

การวิเคราะห์และออกแบบการขนานเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง
ชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุกด้วยเทคนิคสมดุกำลังไฟฟ้า

นายอุเทน คำน่าน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายอุเทน คำน่าน
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์และออกแบบการขนานเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกด้วย เทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้า
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์และออกแบบการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโคจรทางไฟฟ้าบนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้าเพื่อให้ระบบมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งและมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วได้ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เทคนิคการควบคุมแบบสมมูลกำลังไฟฟ้าถูกใช้เพื่อสร้างชุดคำนวณกระแสชดเชวคเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลในแต่ละเฟส ผลลัพธ์ที่ได้คือ ระบบถูกควบคุมให้มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระและแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ วัตถุประสงค์ของระบบควบคุมนี้คือเพื่อที่จะปรับปรุงสมรรถนะทางพลวัต ลดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสอินพุตและแบ่งกระแสชดเชวคเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสให้มีค่าใกล้เคียงกันด้วยวงจรแรงดันป้อนกลับในการทดลองนี้ได้ใช้วงจรทดลองแบบแอนะล็อก กระบวนการคิดวิเคราะห์ที่นำเสนอไม่มีความยุ่งยากแต่ให้ประสิทธิผลที่ดี ระบบต้นแบบถูกสร้างที่พิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต – 48 V และที่พิกัดกำลังไฟฟารวมเอาต์พุต 1.5 kW แต่ละโมดูลเรียงกระแสถูกควบคุมให้ทำงานอยู่ในโหมดกระแสชดเชวคเหนี่ยวนำไหลต่อเนื่องพร้อมกับการควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์ซิส ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า ระบบที่นำเสนอให้ประสิทธิผลและมีผลการตอบสนองทางพลวัตที่รวดเร็ว ตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99 ค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสอินพุตน้อยกว่า 3 % และที่ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ 86 % ระบบสามารถควบคุมการแบ่งกระแสให้มีค่าที่ใกล้เคียงกันในแต่ละโมดูล ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม Simulink และทดสอบเป็นเครื่องยืนยันว่าระบบการควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมให้ระบบกำลังเป็นไปตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 245 หน้า)

คำสำคัญ : โครงสร้างแบบขนาน การแก้ไขตัวประกอบกำลัง เทคนิคการควบคุมสมมูลกำลังไฟฟ้า ชุดชดเชยกระแสชดเชวคเหนี่ยวนำ วงจรเรียงกระแส 3 เฟส

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Uthen Kamnarn
Thesis Title : Analysis and Design of Paralleling Three-Phase AC to DC Converter Using
CUK Rectifier Modules Based on Power Balance Control Technique
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor Dr.Viboon Chunkag
Academic Year : 2006

Abstract

The analysis and design of paralleling ac to dc three-phase configuration using isolated CUK rectifier modules based on power balance control technique with nearly unity power factor and fast transient response for DC Distributed Power System (DPS) applications are presented. The power balance control technique is used to obtain the three-inductor current compensators, as a result, the output voltage of the converter can withstand the variations of the dc load current and the source voltage. To improve the dynamic performance, minimal total harmonic distortion (THD_i) in the source current and inductor currents sharing, a proposed control method is employed in the voltage feedback loop. The proposed procedure of analysis is simple and effective. The implementation of this control circuit uses only analog circuitry. The experimental prototype has been built with a DC output voltage -48 V and output power 1.5 kW. Each converter operates in Continuous Conduction Mode (CCM) together with hysteresis current control. The experimental results indicate that such scheme is effective and offers the fast transient response. The results obtained are : power factor greater than 0.99 and input current Total Harmonic Distortion less than 3%. The system offers 86% efficiency and provide good current sharing among the converter modules. Simulation, using Simulink, and experimental results are presented to verify the feasibility of the control strategy.

(Total 245 pages)

Keywords : parallel configuration, power factor correction, power balance control technique,
Inductor current compensator, three-phase rectifier

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะข้าพเจ้าได้รับการดูแลและเอาใจใส่จากบุคคลต่างๆ ดังนี้คือ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ท่านคอยให้คำชี้แนะและคอยแนะนำแนวทางการทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้สั่งสอนวิชาความรู้และคอยดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีมาตลอดและที่ลืมไม่ได้คือ รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย นัตถรัตน์ ซึ่งท่านได้เสียสละเวลาในการให้คำแนะนำ กำลังใจและคอยช่วยเหลือมาตลอดเช่นกัน

นอกจากกำลังใจที่ได้รับและคำแนะนำจากคณะบุคคลต่างๆ แล้ว ข้าพเจ้ายังได้รับกำลังทุนทรัพย์จากแหล่งเงินทุนต่างๆ เพื่อนำมาใช้จ่ายในการเรียนและทำวิทยานิพนธ์ดังต่อไปนี้คือ ทุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ยิ่งกว่านั้นข้าพเจ้าขอขอบคุณอาจารย์ชัยยง เอื้อวิริยานุกุล ดร. จัตตุฤทธิ์ ทองปรอนและอาจารย์สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์ ที่ได้คอยสนับสนุนช่วยเหลือตลอดมา ทุนส่วนที่ 2 ได้รับจากบัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือซึ่งทุนนี้ได้ช่วยเหลือในด้านการทำวิทยานิพนธ์ ค่าใช้จ่ายในด้านดำเนินการตีพิมพ์วารสารวิชาการและสุดท้ายที่ลืมไม่ได้คือ ทุนที่ได้รับจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติและคณะกรรมการผู้พิจารณาให้ทุนที่ได้เล็งเห็นความสำคัญและคุณค่าของงานวิจัยนี้

กระผมขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย นัตถรัตน์ รองศาสตราจารย์ ร้อยเอก ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์ นุ่นงาม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิญา บุญญาอรุณเนตร ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อมาสอบป้องกันในครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำแนะนำที่ดีเพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ พี่ๆ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกคน และน้องๆ ในห้องวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ กำลังที่ได้ให้ความร่วมมือร่วมใจช่วยเหลือซึ่งกันและกันมาตลอด

สุดท้ายข้าพเจ้าอยากขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ทวิวรรณ คำน่าน ที่ได้เสียสละหลายสิ่งหลายอย่างในชีวิตที่ผ่านมาเพื่อที่จะให้ลูกทั้ง 2 คน ได้มีวิชาความรู้ติดตัวจนได้รับความเจริญก้าวหน้าด้านอาชีพการงานทั้งในปัจจุบันและในอนาคต โดยไม่ยอมเห็นแก่ความยากลำบากและความเหน็ดเหนื่อยในการเลี้ยงดู ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ อัมพล คำน่าน ที่ได้ให้กำลังใจตลอดในการเรียนและการดำรงชีวิต รวมทั้งอยากขอขอบคุณ คุณสาวตรี เรื่องจันทร์ ผู้ซึ่งรู้ใจผม คอยดูแลเอาใจใส่และให้กำลังใจผมมาตลอดในช่วงระยะเวลาที่กำลังศึกษาเช่นกัน ที่สำคัญคือได้อุดหนุนรอผมจนกระทั่งได้เห็นความสำเร็จในการศึกษาระดับปริญญาเอกในครั้งนี้

อุเทน คำน่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	11
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	11
1.4 วิธีการวิจัย	11
1.5 เครื่องมือที่ใช้	12
1.6 ประโยชน์ของผลการวิจัย	12
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	13
2.1 ภาระไม่เป็นเชิงเส้นและผลกระทบที่เกิดกับโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้า	13
2.2 มาตรฐานที่ใช้ควบคุมการแพร่กระจายของกระแสฮาร์มอนิกส์	16
2.3 การแก้ไขตัวประกอบกำลัง	21
2.4 ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย	23
2.5 สถาปัตยกรรมระบบกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจาย	28
2.6 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลัง	41
2.7 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟ	42
2.8 ลักษณะทั่วไปของวงจรเรียงกระแสที่ให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง	43
2.9 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟ	44
2.10 เทคนิคการควบคุมวงจรเรียงกระแสที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลัง ด้วยวิธีแบบแอคทีฟ	57
2.11 สรุป	62
บทที่ 3 การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบรูส ซีพิกและชุก	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 การขนานโมดูลเรียงกระแสแบบบรูซชนิด 1 เฟสด้วยหลักการ พีดับบลิวเอ็ม	64
3.2 การขนานโมดูลเรียงกระแสแบบซีพิกชนิด 1 เฟส ด้วยหลักการ สมดุลย์กำลังไฟฟ้า	76
3.3 การขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบชุกบนพื้นฐานหลักการ สมดุลย์กำลังไฟฟ้า	87
3.4 สรุป	101
บทที่ 4 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟสที่ใช้ โมดูลเรียงกระแสแบบชุกและซีพิกบนหลักการสมดุลย์กำลังไฟฟ้า	103
4.1 บทนำ	103
4.2 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุก	104
4.3 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีพิก	108
4.4 สรุป	141
บทที่ 5 การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุกด้วยหลักการสมดุลย์กำลังไฟฟ้า	143
5.1 โครงสร้างระบบ	144
5.2 การวิเคราะห์และออกแบบระบบ	146
5.3 การจำลองการทำงาน	153
5.4 การทดสอบการทำงาน	157
5.5 สรุป	176
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต	177
6.1 สรุปผลการวิจัย	177
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	181
เอกสารอ้างอิง	183
ภาคผนวก ก การออกแบบโมดูลเรียงกระแสแบบชุกชนิดแยกโคคทางไฟฟ้า 1 เฟส	187
ภาคผนวก ข ผลการจำลองสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ	197

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค บทควมวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	209
ประวัติผู้วิจัย	245

สารบัญญัตินำ

ตารางที่	หน้า
2-1	19
2-2	20
2-3	20
2-4	27
2-5	28
2-6	33
2-7	40
2-8	54
2-9	55
2-10	56
2-11	61
3-1	66
3-2	80
3-3	83
3-4	88
4-1	105
4-2	111
4-3	112

สารบัญญัตินำ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4-4	คุณลักษณะวงจรกำลังของระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีฟิก	117
4-5	คุณลักษณะที่ใช้ในการทดสอบวงจรกำลังของระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีฟิก	119
4-6	คุณลักษณะวงจรกำลังและระบบควบคุมของระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 3 สาย (แบบเดลต้า) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีฟิก	122
4-7	คุณลักษณะปกติของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ต่อแบบ 3 เฟส 3 สาย (เดลต้า) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีฟิก	126
4-8	การเปรียบเทียบของตัวชี้วัดสมรรถนะในสถานะชั่วคราว	137
4-9	สรุปผลการเปรียบเทียบระบบเครื่องแปลงผันชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส	142
5-1	ค่าตัวแปรขององค์ประกอบสัญญาณขนาดเล็กสำหรับระบบที่นำเสนอ	149
5-2	รายละเอียดด้านเทคนิคของโมดูลเรียงกระแส	158
ก-1	ค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ถูกต้องใช้ในการออกแบบหม้อแปลงแยก โดด	188
ก-2	ค่ามิติของแกนที่ถูกต้องใช้ในการออกแบบหม้อแปลงแยก โดด	188
ก-3	ค่าพิกัดทางไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสชุก	189
ก-4	พารามิเตอร์หม้อแปลงความถี่สูง	191
ก-5	ปริมาณที่ถูกต้องกำหนดเพื่อออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ	194
ก-6	ปริมาณมิติของแกนที่ถูกต้องแสดงในหน่วยเซ็นติเมตร	194

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1-1	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่รวมฟังก์ชันการแก้ไขตัวประกอบกำลัง	1
1-2	โครงสร้างระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายและส่วนขยายเครื่องแปลงผันส่วนหน้า	2
1-3	วงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงที่ใช้โมดูลชนิด 1 เฟส จำนวน 3 โมดูล	5
1-4	รูปแบบวงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้าอย่างง่ายที่ใช้โมดูลเรียงกระแส 1 เฟส จำนวน 3 โมดูล ที่ถูกต้องร่วมกันที่ด้านเอาต์พุต	6
1-5	วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส ที่ใช้วงจรเรียงกระแสซิงค์ 1 เฟส จำนวน 3 โมดูล	8
2-1	วงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ชนิด 1 เฟส (ก) วงจรกำลัง (ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสไลน์ (ค) กระแสฮาร์มอนิกส์ไลน์อันดับเลขที่เมื่อเทียบกับปริมาณที่ความถี่มูลฐาน	14
2-2	ขอบเขตของกระแสแหล่งจ่ายในกลุ่ม D ของมาตรฐาน IEC 1000-3-2	19
2-3	โครงสร้างพื้นฐานระบบกำลังไฟฟ้าที่ถูกระบาย (ก) โครงสร้างการขนาน (ข) โครงสร้างการต่อแบบอันดับ (ค) โครงสร้างการต่อแบบแยกแหล่งจ่าย (ง) โครงสร้างการต่อแบบแยกภาระ	23
2-4	โครงสร้างระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายชนิดที่ถูกต้องแบบเรียงทับซ้อน (ก) โครงสร้างเรียงทับซ้อนชนิดเพิ่มค่า (ข) โครงสร้างเรียงทับซ้อนชนิดลดค่า	27
2-5	โครงสร้างสถาปัตยกรรมของระบบกำลังไฟฟ้าที่ถูกระบาย (ก) ระบบบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ข) ระบบบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	29
2-6	ระบบกำลังไฟฟ้าที่ถูกระบายชนิดสถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	31
2-7	บล็อกไดอะแกรมของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายชนิดชนิดการแปลง 2 สถานะ	36
2-8	บล็อกไดอะแกรมระบบย่อยที่ต่อแบบอันดับ	36
2-9	โครงสร้างพื้นฐานของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบการสื่อสาร	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-10 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟ	42
2-11 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้นตอน	45
2-12 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟ	46
2-13 วงจรต้นแบบชนิดบัค	47
2-14 วงจรต้นแบบชนิดไฟล์แบค	48
2-15 โครงสร้างทั่วไปของเครื่องแปลงผันตระกูล S^2IP^2	48
2-16 วงจรต้นแบบบูสต์-ฟอร์เวิร์ดในตระกูล S^2IP^2	49
2-17 วงจรต้นแบบชนิดบูสต์	50
2-18 เครื่องแปลงผันเต็มบริดจ์บูสต์ที่ถูกแยกโคจรทางไฟฟ้า	51
2-19 วงจรต้นแบบชนิดซีฟิกและชุก	52
2-20 วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังรีโซแนนซ์เต็มบริดจ์	53
2-21 วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบสวิตช์ที่แรงดันและหรือกระแสศูนย์	54
2-22 แบบแผนการควบคุมกระแสเฉลี่ย	58
2-23 แบบแผนการควบคุมขอบเขต	59
2-24 แบบแผนการควบคุมแบบตามแรงดัน	61
3-1 โครงสร้างการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบูสต์ จำนวน 3 โมดูล ที่ถูกควบคุมโดยชุด ประมวลผลสัญญาณดิจิทัล DSP TMS320LF2407	64
3-2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบที่แนะนำให้เสนอด้วยชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	68
3-3 ผลการทดสอบสถานะคงตัวของการขนานวงจรเรียงกระแสแบบบูสต์ที่พิกัด กำลังไฟฟ้า 1.5 kW : (ก) แรงดันไลน์อินพุตและกระแสไลน์, (ข) กระแสขดลวด เหนี่ยวนำในสภาวะปกติของแต่ละโมดูล	69
3-4 ผลของการทดสอบในสภาวะคงตัวของการทำงานขนานวงจรเรียงกระแสแบบบูสต์ พิกัดกำลังไฟฟ้า 1.5 kW: (ก) แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระ, (ค) แรงดันกระแสฟ่อมของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-5 ผลการทดสอบในสภาวะเมื่อ โมดูลเสียหาย : (ก) กระแสชดลวดเหนี่ยวนำในสภาวะปกติของแต่ละ โมดูล, (ข) (ค) (ง) กระแสชดลวดเหนี่ยวนำเมื่อ โมดูลที่ 1 2 และ 3 เกิดความเสียหายตามลำดับ	71
3-6 การเปรียบเทียบปริมาณของกระแสไลน์อินพุตที่ถูกต้องจริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณและค่ากระแสภาระที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณบนพื้นฐานการเปลี่ยนแปลงที่ภาระ	72
3-7 ผลการทดสอบสมรรถนะที่สำคัญของระบบที่นำเสนอ เมื่อกำหนดให้ระบบทำงานที่พิกัดแรงดัน ไลน์อินพุต $V_s = 220$ V และ แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง 400 V	73
3-8 ผลทดสอบของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 บนเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าของภาระใน 3 ระดับ	73
3-9 ผลการทดสอบของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อ โมดูลได้รับความเสียหายโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 (อย่างน้อยต้องคงเหลือไว้ 2 โมดูลในแต่ละกรณี)	74
3-10 ผลการทดสอบค่าตัวประกอบกำลังของระบบเมื่อเทียบกับเงื่อนไขของแรงดันไลน์อินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงไป 3 ระดับและภาระเปลี่ยนแปลงจาก 300 W ถึง 1.5 kW	74
3-11 การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซีพิกชนิดแยกโคคทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล	77
3-12 ผลการจำลองสภาวะคงตัวที่พิกัด 1,500 W (ก) กระแสและแรงดันอินพุต (ข) กระแสชดลวดเหนี่ยวนำ 3 โมดูล	81
3-13 ผลการจำลองในสภาวะชั่วคราว (ก) แรงดันและกระแสอินพุตภาระเปลี่ยนจาก 1,500 W ไป 750 W (ข) กระแสชดลวดเหนี่ยวนำ 3 โมดูล ภาระเปลี่ยนจาก 750 W ไปที่ 1,500 W	81
3-14 ผลการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสภาระที่ภาระเปลี่ยนจาก 1.5 kW ไปที่ 0.75 kW และกลับไปที่ 1.5 kW (ข) ภาพขยายที่เวลา $t = 0.4$ (ค) ภาพขยายที่เวลา $t = 0.8$	82
3-15 ผลการทดลองในสภาวะคงตัวที่พิกัดภาระ 600 W (ก) รูปคลื่นของแรงดันและกระแสอินพุต (ข) รูปคลื่นของกระแสชดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 โมดูล	84
3-16 ผลการทดสอบสภาวะคงตัวของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่พิกัด 600 W	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-17 ผลการทดลองเมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจาก 600 W ไปที่ 300 W (ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุต (ข) รูปคลื่นกระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 โมดูล	84
3-18 ผลการทดลอง (ก) แรงดันและกระแสภาระเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระจาก 600 W ไปที่ 300 W (ข) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระจาก 200 W ไปที่ 600 W	85
3-19 โครงสร้างแบบขนานของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก ที่ถูกควบคุมอยู่บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า	87
3-20 ผลการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ	92
3-21 ผลการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ	93
3-22 ผลการจำลอง (ก) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ	93
3-23 ผลการทดลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ	94
3-24 ผลการทดลอง (ก) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ข) แรงดันกระแสเฟืองเอาต์พุต	95
3-25 ผลการทดลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ	95
3-26 ผลการทดลองภายใต้สภาวะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ	96
3-27 ผลการทดลองแรงดันและกระแสภาระที่เปลี่ยนแปลงจาก (ก) จาก 100% ไป 50 % (ข) จาก 50% ไป 100 %	96
3-28 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบ กระแสที่วัดได้ในแต่ละโมดูลเปรียบเทียบกับภาระที่เปลี่ยนแปลงไป (Digital Power Meter Model 2531 A)	97
3-29 คุณสมบัติสมรรถนะหลักของระบบการขนานวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก (แรงดันอินพุต 220 V)	98
3-30 ฮาร์มอนิกส์กระแสอินพุตของระบบที่นำเสนอเมื่อถูกวัดที่พิกัดแรงดันอินพุต 220 V	99
3-31 ตัวประกอบกำลังเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ภาระและแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงไป	99
4-1 ภาพวงจรกำลังของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก จำนวน 3 โมดูล	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-2 ผลตอบสนองทางพลวัตของปริมาณ แรงดันเอาต์พุต กระแสภาระ กระแสอินพุต ไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลภายใต้เงื่อนไขสถานะเมื่อระบบสมดุลและโมดูลเกิดสถานะการทำงานที่ผิดปกติ	106
4-3 ส่วนขยายของผลตอบสนองทางพลวัตของปริมาณ แรงดันเอาต์พุต กระแสภาระ กระแสอินพุต ไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูล ภายใต้เงื่อนไขสถานะการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 100% (1,500 W) ไปที่ 10% (150 W) และกลับมาที่ 1,500 W (10%)	107
4-4 ผลการจำลองของปริมาณแรงดันเอาต์พุต กระแสภาระ แรงดันและกระแส อินพุตของระบบโครงสร้างการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบซุก ชนิด 1 เฟส	108
4-5 ผลการจำลองของแรงดันและกระแสอินพุต แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ ของระบบที่ถูกนำเสนอกภายใต้สถานะการเปลี่ยนแปลงภาระ	109
4-6 ผลการจำลอง การเปรียบเทียบของพฤติกรรมแรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการปรับ เปลี่ยนขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตภายใต้การจ่ายภาระจาก 1.5 kW ไปที่ 150 kW และกลับมาที่ 1.5 kW อีกครั้ง	110
4-7 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสอินพุต (ก) สถานะคงตัวเมื่อจ่ายภาระ 750 W (100%) (ข) สถานะเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750 W ไปที่ 75 W และกลับมาที่ 750 W (ค) ภาพขยายที่พิกัดภาระ 750 W ไปที่ 75 W (ง) ภาพขยายที่พิกัดภาระ 75 W ไปที่ 750 W	113
4-8 ผลการทดสอบของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ก) สถานะคงตัวเมื่อจ่ายภาระ 750 W (100%) (ค) ภาพขยายที่พิกัดภาระ 750 W ไปที่ 75 W (ง) ภาพขยายที่พิกัดภาระ 75 W ไปที่ 750 W	114
4-9 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ก) สถานะคงตัวเมื่อจ่ายภาระ 750 W (100%) (ข) สถานะเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750 W ไปที่ 75 W และ กลับมาที่ 750 W (ค) ภาพขยายที่พิกัดภาระ 750 W ไปที่ 75 W (ง) ภาพขยายที่พิกัด ภาระ 75 W ไปที่ 750 W	115

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-10 วงจรกำลังของระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีพิก	116
4-11 ผลการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำที่ภาระเปลี่ยนจาก 100% ไป 50% (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่ภาระเปลี่ยนจาก 100% ไปที่ 50% กลับมาที่ 100% (จ) ภาพขยายแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่ภาระเปลี่ยนจาก 100% ไป 50% (ฉ) ภาพขยายแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่ภาระเปลี่ยนจาก 100% ไป 50%	118
4-12 ผลการทดสอบ (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ค) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระเมื่อภาระถูกเปลี่ยนจาก 100% ไป 50% และ 100% (จ) ภาพขยายที่ภาระถูกเปลี่ยนจาก 100% ไป 50% (ฉ) ภาพขยายที่ภาระถูกเปลี่ยน 50% ไป 100%	120
4-13 วงจรกำลังของระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 3 สาย (แบบเดลต้า) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีพิก	122
4-14 ผลของการจำลองสถานะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ (ทั้งสองกรณีนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของ $k_p=1$, $\omega_z=150$ และ ค่า $\eta_T=1$) (ก) และ (ค) ระบบไม่ใช้เทคนิคการควบคุมแบบสมดุลงำลังไฟฟ้า (ข) และ (ง) ระบบทำงานบนเทคนิคสมดุลงำลังไฟฟ้า	124
4-15 ผลการจำลองสถานะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต (ทั้งสองกรณีนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของ $k_p=1$, $\omega_z=150$ และ ค่า $\eta_T=1$) (ก) และ (ค) ระบบปราศจากเทคนิคการควบคุมแบบสมดุลงำลังไฟฟ้า (ข) และ (ง) ระบบทำงานบนเทคนิคสมดุลงำลังไฟฟ้า	125
4-16 รูปคลื่นของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระเมื่อภาระถูกเปลี่ยนจาก 10% ไปที่พิกัดกำลังของภาระ (ก) และ (ค) ระบบปราศจากเทคนิคการควบคุมแบบสมดุลงำลังไฟฟ้า (ข) และ (ง) ระบบใช้เทคนิคสมดุลงำลังไฟฟ้า	127
4-17 รูปคลื่นของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระเมื่อภาระถูกเปลี่ยนจาก 10% ไปที่พิกัดกำลังของภาระ (ก) (ค) และ (จ) ระบบปราศจากเทคนิคการควบคุมแบบสมดุลงำลังไฟฟ้า (ข) (ง) และ (ฉ) ระบบใช้เทคนิคสมดุลงำลังไฟฟ้า	129

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-18 การทดสอบในสภาวะคงตัว (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสอินพุตของทั้ง 3 เฟส (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ	130
4-19 การทดสอบในสภาวะชั่วครู่ (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสอินพุตของทั้ง 3 เฟส (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ	131
4-20 ผลการทดสอบสภาวะคงตัวของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง(ก) กระแสอินพุตที่ค่าของ $C_{2min} = 150 \mu F$ (ข) กระแสอินพุตที่ค่าของ $C_{2max} = 13,600 \mu F$	132
4-21 สมรรถนะของระบบที่เป็นฟังก์ชันตามขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ตัวประกอบกำลัง ค่าความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมกระแสอินพุต ที่แรงดันอินพุต 220 V แรงดันเอาต์พุต 48 V และ พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 600 W)	133
4-22 สมรรถนะที่เป็นฟังก์ชันตามขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงภายใต้สภาวะเงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 600 W ไปที่ 60 W และกลับไปที่ 600 W (แรงดันอินพุต 220 V แรงดันเอาต์พุต 48 V)	134
4-23 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระขณะที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 10% (60 W) ไปที่ 100% (600 W) ($V_o: 10 V/div, I_{load}: 5 A/div, Time: 400 \mu s/div$) เมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันเอาต์พุตที่ (ก) 150 μF (ข) 270 μF (ค) 330 μF (ง) 470 μF (จ) 820 μF (ฉ) 1,000 μF	135
4-24 ผลการทดสอบของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส ด้วยค่าตัวเก็บประจุเอาต์พุต 470 μF (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสอินพุต (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (จ) ภาระถูกเปลี่ยนจาก 600 W ไปที่ 60 W (ฉ) ภาระถูกเปลี่ยนจาก 60 W ไปที่ 600 W	136
4-25 กระแสอินพุตที่ถูกวัดเมื่อภาระถูกเปลี่ยนแปลงจาก 100 W ไปที่ 600 W ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 3 สาย (ระบบถูกวัดด้วย Digital Power Meter Model 2531 A)	138

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-26 ฮาร์มอนิกส์กระแสอินพุตที่ถูกวัดจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจากต่ำสุดไป ที่ค่าสูงสุดของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ชนิด 3 เฟส 3 สาย	139
4-27 ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพและค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส อินพุตที่ถูกวัดภายใต้การทดสอบการเปลี่ยนแปลงภาระจากต่ำสุดไปที่ค่าสูงสุด ของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ชนิด 3 เฟส 3 สาย	139
5-1 โครงสร้างภาควงจรกำลังและบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมของ การขนานระบบเรียงกระแส 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า	144
5-2 ไดอะแกรมวงจรสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่นำเสนอ	149
5-3 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมของลู่วัดควบคุมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต	152
5-4 Bode Diagram ของระบบที่นำเสนอ	152
5-5 ผลการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ (ข) กระแสขดลวด เหนี่ยวนำเฟส a (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำเฟส b (ง) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำเฟส C	153
5-6 ผลการจำลอง (ก) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 ของเฟส ab และ C (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 2 ของเฟส ab และ C	154
5-7 ผลการจำลองภายใต้สภาวะชั่วครู่ (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวด เหนี่ยวนำในโมดูลเฟส a (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในโมดูลเฟส b (ง) กระแส ขดลวดเหนี่ยวนำในโมดูลเฟส C (จ)-(ฉ) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในโมดูลแผงชุดที่ 1 ของเฟส ab และ C ที่ตำแหน่งเวลาการจ่ายภาระ $t=0.1$ และ $t=0.2$ ตามลำดับ	155
5-8 ผลการจำลอง (ก) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ข)-(ค) ภาพขยายแรงดัน เอาต์พุตและกระแสภาระที่เวลา $t=0.1$ และ $t=0.2$ ตามลำดับ	156
5-9 ภาพถ่ายการทดสอบระบบต้นแบบของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุก บนหลักการพื้นฐาน สมดุลกำลังไฟฟ้า	157

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-10 ผลการทดสอบที่พิกัดภาระ 1.5 kW (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) แรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 และ 2 ของเฟส <i>a</i> (ค) แรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 และ 2 ของเฟส <i>b</i> (ง) แรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 และ 2 ของเฟส <i>c</i> (จ) แรงดันอินพุต เฟส <i>a</i> และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 ของเฟส <i>a b</i> และ <i>c</i> (ฉ) แรงดันอินพุต เฟส <i>a</i> และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 2 ของเฟส <i>a b</i> และ <i>c</i>	159
5-11 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่พิกัดภาระ 1.5 kW (ก) ที่ฐานเวลา 100 ms/div (ข) ที่ฐานเวลา 1 ms/div	160
5-12 ผลการทดสอบ (ก) แรงดันและกระแสเฟสที่ค่าแรงดันอินพุตต่ำสุด (ข) แรงดันและกระแสเฟสที่ค่าแรงดันอินพุตสูงสุด (ค) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่ค่าแรงดันอินพุตต่ำสุด (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ ที่ค่าแรงดันอินพุตสูงสุด	161
5-13 ผลการทดสอบ (ก) แรงดันและกระแสอินพุตที่พิกัดภาระ 1.5 kW (ข) แรงดันและกระแสอินพุตพร้อมกับกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในเฟส <i>a</i> ที่พิกัดภาระ 1.5 kW (ค) แรงดันและกระแสอินพุตขณะจ่ายภาระจาก 0.15 kW ไปที่ 1.5 kW (ง) แรงดันอินพุตเฟส <i>a</i> และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในโมดูลที่ 1 ของทั้ง 3 เฟส ขณะจ่ายภาระจาก 0.15 kW ไปที่ 1.5 kW	162
5-14 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ก) ที่พิกัดภาระ 1.5 kW (ข) เมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1.5 kW ไปที่ 0.15 kW และกลับไปที่ 1.5 kW (ค) ส่วนขยายเมื่อจ่ายภาระ 1.5 kW ไปที่ 0.15 kW (ง) ส่วนขยายเมื่อจ่ายภาระจาก 0.15 kW ไปที่ 1.5 kW	163
5-15 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสอินพุต (ก) สภาวะภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW และกลับไปที่ 0.36 kW (ข) สภาวะจ่ายภาระที่ตำแหน่งสูงสุดของกระแสเฟส <i>a</i> (ค) ส่วนขยายที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW (ง) ส่วนขยายที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW	164

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-16 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำของโมดูล ที่ 1 และ 2 ของเฟส a (ก) ผลตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1.5 kW ไป ที่ 0.36 kW และกลับไปที่ 1.5 kW (ข) ส่วนขยายที่ 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW (ค) ส่วนขยายที่ 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW	165
5-17 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำของโมดูล ที่ 1 และ 2 ของเฟส b (ก) ผลตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW และกลับไปที่ 0.36 kW (ข) ส่วนขยายที่ 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW (ค) ส่วนขยายที่ 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW	166
5-18 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำของโมดูล ที่ 1 และ 2 ของเฟส c (ก) ผลตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW และกลับไปที่ 0.36 kW (ข) ส่วนขยายที่ 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW (ค) ส่วนขยายที่ 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW	167
5-19 ผลการทดสอบกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแผงโมดูลชุดที่ 1 และ 2 ของเฟส a b และ c (ก) ผลตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW และกลับไปที่ 0.36 kW ของแผงโมดูลชุดที่ 1 (ข) ผลตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลง จาก 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW และกลับไปที่ 1.5 kW ของแผงโมดูลชุดที่ 2 (ค)-(ง) ส่วนภาพขยายของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแผงโมดูลในชุดที่ 1 (จ)-(ฉ) ส่วนภาพขยายของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแผงโมดูลในชุดที่ 2	168
5-20 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ก) ที่พิกัดภาระ 1.5 kW (ข) เมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW และกลับไปที่ 1.5 kW (ค) ส่วนขยายเมื่อจ่ายภาระ 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW (ง) ส่วนขยายเมื่อจ่ายภาระจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW	169
5-21 ผลการทดสอบ ค่าตัวประกอบกำลัง ค่าประสิทธิภาพและค่า THD_V ของกระแส อินพุตเปรียบเทียบกับภาระเปลี่ยนแปลงระดับของแรงดันอินพุต ไฟฟ้ากระแสสลับ จาก $V_{s_{min}} = 187$ V ไปที่ $V_{s_{max}} = 253$ V	170

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-22 ผลการทดสอบ กระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 3 เฟส และแรงดันบัลไฟฟ้า กระแสตรงเอาต์พุตเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ $V_{s_{min}} = 187 \text{ V}$ และ $V_{s_{max}} = 253 \text{ V}$	171
5-23 ผลการทดสอบปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ในสถานะเมื่อระบบที่นำเสนอดูก ปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับให้มีการเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ	172
5-24 ผลการทดสอบ การจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละ โมดูลโดยเปรียบเทียบกับปริมาณ ของกำลังไฟฟารวมด้านเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไป	173
5-25 ผลการทดสอบ ค่าตัวประกอบกำลัง ค่าประสิทธิภาพและค่า THD ของกระแส อินพุตโดยเปรียบเทียบกับปริมาณของกำลังไฟฟารวมของภาระที่เปลี่ยนแปลงไป	174
5-26 ผลการทดสอบ กระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส และกระแสภาระเมื่อ เปรียบเทียบกับปริมาณกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตรวมของภาระที่เปลี่ยนแปลงไป	175
5-27 ผลการทดสอบ ฮาร์มอนิกส์กระแสอินพุตสำหรับระบบที่นำเสนอ	175
ก-1 วงจร โมดูลเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโคคทางไฟฟ้า	189
ก-2 วงจรเทียบเคียง โมดูลเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโคคทางไฟฟ้า	189
ข-1 บล็อกไดอะแกรมของ โมเดลการขนานเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้โปรแกรม Simulink	198
ข-2 ผลการจำลองสมรรถนะของระบบ กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละ โมดูลเปรียบเทียบกับภาระที่เปลี่ยนแปลงไป	199
ข-3 คุณสมบัติสมรรถนะหลักของระบบการขนานวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก (แรงดันอินพุต 220 V)	199
ข-4 ฮาร์มอนิกส์กระแสอินพุตของระบบที่นำเสนอเมื่อถูกวัดที่พิกัด แรงดันอินพุต 220 V	200
ข-5 ผลการจำลองตัวประกอบกำลังเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ภาระและแรงดันที่ อินพุตเปลี่ยนแปลง	200
ข-6 โมเดลบล็อกไดอะแกรมการขนานเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส โดยใช้โปรแกรม Simulink	202
ข-7 ผลการจำลอง ค่าตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพและค่า THD ของกระแสอินพุต	203

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-8 ผลการจำลอง ค่ากระแสอินพุต 3 เฟส และแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรง	204
ข-9 ผลการจำลองปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ	205
ข-10 ผลการจำลอง การจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละโมดูลโดยเทียบกับ กำลังไฟฟ้ารวมเอาต์พุต	205
ข-11 ผลการจำลอง ค่าตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพและค่า THD ของกระแสอินพุต โดยเปรียบเทียบกับปริมาณของกำลังไฟฟ้ารวมของภาระที่เปลี่ยนแปลงไป	206
ข-12 ผลการจำลองกระแสขดลวดเหนี่ยวนำและกระแสภาระเมื่อเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า	207
ข-13 ผลการจำลองกระแสฮาร์มอนิกส์ที่อันดับ 3 ถึง 15 เมื่อเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า 3 ระดับ	207
ข-14 ผลการคำนวณ ประสิทธิภาพเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ภาระและความถี่การสวิตช์ เปลี่ยนแปลง	208

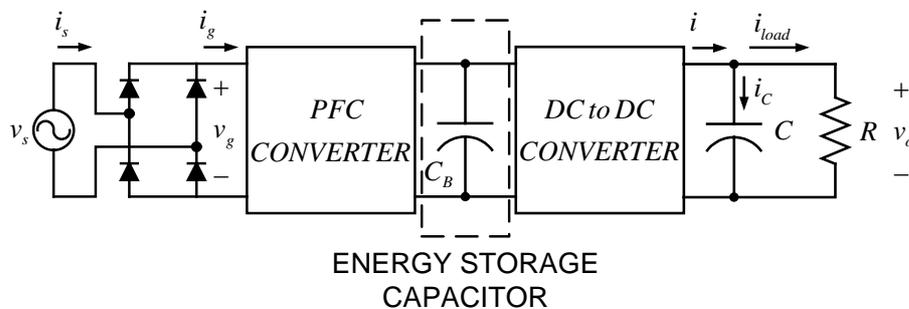
บทที่ 1

บทนำ

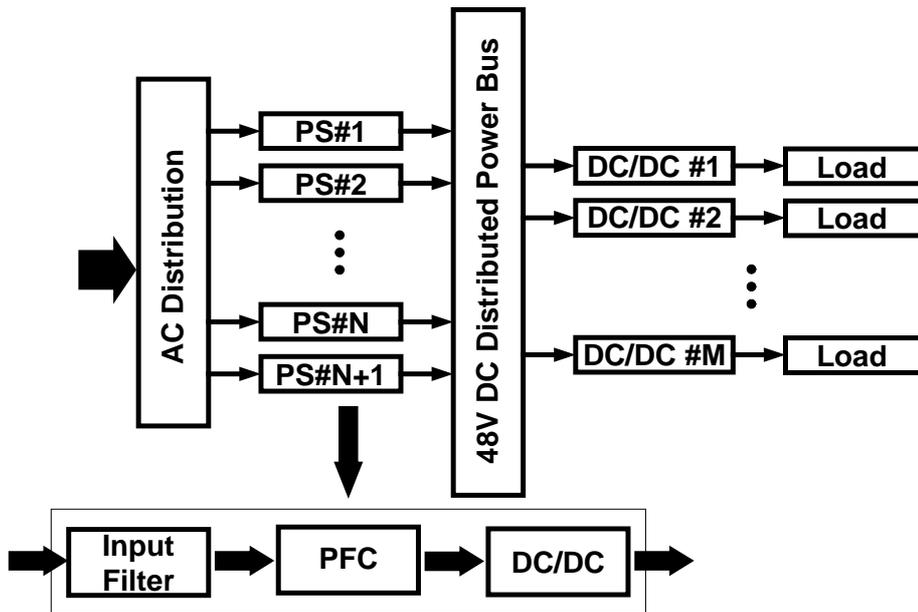
1.1 ความสำคัญของปัญหา

เครื่องแปลงผันกำลังแบบที่มีวงจรส่วนหน้าเพื่อปรับปรุงรูปคลื่นกระแสอินพุตแสดงอยู่ในภาพที่ 1-1 ระบบประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ภาคการแก้ไขตัวประกอบกำลังและส่วนของ การควบคุมแรงดันเอาต์พุตและในขณะเดียวกันวงจรต้องทำหน้าที่แยกโคจรทางไฟฟ้าระหว่างภาค อินพุตและภาคเอาต์พุต ตัวอย่างเช่น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบการสื่อสาร โดยทั่วไปในภาค หลังใช้เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดฟูลบริดจ์เพื่อทำ หน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้า 380-400 V จากวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังไปเป็นแรงดันเอาต์พุตที่ 48 หรือ - 48 V เมื่อภาระของระบบเพิ่มมากขึ้น เครื่องแปลงผันดังกล่าวจำเป็นต้องถูกออกแบบใหม่ให้ มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นตามความต้องการของภาระทั้งในปัจจุบันและอนาคต การเพิ่มขึ้นของพิกัด กำลังไฟฟ้าของเครื่องแปลงผันในลักษณะแบบนี้มีข้อเสียต่างๆ ติดตามมามาก [1]

ดังนั้น เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบรวมศูนย์จึงถูก พัฒนาขึ้นให้มีรูปแบบและลักษณะเป็นระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย รูปแบบของ การกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้างดงกล่าวให้ข้อดีหลายประการเมื่อเทียบบนสัดส่วนที่พิกัดกำลัง ไฟฟ้าสูง คือ ระบบมีความน่าเชื่อถือ ระบบทั้งหมดประกอบขึ้นจากโมดูล ระบบมีการเชื่อมต่อและมื ความสามารถในการบำรุงรักษา จึงส่งผลให้ ระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้รับความ นิยมอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารและระบบคอมพิวเตอร์ [1] และมีความง่ายในการผลิต เชิงพาณิชย์ที่ผลิตในจำนวนมาก



ภาพที่ 1-1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่รวมฟังก์ชันการแก้ไขตัวประกอบกำลัง



ภาพที่ 1-2 โครงสร้างระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย

สำหรับระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบรวมศูนย์ต้องมีคุณสมบัติด้านความน่าเชื่อถือที่สูงมาก เพราะเนื่องจากการทำงานที่ผิดพลาดเพียงแค่ครั้งเดียวอาจเป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้ แต่ในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย ความล้มเหลวของโมดูลกำลังใดๆ ทำให้เกิดผลกระทบน้อยในภาพรวมของระบบทั้งหมด เพราะเนื่องจากว่าระบบถูกออกแบบไว้ตามหลักการเผื่อกำลังไฟฟ้า (Redundancy) คือ $N+1$ ขณะที่ N คือ จำนวนต่ำสุดของโมดูลที่จำเป็นต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระ ข้อดีอีกประการระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย คือ สามารถเปลี่ยนโมดูลที่ได้รับความเสียหายได้อย่างทันทีทันใดและมีความยืดหยุ่นต่อการขยายเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าให้กับระบบภายในอนาคตตามความต้องการของภาระ [2]

ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายให้ข้อดีอยู่ 2 ประการคือ ทำให้ต้นทุนสูงขึ้นและผลของการรบกวนที่เกิดจากเครื่องแปลงผันที่ถูกลวางติดต่อกันเป็นโครงสร้างแบบต่างๆ [3] ประเด็นเรื่องความร้อนอาจถูกนำมาพิจารณาาร่วมด้วยเพราะเนื่องจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นต้องถูกออกแบบให้มีขนาดที่เล็กหรือถูกติดตั้งและวางในพื้นที่จำกัด ถึงแม้ว่าจะเป็นเช่นนั้นก็ตาม โครงสร้างการต่อแบบขนานสามารถช่วยลดเรื่องของการกระจายออกในแต่ละโมดูลได้ เพราะเนื่องจาก แต่ละโมดูลถูกออกแบบให้รองรับกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดในระบบ ซึ่งช่วยให้การออกแบบและจัดการเรื่องความร้อนทำได้ง่ายขึ้น [1]

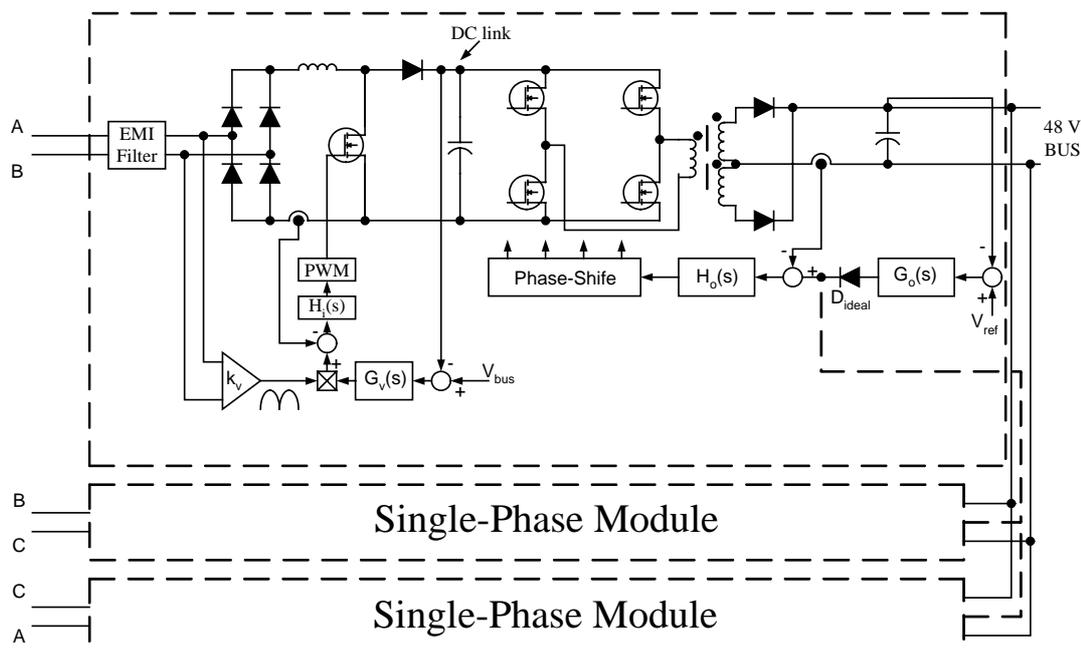
บล็อกไดอะแกรมโดยทั่วไปของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายถูกนำเสนออยู่ในภาพที่ 1-2 ดังที่ได้เห็นในภาพ ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายประกอบขึ้นจากภาคส่วนต่างๆ ของการแปลงผันกำลังไฟฟ้า นิยามของคำว่าระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายมาจากความจริงที่ว่า หน่วยประมวลผลกำลังไฟฟ้าในระบบอาจไม่ได้ถูกวางไว้ในตำแหน่งเดียวกันตลอดเวลา แต่หน่วยประมวลผลกำลังไฟฟ้างดกล่าวถูกกระจายไปในแต่ละที่โดยขึ้นอยู่กับชนิดและตำแหน่งของภาระที่ถูกติดตั้งอยู่ในระบบ [1, 2] สำหรับโครงสร้างที่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 1-2 เครื่องแปลงผันส่วนหน้าถูกจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โดยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งบัสแรงดันดังกล่าวสามารถเป็นได้ทั้งระบบ 1 หรือ 3 เฟส กำลังไฟฟ้าถูกแปลงผันโดยเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่อยู่ในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supplies : PSs) หมายเลข #1 จนถึงหมายเลข #N+1 แต่ละแหล่งจ่ายกำลังประกอบไปด้วยขั้นตอนของแก้ไขตัวประกอบกำลังและเครื่องแปลงผันส่วนหน้าแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงถูกใช้เพื่อที่จะควบคุมแรงดันที่บัสกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจายออกไปที่พิกัดแรงดัน 48 V โมดูลเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีพิกัดกำลังความหนาแน่นสูงถูกกระจายอยู่ในส่วนหลังของบัสแรงดันไฟฟ้า 48 V โดยขึ้นอยู่กับความต้องการของภาระและการวางตำแหน่งเพื่อที่จะให้มีการควบคุมแรงดัน ณ จุดที่มีภาระต่ออยู่ ระบบถูกออกแบบเพื่อที่จะให้ได้การควบคุมจุดต่อเชื่อมของภาระที่ดีที่สุด นอกจากระบบจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระแล้ว เครื่องแปลงผันส่วนหน้าสำหรับการใช้งานในระบบการสื่อสาร ตัวอย่างเช่นระบบต้องถูกใช้เพื่อที่จะประจุเซลล์ไฟฟ้าสำรองที่ถูกต่อพร้อมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกกระจายออกไป (ระบบไม่ได้ถูกแสดงในภาพที่ 1-2) ดังที่ได้กล่าวไว้ในวัตถุประสงค์ของการวิจัย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การหาแนวทางการควบคุมเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายเพื่อให้ระบบมีสมรรถนะของการควบคุมที่ดีเป็นหลัก ดังนั้นในส่วนที่เป็นเครื่องแปลงผันภาระและส่วนที่ต้องทำหน้าที่ในการประจุเซลล์ไฟฟ้าสำรองจึงไม่ได้ถูกกล่าวถึง

เครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสารและระบบเครื่องคอมพิวเตอร์หลักในระบบโครงข่าย ระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่มีอยู่ในตลาดอุตสาหกรรมการสื่อสารสามารถแบ่งแยกได้ด้วยระดับของพิกัดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ระดับหลัก 100 W จนถึง ระดับ 2-3 kW สำหรับการใช้งานในระบบเครื่องคอมพิวเตอร์หลักในระบบโครงข่าย ระดับกำลังไฟฟ้าจะอยู่ที่ประมาณ 1 kW อย่างไรก็ตามตลาดการค้าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบคอมพิวเตอร์หลักในระบบโครงข่ายนั้นเติบโตอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ระดับกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับการใช้งานในระบบนี้ [3]

ขั้นตอนของการแก้ไขตัวประกอบกำลังของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าได้กลับกลายมาเป็นเรื่องที่สำคัญ โดยเฉพาะนานาชาติและภูมิภาคยุโรป มาตรฐานโดยทั่วไปเป็นการจำกัดการแพร่กระจายของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เป็นเกิดมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [4, 5, 6] อย่างไรก็ตาม จึงเป็นเรื่องที่ยากสำหรับที่จะต้องเพิ่มฟังก์ชันของการแก้ไขตัวประกอบกำลังเข้าไปในระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายในขณะที่ต้องไม่ทำให้ราคาต้นทุนของระบบสูงขึ้น โดยเฉพาะสำหรับงานที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง (6 kW และมากกว่า) ผลที่สุดก็คือ งานวิจัยในวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังสำหรับงานที่ต้องการพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงยังคงเปิดกว้างเพื่อที่จะหาทางออกของการแก้ไขปัญหาที่ดีและสามารถลดต้นทุนได้อย่างมีนัยสำคัญ ชัดเจนว่า สมรรถนะของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายต้องถูกทำให้ดีขึ้น โดยไม่คำนึงถึงการลดลงของต้นทุนใดๆ ในวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังของวงจรส่วนหน้า การหาวิธีการควบคุมและออกแบบระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายให้มีสมรรถนะโดยรวมที่ดีจึงเป็นสิ่งที่ทำนายอย่างยิ่ง จึงส่งผลให้ประเด็นสำคัญนี้มีความจำเป็นต้องถูกกล่าวถึงอย่างละเอียดต่อไป

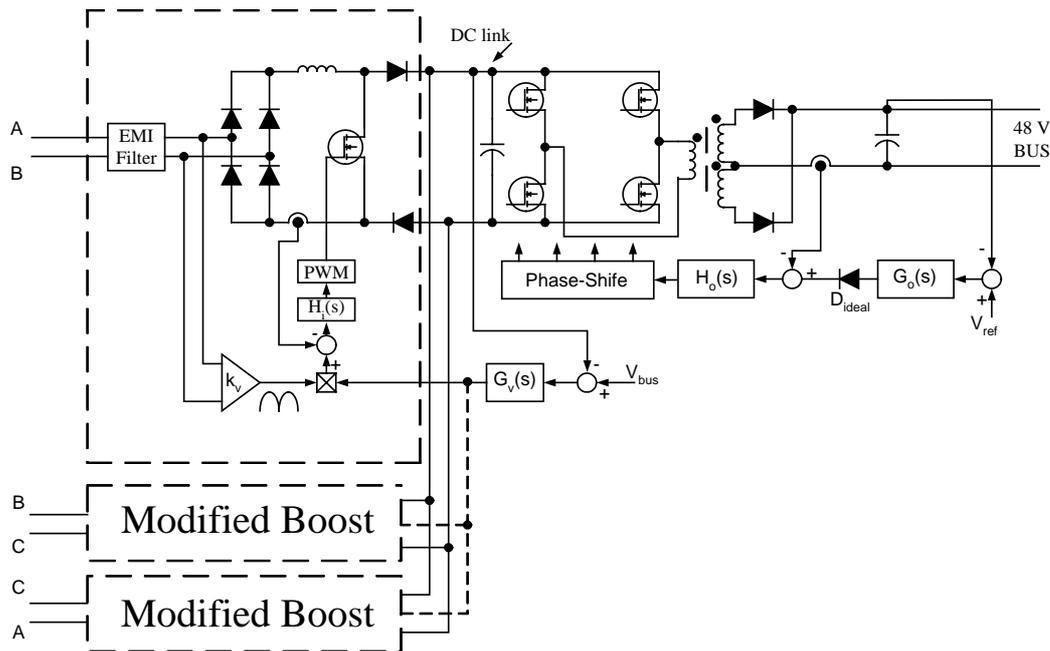
1.1.1 นวัตกรรมเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายพิกัดกำลังสูง สำหรับยุคต่อไปของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ไม่เพียงแต่เรื่องของต้นทุนที่ต้องนำมาวิเคราะห์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังได้รวมถึง สมรรถนะโดยรวมของระบบจะเป็นประเด็นที่สำคัญที่ต้องถูกนำไปพิจารณาระหว่างกระบวนการออกแบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าสำหรับการนำไปใช้งานในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายต้องประกอบด้วยคุณสมบัติดังนี้ ตัวประกอบกำลังสูง ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ต่ำ ประสิทธิภาพสูง ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง ความเชื่อถือได้สูงและมีการรบกวนจากการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ เพื่อที่จะควบคุมให้ระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้ามีสมรรถนะที่ดีดังที่ได้กล่าวไว้ ส่วนขั้นตอนของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังและส่วนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต้องไม่ทำให้ระบบมีความยุ่งยากและซับซ้อน

หนึ่งในบรรดากระบวนการแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายที่มีพิกัดกำลังสูงแบบทั่วไปได้ใช้วิธีการแปลงแบบ 2 ขั้นตอน โดยอาศัยโมดูลกำลังชนิด 1 เฟส ดังได้พิจารณาอยู่ในบทความที่ [7, 8, 9] และถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 1-3 นั้นแสดงว่าขั้นตอนแรกของแต่ละโมดูลถูกใช้เป็นวงจรเพื่อทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลังเพื่อให้ระบบที่นำเสนอผ่านมาตรฐานกระแสฮาร์โมนิกส์เช่น IEC 1000-3-2 ขณะที่ ขั้นตอนที่ 2 เป็นเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงของระบบและระบบมีการควบคุมการแบ่งกระแส



ภาพที่ 1-3 วงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงที่ใช้โมดูลชนิด 1 เฟส จำนวน 3 โมดูล

วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังของแต่ละโมดูลทำงานอยู่ในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่องและถูกควบคุมด้วยโหมดการควบคุมกระแสเฉลี่ย สมรรถนะของวิธีแบบ 2 ขั้นตอนมีค่าสูงแต่รูปแบบของระบบเองทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น เพราะเนื่องจากจำนวนของอุปกรณ์ที่ถูกใช้ภายในวงจรเพื่อที่จะให้ระบบสามารถทำงานได้จริง ยิ่งกว่านั้น เพื่อที่จะทำงานในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 1 เฟส ต้องการการควบคุมที่ซับซ้อน เช่นเดียวกับระบบที่ต้องการตัวเก็บประจุระหว่างกลางขนาดใหญ่เพื่อที่จะจำกัดแรงดันกระแสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและเพื่อที่จะรองรับกำลังไฟฟ้าที่มีค่าความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ไลน์ในบัสเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงส่วนกลาง ถึงแม้ว่าจะเป็นเช่นนั้นก็ตาม ระบบการกระจายกำลังไฟฟ้าแบบ 2 ขั้นตอน ที่ใช้โมดูลเครื่องแปลงผันส่วนหน้าชนิด 1 เฟส ยังคงมีข้อดีตรงที่มีลักษณะการทำงานเป็นโมดูล ซึ่งเป็นตัวชี้วัดหนึ่งของระบบที่ต้องการสมรรถนะที่ดี ขณะที่หลักการเมื่อกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการออกแบบ N+1 ยังคงสามารถถูกเลือกเพื่อนำมาใช้ได้กับระบบนี้เช่นกัน



ภาพที่ 1-4 รูปแบบวงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้าอย่างง่ายที่ใช้โมดูลเรียงกระแส 1 เฟส จำนวน 3 โมดูล ที่ถูกต่อร่วมกันที่ด้านเอาต์พุต

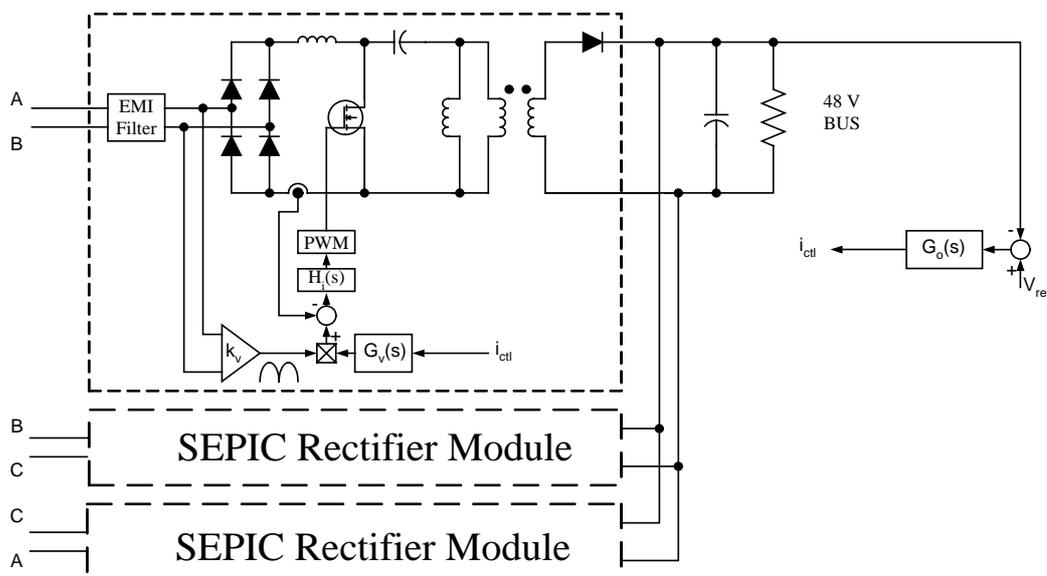
มีอีกวิธีทางเลือกหนึ่งที่เป็นไปได้สำหรับการช่วยลดต้นทุนของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าคือ ให้ทำการจัดชั้นตอนของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย โดยการต่อเอาต์พุต ทั้งสามของแต่ละโมดูลเรียงกระแสแบบบวสชนิด 1 เฟส เข้าด้วยกัน เพื่อที่จะกำจัดกำลังไฟฟ้าที่มี ลักษณะเป็นพัลส์ (100 Hz) ในบัสส่วนกลางเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ในขณะที่ระบบ ยอมให้ใช้เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพียงตัวเดียวในขั้นตอนที่ 2 ของการแปลงแรงดัน ดังถูกแสดงในภาพที่ 1-4 ด้วยวิธีนี้ ขนาดของตัวเก็บประจุที่บัสส่วนกลาง สามารถถูกลดขนาดลงมาได้ [10] เพราะเนื่องจาก กำลังไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นพัลส์ถูกกำจัดไปแล้ว อย่างไรก็ตาม การต่อกันโดยตรงทางด้านเอาต์พุตของโมดูลเรียงกระแสบวส 1 เฟส ก่อให้เกิดผล กระทบระหว่างกันของภาควงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง เพื่อที่จะลดผลของการมีปฏิริยาต่อกันใน โครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 1-4 ขดลวดเหนี่ยวนำบวสต้องถูกแยกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ขณะที่ ไดโอดถูกต่อเพิ่มเข้าไปในโครงสร้างของวงจรของแต่ละโมดูลเรียงกระแสบวส 1 เฟส สำหรับที่ สภาวะของการทำงานที่เหมาะสม ค่าแรงดันบัสส่วนกลางต้องมีค่าน้อยเป็น 2 เท่าของค่ายอด แรงดันอินพุต ซึ่งหมายความว่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าของสวิตซ์กำลังวงจรบวสต้องมีค่าเป็นอย่างน้อย

เท่ากับ 800 V เมื่อถูกนำไปใช้ในระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีค่าพิกัดแรงดันอินพุตระหว่างไลน์กับไลน์ที่ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าปกติเป็น 380 V ในขณะที่สวิตช์ของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะพบกับความเครียดแรงดันที่สูงกว่าปกติ เพราะฉะนั้นโครงสร้างการทำงานของสวิตช์แบบ 3 ระดับต้องถูกนำมาใช้กับระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าว [11, 12, 13, 14]

เครื่องแปลงผันบวสต์ชนิดไม่แยกโคด 1 สวิตช์เป็นวงจรต้นแบบที่ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการแก้ไขตัวประกอบกำลังในระบบ 1 เฟส ขณะที่เครื่องแปลงผันแบบพีดับบลิวเอ็มบวสต์ 6 สวิตช์ เป็นต้นแบบของวงจรมาตรฐานที่ถูกนำมาใช้งานในระบบ 3 เฟส แต่เป็นที่ทราบกันดีถึงข้อด้อยในวงจรต้นแบบบวสต์ชนิดไม่แยกโคดว่า แรงดันเอาต์พุตที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าขอดของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้ระบบต้องใช้สวิตช์กำลังที่มีพิกัดแรงดันสูงเมื่อทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องและระบบควบคุมมีความสลับซับซ้อนมาก [15, 16] ส่วนในระบบวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส ที่ใช้เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 สวิตช์ [17] ได้ให้ผลของการแก้ไขกระแสฮาร์มอนิกส์ไปในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งไม่ตรงกับเป้าหมายของวิทยานิพนธ์นี้ ในส่วนเครื่องแปลงผันที่ทำงานอยู่ในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่องยังคงไม่เป็นที่น่าสนใจเพราะเนื่องจากว่าระบบต้องใช้สวิตช์กำลังที่มีพิกัดทนต่อแรงดันตกคร่อมสวิตช์ที่สูงมากและผลกระทบของการสอดแทรกของสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงด้วยเช่นกัน

ในขณะที่ระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปใช้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับอินพุต 3 เฟส เป็นระบบภาคอินพุต ซึ่งระบบการแปลงผันกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ภาค ดังต่อไปนี้ คือ ส่วนที่หนึ่ง ภาคเรียงกระแสที่ทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลังและแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัดแรงดันเกิน 200 V ขึ้นไป โดยระบบไม่มีการแยกโคดทางไฟฟ้า ส่วนที่สองเป็นเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกแยกโคดทางไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงค่าสูงไปสู่ค่าต่ำ (ค่าของระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) และส่วนที่สามเป็นจุดต่อร่วมเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงภาระ ซึ่งระบบทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าต่ำให้กับภาระตามแต่ความต้องการของภาระชนิดนั้นๆ ระบบนี้ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการแปลงผันกำลังไฟฟ้าในแบบ 3 ขั้นตอนี่ต่ำ แม้ว่าแต่ละโมดูลที่นำมาประกอบรวมกันจะมีค่าประสิทธิภาพที่สูงก็ตาม ด้วยปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ ยังคงมีอีกวิธีทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่สามารถแก้ไขตัวประกอบ

กำลังไฟฟ้าได้ดีในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า คือ วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส แบบ 1 ตอน ที่ใช้เครื่องแปลงผันซีฟิกชนิด 1 เฟส ที่ถูกแยกโคคทางไฟฟ้า โดยระบบถูกควบคุมให้ทำงานอยู่ในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง ได้ถูกนำเสนออยู่ในภาพที่ 1-5 เครื่องแปลงผันประกอบไปด้วย โมดูลแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบซีฟิกชนิด 1 เฟส ที่ถูกแยกโคคทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล (วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบ 1 ตอน ได้ถูกนิยามขึ้นมาจากระบบที่สามารถควบคุมให้กระแสอินพุตใกล้เคียงไซน์และสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ดีในขณะที่มีการแยกโคคทางไฟฟ้าระหว่างภาคอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับและภาคเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรง) วิธีการนี้ถูกค้นพบว่ามี ความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในพิกัดกำลังไฟฟ้าระดับต่ำถึงระดับกลาง การใช้วงจรเครื่องแปลงผันชนิด 1 เฟสที่ถูกแยกโคคทางไฟฟ้าช่วยลดปัญหาของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างเฟสของแรงดันอินพุตได้ สิ่งที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งในการเลือกใช้งานในระบบนี้ คือ วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 1 เฟส เป็นวงจรที่ได้รับการศึกษาและพัฒนาจนเป็นที่รู้จักกันดี และมีความหลากหลายในการเลือกใช้งาน อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ได้ถูกออกแบบไว้ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 500 W และแรงดันอินพุตไลน์กับไลน์ เท่ากับ 200 V ถูกเลือกใช้เพื่อที่จะจำกัดแรงดันตกคร่อมสวิตช์ของซีฟิกไม่ให้เป็น 500 V ดังนั้นถ้าระบบนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบงานที่มีระบบไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตเป็น 3 เฟส 4 สาย 220V/380 V ระบบดังกล่าวน่าจะช่วยให้สมรรถนะที่ดีได้



ภาพที่ 1-5 วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง ชนิด 3 เฟส ที่ใช้วงจรเรียงกระแสแบบซีฟิก ชนิด 1 เฟส จำนวน 3 โมดูล [18]

1.1.2 แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ เครื่องแปลงผันส่วนหน้าในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบการสื่อสาร ระบบเมนเฟรมคอมพิวเตอร์ เครื่องคอมพิวเตอร์ในระบบโครงข่าย และอื่นๆ ผู้วิจัยมีเหตุผลหลักอยู่ด้วยกัน 2 ประการสำหรับการวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่ถูกนำไปใช้ในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง ประการที่ 1 คือ เพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพของระบบกำลัง เนื่องจากค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ต้องถูกจำกัดอยู่ภายในข้อกำหนดที่ได้ถูกกำหนดขึ้นโดยมาตรฐาน เหตุผลที่ 2 สำหรับการวิจัยวงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้า คือ เพื่อที่จะหาแนวทางและวิธีการการควบคุมอย่างง่าย ที่ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนแต่ให้ประสิทธิผล จึงส่งผลให้เครื่องแปลงผันส่วนหน้าของระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนหน้ามีสมรรถนะที่ดีซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการของระบบดังกล่าว

บนพื้นฐานของการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลดังที่ได้กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอความพยายามอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะหาวิธีการและแนวทางใหม่ของการควบคุมระบบที่ทำให้ระบบควบคุมมีความง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อนแต่มีประสิทธิผลสำหรับการขนานระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้า 3 เฟส ที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เป้าประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์นี้คือ เพื่อที่จะวิเคราะห์ ออกแบบ สร้างระบบควบคุมและวงจรกำลังต้นแบบของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าสำหรับจ่ายภาระที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.5 kW เพื่อให้ระบบดังกล่าวมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ลดความยุ่งยากของการวิเคราะห์เพื่อหาระบบควบคุมและระบบมีสมรรถนะที่ดีในขณะที่ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังสูง

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นจริงถึงการบรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้แบ่งหัวข้อของงานวิจัยออกเป็น 3 ประเด็นหลักดังนี้คือ

1. การขนานวงจรส่วนหน้าเพื่อที่จะทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลัง
2. วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแส
3. การขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแส

บทที่ 1 และ 2 ได้กล่าวถึง บทนำ หลักการและเหตุผล วัตถุประสงค์ของการวิจัย ทฤษฎีทั่วไป มาตรฐาน ระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและหลักการของเทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยวิธีแบบพาสซีฟและแอคทีฟและการเปรียบเทียบเครื่องแปลงผันชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้เป็นวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟได้ดี

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์ ออกแบบ จำลองและสร้างระบบจริงของโครงสร้างการขนานระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับขั้นตอนของการแก้ไขตัวประกอบกำลังที่ใช้โมดูลเรียงกระแสชนิด 1 เฟส แบบบัสต์ [19] ซีพิก [20, 21] และชุก [22, 23] ที่ถูกควบคุมให้ระบบทำงานอยู่ในโหมดกระแสชดเชยเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่อง เนื้อหาของบทนี้

ได้มุ่งเน้นไปที่การหารูปแบบของการการแก้ไขตัวประกอบกำลัง การแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในระบบ 1 เฟส และหาเทคนิคการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้ระบบที่นำเสนอมีสมรรถนะทางพลวัตที่ดีและเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างการขนานชนิด 1 เฟส บนพื้นฐานของการประยุกต์ใช้โมดูลแบบมาตรฐานทั้ง 3 แบบ ผลการจำลองถูกแสดงด้วยโปรแกรม Simulink และผลการทดสอบกระทำบนวงจรต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

บทที่ 4 ของวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ จำลองและสร้างวงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสมาตรฐานชนิดแยกโคจรทางไฟฟ้าแบบซีฟิก [20, 21], [24] และชุก [25] บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า วัตถุประสงค์หลักของบทนี้เป็นการใช้เครื่องแปลงผันสวิตซ์ซึ่งชนิด 4 อันดับ (ซีฟิกและชุก) นำมาประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างเครื่องแปลงผันแบบ 3 เฟส ที่อยู่ในรูปแบบเดลต้า (D) และวาย (Y) ระบบควบคุมได้กำหนดให้ระบบต้องมีคุณสมบัติดังนี้คือ ต้องสามารถควบคุมให้ตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง สามารถแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสให้มีค่าใกล้เคียงกันและสามารถควบคุมรูปร่างของสัญญาณกระแสให้เป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ สามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่และมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระเป็นอย่างดี รวดเร็ว ซึ่งผลการจำลองและการทดสอบจากระบบต้นแบบจริงได้ถูกนำเสนอในบทนี้

จากผลของการวิจัยและพัฒนาในงานในบทที่ 4 ทำให้เกิดความต่อเนื่องมาถึงบทที่ 5 ซึ่งบทนี้ได้กล่าวถึงการวิจัยและพัฒนาโครงสร้างแบบขนานเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุกแยกโคจรทางไฟฟ้าชนิด 1 เฟส โดยระบบถูกออกแบบและวิเคราะห์บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าเพื่อที่จะให้ระบบวงจรกำลังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากเดิมพิกัดกำลังไฟฟ้าเดิม โดยระบบที่นำเสนอต้องมีความสามารถในการแบ่งกระแสเพื่อให้ระบบ 3 เฟส นั้นเกิดสถานะเฟสที่สมดุลทั้งสามเฟส ระบบมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่ดี ตัวเก็บประจุของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถถูกลดขนาดลงสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ คุณสมบัติของเทคนิคนี้ถูกวิเคราะห์และผลการทดลองที่ได้จากชุดต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการถูกออกแบบให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าในการจ่ายให้กับภาระได้สูงสุดที่ 1.5kW

บทที่ 6 ได้ทำการรวบรวมผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองและทดสอบการทำงาน เพื่อนำมาวิจารณ์และสรุปผล ผู้วิจัยได้นำเสนอข้อเสนอแนะส่วนต่อขยายของงานวิจัยนี้ทั้งหมดเพื่อที่จะให้ระบบที่ได้ถูกนำเสนอในบทที่ 5 มีฟังก์ชันของการทำงานที่ครบสมบูรณ์ทุกประการ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อที่จะศึกษาการทำงานการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 1 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบวสต์ ซีพิกและชุก

1.2.2 เพื่อที่จะศึกษาการทำงานของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีพิกและชุกบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อที่จะศึกษาการทำงานของการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแยกโคจรทางไฟฟ้าแบบชุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างระบบการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังระบบ 1 เฟส 220 V 50 Hz โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบวสต์ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้ารวมเอาต์พุต 1.5 kW ที่แรงดันเอาต์พุต 400 V ระบบการขนานโมดูลเรียงกระแสแบบซีพิกที่พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมเอาต์พุต 600 W ที่แรงดันเอาต์พุต 48 V และระบบการขนานโมดูลชุกที่พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมเอาต์พุต 750 W ที่แรงดันเอาต์พุต -48 V

1.3.2 สร้างระบบวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 3 เฟส 220/380 V 50 Hz โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแยกโคจรทางไฟฟ้าแบบซีพิกที่พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมเอาต์พุต 600 W ที่แรงดันเอาต์พุต 48 V และระบบเมื่อใช้โมดูลแยกโคจรทางไฟฟ้าแบบชุกที่พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมเอาต์พุต 750 W และแรงดันเอาต์พุต -48 V

1.3.3 สร้างระบบการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 3 เฟส ที่พิกัดแรงดันอินพุต 220/380 V $\pm 15\%$ ความถี่ 50 Hz ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแยกโคจรทางไฟฟ้าแบบชุก ที่ระบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมเอาต์พุต 1.5 kW ที่แรงดันเอาต์พุต -48 V

1.3.4 ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.9

1.3.5 ประสิทธิภาพโดยรวม 86 %

1.3.6 ช่วงเวลาการคืนตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ภายใน 20 ms เมื่อภาระถูกทำให้เปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 24% และกลับมาที่ 100 % อีกครั้ง ระบบให้ค่า $\pm \Delta V_O = \pm 2$ V

1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลของระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่ถูกนำไปใช้ในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

1.4.2 ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลของโมดูลเรียงกระแสมาตรฐานแบบต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้เป็นวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ดี

1.4.3 ศึกษาวิธีการออกแบบการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

1.4.4 จำลองการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม Simulink

1.4.5 ออกแบบ สร้างและทดสอบระบบต้นแบบของการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

1.4.6 ปรับแต่งระบบการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า บันทึกผลและสรุปผลงานวิจัย

1.4.7 เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 เครื่องมือที่ใช้

1.5.1 เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพาและแบบตั้งโต๊ะ

1.5.2 คิวติคอลอสซิลโลสโคป 100 MHz

1.5.3 ชุดวัดสัญญาณแรงดันและกระแส

1.5.4 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

1.5.5 หม้อแปลงกำลังปรับค่าได้ 3 เฟส

1.5.6 หม้อแปลงกำลังอัตราส่วน 1:1 เพื่อแยกโอดวงจรกำลัง

1.5.7 คิวติคอลมิเตอร์วัดค่าประสิทธิภาพจริงและคิวติคอลมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

1.6 ประโยชน์ของผลการวิจัย

1.6.1 ได้องค์ความรู้ในรูปแบบของการวิเคราะห์และออกแบบการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบ 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

1.6.2 ได้ระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการของระบบการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบ 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

บทที่ 2

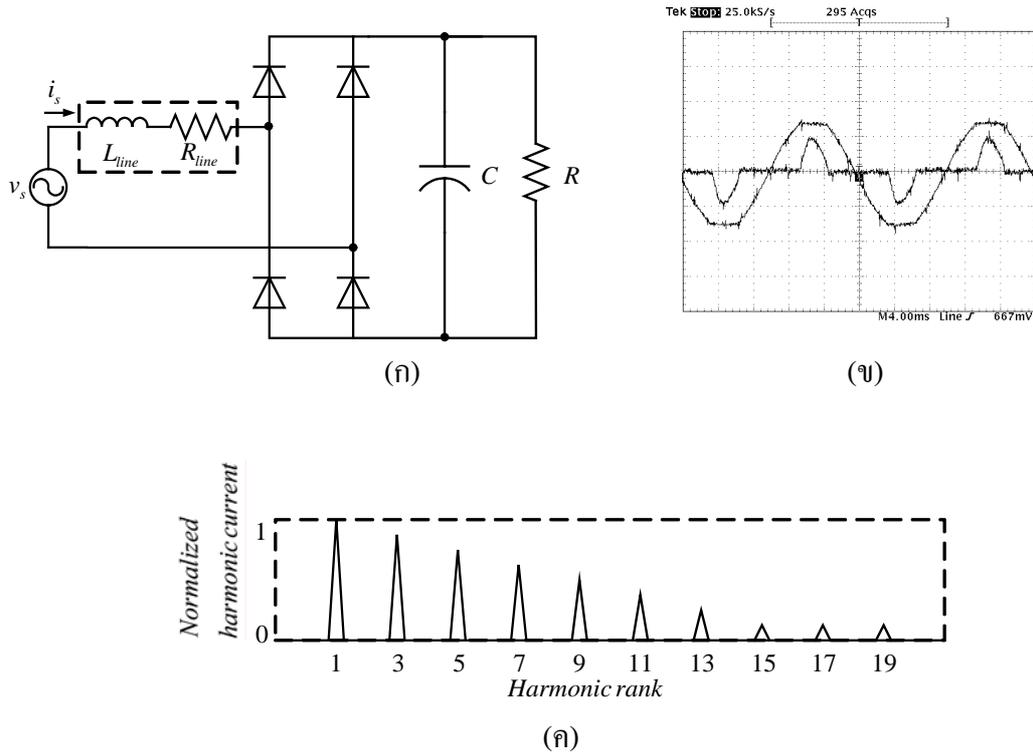
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ภาระไม่เป็นเชิงเส้นและผลกระทบที่เกิดกับโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้า

อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปที่ต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนมากแล้วจำเป็นต้องมีการแปลงผันกำลังไฟฟ้าก่อนเสมอ ซึ่งปกติแล้วจะใช้วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) วงจรดังกล่าวมีผลทำให้กระแสด้านหน้าของวงจรมีลักษณะรูปคลื่นไม่เป็นสัญญาณไซน์ เนื่องจากมีคุณสมบัติของวงจรที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Circuit) ซึ่งส่งผลให้มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แพร่กระจายเข้าไปในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแล้วทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันขึ้นที่จุดต่อร่วมของระบบ

วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่แปลงแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแบบที่ไม่สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ เช่น วงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส แบบไดโอดบริดจ์ที่ใช้กับอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำซึ่งจำเป็นต้องมีการแปลงผันกำลังไฟฟ้าก่อน เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทีวี อุปกรณ์ไฟฟ้าสำนักงานและเครื่องชาร์จแบตเตอรี่และเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เป็นต้น แต่สำหรับอุปกรณ์หรือภาระทางไฟฟ้าที่มีพิกัดของกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น วงจรเรียงกระแสชนิดสามเฟสแบบไดโอดบริดจ์จะถูกนำมาใช้แทน เช่น ในระบบอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ระบบการขับเคลื่อนไฟฟ้าชนิดที่สามารถปรับความเร็วรอบหรือระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบการสื่อสารและคอมพิวเตอร์ ทั้งสองแบบของวงจรเรียงกระแสดังกล่าวจำเป็นต้องต่อตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ขนาดที่ด้านเอาต์พุต เพื่อทำหน้าที่กรองแรงดันพลิวให้มีขนาดต่ำลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้กระแสที่แหล่งจ่ายมีลักษณะของสัญญาณไม่เป็นไซน์และมีเฟสไม่ตรงกับแรงดัน ส่งผลให้ตัวประกอบกำลังต่ำ

ทั้งสองกรณีที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนี้มีขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับเลขคี่ที่สูงเมื่อเทียบกับขนาดกระแสที่ความถี่มูลฐาน ยกตัวอย่างเช่น ในวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ชนิด 1 เฟส ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ประกอบด้วยรูปคลื่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าไลน์ เป็นที่น่าสังเกตว่าขนาดของกระแสฮาร์มอนิกส์เลขคี่อันดับที่ 3, 5 และ 9 มีค่าที่สูงอย่างมีนัยสำคัญ ผลกระทบของภาระแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่พิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำในโครงข่ายระบบจำหน่ายอาจมองได้ว่าไม่มากนัก แต่ถ้าภาระนี้ถูกต่อเข้าไปในระบบเป็นจำนวนมากและพร้อมกัน ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจึงเป็นเรื่องที่ไม่สามารถมองข้ามได้



ภาพที่ 2-1 วงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ชนิด 1 เฟส (ก) วงจรกำลัง (ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสไลน์ (ค) กระแสฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่เมื่อเทียบกับความถี่มูลฐาน

กระแสฮาร์มอนิกที่ถูกทำให้แพร่กระจายเข้าไปในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านั้นมีผลกระทบโดยตรงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้หลายประการ ทั้งที่เกิดกับอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าเองหรือในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งสามารถสรุปผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกได้พอสังเขปดังนี้ [26, 27]

1. ทำให้เกิดความสูญเสียและความร้อนสูงใน หม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่ขนานอยู่ในระบบสายเคเบิลในระบบจำหน่าย เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับและสวิตช์เกียร์ ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกจะส่งผลทำให้อุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวมาเกิดสภาวะการทำงานที่ผิดปกติและมีอายุการใช้งานที่สั้นลง
2. ทำให้เกิดกระแสเกินในสายนิวตรอนของระบบ 3 เฟส 4 สาย ซึ่งกระแสดังกล่าวเกิดขึ้นจากกระแสฮาร์มอนิกเลขคี่ที่มีอันดับถูกหารด้วยสามลงตัว (จำนวนที่เป็นสามเท่า เช่น อันดับที่ 3rd, 9th, 15th, และอื่นๆ) ซึ่งมีลำดับเฟสเป็นศูนย์ (Zero Sequence) ผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดความร้อนสูงในสายนิวตรอนและเกิดการดำเนินงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันประเภทรีเลย์
3. ตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าลดลงเพราะเนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบมีค่าลดลงขณะที่กำลังไฟฟ้าปรากฏมีค่าคงที่

4. เกิดเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้าขึ้นในระบบกำลังซึ่งทำให้ค่ายอดของแรงดันและกระแสใช้งานมีค่าสูงเกินพิกัด ส่งผลทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวเก็บประจุและระบบการฉนวนในอุปกรณ์ที่ถูกต่อร่วมอยู่ในระบบ โดยอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบดังกล่าวจะมีอายุการใช้งานที่สั้นลง

5. แรงดันที่จุดต่อร่วมในระบบเกิดความผิดปกติ เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของระบบ (สายตัวนำ หรือ หม้อแปลง) แรงดันที่จุดต่อร่วมที่ผิดปกติไปนี้จะมีผลกระทบโดยตรงต่อผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆ ที่มีภาระต่อร่วมอยู่ในจุดต่อร่วมเดียวกันในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น เครื่องใช้ไฟฟ้าบางประเภทมีความต้องการรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไลน์ที่มีความถูกต้องเที่ยงตรงสูงทั้งค่าขนาด ค่าประสิทธิผลและตำแหน่งตัดผ่านจุดศูนย์ของแรงดัน

6. เกิดการรบกวนขึ้นในระบบโทรศัพท์

7. เกิดความผิดพลาดขึ้นในอุปกรณ์ประเภทตรวจวัด

8. เกิดการรบกวนเพิ่มขึ้น

9. มอเตอร์ไฟฟ้าเหนียวหรือส่วนกักกันในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการสั่น

การแก้ไขปัญหาอันเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกส์สามารถทำได้ใน 2 แนวทางคือ วิธีแรกเป็นการแก้ไขปัญหาที่กำลังเกิดขึ้นให้ลดความรุนแรงลงหลังจากที่ระบบจำหน่ายและผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกส์ที่แพร่กระจายออกมา ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

1. ใช้วิธีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของการต่อหม้อแปลง
2. เพิ่มขนาดสายนิวตรอนและเพิ่มพิกัดกระแสของตัวเก็บประจุ
3. ติดตั้งวงจรป้องกันการเกิดเรโซแนนซ์
4. ติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟหรือแอคทีฟ

วิธีแรกถูกใช้เมื่อเกิดปัญหาขึ้นแล้วจึงเข้าไปทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นที่ระบบ เพื่อเป็นการลดความรุนแรงของปัญหาลงซึ่งมีข้อด้อยดังนี้ คือ วิศวกรต้องเข้าไปปรับปรุงระบบกำลังใหม่หรือเข้าไปติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม ซึ่งวิธีการนี้ต้องอาศัยวิศวกรผู้ที่มีความชำนาญคอยควบคุม ดูแลและออกแบบระบบอย่างรอบคอบ อีกทางเลือกหนึ่งของการลดปัญหาอันเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกส์ คือ ไปจำกัดการแพร่กระจายของกระแสฮาร์มอนิกส์โดยการเปลี่ยนแปลงและออกแบบวงจรภาคจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาอย่างยั่งยืนและถาวร ทางเลือกที่สองของการแก้ไขจึงน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีและมีความเหมาะสมต่อการแก้ไขปัญหาให้หมดไป โดยผู้ออกแบบต้องเข้าไปเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงให้วงจรแหล่งจ่ายกำลังนั้นๆ ไม่ให้มีการแพร่กระจายของกระแสฮาร์มอนิกส์ออกไปสู่ระบบไฟฟ้ากำลังเกินกว่ามาตรฐานที่ได้กำหนดไว้

2.2 มาตรฐานที่ใช้ควบคุมการแพร่กระจายของกระแสฮาร์โมนิกส์

ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายของกระแสฮาร์โมนิกส์ได้ก่อให้เกิดการกระตุ้นให้มีการบังคับใช้ข้อกำหนดและมาตรฐาน เพื่อที่จะให้มีการจำกัดการแพร่กระจายกระแสฮาร์โมนิกส์อันเกิดจากการต่อภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นเข้าไปที่ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า มาตรฐานที่นำมาใช้เพื่อจำกัดการแพร่กระจายของกระแสฮาร์โมนิกส์มีความเป็นมาพอสังเขปดังนี้ คือ นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1982 คณะกรรมการเทคนิคทางไฟฟ้านานาชาติ (International Electrotechnical Committee หรือ IEC) ได้นำเสนอมาตรฐาน IEC 555-2 ขึ้นมาใช้งาน ซึ่งหลังจากนั้นต่อมา ในปี ค.ศ. 1987 ได้ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานในภาคพื้นยุโรป (European standard) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในนาม EN 60555-2 โดยคณะกรรมการแห่งภาคพื้นยุโรปได้กำหนดให้เป็นข้อบังคับใช้และเป็นมาตรฐานทางไฟฟ้า (the European Committee for Electrotechnical Standardization-CENELEC) ในเวลาต่อมามาตรฐาน IEC 555-2 ได้ถูกแทนที่ด้วยมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ในปี ค.ศ. 1995 พร้อมกันนั้นมาตรฐานดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้โดย CENELEC ให้เป็นมาตรฐานแห่งภาคพื้นยุโรปที่รู้จักกันในชื่อ EN 61000-3-2 トラバจนถึงปัจจุบัน [4, 5]

ตั้งแต่เดือนมกราคมปี ค.ศ. 1996 มาตรฐาน IEC 1000-3-2 (IEC 555-2) มีผลบังคับใช้เพื่อจำกัดการดึงกระแสฮาร์โมนิกส์ของเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านเรือนหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีพิกัดกระแสไม่เกิน 16 A ต่อเฟส ซึ่งอุปกรณ์หรือภาระดังกล่าวถูกต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันต่ำชนิด 1 เฟส ที่มีความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz พิกัดแรงดันไฟฟ้า 220-240 V หรือระบบจำหน่ายที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 380-415 V ในกรณีของระบบประธานเป็น 3 เฟส ผลกระทบของมาตรฐานต่อขนาดและราคาของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามักมีผลกระทบมากพอสมควร เช่น กรณีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อให้ได้มาตรฐาน IEC 1000-3-2 นั้น ต้องใช้ต้นทุนและมีขนาดที่เพิ่มขึ้นมาโดยเฉลี่ยแล้วประมาณ 20%

หลักของการแก้ปัญหาที่เกิดจากการแพร่กระจายของกระแสฮาร์โมนิกส์ในมุมมองจากระดับของกำลังไฟฟ้า การแก้ปัญหาด้วยวิธีการแบบพาสซีฟถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง [28] (ระดับกำลังไฟฟ้าที่มากกว่า 10 kW) และที่ระดับกำลังไฟฟ้าต่ำ (ต่ำกว่า 200 W) ที่ระดับพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สูงวิธีแก้ปัญหาแบบพาสซีฟมีความเหมาะสมในระดับนี้เพราะการใช้เทคนิคสวิตชิงความถี่สูงมีความยุ่งยากมาก ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำ การแก้ไขปัญหาระดับฮาร์โมนิกส์ด้วยวิธีพาสซีฟมีความเหมาะสมเพราะสามารถลดต้นทุนได้ สำหรับกรณีพิกัดกำลังไฟฟ้าระดับกลาง ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการแบบแอคทีฟบนพื้นฐานของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ระบบทำงานอยู่ในโหมดของการสวิตชิงเป็นทางออกที่เหมาะสมในพิกัดกำลังไฟฟ้าระดับนี้ แต่ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดอันเกิดจากการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) ด้วย

ในความเป็นจริง กระแสฮาร์โมนิกส์เป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาที่สำคัญขึ้นหลายประการ เช่น การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์ตัดตอนเกิดความผิดพลาด ความผิดเพี้ยนแรงดัน เพราะเนื่องจากแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของไลน์ในตำแหน่งอนุกรม มีความเป็นไปได้ที่จะมีการขยายความผิดเพี้ยนแรงดันเพราะเนื่องจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ความสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในอุปกรณ์ที่ต่ออนุกรมกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าและไปลดความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดและการวัดคุมในระบบและการจำกัดความผิดเพี้ยนของกระแสส่งผลดีกับภาระเช่นกัน ในความเป็นจริงแล้ว ตัวประกอบกำลังที่เพิ่มขึ้นทำให้ระบบมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้เพิ่มขึ้น ยิ่งกว่านั้น กระแสที่ไหลในสายนิวตรอนถูกทำให้ลดลงอย่างมาก

มาตรฐาน IEC 1000-3-2 ถูกนำมาใช้กับภาระหรืออุปกรณ์ชนิด 1 เฟส หรือ 3 เฟส ที่ใช้กระแสไม่เกิน 16 A ต่อเฟส และสามารถจำแนกประเภทของอุปกรณ์หรือภาระทางไฟฟ้าออกเป็น 4 แบบ (กลุ่ม A, B, C และ D) เพื่อที่จะแยกแยะในการจำกัดและกำหนดปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ที่จะสามารถเกิดขึ้นได้ในกระแสไลน์ มาตรฐานดังกล่าวได้รับการปรับปรุงมาหลายต่อหลายครั้งและการปรับปรุงครั้งที่สองได้ถูกเผยแพร่เมื่อปี ค.ศ. 2000 พร้อมกับการปรับปรุงฉบับปัจจุบันเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 2001

กลุ่ม A ประกอบด้วย อุปกรณ์ไฟฟ้า 3 เฟสที่กระแสสมมูล เครื่องใช้ในครัวเรือน ซึ่งไม่รวมถึงอุปกรณ์ที่ถูกระบุอยู่ในกลุ่ม D เครื่องมือซึ่งไม่รวมถึงเครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้ อุปกรณ์หรือไฟของหลอดไส้ และเครื่องเสียง อุปกรณ์ที่ไม่ได้ถูกระบุอยู่ในหนึ่งในบรรดาทั้งหมดของกลุ่มต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในกลุ่ม A ข้อกำหนดสำหรับกลุ่ม A ถูกแสดงในตารางที่ 2-1

กลุ่ม B ประกอบด้วย เครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้และต้องไม่ใช่อุปกรณ์ประเภทเครื่องเชื่อมแบบมืออาชีพ ข้อกำหนดของชั้นนี้ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 2-1 เช่นกัน แต่ปริมาณต่างๆ ต้องถูกคูณด้วยค่าตัวประกอบเท่ากับ 1.5

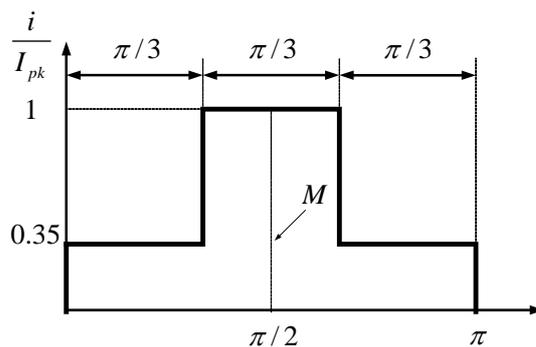
กลุ่ม C ประกอบด้วย อุปกรณ์ให้แสงสว่าง สำหรับกำลังไฟฟ้าอินพุตจริงที่มากกว่า 25 W กระแสฮาร์โมนิกส์ควรที่จะต้องไม่เกินข้อกำหนดที่ถูกแสดงในตารางที่ 2-2 (ยกเว้นในอุปกรณ์การหรือไฟสำหรับหลอดไส้ที่จัดอยู่ในกลุ่ม A) อุปกรณ์ให้แสงสว่างประเภทหลอดคายประจุที่มีค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตจริงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 W ควรที่จะเป็นไปตามข้อกำหนดอันใดอันหนึ่งจากความต้องการทั้ง 2 กลุ่มดังต่อไปนี้คือ หนึ่ง กระแสฮาร์โมนิกส์ควรที่จะไม่เกิน ข้อจำกัดพิคกิ้งกำลังไฟฟ้ากลุ่ม D แสดงในตารางที่ 2-3 คอลัมที่ 2 หรือสอง กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่สาม ถูกแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์จากปริมาณกระแสหลักมูลฐาน ควรที่จะไม่เกิน 86 เปอร์เซ็นต์ และ อันดับที่ 5 ควรที่จะไม่เกิน 61 เปอร์เซ็นต์

ข้อกำหนดฮาร์มอนิกส์สำหรับกลุ่ม D ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 2-3 ทั้งหมดถูกกำหนดให้อยู่ในเทอมของพิกัดกำลังและเทอมสมบูรณ์ กล่าวคือกลุ่ม D ประกอบด้วย อุปกรณ์ที่มีพิกัดกำลังจริงอินพุตน้อยกว่าหรือเท่ากับ 600 W และ รูปคลื่นกระแสอินพุตถูกทำให้เป็นปกติเทียบกับค่าสูงสุด I_{pk} ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตที่แสดงอยู่ในภาพที่ 2-2 ภายใต้ข้อกำหนดของกระแสนี้ กลุ่ม D ต้องเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าจริงอินพุตน้อยกว่าหรือเท่ากับ 600 W เช่น ในภาวะประเภทคอมพิวเตอรส์ส่วนบุคคล จอคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและเครื่องรับโทรทัศน์ โดยทั่วไป อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า

1. มาตรฐานเป็นตัวกำหนดให้ภาระในกลุ่มต่างๆ ต้องยินยอมที่จะอยู่ภายในข้อกำหนดที่ได้ระบุไว้ และต้นทุนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากผู้ผลิตที่ปฏิบัติตามมาตรฐานจะตกไปอยู่โดยตรงกับผู้บริโภค
2. รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่มีค่า Crest-Factor สูงมีผลทำให้ยอดแรงดันแหล่งจ่ายถูกตัดหายไป
3. กระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีอันดับเลขคี่ทำให้เกิดความไม่สมส่วนของรูปคลื่นกระแสแหล่งจ่าย
4. สิ่งที่ต้องการสำหรับโหลดไฟฟ้าขนาดมากกว่า 25 W คือ แยกออกเป็นอิสระ แต่ที่พิกัดต่ำกว่า 25 W ไม่มีข้อจำกัดที่ได้กำหนดไว้
5. ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของภาระต่ำกว่า 600 W ความต้องการของกลุ่ม A นั้นเข้มงวดน้อยกว่ากลุ่ม D

นอกจากมาตรฐาน IEC 1000-3-2 แล้ว ยังมีข้อกำหนดอื่นๆ เพื่อใช้ในการควบคุมการแพร่กระจายของกระแสฮาร์มอนิกส์อีก เช่น มาตรฐาน IEC/TS 1000-3-4 พิจารณาอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยพิกัดกระแสมากกว่า 16 A ต่อเฟส ที่ต่อรวมอยู่ในระบบไฟฟ้า 1 เฟส พิกัดแรงดัน 240 V ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz หรือ ที่พิกัดแรงดันที่สามารถเพิ่มได้ถึง 600 V ในระบบ 3 เฟส มาตรฐาน IEEE 519-1992 ได้กล่าวถึงข้อกำหนดสำหรับควบคุมฮาร์มอนิกส์ในระบบกำลังไฟฟ้า ทั้งในส่วนที่เป็นของผู้ใช้ไฟฟ้าและภายในระบบการบริการไฟฟ้า ข้อกำหนดสำหรับกระแสฮาร์มอนิกส์ที่แพร่กระจายกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความถี่กระแสสูงสุด I_L (องค์ประกอบความถี่มูลฐาน) ณ จุดต่อร่วมของการไฟฟ้า (Point of Common Coupling : PCC)

งานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มุ่งเน้นที่การใช้เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้าชนิด 1 เฟส นำมาประกอบเป็นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้านี้คือ โครงสร้างแบบขนานชนิด 1 เฟส โครงสร้างแบบแยกแหล่งจ่ายชนิด 3 เฟส และโครงสร้างการขนานระบบแยกแหล่งจ่ายชนิด 3 เฟส โดยทำหน้าที่เป็นวงจรส่วนหน้าเพื่อที่จะแก้ไขตัวประกอบกำลังให้ใกล้เคียงหนึ่ง การทดสอบมีกรอบมาตรฐาน IEC 1000-3-2 เป็นตัวควบคุมการแพร่กระจายกระแสฮาร์มอนิกส์โดยที่ระบบสามารถแยกโดดทางไฟฟ้าและมีการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้อย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 2-2 ขอบเขตของกระแสแหล่งจ่ายในกลุ่ม D ของมาตรฐาน IEC 1000-3-2

ตารางที่ 2-1 ข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์กลุ่ม A ของมาตรฐาน IEC 1000-3-2

Harmonic Order n	Maximum Permissible Harmonic Current A
Odd Harmonics	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \frac{15}{n}$
Even Harmonics	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \frac{8}{n}$

ตารางที่ 2-2 ข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์กลุ่ม C ของมาตรฐาน IEC 1000-3-2

Harmonic Order n	Maximum Permissible Harmonic Current Expressed as a Percentage of the Input Current at the Fundamental Frequency %
2	2
3	$30.PF^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (odd harmonics only)	3

PF^* is the circuit power factor

ตารางที่ 2-3 ข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์กลุ่ม D ของมาตรฐาน IEC 1000-3-2

Harmonic Order n	Maximum Permissible Harmonic Current per Watt mA/W	Maximum Permissible Harmonic Current A
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
$13 \leq n \leq 39$	$\frac{3.85}{n}$	As in Class A

2.3 การแก้ไขตัวประกอบกำลัง

การลดการแพร่กระจายของกระแสฮาร์โมนิกส์ให้อยู่ภายในข้อกำหนดมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับผู้ให้บริการทางไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า ด้วยเหตุและผลดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น จึงได้มีงานวิจัยที่ได้ถูกนำเสนอและกล่าวถึงวิธีการแก้ไขตัวประกอบกำลังขึ้นในหลากหลายวิธี (Power Factor Correction : PFC) [29, 30, 31] เพื่อไม่ให้เกิดความสับสน การแสดงให้เห็นถึงเทอมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวประกอบกำลังจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นในเบื้องต้น เทอมทั่วไปของค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor : PF) ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power : P) หารด้วยเทอมของกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power : U)

$$PF = \frac{P}{U} \quad (2-1)$$

สำหรับกรณีที่แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีรูปคลื่นเป็นสัญญาณไซน์ สมการตัวประกอบกำลังสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$PF = \cos \varphi \quad (2-2)$$

ขณะที่ $\cos \varphi$ เป็นตัวประกอบการเคลื่อนของแรงดันและกระแส ซึ่งในความหมายโดยทั่วไปของการชดเชยและแก้ไขตัวประกอบกำลังให้กับระบบจะพิจารณาสมการที่ 2-2 นี้เป็นหลัก สมมติให้แรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณไซน์ เพราะเนื่องจากโดยทั่วไปค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ามักมีค่าต่ำมาก เช่น ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมของแรงดันไลน์ดังแสดงในภาพที่ 2-1 มีค่า $THD_V \cong 2\%$ เมื่อภาระที่ต่อเข้าไปในระบบเป็นชนิดไม่เป็นเชิงเส้นทำให้กระแสแหล่งจ่ายไม่เป็นสัญญาณไซน์ ดังนั้นสมการตัวประกอบกำลังที่ได้นิยามไว้ในสมการที่ 2-2 จึงไม่สามารถใช้ได้อีกต่อไป สำหรับแรงดันที่เป็นไซน์และกระแสที่ไม่เป็นไซน์ สมการที่ 2-2 สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$PF = \frac{V_{rms} I_{1,rms} \cos \varphi}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \cos \varphi = K_p \cos \varphi \quad (2-3)$$

เมื่อ

$$K_p = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}, K_p \in [0,1] \quad (2-4)$$

ค่าตัวประกอบ K_p อธิบายถึงปริมาณอันดับต่างๆ ของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในกระแสไลน์เทียบกับปริมาณกระแสมูลฐาน ในกรณีเช่นนี้ ค่าตัวประกอบกำลังขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบทั้งสองค่านี้คือ K_p และ $\cos \varphi$ หรือสามารถพิจารณาในเทอมของตัวประกอบความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion : THD) แสดงดังนี้

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}} \quad (2-5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_p และ THD_i คือ

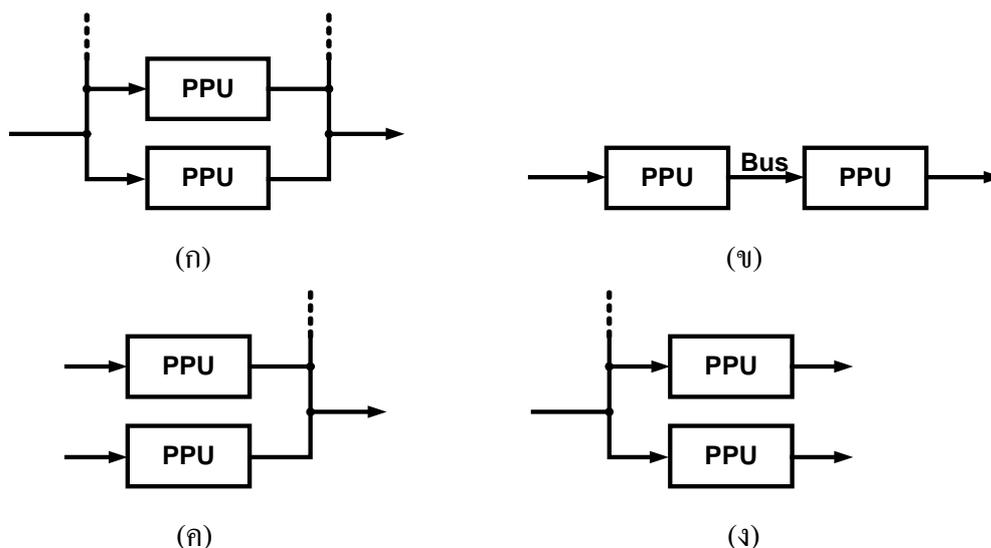
$$K_p = \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (2-6)$$

มาตรฐาน IEC 1000-3-2 ได้อ้างอิงถึงปริมาณของกระแสฮาร์โมนิกส์ในแต่ละอันดับแต่ไม่ได้ระบุปริมาณของค่าคงที่ K_p หรือ ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมของกระแสไลน์ (THD) ดังนั้นจึงสามารถอธิบายสมการที่ (2-3) เพิ่มเติมได้ดังนี้ ถึงแม้ว่ามุมต่างเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสที่ความถี่มูลฐานจะต่ำ ($\cos \varphi$) แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าค่าตัวประกอบกำลังจะสูง (≈ 1) ด้วยเนื่องจากค่าตัวประกอบกำลังยังขึ้นอยู่กับค่าความผิดเพี้ยน (K_p) ของกระแสด้วย ถ้าความผิดเพี้ยนมาก ($K_p < 1$) ก็จะทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำ

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มุ่งเน้นถึงวิธีการลดปริมาณอันดับต่างๆ ของปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์เป็นหลัก ซึ่งทางออกของการแก้ไขตัวประกอบกำลังสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการดังนี้ คือ แบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟ ในวิธีการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟนั้น ต้องใช้อุปกรณ์ประเภทพาสซีฟนำมาต่อเพิ่มเข้าไปในวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ เพื่อที่จะทำให้รูปคลื่นของกระแสไลน์ใกล้เคียงไซน์มากขึ้น วิธีการนี้มีข้อด้อยคือแรงดันด้านเอาต์พุตไม่สามารถควบคุมได้ แต่สำหรับวิธีการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟนั้น วงจรแอคทีฟสวิตช์ได้ถูกต่อเชื่อมกับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เดิมที่มีอยู่เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ไขรูปคลื่นของกระแสไลน์ให้เป็นไซน์และมีเฟสทับกันกับแรงดัน และเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตให้คงที่ ซึ่งวิธีการของการแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทั้งสองแบบจะได้ถูกกล่าวเพิ่มเติมต่อไป

2.4 ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย

การวิจัยและพัฒนาที่มีอย่างต่อเนื่องของเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำส่งผลให้เกิดสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมใหม่ๆ ขึ้นในหลากหลายระบบ เช่น ความเร็วที่เพิ่มขึ้นของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในคอมพิวเตอร์หรือระบบการควบคุมอุตสาหกรรมที่มีฟังก์ชันที่สลับซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้ได้มาซึ่งความเร็วของการประมวลผลที่สูงกว่าเดิมและระบบใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด แหล่งจ่ายกำลังจำเป็นต้องถูกออกแบบให้ระดับแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดต่ำลงกว่าเดิมจากที่เป็นอยู่ ด้วยความต้องการที่เพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าและการลดลงของระดับแรงดันที่แหล่งจ่าย จึงเป็นหัวข้อที่ทำนายสำหรับการออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในยุคปัจจุบันและอนาคต ระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบทั่วไปนั้นไม่มีความเหมาะสมกับระบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในยุคใหม่ ด้วยเหตุนี้ จึงส่งผลให้ระบบกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจายมีการพัฒนาและยอมรับมากขึ้นในการประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบรวมศูนย์ กระบวนการแปลงผันกำลังไฟฟ้าถูกรวมอยู่ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพียง 1 ตัวที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยพิกัดของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้างดงกล่าวขึ้นอยู่กับความต้องการของภาระเป็นหลัก ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายนั้นถูกจำแนกแบ่งตามลักษณะการกระจายของหน่วยจัดการกำลังไฟฟ้า (Power Processing Unit : PPU) แบบต่างๆ เป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายนิยมได้โดยอ้างถึงหน้าที่การจัดการกำลังที่ถูกกระจายออกไปของหน่วยจัดการกำลังไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกัน ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายถูกแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างพื้นฐานของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย (ก) โครงสร้างขนาน

(ข) โครงสร้างอับดับ (ค) โครงสร้างแยกแหล่งจ่าย (ง) โครงสร้างแยกภาระ

2.4.1 โครงสร้างการขนาน โครงสร้างแบบขนานถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2-3 (ก) ระบบดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในภาคระบบกำลัง โมดูลแบบขนานสามารถวางลงแทนที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบรวมศูนย์ได้ โครงสร้างที่พบบ่อย คือ ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบโมดูล ในระบบกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจายที่ประกอบด้วยบัสแรงดันไฟฟ้าระหว่างกลาง การขนานโมดูลสามารถนำมาใช้เพื่อเป็นเครื่องแปลงผันในส่วนหน้าและหรือใช้เป็นเครื่องแปลงผันการระบบมีคุณลักษณะที่ดีดังต่อไปนี้

2.4.1.1 การจัดการความร้อน โครงสร้างแบบขนาน แต่ละหน่วยของการจัดการกำลังไฟฟ้ารับภาระกำลังไฟฟ้าเพียงส่วนหนึ่งของทั้งหมด เพราะเนื่องจากว่ามีกำลังไฟฟ้าเพียงส่วนน้อยที่ถูกกระจายออกไปในแต่ละหน่วย การออกแบบการระบายและกระจายความร้อนจึงทำได้ง่าย

2.4.1.2 ความน่าเชื่อถือ การขนานสามารถลดความเครียดทางไฟฟ้าและความร้อนบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ แม้ว่าจำนวนของอุปกรณ์ภายในโครงสร้างการขนานถูกทำให้เพิ่มขึ้น แต่ความน่าเชื่อถือของระบบโดยรวมถูกทำให้เพิ่มตามขึ้นไปด้วย

2.4.1.3 การเผื่อ เป็นคุณลักษณะที่เด่นและสำคัญของการทำงานในโครงสร้างแบบขนานคือความสามารถในการกำหนดให้ระบบมีการเผื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยใช้โมดูลจำนวนที่มากกว่าจำนวนต่ำสุดที่ภาระในระบบต้องการ โดยทั่วไปแล้วให้จำนวนของโมดูลในระบบเป็นไปตามสมการ $N+1$ ขณะที่ N คือจำนวนโมดูลที่น้อยที่สุดที่ต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้ การเผื่อเป็นสิ่งที่ต้องการในการประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูง ซึ่งรวมไปถึงระบบประมวลผลหลักของคอมพิวเตอร์แบบเมนเฟรม การสื่อสาร การประยุกต์ใช้กับสถานีอวกาศหรือทางการทหาร

2.4.1.4 การแยกเป็นสัดส่วน โครงสร้างแบบขนานมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบระบบเพื่อให้มีการแยกเป็นสัดส่วน ข้อดีของการออกแบบการแยกเป็นสัดส่วนรวมถึงแต่ละระบบสามารถแยกส่วนและนำกลับมาประกอบใหม่ได้ ระบบมีความยืดหยุ่นสูง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าความต้องการของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โมดูลที่ได้เตรียมไว้จะถูกเพิ่มเข้าไปในวงจรเพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามความต้องการของภาระอย่างฉับพลัน ระบบนี้ต้องการเพียงแค่โมดูลที่เป็นมาตรฐานทั่วไป ส่งผลให้วิศวกรผู้ออกแบบใช้เวลาไม่มากในการออกแบบ ซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิตได้

2.4.1.5 ความสามารถในการบำรุงรักษา โครงสร้างแบบขนานที่ถูกออกแบบมานั้นพร้อมที่จะยอมให้มีการเปลี่ยนโมดูลที่ได้รับความเสียหายออกไปจากระบบและเปลี่ยนโมดูลที่ดีเข้าไปแทนในระบบโดยไม่จำเป็นต้องมีการหยุดการทำงานของระบบในขณะที่มีการบำรุงรักษาและการซ่อมแซม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการอย่างยิ่ง ในระบบที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูง

2.4.1.6 การลดขนาด การออกแบบระบบให้เป็นแบบแยกส่วนนั้นสามารถออกแบบให้หน่วยประมวลผลกำลังมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ เช่น เมื่อเทียบโมดูลเครื่องแปลงผันที่มีพิคกำลังไฟฟ้าเท่ากัน ผู้ออกแบบสามารถเพิ่มความถี่ของการสวิตช์เพื่อลดขนาดของวงจรกรอง โดยใช้หลักการเหลื่อมกันของกระแสในแต่ละโมดูลแบบขนานซึ่งจะส่งผลให้ไปเพิ่มความถี่กระแสเพื่อนำไปสู่การลดขนาดของวงจรกรองกระแสทั้งหมด

2.4.2 โครงสร้างการต่อแบบอันดับ โครงสร้างการต่อแบบอันดับของหน่วยประมวลผลกำลังไฟฟ้ามีความจำเป็นในบรรดาทั้งหมดของโครงสร้างการต่อแบบต่างๆ โครงสร้างดังกล่าวปรากฏอยู่ในระบบกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจายเพื่อที่จะสร้างบัสแรงดันไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างเครื่องแปลงผันส่วนหน้าและเครื่องแปลงผันภาระ ระบบแสดงอยู่ในภาพที่ 2-3 (ข) การออกแบบระบบกำลังที่มีโครงสร้างดังกล่าวทำให้จำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงสิ่งต่างๆ ดังนี้คือ

2.4.2.1 เพื่อควบคุมระดับแรงดันในตำแหน่งจุดต่อร่วมของภาระ โครงสร้างการต่อแบบอันดับนี้ได้นำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อควบคุมระดับแรงดันและเพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองทางผลวัตที่ดี ถ้าเครื่องแปลงผันภาระมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูง ระบบจะถูกนำไปใช้เป็นเครื่องแปลงผันชนิดติดตั้งบนบอร์ดชุดประมวลผลของคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง

2.4.2.2 การกระจายประสิทธิภาพ ระบบหน่วยประมวลผลข้อมูลและสัญญาณสมัยใหม่ที่มีสมรรถนะสูงต้องการระดับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ค่าต่ำและพิคกำลังไฟฟ้าที่สูง ซึ่งคุณสมบัติที่ต้องการดังกล่าวส่งผลให้การกระจายกำลัง ณ ที่ตำแหน่งแรงดันระดับลอจิกไม่ได้ผลเป็นที่น่าพอใจและทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ ในโครงสร้างการต่อแบบอันดับนี้ ค่าแรงดันบัสระหว่างกลางสามารถเพิ่มขึ้นได้เพื่อให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับที่จะลดกระแสที่มีการกระจายออกไป ดังนั้นจึงส่งผลให้ความสูญเสียที่กระจายออกไปในตัวนำบัสแรงดันถูกลดค่าลง ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบดีขึ้น

2.4.2.3 ง่ายต่อการควบคุมแรงดันบัส ระบบกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจาย ณ ที่ตำแหน่งของบัสระหว่างกลางที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าจะส่งผลให้ระบบมีความง่ายกว่า เบากว่า เล็กกว่า และมีราคาถูกลงกว่าระบบที่ไม่ได้ใช้บัสแรงดันไฟฟ้าระหว่างกลาง

2.4.2.4 ความสามารถในการรับมือกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตในช่วงกว้างได้ เนื่องจากการแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นแบบการแปลงสองขั้นตอน การต่อแบบอันดับทำให้ระบบสามารถรองรับกับสถานะการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตในช่วงกว้างได้

2.4.3 โครงสร้างแบบแยกแหล่งจ่าย โครงสร้างการต่อแบบแยกแหล่งจ่ายถูกแสดงในภาพที่ 2-3 (ค) ระบบแยกแหล่งจ่ายถูกสร้างขึ้นมาเพื่อช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมของภาระในระบบความสามารถของโครงสร้างแบบแยกแหล่งจ่ายประกอบด้วยดังนี้

2.4.3.1 สามารถสำรองกำลังไฟฟ้าได้ด้วยแบตเตอรี่ มีระบบหลากหลายประเภทที่ต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง การสำรองกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ถูกนำมาใช้ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าหลักของระบบเกิดขาดหายไป

2.4.3.2 การแยกเฟส รูปแบบอื่นๆ ของการเพื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการจ่ายกำลังไปที่อุปกรณ์หรือภาระจากเฟสของการไฟฟ้าที่แยกออกมา ซึ่งในบางกรณีของการเพื่อสามารถทำได้โดยการใช้หน่วยประมวลผลกำลังที่แยกออกมาสำหรับแต่ละเฟส

2.4.3.3 บัสที่มีมากกว่าสอง การเพื่อกำลังไฟฟ้าในระบบสามารถทำได้โดยใช้บัสของการกระจายกำลังไฟฟ้าที่มีจำนวนของบัสแรงดันมากกว่าสองบัส โดยอาศัยโครงสร้างแบบแยกเครื่องแปลงผันภาระสำหรับแต่ละบัส

2.4.4 โครงสร้างแบบแยกภาระ การต่อแบบแยกภาระเป็นการนำเอาเครื่องแปลงผันภาระมาทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่มีความแตกต่างกัน ดังถูกแสดงในภาพที่ 2-3 (ง) โครงสร้างนี้ถูกใช้ด้วยเหตุและผลของการพิจารณาดังต่อไปนี้

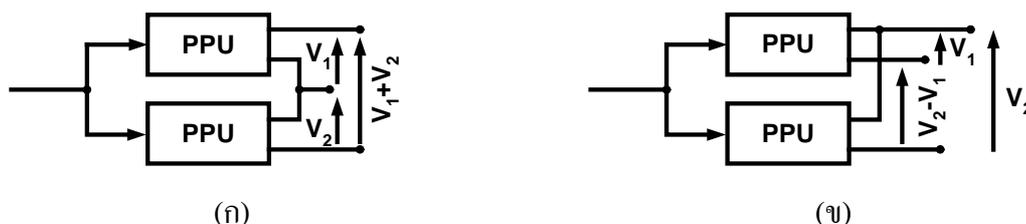
2.4.4.1 ภาระที่ถูกกระจาย ในระบบขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน เช่น ระบบในยานอวกาศ คอมพิวเตอร์แบบเมนเฟรม และอื่นๆ ซึ่งลักษณะของภาระนั้นถูกกระจายไปยังส่วนต่างๆ การกระจายกำลัง ณ ที่ระดับแรงดันลอจิกไม่สามารถทำได้เพราะเนื่องจากจะทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการนำสูงและความยุ่งยากของฮาร์ดแวร์ที่กระจายออกไปต้องการแหล่งจ่ายแรงดันในรูปแบบที่หลากหลาย ระบบกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจายที่ประกอบด้วยบัสแรงดันไฟฟ้าส่วนกลางเป็นทางออกโดยทั่วไปของปัญหาดังที่ได้กล่าวมาตั้งแต่ต้น ในบางระบบ แต่ละภาระถูกจัดให้มีเครื่องแปลงผันที่แยกต่างหากเพื่อที่จะให้ได้แหล่งจ่ายแรงดันตามที่ต้องการ

2.4.4.2 การควบคุมระบบที่ภาระถูกกระจาย แหล่งจ่ายกำลังแบบรวมศูนย์ไม่มีความสามารถเพียงพอที่จะควบคุมแรงดันที่จุดต่อร่วมของภาระได้ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ที่บัสแรงดันปัญหานี้ถูกกำจัดได้โดยใช้ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายที่ประกอบด้วยเครื่องแปลงผันภาระที่แยกออกมาซึ่งถูกนำมาวางในตำแหน่งที่ใกล้ชิดติดกับภาระแต่ละตัวให้มากที่สุด

2.4.4.3 การลดสัญญาณรบกวน เมื่อใดก็ตามที่ภาระถูกต่อเข้ากับบัสรวม ปรากฏการณ์การรบกวนสามารถเกิดขึ้นได้ที่จุดต่อร่วมดังกล่าว เทคนิคของการแยกภาระออกช่วยลดปัญหานี้ลงได้ เครื่องแปลงผันภาระและวงจรกรองที่ต่ออยู่สามารถกำจัดผลกระทบของการรบกวนระหว่างโมดูลได้

2.4.4.4 การสำรองแบตเตอรี่ที่สามารถเลือกได้ ในบางกรณีของการใช้งาน ระบบมีความต้องการที่จะกำหนดให้มีการสำรองแบตเตอรี่เพียงเพื่อจ่ายกำลังให้กับส่วนที่อ่อนไหวที่สุดของระบบ โดยปราศจากความต้องการแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่โดยไม่จำเป็น

2.4.5 โครงสร้างการจัดเรียงแบบทับซ้อน โครงสร้างการจัดเรียงแบบทับซ้อนของหน่วยประมวลผลกำลังไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดยการต่อร่วมกันของเอาต์พุตของหน่วยประมวลผลกำลังไฟฟ้าในแต่ละตัว เพื่อที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าแตกต่างจากแรงดันไฟฟ้าในแบบทั่วไป เทคนิคนี้สามารถถูกนำมาใช้เมื่อต้องการแรงดันเอาต์พุตที่ระดับแรงดันค่าใดๆ โดยอาศัยโมดูลวงจรเครื่องแปลงผันที่เป็นแบบมาตรฐาน สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานประเภทที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูง โครงสร้างการต่อแบบเรียงทับซ้อนของภาพที่ 2-4 (ก) กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันปกติของหน่วยประมวลผลกำลังที่ถูกต่อแบบเพิ่มแรงดัน สำหรับที่การประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าค่าต่ำมากๆ โครงสร้างที่ถูกต่อแบบลดแรงดันของภาพที่ 2-4 (ข) กำหนดให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างแรงดันของหน่วยประมวลผลกำลังแบบเดียว ซึ่งจะส่งผลถึงการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของบางระบบที่ประยุกต์ใช้หลักการนี้



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายชนิดที่ระบบถูกต่อแบบเรียงทับซ้อน
(ก) โครงสร้างเรียงทับซ้อนชนิดเพิ่มค่า (ข) โครงสร้างเรียงทับซ้อนชนิดลดค่า

ตารางที่ 2-4 สรุปข้อดีและข้อเสียของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย

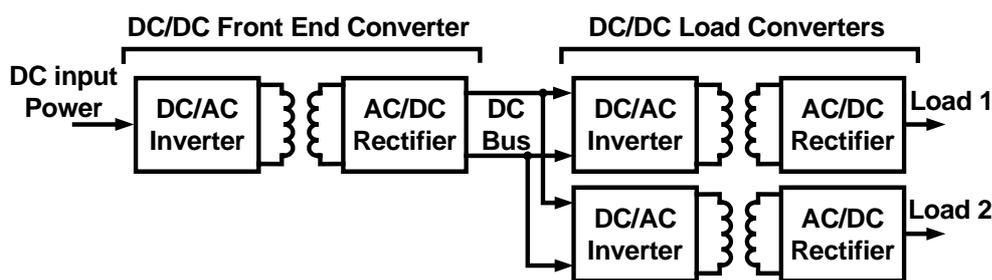
ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> ● คุณภาพกำลังไฟฟ้าดี ● น้ำหนักเบา ● สามารถประหยัดขนาดและพื้นที่ ● ระบบมีการแยกโคด ● กำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจายออกไปช่วยลดความสูญเสีย ● ระบบมีความยืดหยุ่น ● ระบบมีความสามารถในการขยายในอนาคต ● ระบบมีการเพื่อ 	<ul style="list-style-type: none"> ● ระบบเกิดการรบกวนได้ง่าย ● ราคาแพง ● การระบายความร้อน (ในกรณีเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ถูกติดตั้งอยู่บนบอร์ดชุดประมวลผล)

ตารางที่ 2-5 สรุปการประยุกต์ใช้งานขั้นพื้นฐานและข้อดีของแต่ละโครงสร้างในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย

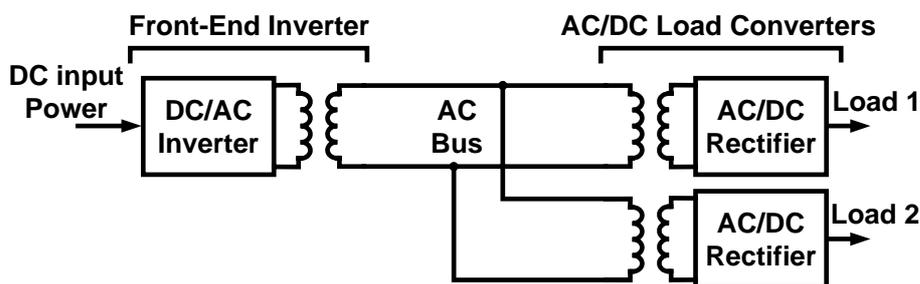
โครงสร้าง	การประยุกต์ใช้งาน	ข้อดี
แบบอันดับ	<ul style="list-style-type: none"> ระบบที่แรงดันอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงกว้าง ระบบที่ต้องการสำรองกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ 	<ul style="list-style-type: none"> สามารถควบคุมแรงดันที่ตำแหน่งจุดต่อร่วมของภาระได้ดี การกระจายระบบทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ
แบบขนาน	<ul style="list-style-type: none"> ระบบต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ความน่าเชื่อถือสูง ระบบเป็นโมดูลมีการแยกเป็นสัดส่วน 	<ul style="list-style-type: none"> การจัดการความร้อนทำได้ง่าย ลดความเครียดบนสวิทช์สารกึ่งตัวนำ ซ่อมบำรุงได้ในขณะจ่ายกำลังไฟฟ้า การลดขนาดของวงจรกรองอินพุต การเผื่อ
แบบแยกภาระ	<ul style="list-style-type: none"> ระบบที่ภาระถูกกระจายออกไป ระบบมีการสำรองกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่เฉพาะตำแหน่ง ระบบมีการสำรองกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ในจุดต่อร่วม 	<ul style="list-style-type: none"> ควบคุมแรงดันที่ตำแหน่งภาระได้ดี การกระจายระบบทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ การลดสัญญาณรบกวนจากเครื่องแปลงผันภาระอื่นๆ ที่ต่ออยู่ในระบบ
แบบแยกแหล่งจ่าย	<ul style="list-style-type: none"> ระบบสามารถสำรองกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ ระบบที่มีการแยกเฟส ระบบมีการเผื่อของบัสแรงดัน 	<ul style="list-style-type: none"> สามารถรองรับสภาวะความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นกับระบบได้ สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลายบัสแรงดันที่ต่ออยู่ในระบบ
แบบทับซ้อน	<ul style="list-style-type: none"> ระบบที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งานในระดับที่แตกต่างกัน ระบบพิกัดแรงดันสูง ระบบพิกัดแรงดันต่ำ ระบบพิกัดกระแสสูง 	<ul style="list-style-type: none"> ใช้เครื่องแปลงผันมาตรฐาน/ได้ระดับของแรงดันใดๆ ตามกำหนด ใช้เครื่องแปลงผันจำนวนน้อย/ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตหลากหลาย มีระบบการเผื่ออยู่ภายใน/โมดูลที่ใช้มีจำนวนมากกว่า 1 โมดูล ประสิทธิภาพได้รับการปรับปรุง

2.5 สถาปัตยกรรมระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย

ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายแบบพื้นฐานดังที่ได้ถูกกล่าวถึงในตอนที 2.4 นั้น ได้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างเป็นสถาปัตยกรรมระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ สถาปัตยกรรมระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้รวมเอาระบบบัสส่วนกลางที่มีการกระจายและได้กำหนดให้มีการใช้รูปแบบของการต่อร่วมแบบผสมผสานระหว่างโครงสร้างแบบอันดับและโครงสร้างแบบแยกภาระ แรงดันบัสสามารถเป็นได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เพราะฉะนั้นข้อแตกต่างโดยพื้นฐานของทั้งสองส่วนนี้จึงได้ถูกนำมาเพื่อกำหนดรูปแบบของสถาปัตยกรรมของระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบดังนี้คือ สถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นในด้านการออกแบบ ไม่ว่าจะเลือกออกแบบระบบด้วยสถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะส่งผลกระทบต่อเนื่องกับการเลือกใช้อุปกรณ์และสมรรถนะของระบบโดยตรง



(ก)

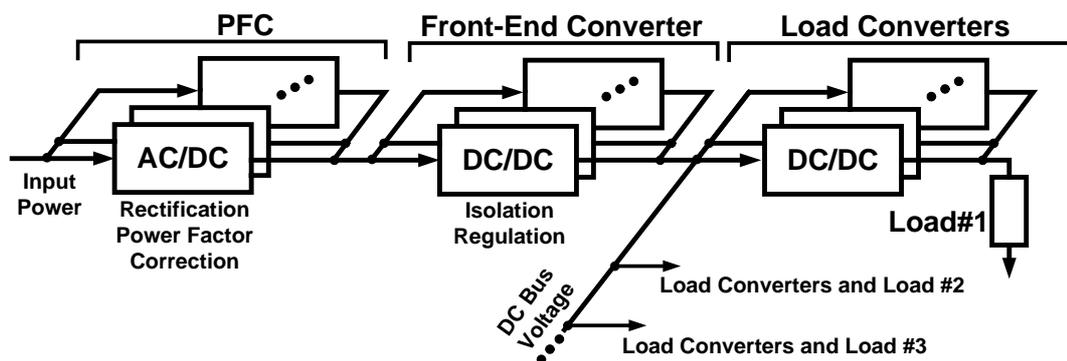


(ข)

ภาพที่ 2-5 โครงสร้างสถาปัตยกรรมของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย (ก) ระบบเป็นบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ข) ระบบเป็นบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

สถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2-5 ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายถูกตั้งข้อสมมุติฐานไว้ว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เป็นอินพุตให้กับเครื่องแปลงผันส่วนหน้า สถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วยเครื่องแปลงผันด้วยเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสองขั้นตอนคือ เครื่องแปลงผันส่วนหน้าและเครื่องแปลงผันภาาระบบต้องเพิ่มการแปลงผันกลับและภาคการเรียงกระแสอย่างน้อยอีก 2 ภาคด้วยกัน จึงเป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบไม่ดีมากนัก

ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายชนิดบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นระบบที่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าระบบบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากการแปลงผันที่ใช้เป็นเพียงแค่หนึ่งการแปลงกลับและอีกหนึ่งการเรียงกระแสเท่านั้น ระบบบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงได้รับการพัฒนาอยู่ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่สูงสามารถแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำได้โดยใช้หลักการการผสมความหนาแน่นของพัลส์หรือแปลงไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้หลักการเรียงกระแสแบบธรรมดา ข้อได้เปรียบของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายชนิดบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับประกอบด้วย ระบบมีประสิทธิภาพสูง มีความสะดวกต่อการแปลงแรงดันและกระแสไฟฟ้า มีการแยกกันของกราวด์ส่งผลให้ไม่เกิดการรบกวนขึ้นในระบบและการดับอาร์คทำได้ง่ายที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตาม สถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับยังคงไม่ได้รับความนิยมมากนักเพราะเนื่องจากยังมีปัญหาอีกมากมายที่ซ่อนเร้นอยู่ภายในระบบดังกล่าว เช่น ปัญหาจากคลื่นสนามแม่เหล็กที่กระจายออกไปเป็นสัญญาณรบกวนให้กับระบบข้างเคียง ระบบต้องใช้ตัวนำชนิดพิเศษเพื่อใช้สำหรับเป็นบัสเชื่อมต่อ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ระบบมีต้นทุนราคาที่สูงขึ้น กล่าวเพิ่มเติมอีกได้ว่า ผลกระทบที่เกิดจากกระแสไหลที่ผิวเป็นผลที่เกิดจากความต้านทานบัสที่ความถี่สูง เพื่อที่จะลดการสูญเสียที่บัสลง ในทางปฏิบัติความถี่บัสแรงดันไฟฟ้าต้องถูกจำกัดให้อยู่ในช่วง 20-100 kHz เป็นผลให้ตัวกรองของบัสแรงดันที่ถูกเรียงกระแสต้องใช้ขนาดใหญ่ การเรียงกระแสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในเครื่องแปลงผันภาาระอาจเป็นเหตุให้เกิดปัญหาที่นำวิตกกังวลเป็นอย่างยิ่งอันเนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ถูกฉีดเข้าไปที่บัสแรงดัน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ แต่ละเครื่องแปลงผันภาาระต้องถูกออกแบบเพื่อให้ระบบสามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังและให้มีความผิดเพี้ยนอันเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกส์ที่กระแสนินพุตต่ำสุดท้าย โครงสร้างการขนานของโมดูลเครื่องแปลงผันในระบบบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอาจต้องใช้เทคนิคการควบคุมที่ยุ่งยากมากกว่าเพราะเนื่องจากความต้องการของการซิงโครไนซ์เซชันและต้องควบคุมค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละโมดูลต้องเท่าเทียมกัน



ภาพที่ 2-6 ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายชนิดสถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2.5.1 สถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงยังคงได้รับความนิยมในวงการทำงานวิจัยและอุตสาหกรรมการผลิตแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอย่างแพร่หลายและนับวันจะมีมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งปัจจุบันกลับกลายเป็นเทคโนโลยีหลักที่มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายเพราะเนื่องจากว่า ระบบมีการควบคุมต่ำมีการสูญเสียจากการนำที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำและเนื่องจากสามารถนำเอาโมดูลเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบมาตรฐานมาประยุกต์ใช้งานได้ ซึ่งผลที่ได้ตามมามีคือ ทำให้ระบบมีความง่ายต่อการออกแบบและพัฒนา ในระบบสถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วยแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าพิคกิ้งแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 12 V ถึง 360 V ในการประยุกต์ใช้งานมีตั้งแต่ระดับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลไปจนถึงในระบบอุตสาหกรรมทหารที่พิคกิ้งกำลังไฟฟ้า 1 kW และระบบคอมพิวเตอร์เมนเฟรมที่มีพิคกิ้งกำลังไฟฟ้ามากกว่า 100 kW ในคอมพิวเตอร์เมนเฟรมที่มีสมรรถนะด้านความเร็วของการประมวลผลสูงนั้นต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีความแตกต่างออกไป ระบบมีหน้าที่และวงจรที่สลับซับซ้อนมากขึ้น มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงและระดับแรงดันแหล่งจ่ายมีค่าต่ำ (0.7-3.6 V) เงื่อนไขเหล่านี้จึงส่งผลให้ผู้ออกแบบต้องออกแบบระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดที่มีความพิเศษเป็นอย่างยิ่ง สถาปัตยกรรมระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายนั้นสามารถรับมือกับความท้าทายอันนี้ได้และสามารถกล่าวเพิ่มเติมได้ว่า สามารถกำหนดให้ระบบนั้นมีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น มีความสามารถในการซ่อมแซมและง่ายต่อการบำรุงรักษา ตลอดจนระบบสามารถใช้โครงสร้างแบบขนานเพื่อเพิ่มการเผื่อกำลังไฟฟ้าในอนาคต ภาพที่ 2-6 แสดงสถาปัตยกรรมระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายของระบบคอมพิวเตอร์เมนเฟรม การทำงานของระบบเริ่มจากอินพุตของระบบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้โครงสร้างการต่อในแบบขนาน แต่ละโมดูลของเครื่องแปลงผันจะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแส วงจรการแก้ไขตัวประกอบกำลังและวงจรกรอง

เครื่องแปลงผันส่วนหน้าทำงานในลักษณะโครงสร้างขนานเพื่อที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าตามความต้องการของภาระ เครื่องแปลงผันภาระถูกต่อในลักษณะขนานเพื่อที่จะรองรับกระแสภาระที่มีพิกัดสูงเช่นกัน ระบบที่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2-6 นี้ถูกสร้างขึ้นมาจากระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายดังที่ได้ถูกบรรยายไว้ในตอนที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วยการต่อแบบอันดับ 3 ระดับ การต่อแบบขนาน การต่อแบบแยกภาระและการต่อแบบเรียงทับซ้อน

2.5.2 การพิจารณาเพื่อออกแบบระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายการออกแบบระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายชนิดบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีสิ่งต่างๆ ที่ต้องพิจารณาดังนี้คือ การเลือกระดับของแรงดันบัสที่มีการกระจายออกไป การออกแบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าและเครื่องแปลงผันภาระ และสุดท้ายเป็นการนำเอาทุกภาคส่วนที่ได้ออกแบบไว้มารวมกันเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

2.5.2.1 การเลือกแรงดันบัส การเลือกคุณลักษณะสมบัติของแรงดันบัสเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการออกแบบระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายเนื่องจากมันมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบกำลังทั้งหมด การควบคุมระดับของแรงดันบัสและคิกริชของแรงดันบัสเป็นคุณลักษณะสมบัติหลักของบัสไฟฟ้ากระแสตรง สิ่งสำคัญที่ต้องใช้ในการเลือกแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง คือ

ก) ระดับกำลังไฟฟ้า เพื่อที่จะลดการกระจายความสูญเสียลงให้น้อยที่สุดแรงดันบัสต้องมีค่าสูงเพียงพอที่จะลดขนาดของกระแสที่กระจายไปให้อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ ด้วยวิธีการเช่นนี้ เป็นผลให้ระบบที่มีระดับบัสแรงดันไฟฟ้าที่สูงจึงถูกออกแบบให้นำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีระดับกำลังไฟฟ้าสูงด้วย

ข) การพิจารณาความปลอดภัย ถ้าความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญต่อการพิจารณาออกแบบระบบ แรงดันบัสต้องถูกกำหนดให้อยู่ในระดับมาตรฐานของความปลอดภัย ในกรณีทั้งหมดนี้หมายถึงแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงต้องต่ำกว่า 60 V เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความเป็นไปได้ของการอาร์กที่จะเกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงต้องถูกเลือกให้มีค่าต่ำกว่า 32 V

ค) ความต้องการสำรองกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ ในระบบต่างๆ ที่ประกอบด้วยระบบการสำรองกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ ระบบแรงดันบัสต้องเข้ากันได้กับแรงดันแบตเตอรี่เพื่อที่จะกำจัดส่วนที่ต้องใช้ในการคายประจุของแบตเตอรี่ ตัวอย่างของการใช้งานระบบนี้คือ ในระบบการสื่อสาร สิ่งนี้เป็นปัจจัยเดียวที่ใช้ในการพิจารณาเลือกระดับของแรงดันบัสไฟฟ้า

ตารางที่ 2-6 สรุปค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย

ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	การประยุกต์ใช้
<ul style="list-style-type: none"> ● 12 V 	<ul style="list-style-type: none"> ● อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การควบคุมอัตโนมัติและในระบบคอมพิวเตอร์แบบพกพา
<ul style="list-style-type: none"> ● 24 V และ 48 V หรือ - 48 V 	<ul style="list-style-type: none"> ● อุตสาหกรรมระบบการสื่อสารและในระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์
<ul style="list-style-type: none"> ● 28 V และ 270 V 	<ul style="list-style-type: none"> ● อุตสาหกรรมการบิน อวกาศและทางการทหาร
<ul style="list-style-type: none"> ● 300 V และหรือ 400 V 	<ul style="list-style-type: none"> ● อุตสาหกรรมการผลิตแหล่งจ่ายแบบสวิตช์และทั่วไป

การควบคุมแรงดันบัสมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบกำลัง บัสแรงดันไฟฟ้าที่ถูกควบคุมได้เป็นอย่างดียอมทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงสุด เพื่อให้การควบคุมเป็นที่น่าพอใจ การเลือกเครื่องแปลงผันส่วนหน้าต้องเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการควบคุมแรงดันที่บัสมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย โดยทั่วไปใช้เครื่องแปลงผันชนิดแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมระดับแรงดันบัสมต้องถูกระบุและกำหนดลงไปบนความต้องการสมรรถนะ โดยรวมทั้งหมดของระบบ

2.5.2.2 เครื่องแปลงผันส่วนหน้า ระบบมีหน้าที่ดังนี้

- ก) แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและกรองแรงดัน
- ข) แก้ไขตัวประกอบกำลังและลดกระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย
- ค) แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
- ง) การเก็บรักษาพลังงานเพื่อยกแรงดันขึ้น

ในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายอย่างง่ายที่สุดประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ตัวกรองและวงจรเรียงกระแสอยู่ในตอนเดียวกันกับเครื่องแปลงผันส่วนหน้า แรงดันบัสมที่มีการควบคุมที่ไม่ดีมากนักและเครื่องแปลงผันภาระต้องถูกออกแบบให้สามารถยอมรับย่านแรงดันอินพุตที่เปลี่ยนแปลงในย่านที่กว้างได้ ถ้าจำเป็นต้องมีการแก้ไขตัวประกอบกำลัง เครื่องแปลงผันส่วนหน้านี้ต้องรวมเอาหน้าที่ของการแก้ไขตัวประกอบกำลังนี้ไว้ด้วย

2.5.2.3 เครื่องแปลงผันภาระ จุดมุ่งหมายของแนวคิดระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายเป็นการออกแบบระบบเพื่อที่จะทำให้ระบบมีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพสูง การรบกวนต่ำ และมีต้นทุนของเครื่องแปลงผันภาระที่มีราคาต่ำ งานวิจัยในส่วนของเครื่องแปลงผันภาระนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาวงจรใหม่ๆ ให้มีความเหมาะสมสำหรับเป็นโมดูลเครื่องแปลงผันภาระที่มีพิกัด

และความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง งานวิจัยดังกล่าวนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอาศัยการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังและวัสดุที่นำมาใช้ทำวงจรมแม่เหล็กเพื่อต้องการให้ได้ระบบที่มีความหนาแน่นของกำลังและประสิทธิภาพสูงที่สุดในอุตสาหกรรมการผลิตแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซ์ซึ่ง ราคาและประสิทธิภาพของโมดูลเครื่องแปลงผันภาระเป็นตัวแปรที่อ่อนไหวที่สุด

2.5.2.4 การรวมระบบและผลกระทบทางพลวัต ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายมักเกี่ยวข้องกับการต่อเชื่อมกันของโมดูลเครื่องแปลงผันในโครงสร้างแบบขนานและแบบอันดับเสมอ วงจรกรองเพื่อป้องกันการรบกวนจากการแทรกสอดของสนามแม่เหล็กเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับแต่ละเครื่องแปลงผันในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายซึ่ง วงจรกรองที่เพิ่มเข้ามาดังกล่าวสามารถไปเพิ่มความสลับซับซ้อนในการวิเคราะห์ระบบได้ด้วยเช่นกัน

ก) เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกขนาน เมื่อโมดูลเครื่องแปลงผันแบบเดียวกันถูกนำมาต่อในโครงสร้างแบบขนาน เสถียรภาพของระบบจะไม่มีผลกระทบ แต่ละโมดูลสามารถติดตั้งตัวเก็บประจุกรองด้านเอาต์พุตในแต่ละโมดูลได้เอง ในกรณีเช่นนี้ ฟังก์ชันโอนย้ายและรูปเกณฑ์ทั้งหมดของโมดูลที่ถูกขนานจะเหมือนกันกับรูปเกณฑ์ที่ได้จากโมดูลเดี่ยว จึงสามารถกำหนดให้ภาระถูกเปลี่ยนในลักษณะที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของโมดูลได้ ส่งผลให้แต่ละโมดูลเครื่องแปลงผันสามารถทำงานได้ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละส่วนและจำนวนของแต่ละตัวของโมดูลที่เท่าเทียมกันสามารถนำมาต่อในแบบขนานได้โดยปราศจากผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับคุณลักษณะของรูปเกณฑ์ทั้งหมด แต่ในระบบที่โมดูลมีการแบ่งใช้ตัวกรองแรงดันไฟฟ้าร่วมกัน จะทำให้โมดูลที่ถูกต่อเพิ่มเข้ามาที่โครงสร้างแบบขนานจะไปลดความมั่นคงของระบบลงในขณะที่จำนวนของโมดูลถูกทำให้เพิ่มขึ้น หรือ เมื่อโมดูลเครื่องแปลงผันที่มีความไม่เท่าเทียมกันถูกนำมาต่อแบบขนานจะส่งผลให้ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงความมั่นคงของระบบเป็นสิ่งสำคัญ

ข) เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกต่อแบบอันดับ สาเหตุที่เป็นไปได้อีกหนึ่งประการของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายที่ขาดความมั่นคงคือผลกระทบของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่ทำหน้าที่จ่ายภาระให้กับเครื่องแปลงผันภาระ อิมพีแดนซ์ด้านอินพุตของเครื่องแปลงผันภาระสามารถโมเดลได้เป็นค่าความต้านทานลบที่ขึ้นอยู่กับว่าความถี่ตัดมุมศูนย์ของรูปเกณฑ์ระบบรวม ค่าความต้านทานลบนี้สามารถทำให้ระบบเครื่องแปลงผันแบบส่วนหน้านี้กลายเป็นไม่มีความมั่นคงได้เพราะเนื่องจากระบบถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดความมั่นคงในกรณีภาระเป็นความต้านทาน มันแสดงให้เห็นได้ว่าสำหรับวงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้าต้องถูกออกแบบให้มีความถี่ตัดผ่านเกณฑ์ศูนย์ที่สูงและมีเกณฑ์ป้อนกลับที่มีค่า

สูงเพียงพอเพื่อที่จะคงรักษาไว้ซึ่งความมั่นคงของระบบ เทคนิคการออกแบบโดยทั่วไปสามารถนำมาใช้เพื่อให้เกิดความเหมาะสมที่สุดในการออกแบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้า แต่การออกแบบควรแสดงให้เห็นจริงว่าต้องนำไปใช้กับภาระประเภทใดหรืออย่างน้อยต้องประมาณว่าภาระเป็นความต้านทานที่มีค่าความชันเป็นลบ

ค) การพิจารณาออกแบบวงจรกรองเพื่อที่จะป้องกันการรบกวนอันเกิดจากการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อที่จะลดการรบกวนลงให้มากที่สุด ระบบการกรองที่เหมาะสมจึงต้องถูกนำมาเพื่อติดตั้งในระบบกำลังที่ถูกกระจาย การติดตั้งของวงจรกรองการรบกวนที่เกิดจากคลื่นสนามแม่เหล็กนั้นจะกระทำที่ตำแหน่งอินพุตของเครื่องแปลงผันส่วนหน้าและที่ตำแหน่งอินพุตของแต่ละเครื่องแปลงผันภาระ ซึ่งผลของการต่อลักษณะนี้อาจทำให้เกิดผลการรบกวนที่มีผลกระทบต่อกันได้ เทคนิคการออกแบบที่เหมาะสมจึงต้องถูกนำมาใช้เพื่อที่จะลดผลของปฏิกิริยาการรบกวนที่เกิดขึ้นและเพื่อที่จะมั่นใจได้ว่าสมรรถนะของระบบยังมีความเหมาะสมดี

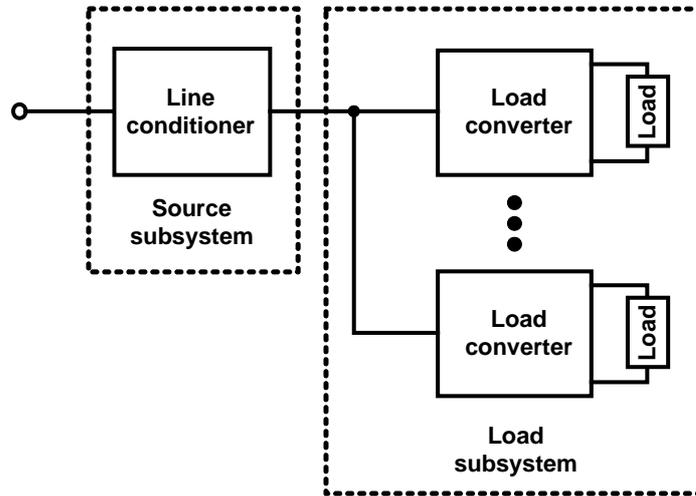
2.5.2.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพ เพราะเนื่องจากขนาดและความยุ่งยากซับซ้อนของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ถูกกระจาย จึงทำให้ระบบดังกล่าวไม่สามารถออกแบบได้ง่ายเหมือนกับระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไป ดังนั้นในการวิเคราะห์และออกแบบระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบของเทอมในระบบย่อยของแต่ละส่วนที่นำมาประกอบกันขึ้นเป็นระบบใหญ่

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบย่อยดังกล่าวถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายอย่างสมบูรณ์ ประเด็นที่สำคัญต่อมาเมื่อนำเอาระบบย่อยดังกล่าวมาต่อร่วมกันคือ เรื่องปัญหาเสถียรภาพของระบบ ที่เกิดจากผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่างระบบย่อยดังกล่าว แม้ว่าระบบย่อยนี้จะถูกออกแบบมาอย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถทำงานในลักษณะแยกเดี่ยวได้ดีก็ตาม เสถียรภาพของระบบยังคงสามารถกลับกลายมาเป็นปัญหาใหญ่ได้หลังจากมีการนำระบบย่อยที่ดีดังกล่าวมาต่อร่วมกัน

ภาพที่ 2-7 แสดงระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายอย่างง่ายที่ประกอบไปด้วยส่วนระบบย่อยของแหล่งจ่ายและส่วนระบบย่อยของภาระ กระบวนการออกแบบที่เป็นไปได้ในรูปแบบแรกสำหรับระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายคือ ให้เริ่มต้นพิจารณาออกแบบในส่วนเครื่องแปลงผันที่ทำหน้าที่ในการปรับปรุงรูปคลื่นกระแสอินพุตแยกออกมาจากระบบใหญ่ก่อน โดยไปกำหนดให้ค่าขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์ระบบย่อยของภาระให้มีค่าขนาดมากกว่าขนาดของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ระบบย่อยของแหล่งจ่าย

ภาพที่ 2-8 แสดงระบบย่อยทั้ง 2 ระบบที่ถูกนำมาต่อร่วมกันในแบบอนุกรม คุณลักษณะของแต่ละระบบย่อยสามารถวิเคราะห์และออกแบบได้ด้วยกระบวนการและวิธีออกแบบแหล่งจ่ายกำลัง

ไฟฟ้าแบบสวิตช์โดยทั่วไป การพิจารณาฟังก์ชันโอนย้ายทั้งหมดของระบบที่ถูกต่อเข้าด้วยกันสามารถอธิบายได้จากสมการโอนย้ายของแต่ละระบบย่อย (F_A และ F_B) และอิมพีแดนซ์ของระบบ

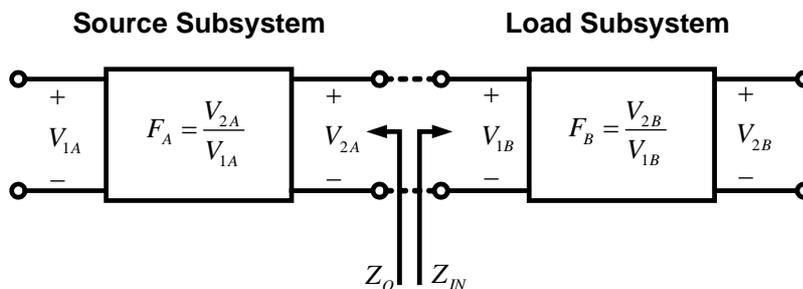


ภาพที่ 2-7 บล็อกไดอะแกรมของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายชนิดการแปลง 2 สถานะ

สมการฟังก์ชัน โอนย้ายของระบบทั้งหมดคือ

$$F_{AB} = \frac{F_{2B}}{V_{1A}} = \frac{F_A F_B}{1 + T_m} \tag{2-7}$$

เมื่อกำหนดให้ F_{AB} คือ ฟังก์ชันโอนย้ายของระบบที่ถูกต่อร่วมกัน F_A คือ ฟังก์ชันโอนย้ายของระบบย่อยของแหล่งจ่าย F_B คือ ฟังก์ชันโอนย้ายของระบบย่อยของภาระ Z_O คือ อิมพีแดนซ์ด้านออกของระบบย่อยของแหล่งจ่าย Z_{IN} คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของระบบย่อยของภาระ



ภาพที่ 2-8 บล็อกไดอะแกรมระบบย่อยที่ถูกต่อแบบอันดับ

สมมุติให้ระบบย่อยทั้งสองถูกออกแบบมาให้มีเสถียรภาพในแต่ละโมดูล จากสมการที่ (2-7) อัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ที่ตำแหน่งของบัสแรงดันไฟฟ้ากำหนดให้เป็นดังนี้

$$T_m = \frac{Z_O}{Z_{IN}} \quad (2-8)$$

ซึ่งสมการนี้สามารถพิจารณาให้เป็นรูปเกณฑ์ของระบบที่ถูกนำมาต่อร่วมกันและสามารถนำมาพิจารณาเพื่อหาเสถียรภาพและผลกระทบของภาระที่มีต่อระบบได้เช่นกัน

ถ้า $|Z_O| \ll |Z_{IN}|$ เป็นจริงในทุกๆ ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อนั้น ผลกระทบของภาระไม่มีความสำคัญต่อระบบอีกต่อไปและเสถียรภาพของระบบหลักจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพที่ได้จากแต่ละระบบย่อยที่ต่ออยู่ภายในระบบนั้น แต่อย่างไรก็ตาม ในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายโดยทั่วไปแล้ว ระบบไม่สามารถคงเงื่อนไข $|Z_O| \ll |Z_{IN}|$ ไว้ได้เสมอไป เมื่อค่าอิมพีแดนซ์นี้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังที่ได้กล่าวมา กล่าวคือ $|Z_O|$ มากกว่า $|Z_{IN}|$ ในกรณีนี้ Nyquist Criterion สามารถนำมาใช้กับสมการรูปเกณฑ์ดังกล่าวเพื่อพิจารณาเสถียรภาพของระบบที่ถูกนำมาต่อร่วมกันต่อไป

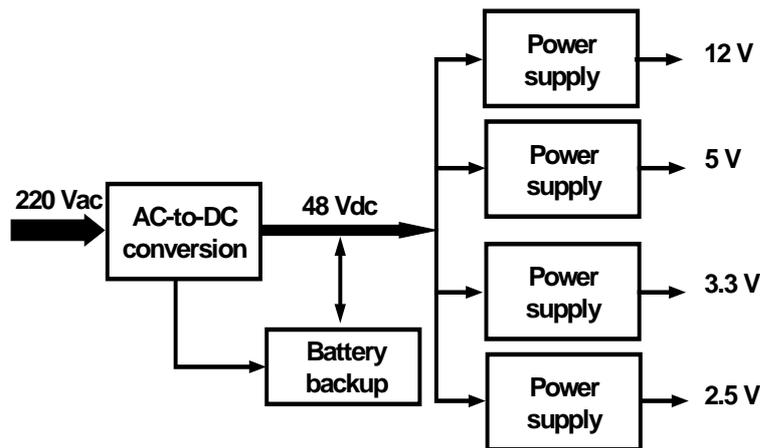
เมื่อกำหนดให้สมการคุณลักษณะของระบบ คือ $1+T_m = 0$ จากสมการคุณลักษณะนี้เองจึงสามารถนำไปสู่การพิจารณาหาความมีเสถียรภาพและตำแหน่งค่ารากของระบบทั้งหมดได้ ประกอบกับระบบนี้ยังคงสามารถใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบเชิงเส้นทั่วไปเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และพิจารณารูปเกณฑ์ต่างๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น สามารถใช้ Nyquist Criterion กับสมการรูปเกณฑ์ T_m เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของระบบได้ เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2-7) การวิเคราะห์จะต้องขึ้นอยู่กับเงื่อนไขทั้ง 2 ข้อนี้ที่สำคัญคือ

$$F_{AB} \approx F_A F_B \quad \text{เมื่อ} \quad T_m \ll 1 \quad (2-9)$$

$$F_{AB} \approx \frac{F_A F_B}{T_m} \quad \text{เมื่อ} \quad T_m \gg 1 \quad (2-10)$$

เมื่อนำทั้ง 2 ระบบย่อยมาต่อร่วมกัน โดยกำหนดการพิจารณาจากเงื่อนไขในสมการที่ (2-9) ว่าเป็นจริงเมื่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป คุณสมบัติของระบบย่อยทั้ง 2 จะเป็นแบบแยกอิสระจากกัน (ระบบย่อยไม่มีผลกระทบซึ่งกันและกัน) ในกรณีนี้การวิเคราะห์และออกแบบระบบถูกทำให้ง่ายขึ้น เพราะเนื่องจากแต่ละระบบย่อยสามารถออกแบบให้อิสระต่อกันได้และสมรรถนะของระบบที่ถูกต่อร่วมกันสามารถคาดเดาได้จากสมรรถนะของแต่ละระบบย่อยในแต่ละตัว

2.5.3 ตัวอย่างการพิจารณาเพื่อออกแบบระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจายสำหรับระบบการสื่อสาร โครงสร้างพื้นฐานของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบการสื่อสารแสดงอยู่ในภาพที่ 2-9 ระบบประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนที่ 1 เป็นวงจรเรียงกระแสซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไลน์ไปเป็นแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 V ซึ่งแรงดัน 48 V นี้จะถูกกระจายไปเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบต่อไป สำหรับในระบบกำลังไฟฟ้าที่มีความอ่อนไหว การสำรองกำลังไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่จึงกลายเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ในกรณีนี้ เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต้องสามารถทำหน้าที่ชดเชยประจุให้กับแบตเตอรี่ได้ เมื่อระบบมีความต้องการ ส่วนที่เหลือเป็นระบบแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัดแรงดัน 48 V ไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในระดับที่ภาระต้องการเช่น 12 V 5V 3.3 V 2.5 V หรือ 0.5 V เป็นต้น ความเชื่อถือได้สูงและคุณภาพที่สูงเป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับระบบสื่อสารและยิ่งกว่านั้นระบบต้องมีการเผื่อกำลังไฟฟ้าไว้ด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 2-9 โครงสร้างพื้นฐานของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบการสื่อสาร

2.5.3.1 วงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรเรียงกระแสทำหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 48 V จากมุมมองตรงจุดนี้ คุณสมบัติที่ต้องการของระบบนี้ คือ ระบบต้องมีประสิทธิภาพสูง มีการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำและตัวประกอบกำลังสูงหรือมีความผิดเพี้ยนของกระแสต้านอินพุตต่ำ สำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงกว่า 250 W วงจรเรียงกระแสที่มีลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบ 2 สถานะเป็นทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้เมื่อพิจารณาอยู่บนพื้นฐานของปัจจัยต้นทุนการผลิตและสมรรถนะที่ได้รับ ระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 สถานะนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนที่ 1 เป็นระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 400 V ซึ่งในตอนนี้ระบบต้องทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลังได้ โดยทั่วไปใช้เครื่องแปลงผันแบบบูสต์เพราะเนื่องจากควบคุมกระแสได้ง่ายและเหมาะสมสำหรับระบบที่ต้องการแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงสูง

ส่วนที่เหลือคือ เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แปลงแรงดัน 400 V ไปเป็นแรงดันขนาด 48 V ฟังก์ชันการแยกโคจรทางไฟฟ้าถูกกระทำอยู่ในส่วนนี้ของการแปลงผันในส่วนนี้ โดยทั่วไปใช้เครื่องแปลงผันแบบบริดจ์ชนิดเลื่อนเฟส

2.5.3.2 วงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่แปลงแรงดันที่บัสไฟฟ้า 48 V ไปสู่ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรลอจิกเกต ดังถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2-9 ในขั้นตอนนี้มีระบบการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีให้เลือกด้วยกัน 2 รูปแบบ ในรูปแบบที่ 1 ถูกเรียกว่า เป็นระบบที่กำลังไฟฟ้าถูกจ่ายอยู่ภายใน (Self Power) และอีกแบบหนึ่งถูกเรียกว่า ระบบที่กำลังไฟฟ้าถูกกระจายออกไป (Distributed Power)

ก) กรณีเครื่องแปลงผันชนิด Self Converter Powering Options ในกรณีนี้ วงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่ถูกต่ออยู่ในระบบนี้ โดยทั่วไปแล้วแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามักมีค่าพิกัดแรงดันเอาต์พุตเป็นแบบหลากหลายค่า เพื่อที่จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้ในหลากหลายพิกัดกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบนี้จะถูกออกแบบให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อยู่ในช่วง 200 ถึง 300 W สิ่งจำเป็นที่เป็นที่ต้องการสำหรับระบบนี้คือ ระบบต้องสามารถเริ่มทำงานได้อย่างนุ่มนวล เอาต์พุตมีการเรียงลำดับ มีการป้องกันการรบกวนที่เกิดขึ้นจากการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าและระบบต้องมีการเผื่อกำลังไฟฟ้าด้วยหลักการ N+1

ข) กรณีเครื่องแปลงผันชนิด On-board Power Module ในกรณีนี้ โมดูลกำลังถูกติดตั้งโดยตรงอยู่บนแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไประบบดังกล่าวถูกออกแบบให้มีพิกัดแรงดันเอาต์พุตเพียง 1 ค่า สิ่งที่เป็นที่ต้องการสำหรับเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดนี้คือ ระบบต้องมีประสิทธิภาพสูง มีการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ มีการป้องกันความเสียหายภายใน วงจรมีขนาดเล็กและสูงน้อยที่สุด และระบบต้องถูกออกแบบให้มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี

ตารางที่ 2-7 สรุปรายละเอียดที่จำเป็นสำหรับการออกแบบเครื่องแปลงผันชนิดที่ถูกติดตั้งอยู่บน
แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย

รายละเอียด	ข้อกำหนด
<p>คุณลักษณะทางไฟฟ้า</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ช่วงแรงดันอินพุต ● แรงดันเอาต์พุต <p>● ช่วงของการทดสอบกระแสการะ</p> <p>คุณลักษณะด้านมิติ</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ขนาด <ul style="list-style-type: none"> ● EMC และ EMI ให้เป็นไปตามมาตรฐาน <ul style="list-style-type: none"> ● ความน่าเชื่อถือ <p>คุณลักษณะด้านวงจรกำลัง</p> <ul style="list-style-type: none"> ● กำลังไฟฟ้าต่ำ (ต่ำกว่า 10 W) ● กำลังไฟฟ้าต่ำถึงปานกลาง (10-50 W) ● กำลังไฟฟ้าปานกลาง (50-100 W) ● กำลังไฟฟ้าปานกลางถึงสูง (100-200 W) ● กำลังไฟฟ้าสูง (มากกว่า 2000 W) <p>คุณลักษณะต่างๆ ไปประกอบด้วย</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 40 V ถึง 60 V หรือ จาก 40 ถึง 72 V ● 5 V (Bipolar หรือ CMOS) ● 3.3 V (CMOS) ● แรงดันพลิวเอาต์พุต 1 % (1% ของแรงดันเอาต์พุต วัดจากค่าขอดถึงขอด) ● เปลี่ยนแปลงในช่วง 10-100% และ 75-100% <ul style="list-style-type: none"> ● ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข Telecom rack และความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าบนบอร์ด <ul style="list-style-type: none"> ● FCC Part 15 Subpart J ● EN 55022 (บนพื้นฐาน CISPR 22) ● ETS 300 132 ● 200,000 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแวดล้อม 45 องศา <ul style="list-style-type: none"> ● วงจร Flyback ● วงจร Flyback-Forward ● วงจร Forward ● วงจร Forward, Push-Pull หรือ Half-Bridge ● วงจร Half หรือ Full Bridge <ul style="list-style-type: none"> ● เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดด้านอินพุต ● สมรรถนะทางพลวัตของระบบ ● การแกว่งของแรงดัน ความปลอดภัยและอื่นๆ

2.6 เทคนิคของการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นองค์ประกอบหนึ่งของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบสวิตซ์ซึ่งทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระประเภทอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งถือได้ว่าเป็นภาระที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าในปัจจุบัน โดยทั่วไปวงจรแปลงผันดังกล่าวทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ไลน์ (50 Hz) ไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การแปลงผันใช้วงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ เมื่อต้องการลดการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่สำหรับทำหน้าที่กรองแรงดันได้ถูกนำมาติดตั้งไว้ในตำแหน่งเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสดังกล่าว เนื่องจากตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ จึงทำให้วงจรเรียงกระแสนี้ดึงกระแสที่มีลักษณะเป็นพัลส์ที่มีค่ายอดของกระแสสูง กระแสดังกล่าวประกอบไปด้วยขนาดของกระแสฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่างๆ เช่น อันดับที่ 3 5 7 และ 9 เมื่อภาระชนิดไม่เป็นเชิงเส้นชนิดนี้ถูกนำมาต่อใช้งานเพิ่มมากขึ้นในระบบไฟฟ้า ระบบจึงกลายเป็นแหล่งกำเนิดของกระแสฮาร์มอนิกส์ให้กับระบบไฟฟ้า เป็นผลทำให้ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมทั้งกระแสและแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูง ตัวประกอบกำลังอินพุตมีค่าต่ำและเกิดปัญหาด้านคุณภาพทางไฟฟ้าต่างๆ อีกมากมาย ปัญหาที่เกิดขึ้นได้กระตุ้นให้เกิดมีการบังคับให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปฏิบัติตามกฎและข้อแนะนำของมาตรฐานฮาร์มอนิกส์ที่ได้บัญญัติขึ้น ซึ่งรายละเอียดของข้อกำหนดได้กล่าวถึงการจำกัดปริมาณของความผิดเพี้ยนกระแสที่ยอมรับได้ในระบบไฟฟ้า ส่งผลให้วงจรเรียงกระแสอย่างง่ายชนิดไดโอดบริดจ์ 1 และ 3 เฟส อาจจะไม่ถูกนำมาใช้งานอีกต่อไปในอนาคต ดังนั้นในการออกแบบวงจรเรียงกระแสที่มีความสามารถในการแก้ไขตัวประกอบกำลังให้ใกล้เคียงหนึ่งและให้ความผิดเพี้ยนกระแสอินพุตต่ำจึงเป็นสิ่งประเด็นหรือหัวข้อที่มีความท้าทายและมีความสำคัญอย่างยิ่งในวงการวิจัยและพัฒนาทั้งในปัจจุบันและอนาคต

ในตอนี่ 2.7, 2.8 และ 2.9 ของวิทยานิพนธ์นี้จะได้นำเสนอความรู้เบื้องต้นของวิธีการแก้ไขตัวประกอบกำลังในทั้ง 2 รูปแบบอย่างพอสังเขป คือ

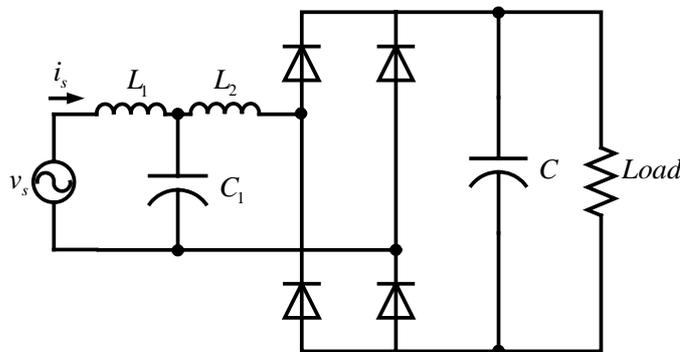
1. วิธีการแบบแอกทีฟ
2. วิธีการแบบพาสซีฟ

สิ่งที่สำคัญของเนื้อหานี้ได้มุ่งเน้นไปที่วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดต่างๆ เช่น วงจรแบบบัค บูสท์ บัค-บูสท์ ซีพิก และซุก ที่มีคุณสมบัติและความสามารถในการนำมาใช้เป็น โมดูลเรียงกระแสเพื่อทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลังในวิธีแบบแอกทีฟและสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีผลการตอบสนองได้ดีและยังได้กล่าวถึงแบบแผนต่างๆ ของกรรมวิธีการควบคุมวงจรเครื่องแปลงผันที่ทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟเช่นกัน

2.7 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา วงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำงานอยู่ในโหมดการสวิตช์ ชนิด 1 เฟส ได้ถูกนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลายในภาคธุรกิจ อุตสาหกรรม เครื่องใช้ครัวเรือน กิจการทหาร พลเรือน การบินและอวกาศ เพราะเนื่องจากระบบมีข้อดีคือ ประสิทธิภาพสูง ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา อย่างไรก็ตาม การใช้งานที่เพิ่มขึ้นของเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้านี้ได้ก่อให้เกิดปัญหากระแสฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าลดลง ดังนั้น เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น รูปแบบของการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบต่างๆ จึงได้ถูกนำเสนออย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันได้มีการบังคับใช้ข้อกำหนดและมาตรฐานฮาร์มอนิกส์ต่างๆ เช่น มาตรฐาน IEC 1000-3-2 ได้ถูกประกาศใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า ด้วยมาตรฐานดังกล่าว ในปัจจุบัน ผู้ผลิตแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องปฏิบัติตามกฎระเบียบต่างๆ ตามมาตรฐานอย่างเคร่งครัด เพื่อแก้ไขปัญหาค่าฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ถูกจ่ายเข้าไปในระบบไฟฟ้า วิธีการของการแก้ไขตัวประกอบกำลังสามารถจำแนกออกได้เป็นแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ

ในเทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟ [32] ตัวกรองขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุถูกติดตั้งอยู่ระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับและภาคอินพุตของวงจรเรียงกระแสชนิดไดโอดบริดจ์ เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟถูกแสดงในภาพที่ 2-10 ด้วยเทคนิคนี้ระบบมีความง่ายและทนทาน แต่อย่างไรก็ตามระบบมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากและตัวประกอบกำลังที่ได้ไม่สามารถแก้ไขให้มีค่าสูงใกล้เคียงหนึ่ง เพราะฉะนั้น มันจึงไม่ใช่แนวทางที่จะใช้เพื่อแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกส์ให้ผ่านมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ในปัจจุบัน โดยความเป็นจริงแล้ว มันมีความเหมาะสมกับระบบที่มีพิกัดกำลังภาระทางไฟฟ้าไม่เกิน 25 W



ภาพที่ 2-10 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟ

2.8 ลักษณะทั่วไปของวงจรเรียงกระแสที่ให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง

เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ถูกนำมาใช้เพื่อที่จะควบคุมให้รูปคลื่นของสัญญาณกระแสไลน์อินพุตมีค่าเฟสและขนาดมีลักษณะตามกันกับแรงดันอินพุต เพราะฉะนั้นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกควบคุมให้มีลักษณะพฤติกรรมเช่นนี้จึงถูกเรียกว่า ตัวเลียนแบบตัวต้านทาน (Resistor Emulator) เพราะเนื่องจากตัวมันเองถูกมองจากวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ว่าเป็นเสมือนตัวต้านทานที่ถูกต่อเข้ามาในระบบ จึงส่งผลให้กระแสแหล่งจ่ายมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ จึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งและค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมต่ำ

วงจรเรียงกระแสที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ชนิดนี้ทำงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขในสภาวะพิเศษ เพราะเนื่องจากระบบดังกล่าวต้องถูกวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์มองเป็นตัวต้านทานที่ถูกนำมาต่อทางด้านเอาต์พุต เพราะฉะนั้นแรงดันอินพุตของระบบ V_g สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$v_g = \hat{V}_g |\sin(\omega t)| \quad (2-11)$$

และอัตราส่วนการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (m) นิยามได้ดังนี้

$$m(\omega t) = \frac{V_o}{\hat{V}_g |\sin(\omega t)|} \quad (2-12)$$

ขณะที่ $M \equiv V_o / \hat{V}_g$ สมการที่ (2-12) แสดงให้เห็นจุดสำคัญอันดับแรกของสิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับตัวเลียนแบบตัวต้านทานคือ สมการมีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนแปลงไป ในลักษณะไม่คงที่ ซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงจากค่าจำกัดค่าหนึ่ง คือ $M \equiv V_o / \hat{V}_g$ ไปสู่ค่าอนันต์ด้วยความจริงจากสมการที่ (2-12) จึงไม่นิยมนำเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงบางประเภท เช่น บัค ฟอเวิร์ด หรือ วงจรจ่ายแรงดันแบบบริดจ์ มาใช้เป็นวงจรเรียงกระแสที่สามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังได้ เพราะเนื่องจากอัตราส่วนการแปลงแรงดันของวงจรเหล่านั้นไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างไม่มีกำหนด ประเด็นที่สองที่น่าสนใจสำหรับเครื่องแปลงผันที่ทำหน้าที่เป็นตัวเสมือนตัวต้านทานคือ ภาระของระบบที่ถูกมองจากเครื่องแปลงผันเอง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เป็นฟังก์ชันกำลังสองของไซน์ดังนี้

$$p_i = p_o = \hat{V}_g \hat{I}_g \sin^2(\omega t) \quad (2-13)$$

ขณะที่ \hat{I}_g คือ ค่าสูงสุดของกระแสอินพุต เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตถูกรักษาในระดับให้คงที่ด้วยตัวเก็บประจุเอาต์พุต กระแสเอาต์พุตของเครื่องแปลงผัน i ถูกดึงไปที่ตัวเก็บประจุและภาวะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันกำลังสองของไซน์เช่นกัน ด้วยหลักการเท่ากันของกำลังไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตในช่วงคาบเวลาของแหล่งจ่าย สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$i = \frac{2V_o}{R} \sin^2(\omega t) \quad (2-14)$$

ขณะที่ $R \cong V_o / I_{load}$ แต่อย่างไรก็ตามภาวะที่มองเห็นโดยเครื่องแปลงผันนั้น ไม่ได้เป็นค่าคงที่ R เพราะเนื่องจากมันต้องจ่ายกระแสภาระ (I_{load}) และกระแสสลับ (i_C) ดังนั้นภาวะที่เห็นได้ด้วยเครื่องแปลงผันเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุต (V_o มีค่าเกือบคงที่) และกระแสเอาต์พุตของเครื่องแปลงผัน (i)

$$r(\omega t) = \frac{V_o}{i} = \frac{R}{2 \sin^2(\omega t)} \quad (2-15)$$

นี่คือจุดสำคัญอันที่สองของสิ่งที่สนใจ ภาวะที่เห็นโดยเครื่องแปลงผันนั้นมีค่าไม่คงที่แต่ค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละครึ่งวงรอบของความถี่แหล่งจ่ายตามสมการที่ (2-15) ซึ่งมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ $R/2$ (ที่ $\omega t = 0$ และ $\omega t = \pi/2$) และค่าสูงสุดอยู่ที่ค่าอนันต์ (ที่ $\omega t = \pi$) ด้วยความจริงเช่นนี้จึงไม่สามารถนำเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงบางชนิดที่ไม่มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมาเพื่อทำหน้าที่ควบคุมระบบให้มีคุณสมบัติเป็นดังตัวเลียนแบบตัวต้านทานได้

รูปแบบของการควบคุมวงจรเรียงกระแสที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังให้ใกล้เคียงหนึ่งนั้นต้องมีแบบแผนการควบคุมในวงจรควบคุมต้องรับประกันเงื่อนไขที่สำคัญ 2 ข้อดังนี้คือ

1. แรงดันเอาต์พุตต้องมีค่าตามที่ต้องการ
2. กระแสแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นสัญญาณเหมือนกันกับแรงดันแหล่งจ่าย (เป็นสัญญาณไซน์)

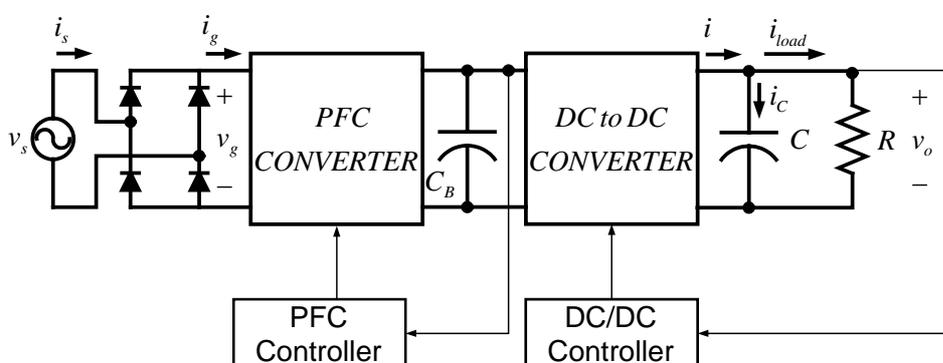
2.9 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแยกทีฟ [33, 34]

เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปประกอบด้วยภาควงจรเรียงกระแสชนิดไดโอดบริดจ์ที่ใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดันขนาดใหญ่ต่ออยู่ ณ ตำแหน่งเอาต์พุต ทำให้ระบบดึงกระแสอินพุตที่มีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ กระแสดังกล่าวประกอบด้วยค่ากระแสฮาร์มอนิกสูงซึ่งอาจจะเกินมาตรฐาน IEC 1000-3-2 หรือข้อกำหนดรายละเอียดประกอบกระแสฮาร์มอนิกอินพุตของ

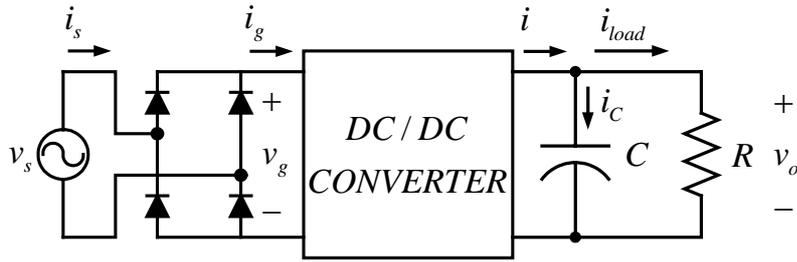
ประเทศญี่ปุ่น เพื่อให้กระแสดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐานดังที่ได้กล่าวมา ผู้ผลิตแหล่งจ่ายไฟฟ้าต้องติดตั้งวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังเพิ่มไว้ที่ตำแหน่งด้านหน้าของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่แยกโคจรทางไฟฟ้าและควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุต ดังนั้นระบบดังกล่าวมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องแปลงผัน 2 สถานะ สถานะที่ 1 ใช้สำหรับการแก้ไขตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงขึ้นและสถานะที่ 2 ใช้เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้คงที่ โครงสร้างระบบเพื่อการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟชนิด 1 เฟส สามารถแยกออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ วิธีการแปลงแบบ 1 และ 2 ขั้นตอน

วิธีการแปลงแบบ 2 ขั้นตอนนั้นเป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง บล็อกไดอะแกรมของเครื่องแปลงผันที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ใน 2 ขั้นตอนถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2-11 ด้วยวิธีนี้ ระบบประกอบด้วยภาควงจรกำลังไฟฟ้า 2 ส่วนที่แยกกันเป็นอิสระ ภาคแรกเป็นเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่ทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลัง โดยทั่วไปใช้เครื่องแปลงผันชนิด บูสต์ (Boost) บัค-บูสต์ (Buck-boost) ในส่วนที่ 2 เป็นการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่แยกโคจรทางไฟฟ้าระหว่างภาคอินพุตและเอาต์พุตซึ่งเครื่องแปลงผันที่ใช้อย่างน้อยต้องมี 1 สวิตช์ โดยที่ระบบถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมแบบอิสระเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่

ด้วยเทคนิคของการแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบแอกทีฟ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ทำงานในโหมดการสวิตช์ถูกนำมาใช้เพื่อที่จะปรับปรุงรูปคลื่นกระแสอินพุตให้เป็นสัญญาณไซน์และมีค่าของเฟสตรงกันกับแรงดันไลน์อินพุต ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังของระบบสามารถแก้ไขให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งได้ ในภาพที่ 2-12 แสดงบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของเทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟ



ภาพที่ 2-11 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสองขั้นตอน



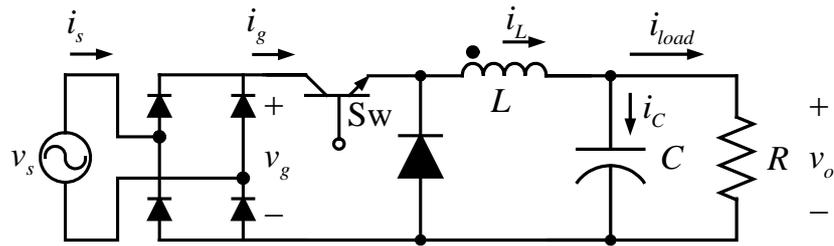
ภาพที่ 2-12 เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟ

เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ระบบมีวงจรต้นแบบหลากหลายรูปแบบที่จะสามารถนำมาใช้กับเทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟได้ โดยพื้นฐานของเทคนิคนี้ ส่วนของการแก้ไขตัวประกอบกำลังนั้นถูกนำมาใช้เพื่อที่จะควบคุมให้กระแสอินพุตติดตามสัญญาณไซน์เพื่อให้กระแสมีเฟสตรงกันกับแรงดันไลน์อินพุต ฉะนั้นตัวประกอบกำลังจึงถูกควบคุมให้ใกล้เคียงหนึ่งได้ เปรียบเทียบกับเทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบพาสซีฟ เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟมีข้อดีกว่าหลายประการคือ ตัวประกอบกำลังสูงกว่า กระแสฮาร์มอนิกส์ถูกทำให้ลดลงได้มากกว่า ระบบมีขนาดเล็กกว่าและน้ำหนักเบา อย่างไรก็ตามความซับซ้อนและทำให้ระบบมีต้นทุนที่สูงขึ้นเป็นเหตุปัจจัยลบที่สำคัญของกรรมวิธีนี้

เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟสามารถจำแนกออกเป็นแบบต่างๆ ได้ดังนี้

1. เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบพีดีบีบลิวเอ็ม
2. เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบเรโซแนนซ์
3. เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบสวิตช์ที่แรงดันและหรือกระแสศูนย์

ในการแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยวิธีการแบบพีดีบีบลิวเอ็ม อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลังถูกควบคุมให้ทำงานอยู่ในรูปแบบของพัลส์ที่ถูกผสมทางกว้าง โดยพื้นฐานของเทคนิคนี้ สวิตช์กำลังทำงานที่ความถี่คงที่แต่ช่วงเวลานำกระแสและช่วงเวลาที่หยุดนำกระแสสามารถปรับค่าได้ ข้อเด่นของระบบควบคุมชนิดนี้คือโครงสร้างระบบมีความง่าย การวิเคราะห์และการควบคุมไม่ซับซ้อน ความเครียดที่เกิดจากแรงดันและกระแสบนอุปกรณ์การสวิตช์กำลังมีค่าต่ำ เพราะฉะนั้น มันจึงถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงจรการแก้ไขตัวประกอบกำลัง วงจรต้นแบบที่ใช้กับเทคนิคพีดีบีบลิวเอ็มประกอบด้วย

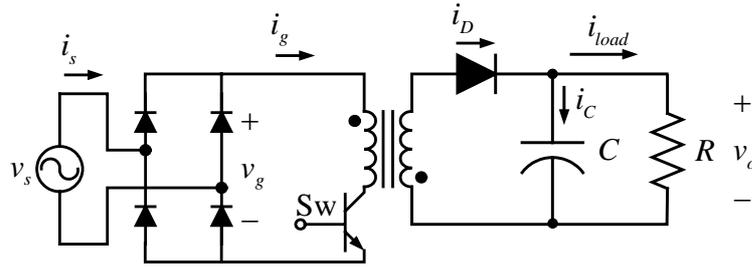


ภาพที่ 2-13 วงจรต้นแบบชนิดบัค

1. วงจรแปลงผันแบบบัค
2. วงจรแปลงผันแบบฟลายแบ็ก
3. วงจรแปลงผันแบบบูสต์
4. วงจรแปลงผันแบบซุก

2.9.1 ในภาพที่ 2-13 แสดงวงจรต้นแบบชนิดบัค ซึ่งข้อดีของวงจรต้นแบบชนิดนี้คือ ระบบเครื่องแปลงผันสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ต่ำกว่าแรงดันอินพุต แต่ข้อด้อยคือ กระแสไลน์ที่ได้มีค่าความผิดเพี้ยนสูง ระบบสร้างการรบกวนสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงมากเพราะเนื่องจากกระแสอินพุตไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง ดังนั้น ทำให้ต้องติดตั้งตัวกรองขนาดใหญ่ด้านอินพุต ส่งผลถึงต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นของระบบโดยรวม เครื่องแปลงผันแบบบัคเป็นวงจรที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบพื้นฐานที่สุดแต่ไม่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง

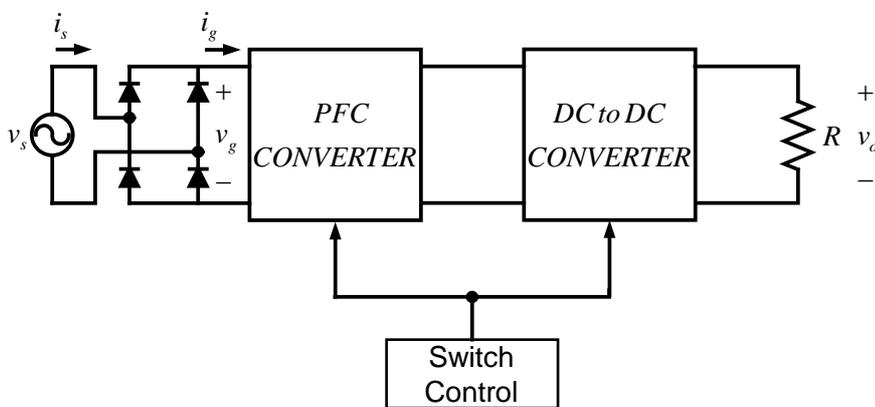
2.9.2 เครื่องแปลงผันชนิดฟลายแบ็ก วงจรที่ใช้ในแก้ไขตัวประกอบกำลังที่ประกอบด้วย การแยกโหนดทางไฟฟ้าด้วยหลักการใช้ความถี่สูงอย่างง่ายที่สุด คือ เครื่องแปลงผันแบบฟลายแบ็ก ซึ่งระบบถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2-14 เครื่องแปลงผันชนิดนี้สามารถทำงานได้ทั้งโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่องและกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง วงจรฟลายแบ็กมีข้อดีหลายประการ เช่น แรงดันไฟฟ้าด้านออกสามารถควบคุมให้มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันอินพุต ระบบสามารถแยกโหนดทางไฟฟ้าได้ระหว่างภาคอินพุตกับภาคเอาต์พุต เครื่องแปลงผันชนิดนี้มีความสามารถต่อการควบคุมสถานะขณะเริ่มการทำงานได้ดีและสามารถออกแบบการป้องกันการทำงานเกินกำลังได้ด้วยพฤติกรรมของวงจรนี้เอง เพราะเนื่องจาก สวิตช์ถูกต่ออยู่ในลักษณะอนุกรมกับทางเดินของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้ามา ในวงจรต้นแบบชนิดนี้หม้อแปลงที่ปรากฏนั้นเป็นองค์ประกอบที่วิกฤตที่สุด เพราะเนื่องจากว่ามันต้องทำหน้าที่สองประการ คือ เป็นทั้งขดลวดเหนี่ยวนำและเป็นทั้งหม้อแปลงด้วย (ต้องมีช่องว่างอากาศเพราะฉะนั้นจึงไปเพิ่มการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็ก)



ภาพที่ 2-14 วงจรต้นแบบชนิดฟลายแบ็ก

การทำงานของหม้อแปลงเป็นแบบความหนาแน่นฟลักซ์เป็นไปในทิศทางเดียว ยิ่งกว่านั้น ความเครียดที่เกิดจากแรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นผลรวมของค่ายอดแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตที่ถูกมองกลับมามบนด้านขดลวดปฐมภูมิ (แรงดันเกินที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุมาจากค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลง) ทำให้อุปกรณ์การสวิตช์ต้องใช้พิกัดแรงดันและกระแสที่สูงกว่าปกติ เมื่อระบบควบคุมให้กระแสอินพุตทำงานในโหมดไหลไม่ต่อเนื่อง ระบบต้องออกแบบตัวกรองอินพุตอย่างระมัดระวังและเครื่องแปลงผันมีความยุ่งยากที่จะควบคุมการทำงานของกระแสอินพุตให้อยู่ในการควบคุมโหมดกระแสเฉลี่ย

2.9.3 เครื่องแปลงผันในตระกูล S²IP² (Single-Stage Isolated Power-Factor Corrected Power Supplies) ดังที่ได้กล่าวไว้ตั้งแต่ต้นว่า ระบบการแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 1 เฟส สามารถจำแนกแยกออกเป็นไปตามสถานะของขั้นตอนการแปลงผันได้ 2 แบบคือ การแปลงแบบ 1 และ 2 ขั้นตอน ซึ่งในเนื้อหาส่วนนี้ได้กล่าวถึงกลุ่มของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังที่มีการแยกโคจรทางไฟฟ้าโดยอาศัยการแปลงเพียง 1 ขั้นตอน ซึ่งรูปแบบโดยทั่วไปถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2-15

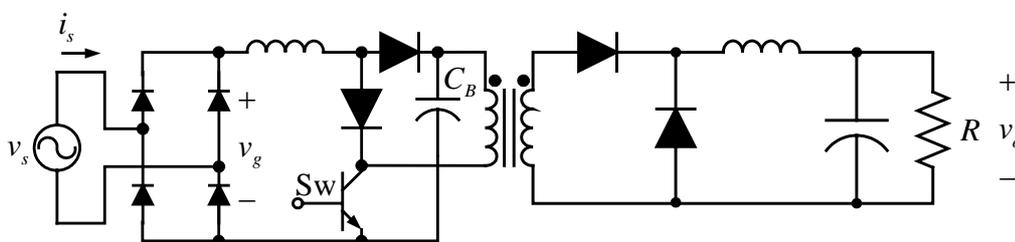


ภาพที่ 2-15 โครงสร้างทั่วไปของเครื่องแปลงผันตระกูล S²IP²

วิธีการนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการปรับปรุงและการนำมารวมกันของสวิตช์ที่อยู่ในภาคส่วนของการแก้ไขตัวประกอบกำลังและภาคการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ด้วยวิธีทางนี้การแปลงแบบ 2 ขั้นตอนที่ต่ออันดับกันดังถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2-15 ถูกทำให้กลายเป็นการแปลงผันแบบตอนเดียวที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุสะสมพลังงานอยู่ในเครื่องแปลงผัน ดังนั้นการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่จึงเป็นสิ่งที่สามารถทำได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันแบบตอนเดียวได้ถูกนำเสนอและเผยแพร่มาอย่างต่อเนื่องเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา เครื่องแปลงผันชนิดนี้ใช้ชุดควบคุม 1 ชุด เพื่อที่จะปรับปรุงรูปคลื่นกระแสอินพุตและควบคุมแรงดันเอาต์พุต ถึงแม้ว่าเครื่องแปลงผันชนิดนี้ไม่สามารถลดกระแสฮาร์มอนิกอินพุตได้ดีเท่าเมื่อเทียบกับการแปลงผันแบบ 2 ขั้นตอน แต่ยังสามารถควบคุมให้เข้าไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ที่ได้ระบุไว้ ข้อได้เปรียบอีกประการของระบบแปลงผันแบบขั้นตอนเดียวคือ ต้นทุนต่ำกว่า เบากว่า กะทัดรัดกว่าเมื่อนำไปเทียบกับระบบการแปลงผันแบบ 2 ขั้นตอน

ระบบแปลงผันแบบ 1 ขั้นตอนสามารถแยกรูปแบบของการควบคุมได้ 4 รูปแบบ เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งการแก้ไขตัวประกอบกำลัง

1. การแก้ไขตัวประกอบกำลังในโหมดกระแสไหลไม่ต่อเนื่องกับเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง
2. การแก้ไขตัวประกอบกำลังในโหมดกระแสไหลไม่ต่อเนื่องกับเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในโหมดกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง
3. การแก้ไขตัวประกอบกำลังในโหมดกระแสไหลต่อเนื่องกับเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง
4. การแก้ไขตัวประกอบกำลังในโหมดกระแสไหลต่อเนื่องกับเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในโหมดกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง

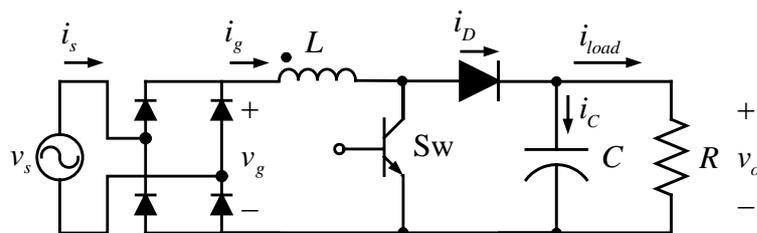


ภาพที่ 2-16 วงจรต้นแบบบัสต์-ฟอร์เวิร์ดในตระกูล S²IP²

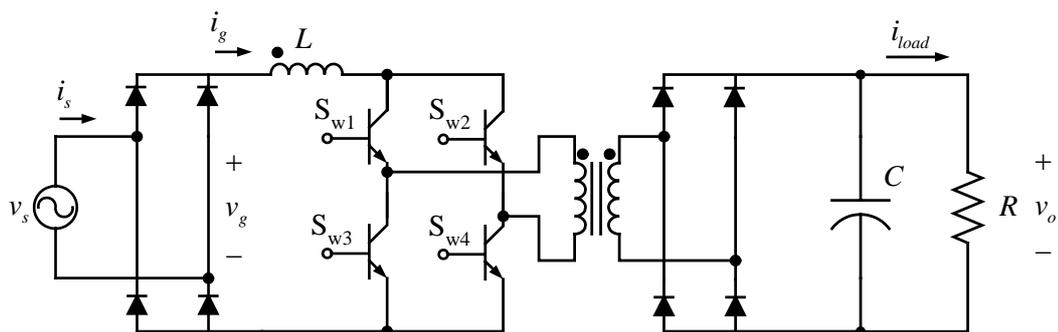
ยกตัวอย่างดังเช่นในภาพที่ 2-16 ได้นำเสนอเครื่องแปลงผันที่ได้มาจากการรวมตัวกันของ วงจรกำลังเครื่องแปลงผันแบบบวสต์และฟอร์เวิร์ดประกอบอยู่ในวงจรเดียวกันซึ่งระบบใช้สวิตช์ กำลังเพียง 1 ตัว เมื่อวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบบวสต์ถูกใช้งานในตอนี้ กระแสอินพุตมีความผิดเพี้ยนอยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งความผิดเพี้ยนดังกล่าวนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันที่ ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_B และแรงดันเรียงกระแส V_g ดังนั้นในการออกแบบจึงได้กำหนดให้มีการหา ความเหมาะสมระหว่างคุณภาพของกระแสอินพุตและความเครียดบนอุปกรณ์สวิตช์ที่เกิดจาก แรงดันไฟฟ้า การพิจารณาออกแบบค่าสัมประสิทธิ์การใช้ประโยชน์ของหม้อแปลงนี้เป็นเช่นเดียว กันกับเครื่องแปลงผันแบบทั่วไปที่ต้องการคุณสมบัติการแยกโคจรทางไฟฟ้า

2.9.4 เครื่องแปลงผันแบบบวสต์ชนิดที่ไม่ถูกแยกโคจรและถูกแยกโคจร วงจรต้นแบบชนิด บวสต์ที่ไม่สามารถแยกโคจรทางไฟฟ้าได้ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 2-17 เครื่องแปลงผันชนิดนี้เป็นหนึ่ง ในบรรดาของเครื่องแปลงผันที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเพื่อนำมาใช้งานเป็นวงจรแก้ไขตัว ประกอบกำลัง เนื่องจากระบบให้ข้อดีหลายประการคือ การควบคุมให้ระบบทำงานในโหมดกระแส ทำได้ง่าย กระแสที่ไลน์อินพุตมีความผิดเพี้ยนต่ำ ส่งผลให้ตัวประกอบกำลังที่ค่าใกล้เคียงหนึ่ง การ ระบายความร้อนแม่เหล็กมีน้อยดังนั้นจึงทำให้ขนาดของวงจรกรองด้านอินพุตมีขนาดลดลง วงจรไม่ม ีความซับซ้อนและตัวสวิตช์กำลังถูกต่อร่วมกับกราวด์ของระบบทำให้วงจรจับนำสวิตช์ไม่มีความ ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม มันยังคงมีข้อด้อยอยู่บางประการคือ วงจรมีความสูญเสียสูงเนื่องจากการนำ กระแส มีความยุ่งยากในการป้องกันกระแสขณะเริ่มทำงาน ไม่สามารถจำกัดกระแสในระหว่าง ภาระเกินและลัดวงจรได้ ระบบไม่สามารถแยกโคจรทางไฟฟ้าได้และแรงดันด้านเอาต์พุตต้องมาก กว่าค่ายอดของแรงดันด้านอินพุตเสมอ

เครื่องแปลงผันแบบบวสต์ชนิดที่ถูกแยกโคจรทางไฟฟ้า รูปแบบที่มีการแยกโคจรทางไฟฟ้าของ เครื่องแปลงผันแบบบวสต์สำหรับการแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 1 เฟส ถูกนำเสนออยู่ในภาพที่ 2-18 ซึ่งแสดงถึงบล็อกโคจรแอมของวงจรเต็มบริดจ์บวสต์ที่ถูกแยกโคจรทางไฟฟ้าด้วยหม้อแปลง ความถี่สูง



ภาพที่ 2-17 วงจรต้นแบบชนิดบวสต์

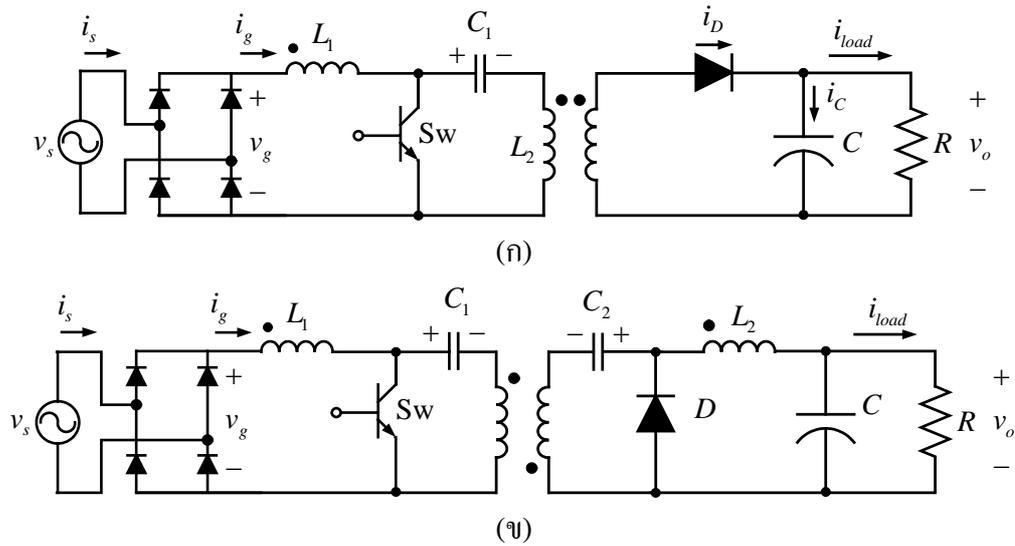


ภาพที่ 2-18 เครื่องแปลงผันเต็มบริดจ์แบบบูสต์ที่ถูกแยกโคตทางไฟฟ้า

วงจรบริดจ์ทำงานอยู่ในโหมดบูสต์ แสดงให้เห็นด้วยสถานะของสวิตช์ 1 และ 3 หรือ 2 และ 4 นำกระแส ขณะนี้โมดอินเวอร์เตอร์ถูกตัดวงจร และใน โมดอินเวอร์เตอร์สวิตช์ 1 และ 4 หรือ 2 และ 3 นำกระแส ดังนั้นหม้อแปลงความถี่สูงถูกควบคุมให้ทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบ รูปคลื่นสัญญาณไซน์ของกระแสไลน์ได้มาด้วยเทคนิคพีดีดับลิแวมในระหว่างช่วงเวลาของการทำงานโหมดบูสต์ และโหมดการกลับสัญญาณ

2.9.5 เครื่องแปลงผันชนิดซุกและซีพิก ภาพที่ 2-19 แสดงวงจรต้นแบบซีพิกและซุก ภาคอินพุตของวงจรต้นแบบทั้งสองทำงานด้วยหลักการเดียวกับเครื่องแปลงผันแบบบูสต์ ขณะที่ด้านเอาต์พุตของเครื่องแปลงผันแบบซุกใช้หลักการการทำงานเช่นเดียวกันกับวงจรบัค ส่วนวงจรซีพิกใช้หลักการเดียวกันกับวงจรฟลายแบ็ก ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดแสดงที่การใช้ประโยชน์ของหม้อแปลงไฟฟ้า ในเครื่องแปลงผันแบบซุกค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็กไม่ได้ดึงไฟฟ้ากระแสตรงเข้ามาที่หม้อแปลง ดังนั้นหม้อแปลงจึงสามารถถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ ในขณะที่ในเครื่องแปลงผันแบบซีพิก ค่ากระแสเหนี่ยวนำแม่เหล็กเฉลี่ยมีค่าเท่ากับกระแสเอาต์พุต ในวงจรทั้งสองแบบนี้ ค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลเป็นเหตุให้เกิดแรงดันเกินบนอุปกรณ์การสวิตช์ ดังนั้นวงจรที่มีคุณสมบัติในการป้องกันแรงดันเกินจึงมีความจำเป็นสำหรับกรณีนี้ ทางออกของปัญหาโดยใช้หลักการสวิตช์ที่แรงดันและหรือกระแสศูนย์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เป็นไปได้ในการขจัดปัญหาเหล่านี้ให้หมดไป

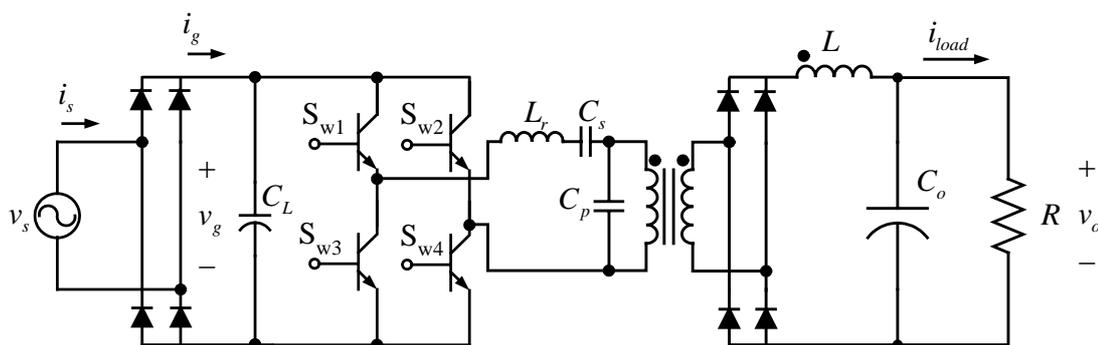
สิ่งที่สังเกตได้ก็คือ ด้วยวิธีการเลือกค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสม กระแสไลน์ของเครื่องแปลงผันแบบซุกและซีพิกยังคงไหลอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าเครื่องแปลงผันดังกล่าวยังคงทำงานอยู่ในโหมดของกระแสไหลขดลวดเหนี่ยวนำไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง เป็นผลทำให้ระบบต้องการวงจรกรองด้านอินพุตที่มีขนาดเล็กลง แต่เมื่อระบบถูกกำหนดให้ทำงานอยู่ในโหมดการนำกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง ควบคุมกระแสขดลวดเหนี่ยวนำภายในมีความจำเป็นต้องถูกใช้เพื่อที่จะควบคุมให้กระแสอินพุตเป็นไปตามสัญญาณไซน์



ภาพที่ 2-19 วงจรต้นแบบชนิดซีพิกและชุก

ระบบวงจรควบคุมต้องถูกออกแบบอย่างระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการขาดเสถียรภาพในการควบคุม ข้อดีอีกประการหนึ่งของเครื่องแปลงผันทั้ง 2 ชนิดนี้คือ ตัวเหนี่ยวนำทั้งสองสามารถเชื่อมต่อทางแม่เหล็กได้ ในกรณีนี้เราสามารถใช้งานแม่เหล็กเพียงแกนเดียวเพื่อลดขนาดและต้นทุนของเครื่องแปลงผัน ยิ่งไปกว่านั้น ด้วยการออกแบบที่เหมาะสมของโครงสร้างที่เป็นแม่เหล็กกระแสกระเพื่อมอินพุตความถี่สูงสามารถทำให้ลดลงได้อย่างมาก ข้อด้อยของวงจรเครื่องแปลงผันชนิดนี้คือ จำนวนอุปกรณ์พาสซีฟที่มีจำนวนมากเมื่อเทียบกับเครื่องแปลงผันประเภทอื่น ค่าความเครียดของกระแสและแรงดันที่ถูกทำให้เพิ่มขึ้นบนอุปกรณ์สวิตช์กำลัง

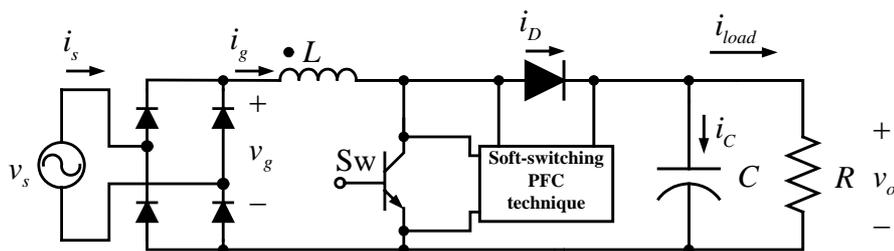
2.9.6 เครื่องแปลงผันชนิดเรโซแนนซ์ ในเครื่องแปลงผันเรโซแนนซ์ แรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์หรือกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ถูกควบคุมให้สามารถปรับรูปร่างได้โดยใช้วงจรตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ (L-C Resonance) เพื่อที่จะให้กระแสและหรือแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาของสวิตช์ที่ถูกควบคุมให้นำและหยุดนำ ดังนั้นความสูญเสียเนื่องจากการสวิตช์ถูกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ค่าตัวประกอบกำลังสูงสามารถทำได้โดยคุณสมบัติของเครื่องแปลงผันเรโซแนนซ์ ข้อเด่นและข้อด้อยของวงจรประเภทนี้คือ ความเครียดจากกระแสและแรงดันบนสวิตช์กำลังมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับการทำงานแบบโหมดดับบลิวเอ็มและความถี่การสวิตช์มีค่าสูงมาก ภาพที่ 2-20 แสดงเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิดโหลดเรโซแนนซ์ (Load-Resonance AC to DC Converter) ค่าตัวประกอบกำลังสูงหาได้โดยปราศจากการควบคุมแบบแอกทีฟของกระแสอินพุต โดยระบบได้กำหนดให้มีการใช้ตัวเก็บประจุขนาดเล็กที่จุดเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 2-20 วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังเรโซแนนซ์เต็มบริดจ์

ตัวประกอบกำลังที่สูงกว่าสามารถทำได้โดยการควบคุมที่ความถี่อินเวอร์เตอร์ด้วยเทคนิคนี้จึงได้มาซึ่งการปรับปรุงกระแสอินพุต ด้วยหลักการแบบเรโซแนนซ์ ระบบดังกล่าวสามารถถูกออกแบบให้มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นได้ เพราะเนื่องจากมีความถี่การสวิตช์ที่สูงขึ้น การรบกวนที่เกิดจากการสอดแทรกสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำเพราะเนื่องจากการขับนำสวิตช์กระทำที่กระแสและหรือแรงดันเป็นศูนย์ หม้อแปลงความถี่สูงถูกใช้งานอย่างเต็มที่และผลกระทบของความเหนี่ยวนำรั่วไหลไม่ปรากฏเพราะเนื่องจากว่ามันถูกกำหนดให้เป็นส่วนหนึ่งของวงจรเรโซแนนซ์ ยิ่งกว่านั้นยังสามารถออกแบบการป้องกันกระแสลัดวงจรได้โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้องแบบอนุกรม L_r และ C_s ดังปรากฏอยู่ในวงจรนี้

2.9.7 วงจรการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบสวิตช์ที่แรงดันและหรือกระแสศูนย์ ด้วยเทคนิคของการสวิตช์ที่แรงดันและหรือกระแสศูนย์ในวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังได้รวบรวมข้อดีของเทคนิคการทำงานในโหมดแบบพีดับบลิวเอ็มและแบบเรโซแนนซ์รวมเข้าไว้ด้วยกัน ระบบดังกล่าวประกอบขึ้นจาก ขดลวดเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์และสวิตช์ช่วยระบบทำงานในโหมดพีดับบลิวเอ็มในระหว่างเวลาที่ทั้งหมดของวงรอบการสวิตช์พร้อมกับการทำงานในโหมดเรโซแนนซ์อยู่ในช่วงระหว่างเวลาที่สวิตช์นำกระแสและหยุดนำเท่านั้น ผลที่ตามมาก็คือวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังทำงานที่ความถี่การสวิตช์คงที่และสวิตช์กำลังนำและหยุดนำกระแสที่สถานะกระแสศูนย์และหรือแรงดันศูนย์ ดังนั้น จึงทำให้ประสิทธิภาพและตัวประกอบกำลังถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยใช้เทคนิคนี้ ภาพที่ 2-21 แสดงถึงวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบบวสต์ที่ประกอบด้วยวงจรการควบคุมสวิตช์ที่กระแสและหรือแรงดันศูนย์



ภาพที่ 2-21 วงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบสวิทช์ที่แรงดันและหรือกระแสศูนย์

เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใดๆ ที่สามารถทำงานได้ตามฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของ $m(\omega t)$ และ $r(\omega t)$ ดังที่ได้ถูกนิยามไว้ตามสมการที่ 2-12 และ 2-15 จะสามารถนำไปใช้เพื่อควบคุมให้ตัวของมันเองมีพฤติกรรมเปรียบได้กับตัวต้านทานได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปคอนเวอเตอร์แบบ บูลสต์ บัค-บูลสต์ (ฟลายแบ็ก) ซีพิก หรือ ชุก สามารถเป็นวงจรส่วนหน้าที่ทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลังได้ดี ตารางที่ 2-1, 2-2 และ 2-3 แสดงผลสรุปข้อเด่นและข้อด้อยของแต่ละเครื่องแปลงผัน วงจรต้นแบบที่นิยมนำมาใช้เป็นวงจรส่วนหน้าเพื่อแก้ไขตัวประกอบกำลัง คือ วงจรเครื่องแปลงผันแบบบูลสต์ แม้กระนั้นก็ตาม ซีพิกและชุกคอนเวอเตอร์ยังได้แสดงข้อเด่นในหลายประการที่เราจะสามารถนำมาใช้เป็นส่วนหน้าเพื่อทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลังได้เช่นกัน

ตารางที่ 2-8 คุณลักษณะของคอนเวอเตอร์เพื่อเป็นส่วนหน้าเพื่อแก้ไขตัวประกอบกำลัง [35]

คุณลักษณะ	บูลสต์	บัค-บูลสต์	ซีพิก	ชุก
ตำแหน่งของ L	ดี	ไม่ดี	ดี	ดี
การแยกโหนด	ยาก	ง่าย	ง่าย	ง่าย
แรงดันเอาต์พุต	$> \hat{V}_g$	มากกว่า/น้อยกว่า	มากกว่า/น้อยกว่า	มากกว่า/น้อยกว่า
การป้องกันกระแส	ใช้วงจรช่วย	ทำได้ภายใน	ทำได้ภายใน	ทำได้ภายใน
ความสามารถในการควบคุมกระแสเกิน	ไม่ได้	ได้	ได้	ได้
แรงดันสวิทช์	V_o	$V_o + \hat{V}_g$	$V_o + \hat{V}_g$	$V_o + \hat{V}_g$
กระแสต่อเนื่อง	ดี	พอใช้	ดี	ดี
กระแสไม่ต่อเนื่อง	พอใช้	พอใช้	ดี	ดี

ตารางที่ 2-9 การเปรียบเทียบวงจรแปลงผันแบบบัส ซีพิก และ ชุก ที่ถูกควบคุมให้เป็นวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังในโหมดกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง [36]

เครื่องแปลงผัน/รายละเอียด	บัส	ชุก	ซีพิก
ความผิดเพี้ยนกระแสอินพุต	มี	น้อย	น้อย
การแปลงผันแรงดัน	เพิ่มแรงดันเท่านั้น	เพิ่มหรือลดแรงดัน	เพิ่มหรือลดแรงดัน
จำนวนของอุปกรณ์ในวงจรแปลงผัน	3 ตัว	5 ตัว	5 ตัว
แรงดันตกคร่อมสวิตช์	V_o	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $
ผลรวมกระแสสวิตช์และไดโอด (ค่าเฉลี่ย)	I_s	$I_s + I_o$	$I_s + I_o$
แรงดันตกคร่อมไดโอด	V_o	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $
แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ	ไม่มี	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $
กระแสตัวเก็บประจุ	ไม่มี	มาก	มาก
กระแสแหล่งจ่าย	เป็นพัลส์	ไม่มีการกระเพื่อม	ไม่มีการกระเพื่อม
กระแสเอาต์พุต (ก่อนผ่านวงจรกรอง)	เป็นพัลส์	เป็นพัลส์พร้อมกระแสลบ	เป็นพัลส์
ตัวกรองด้านเอาต์พุต	ต้องการ	ต้องการ	ต้องการ
ขั้วด้านเอาต์พุต	บวก	ลบ	บวก
ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์	มีความสำคัญ	เล็กน้อย	เล็กน้อย
ผลกระทบของวงจรกรองอินพุต	มี	ไม่มี	ไม่มี

หมายเหตุ วงจรชุกและซีพิกเป็นชนิดที่ไม่มีกระแสไหลตรงทางไฟฟ้า

ตารางที่ 2-10 การเปรียบเทียบเครื่องแปลงผันแบบบัส ซีพิก และ ชุก ที่ถูกควบคุมให้สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังใน โมดกระแสไหลต่อเนื่อง [37]

เครื่องแปลงผัน/รายละเอียด	บัส	ชุก	ซีพิก
การส่งผ่านพลังงาน	เป็นแบบ โดยตรง	เป็นแบบ โดยอ้อม	เป็นแบบ โดยอ้อม
การแปลงผันแรงดัน	เพิ่มแรงดันเท่านั้น	เพิ่มหรือลดแรงดัน	เพิ่มหรือลดแรงดัน
จำนวนองค์ประกอบ	3 ตัว	5 ตัว	5 ตัว
แรงดันตกคร่อมสวิตช์	V_o	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $
ผลรวมกระแสสวิตช์และไดโอด (ค่าเฉลี่ย)	I_s	$I_s + I_o$	$I_s + I_o$
แรงดันตกคร่อมไดโอด	V_o	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $
แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ	ไม่มี	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $	$V_o + \hat{V}_g \sin \omega t $
กระแสตัวเก็บประจุ	ไม่มี	มาก	มาก
กระแสแหล่งจ่าย	มีการกระเพื่อมมาก	ควบคุมให้ไม่มีการกระเพื่อมได้	ควบคุมให้ไม่มีการกระเพื่อมได้
กระแสเอาต์พุต (ก่อนผ่านวงจรกรอง)	เป็นพัลส์	มีความต่อเนื่องพร้อมกับกระแสลบ	เป็นพัลส์
ตัวกรองด้านเอาต์พุต	ขนาดใหญ่	ขนาดใหญ่	ขนาดใหญ่
ขั้วด้านเอาต์พุต	บวก	ลบ	บวก
การป้องกันการทำงานเกินพิกัด	ไม่มี	มี	มี
ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์อินพุต	มาก	น้อย	น้อย
อันดับที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็ก	2 อันดับ	4 อันดับ	4 อันดับ

หมายเหตุ วงจรชุกและซีพิกเป็นชนิดที่ไม่มีกระแสแยกโดดทางไฟฟ้า

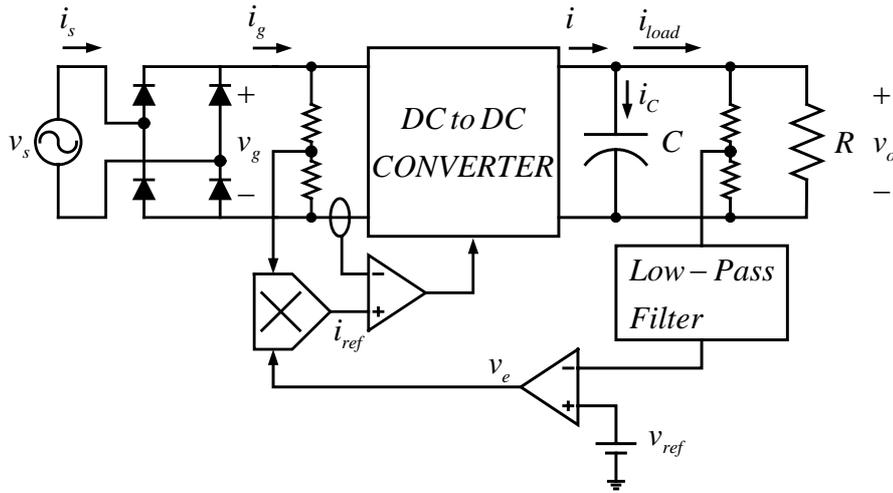
2.10 เทคนิคการควบคุมวงจรรีจิงกระแสที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยวิธีแบบแอกทีฟ

การแก้ไขตัวประกอบกำลังสามารถทำได้โดยการควบคุมที่กระแสไลน์ให้เป็นไปตามสัญญาณไซน์เพราะฉะนั้นการควบคุมกระแสไลน์ในวิธีแบบแอกทีฟจึงเป็นวิธีที่จำเป็น การควบคุมกระแสไลน์อินพุตสามารถควบคุมการทำงานได้หลากหลายโหมด เช่น การควบคุมกระแสในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่องและโหมดกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง การควบคุมในโหมดสถานะเส้นแบ่งเขตระหว่างกระแสชดวอดเหนี่ยวนำไหลอย่างไม่ต่อเนื่องและต่อเนื่อง

เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ ลูปป้อนกลับของแรงดันเอาต์พุตจึงถูกนำมาใช้เป็นลูปควบคุมภายนอกเพื่อให้ระบบสามารถควบคุมแรงดันด้านเอาต์พุตได้ ส่วนลูปในเป็นการควบคุมกระแสที่ชดวอดเหนี่ยวนำเพื่อบังคับให้กระแสที่แหล่งจ่ายเป็นไปตามความต้องการโดยสามารถควบคุมได้ในสองลักษณะดังนี้ คือ หลักการควบคุมด้วยการคูณ (Multiplier Approach Control) และวิธีควบคุมด้วยหลักการตามแรงดัน (Voltage-Follower Approach Control)

2.10.1 เทคนิคการควบคุมกระแส สัญญาณกระแสอ้างอิงไซน์ที่เหมาะสมถูกสร้างขึ้นจากสัญญาณอ้างอิงของแรงดันไลน์แบบเต็มคลื่นคูณกับเอาต์พุตของชุดขยายสัญญาณผิดพลาดแรงดัน ซึ่งขนาดของสัญญาณที่ได้จากการคูณถูกกำหนดให้เป็นสัญญาณกระแสอ้างอิง โดยทั่วไปวิธีการควบคุมกระแสสามารถนำมาใช้ได้กับการควบคุมแบบแอกทีฟของกระแสไลน์ ซึ่งสามารถแบ่งแยกย่อยออกได้เป็น 3 ลักษณะคือ การควบคุมกระแสเฉลี่ย (Average Current Control) การควบคุมกระแสสูงสุด (Peak Current Control) และ การควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (Variable-Hysteresis Control)

2.10.1.1 การควบคุมกระแสเฉลี่ย โหมดการควบคุมกระแสชนิดนี้บางครั้งเรียกว่าการควบคุมแบบพีดับเบิลวเอ็ม (PWM) ดังแสดงอยู่ในภาพที่ 2-22 การควบคุมนี้ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณกระแสชดวอดเหนี่ยวนำและสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย สวิตช์หยุดนำกระแสเมื่อผลรวมของสัญญาณกระแสรูปคลื่นสัญญาณฟันเลื่อยเกินค่าอ้างอิงและสวิตช์นำกระแสเมื่อผลรวมตกลงต่ำกว่าค่าอ้างอิง การควบคุมชนิดนี้กำหนดให้การทำงานของสวิตช์เป็นแบบความถี่คงที่ ข้อดีของการควบคุมกระแสชนิดนี้เมื่อนำไปใช้ควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันที่ให้อัตราตัวประกอบกำลังสูง คือ ความผิดเพี้ยนของกระแสแหล่งจ่ายมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระบบควบคุมที่กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งยังสามารถกรองสัญญาณรบกวนที่ความถี่การสวิตช์ได้โดยง่าย แต่ด้วยการควบคุมชนิดนี้จำเป็นต้องวัดกระแสแหล่งจ่ายหรือกระแสชดวอดเหนี่ยวนำซึ่งอาจทำให้เกิดความยุ่งยากกว่าระบบที่ต้องวัดกระแสที่สวิตช์ ซึ่งในปัจจุบันมีวงจรรวมหลากหลายเบอร์ให้เลือกเพื่อให้การควบคุมโหมดกระแสเฉลี่ยเป็นไปโดยง่ายและสะดวก เช่น ไอซีเบอร์ UC3854 ของบริษัท Unitrode, เบอร์ TK83854 ของ Toko, เบอร์ L4981A/B จาก Tomson และ เบอร์ TA8310P จาก Toshiba

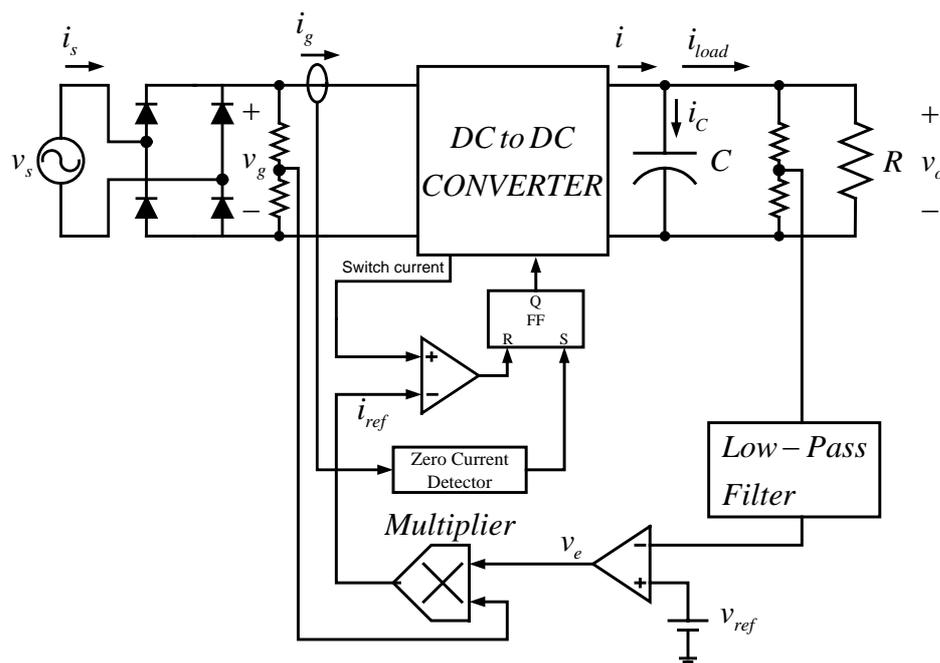


ภาพที่ 2-22 แบบแผนการควบคุมกระแสเฉลี่ย

แต่อย่างไรก็ตาม วงจรรวมที่ออกแบบมาสำหรับควบคุมโมดกระแสสูงสุดสามารถปรับปรุงให้ควบคุมกระแสในโมดเฉลี่ยได้เช่นกัน

2.10.1.2 การควบคุมค่าสูงสุดของกระแส ในการควบคุมโมดกระแสชนิดนี้ สวิตช์ถูกควบคุมให้ทำงานตามจังหวะสัญญาณนาฬิกา (ความถี่คงที่) และคงทำงานค้างอยู่จนกระทั่งกระแสที่ถูกวัดเข้ามามีค่าเท่ากับค่าคำสั่งที่กำหนดไว้ ณ ที่เวลานี้สวิตช์ถูกสั่งให้หยุดนำกระแส การควบคุมกระแสนี้สามารถทำงานบนพื้นฐานการวัดอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างกระแสขดลวดเหนี่ยวนำหรือกระแสสวิตช์ การควบคุมในโมดกระแสสูงสุดนี้เป็นการควบคุมกระแสชนิดหนึ่งที่มีความนิยมในแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าประเภทแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ยังคงมีข้อจำกัดบางประการเมื่อมันถูกนำมาใช้กับระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ดังเช่น มีความยุ่งยากที่จะสร้างการชดเชยสัญญาณพินเหล็ยภายนอก ยิ่งกว่านั้น เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นบ้างในกระแสแหล่งจ่ายเพราะเนื่องจากเป็นพฤติกรรมของระบบควบคุมนี้เอง แต่การควบคุมโมดกระแสสูงสุดนี้ยังคงมีข้อเด่นเหนือการควบคุมกระแสโมดอื่นๆ คือ ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน สามารถสร้างระบบควบคุมขึ้นมาง่ายกว่าระบบควบคุมกระแสแบบอื่นๆ และสามารถสร้างระบบป้องกันกระแสเกินได้ง่าย ในปัจจุบันมีหลายบริษัทที่ได้พัฒนางจรรวมเพื่อใช้ทำหน้าที่ควบคุมกระแสในโมดนี้ เช่น เบอร์ ML4812 และ ML4819 จากบริษัท MicroLinear เบอร์ TK84812 และ TK84816 จาก Toko

2.10.1.3 การควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิส การควบคุมกระแสชนิดนี้ทำงานด้วยการเปรียบเทียบปริมาณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำจริงกับค่ากระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิงโดยอาศัยชุด



ภาพที่ 2-23 แบบแผนการควบคุมขอบเขต

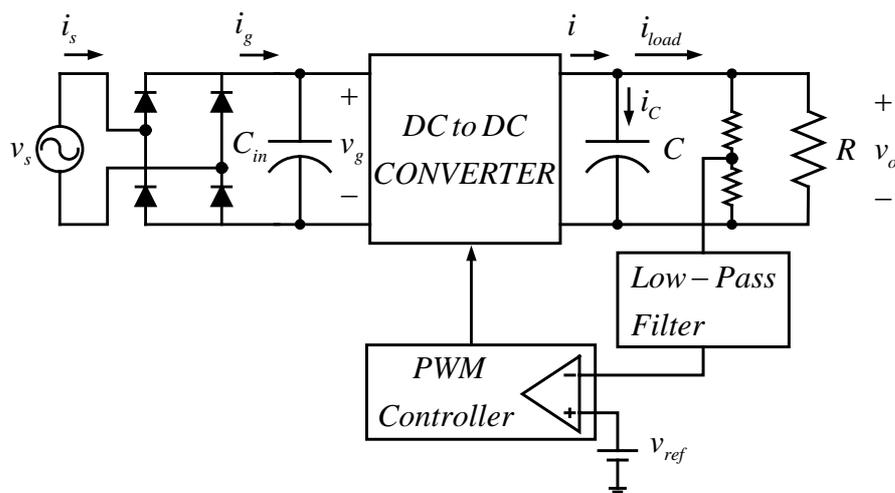
เปรียบเทียบฮิสเทอรีซิส ผลที่ได้คือ สวิตช์ถูกควบคุมให้นำกระแสเมื่อกระแสขดลวดเหนี่ยวนำที่ไหลมีค่าต่ำกว่าค่าอ้างอิงที่ตั้งไว้และหยุดนำกระแสเมื่อกระแสจริงสูงกว่าค่ากระแสอ้างอิงที่กำหนด โดยผลรวมของสองค่าสัญญาณอ้างอิงด้านบนและด้านล่างที่กำหนดไว้คือแถบความกว้างของกระแสอ้างอิงนั่นเอง ข้อดีของการควบคุมชนิดนี้คือ ระบบสามารถควบคุมให้เกิดความผิดเพี้ยนรูปคลื่นกระแสแหล่งจ่ายต่ำ ง่ายในการสร้างวงจรเพื่อใช้งาน ระบบควบคุมมีความคงทนและเสถียรภาพสูง แต่ระบบมีข้อเสียคือ ความถี่ที่ทำงานเป็นแบบไม่คงที่

2.10.2 การควบคุมที่ขอบเขต ดังที่แสดงในภาพที่ 2-23 ในวิธีการควบคุมชนิดนี้ ช่วงเวลาการนำของสวิตช์ถูกกำหนดให้คงที่ในระหว่างคาบเวลาของกระแสไซน์และสวิตช์ถูกขับนำกระแสเมื่อกระแสขดลวดเหนี่ยวนำตกถึงค่าศูนย์ ดังนั้น เครื่องแปลงผันทำงานที่ขอบเขตระหว่างโหมดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง กระแสอินพุตชั่วขณะถูกควบคุมให้มีลักษณะเป็นสัญญาณที่เรียงกันของรูปกระแสามเหลี่ยมที่ค่ายอดและค่าเฉลี่ยแปรเป็นสัดส่วนกันกับแรงดันไลน์ชั่วขณะ ความถี่สวิตช์เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาไลน์และภาระของระบบมีผลกระทบต่อความถี่สวิตช์อย่างมาก

2.10.3 การควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้วยหลักการตามแรงดัน (Voltage-Follower Approach Control) ในวงจรการแก้ไขตัวประกอบกำลังทั้งหมด มีความต้องการนำขดลวดเหนี่ยวนำ

อินพุตต่อร่วมอยู่กับวงจรเต็มบริดจ์เรียงกระแส เพราะเนื่องจากต้องการความต่อเนื่องของกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำ เราจึงเรียกลักษณะของการต่อแบบนี้ว่า กลไกของการขับกระแส (Current Driven) ขดลวดเหนี่ยวนำอินพุตสามารถทำงานภายใต้สถานะโหมคโคโหมคหนึ่งได้ดังต่อไปนี้ โหมคกระแสไหลต่อเนื่อง หรือ โหมคกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง ในโหมคกระแสไหลไม่ต่อเนื่องนั้น ตัวแปรที่สำคัญอยู่ที่วงรอบของการสวิตซ์ชิ่ง ยอดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำถูกสุ่มและควบคุมให้เป็นไปตามแรงดันแหล่งจ่ายโดยอัตโนมัติ ด้วยคุณสมบัติเช่นนี้เองของวงจรที่ทำงานในโหมคกระแสไหลไม่ต่อเนื่องจึงถูกเรียกว่า การแก้ไขตัวประกอบกำลังด้วยตัวเอง (Self-Power Factor Correction) เพราะเนื่องจากระบบไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมกระแสอินพุต กระแสอินพุตเฉลี่ยที่ได้มาเป็นไปตามแรงดันอินพุตตามธรรมชาติ ด้วยลักษณะของการควบคุมเช่นนี้จึงให้ข้อดีว่าการควบคุมบนหลักการคูณ อย่างไรก็ตาม ขดลวดเหนี่ยวนำอินพุตขณะที่ทำงานอยู่ในโหมคกระแสไหลไม่ต่อเนื่องไม่สามารถรองรับพลังงานอินพุตที่มากเกินไปได้เพราะเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำต้องดึงพลังงานที่จะถูกเก็บเข้ามาและปล่อยออกไปก่อนสิ้นสุดในแต่ละวงรอบของการสวิตซ์ ด้วยผลเช่นนี้ ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ จึงถูกใช้เพื่อที่จะสมดุลกำลังไฟฟ้าชั่วขณะระหว่างอินพุตและเอาต์พุตดังแสดงในภาพที่ 2-21 กล่าวเพิ่มเติมได้อีกว่า ถ้าโหมคการนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่องถูกใช้งาน กระแสอินพุตมีลักษณะเป็นแนวของรูปคลื่นพัลส์สามเหลี่ยมปกติที่ประกอบด้วยอัตราส่วนวัฏจักรงานที่เกือบคงที่ ในกรณีนี้ ตัวกรองกระแสด้านอินพุตมีความจำเป็นอย่างมากเพื่อกรองกระแสที่มีลักษณะเป็นพัลส์ให้เป็นรูปสัญญาณต่อเนื่อง เห็นได้ชัดเจนว่า เพื่อที่จะให้เกิดความมั่นใจว่าระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังสูง กระแสเฉลี่ยของกระแสพัลส์ต้องมีลักษณะเป็นไปตามแรงดันอินพุตทั้งเฟสและรูปคลื่น

ระบบการควบคุมชนิดนี้สามารถใช้กับเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบพื้นฐานได้หลากหลายแบบ เช่น วงจรบัค บูสต์ บัค-บูสต์ ไฟล์แบค ฟอร์เวดชุก และ ซีพิก อย่างไรก็ตาม เมื่อถูกนำไปใช้เป็นวงจรเรียงกระแสที่ให้ค่าตัวประกอบกำลังสูง แต่ละโทปโพลโลจี้ที่อาจมีรูปคลื่นของกระแสอินพุตที่ถูกเฉลี่ยแล้วที่แตกต่างกันไป หลักการควบคุมชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องใช้วงจรรวมชนิดพิเศษและสามารถควบคุมให้ทำงานที่ความถี่สวิตซ์คงที่ได้ ข้อดีอีกประการของระบบการควบคุมนี้คือ เมื่อความถี่ของแหล่งจ่ายเปลี่ยน (มากกว่าความถี่ปกติ) ระบบยังคงสามารถควบคุมให้เป็นไปตามหลักการตามแรงดันได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบนี้มีข้อดีอยู่บางประการ เช่น เครื่องแปลงผันทั้งหมดที่กล่าวมาทำงานอยู่ในโหมคกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง



ภาพที่ 2-24 แบบแผนการควบคุมแบบตามแรงดัน

ดังนั้นความเครียดในสารกึ่งตัวนำกำลังถูกทำให้เพิ่มขึ้นในทุกๆ วงจรต้นแบบที่ทำงานในโหมดกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง การกระเพื่อมที่เกิดจากความถี่สูงในกระแสอินพุตเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วยในบางวงจรต้นแบบ เช่น บูสต์ และ บัค-บูสต์ อย่างไรก็ตาม บางวงจรต้นแบบ เช่น ซีพิก หรือ ชุก สามารถควบคุมให้ทำงานได้ในโหมดกระแสไหลไม่ต่อเนื่องพร้อมกับการกระเพื่อมที่ต่ำลงที่ความถี่สูงในกระแสอินพุต ถ้าตัวเหนี่ยวนำนั้นถูกออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสม

ตารางที่ 2-11 สรุปเทคนิคการควบคุมกระแสในวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง

รายละเอียดการควบคุม	แบบกระแสเฉลี่ย	แบบขอบเขต	แบบตามแรงดัน
โหมดการควบคุมกระแส	เป็นแบบต่อเนื่อง	ต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง	เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง
การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำอินพุต	ง่าย	ต้องออกแบบให้ได้ค่าที่เหมาะสม	ง่าย
การวิเคราะห์เพื่อหาโมเดลของระบบกำลัง	ง่าย	ยากปานกลาง	ยุ่งยากมาก
วงจรกรองด้านอินพุต	ขนาดเล็ก	ขนาดใหญ่	ขนาดใหญ่
วงจรคูณสัญญาณ	จำเป็นต้องใช้	จำเป็นต้องใช้	ไม่จำเป็นต้องใช้
วงจรวัดกระแสอินพุต	จำเป็นต้องใช้	จำเป็นต้องใช้	ไม่จำเป็นต้องใช้
ค่าความผิดเพี้ยนกระแส	ต่ำ	เล็กน้อย	เล็กน้อย

หมายเหตุ เพื่อความเข้าใจโดยง่าย วงจรกำลังที่ใช้อธิบายจึงเลือกเป็นเครื่องแปลงผันแบบบูสต์

2.11 สรุป

เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบแอกทีฟเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการแพร่กระจายของกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขของระดับพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูงมากนัก (ประมาณ 2-3 kW) เทคนิคนี้ต้องอาศัยวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดพื้นฐานเช่น บูสต์ บัค บัค-บูสต์ ฟลายแบ็ก ซีพิก หรือ ชุก อย่างไรก็ตาม วงจรแปลงแรงดันแบบบูส ซีพิก และชุก ให้คุณสมบัติที่เด่นคือมีคุณลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้ง่ายต่อการควบคุมระบบวงจรกำลังให้ทำงานอยู่ในโหมดการควบคุมกระแสแบบต่างๆ เช่น โหมดการควบคุมกระแสแบบต่อเนื่อง โหมดการควบคุมกระแสชดวคเหนี่ยวนำไหลอย่างไม่ต่อเนื่องและโหมดที่อยู่ระหว่างการนำอย่างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เครื่องแปลงผันแบบบูสต์ ซีพิกและชุก ที่ถูกควบคุมให้ทำงานอยู่ในโหมดกระแสชดวคเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ระบบควบคุมกระแสเป็นแบบฮิสเตอร์ซิสซึ่งเป็นระบบควบคุมที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนแต่ให้ประสิทธิภาพที่ดีต่อการควบคุม ซึ่งรายละเอียดของเนื้อหาทั้งหมดจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 3 4 และ 5

บทที่ 3

การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบรูส ซีพิก และ ชุก

ในปัจจุบันเทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบแอกทีฟที่ใช้เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิดพื้นฐานได้รับการออกแบบและพัฒนาให้มีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการแพร่กระจายของกระแสฮาร์มอนิกส์ได้เป็นอย่างดี [38, 39, 40, 41, 42, 43] แต่อย่างไรก็ตามแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าดังกล่าวในรูปแบบเชิงเดี่ยวที่ถูกออกแบบให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงมีข้อเสียในเรื่องของการกระจายความร้อนของระบบ อุปกรณ์ประกอบมีราคาแพง ทั้งยังต้องใช้เวลาและความสามารถในการออกแบบสูงเมื่อภาระมีระดับของความต้องการแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นการพัฒนาและออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตซ์ซึ่งที่มีลักษณะการกระจายจึงเข้ามาแทนที่ ระบบที่มีการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดนี้สามารถจำแนกแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างสถาปัตยกรรมแรงดันไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างระบบบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ [44, 45] โครงสร้างสถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกประกอบขึ้นจากภาคส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ภาควงจรเรียงกระแสซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแก้ไขตัวประกอบกำลังของระบบให้ใกล้เคียงหนึ่ง [46, 47, 48, 49, 50] ส่วนที่ 2 เป็นวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงให้กับบัสแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดแรงดันเอาต์พุตใดๆ เช่น 5 V 12 V 48 V หรือ -48 V พร้อมกับทำหน้าที่แยกโคจรทางไฟฟ้าระหว่างภาคอินพุตและเอาต์พุตของระบบโดยอาศัยหม้อแปลงความถี่สูง

เนื้อหาของบทที่ 3 นี้ จะได้กล่าวถึงการออกแบบ การจำลองการทำงานและการทดสอบระบบวงจรส่วนหน้าในโครงสร้างแบบขนานที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบรูส ซีพิก และชุก ชนิด 1 เฟส โดยที่ระบบดังกล่าวมีหน้าที่หลัก 4 ประการดังนี้ คือ

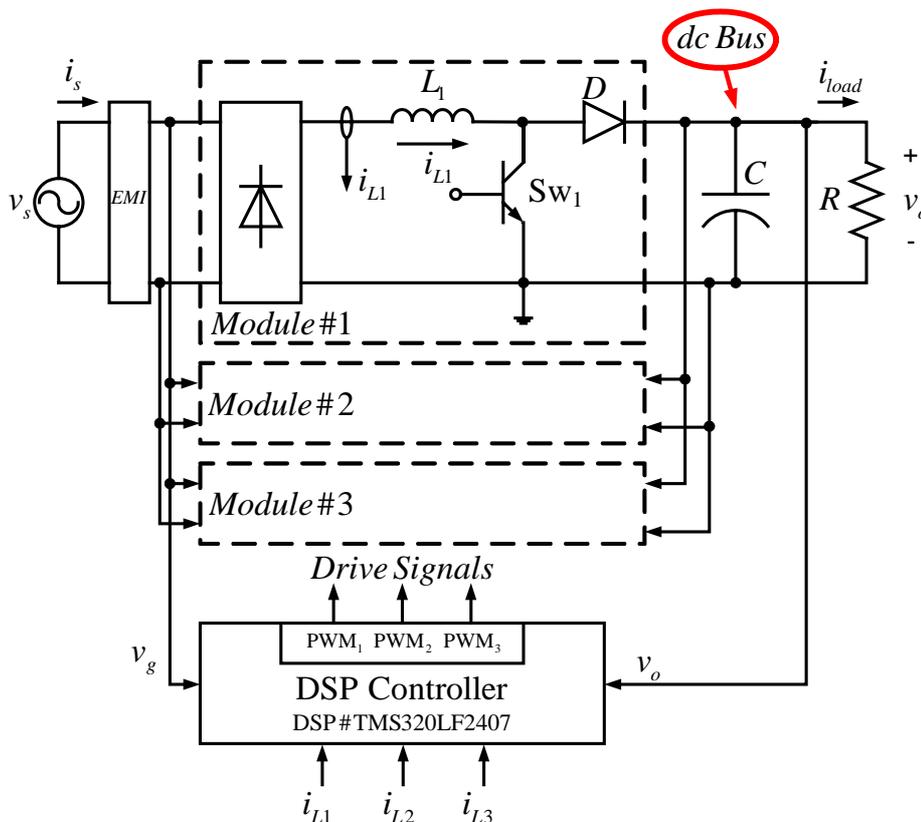
1. เพื่อที่จะควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต
2. เพื่อที่จะแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้ใกล้เคียงหนึ่ง
3. เพื่อที่จะแบ่งกระแสโหลดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลให้มีค่าใกล้เคียงกัน
4. เพื่อที่จะเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าให้กับระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

3.1 การขนานโมดูลเรียงกระแสแบบบัสชนิด 1 เฟสด้วยหลักการพีดับบลิวเอ็ม

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ว่า เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัสชนิดพื้นฐานได้รับความนิยมอย่างสูงในการนำมาใช้เป็นวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอคทีฟ เนื่องจากโครงสร้างไม่มีความซับซ้อน ระบบสามารถควบคุมให้ทำงานอยู่ในโหมดกระแสเฉลี่ยได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังของระบบให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

ในส่วนนี้จะได้อธิบายถึงการนำโมดูลวงจรเรียงกระแสแบบบัสชนิด 1 เฟส จำนวน 3 โมดูลมาประกอบกันขึ้นเป็น โครงสร้างแบบขนาน เพื่อที่จะให้ระบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ถูกต้องเพิ่มเข้ามาในระบบได้ ระบบการขนานเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ที่ประกอบขึ้นจากโมดูลเรียงกระแสแบบบัสจำนวน 3 โมดูล ที่ถูกควบคุมด้วยหลักพีดับบลิวเอ็ม ดังแสดงอยู่ในภาพที่ 3-1

3.1.1 การออกแบบโมดูลเรียงกระแสแบบบัส ในตอนนี้ได้กล่าวถึงสมการของการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบบัส



ภาพที่ 3-1 โครงสร้างแบบขนานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบัสจำนวน 3 โมดูล

ที่ตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ในโหมดการควบคุมกระแสชดวลดเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่อง ที่ความถี่ของการสวิตช์คงที่ ภาพที่ 3-1 แสดงโมดูลเรียงกระแสแบบบรูสต์ ระบบประกอบด้วยวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ (Bridge Rectifier) ที่ทำหน้าที่แปลงผันไฟสลับเป็นไฟตรง เพื่อให้แรงดันที่ได้มีค่าเป็น $v_g = \hat{V}_g |\sin \omega t|$ โดยไม่ต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่สำหรับกรองแรงดันให้เรียบ กำหนดให้ระบบทำงานอยู่ในโหมดกระแสชดวลดเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่อง

3.1.1.1 การออกแบบชดวลดเหนี่ยวนำ ให้สมมุติว่าขณะนี้ระบบสามารถควบคุมให้กระแสอินพุตเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต ดังนั้นสมการค่ายอดของกระแสอินพุตคือ

$$\hat{I}_{S,\max} = \frac{\sqrt{2}P_o}{\eta V_{S,\min}} \quad (3-1)$$

สมการ duty ratio สูงสุด คือ

$$d_{\max} = \frac{(V_o - \hat{V}_{S,\min})}{V_o} \quad (3-2)$$

สมการค่าการกระแสวิงของชดวลดเหนี่ยวนำ คือ

$$\Delta i_L \leq (\%i_L)(\hat{I}_{S,\max}) \quad (3-3)$$

สมการชดวลดเหนี่ยวนำ

$$L \geq \frac{\hat{V}_{S,\min} d_{\max}}{f_{sw} \Delta i_L} \quad (3-4)$$

3.1.1.2 การออกแบบตัวเก็บประจุเอาต์พุต ตัวเก็บประจุสามารถใช้ค่าตัวเลขดังต่อไปนี้เพื่อใช้ในการออกแบบได้คือ $1 \mu\text{F}/\text{W}$ ถึง $2 \mu\text{F}/\text{W}$ (กรณีกำหนดได้จากค่าแรงดันพลิวเอาต์พุต) หรือใช้สมการที่พิจารณาถึงค่าเวลาคืนตัวดังนี้

$$C_o \geq \frac{2P_o \Delta_{th}}{V_o^2 - V_{o,\min}^2} \quad (3-5)$$

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดด้านเทคนิคของโมดูลเรียงกระแสแบบบวสต์

คุณลักษณะ	รายละเอียด
แรงดันอินพุต (V_{SN})	220 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
ความถี่สวิตช์	20 kHz
พิกัดกำลังไฟฟ้าแต่ละโมดูล	500 W/Module
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมที่จ่ายภาระปกติ	1,000 W
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมที่จ่ายภาระสูงสุด	1,500 W
แรงดันเอาต์พุต	400 V
L_{11}, L_{12}, L_{13} ,	5.014 mH, 5.064 mH, 5.052 mH
C_o	940 μ F

3.1.2 แบบแผนการควบคุมระบบที่นำเสนอ ในตอนนี้ได้กล่าวถึงรูปแบบของการควบคุมระบบของการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ที่ให้ตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบวสต์ บนหลักการพีดับบลิวเอ็ม แบบแผนของการควบคุมระบบประกอบไปด้วยรูปของการควบคุมกระแสชดวอดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลและรูปของการควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง รูปควบคุมกระแสชดวอดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลถูกกำหนดให้เป็นรูปในมีจำนวนทั้งสิ้น 3 รูป ส่วนรูปของการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตเป็นรูปนอก รูปแบบการควบคุมระบบที่นำเสนอประกอบด้วย ระบบควบคุมกระแสชดวอดเหนี่ยวนำเป็นชนิดพีดับบลิวเอ็ม ดังปรากฏอยู่ในรูปควบคุมกระแสของแต่ละโมดูล ในรูปของการควบคุมประกอบด้วยชุดควบคุมแบบพีโอที่ถูกใช้เพื่อควบคุมค่ากระแสเฉลี่ยของแต่ละโมดูลดังถูกแสดงในภาพที่ 3-2 (ก) สัญญาณอ้างอิงที่ได้จากชุดพีโอ คือ $d^*(s)$ ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นอินพุตให้กับชุดพีดับบลิวเอ็มจากนั้นชุด พีดับบลิวเอ็มจะสร้างสัญญาณ $d(s)$ ไปขับนำระบบเพื่อแก้ไขค่าสัญญาณผิดพลาดที่ได้จากผลต่างระหว่างกระแสชดวอดเหนี่ยวนำจริงในแต่ละโมดูลกับสัญญาณกระแสชดวอดเหนี่ยวนำอ้างอิงของแต่ละโมดูลให้มีค่าเป็นศูนย์ จากภาพที่ 3-2 (ก) สมการของกระแสชดวอดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลคือ

$$L_i \frac{di_{Li}}{dt} = |v_s| - (1 - d_i) v_o \quad (3-6)$$

เมื่อกำหนดให้

I_L คือ กระแสขดลวดเหนี่ยวนำจริงของแต่ละโมดูลเรียงกระแสแบบบรูสต์

L_j คือ ค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลเรียงกระแสแบบบรูสต์

d_j คือ อัตราส่วนภาระงานเฉลี่ยของแต่ละโมดูลเรียงกระแสแบบบรูสต์

$|v_s|$ และ V_o คือ แรงดันเรียงกระแสเต็มคลื่นและแรงดันเอาต์พุตตามลำดับ

i คือ จำนวนโมดูลเรียงกระแสแบบบรูสต์ในระบบที่นำเสนอมีค่าตั้งแต่ 1,2,3... N

ในรูปควบคุมแรงดัน ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วยชุดควบคุมพีไอ ถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงดังแสดงในภาพที่ 3-2 (ข) ชุดควบคุมทำหน้าที่ สร้างสัญญาณอ้างอิง $I_{DC}^*(s)$ จากนั้นสัญญาณนี้จะถูกคูณด้วยค่าสมมูลของสัญญาณแรงดันอินพุต ที่ถูกเรียงสัญญาณเป็นแบบเต็มคลื่นที่มีขนาดของค่ายอดเป็นหนึ่งหน่วย เพื่อเป็นการสร้างสัญญาณ กระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิงรวม (I_{LP}^*) ผลที่ได้รับคือกระแสอินพุตที่ได้เป็นสัญญาณไซน์ตาม อุดมคติและมีมูมเฟสที่ค่าเป็นศูนย์เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ไลน์ สมการกำลังไฟฟ้าอินพุตชั่วขณะของระบบสามารถเขียนได้ดังนี้

$$p_{in}(t) = \frac{\hat{V}_s \hat{I}_s}{2} - \frac{\hat{V}_s \hat{I}_s}{2} \cos(2\omega t) \quad (3-7)$$

ขณะที่

\hat{V}_s และ \hat{I}_s คือ ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ไลน์

สมการที่ (3-7) ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอินพุตและกำลังไฟฟ้ากระแสเพื่อมอินพุต ถ้า ระบบไม่มีการสูญเสีย ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอินพุตถูกใช้โดยภาระที่ต่ออยู่กับระบบและกำลังไฟฟ้า กระแสเพื่อมอินพุตจะถูกดึงไปที่ตัวเก็บประจุเอาต์พุต ซึ่งแสดงด้วยสมการได้ดังนี้

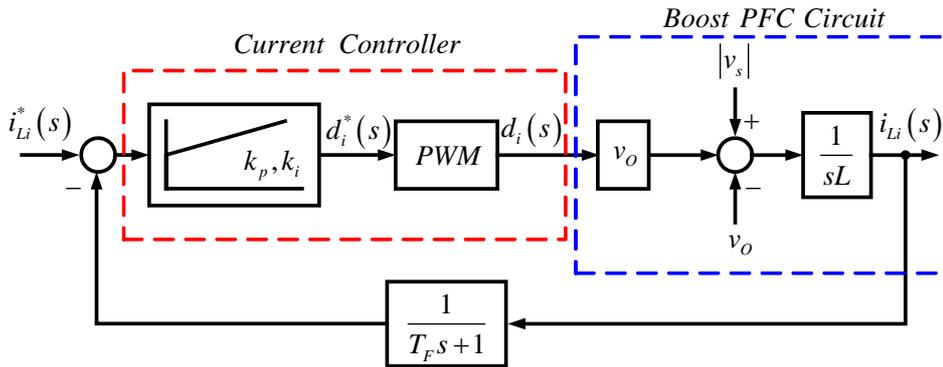
$$CV_o^* \frac{d\hat{v}_o}{dt} = -\frac{\hat{V}_s \hat{I}_s}{2} \cos(2\omega t) \quad (3-8)$$

ขณะที่

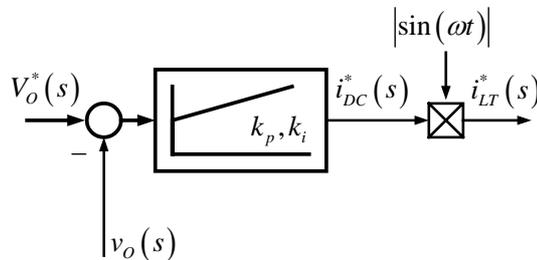
C คือ ค่าตัวเก็บประจุเอาต์พุต

V_o^* คือ แรงดันอ้างอิงเอาต์พุต

\hat{v}_o คือ แรงดันกระแสเพื่อมเอาต์พุต



(ก) รูปควบคุมกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ ที่ $k_p=0.061$ และ $k_i=0.0078$



(ข) รูปควบคุมแรงดันของระบบที่ $k_p=0.125$ และ $k_i=0.0156$

ภาพที่ 3-2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบที่ถูกนำเสนอด้วยชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

สมการแรงดันกระแสเพื่อเอาต์พุตที่ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบที่ได้นำเสนอขึ้นแสดงอยู่ในสมการที่ (3-9) ซึ่งแสดงถึงสัญญาณที่ถูกป้อนกลับให้กับรูปควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง

$$\tilde{v}_o = -\frac{\hat{V}_s \hat{I}_s}{4\omega CV_o} \sin(2\omega t) \tag{3-9}$$

หลักของการออกแบบรูปควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงคือ ระบบต้องการควบคุมให้กระแสอินพุตมีสัญญาณใกล้เคียงไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต พร้อมกับควบคุมค่าแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตให้คงที่ ระบบที่นำเสนอจึงถูกออกแบบให้มีค่าความถี่ตัดผ่านเกณฑ์ศูนย์มีค่าไม่เกินหนึ่งในสามของความถี่กำลังไฟฟ้าอินพุต (50Hz) โดยทั่วไปเลือกความถี่ตัดผ่านเกณฑ์ศูนย์ที่ประมาณ 8-10 Hz ที่ระบบให้ค่าเฟสมาจูนมากกว่า 45 องศา

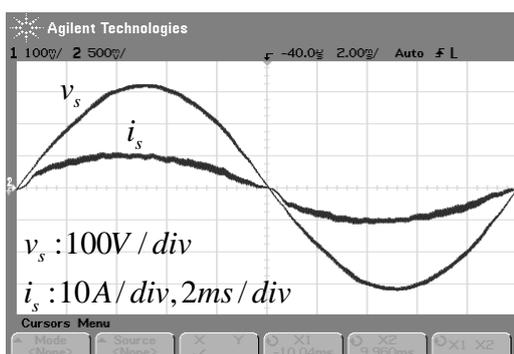
3.1.3 การทดสอบระบบที่นำเสนอ การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบบวสต์จำนวน 3 โมดูล ที่กระแสขดลวดเหนี่ยวนำถูกควบคุมให้ทำงานอยู่ในโหมดควบคุมกระแสพีคดับลิวเอ็มได้รับการทดสอบภายใต้สภาวะที่สำคัญ 3 ประการดังนี้คือ

3.1.3.1 การทดสอบในสภาวะคงตัว

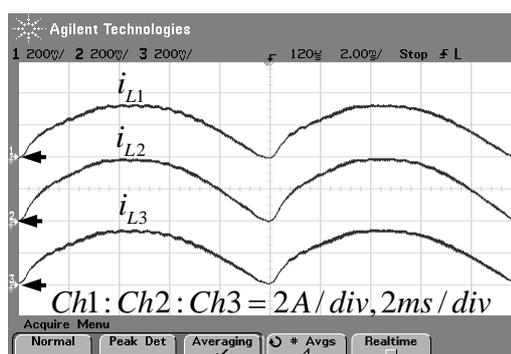
3.1.3.2 การทดสอบสภาวะเมื่อแต่ละโมดูลเกิดความเสียหาย

3.1.3.3 การทดสอบสมรรถนะโดยรวมของระบบ

ผลของการทดสอบในสภาวะคงตัวของระบบที่นำเสนอถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-3 และ ภาพที่ 3-4 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไลน์อินพุตเมื่อจ่ายภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1,500 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-3 (ก) กระแสไลน์อินพุตที่ได้มีรูปคลื่นที่เกือบใกล้เคียงสัญญาณไซน์และผลของเฟสตรงกันกับแรงดันไลน์อินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 โมดูลที่ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1,500 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-3 (ข) ส่วนภาพที่ 3-4 (ก) แสดงแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัด 400 V และกระแสภาระที่พิกัดสูงสุด 3.75 A ภาพที่ 3-4 (ข) แสดงแรงดันกระแสเฟืองของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยระบบที่นำเสนอถูกออกแบบให้มีค่า $\Delta V_o = 10$ V (คิดเป็น 2.5%) เมื่อระบบถูกกำหนดให้บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 940 μ F เนื่องจากความแตกต่างของค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานภายในของแต่ละโมดูลที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าปริมาณกระแสในแต่ละโมดูลมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย



(ก)

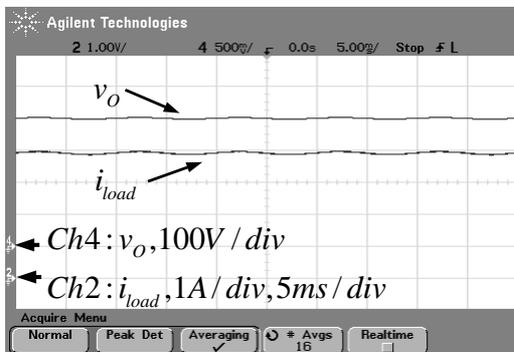


(ข)

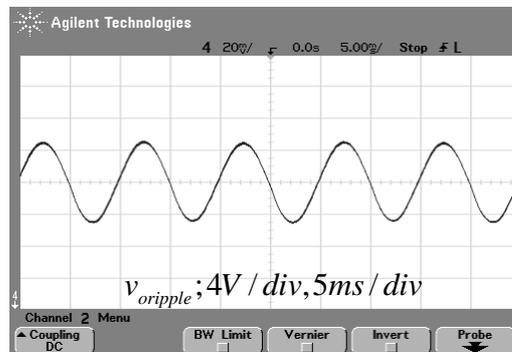
ภาพที่ 3-3 ผลการทดสอบภายใต้สภาวะคงตัวระบบขนานวงจรเรียงกระแสแบบบวสต์ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1.5 kW (ก) แรงดันไลน์อินพุตและกระแสไลน์ (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในสภาวะปกติของแต่ละโมดูล

แต่อย่างไรก็ตาม สามารถประมาณได้ว่ากระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้งหมดมีค่าของขนาดที่เท่ากัน นั่นก็หมายความว่าระบบควบคุมกระแสชนิดพีดับบลิวเอ็มที่นำเสนอนี้สามารถแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลให้มีค่าเท่ากันได้ ในขณะที่ตัวประกอบกำลังของระบบยังคงใกล้เคียงหนึ่ง

ภาพที่ 3-5 (ก) แสดงกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของทั้งสามโมดูลในสภาวะคงตัว โดยระบบที่นำเสนอทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัดสูงสุด 1,500 W ผลของการทดสอบในสภาวะที่โมดูลได้รับความเสียหายถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-5 (ข) ถึง (ง) ซึ่งระบบได้แสดงให้เห็นถึงสภาวะของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโมดูลที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ในสภาวะของการทดสอบนี้ระบบต้องถูกจำกัดการรวมเอาต์พุตไว้ที่ไม่เกิน 1,000 W ภาพที่ 3-5 (ข) แสดงกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในขณะโมดูลหมายเลข 1 เกิดความเสียหาย ส่วนภาพที่ 3-5 (ค) แสดงสภาวะที่เกิดความเสียหายกับโมดูลที่ 2 และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโมดูลที่ 3 ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-5 (ง) ซึ่งจากผลการทดสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอยังคงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้อย่างต่อเนื่อง เป็นไปตามหลักของการออกแบบระบบขนานเพื่อให้ระบบที่ถูกออกแบบด้วยโครงสร้างชนิดนี้มีความสามารถในการเพื่อกำลังไฟฟ้าให้กับระบบด้วยหลักของสมการจำนวนโมดูลที่ต้องปรากฏอยู่ในระบบกำลังคือ $n_M = N + 1$

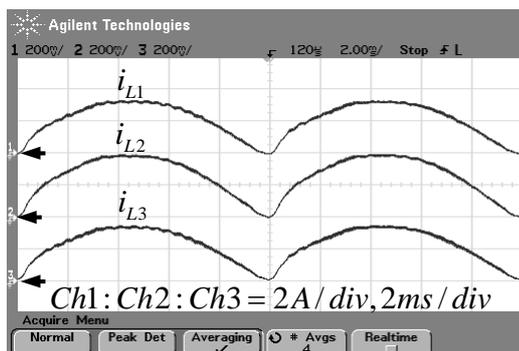


(ก)

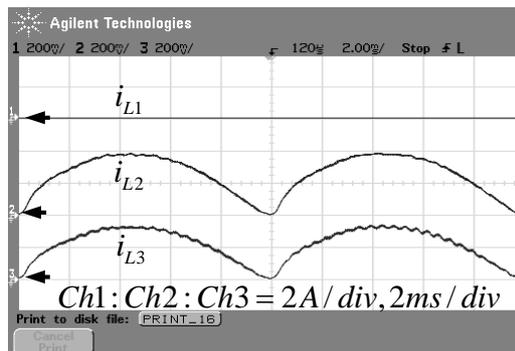


(ข)

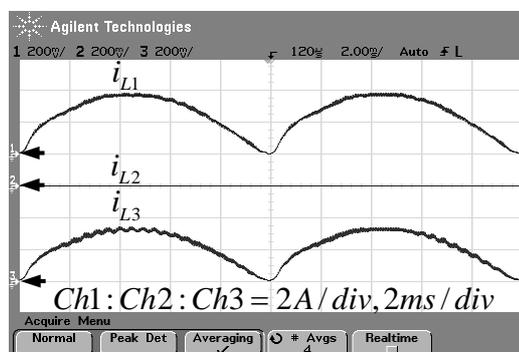
ภาพที่ 3-4 ผลของการทดสอบในสภาวะคงตัวของการทำงานวงจรเรียงกระแสแบบบวสต์ พิกัดกำลังไฟฟ้า 1.5 kW (ก) แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระ, (ค) แรงดันพลิ้วของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



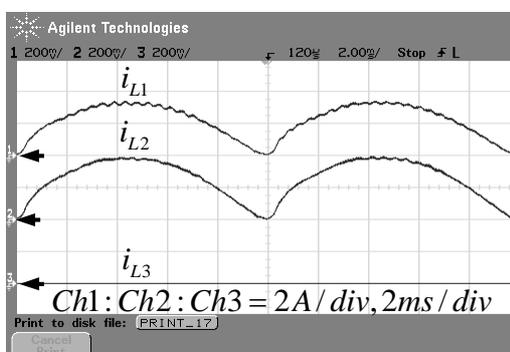
(ก)



(ข)



(ค)

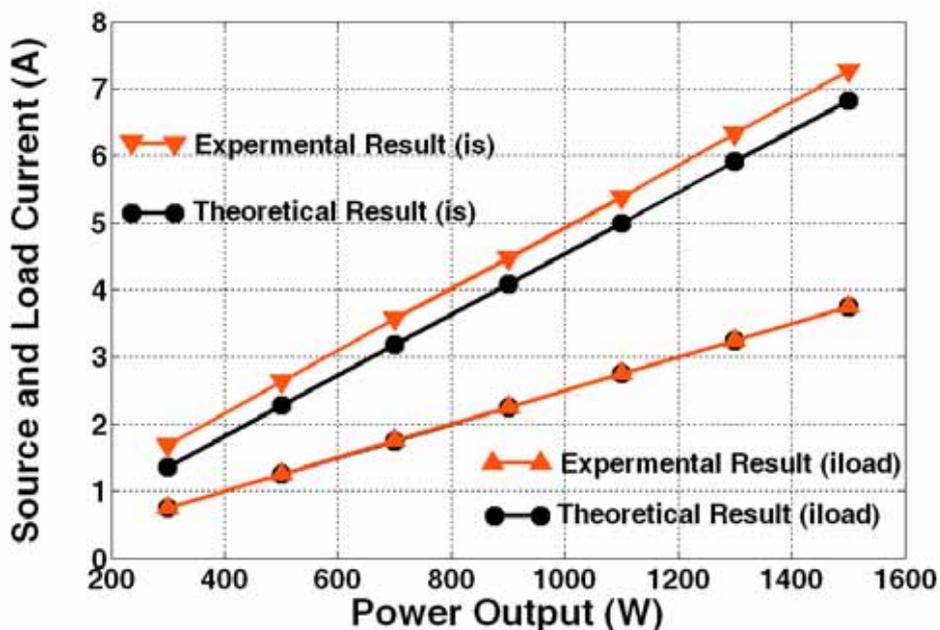


(ง)

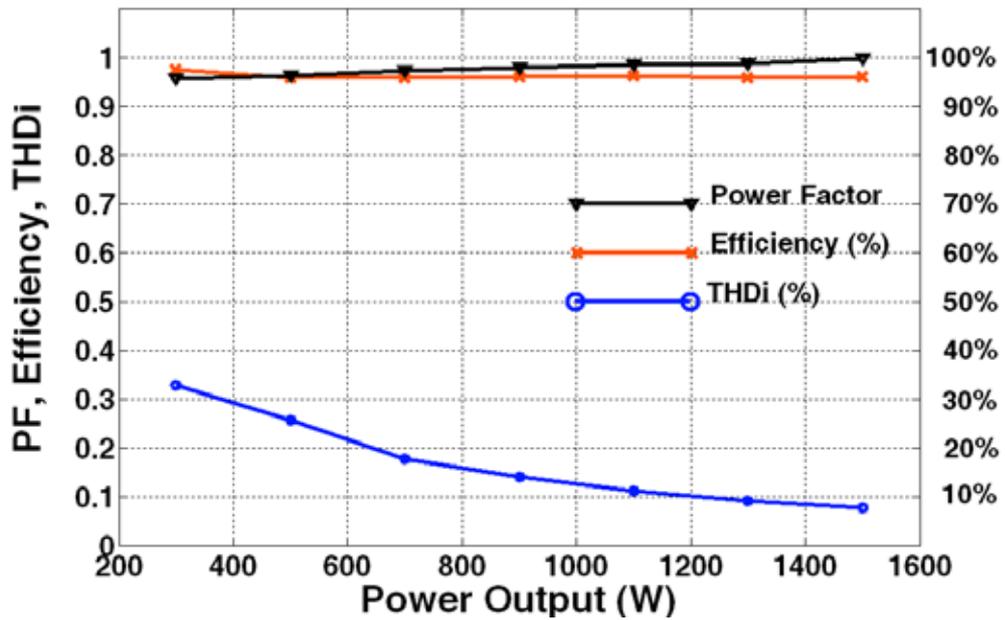
ภาพที่ 3-5 ผลการทดสอบในสถานะเมื่อโมดูลเสียหาย (ก) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในสถานะปกติของแต่ละโมดูล (ข) (ค) (ง) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อ โมดูลที่ 1 2 และ 3 เกิดความเสียหายตามลำดับ

ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบที่ถูกนำเสนอแสดงด้วยปริมาณกระแสไลน์อินพุต แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสการะ ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพ ความผิดเพี้ยน ฮาร์มอนิกสรวมของกระแสไลน์อินพุตและมาตรฐาน IEC 1000-3-2 ปริมาณทั้งหมดถูกวัดจาก Digital Power Meter YOKOGAWA โมเดล WT110 ภาพที่ 3-6 แสดงกราฟกระแสไลน์อินพุตและกระแสการะที่ถูกทดสอบภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 300 W ถึง 1,500 W ปริมาณที่วัดได้ถูกเปรียบเทียบกับปริมาณจากการคำนวณ เส้นกราฟทั้งสองปริมาณมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบบขนานและตามกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าระบบที่ได้นำเสนอนี้สามารถควบคุมระบบที่นำเสนอให้มีพฤติกรรมเป็นภาระแบบเชิงเส้นได้

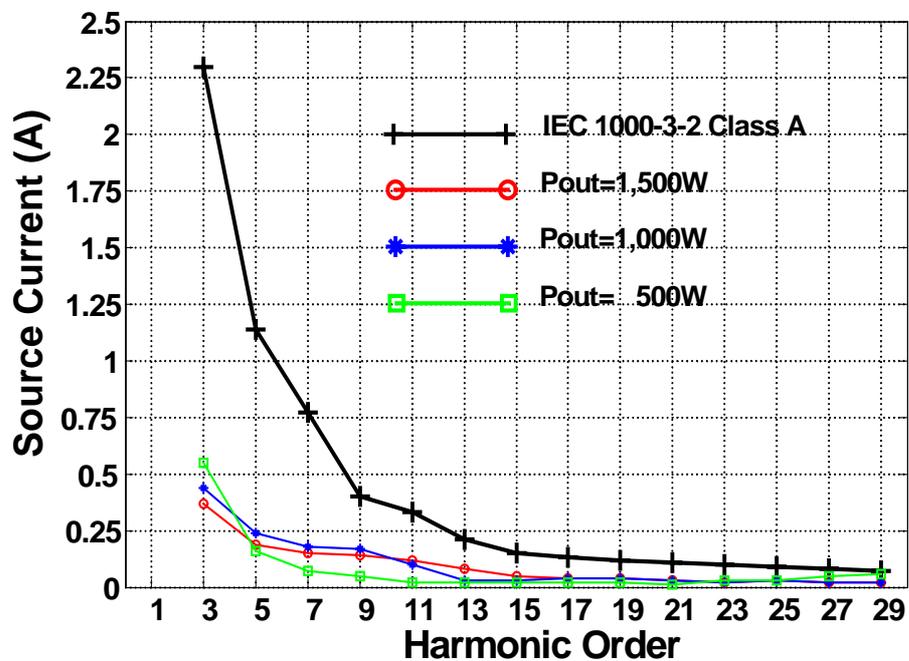
เส้นกราฟของกระแสหาระทับกันกับค่าที่คำนวณได้ซึ่งชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมให้แรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงคงที่เมื่อภาระเปลี่ยนแปลงไป ในภาพที่ 3-7 แสดงสมรรถนะที่สำคัญของระบบที่นำเสนอ เส้นบนสุดแสดงตัวประกอบกำลัง $\cos \phi$ ตำแหน่งอินพุตของระบบ เส้นกลางแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบ เส้นล่างสุดแสดงค่าความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของกระแสไลน์อินพุต การทดสอบค่ากระแสฮาร์มอนิกสร่วมของระบบแสดงอยู่ใน 2 สภาวะ คือ สภาวะที่เปลี่ยนแปลงภาระ 3 ระดับ (ระดับละ 500 W) และในสภาวะที่แต่ละโมดูลได้รับความเสียหายซึ่งถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-8 และ 3-9 ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงระบบที่นำเสนอนั้นสามารถทำงานอยู่ภายใต้ข้อกำหนดและกรอบมาตรฐาน ของ IEC 1000-3-2 Class A ส่วนในภาพที่ 3-10 ได้แสดงค่าตัวประกอบกำลังเมื่อแรงดันไลน์อินพุตมีการเปลี่ยนแปลงใน 3 ระดับ โดยกำหนดให้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ กราฟชี้ให้เห็นว่าเมื่อแรงดันไลน์อินพุตเพิ่มขึ้น ตัวประกอบกำลังของระบบจะลดลงโดยเฉพาะที่ค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่ำสุด



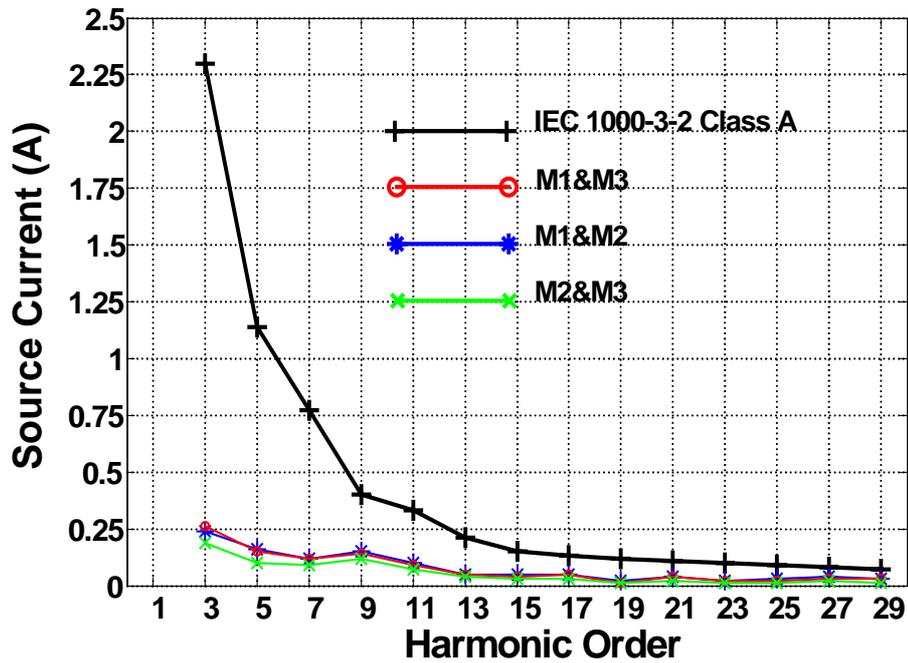
ภาพที่ 3-6 การเปรียบเทียบปริมาณของกระแสไลน์อินพุตที่ถูกวัดจริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ
คำนวณและค่ากระแสหาระที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณบนพื้นฐานการ
เปลี่ยนแปลงที่ภาระ



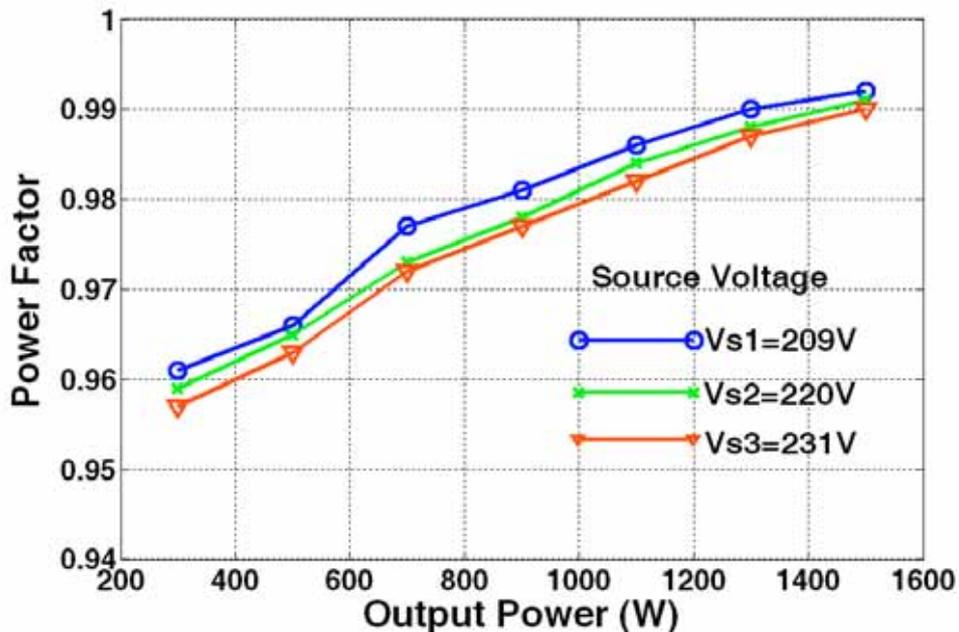
ภาพที่ 3-7 ผลการทดสอบสมรรถนะที่สำคัญของระบบที่นำเสนอ เมื่อกำหนดให้ระบบทำงานที่ พิกัดแรงดันไลน์อินพุต $V_s = 220$ V และ แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง 400 V



ภาพที่ 3-8 ผลทดสอบของกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 บน เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าของภาระใน 3 ระดับ



ภาพที่ 3-9 ผลการทดสอบของกระแสฮาร์โมนิกส์เมื่อโมดูลได้รับความเสียหายโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 (อย่างน้อยต้องคงเหลือไว้ 2 โมดูลในแต่ละกรณี)



ภาพที่ 3-10 ผลการทดสอบตัวประกอบกำลังของระบบเมื่อเทียบกับเงื่อนไขของแรงดันไลน์อินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงไป 3 ระดับ และ ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 300 W ถึง 1,500 W

3.1.4 สรุปผล ผลของการทดสอบระบบการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบบวสต์จำนวน 3 โมดูล ที่ถูกควบคุมด้วย DSP เบอร์ TMS320LF2407 ได้ถูกนำเสนอในตอนต้นที่ 3.1 นี้ ระบบต้นแบบถูกออกแบบให้มีพิกัดกำลังไฟฟารวมเอาต์พุตปกติ 1,000 W (สูงสุดที่ 1,500 W) แรงดันเอาต์พุต 400 V ระบบถูกออกแบบและสร้างตามพิกัด ผลการทดสอบแสดงถึงระบบที่นำเสนอสามารถทำงานได้ดีทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเกิดความผิดปกติพร้อมในแต่ละโมดูล โดยที่ระบบสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ดังที่ได้กำหนดไว้ดังต่อไปนี้ คือ

- 3.1.4.1 ระบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้
- 3.1.4.2 ระบบสามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังอินพุตให้ใกล้เคียงหนึ่ง
- 3.1.4.3 ระบบสามารถแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำแต่ละโมดูลให้มีค่าใกล้เคียงกัน
- 3.1.4.4 โครงสร้างระบบที่นำเสนอสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่เพิ่มขึ้นได้

แต่อย่างไรก็ตาม โมดูลเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์นี้ยังคงมีข้อด้อยที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัด 2 ประการคือ

1. ระบบไม่สามารถควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำกว่าแรงดันอินพุตได้ ส่งผลให้เมื่อต้องนำเครื่องแปลงผันชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้กับภาระงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ต่ำกว่าแรงดันอินพุต ระบบจำเป็นต้องเพิ่มเครื่องแปลงผันโดยต่อแบบอันดับเข้าไปในระบบเพื่อลดขนาดของแรงดัน 400 V ไปสู่ค่าที่ต่ำกว่า เช่น 5 V 12 V 48 V หรือ -48 V

2. คุณสมบัติของวงจรเครื่องแปลงผันแบบบวสต์ไม่สามารถทำการแยกโหนดทางไฟฟ้าระหว่างภาคอินพุตและเอาต์พุตได้

จากปัญหาที่ได้กล่าวไว้นั้น จึงได้กำหนดแนวทางของการแก้ไขปัญหาโดยการเปลี่ยนจากวงจรเครื่องแปลงผันแบบบวสต์ ไปเป็นวงจรเครื่องแปลงผันแบบซีพิกและชุก ซึ่งเครื่องแปลงผันดังกล่าวสามารถแยกโหนดทางไฟฟ้าและสามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตต่ำกว่าแรงดันอินพุตได้อีกทั้งยังคงให้คุณสมบัติของการเป็นแหล่งจ่ายกระแสอยู่เหมือนเดิม ดังนั้นในตอนต้นที่ 3.2 จะได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีพิก ชนิดแยกโหนดทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล โดยถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างแบบขนานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส และตอนที่ 3.3 จะได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุก ชนิดไม่แยกโหนด จำนวน 3 โมดูล ซึ่งถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างแบบขนานเช่นกัน ซึ่งทั้ง 2 โครงสร้างดังกล่าวจะถูกออกแบบและวิเคราะห์ระบบบนหลักการสมดุลย์กำลังไฟฟ้าเพื่อที่จะควบคุมให้ระบบที่นำเสนอมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่ดี

3.2 การขนานโมดูลเรียงกระแสแบบซีพิกชนิด 1 เฟส ด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

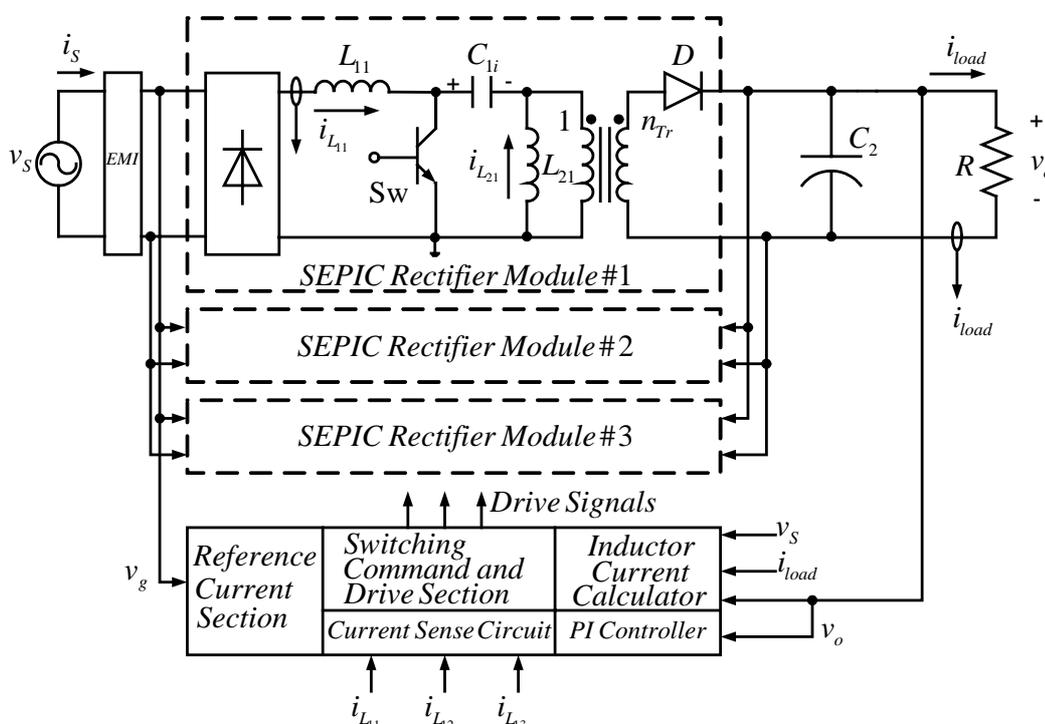
เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟโดยใช้วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประสบความสำเร็จอย่างสูงในการนำมาใช้เพื่อแก้ไขตัวประกอบกำลังและลดความผิดเพี้ยนกระแสไลน์อินพุตในระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสวิตซ์ชนิด 1 เฟส วงจรต้นแบบซีพิกได้รวมเอาข้อดีของวงจรแบบบูสต์และบัค-บูสต์ รวมเข้าไว้ด้วยกัน เช่น แรงดันเอาต์พุตสามารถถูกควบคุมให้มีความมากกว่าหรือน้อยกว่าอินพุตได้ สามารถแยกโคดทางไฟฟ้าระหว่างภาคอินพุตและภาคเอาต์พุตได้และการปรับปรุงกระแสสามารถทำได้โดยอัตโนมัติภายใต้เงื่อนไขการทำงานของกระแสไหลเวียนในโมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม การทำงานของกระแสในโมดการไหลอย่างต่อเนื่องเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเครียดเนื่องจากกระแสบนอุปกรณ์การสวิตซ์เพิ่มขึ้น มีการรบกวนสูงและทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของกระแสไลน์อินพุตมีค่าสูง โมดของการควบคุมกระแสไหลเวียนชนิดไหลไม่ต่อเนื่องนั้นเหมาะสมกับระบบที่มีพิกัดการกำลังไฟฟ้าขนาดต่ำ ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าระดับกลางและระดับที่สูงกว่า โมดการควบคุมกระแสไหลเวียนชนิดไหลอย่างต่อเนื่องได้รับความนิยมมากกว่า อย่างไรก็ตามการออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์ชนิดเชิงเดี่ยวเพื่อตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของภาระในปัจจุบันนั้นมีข้อเสียอย่างเห็นได้ชัดคือ การออกแบบมีความยุ่งยากและซับซ้อน การจัดการกับปัญหาเรื่องการระบายความร้อนนั้นยุ่งยาก อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพงและระบบมีขนาดใหญ่

ดังนั้นระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจึงได้เข้ามาแทนที่ระบบเชิงเดี่ยวดังที่ได้กล่าวไว้ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาหลากหลายงานวิจัย [46], [49, 50] ได้ตีพิมพ์และเผยแพร่บทความโดยได้มุ่งเน้นไปที่ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเครื่องแปลงผันที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ชนิด 1 เฟส

การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสชนิดซีพิกที่ถูกแยกโคดทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล ซึ่งระบบดังกล่าวถูกออกแบบบนหลักการสมดุลย์กำลังไฟฟ้าได้ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-1 งานวิจัยนี้ได้กล่าวและแสดงถึงเนื้อหาของการนำเสนอ 2 ส่วนด้วยกันคือ การจำลองการทำงานและการทดสอบระบบต้นแบบของโครงสร้างการขนานระบบที่นำเสนอ

ระบบที่ได้ถูกนำเสนอให้ข้อดีคือ ออกแบบง่าย สามารถเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบที่นำเสนอได้เพราะเนื่องจากโครงสร้างการขนานนี้ได้ทำหน้าที่ในการแบ่งการไหลของกำลังไฟฟ้าไปในแต่ละโมดูล เครื่องแปลงผันถูกออกแบบให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 48 V และมีพิกัดกำลังไฟฟ้าในแต่ละโมดูลเท่ากับ 500 W พร้อมกับความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้รวม 1,500 W

3.2.1 ระบบต้นแบบและแบบแผนการควบคุมที่นำเสนอ เครื่องแปลงผันแบบซิงคิกแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง โครงสร้างการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิกชนิดแยกโคจรทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล บนหลักการสมมูลย์กำลังไฟฟ้าถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-11 ระบบควบคุมประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนดังนี้คือ ส่วนการสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิงจากแรงดันไลน์อินพุต ส่วนควบคุมแรงดันเอาต์พุต (ชุดควบคุมแรงดันแบบพีไอ) และชุดคำนวณค่ายอดของกระแสตลอดหนึ่งยวนำ



ภาพที่ 3-11 การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิกชนิดแยกโคจรทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล

3.2.2 การออกแบบโมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิก โครงสร้างวงจรของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบซิงคิกได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 3-11 ซึ่งประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบซิงคิกและตัวเก็บประจุเอาต์พุต โดยสมมุติให้กระแสอินพุตของระบบถูกควบคุมให้มีรูปสัญญาณเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต แรงดันที่ได้มีค่าเป็น $v_g = \hat{V}_g |\sin \omega t|$

โดยไม่ใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่สำหรับกรองแรงดันให้เรียบ กำหนดให้ระบบทำงานอยู่ในโหมด
กระแสขดลวดเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่อง
อัตราส่วนการแปลงผันแรงดันคือ

$$M = \frac{V_o}{\hat{V}_g} = \frac{\eta I_g}{I_o} = n_{Tr} \frac{D}{1-D} \quad (3-10)$$

ขณะที่

η คือ ประสิทธิภาพเครื่องแปลงผัน

D คือ Duty-cycle

และค่าพารามิเตอร์ K หาได้ดังนี้

$$K = \frac{2L_{eq}}{R_L T} \quad (3-11)$$

ขณะที่

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (3-12)$$

เมื่อ

T คือ คาบการสวิตช์

L_2 คือ Magnetizing Inductance ของหม้อแปลง

ค่าของพารามิเตอร์ K_{crit} ที่ขอบระหว่างโหมดการทำงานของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำไหลต่อเนื่อง
และไม่ต่อเนื่อง แสดงดังนี้

$$K_{crit} = \frac{(1-D)^2}{n_{Tr}^2} = \frac{1}{(n_{Tr} + M)^2} \quad (3-13)$$

ระบบทำงานอยู่ใน โหมดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่องเมื่อ $K > K_{crit}$

3.2.2.1 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ สมการค่ายอดของกระแสอินพุต คือ

$$\hat{I}_{S,\max} = \frac{\sqrt{2}P_o}{\eta V_{S,\min}} \quad (3-14)$$

สมการ Duty Ratio ต่ำสุด คือ

$$d(\omega t)_{\min} = \frac{M}{(M + n_{TR})} \quad (3-15)$$

สมการค่ากระแสสลับขดลวดเหนี่ยวนำ คือ

$$\Delta i_L \leq (\%i_L)(\hat{I}_{S,\max}) \quad (3-16)$$

สมการขดลวดเหนี่ยวนำด้านเข้าคือ

$$L_1 \geq \frac{\hat{V}_S T_{sw} d(\omega t)_{\min}}{\Delta i_L} \quad (3-17)$$

ขณะที่ค่า Magnetizing Inductance L_2 หาได้ดังนี้

$$L_2 \geq \frac{(\hat{V}_S d(\omega t)_{\min})^2}{2f_{sw} P_{o,\min}} \quad (3-18)$$

3.2.2.2 การออกแบบตัวเก็บประจุ ระบบที่นำเสนอขึ้นมีการใช้งานของตัวเก็บประจุ อยู่ด้วยกัน 2 ส่วน คือ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางวงจรและด้านเอาต์พุตของวงจร ในการออกแบบตัวเก็บประจุที่ตำแหน่งกึ่งกลางวงจรมันจำเป็นต้องคำนึงถึงการรีโซแนนซ์ของวงจรซีพิกคังนั้นสมการของตัวเก็บประจุส่วนกลางหาได้ดังนี้

$$C_1 = \frac{1}{\omega_r^2 (L_1 + L_2)} \quad (3-19)$$

เมื่อ ω_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์

ส่วนตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก C_2 ถูกพิจารณาจากค่าเวลาคืนตัวของระบบ โดยสามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_2 \geq \frac{2P_o \Delta_{th}}{V_o^2 - V_{o,min}^2} \quad (3-20)$$

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติของโมดูลเรียงกระแสแบบซิงค์ฟิสิกชนิด 1 เฟส เพื่อการจำลองการทำงาน

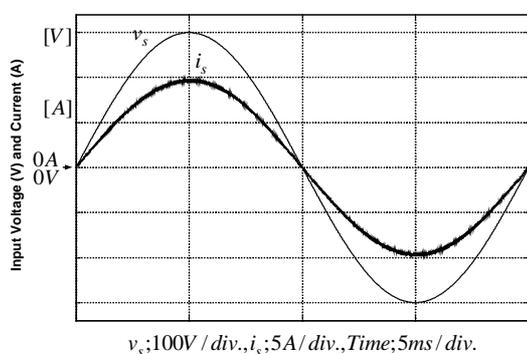
คุณสมบัติ	โมดูลเรียงกระแสใน โครงสร้างแบบขนาน
แรงดันไลน์อินพุต	220 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าแต่ละโมดูล	500 W/Module
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมด้านเอาต์พุตปกติ	1,000 W
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมด้านเอาต์พุตสูงสุด	1,500 W
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	48 V
L_{1i}, L_{2i}	5 mH, 0.25 mH
C_{1i}, C_2	0.68 μ F, 20 mF
ค่าพารามิเตอร์พีและไอ	$k_p=0.125, \omega_z=40$
ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงแยกโดด	$n_{TF}=1$

3.2.3 การจำลองการทำงาน หน้าหลักของวงจรเรียงกระแสที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ คือ ต้องการควบคุมกระแสอินพุตให้มีลักษณะของสัญญาณกระแสเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต ดังนั้นค่าแบนวิดท์ (Bandwidth) ของลู่วควบคุมแรงดันเอาต์พุตควรมีค่าน้อยกว่าความถี่ที่ไลน์ระบบกำลัง ช่วงกว้างที่เหมาะสมอยู่ในช่วงของ 1/3 หรือ 1/5 ของความถี่ไลน์

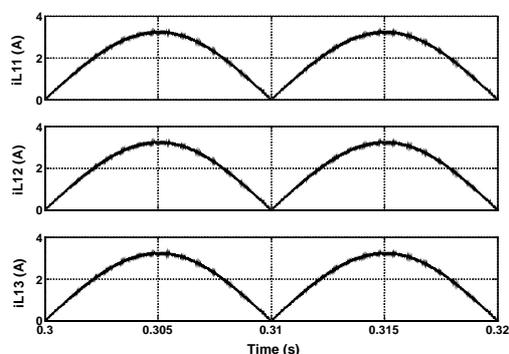
รายละเอียดคุณสมบัติทางไฟฟ้าประกอบการออกแบบถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 3-2 เพื่อใช้เป็นค่าพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Simulink ผลการจำลองการทำงานของระบบที่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-11 เมื่อค่า $n_{TF}=3$ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-12 ถึง 3-14 ภาพที่ 3-12 (ก) แสดงกระแสและแรงดันอินพุตที่ถูกจำลองสภาวะการจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,500 W (เต็มพิกัดความสามารถของแต่ละโมดูล) ในขณะที่กระแสไลน์อินพุตมีเฟสตรงกันกับแรงดันไลน์อินพุตและใกล้เคียงสัญญาณไซน์ เพราะฉะนั้น ตัวประกอบกำลังอินพุตมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ภาพที่ 3-12 (ข) แสดงกระแส

ขดลวดเหนี่ยวนำที่ถูกจำลองสภาวะการจ่ายภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เครื่องแปลงผันสามารถแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลให้มีค่าเท่ากัน ในขณะที่ยังคง ให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ภาพที่ 3-13 แสดงกระแสและแรงดันอินพุตเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1,500 W ไปที่ 750 W และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของทั้ง 3 โมดูล เมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 750 W กลับไปที่ 1,500 W ระบบแสดงผลการตอบสนองที่รวดเร็ว

ภาพที่ 3-14 แสดงผลการตอบสนองสภาวะชั่วคราวที่ถูกจำลองของแรงดันและกระแสเอาต์พุต ที่ภาระเปลี่ยนแปลงจากพิกัดกำลังไฟฟ้า 1,500 W ไปที่ 750 W และกลับมาที่ 1,500 W อีกครั้ง ในระบบวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลัง

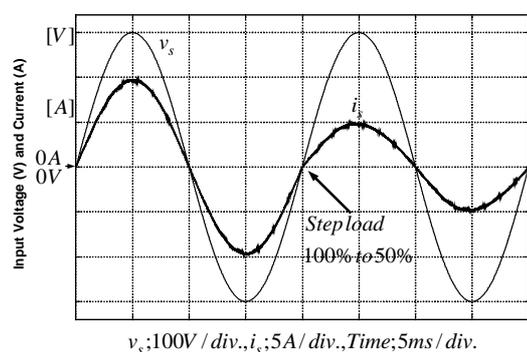


(ก)

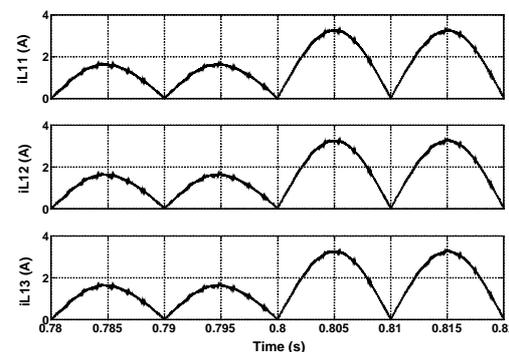


(ข)

ภาพที่ 3-12 ผลการจำลองสภาวะคงตัวที่พิกัด 1,500 W (ก) กระแสและแรงดันอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ 3 โมดูล

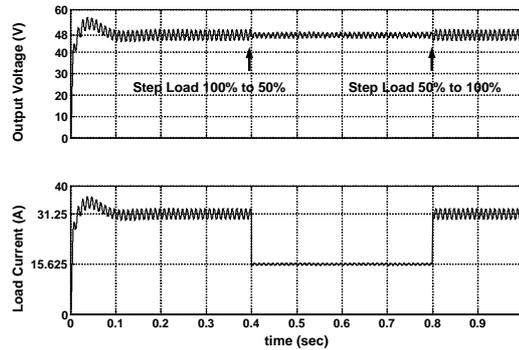


(ก)

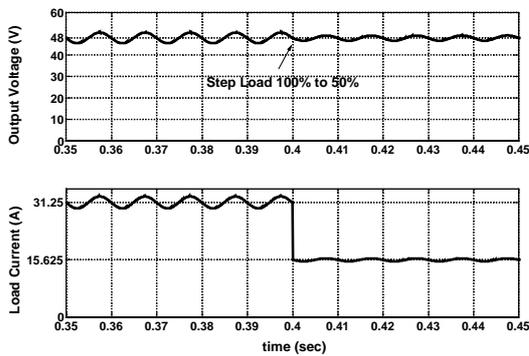


(ข)

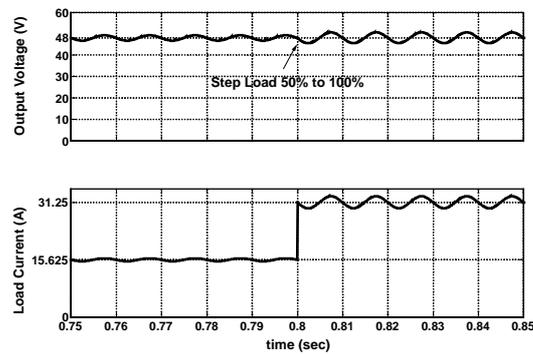
ภาพที่ 3-13 ผลการจำลองในสภาวะชั่วคราว (ก) แรงดันและกระแสอินพุตภาระเปลี่ยนจาก 1,500 W ไป 750 W (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ 3 โมดูล ภาระเปลี่ยนจาก 750 W ไปที่ 1,500 W



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3-14 ผลการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสภาระที่ภาระเปลี่ยนจาก 1,500 W ไปที่ 750 W และกลับมาที่ 1,500 W (ข) ภาพขยายที่เวลา $t = 0.4$ (ค) ภาพขยายที่เวลา $t = 0.8$

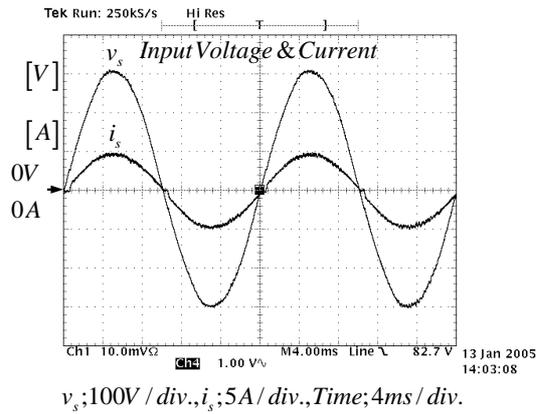
ได้มีผลทำให้เกิดการกระเพื่อมขนาดใหญ่ที่แรงดันเอาต์พุตซึ่งมีค่าความถี่ของแรงดันกระเพื่อมเป็น 2 เท่าของความถี่ไลน์ แต่อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะของตัวประกอบกำลังและผลตอบสนองทางพลวัตของระบบที่ได้นำเสนอมีค่าตัวประกอบกำลังสูงและผลตอบสนองทางพลวัตที่รวดเร็ว

สรุป การจำลองการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิก ได้ถูกนำเสนอในตอนนี โมดูลเรียงกระแสจำนวน 3 โมดูล ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าแต่ละโมดูลเป็น 500 W ต่างถูกต่อเป็น โครงสร้างแบบขนานกับที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสและเอาต์พุตเดี่ยว ระบบที่ได้นำเสนอออกแบบง่าย ระบบมีการควบคุมที่ง่ายไม่ซับซ้อนและ โครงสร้างนี้เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบที่ต้องการความมั่นคงได้ ระบบที่นำเสนอให้ข้อดีดังต่อไปนี้คือ ตัวประกอบกำลังของระบบใกล้เคียงหนึ่ง เทคนิคการควบคุมแบบสมดุลย์กำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงของระบบที่นำเสนอให้มีพลวัตของการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้ดี ยิ่งกว่านั้นกระแสหลอดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลถูกควบคุมให้สามารถแบ่งกระแสให้มีค่าเท่ากันในทุกๆ โมดูล

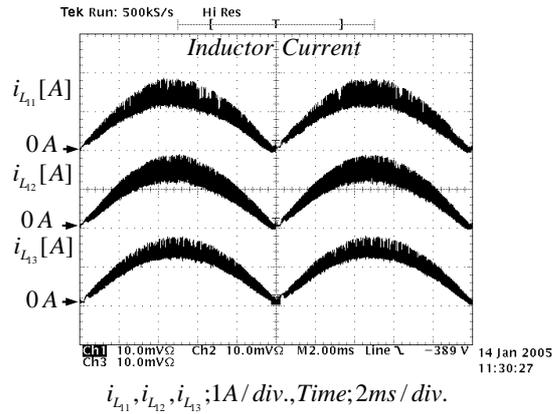
3.2.4 การทดสอบระบบที่นำเสนอ ตารางที่ 3-3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างระบบ การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถแก้ไขตัว ประกอบกำลัง ชนิด 1 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิก ที่ระบบเครื่องแปลงผันจ่ายกำลัง ไฟฟ้าให้กับภาระที่ 600 W แรงดันเอาต์พุต 48 V เนื่องจากการทดสอบในสภาวะคงตัวของระบบที่ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-1 เมื่อ $\eta_{FF}=3$ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-15 ถึง 3-16 ในภาพที่ 3-15 (ก) แสดง รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุตที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 600 W ในภาพที่ 3-15 (ข) แสดงรูปคลื่นของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 โมดูลเมื่อระบบจ่ายภาระที่ 600 W ภาพที่ 3-16 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ 48 V ($\Delta V_o=6.66\%$) และกระแสภาระที่ 12.5 A เนื่องจากการทดสอบ ภายใต้สภาวะชั่วคราวของระบบที่นำเสนอ โดยมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของภาระจาก 100 % ไป ที่ 50% และกลับไปที่ 100 % อีกครั้ง ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-17 ถึง 3-18 ภาพที่ 3-17 (ก) แสดง สภาวะการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของกระแสและแรงดันอินพุตภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100 % ไปที่ 50% ณ ตำแหน่งกระแสสูงสุด

ตารางที่ 3-3 รายละเอียดของการทดสอบระบบขนานวงจรเรียงกระแสแบบซิงคิก

คุณสมบัติ	โมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิก
แรงดันไลน์อินพุต	220 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าแต่ละโมดูล	300 W/Module
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมด้านเอาต์พุตปกติ	600 W
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	48 V
L_{11}, L_{12}, L_{13}	5.089 mH , 5.047 mH, 5.006 mH
r_{11}, r_{12}, r_{13}	1.30 Ω , 1.25 Ω , 1.60 Ω
L_{21}, L_{22}, L_{23}	2.142 mH, 2.151 mH, 2.161 mH
r_{21}, r_{22}, r_{23}	1.21 Ω , 1.59 Ω , 1.26 Ω
C_{1i}	1 μ F
C_2	13.6 mF
ค่าพารามิเตอร์พีและไอ	$k_p=0.3, \omega_z=8$
ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงแยกโดด	$\eta_{FF}=0.5$

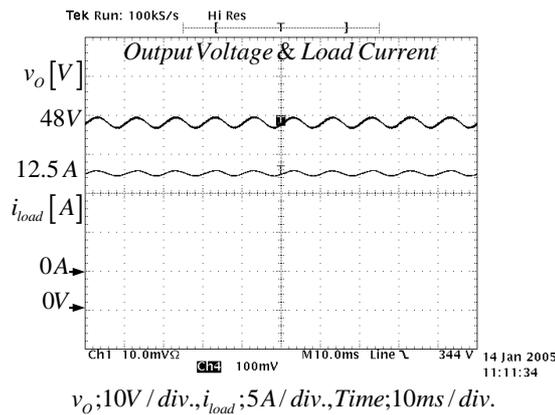


(ก)

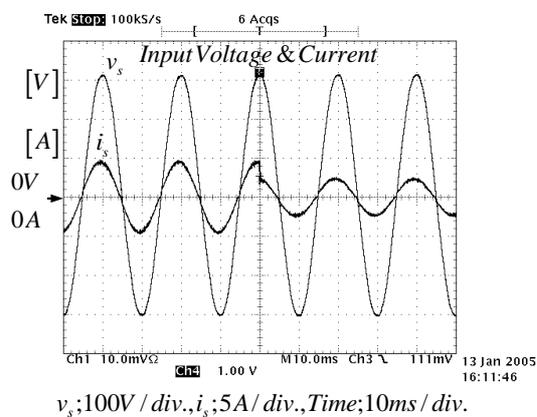


(ข)

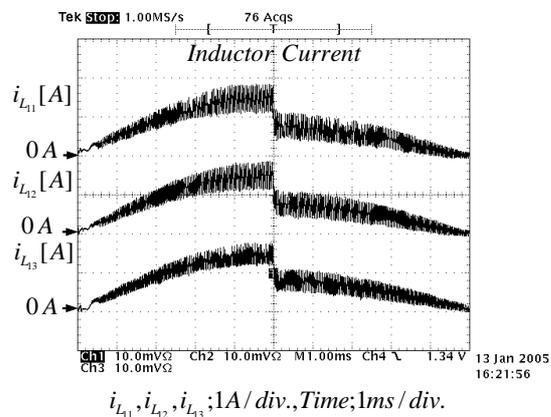
ภาพที่ 3-15 ผลการทดลองในสภาวะคงตัวที่พิกัดภาระ 600 W (ก) รูปคลื่นของแรงดันและกระแสอินพุต (ข) รูปคลื่นของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 โมดูล



ภาพที่ 3-16 ผลการทดสอบสภาวะคงตัวของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่พิกัด 600 W

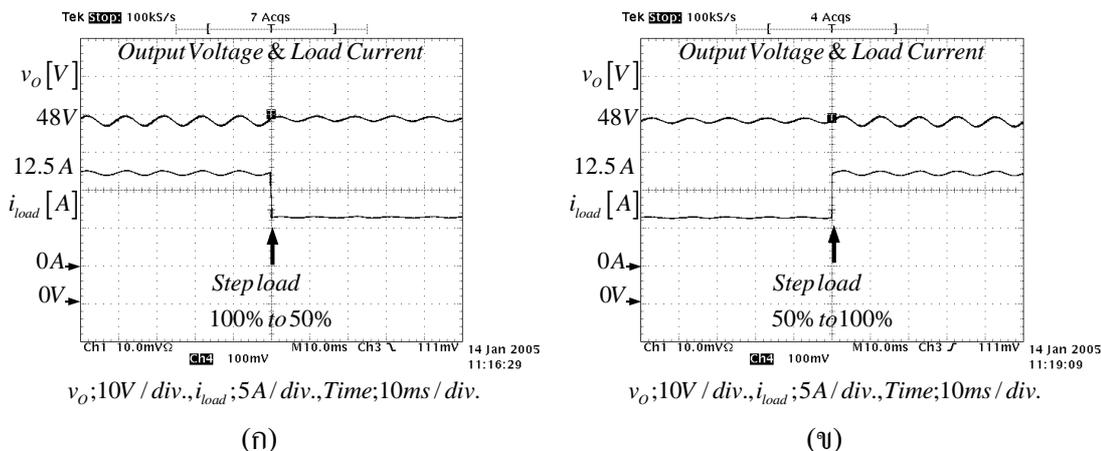


(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-17 ผลการทดลองเมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจาก 600 W ไปที่ 300 W (ก) รูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุต (ข) รูปคลื่นกระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 โมดูล



ภาพที่ 3-18 ผลการทดลอง (ก) แรงดันและกระแสภาระเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระจาก 600 W ไปที่ 300 W (ข) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ภาระจาก 200 W ไปที่ 600 W

ภาพที่ 3-17 (ข) แสดงภาพขยายของกระแสหลอดเหนี่ยวนำขณะที่ถูกจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระจากพิกัด 600 W ไปที่ 300W ภาพที่ 3-18 (ก) และ ภาพที่ 3-18 (ข) แสดงภาพขยายของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระขณะที่ภาระของระบบถูกเปลี่ยนแปลงไปจาก 100 % ไปที่พิกัด 50 % และจากที่ 50 % กลับไปที่ 100 % อีกครั้ง ตามลำดับ ค่าแรงดันปลิวเอาต์พุตอ่านค่าได้ 3.33 % ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 50 % ในภาพขยายทั้งสองได้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถกลับคืนเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ภายใน 20 ms ขณะที่กระแสอินพุตยังคงมีคุณภาพสูง ภาพที่ 3-15 (ก) และภาพที่ 3-17 (ก) แสดงกระแสอินพุตที่ใกล้เคียงไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุตทั้งที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วคราว ซึ่งเป็นผลทำให้ระบบดังกล่าวให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งและผลตอบสนองกระแสอินพุตต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระเป็นไปอย่างรวดเร็ว กระแสอินพุตไม่มีการแกว่งของสัญญาณให้เห็น ภาพที่ 3-17 (ข) แสดงสมรรถนะของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระเนื่องจากระบบที่นำเสนอได้กำหนดให้ตัวแปรต้นเป็นกระแสหลอดเหนี่ยวนำ ดังนั้นในภาพที่ 3-18 นี้เป็นเครื่องยืนยันที่ดีว่าระบบการควบคุมที่อาศัยเทคนิคสมดุกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมระบบให้มีผลการตอบสนองที่รวดเร็วได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในระบบเครื่องแปลงผันที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ชนิด 1 เฟส ให้ผลลัพธ์ที่ไม่พึงประสงค์คือ แรงดันเอาต์พุตที่ได้ปรากฏค่าแรงดันปลิวที่มีค่าขนาดใหญ่ซึ่งมีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ไลน์ (50 Hz) ซึ่งแรงดันปลิวดังกล่าวสามารถลดขนาดลงได้โดยการใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตาม ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มีผลกระทบโดยตรงต่อผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบและที่สำคัญคือทำให้ต้นทุนของการผลิตสูงขึ้น ระบบต้องการพื้นที่ที่มากขึ้น ซึ่งปัญหาที่เกี่ยวข้องกับตัวเก็บประจุดังกล่าวนี้จะได้รับการแก้ไขต่อไป รายละเอียดจะถูกกล่าวถึงในบทที่ 4

3.2.5 สรุป การขนานวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงก์ บนหลักการควบคุมสมดุลกำลังไฟฟ้าได้ถูกนำเสนอในตอนที 3.2 นี้ วงจรกำลังของระบบที่นำเสนอประกอบขึ้นจากโมดูลเรียงกระแสแบบแยกโดดทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล ที่ภาคอินพุตของแต่ละโมดูลถูกต่อขนานเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับและภาคเอาต์พุตถูกต่อขนานเข้ากับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ระบบควบคุมบนเทคนิคสมดุลกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยภาคส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงที่อาศัยชุดควบคุมที่ให้อย่างง่ายและส่วนที่สำคัญอีกชุด คือ ควบคุมจำนวนกระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิงของแต่ละโมดูล ระบบดังกล่าวได้ถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Simulink โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นประสิทธิภาพในเบื้องต้นของแนวคิดในการออกแบบและการควบคุมระบบด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า เพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของระบบภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่มีข้อจำกัดและยุ่งยากต่อการทดสอบจากระบบต้นแบบจริง

ระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการถูกออกแบบและสร้างเพื่อจ่ายพิกัดกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ 600 W ที่แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง 48 V ภาคอินพุตถูกต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของกรไฟฟ้าที่พิกัดแรงดันอินพุต 220 V ความถี่ 50 Hz ระบบต้นแบบที่ถูกทดสอบนี้สามารถบรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ทุกประการดังนี้

1. ระบบสามารถควบคุมการแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำได้ดี
2. ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99 ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า
3. ระบบสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตได้ดีทั้งในสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วคราว สภาวะเมื่อภาระถูกทำให้เปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 50% และกลับมาที่ 100% ระบบสามารถกลับคืนเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 20 ms
4. ระบบสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระในอนาคได้
5. ระบบสามารถควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตต่ำกว่าอินพุต

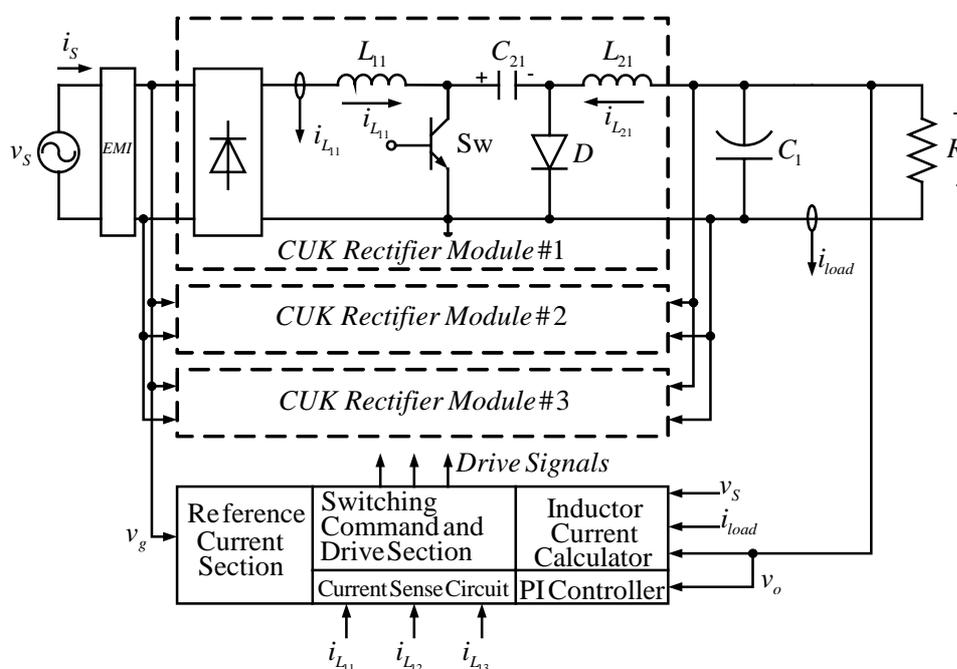
ถึงอย่างไรก็ตาม แม้ว่าระบบการขนานวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงก์ ได้ให้คุณสมบัติที่เด่นมากมายหลายประการ แต่ระบบเองยังคงมีจุดด้อยที่เห็นได้เด่นชัด คือ เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซิงก์มีการรบกวนสนามแม่เหล็กทางด้านเอาต์พุตสูง ซึ่งทำให้วิศวกรผู้ออกแบบต้องใช้วงจรกรองทางด้านเอาต์พุตขนาดใหญ่เพื่อกำจัดปัญหาดังกล่าวให้หมดไป ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาที่ได้เกิดขึ้นนี้ให้เบาบางลง ผู้ออกแบบจึงได้เลือกใช้วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซิงก์เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งรายละเอียดของ การออกแบบ จำลอง และทดสอบการขนานวงจรเรียงกระแสแบบซิงก์ชนิด 1 เฟส จะได้ถูกกล่าวถึงในตอนที 3.3 ต่อไป

3.3 การขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบชุกบนพื้นฐานหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

เครื่องผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบชุกถูกนำมาใช้ในวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เพราะเนื่องจากว่า วงจรชุกสามารถแยกโคจรทางไฟฟ้าระหว่างภาคอินพุตและเอาต์พุตได้ สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันอินพุตได้ และสามารถดรูปรองจรแม่เหล็กให้อยู่บนแกนเดียวกันได้ ในตอนนี้ได้กล่าวถึง การออกแบบ จำลองการทำงานและสร้างระบบการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 1 เฟส ที่อาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบชุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า วัตถุประสงค์ของการขนานระบบวงจรเรียงกระแสที่นำเสนอมีดังนี้คือ

1. เพื่อที่จะปรับรูปคลื่นกระแสอินพุตให้เป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต
2. เพื่อที่จะควบคุมการแบ่งกระแสโหลดเหนี่ยวนำ
3. เพื่อที่จะปรับปรุงการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของระบบที่นำเสนอให้มีพลวัตที่ดี

3.3.1 ระบบที่นำเสนอ วงจรกำลังของเครื่องแปลงผันแบบชุกมีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายกระแสซึ่งมีความเหมาะสมอย่างมากสำหรับการนำมาใช้งานเป็นวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง วงจรกำลังของการขนานโมดูลเรียงกระแสแบบชุก ชนิดไม่แยกโคจรทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูลถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-19 อุปกรณ์กำลังของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส



ภาพที่ 3-19 โครงสร้างแบบขนานของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุกบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

แบบไดโอดบริดจ์ วงจรกำลังของเครื่องแปลงผันแบบซุกเป็น โมดูลและตัวเก็บประจุเอาต์พุตแบบเดี่ยวที่ถูกต่ออยู่ ณ ตำแหน่งบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต เพื่อที่จะทำหน้าที่กรองแรงดันกระแสเพื่อเอาต์พุตที่มีค่าความถี่กำลังเป็น 2 เท่าของความถี่ไลน์ให้มีขนาดลดลง

เทคนิคของการควบคุมแบบสมมูลย์กำลังไฟฟ้าสำหรับควบคุมระบบที่นำเสนอแสดงอยู่ในภาพที่ 3-19 ด้านล่าง มันแสดงให้เห็นบล็อกไดอะแกรมระบบการควบคุมอย่างง่าย ระบบควบคุมประกอบไปด้วย วงจรสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิง ชุดควบคุมแบบพีไอและชุดคำนวณหาค่ากระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 โมดูล ชุดคำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำทำหน้าที่คำนวณค่ายอดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล เพื่อนำไปรวมกับสัญญาณที่ได้จากชุดควบคุมรูปแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต จากนั้นสัญญาณทั้งสองจึงถูกคูณเข้ากับสัญญาณอ้างอิงแบบเต็มคลื่นผลจากการคูณคือค่ากระแสอ้างอิงของขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล ในระบบกำลัง กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลถูกวัดและนำมาเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงในแต่ละโมดูลดังกล่าว ความผิดพลาดที่ได้จากการเปรียบเทียบได้ถูกประมวลผลโดยชุดควบคุมกระแสแบบฮิสเตอรีซิส สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากชุดควบคุมกระแสนี้จะถูกส่งไปขับนำสวิตซ์กำลังในแต่ละโมดูลต่อไป

ตารางที่ 3-4 รายละเอียดของการทดสอบระบบขนานวงจรเรียงกระแสแบบซุก

คุณสมบัติ	โมดูลเรียงกระแสแบบซุก
แรงดันไลน์อินพุต	220 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าแต่ละโมดูล	375 W/Module
พิกัดกำลังไฟฟารวมด้านเอาต์พุตปกติ	750 W
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	- 48 V
L_{11}, L_{12}, L_{13}	3.1541 mH , 3.1873 mH, 3.1617 mH
r_{11}, r_{12}, r_{13}	1.1040 Ω , 0.8160 Ω , 0.7769 Ω
L_{21}, L_{22}, L_{23}	1.0764 mH, 1.0360 mH, 1.0880 mH
r_{21}, r_{22}, r_{23}	0.3190 Ω , 0.3388 Ω , 0.3260 Ω
C_{21}, C_{22}, C_{23}	1 μF
C_2	13.6 mF
ค่าพารามิเตอร์พีและไอ	$k_p = 0.3, \omega_z = 33$

3.3.2 เกณฑ์การออกแบบเครื่องแปลงผัน ในตอนนี้ได้แสดงถึงหลักเกณฑ์ในการออกแบบขั้นพื้นฐานของวงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้แบบซุก ที่ระบบทำงานอยู่ในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง

3.3.2.1 การทำงานในโหมดกระแสไหลต่อเนื่อง ด้วยวิธีการพิจารณาระบบแบบ Quasi-Static Approach เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถถูกพิจารณาให้ระบบทำงานได้เช่นเดียวกับการทำงานของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่พิเศษ เพราะเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าอินพุต V_g เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ในระหว่างช่วงเวลา 1 ไซเคิลของคาบเวลาความถี่มูลฐาน ในขณะที่แรงดันเอาต์พุตสามารถประมาณให้มีค่าคงที่ ด้วยสถานะการณ์เช่นนี้จึงทำให้อัตราส่วนของการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง m และ ภาวะ r_L ที่มองเห็นโดยเครื่องแปลงผันมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละครึ่งไซเคิลของความถี่ไลน์อินพุต ซึ่งสามารถพิจารณาจากสมการดังต่อไปนี้

$$m(\theta) = \frac{V_o}{v_g} = \frac{V_o}{\hat{V}_g |\sin(\theta)|} = \frac{M}{|\sin(\theta)|} \quad (3-21)$$

$$r_L(\theta) = \frac{V_o^2 / P_o}{2|\sin(\theta)|^2} = \frac{R_L}{2|\sin(\theta)|^2} \quad (3-22)$$

ขณะที่

θ คือ Angular Position ภายในครึ่งไซเคิลของความถี่ไลน์

P_o คือ กำลังเอาต์พุต

สถานะขอของการทำงานระหว่างโหมดกระแสไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องสามารถคำนวณหาได้โดยใช้หลักการเท่ากันของสมการอัตราส่วนของการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง $m(\theta)$ ในทั้ง 2 โหมด ของการทำงาน

กำหนดให้ Dimensional Coefficient K คือ

$$K = \frac{2L_{eq}}{R_L T} \quad (3-23)$$

ขณะที่

T คือ คาบเวลาของการสวิตช์

R_L คือ ภาวะของระบบ

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2'}{L_1 + L_2'} \quad (3-24)$$

ขณะที่ $L_2' = L_2 / n^2$

โมดการควบคุมกระแสไหลอย่างต่อเนื่องถูกทำให้เป็นจริงสำหรับค่าของ θ ที่ให้มาใดๆ คือ

$$K > \frac{1}{2(M + n|\sin(\theta)|)^2} \quad (3-25)$$

ขณะที่

$n_{Tr} =$ อัตราส่วนรอบของหม้อแปลง N_1/N_2

3.3.2.2 การออกแบบวงจรกำลัง เงื่อนไขในสมการที่ (3-25) สามารถถูกทำให้มั่นใจได้ว่าเป็นจริงโดยการไปจำกัดช่วงของภาระไว้ ในความเป็นจริง การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานภาระ ส่งผลกระทบบต่อเนื่องไปถึงค่าคงที่ K ที่ถูกทำให้ลดลง จนกระทั่งค่าของมันกลับกลายเป็นค่าที่น้อยกว่าเทอมที่ 2 ของสมการที่ (3-25) ยิ่งกว่านั้น สำหรับภาระความต้านทานค่าใดๆ เครื่องแปลงผันสามารถเปลี่ยนโมดการทำงานได้จากโมดกระแสไหลต่อเนื่อง (ใกล้กับค่าสูงสุดแรงดันอินพุต) ไปทำงานในโมดกระแสไหลอย่างไม่ต่อเนื่อง (บริเวณใกล้กับจุดตัดผ่านค่าศูนย์ของแรงดันอินพุต)

การออกแบบเครื่องแปลงผันให้ทำงานอยู่ในโมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่ค่าภาระใดๆ นั้น สามารถทำได้โดยการออกแบบให้มีการเผื่อขนาดของ L_{eq} (L_1, L_2) วิธีทางเลือกที่นิยมใช้กันเมื่อยังคงต้องการออกแบบให้ระบบเครื่องแปลงผันยังคงทำงานอยู่ในโมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง คือ กำหนดให้ $\theta_{crit} < \theta < \pi - \theta_{crit}$ แม้ว่าที่ขนาดของความต้านทานภาระที่ต่ำสุด มุมวิกฤต θ_{crit} นี้ เปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของ ภาระ R_L ที่เปลี่ยนแปลงไป และสามารถหาสมการมุมวิกฤตนี้ได้จากสมการที่ (3-5) ดังนี้

$$\theta_{crit} = \arcsin \left[\frac{1}{n} \left(\sqrt{\frac{R_L T}{4L_{eq}}} - M \right) \right] \quad (3-26)$$

การทำงานในโมดกระแสไหลต่อเนื่องไม่เป็นปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์สวิตซ์ที่ถูกต่ออยู่ภายในระบบ เพราะเนื่องจากว่า โมดกระแสไหลต่อเนื่องนี้ไปปรากฏอยู่ที่บริเวณใกล้กับจุดตัดผ่านค่าศูนย์ของแรงดันอินพุต เมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยขนาดที่ไม่มากนักให้กับภาระ การทำงานในโมดที่กระแสไหลอย่างต่อเนื่องเป็นเหตุให้มีการเพิ่มขึ้นของค่าความผิดเพี้ยนกระแสอินพุตขึ้นแทน เพราะเนื่องจาก เกณฑ์ไฟฟ้ากระแสตรงของฟังก์ชันอินฮาร์โมนิกกำลังลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เสถียรภาพของระบบยังคงมีอยู่ตลอดเวลาที่วงจรเครื่องแปลงผันทำงานอยู่ในโมดกระแส

ไหลต่อเนื่อง การเลือกค่าของ θ_{crit} ที่พิถีพิถันเป็นการประนีประนอมระหว่างขนาดขององค์ประกอบวงจรกำลังและความผิดเพี้ยนกระแสอินพุตในสภาวะที่ภาระเปลี่ยนแปลงค่าไป เมื่อไรที่ทราบค่าของ L_{eq} ค่าของขดลวดเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 สามารถถูกคำนวณได้จากค่ากระแสพัลส์อินพุตที่ต้องการและใช้สมการที่ (3-24)

3.3.2.3 อัตราส่วนรอบของหม้อแปลง ค่าพารามิเตอร์นี้ถูกเลือกเพื่อที่จะให้ได้พิถีพิถันของอุปกรณ์ที่เหมาะสม เช่น เพื่อหาค่าของ n_T ที่ทำให้ความเครียดของกระแสและแรงดันสูงสุดของสวิตช์และไดโอดมีค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยที่ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นฟังก์ชันของ n_T ที่ค่า $\theta = \pi/2$ (เป็นกรณีพิเศษที่สุด) วิธีการเลือกต้องอาศัยการพิจารณาที่แรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นหลัก (พิถีพิถันแรงดันตกคร่อมสวิตช์) ยิ่งกว่านั้น แรงดันเกินอันเนื่องมาจากค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงต้องถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบเครื่องแปลงผันด้วย

3.3.2.4 ตัวเก็บประจุส่งผ่านพลังงาน ในเครื่องแปลงผันแบบซุกและซีพิกแบบต่างๆไป ตัวเก็บประจุ C_1 ถูกสมมุติให้มีค่าแรงดันตกคร่อมตัวมันคงที่ เมื่อทำงานเป็นวงจรเครื่องแปลงผันที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 มี 2 สิ่งที่เป็นเงื่อนไขสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ ต้องให้การกระเพื่อมของแรงดันที่ความถี่สูงมีค่าต่ำที่สุดและสามารถติดตามแรงดันอินพุตในช่วงคาบเวลาความถี่ไลน์ ค่าของมันจะมีอิทธิพลต่อความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสอินพุต ความถี่เรโซแนนซ์ของ C_1L_1 และ L_2 ต้องมีค่ามากกว่าความถี่ที่ไลน์ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแกว่งของกระแสอินพุตในแต่ละครึ่งไซเคิล ยิ่งกว่านั้น ถ้าความถี่เรโซแนนซ์อยู่ใกล้กับความถี่สวิตช์ คุณสมบัติของตัวประกอบกำลังที่ดีได้สูญเสียไปอันเนื่องมาจากรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปของกระแสอินพุต โดยทั่วไปสามารถออกแบบได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\omega^2 \gg \frac{1}{C_1(L_1 + L_2)} = \omega_r^2 \gg \omega_s^2 \quad (3-27)$$

ขณะที่ $\omega = 2\pi f =$ ความถี่ไลน์

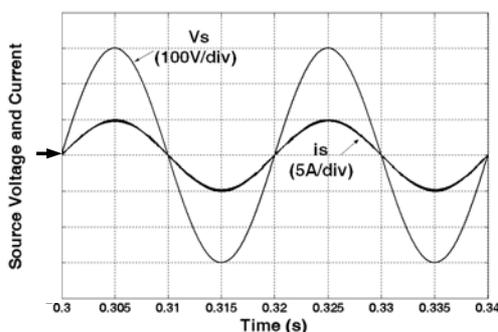
จากสมการที่ (3-27) ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการนี้เป็นเพียงแค่ค่าเริ่มต้นเท่านั้น ทางออกที่ดีของแก้ไขปัญหานี้อยู่ที่การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการทำงานเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมต่อไป

ส่วนตัวเก็บประจุไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก C_2 ถูกพิจารณาจากค่าเวลาเก็บตัวของระบบ โดยสามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้

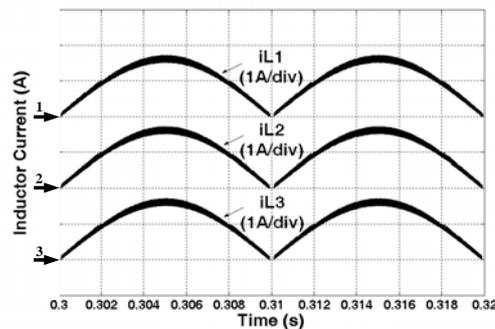
$$C_2 \geq \frac{2P_o \Delta_{th}}{V_o^2 - V_{o,\min}^2} \quad (3-28)$$

3.3.3 การจำลองการทำงาน ผลการจำลองการทำงานของการขนานเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 750 W ที่แรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรง -48 V ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-20 ชุดควบคุมแบบพีไออย่างง่ายถูกนำมาใช้งานในรูปควบคุมแรงดัน ชุดคำนวณกระแสชดเชยเหนี่ยวนำทำหน้าที่จ่ายสัญญาณกระแสอ้างอิงเพื่อบังคับให้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกทั้ง 3 โมดูล ทำหน้าที่แบ่งกระแสให้มีค่าเท่ากัน ประสิทธิภาพของเทคนิคสมดุทธ์กำลังไฟฟ้า ถูกแสดงด้วยผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รายละเอียดของข้อมูลทางไฟฟ้าพร้อมกับค่าพารามิเตอร์ของระบบการขนานที่นำเสนอนี้ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 3-4 โครงสร้างของการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม Simulink เป้าหมายหลักของการจำลองการทำงานนี้คือ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงกระบวนการของระบบควบคุมที่นำเสนอ เพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมของระบบภายใต้เงื่อนไขสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ก่อนที่จะได้ดำเนินการสร้างและทดสอบระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ

การทดสอบภายใต้เงื่อนไขผลตอบสนองในสภาวะคงตัว ผลการจำลองของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุต รูปคลื่นกระแสชดเชยเหนี่ยวนำทั้ง 3 โมดูล ของระบบที่แสดงอยู่ในภาพที่ 3-19 เมื่อ $M_f=3$ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-20 ผลการจำลองของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุตเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ 750 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-20 (ก) ในขณะที่ กระแสอินพุตนั้นมีรูปคลื่นเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต ดังนั้น ตัวประกอบกำลังอินพุตใกล้เคียงหนึ่ง ผลการจำลองของรูปคลื่นกระแสชดเชยเหนี่ยวนำเมื่อระบบเครื่องแปลงผันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ 750 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-20 (ข) ผลที่ได้รับปรากฏว่า เครื่องแปลงผันในแต่ละโมดูลสามารถแบ่งกระแสชดเชยเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลให้มีค่าเท่ากัน ในขณะที่ระบบที่นำเสนอยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งเหมือนเดิม

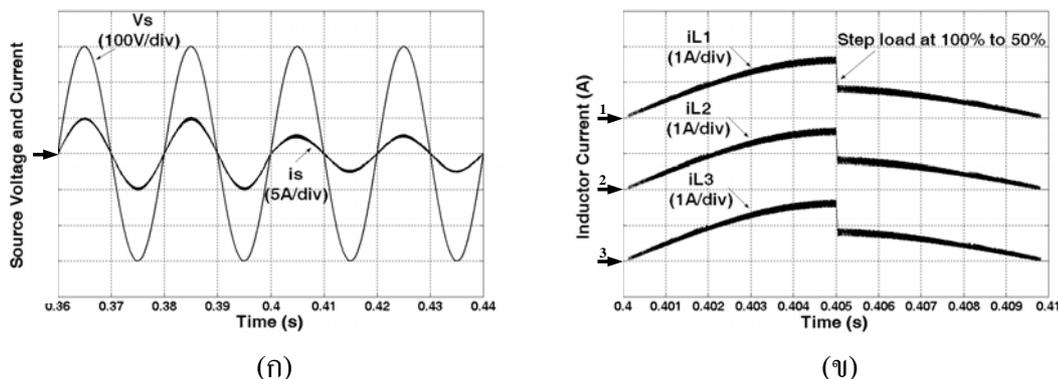


(ก)

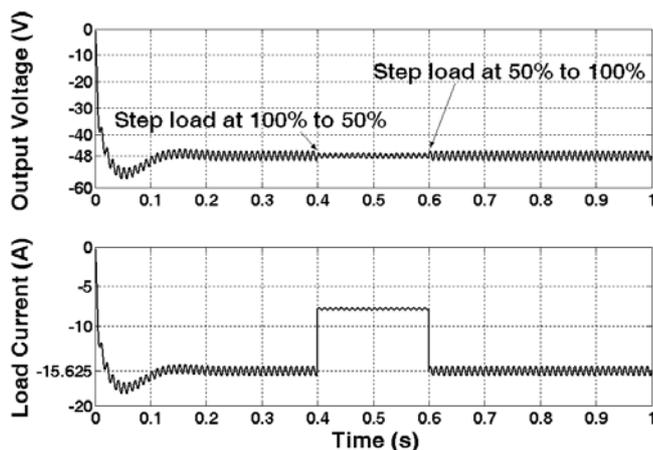


(ข)

ภาพที่ 3-20 ผลการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสชดเชยเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 3-21 ผลการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ

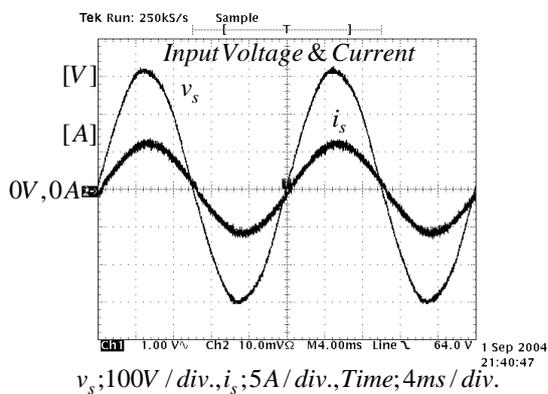


ภาพที่ 3-22 ผลการจำลอง (ก) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ

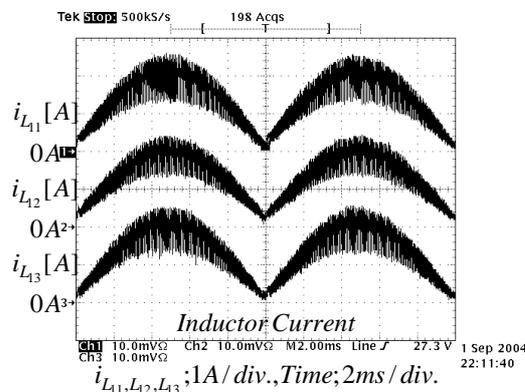
ผลการจำลองการทำงานของระบบในภาพที่ 3-19 เมื่อ $n_M=3$ และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไปจาก 750 W ไปที่ 375 W และกลับไปที่ 750 W อีกครั้ง ถูกแสดงในภาพที่ 3-21 และ ภาพที่ 3-22 ผลการจำลองในสถานะชั่วคราวของรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุตเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ 750 W ไปที่ 375 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-21 (ก) ผลการจำลองในสถานะชั่วคราวของรูปคลื่นกระแสขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อระบบเครื่องแปลงผันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระจาก 750 W ไปที่ 375 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-21 (ข) ผลตอบสนองในสถานะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750 W ไปที่ 375 W และกลับไปที่ 750 W อีกครั้ง ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-22 คุณสมบัติของตัวประกอบกำลังและผลตอบสนองทางพลวัตของระบบที่นำเสนอให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงและมีผลตอบสนองทางพลวัตที่รวดเร็ว

3.3.4 การทดสอบระบบ ระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่แสดงอยู่ในภาพที่ 3-19 ถูกประกอบขึ้นจากโมดูลเรียงกระแสแบบซุกที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 375 W ต่อโมดูล จำนวน 3 โมดูล หน้าที่หลักของระบบควบคุมที่นำเสนอ คือ เพื่อที่จะแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อที่จะควบคุม แรงดันเอาต์พุตและเพื่อที่จะปรับรูปคลื่นกระแสอินพุตให้เป็นไปตามการกำหนดโดยสัญญาณ แรงดันอินพุต ผลที่ได้จึงนำไปสู่ ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงและกระแสฮาร์มอนิกส์ต่ำ ระบบ ควบคุมต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการถูกสร้างจากวงจรแอนะล็อก ผลการทดสอบระบบทั้งหมด ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-23 ถึงภาพที่ 3-31

3.3.4.1 การทดสอบในสถานะคงตัว ผลการทดสอบที่ได้จากระบบการขนานวงจร แก้วตัวประกอบกำลังแบบซุกถูกนำเสนอพร้อมกับระบบที่ถูกออกแบบให้ทำงานอยู่ในโหมดของ กระแสขดลวดเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่อง ผลตอบสนองในสถานะคงตัวของระบบที่แสดงอยู่ใน ภาพที่ 3-19 เมื่อ $\eta_{PF}=3$ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-23 และ ภาพที่ 3-24 รูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุต เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ 750 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-23 (ก) กระแสอินพุตที่วัดได้นั้นมี รูปคลื่นเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต จึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังอินพุตใกล้เคียง หนึ่ง ค่า THD ของกระแสอินพุตวัดได้ 3 % ซึ่งปริมาณดังกล่าววัดได้จาก Digital Power Meter YOKOGAWA Model 2531 A รูปคลื่นกระแสขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อระบบเครื่องแปลงผันจ่ายกำลัง ไฟฟ้าให้กับภาระที่ 750 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-23 (ข) เพราะเนื่องจากผลกระทบของค่าความ เหนี่ยวนำและค่าความต้านทานภายในที่ไม่เท่ากันในแต่ละโมดูลจึงไปมีผลทำให้กระแสที่ได้รับมี ความแตกต่างกับบ้าง แต่อย่างไรก็ตาม กระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 โมดูล สามารถประมาณได้ว่า มีขนาดที่เท่าเทียมกัน นั่นก็หมายความว่าระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถแบ่งกระแสให้เท่ากันได้ ในแต่ละโมดูล ในขณะที่ระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง

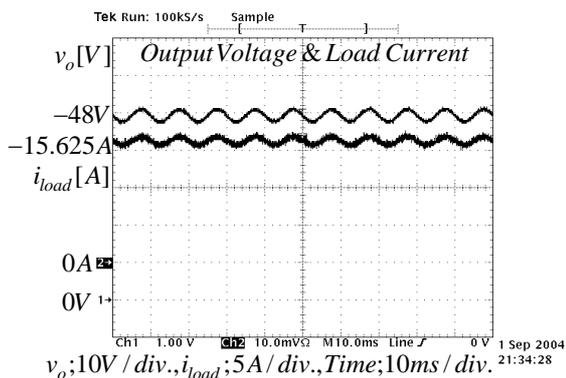


(ก)

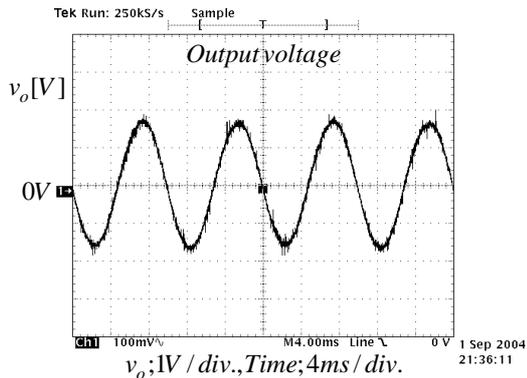


(ข)

ภาพที่ 3-23 ผลการทดลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ



(ก)

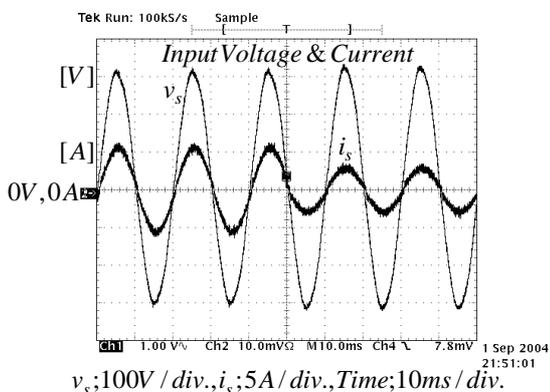


(ข)

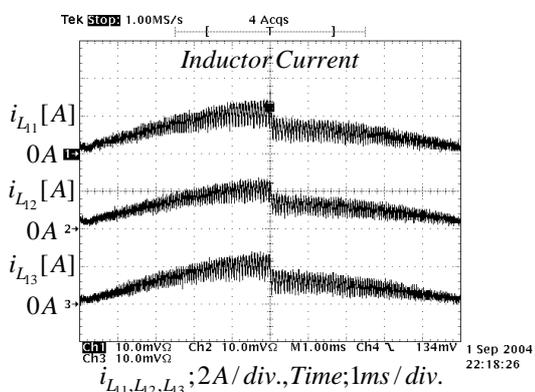
ภาพที่ 3-24 ผลการทดลอง (ก) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ข) แรงดันกระแสเฟืองเอาต์พุต

ภาพที่ 3-24 (ก) แสดงผลตอบสนองในสภาวะคงตัวแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกวัด โดยการกลับขั้วของสายสัญญาณ ในขณะที่ระบบกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระ 750 W ที่พิกัดแรงดันเอาต์พุต -48 V กระแสภาระ -15.625 A ภาพที่ 3-24 (ข) แสดงแรงดันกระแสเฟืองที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต $\Delta V_o = 3.2\text{ V}$ (6.66%) เมื่อใช้ขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ $13,600\text{ }\mu\text{F}$

3.3.4.2 การทดสอบในสภาวะชั่วคราว ผลตอบสนองทางพลวัตของระบบถูกทดสอบ โดยการปรับเปลี่ยนภาระจาก 100 % ไปที่ 50 % และกลับมาที่ 100 % อีกครั้ง ผลที่ได้ปรากฏอยู่ในภาพที่ 3-25 ถึง ภาพที่ 3-27 ผลการทดสอบของระบบในสภาวะชั่วคราวของแรงดันและกระแสอินพุตเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ 750 W ไปที่ 375 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-25 (ก) ภาพขยายของผลการทดลองในสภาวะชั่วคราวของรูปคลื่นกระแสขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อระบบเครื่องแปลงผันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระจาก 750 W ไปที่พิกัด 375 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-25 (ข)

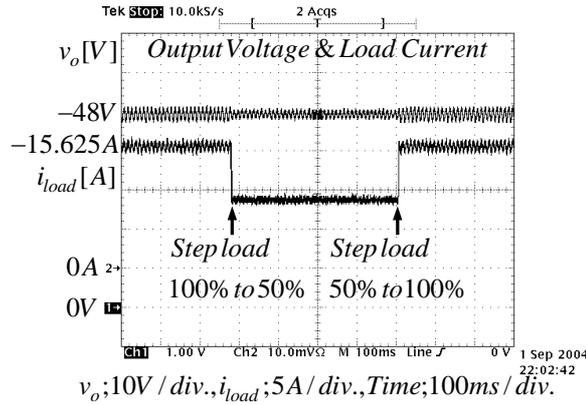


(ก)

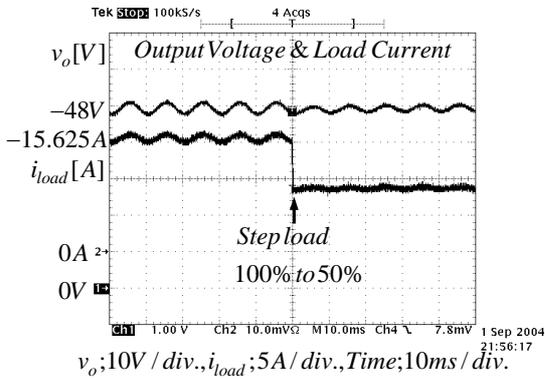


(ข)

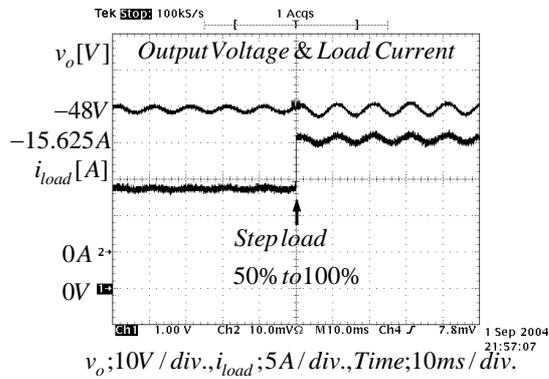
ภาพที่ 3-25 ผลการทดลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 3-26 ผลการทดลองภายใต้สภาวะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ



(ก)



(ข)

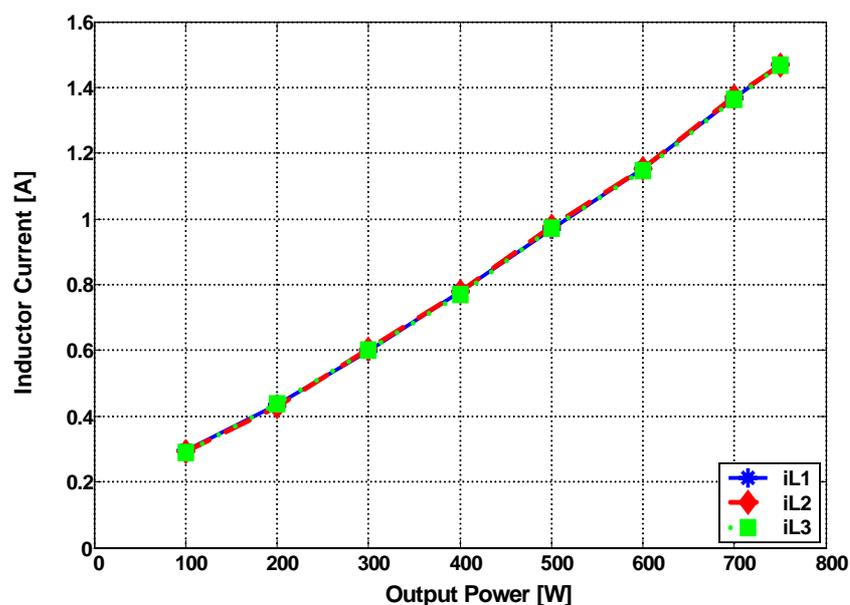
ภาพที่ 3-27 ผลการทดลองแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่เปลี่ยนแปลง (ก) จาก 100% ไป 50% (ข) จาก 100% ไป 50%

ผลการทดสอบที่ปรากฏอยู่ในภาพที่ 3-25 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ระบบการควบคุมที่นำเสนอดังกล่าวให้ประสิทธิภาพมากและระบบการขนานวงจรเรียงกระแสให้คุณสมบัติของการตอบสนองทางพลวัตอย่างรวดเร็ว ค่า *THD* ของกระแสอินพุตวัดได้ต่ำกว่า 6 % ที่ครึ่งหนึ่งของพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ภาระ

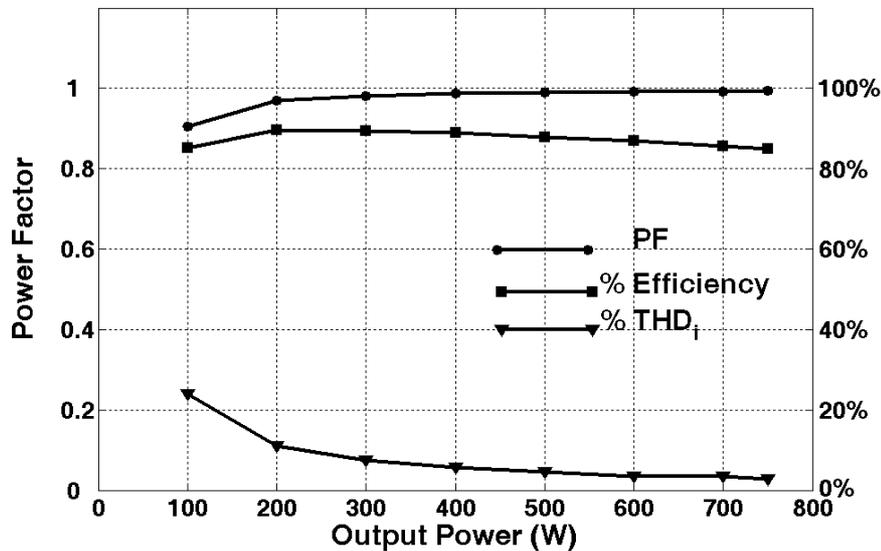
ผลการทดสอบที่แสดงอยู่ในภาพที่ 3-26 ถึง ภาพที่ 3-27 ถูกวัดโดยการกลับขั้วของสายสัญญาณที่ออสซิลโลสโคป ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750 W ไปที่ 375 W และกลับมาที่ 750 W อีกครั้ง ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-26 ระบบมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่รวดเร็ว ภาพที่ 3-27 (ก) และ (ข) เป็นส่วนขยาย ซึ่งแสดงถึงการกลับคืนตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวของแรงดันเอาต์พุตเกิดขึ้นภายใน 20 ms และรูปคลื่นกระแสอินพุตยังคงเป็นสัญญาณไซน์ที่มีคุณภาพสูง ระบบให้สมรรถนะทางพลวัตที่ดี

3.3.4.3 การทดสอบสมรรถนะระบบที่นำเสนอ ผลของการทดสอบสมรรถนะของการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก จำนวน 3 โมดูล ได้ถูกนำเสนอในตอนนี้ ปริมาณทางไฟฟ้าที่สำคัญถูกแสดงอยู่ในเทอมของกระแสโหลดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสักรวมของกระแสอินพุตและมาตรฐาน IEC 1000-3-2 class A limits ปริมาณทั้งหมดถูกวัดโดยใช้ Digital Power Meter YOKOGAWA โมเดล 2531 A การทดสอบสมรรถนะของระบบนี้ได้กำหนดเงื่อนไขของการทดสอบไว้ดังนี้ คือ สภาวะเมื่อระบบปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจาก 100 W ไปที่ 750 W ในขณะที่ระบบถูกกำหนดให้พารามิเตอร์ $V_s = 220$ V และ $V_o = -48$ V ผลของการทดสอบกับเงื่อนไขดังกล่าวถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-28 ถึง ภาพที่ 3-31

ผลของการแบ่งจ่ายกระแสโหลดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลให้กับภาระด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 3-28 ระบบถูกทดสอบด้วยการเปลี่ยนแปลงภาระจากค่าต่ำสุดที่ 100 W ไปจนถึงค่าสูงสุดที่ 750 W ผลจากการทดสอบได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานแฝงของแต่ละโมดูลที่ไม่เท่ากัน ในสภาวะของการสร้างวงจรจริง ผู้ปฏิบัติไม่สามารถควบคุมค่าของความเหนี่ยวนำและความต้านทานแฝงภายในขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลให้มีค่าเท่ากันได้อย่างแท้จริง แต่อย่างไรก็ตาม ระบบยังคงแสดงให้เห็นถึงผลของการควบคุมการแบ่งกระแสในแต่ละโมดูลได้ดี



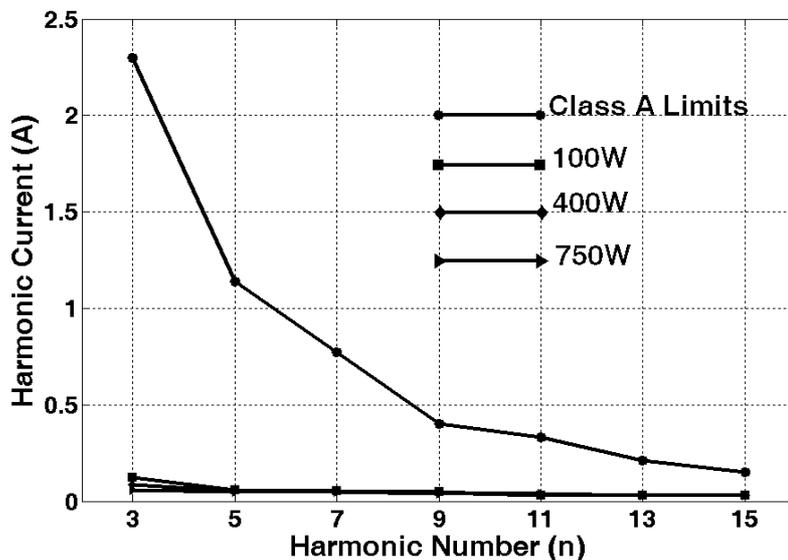
ภาพที่ 3-28 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบ กระแสที่วัดได้ในแต่ละ โมดูลเปรียบเทียบกับภาระที่เปลี่ยนแปลงไป (Digital Power Meter Model 2531 A)



ภาพที่ 3-29 คุณสมบัติสมรรถนะหลักของระบบการขนานวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก (แรงดันอินพุต 220 V)

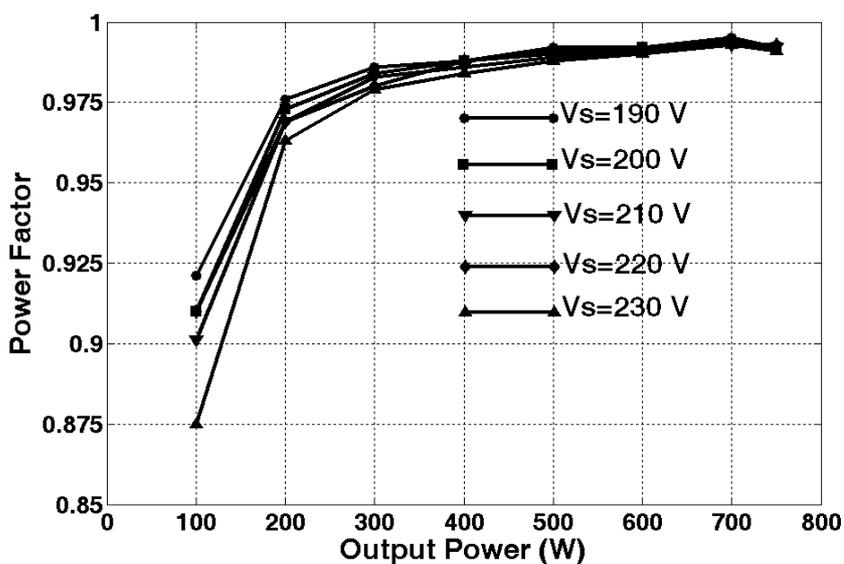
ภาพที่ 3-29 แสดงสมรรถนะหลักของระบบที่ถูกนำเสนอ ภายใต้เงื่อนไขการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่มีการเปลี่ยนแปลงไป กราฟบนสุดของภาพที่ 3-29 แสดงเส้นโค้งของตัวประกอบกำลังของระบบที่วัดได้จากสภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100 W ไปที่ 750 W เมื่อพิจารณาที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของภาระ ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99 เส้นโค้งกลางในภาพแสดงประสิทธิภาพของระบบซึ่งมีค่าอยู่ประมาณที่ 85% เส้นโค้งต่ำสุดแสดงปริมาณ *THD* ของกระแสอินพุตที่ภาระเปลี่ยนแปลงไป ค่า *THD* ของกระแสอินพุตมีค่าต่ำกว่า 3% ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 750 W

ภาพที่ 3-30 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์จากระบบที่นำเสนอโดยปริมาณทั้งหมดถูกวัดจากสภาวะเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงของภาระเป็นแบบขั้นบันได รายละเอียดที่ได้ แสดงถึงขนาดของกระแสฮาร์มอนิกส์อินพุตที่ถูกวัดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของภาระที่ 100 W 400 W และที่ 750 W เส้นกราฟที่ได้แสดงให้เห็นถึงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้ในแต่ละอันดับนั้นมีค่าต่ำกว่าที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC-1000-3-2 class A limits จะมีก็เพียงแต่ปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 เท่านั้นที่มีขนาดมากอย่างมีนัยสำคัญจากจำนวนอันดับอื่นๆ แต่เมื่อเทียบกับปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐานแล้วยังคงถือว่าปริมาณที่วัดได้ดังกล่าวมีค่าน้อยมาก นั่นก็หมายความว่าเราสามารถเพิ่มความสามารถของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้านี้เพื่อที่จะให้ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้ต่อไปในอนาคต โดยวิธีการเพิ่มจำนวนโมดูลในแต่ละเฟส โดยที่ระบบที่นำเสนอยังคงอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEC-1000-3-2 ที่ได้กำหนดไว้



ภาพที่ 3-30 ฮาร์มอนิกกระแสอินพุตของระบบที่นำเสนอเมื่อถูกวัดที่พิกัดแรงดันอินพุต 220 V

ภาพที่ 3-31 แสดงปริมาณของตัวประกอบกำลังที่วัดได้ภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงของ 2 ตัวแปรดังนี้ คือ ภาระที่ถูกรักษาให้เปลี่ยนแปลงไปจากค่า 100 W ไปจนถึง 750 W และ แรงดันอินพุตที่ถูกปรับเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่ 190 V และค่าสูงสุดที่ 230 V เป็นไปดังที่ได้คาดการณ์ไว้ การเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุตเป็นผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังลดลง โดยเฉพาะที่ค่าพิกัดภาระต่ำสุด แต่อย่างไรก็ตาม ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าและที่แรงดันไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 220 V ระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังที่มากกว่า 0.99



ภาพที่ 3-31 ตัวประกอบกำลังเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ภาระและแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงไป

รูปแบบของการขนานวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซุก สามารถให้ค่าตัวประกอบกำลังที่สูงเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 200 W ไปจนถึง 750 W ปริมาณของตัวประกอบกำลังและค่า *THD* ของกระแสขึ้นอยู่กับภาระเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต เพราะฉะนั้นเครื่องแปลงผันแบบซุกที่ทำงานอยู่ในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง มีความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตได้ดี

3.3.5 สรุป การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกที่ไม่แยกโคจรทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล บนหลักการสมมูลย์กำลังไฟฟ้าได้ถูกนำเสนอในบทนี้ โมดูลเรียงกระแสแบบซุกถูกออกแบบให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 375 W ต่อ 1 โมดูล ซึ่งโมดูลดังกล่าวถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นระบบต้นแบบเพื่อที่จะจ่ายกำลังไฟฟารวมให้กับภาระที่ 750 W ที่แรงดันเอาต์พุต -48 V กระแสภาระสูงสุดที่ -31.25 A ระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการถูกสร้างขึ้นมา เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงความจริงของแนวคิดของการควบคุมระบบด้วยหลักการที่ได้ถูกนำเสนอไป ผลการทดสอบระบบแสดงให้เห็นว่าระบบที่ได้ถูกนำเสนอนี้ทำงานได้เป็นอย่างดีทั้งในสภาวะคงตัวและในสภาวะชั่วคราว ระบบที่นำเสนอได้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ 3 ประการคือ

3.3.5.1 ระบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ดี

3.3.5.2 ระบบสามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังอินพุตให้ใกล้เคียง 1

3.3.5.3 ระบบถูกควบคุมให้กระแสชดเชยเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลมีค่าใกล้เคียงกัน

ระบบที่ได้นำเสนอให้ข้อดีเพิ่มเติมดังต่อไปนี้ คือ ระบบออกแบบและควบคุมง่าย ระบบให้ผลการตอบสนองทางพลวัตได้ดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างทันทีทันใด ระบบต้นแบบที่ถูกทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 750 W แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V ให้ค่าตัวประกอบกำลังที่มากกว่า 0.99 ประสิทธิภาพประมาณ 85 % และค่า *THD* ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 3%

แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการขนานวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก ได้ให้คุณสมบัติที่เด่นมากมายหลายประการ แต่ระบบดังกล่าวยังคงมีจุดด้อยที่เห็นได้เด่นชัด คือ แรงดันเอาต์พุตที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงยังคงปรากฏแรงดันกระเพื่อมที่มีขนาดของค่าความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ไลน์ ซึ่งทำให้ผู้ออกแบบต้องเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่เพื่อนำมากรองแรงดันกระเพื่อมดังกล่าวให้ลดลง ผลที่ตามมาคือ ระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าว การใช้โครงสร้างแบบแยกแหล่งจ่ายของสถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะได้ถูกกล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

3.4 สรุป

ในบทที่ 3 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการจำลองและทดสอบการทำงานของระบบโครงสร้างแบบขนานของวงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบมาตรฐาน 3 รูปแบบดังนี้

1. การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบัส 3 โมดูล บนหลักการควบคุมกระแสแบบพีคบัลลิ่งเอ็ม
2. การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีฟิคนิดแยกโคจรทางไฟฟ้า 3 โมดูล บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า
3. การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุกชนิดไม่แยกโคจรทางไฟฟ้า 3 โมดูล บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

ระบบที่ถูกลำเสนอทั้งหมดในบทที่ 3 นี้ ได้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ในข้างต้นทุกประการ คือ

1. ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99
2. กระแสอินพุตมีค่า THD_i ต่ำ
3. ระบบสามารถควบคุมการแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลได้ดี
4. ระบบทำงานอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 class A limits
5. ระบบโครงสร้างแบบขนานที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบ ซีฟิกและแบบชุก ชนิด 1 เฟส ที่ได้ถูกออกแบบอยู่บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้านั้น ให้คุณสมบัติของการตอบสนองทางพลวัตที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระ
6. ระบบสามารถเพื่อกำลังไฟฟ้าได้ด้วยหลักการ $n_M = N + 1$

แต่อย่างไรก็ตาม ระบบการขนานวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบัส ซีฟิกและชุก นั้นให้แรงดันกระแสเพื่อเอาต์พุตที่มีขนาดของความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ไลน์ ทำให้ระบบดังกล่าวต้องถูกออกแบบให้มีการติดตั้งตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะนำมากรองขนาดของแรงดันกระแสเพื่อมดังกล่าวให้มีค่าลดลง ผลที่ตามมาคือ ระบบโครงสร้างของวงจรกำลังมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลถึงต้นทุนของการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากแรงดันปลิวเอาต์พุตดังกล่าว จึงได้นำไปสู่การใช้ระบบการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบมาตรฐาน ซึ่งเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาที่ดีอีกทางเลือกหนึ่ง

ดังนั้น ในบทที่ 4 จะได้กล่าวถึงการใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีฟิกและแบบชุก ชนิดแยกโคจรทางไฟฟ้า ซึ่งได้ถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็น

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ในรูปแบบ 3 เฟส 4 สาย และ 3 เฟส 3 สาย โดยระบบที่นำเสนอตั้งกล่าวจะได้ถูกวิเคราะห์และออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาที่ได้ปรากฏขึ้นกับระบบการขนานวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส

บทที่ 4

วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้ โมดูลเรียงกระแสแบบซุกและซีพิกบนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า

4.1 บทนำ

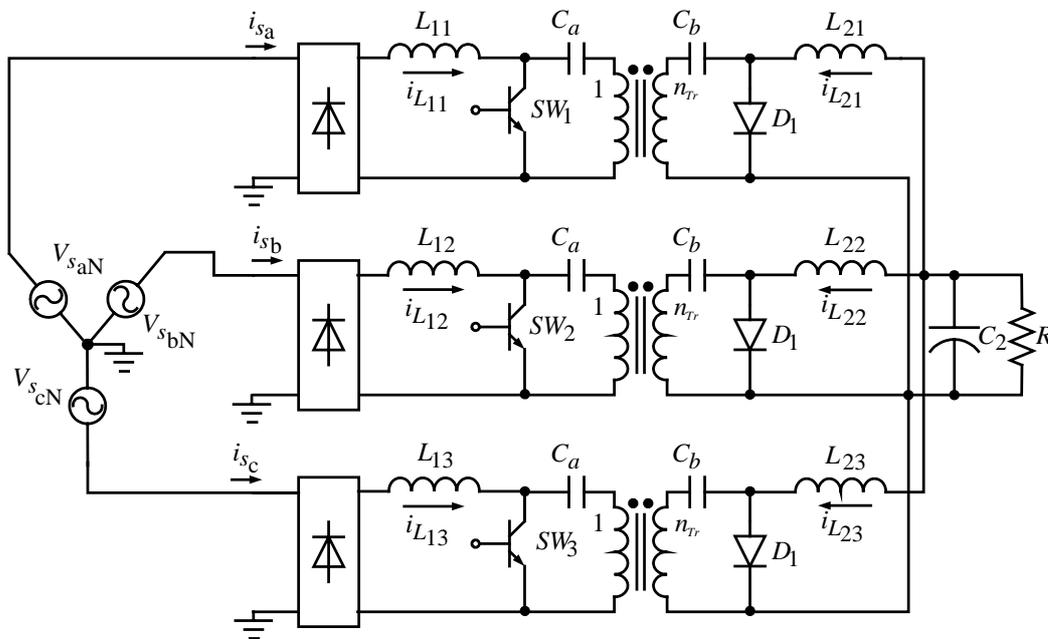
วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังให้ใกล้เคียงหนึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [38, 39, 40, 41, 42, 43] กับการประยุกต์ใช้ในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งวงจรดังกล่าวทำหน้าที่หลักอยู่ 2 ประการ คือ แก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้ใกล้เคียงหนึ่งและรักษาระดับแรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าคงที่ แต่เมื่อระบบดังกล่าวต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระเพิ่มขึ้น โครงสร้างของแหล่งจ่ายกำลังแบบขนานจึงถูกนำมาใช้แทนที่โครงสร้างแบบแหล่งจ่ายเดี่ยว [44, 45, 46, 47, 48, 49, 50] เพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่เพิ่มขึ้นได้ ระบบโครงสร้างแบบขนานนี้ได้เพิ่มหน้าที่ของการทำงานที่สำคัญอีก 1 ประการ คือ ต้องมีความสามารถในการแบ่งกระแสให้ไหลผ่านในแต่ละโมดูลได้อย่างเท่าเทียมกัน แต่อย่างไรก็ตาม ในระบบโครงสร้างแบบขนานในระบบไฟฟ้า 1 เฟส ยังคงเหลือไว้ซึ่งปัญหาที่สำคัญอีก 1 ประการ คือ แรงดันเอาต์พุตบัสไฟฟ้ากระแสตรงยังคงปรากฏแรงดันกระเพื่อมที่ประกอบด้วยความถี่เป็น 2 เท่า ของความถี่ไลน์ (50Hz) ดังนั้น ระบบยังคงต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำหน้าที่ลดขนาดของแรงดันกระเพื่อม การออกแบบรูปควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำได้ยากและระบบให้ค่า *THD* ของกระแสสูงเมื่อจ่ายภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส จึงได้รับความนิยมและได้เข้ามาแทนที่โครงสร้างแบบขนานเพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังที่ได้กล่าวมา [51, 52, 53, 54, 55, 56]

ในบทที่ 4 ของวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกและซีพิก บนหลักการสมมูลย์กำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบทำหน้าที่หลัก 3 ประการคือ

1. แก้ไขตัวประกอบกำลังอินพุต
2. แบ่งกระแสลดความถี่ยวนนำในแต่ละโมดูลในแต่ละเฟส
3. ควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีผลการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระ

4.2 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุก

ในตอนที 4.2 ของบทที่ 4 นี้ได้กล่าวถึงผลการจำลองและผลการทดสอบของระบบต้นแบบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบชุก บนหลักการสมมูลย์กำลังไฟฟ้า วงจรกำลังของระบบที่นำเสนอแสดงอยู่ในภาพที่ 4-1 วงจรกำลังของระบบแปลงผันประกอบขึ้นมาจากโมดูลเรียงกระแสแบบชุกชนิด 1 เฟส แบบแยกโคจรทางไฟฟ้าด้วยจำนวนทั้งสิ้น 3 โมดูล โดยที่ภาคอินพุตของโมดูลดังกล่าวถูกต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 4 สาย (สตาร์) ภาคเอาต์พุตของทุกๆ โมดูลถูกต่อรวมกันที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แบบแผนของการควบคุมประกอบด้วยรูปควบคุมแรงดันเอาต์พุต 1 รูป พร้อมกับชุดคำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลในแต่ละเฟส วัตถุประสงค์หลักของระบบที่ได้ถูกนำเสนอนี้คือ เพื่อที่จะลดจำนวนภาคส่วนของการแปลงแรงดันไฟฟ้าลงและปรับปรุงพลวัตของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่บัสแรงดันไฟฟ้าในระบบกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบวงจรกำลังของระบบที่นำเสนอ นั้นให้ความยืดหยุ่นไม่ว่าจะเป็นการต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) หรือ เป็นระบบ 3 เฟส 3 สาย (แบบเดลต้า) แบบแผนของการควบคุมออกแบบง่ายและไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน



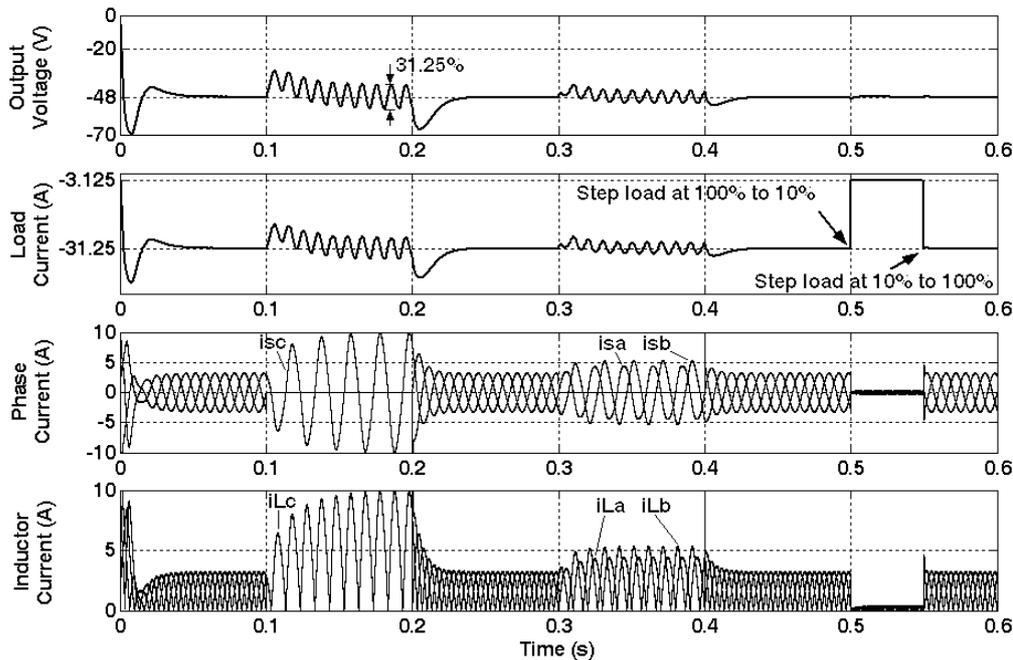
ภาพที่ 4-1 ภาควงจรกำลังของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุก จำนวน 3 โมดูล

4.2.1 การจำลองการทำงาน โครงสร้างของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟสบนพื้นฐานการควบคุมแบบสมดุลงำลังไฟฟ้าถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม Simulink เป้าหมายของการจำลองการทำงานนี้คือ เพื่อที่จะแสดงถึงกระบวนการควบคุมการออกแบบพารามิเตอร์ของระบบและศึกษาสมรรถนะทางด้านพลวัตและสภาวะคงตัวของระบบที่นำเสนอ ตารางที่ 4-1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่นำเสนอเพื่อใช้กับระบบการจำลองด้วยโปรแกรม Simulink ดังกล่าว

4.2.1.1 การทดสอบระบบภายใต้สภาวะกำลังไฟฟ้าสมดุลง่ายและโมดูลเกิดสภาวะการทำงานที่ผิดปกติ ผลการจำลองของการควบคุมระบบภายใต้สภาวะเมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า 1,500 W ภายใต้การทำงานทั้งในสภาวะที่โมดูลทำงานครบทุกเฟสและสภาวะเมื่อเกิดสภาวะความผิดปกติกับแต่ละโมดูลถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-2 (ระบบทำงานที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 220 V เทียบกับนิวตรอน)

ตารางที่ 4-1 คุณลักษณะปกติของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก

คุณลักษณะ	โมดูลกำลัง
แรงดันไฟฟ้าอินพุต 3 เฟส 4 สาย	220/380 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าของโมดูล	500 W/ Module
พิกัดกำลังไฟฟารวมที่ภาระ	1,500 W
พิกัดแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต	-48 V
L_{11}, L_{12}, L_{13}	5 mH
L_{21}, L_{22}, L_{23}	1 mH
C_a, C_b	1 μ F
C_2	6,800 μ F
k_p	1.25
ω_z	140
n_{Tr}	1

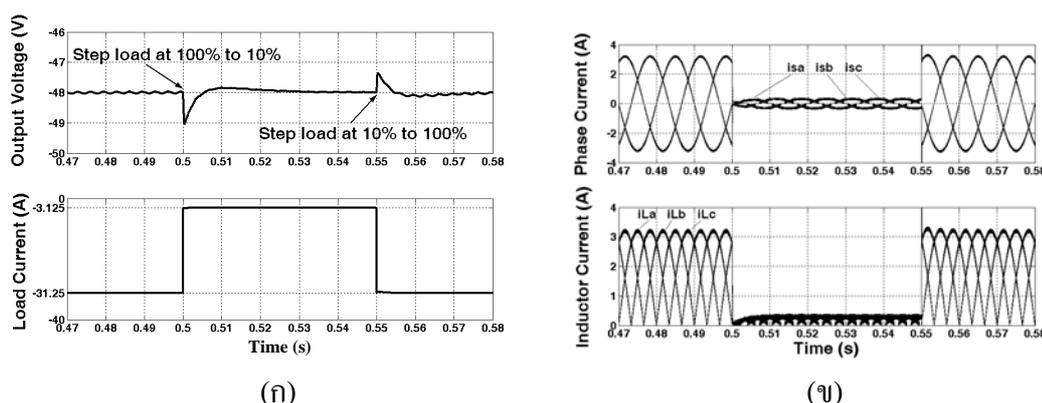


ภาพที่ 4-2 ผลตอบสนองทางพลวัตของปริมาณ แรงดันเอาต์พุต กระแสภาระ กระแสอินพุตไฟฟ้า กระแสสลับและกระแสคลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูล ภายใต้สภาวะเงื่อนไขเมื่อระบบสมดุลย์และโมดูลเกิดสภาวะการทำงานที่ผิดปกติ

การจำลองได้ทำการวิเคราะห์สภาวะการทำงานของระบบภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงภาระและโมดูลที่ต่ออยู่ภายในระบบที่นำเสนอต่อไปนี้

1. ที่ช่วงเวลา 0...100 ms เป็นการทำงานของระบบที่สภาวะสมดุลกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส
2. ที่ช่วงเวลา 100...200 ms เป็นสภาวะเมื่อ โมดูลของเฟส *a* และ *b* ถูกถอดออกจากระบบ
3. ที่ช่วงเวลา 200...300 ms เป็นสภาวะเมื่อโมดูลของเฟส *a* และ *b* ถูกต่อกลับเข้าไปที่ระบบ
4. ที่ช่วงเวลา 300...400 ms เป็นสภาวะเมื่อ โมดูลของเฟส *c* ถูกถอดออกจากระบบ
5. ที่ช่วงเวลา 400...500 ms ระบบกลับสู่สภาวะที่สมดุลกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส อีกครั้ง
6. ที่ช่วงเวลา 500...550 ms ภาระของระบบมีการเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 10% ภายใต้สภาวะกำลังไฟฟ้าของระบบที่สมดุลทุกเฟส
7. ที่ช่วงเวลา 550...600 ms ภาระของระบบมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10% ไปที่ 100% ภายใต้สภาวะกำลังไฟฟ้าของระบบที่สมดุลทุกเฟส

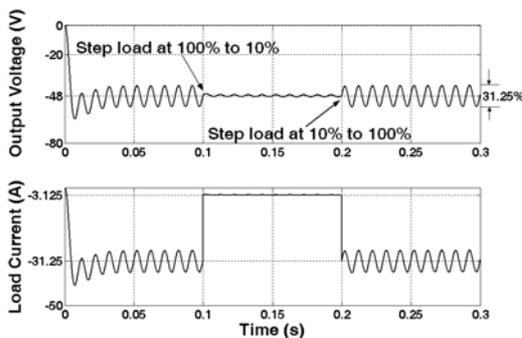
ที่เวลา $t = 100$ ms โมดูลเรียงกระแสของเฟส a และ b ถูกถอดออกจากระบบ การคำนวณของค่าสูงสุดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสต้องการเวลาในการคำนวณต่ำสุดอยู่ที่ 20 ms เป็นผลทำให้กระแสอินพุตลดลงชั่วคราว ซึ่งผลของการคำนวณที่ผิดพลาดนี้เป็นผลทำให้เกิดการตกลงอย่างมีนัยสำคัญของแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระในระหว่างช่วงเวลา 100 ms ถึง 120 ms ปรากฏที่ค่ายอดถูกคำนวณอย่างถูกต้องการตกลงอย่างรวดเร็วของค่าแรงดันจึงถูกหยุดเพราะเนื่องจากชุดควบคุมพีไอไปเพิ่มค่าของสัญญาณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิง นั่นก็หมายความว่าในช่วงเวลานี้ โมดูลเรียงกระแสในเฟส c ยังคงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้ตามปกติที่ 1,500 W แรงดันอินพุต 220 V รายละเอียดของการต่อกลับคืนมาของโมดูลในเฟส a และ b ที่เวลา $t = 200$ ms ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-2 กระแสอินพุตในเฟส a และ b เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะเนื่องจากค่าของสัญญาณที่ต้องการของรูปคำนวณกระแสและรูปควบคุมแรงดัน ค่าของกระแสเฟสที่เพิ่มขึ้นมากเกินไปเป็นเหตุให้เกิดแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระเกินชั่วขณะในช่วงเวลา 200 ถึง 220 ms การกระเพื่อมของกระแสอินพุตถูกทำให้เข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 20 ms ($t = 220$ ms) ระบบยังคงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้ 1,500 W ตามปกติภายในเวลา 20 ms ภายหลังจากที่โมดูลในเฟส a และ b ถูกนำกลับมาต่อเข้ากับระบบอีกครั้ง พฤติกรรมของระบบเมื่อโมดูลในเฟส c เกิดความเสียหายปรากฏขึ้นในช่วงเวลา $t = 300$ ถึง 400 ms การคำนวณที่ล่าช้าของค่ายอดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำเป็นเหตุให้เกิดแรงดันเอาต์พุตลดลงเกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่งในช่วงระหว่างเวลา $t = 300$ ถึง 320 ms



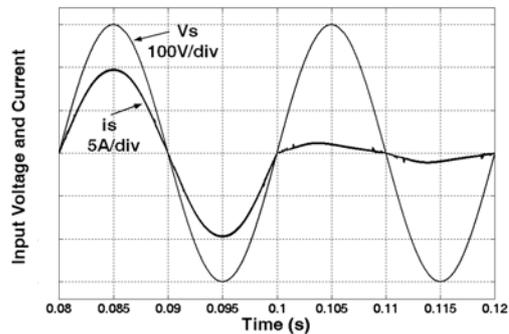
ภาพที่ 4-3 ส่วนขยายของผลตอบสนองทางพลวัตของปริมาณ แรงดันเอาต์พุต กระแสภาระกระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูล ภายใต้เงื่อนไขสภาวะการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 100% (1,500 W) ไปที่ 10% (150 W) และกลับมาที่ 1,500 W (100%)

ระบบที่นำเสนอยังคงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้ที่พิกัด 1,500 W ถึงแม้ว่าได้เกิดความเสียหายขึ้นกับโมดูลในเฟส C ก็ตาม การต่อกลับเข้าไปใหม่ของโมดูลในเฟส C ปรากฏขึ้นที่เวลา $t = 400$ ms เมื่อนั้นระบบกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวของภาวะสมดุลย์เฟสอีกครั้ง การเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างฉับพลันเกิดขึ้นที่ช่วงเวลา $t = 500$ ถึง 600 ms ภาพขยายของช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงภาระดังกล่าวปรากฏอยู่ในภาพที่ 4-3 ซึ่งได้แสดงถึงการปรับเปลี่ยนภาระจาก 1,500 W ไปที่ 150 W และกลับมายัง 1,500 W อีกครั้ง แรงดันกระแสเพิ่มที่เอาต์พุตเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัดมีค่าเท่ากับ 0.06 V (0.125% เมื่อค่าความจุตัวเก็บประจุเอาต์พุตเป็น 6,800 μ F) ภายใต้การทำงานในสภาวะสมดุลย์ของกระแสเฟสทั้ง 3 นี้ ระบบไม่ปรากฏความพลัวของความถี่ต่ำที่แรงดันเอาต์พุตอีกต่อไป ดังนั้นที่ชุดควบคุมของรูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตสามารถถูกออกแบบให้มีความถี่ตัดผ่านเกณฑ์ศูนย์ที่สูงกว่าความถี่ไลน์ได้เพื่อที่จะให้ระบบที่ได้ถูกออกแบบไปมีผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้อย่างรวดเร็ว

4.2.1.2 การเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบขนานของวงจรเรียงกระแสแบบซุกที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ การวิเคราะห์และออกแบบการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบซุกบนหลักการพื้นฐานสมดุลย์กำลังไฟฟ้าได้ถูกกล่าวไว้ในบทที่ 3 พฤติกรรมที่สำคัญของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังชนิด 1 เฟส คือ มีแรงดันกระแสเพิ่มของแรงดันเอาต์พุตที่มีลักษณะของความถี่กำลังเป็น 2 เท่าของความถี่ไลน์ ดังนั้นเพื่อที่จะเป็นการป้องกันขนาดของแรงดันกระแสเพิ่มนี้ต่อผลกระทบที่เกิดกับสัญญาณกระแสอ้างอิงในรูปควบคุมกระแส จึงจำเป็นต้องออกแบบรูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเกณฑ์ตัดผ่านความถี่ศูนย์ที่ต่ำกว่าความถี่ไลน์



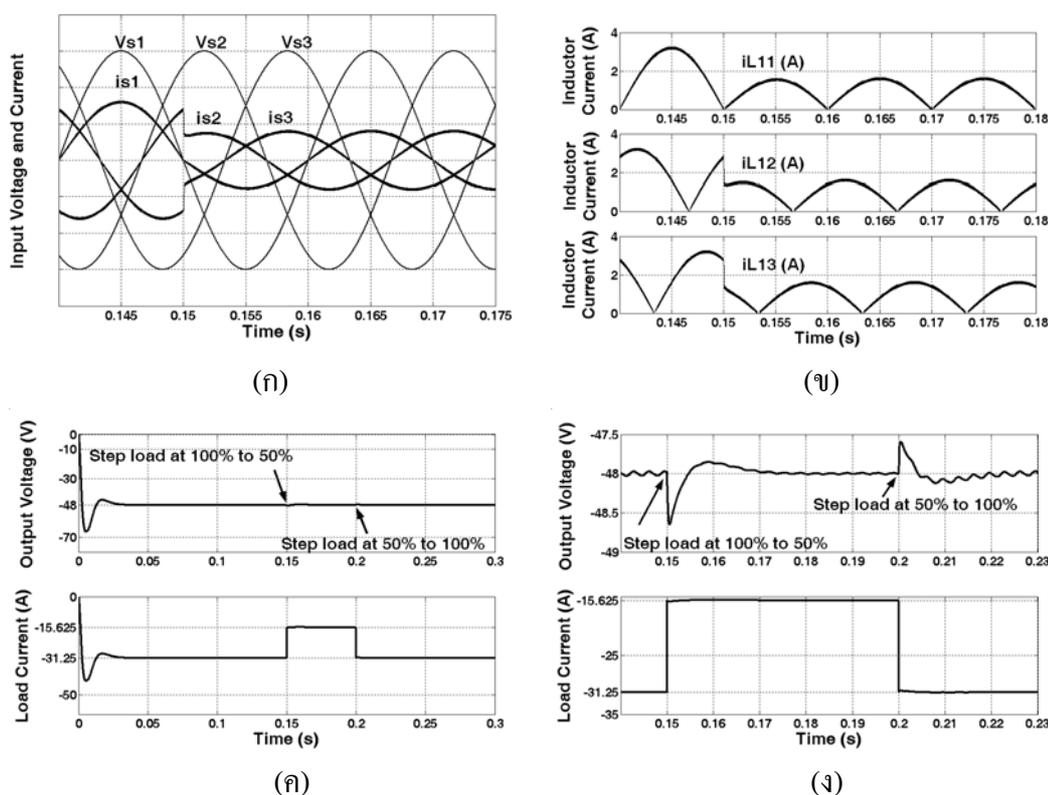
(ก)



(ข)

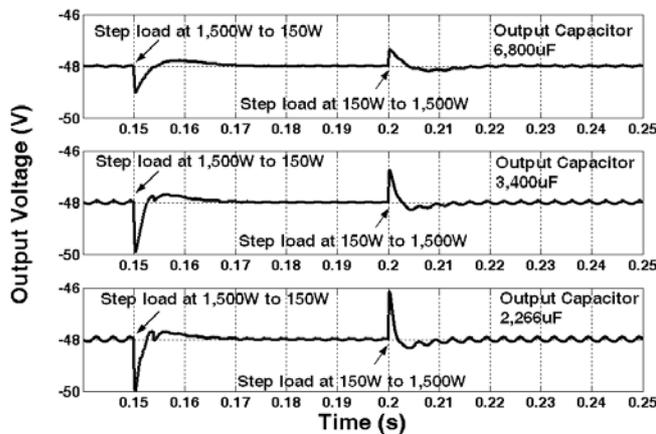
ภาพที่ 4-4 ผลการจำลองของปริมาณแรงดันเอาต์พุต กระแสภาระ แรงดันและกระแสอินพุตของระบบโครงสร้างการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบซุก ชนิด 1 เฟส

ภาพที่ 4-4 แสดงผลการจำลองของแรงดันเอาต์พุต กระแสภาระ แรงดันและกระแสอินพุต ต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 1.5 kW ไปที่ 0.15 kW และกลับมาที่ 1.5 kW ในโครงสร้างแบบขนานของวงจรเรียงกระแสแบบซุกชนิด 1 เฟส แรงดันเอาต์พุตยังคงเกือบไม่เปลี่ยนแปลง นั่นแสดงว่าการขนานวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบซุกชนิด 1 เฟส ด้วยหลักการสมดุลย์กำลังไฟฟ้า ให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้อย่างรวดเร็ว ค่าของแรงดันกระแสเพื่อมีความถี่ต่ำ (100 Hz) ของแรงดันเอาต์พุตที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีระบบ 1 เฟส มีค่าอยู่ประมาณ 31.25% ภาพที่ 4-4 (ข) แสดงผลแรงดันและกระแสอินพุตของระบบโครงสร้างแบบขนาน 1 เฟส ขณะที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดให้กับภาระ สัญญาณรูปคลื่นของกระแสที่ได้รับใกล้เคียงไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต ดังนั้น ค่าตัวประกอบกำลังอินพุตของระบบจึงใกล้เคียงหนึ่ง แต่เมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัด 150 W กระแสอินพุตของระบบนี้ยังคงเห็นรูปสัญญาณของกระแสอินพุตที่มีความผิดเพี้ยนอยู่บ้าง



ภาพที่ 4-5 ผลการจำลองของแรงดันและกระแสอินพุต แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระของระบบที่ ถูกนำเสนอกภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระ

4.2.1.3 พฤติกรรมของระบบที่นำเสนอภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าสมดุลทั้ง 3 เฟส วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาพฤติกรรมภายใต้สภาวะเงื่อนไขนี้คือ การควบคุมแรงดันเอาต์พุต การแบ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในแต่ละโมดูลและการแก้ไขตัวประกอบกำลัง ผลการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัด 1,500 W ภายใต้สภาวะการทำงานที่เกิดการสมดุลของกำลังไฟฟ้าในทุกๆ เฟส ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-5 ถึงภาพที่ 4-6 ผลจำลองของการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของรูปคลื่นกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ แรงดันและกระแสอินพุต ที่การเปลี่ยนแปลงภาระจาก 1,500 W ไปที่ 750 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ในขณะที่กระแสอินพุตมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุตและใกล้เคียงสัญญาณไซน์ ดังนั้นทำให้ตัวประกอบกำลังของระบบใกล้เคียงหนึ่งและระบบสามารถควบคุมการแบ่งการไหลของกำลังไฟฟ้าในแต่ละโมดูลได้ดีเช่นกัน ผลการจำลองของผลตอบสนองสภาวะชั่วคราวของรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 1,500 W ไปที่ 750 W และกลับมาที่ 1,500 W ซึ่งถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-5 (ค) ภาพขยายของผลการจำลองภายใต้เงื่อนไขของการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนแปลงพิกัดภาระจาก 1,500 W ไปที่ 150 W และกลับมาที่ 1,500 W อีกครั้ง ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-5 (ง) แรงดันกระแสเพิ่มที่เอาต์พุตขณะจ่ายภาระเต็มพิกัดมีค่าเท่ากับ 0.06 V (0.125% เมื่อ $C_2=6,800 \mu\text{F}$) ระบบให้คุณสมบัติของค่าตัวประกอบกำลังที่สูงและมีผลตอบสนองทางพลวัตของระบบที่นำเสนอที่รวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากภาพที่ 4-5 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตถูกควบคุมให้กลับเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลา 20 ms โดยที่กระแสอินพุตยังคงถูกควบคุมให้เป็นรูปคลื่นเป็นไซน์ที่มีคุณภาพสูง แสดงให้เห็นว่าระบบที่ถูกนำเสนอนี้สามารถให้สมรรถนะต่อการตอบสนองทางพลวัตที่ดีมาก



ภาพที่ 4-6 ผลการจำลอง การเปรียบเทียบพฤติกรรมแรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการปรับเปลี่ยนขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตภายใต้การจ่ายภาระจาก 1.5 kW ไปที่ 150 W และกลับมาที่ 1.5 kW อีกครั้ง

ผลตอบสนองของแรงดันและกระแสภาระเมื่อระบบที่นำเสนอถูกกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตเท่ากับ 1.35 kW โดยที่ตัวเก็บประจุเอาต์พุตถูกปรับเปลี่ยนค่าด้วยอัตราส่วนที่ลดลงเป็นจำนวนเท่าใน 3 ระดับ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-6 ภาพที่ 4-6 บน กลางและล่าง แสดงการเปรียบเทียบของ $\pm \Delta v_o$ และ $\% v_{ripple}$ บนตัวเก็บประจุเอาต์พุต เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ภาระโดยที่ระบบควบคุมประกอบไปด้วยชุดควบคุมแรงดันแบบพีไอและชุดคำนวณกระแสชดเชยเหนี่ยวนำ รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตเป็นตัวแทนของผลจากค่าของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันเอาต์พุตที่ค่า 6,800 μF 3,400 μF และ 2,266 μF ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตและเปอร์เซ็นต์ของค่าแรงดันกระแสเพื่อมถูกแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 4-2 การเปรียบเทียบถูกแสดงให้เห็นว่าผลของแรงดันที่ลดลงไปมีค่าเพียงเล็กน้อยและระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว ผลที่ได้รับเป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าระบบดังกล่าวถูกออกแบบด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้านั้นเอง แม้ว่าค่าที่เล็กที่สุดของตัวเก็บประจุที่ได้ถูกเลือกใช้ไป ระบบยังคงให้ผลของการควบคุมที่ดี จากผลดังกล่าว การเลือกค่าตัวเก็บประจุเพื่อที่จะนำมาใช้งานจริงต้องเป็นการพิจารณาจากการประนีประนอมระหว่างสมรรถนะของการควบคุมที่ได้รับกับค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งจากหลักดังกล่าว ตัวเก็บประจุค่า 2,266 μF จะถูกนำไปใช้กับระบบที่นำเสนอเพื่อใช้ในการสร้างวงจรต้นแบบจริง (ข้อกำหนด $\% \Delta v_o < 10\%$)

ในทั้ง 3 กรณีของตัวเก็บประจุเอาต์พุต แรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสสลับถูกควบคุมให้มีผลของการตอบสนองภายใต้สภาวะชั่วคราวได้ดีโดยใช้ชุดควบคุมแรงดันแบบพีไอบนรูปควบคุมแรงดันพร้อมกับชุดคำนวณกระแสชดเชยเหนี่ยวนำในแต่ละเฟส

ตารางที่ 4-2 พฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกบนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมสมดุลกำลังไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุเอาต์พุต (C_2)	% อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต ($\pm \Delta v_o$)	% แรงดันกระแสเฟรมด้านเอาต์พุต (คิดที่กระแสภาระ 100%)
6,800 μF	3.125 % (1.50 V)	0.125 %
3,400 μF	6.770 % (3.25 V)	0.25 %
2,266 μF	8.330 % (4.00 V)	0.41 %

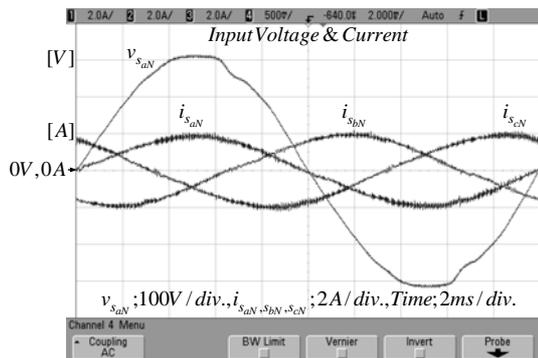
4.2.2 การทดสอบการทำงานของระบบต้นแบบ โครงสร้างของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก ที่ถูกควบคุมอยู่บนพื้นฐานเทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้างแสดงอยู่ในภาพที่ 4-3 ระบบได้ถูกออกแบบ สร้าง และทดสอบ โดยมีเป้าหมายหลักของการทดสอบการทำงานดังต่อไปนี้คือ

4.2.2.1 เพื่อที่จะแสดงให้เห็นได้จริงว่าแนวคิดการออกแบบบนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้าสามารถออกแบบระบบ 3 เฟสที่มีลักษณะเป็น Modular Approach ได้

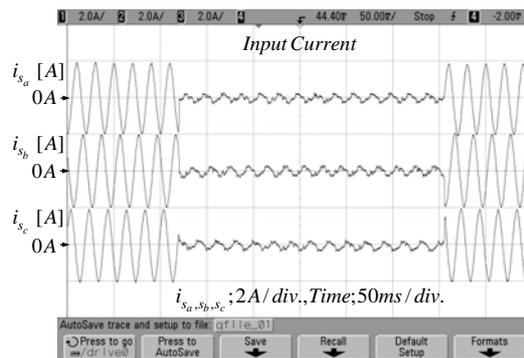
4.2.2.2 เพื่อที่จะศึกษาสมรรถนะด้านพลวัตและสถานะคงตัวของระบบที่นำเสนอ โดยตารางที่ 4-1 แสดงค่าพารามิเตอร์และรายละเอียดประกอบทางไฟฟ้าของระบบที่นำเสนอนี้ เพื่อใช้ในการทดสอบภายใต้สถานะเงื่อนไขที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4-3 คุณลักษณะปกติของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก

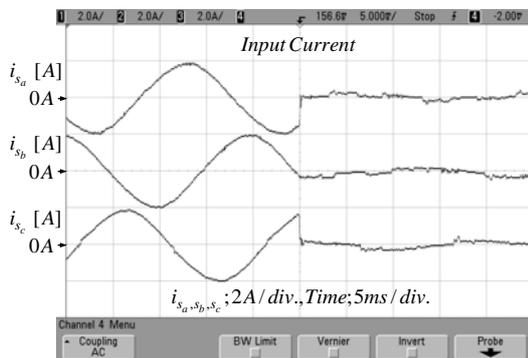
คุณลักษณะ	โมดูลกำลัง
แรงดันไฟฟ้าอินพุต 3 เฟส 4 สาย	220/380 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าของโมดูล	250 W/ Module
พิกัดกำลังไฟฟารวมที่ภาระ	750 W
พิกัดแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต	-48 V
$L_{11a}, L_{21a}, r_{11a}, r_{21a}$	5.069 mH, 1.066 mH, 1.329 Ω , 0.320 Ω
$L_{11b}, L_{21b}, r_{11b}, r_{21b}$	5.068 mH, 1.086 mH, 1.280 Ω , 0.320 Ω
$L_{11c}, L_{21c}, r_{11c}, r_{21c}$	5.066 mH, 1.044 mH, 1.279 Ω , 0.319 Ω
C_a, C_b	0.68 μ F
C_2	13,600 μ F
k_p	1
ω_z	150
η_{Tr}	0.5



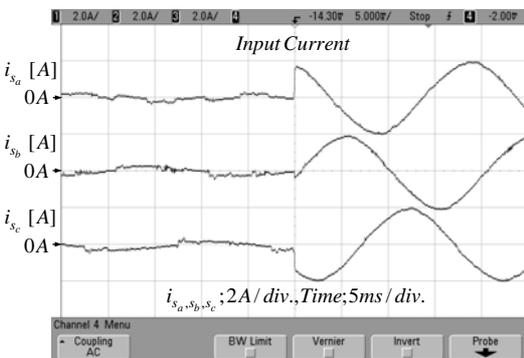
(ก)



(ข)



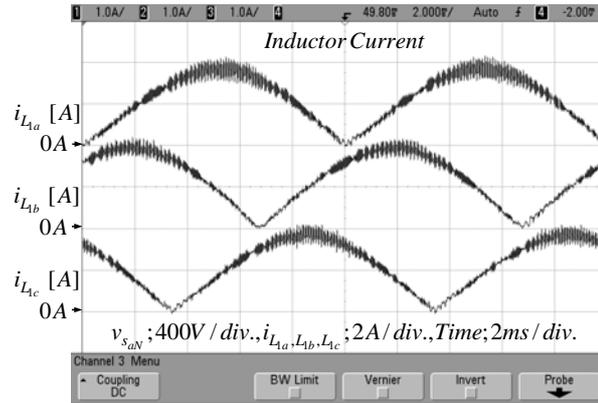
(ค)



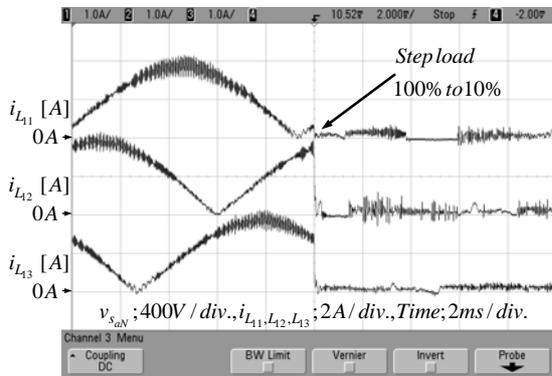
(ง)

- ภาพที่ 4-7 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสอินพุต (ก) สภาวะคงตัวเมื่อจ่ายภาระ 750 W (100%)
 (ข) สภาวะเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750 W ไปที่ 75 W และกลับมาที่พิกัด 750 W
 (ค) ภาพขยายที่พิกัดภาระ 750 W ไปที่ 75 W (ง) ภาพขยายที่พิกัด 75 W ไปที่ 750 W

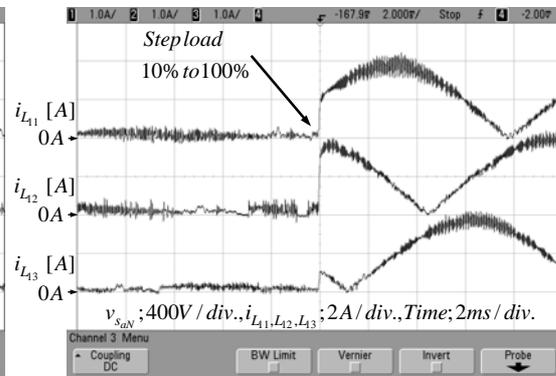
ผลตอบสนองในสภาวะคงตัวเมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ 750 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-7 (ก) กระแสอินพุตเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดัน เป็นผลให้ตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ระบบที่นำเสนอถูกควบคุมให้สามารถทำงานอยู่ภายใต้สภาวะกระแสเฟสสมดุลในทุกๆ เฟส ผลการตอบสนองทางพลวัตของกระแสอินพุต 3 เฟส ที่ถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขสภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750 W ไปที่ 75 W และกลับมาที่ 750 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-7 (ข) ภาพขยายของกระแสทั้ง 3 เฟส ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-7 (ค) และ (ง) ผลการทดสอบในภาพที่ 4-7 แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบให้ผลของการทดสอบที่ดีมากไม่ว่าจะถูกทดสอบอยู่ภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงตัวหรือในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของภาระ ค่า THD_i ของกระแสอินพุตที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 750 W มีค่าอยู่ที่ 2.34 %



(ก)



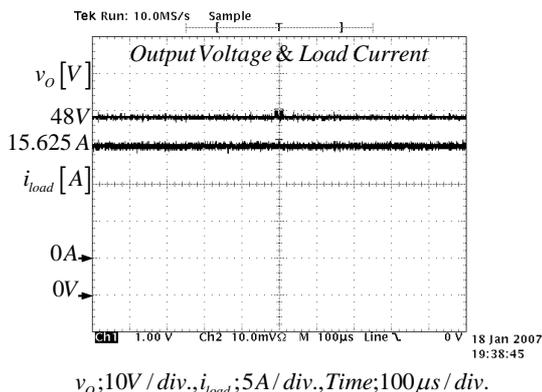
(ค)



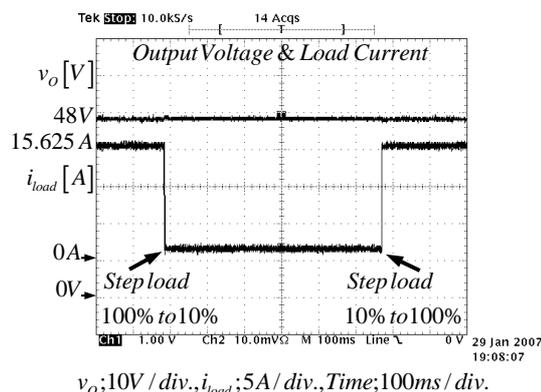
(ง)

ภาพที่ 4-8 ผลการทดสอบของกระแสคลื่นเหนี่ยวนำ (ก) สภาวะเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัด 750 W (100%) (ค) ภาพขยายที่พิกัดภาระ 750 W ไปที่ 75 W (ง) ภาพขยายที่พิกัดภาระ 75 W ไปที่ 750 W

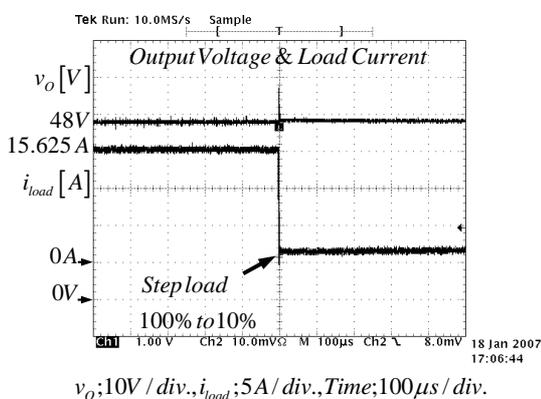
ผลการทดสอบที่แสดงอยู่ในภาพที่ 4-8 แสดงถึงกระแสคลื่นเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของเฟส *a b* และ *c* ซึ่งระบบถูกกำหนดให้ทดสอบอยู่ภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงตัวและการเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างทันทีทันใด ภาพที่ 4-8 (ก) แสดงกระแสคลื่นเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลที่ระบบเครื่องแปลงผันจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ให้กับภาระที่พิกัด 750 W ส่วนภาพที่ 4-8 (ค) และ (ง) แสดงภาพขยายกระแสคลื่นเหนี่ยวนำของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750W ไปที่ 750 W และกลับมาที่ 750 W ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าด้วยระบบของการควบคุมที่ได้ถูกนำเสนอนี้สามารถควบคุมให้วงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซุก จำนวน 3 โมดูล ได้เป็นอย่างดี ในขณะที่ระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังอินพุตใกล้เคียง 1 และให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ดีภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว



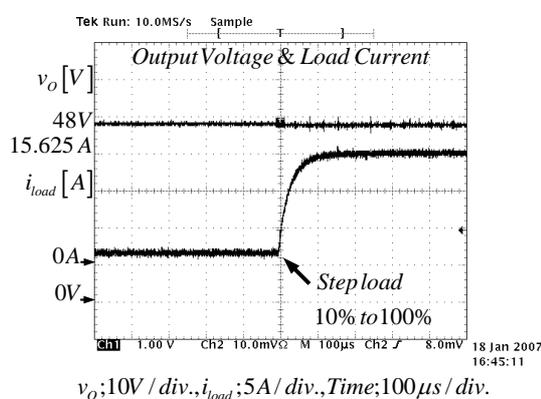
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

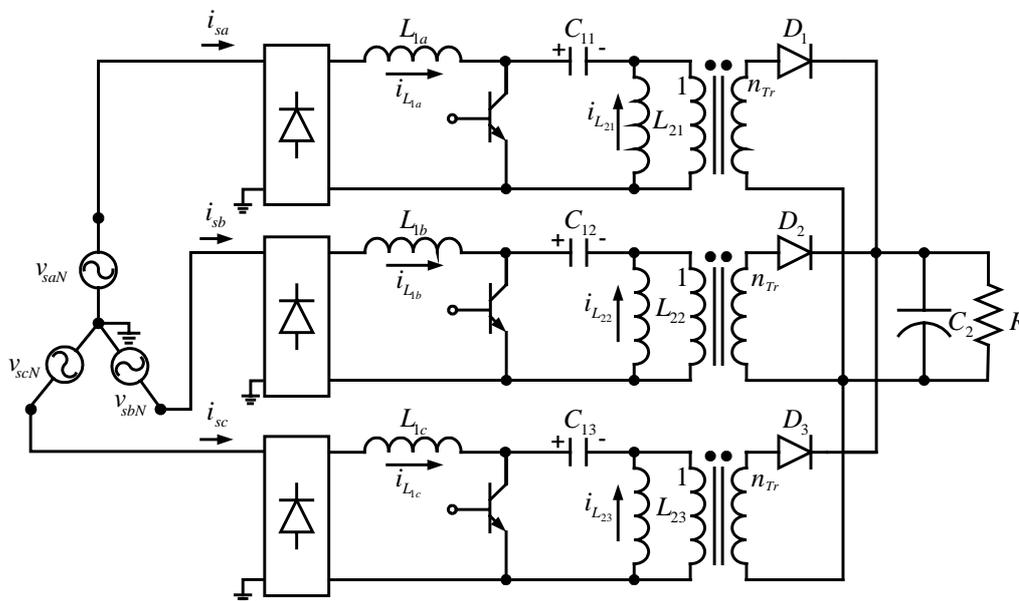
ภาพที่ 4-9 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ก) สถานะคงตัวเมื่อจ่ายภาระ 750 W (100%) (ข) สถานะเมื่อเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750 W ไปที่ 75 W และกลับมาที่ 750 W (ค) ภาพขยายที่พิกัดภาระ 750 W ไปที่ 75 W (ง) ภาพขยายที่พิกัด 75 W ไปที่ 750 W

ผลการทดสอบที่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-9 (ก) ถึง (ง) ถูกบันทึกโดยการกลับหัวของสายสัญญาณที่ออสซิลโลสโคป ภาพที่ 4-9 (ข) แสดงผลการทดสอบของระบบที่นำเสนอภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระจาก 750 W ไปที่ 75 W และกลับมาที่ 750 W ระบบให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้เป็นอย่างดีเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ 4-9 (ก) กับภาพที่ 4-9 (ค) และ (ง) ซึ่งภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแรงดันของบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตสามารถเข้าสู่สถานะคงตัวได้อย่างรวดเร็วภายใน 100 μ s ระบบไม่ปรากฏค่าแรงดันที่ตกลงไปหรือเกินขึ้นมาอีกเลย ดังนั้นจึงพอที่จะสามารถสรุปได้ว่าระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส ชนิดนี้ให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ

4.3 วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงฟิก

ในตอนที่ 4.3 ของบทที่ 4 นี้จะได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงฟิก ชนิด 1 เฟส แบบแยกโคจรทางไฟฟ้าจำนวน 3 โมดูล มาประกอบกันขึ้นเป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ซึ่งระบบถูกวิเคราะห์และออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า โดยโครงสร้างของระบบ 3 เฟส ดังกล่าวได้ถูกแบ่งแยกออกเป็น 2 รูปแบบดังนี้

4.3.1 การต่อแบบ 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ภาพวงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงฟิก ชนิดแยกโคจรทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล ได้ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-10 ในตอนนี้ของบทที่ 4 จะได้กล่าวถึงผลของการจำลองการทำงานและผลของการทดสอบในระดับวงจรต้นแบบดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้คือ เพื่อที่จะควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงให้มีผลการตอบสนองที่ดีต่อสภาวะต่างๆและเพื่อที่จะแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลให้มีค่าเท่ากันในขณะที่ระบบยังคงสามารถถูกควบคุมให้มีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ซึ่งเป็นผลทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์ถูกฉีดเข้าไปที่ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าลดลงด้วย

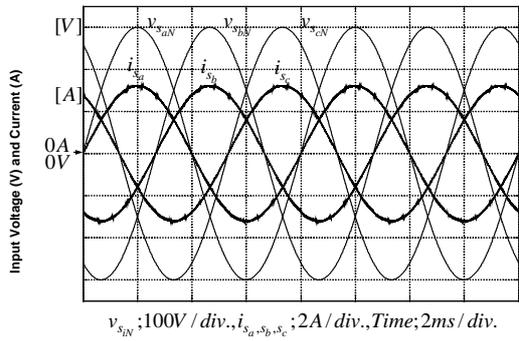


ภาพที่ 4-10 วงจรกำลังของระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงฟิก

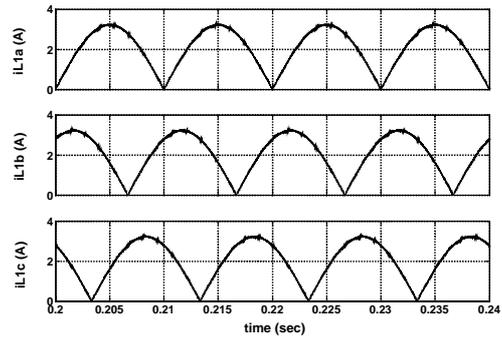
4.3.1.1 การจำลองการทำงาน เครื่องแปลงผันแบบซิงคิกแสดงคุณลักษณะสมบัติ เป็นแหล่งจ่ายกระแสซึ่งมีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการนำมาใช้เป็นวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ โดยในขั้นตอนของการจำลองในระบบนี้ กำหนดให้ใช้รายละเอียดที่ปรากฏอยู่ในตารางที่ 4-4 กับระบบที่ถูกนำเสนอ เพื่อเป็นค่าพารามิเตอร์ให้กับโมเดลในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Simulink ผลของการจำลองการทำงานของระบบที่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-10 แสดงอยู่ในภาพที่ 4-11 (ก) ถึง (ฉ) ผลการจำลองของแรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ให้กับภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1,500 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ภาพที่ 4-11 (ค) แสดงกระแสขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อภาระถูกเปลี่ยนจาก 1.5 kW ไปที่ 0.75 kW ภาพที่ 4-11 (ง) แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 1.5 kW ไปที่ 0.75kW และกลับมามี 1.5 kW อีกครั้ง ภาพที่ 4-11 (จ) และ (ฉ) แสดงภาพส่วนขยายของการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 1.5 kW ไปที่ 0.75 kW และ จาก 0.75 kW กลับมาที่ 1.5 kW ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผลการจำลองที่ได้แสดงไว้นั้นได้ปรากฏชัดว่าระบบสามารถถูกควบคุมให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้ทุกประการ

ตารางที่ 4-4 คุณลักษณะวงจรกำลังของระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิก

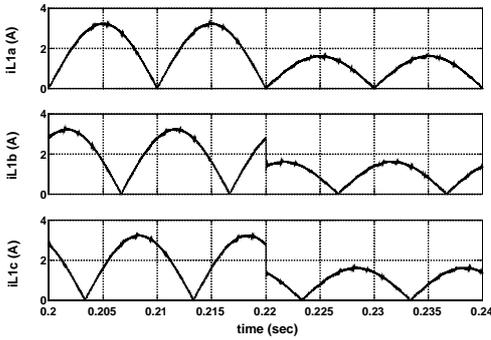
คุณลักษณะ (แบบสตาร์)	โมดูลกำลัง
แรงดันไฟฟ้าอินพุต 3 เฟส 4 สาย	220/380 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าของโมดูล	500 W/ Module
พิกัดกำลังไฟฟารวมที่ภาระ	1,500 W
พิกัดแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต	-48 V
L_{11}, L_{12}, L_{13}	5 mH
L_{21}, L_{22}, L_{23}	0.25 mH
C_{ij}, C_2	0.68 μ F และ 20,000 μ F
k_p, ω_z	0.2, 25
Π_{Tr}	1



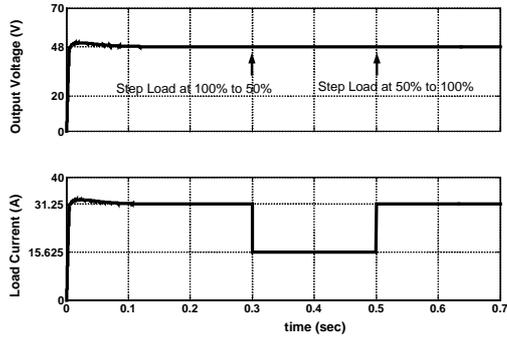
(ก)



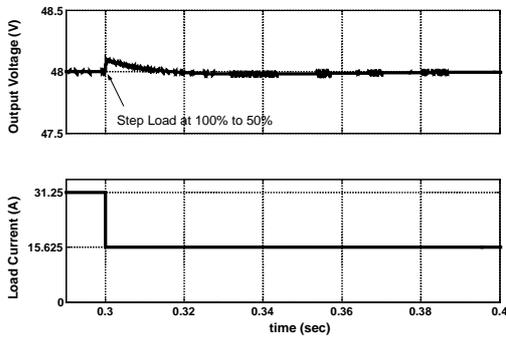
(ข)



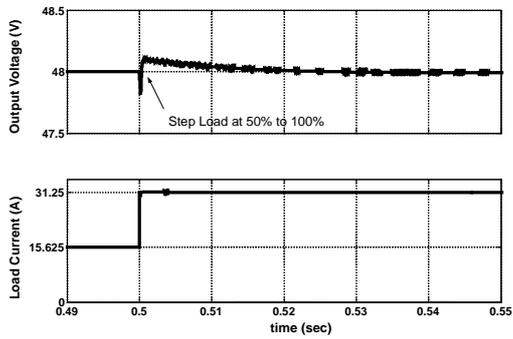
(ค)



(ง)



(จ)



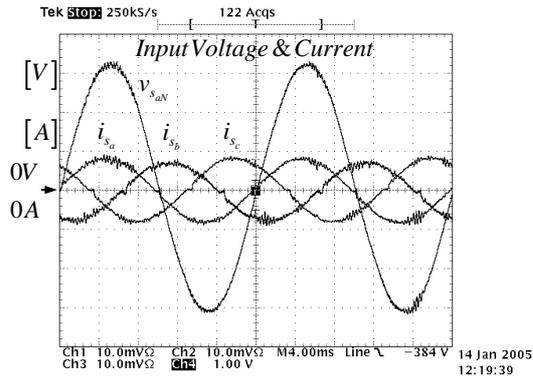
(ฉ)

ภาพที่ 4-11 ผลการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสโหลดเหนี่ยวนำ (ค) กระแสโหลดเหนี่ยวนำที่ภาระเปลี่ยนจาก 100% ไป 50% (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ภาระเปลี่ยนจาก 100% ไปที่ 50% กลับมาที่ 100% (จ) ภาพขยายของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่ภาระเปลี่ยนจาก 100% ไป 50% (ฉ) ภาพขยายของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่ภาระเปลี่ยนจาก 100% ไป 50%

4.3.1.2 การทดสอบการทำงาน ตารางที่ 4-5 แสดงผลการออกแบบของระบบที่ พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมเอาต์พุต 600 W แรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรง 48 V ในโครงสร้างระบบที่ ถูกนำเสนอ ผลการทดสอบของระบบที่นำเสนอถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-12 (ก) ถึง (ฉ) ผลตอบสนองภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงตัวของภาพที่ 4-10 เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัด 600 W ถูก แสดงอยู่ในภาพ 4-12 (ก) (ข) และ (ค) ภาพที่ 4-12 (ก) แสดงแรงดันและกระแสไฟฟ้าอินพุต ภาพที่ 4-12 (ข) แสดงกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลของแต่ละเฟส ภาพที่ 4-12 (ค) แสดงแรงดัน เอาต์พุตและกระแสภาระ ภาพที่ 4-12 (ง) แสดงผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ ต่อสภาวะเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 600 W ไปที่ 60 W และกลับมาที่ 600 W ส่วน ภาพขยายของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 600 W ไปที่ 60 W และจาก 60 W กลับไปที่ 600 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-12 (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ

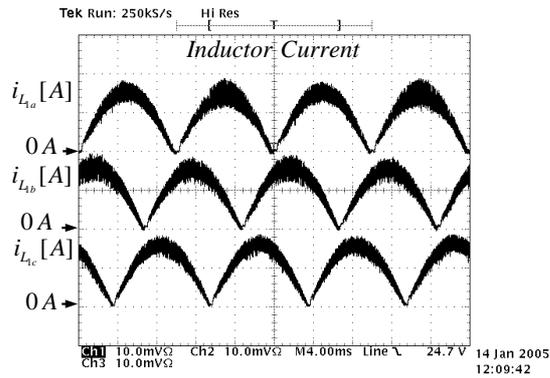
ตารางที่ 4-5 คุณลักษณะที่ใช้ในการทดสอบวงจรกำลังของระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบ ซึพิก

คุณลักษณะ	โมดูลกำลัง
แรงดันไฟฟ้าอินพุต 3 เฟส 4 สาย	220/380 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าของโมดูล	200 W/ Module
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมที่ภาระ	600 W
พิกัดแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต	48 V
$L_{11a}, L_{21a}, r_{11a}, r_{21a}$	5.0890 mH, 2.142 mH, 1.30 Ω , 1.211 Ω
$L_{11b}, L_{21b}, r_{11b}, r_{21b}$	5.0470 mH, 2.151 mH, 1.25 Ω , 1.597 Ω
$L_{11c}, L_{21c}, r_{11c}, r_{21c}$	5.006 mH, 2.161 mH, 1.60 Ω , 1.265 Ω
C_a, C_b	1 μ F
C_2	6,800 μ F
k_p, ω_Z	1, 150
n_{Tr}	0.5



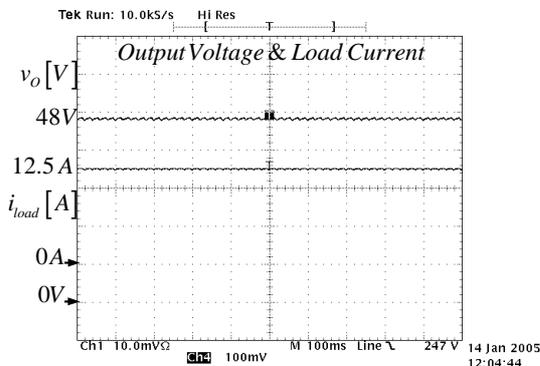
$v_{s_{iN}}$; 100V / div., i_{s_i} ; 2A / div., Time; 4ms / div.

(ก)



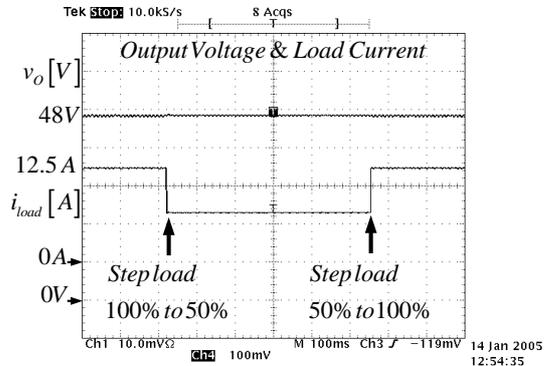
i_{L_a} , i_{L_b} , i_{L_c} ; 1A / div., Time; 4ms / div.

(ข)



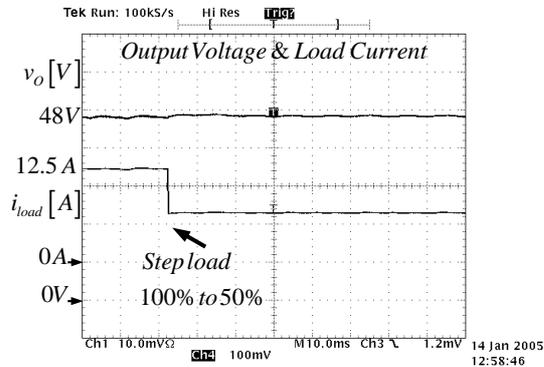
v_o ; 10V / div., i_{load} ; 5A / div., Time; 10ms / div.

(ค)



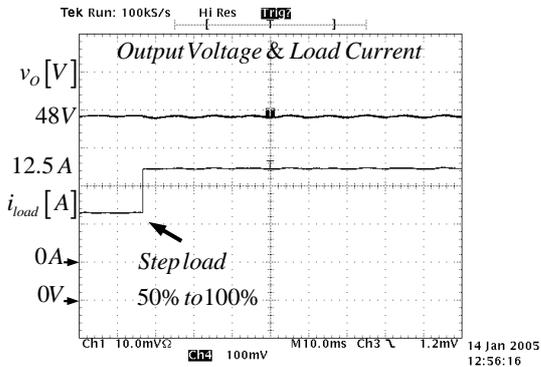
v_o ; 10V / div., i_{load} ; 5A / div., Time; 10ms / div.

(ง)



v_o ; 10V / div., i_{load} ; 5A / div., Time; 10ms / div.

(จ)



v_o ; 10V / div., i_{load} ; 5A / div., Time; 10ms / div.

(ฉ)

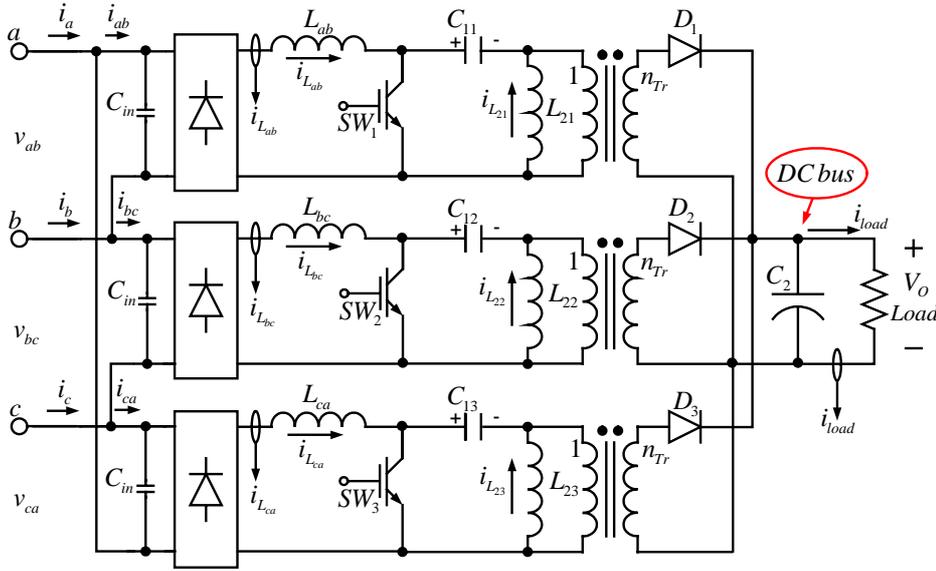
ภาพที่ 4-12 ผลการทดสอบ (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ค) แรงดันเอาต์พุตและกระแส (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสการะ เมื่อภาระถูกเปลี่ยนจาก 100% ไป 50% และ 100% (จ) ภาพขยายที่ภาระถูกเปลี่ยนจาก 100% ไป 50% (ฉ) ภาพขยายที่ภาระถูกเปลี่ยน 50% ไป 100%

ภาพที่ 4-12 (ก) แสดงแรงดันและกระแสอินพุตซึ่งคุณลักษณะของกระแสที่ได้มีเฟสตรงกันกับแรงดันและใกล้เคียงไซน์ ดังนั้น ตัวประกอบกำลังของระบบใกล้เคียงหนึ่ง ภาพที่ 4-12 (ข) แสดงปริมาณของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลในแต่ละเฟส เนื่องจากผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานแฝงของแต่ละโมดูลที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นกระแสขดลวดเหนี่ยวนำจึงไม่เท่าเทียมกันอย่างแท้จริง อย่างไรก็ตาม กระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้งหมดดังกล่าวถือได้ว่ามีค่าโดยประมาณที่เท่ากัน ในภาพที่ 4-12 (ง) ถึง (จ) แสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมที่ได้ถูกนำเสนอมีประสิทธิภาพและให้การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้อย่างรวดเร็ว แรงดันเอาต์พุตสามารถกลับคืนเข้าสู่ภาวะคงตัวได้ภายในเวลา 20 ms และขณะที่กระแสอินพุตยังคงให้รูปคลื่นกระแสที่ใกล้เคียงไซน์และมีคุณภาพของรูปคลื่นที่ดี

ในระบบโครงสร้างแบบขนานของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิกนั้นให้ข้อดีที่สำคัญคือ ค่าการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุตซึ่งมีลักษณะความถี่เป็น 2 เท่า ของความถี่ที่ไลน์มีขนาดใหญ่ ในทางกลับกันการทำงานภายใต้สภาวะสมดุลกำลังไฟฟ้าของระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ให้ค่าการกระเพื่อมความถี่ต่ำของแรงดันเอาต์พุตที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าต่ำ เพราะฉะนั้น ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุตที่ถูกต้องอยู่กับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสามารถที่จะลดขนาดให้เล็กลงได้เพื่อให้มีความเหมาะสมกับเงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆ

4.3.2 การต่อแบบ 3 เฟส 3 สาย (แบบเดลต้า) ภาพวงจรกำลังของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ถูกต้องแบบ 3 เฟส 3 สาย (แบบเดลต้า) โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิก จำนวนทั้งสิ้น 3 โมดูล ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-13 วงจรกำลังถูกสร้างและประกอบขึ้นด้วยด้านอินพุตเป็นระบบ 3 เฟส 3 สาย แบบเดลต้า จากโมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิกที่ถูกแยกโคจรทางไฟฟ้าจำนวน 3 โมดูล พร้อมกับด้านเอาต์พุตถูกต้องแบบขนานเข้ากับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบเดี่ยวถูกต้องใช้งานร่วมกันจากทั้ง 3 โมดูล แบบแผนของระบบควบคุมบนพื้นฐานหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าประกอบไปด้วยส่วนลูบที่ใช้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตและชุดคำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ ระบบควบคุมถูกออกแบบและสร้างด้วยวงจรแอนะล็อก ซึ่งจะส่งผลดีคือ สามารถช่วยลดต้นทุนของการผลิตลงได้

ในตอนนี้อย่างบทที่ 4 ได้แสดงถึงเทคนิคของการควบคุมสมดุลกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส แบบโมดูล ที่ให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งและให้ผลตอบสนองต่อสภาวะชั่วคราวได้อย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 4-13 วงจรกำลังของระบบแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 3 สาย (แบบเซลล์ต่ำ) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีฟิก

ตารางที่ 4-6 คุณสมบัติของวงจรกำลังและระบบควบคุมของระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 3 สาย (แบบเซลล์ต่ำ) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีฟิก

คุณลักษณะการต่อแบบเซลล์ต่ำ	โมดูลกำลัง
แรงดันไฟฟ้าอินพุต 3 เฟส 3 สาย	220 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าของโมดูล	200 W/ Module
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมที่ภาระ	600 W
พิกัดแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต	48 V
L_{11}, L_{12}, L_{13}	5 mH
L_{21}, L_{22}, L_{23}	2 mH
C_{ij}	1 μ F
C_2	13,600 μ F
k_p, ω_z	1, 150
n_{Tr}	1

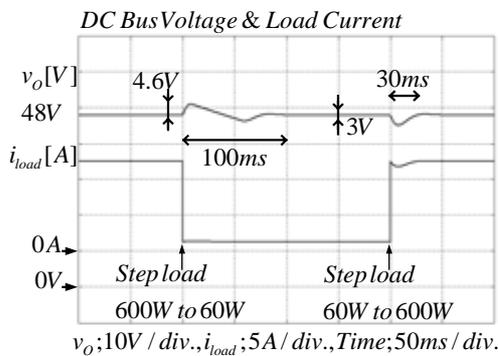
เทคนิคการควบคุมสมมูลกำลังไฟฟ้าถูกใช้เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งชุดชดเชยกระแสชดลวดเหนี่ยวนำ 3 เฟส ดังนั้น จึงส่งผลให้ระบบที่ถูกนำเสนอด้วยวิธีการควบคุมชนิดนี้ไม่หวั่นไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระและแรงดันอินพุตของระบบ วัตถุประสงค์หลักของระบบที่นำเสนอนี้คือเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบสนองทางพลวัตต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระ เพื่อที่จะลดความผิดพลาดกระแสฮาร์มอนิกส์รวมในกระแสอินพุตให้น้อยที่สุดและเพื่อที่จะแบ่งกระแสชดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสให้มีค่าใกล้เคียงกัน วิธีการควบคุมที่ถูกนำเสนอนี้ถูกต่อรวมเข้าไปที่ลูปฟีดแบ็คแรงดันเอาต์พุต ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงอยู่ในผลของการจำลองและการทดสอบระบบต้นแบบจริง

4.3.2.1 การจำลองการทำงาน ในเบื้องต้นประสิทธิภาพของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบโมดูล บนหลักการเทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงให้เห็นได้ด้วยการจำลองโดยโปรแกรม Simulink พารามิเตอร์ที่แสดงอยู่ในตารางที่ 4-6 ถูกเลือกเพื่อกำหนดค่าลงไปโมเดลของการจำลอง วัตถุประสงค์ของการจำลองการทำงานนี้ คือ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนของการควบคุมที่นำเสนอ เพื่อออกแบบและปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของระบบ และเพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมของระบบภายใต้การตอบสนองสถานะคงตัวและสมรรถนะทางพลวัตของระบบก่อนที่จะทำการสร้างวงจรต้นแบบจริง

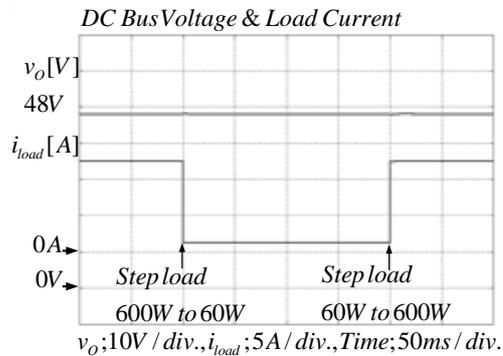
ภาพที่ 4-14 (ก) และ (ค) แสดงผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระกับแรงดันและกระแสอินพุตของเครื่องแปลงผันที่ถูกจำลองภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของภาระโดยระบบปราศจากการใช้งานเทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้า รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตและกระแสภาระสำหรับลูปควบคุมแรงดันที่ไม่มีชุดคำนวณกระแสชดลวดเหนี่ยวนำร่วมอยู่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-14 (ก) แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญด้วยค่า $\Delta v_o = 4.6 \text{ V}$ ณ ที่ตำแหน่งของการจ่ายภาระครั้งแรก และ $\Delta v_o = 3 \text{ V}$ ที่ตำแหน่งถัดมา ภาพที่ 4-14 (ค) แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุตโดยระบบปราศจากชุดคำนวณกระแสชดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าผลตอบสนองของกระแสไม่ได้รับการแก้ไขให้ดีขึ้น ภาพที่ 4-14 (ข) และ (ง) แสดงผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของระบบที่ถูกจำลองอยู่ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของภาระโดยลูปควบคุมแรงดันประกอบด้วยชุดคำนวณกระแสชดลวดเหนี่ยวนำ รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-14 (ข) ส่วนภาพที่ 4-14 (ง) แสดงผลตอบสนองของแรงดันและกระแสอินพุต ชัดเจนว่า เทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้าที่ได้ถูกนำเสนอนี้ได้บรรลุให้เห็นถึงสมรรถนะที่ต้องการในกรณีที่ว่ามีการเปลี่ยนแปลงภาระอย่างฉับพลัน ยิ่งกว่านั้น ภาพที่ 4-14 (ง) ยังแสดงให้เห็นอีกด้วยว่ากระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส นั้นมี

เฟสตรงกันกับแรงดันและมีรูปคลื่นเป็นไซน์ นั่นคือ ระบบที่ถูกนำเสนอทำงานด้วยสภาวะตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง

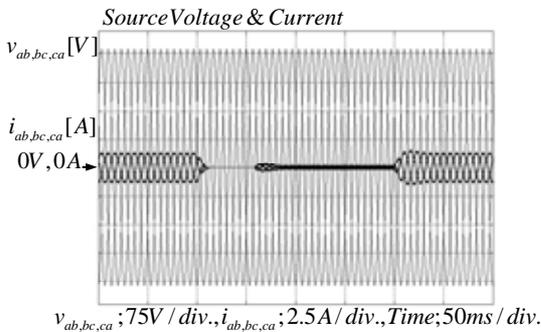
ภาพที่ 4-15 (ก) และ (ค) แสดงผลตอบสนองชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงและภาระกับแรงดันและกระแสอินพุตภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก 100% ไป 70% และกลับมาที่ 100% อีกครั้ง โดยที่ระบบปราศจากเทคนิคการควบคุมแบบสมดุลงำลังไฟฟ้า ภาพที่ 4-15 (ก) แสดงผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ ภาพที่ 4-15 (ค) แสดงผลตอบสนองของกระแสอินพุตต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต



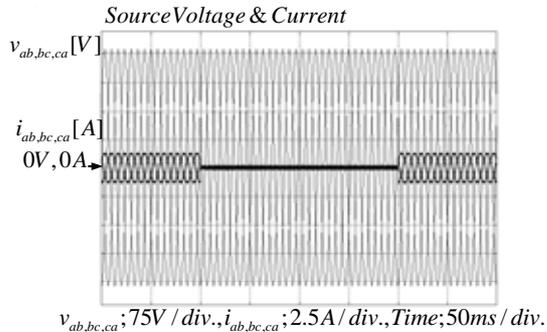
(ก)



(ข)

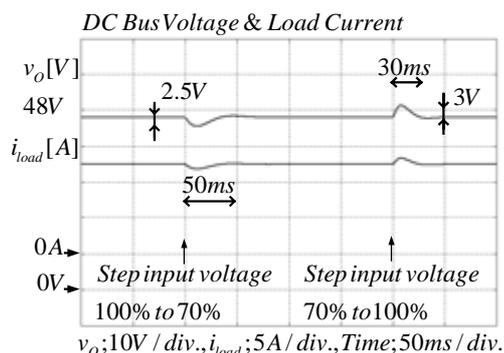


(ค)

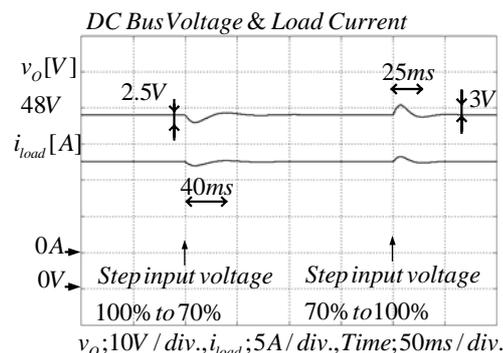


(ง)

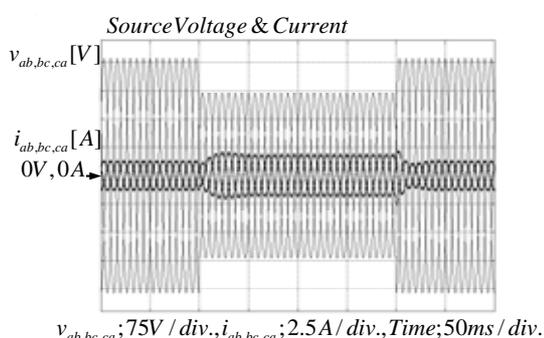
ภาพที่ 4-14 ผลของการจำลองสภาวะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระ (โดยทั้งสองกรณีนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของ $k_p=1$, $\omega_z=150$ และ ค่า $\eta_f=1$) (ก) และ (ค) ระบบไม่ได้ใช้เทคนิคการควบคุมแบบสมดุลงำลังไฟฟ้า (ข) และ (ง) ระบบทำงานบนเทคนิคสมดุลงำลังไฟฟ้า



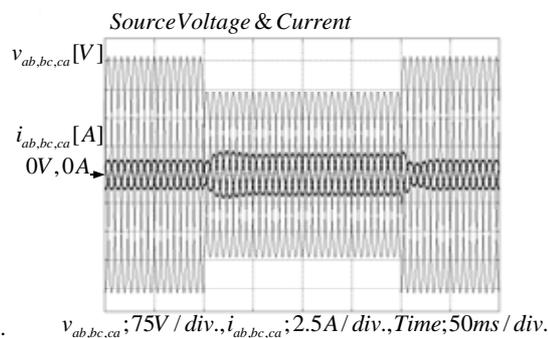
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 4-15 ผลการจำลองสถานะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต (ทั้งสองกรณีนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขของ $k_p=1$, $\omega_z=150$ และ ค่า $\eta_f=1$) (ก) และ (ข) ระบบปราศจากการใช้เทคนิคการควบคุมแบบสมดุลกำลังไฟฟ้า (ข) และ (ง) ระบบทำงานอยู่บนเทคนิคสมดุลกำลังไฟฟ้า

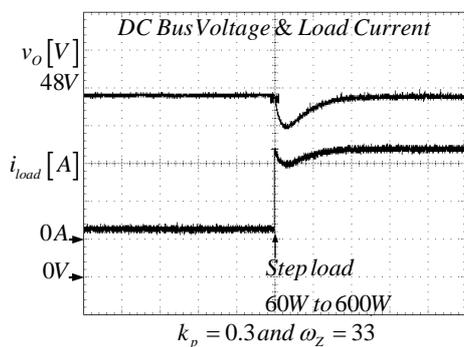
ภาพที่ 4-15 (ข) และ (ง) แสดงผลตอบสนองสถานะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระกับกระแสและแรงดันอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงพร้อมด้วยรูปคำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ ภาพที่ 4-15 (ข) แสดงถึงผลตอบสนองของค่าแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงที่ดีกว่าภาพ 4-15 (ก) ส่วนภาพที่ 4-15 (ง) แสดงให้เห็นว่าตัวประกอบกำลังด้านอินพุตยังคงมีค่าใกล้เคียงหนึ่งภายใต้สถานะชั่วคราวดังกล่าว คุณลักษณะของตัวประกอบกำลังและผลตอบสนองทางพลวัตของระบบที่แนะนำให้เสนอโดยใช้เทคนิคบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงและให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่รวดเร็ว

4.3.2.2 การทดสอบการทำงานของระบบเมื่อมีและไม่มีเทคนิคการควบคุมสมดุลกำลังไฟฟ้า ระบบต้นแบบวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบโมดูลที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 600 W โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซีพิก 200 W ชนิดแยกโคจ จำนวน 3 โมดูล ได้ถูกสร้างและทดสอบ พารามิเตอร์ของวงจรของระบบที่นำเสนอนี้ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4-7

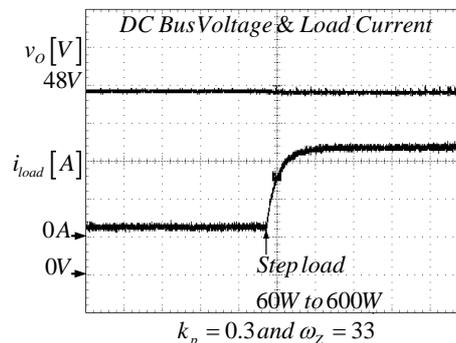
ผลกระทบของเทคนิคการควบคุมแบบสมดุลย์กำลังไฟฟ้าบนผลการตอบสนองของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงภายใต้การควบคุมของลูปควบคุมแรงดันได้ถูกทดสอบให้เห็น ภาพที่ 4-16 แสดงผลตอบสนองการทดสอบของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงที่การเปลี่ยนแปลงไปจาก 60 W ไปที่ 600 W พร้อมกับระบบควบคุมที่มีและไม่มีการใช้งานเทคนิคการควบคุมแบบสมดุลย์กำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแบบพีไอ 2 ชุด คือ $k_p = 0.3$ และ $\omega_z = 33$ กับ $k_p = 1$ และ $\omega_z = 150$

ตารางที่ 4-7 คุณลักษณะปกติของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ต่อแบบ 3 เฟส 3 สาย (เดลต้า) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีพิก

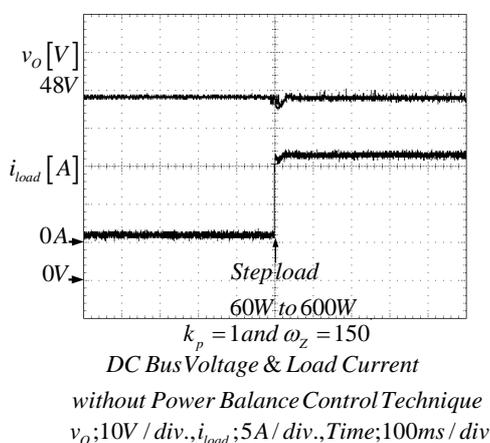
คุณลักษณะ	โมดูลกำลัง
แรงดันไฟฟ้าอินพุต 3 เฟส 3 สาย	220 V
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าของโมดูล	200 W/ Module
พิกัดกำลังไฟฟารวมที่ภาระ	600 W
พิกัดแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต	48 V
$L_{11a}, L_{21a}, r_{11a}, r_{21a}$	5.0890 mH, 2.142 mH, 1.30 Ω , 1.211 Ω
$L_{11b}, L_{21b}, r_{11b}, r_{21b}$	5.0470 mH, 2.151 mH, 1.25 Ω , 1.597 Ω
$L_{11c}, L_{21c}, r_{11c}, r_{21c}$	5.006 mH, 2.161 mH, 1.60 Ω , 1.265 Ω
C_a, C_b	1 μ F
C_2	13,600 μ F
k_p	1
ω_z	150
η_{Tr}	0.5



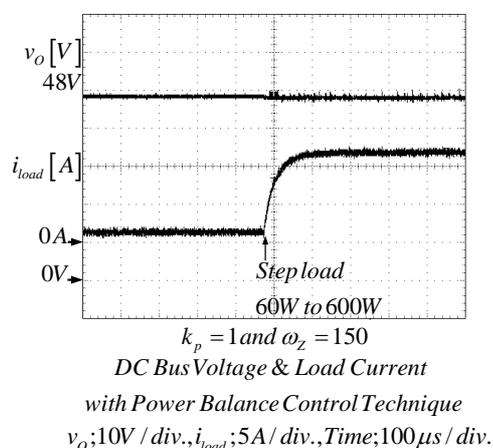
(ก)



(ข)



(ค)



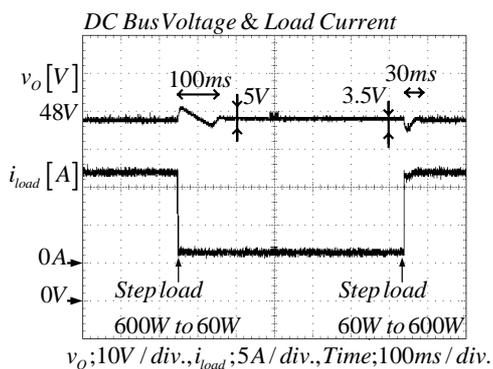
(ง)

ภาพที่ 4-16 รูปคลื่นของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระเมื่อภาระถูกเปลี่ยนจาก 10% ไปที่พิกัดกำลังของภาระ (ก) และ (ค) ระบบปราศจากการใช้เทคนิคการควบคุมแบบ สมดุลกำลังไฟฟ้า (ข) และ (ง) ระบบใช้เทคนิคสมดุลกำลังไฟฟ้า

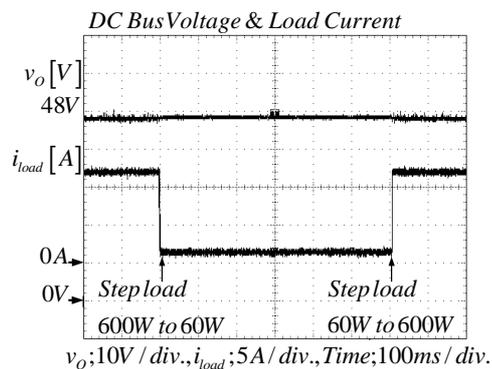
ภาพที่ 4-16 (ก) แสดงแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระในระหว่างสภาวะชั่วคราว สังเกตได้ว่ารูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงอย่างมากและใช้เวลาในการกลับคืนเข้าสู่สภาวะคงตัว นาน นั้นแสดงให้เห็นว่าระบบให้สมรรถนะทางพลวัตแย่มาก ภาพที่ 4-16 (ข) แสดงว่า ในระหว่าง สภาวะชั่วคราว รูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วโดยปราศจากแรงดันที่ ตกลงไป แสดงถึงระบบมีสมรรถนะทางพลวัตที่ดี ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า ผลจากการรบกวนที่ เกิดขึ้นภายในของลูปควบคุมแรงดันสามารถถูกกำจัดออกไปได้อย่างรวดเร็ว ช่วงเวลาคืนตัวของ สภาวะชั่วคราวโดยระบบปราศจากชุดคำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 200 ms แต่เมื่อ ระบบประกอบชุดคำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำเข้าไปที่ลูปควบคุมแรงดันจึงสามารถวัดเวลา คืนตัวได้เท่ากับ 100 μs

ภาพที่ 4-16 (ค) คือ รูปคลื่นของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสการะ มันแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองทางพลวัตแรงดันเอาต์พุตบัสไฟฟ้ากระแสตรงถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการไปเพิ่มค่าของ k_p และ ω_z ระบบให้ผลตอบสนองที่ 30 ms ส่วนรูปคลื่นแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงในภาพที่ 4-16 (ง) ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นอย่างมาก มันกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วโดยที่ไม่ปรากฏแรงดันที่ลดลงไปอีกเลย ระบบให้ผลการตอบสนองที่ 100 μ s ผลตอบสนองที่ได้มีค่ามากกว่า 300 เท่า เมื่อทำการเทียบระหว่างมีและไม่มีการใช้เทคนิคการควบคุมสมดุคกำลังไฟฟ้าในทั้ง 2 กรณีของค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแบบพีไอ ($k_p=0.3$ และ $\omega_z=33$ กับ $k_p=1$ และ $\omega_z=150$) และระบบไม่ปรากฏผลของแรงดันที่ลดลงหรือแรงดันที่เกินที่สูงกว่าค่าแรงดันอ้างอิงอีกเลย ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าระบบที่นำเสนอนี้ไม่มีการใช้งานเทคนิคสมดุคย์กำลังไฟฟ้า ผลของการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับยังคงถูกกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของภาระที่ต่ออยู่ภายในระบบ

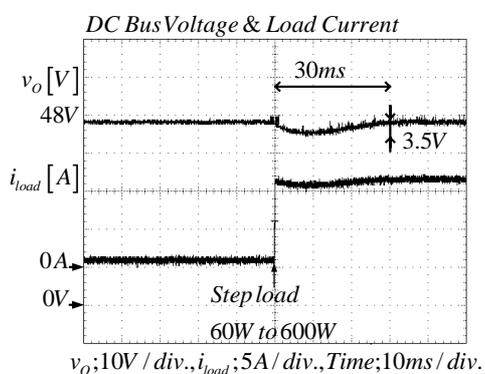
ผลกระทบของเทคนิคการควบคุมสมดุคกำลังไฟฟ้าบนกระแสอินพุต แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสการะเมื่อพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแบบพีไอ มีค่าเท่ากับ $k_p=1$ และ $\omega_z=150$ ถูกทดสอบในกรณีนี้ ภาพที่ 4-17 (ก) (ค) และ (จ) แสดงผลการทดสอบสภาวะชั่วคราวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระโดยที่ระบบควบคุมปราศจากชุดชดเชยกระแสชดลวดเหนี่ยวนำ ภาพที่ 4-17 (ก) แสดงแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสการะที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 10% และกลับไปที่ 100% ภาพที่ 4-17 (ค) แสดงแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสการะ ภาพที่ 4-17 (จ) แสดงแรงดันอินพุตสำหรับเฟส ab และกระแสอินพุตสำหรับเฟส ab bc และ ca ในกรณีนี้ภาระที่ถูกต่ออยู่ที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เปลี่ยนแปลงจาก 10% ไปที่ 100% ภาพที่ 4-17 (ข) (ง) และ (ฉ) แสดงผลการทดสอบในสภาวะชั่วคราวของการเปลี่ยนแปลงภาระพร้อมกับชุดชดเชยกระแสชดลวดเหนี่ยวนำ ภาพที่ 4-17 (ข) แสดงแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสการะที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 10% และกลับไปที่ 100% ภาพที่ 4-17 (ง) แสดงแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสการะ ภาพที่ 4-17 (ฉ) แสดงแรงดันอินพุตสำหรับเฟส ab และกระแสอินพุตสำหรับเฟส ab bc และ ca ในกรณีนี้ ภาระที่ถูกต่ออยู่ที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เปลี่ยนแปลงจาก 10% ไปที่ 100% เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบในภาพที่ 4-17 (ก) (ค) และ (จ) กับผลในภาพที่ 4-17 (ข) (ง) และ (ฉ) เราพบว่า ผลตอบสนองที่ได้จากระบบที่ไม่มีการใช้หลักการสมดุคกำลังไฟฟ้าให้ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวที่ช้ากว่ามาก ดังนั้น เทคนิคการควบคุมสมดุคกำลังไฟฟ้าที่ได้ถูกนำเสนอขึ้นนี้มีประสิทธิผลมากและได้ให้ผลลัพธ์ด้านสมรรถนะของระบบที่ดีกว่ามาก จากการเปรียบเทียบระหว่างภาคของการจำลองและผลทดสอบจริง เราพบว่าผลการจำลองเป็นตัวยืนยันผลจากการทดสอบจริงได้



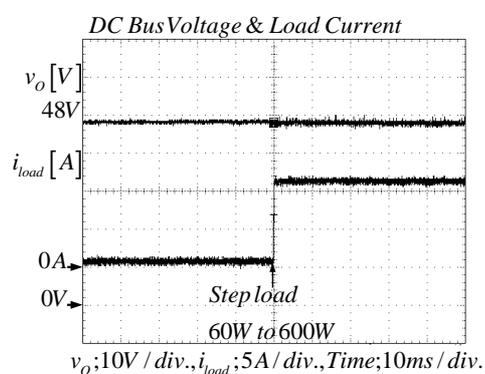
(ก)



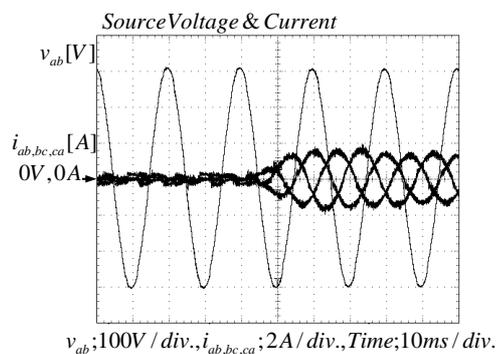
(ข)



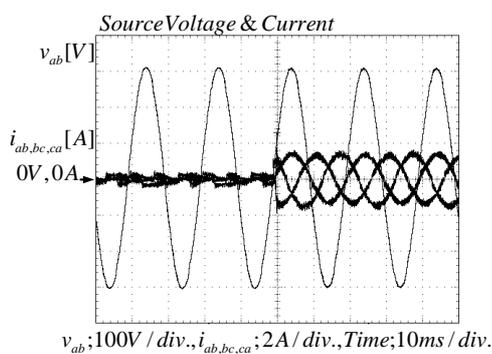
(ค)



(ง)



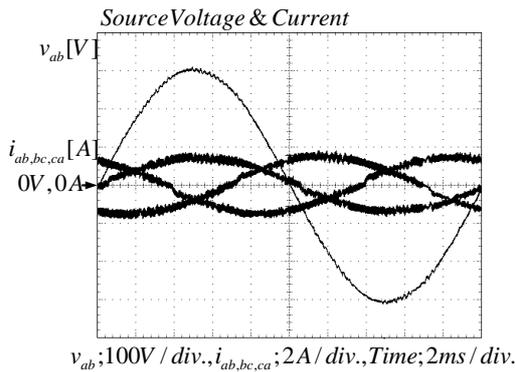
(จ)



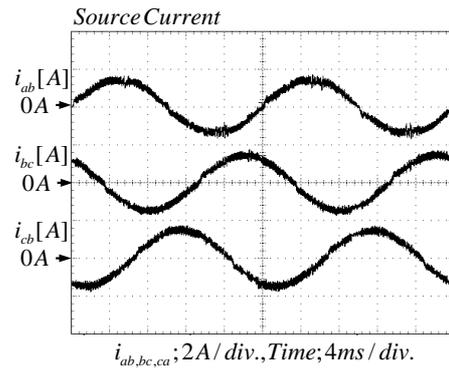
(ฉ)

ภาพที่ 4-17 รูปคลื่นของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระ เมื่อภาระถูกเปลี่ยนจาก 10% ไปที่พิกัดกำลังของภาระ (ก) (ค) และ (ง) ระบบปราศจากการใช้เทคนิคการควบคุมแบบ สมดุลกำลังไฟฟ้า (ข) (ง) และ (ฉ) ระบบใช้เทคนิคสมดุลกำลังไฟฟ้า

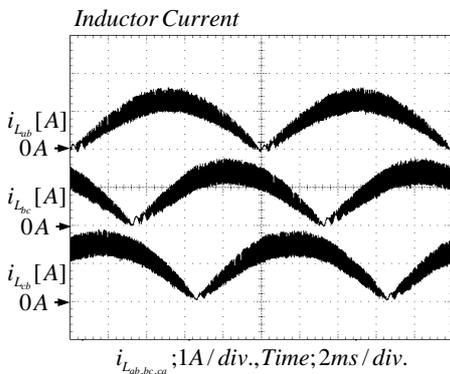
4.3.2.3 ผลตอบสนองในสภาวะคงตัวและชั่วคราวของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบโมดูลที่ใช้หลักการควบคุมแบบสมดุทธ์กำลังไฟฟ้า ผลตอบสนองของระบบที่นำเสนอถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-18 ถึง ภาพที่ 4-19 พารามิเตอร์ของชุดควบคุมแบบพีไอคือ $k_p=1$ และ $\omega_z=150$ ภาพที่ 4-18 (ก) แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุต ปริมาณกระแสอินพุตที่วัดได้นั้นแสดงให้เห็นเฟสที่ตรงกันกับแรงดันของแต่ละเฟส ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าระบบที่ถูกนำเสนอขึ้นให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ภาพที่ 4-18 (ข) แสดงปริมาณของกระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส ขณะที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ 600 W กล่าวได้ว่ากระแสอินพุตที่ได้ใกล้เคียงสัญญาณไซน์และสมดุทธ์ทั้ง 3 เฟส ภาพที่ 4-18 (ค) แสดงรูปคลื่นสภาวะคงตัวของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟส ภาพที่ 4-18 (ง) แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ 48 V และกระแสภาระที่ 12.5 A ขณะที่ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตได้ถูกกำหนดไว้ที่ 13,600 μF



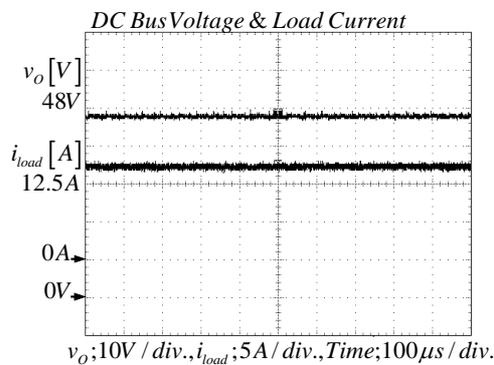
(ก)



(ข)

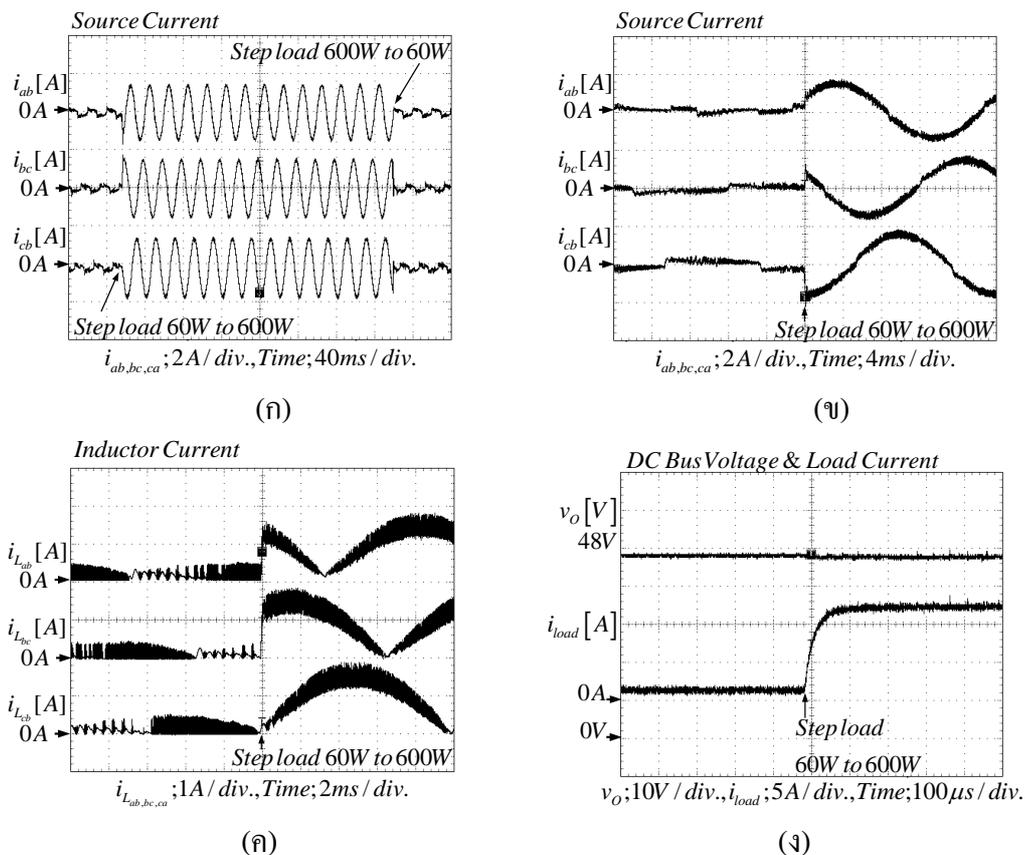


(ค)



(ง)

ภาพที่ 4-18 การทดสอบในสภาวะคงตัว (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสอินพุตของทั้ง 3 เฟส (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ

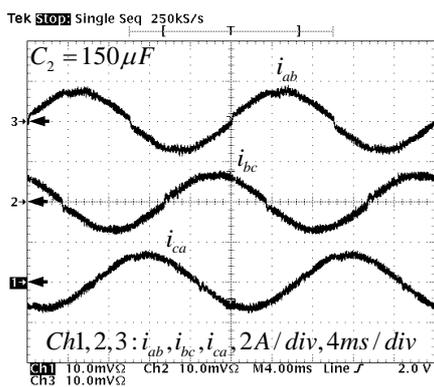


ภาพที่ 4-19 การทดสอบในสภาวะชั่วคราว (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสอินพุตของทั้ง 3 เฟส (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ

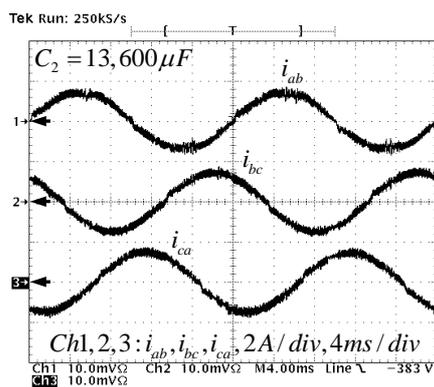
ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของกระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส ขณะเปลี่ยนแปลงการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระจาก 60 W ไปที่ 600 W และกลับมาที่ 60 W อีกครั้ง ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-19 (ก) ส่วนภาพขยายของกระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส ขณะที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระจาก 60 W ไปที่ 600 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-19 (ข) ภาพขยายของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำขณะภาระถูกเปลี่ยนแปลงจาก 60 W ไปที่ 600 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-19 (ค) เพราะเนื่องจากผลของค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานแฝงที่แตกต่างกันของแต่ละโมดูล จึงเป็นเหตุทำให้ปริมาณของกระแสที่วัดได้ต่างกันไปเล็กน้อย ภาพที่ 4-19 (ง) แสดงผลตอบสนองทางพลวัตของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระของระบบที่นำเสนอนี้ที่มีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 60 W ไปที่ 600 W ระบบใช้เวลาในการกลับเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 100 μ s ผลการทดสอบที่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-19 แสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพและให้คุณลักษณะของการตอบสนองทางพลวัตได้อย่างรวดเร็ว

4.3.2.4 การทดสอบเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่เหมาะสม ดังที่ได้เคยสรุปกล่าวไว้ในตอนต้นของบทที่ 4 นี้ว่า ระบบการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ถูกออกแบบและควบคุมอยู่บนหลักการสมดุลย์กำลังไฟฟ้านั้นสามารถที่จะลดขนาดของตัวเก็บประจุที่อยู่ ณ ตำแหน่งของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ ในตอนนี้องบบทที่ 4 จึงได้นำเสนอการทดสอบวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟสที่ถูกต่อแบบเคลด้า โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซิงคิก ที่ใช้ตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยที่ระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งและมีผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่รวดเร็ว ซึ่งโดยในรายละเอียดได้กล่าวถึงแนวคิดของการควบคุมเพื่อที่จะค้นหาค่าที่เล็กที่สุดของตัวเก็บประจุเพื่อที่จะให้พอใจกับเงื่อนไขของผลการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว พฤติกรรมทางพลวัตของแรงดันเอาต์พุตจะถูกพิจารณาและอธิบายด้วยค่าที่แตกต่างกันของขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากค่าต่ำสุดที่ 150 μF ไปจนถึงค่าสูงสุดคือ 13,600 μF ด้วยผลการทดสอบวงจรต้นแบบในระดัห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบกระแสอินพุตแต่ละเฟสในสภาวะคงตัวของระบบที่นำเสนอพร้อมกันกับค่าที่แตกต่างกัน 2 ค่าของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-20 ภาพที่ 4-20 (ก) แสดงกระแสอินพุตขณะที่ $C_{2\text{min}} = 150 \mu\text{F}$ ภาพที่ 4-20 (ข) ขณะที่ $C_{2\text{max}} = 13,600 \mu\text{F}$ กระแสที่วัดมีสัญญาณเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต ดังนั้นจึงส่งผลให้ระบบที่ถูกทดสอบนี้ให้ค่าตัวประกอบกำลังที่ใกล้เคียงหนึ่ง แสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอให้ค่าตัวประกอบกำลังที่สูง

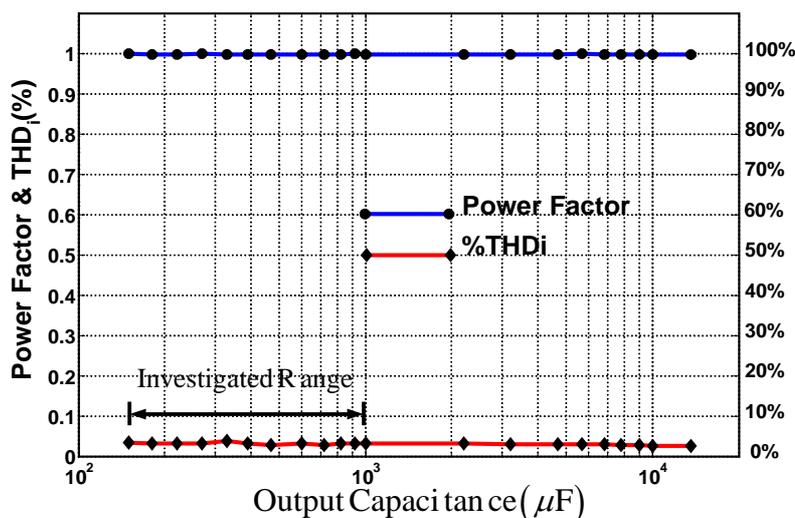


(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-20 ผลการทดสอบสภาวะคงตัวของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (ก) กระแสอินพุตที่ค่าตัวเก็บประจุเอาต์พุต $C_{2\text{min}} = 150 \mu\text{F}$ (ข) กระแสอินพุตที่ค่าของตัวเก็บประจุ $C_{2\text{max}} = 13,600 \mu\text{F}$



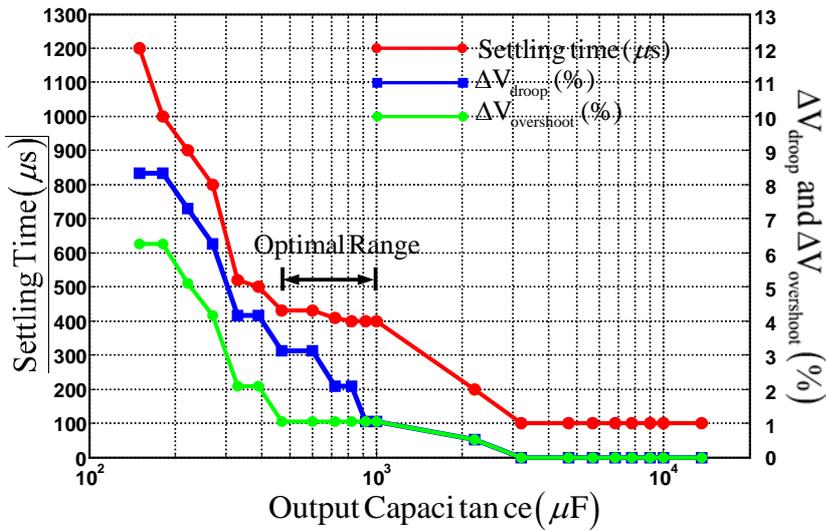
ภาพที่ 4-21 สมรรถนะของระบบที่เป็นฟังก์ชันตามขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ตัวประกอบกำลัง ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมกระแสอินพุตที่แรงดันอินพุต 220 V แรงดันเอาต์พุต 48 V และ พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 600 W)

คุณลักษณะด้านสมรรถนะหลักของระบบที่ถูกนำเสนออยู่ในรูปแบบของค่าตัวประกอบกำลังอินพุตและความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสอินพุตถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-21 ซึ่งปริมาณดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของขนาดตัวเก็บประจุที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าความแตกต่างกันถึง 21 ค่า ระบบถูกทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 600W แรงดันอินพุต 220 V และแรงดันเอาต์พุต 48 V ปริมาณทั้งหมดถูกวัดด้วย Digital Power Meter YOKOGAWA โมเดล 2531A ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตัวประกอบกำลังที่พิกัดภาระใกล้เคียง 1 สามารถวัดได้ค่ามากกว่า 0.99 สำหรับทุกๆ ค่าที่แตกต่างกันไปของตัวเก็บประจุเอาต์พุต

2. ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมกระแสอินพุตอยู่ในระดับต่ำ สามารถวัดได้มีค่าไม่เกิน 4% ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 600 W ที่ขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตถูกปรับเปลี่ยนค่าไป 21 ค่า

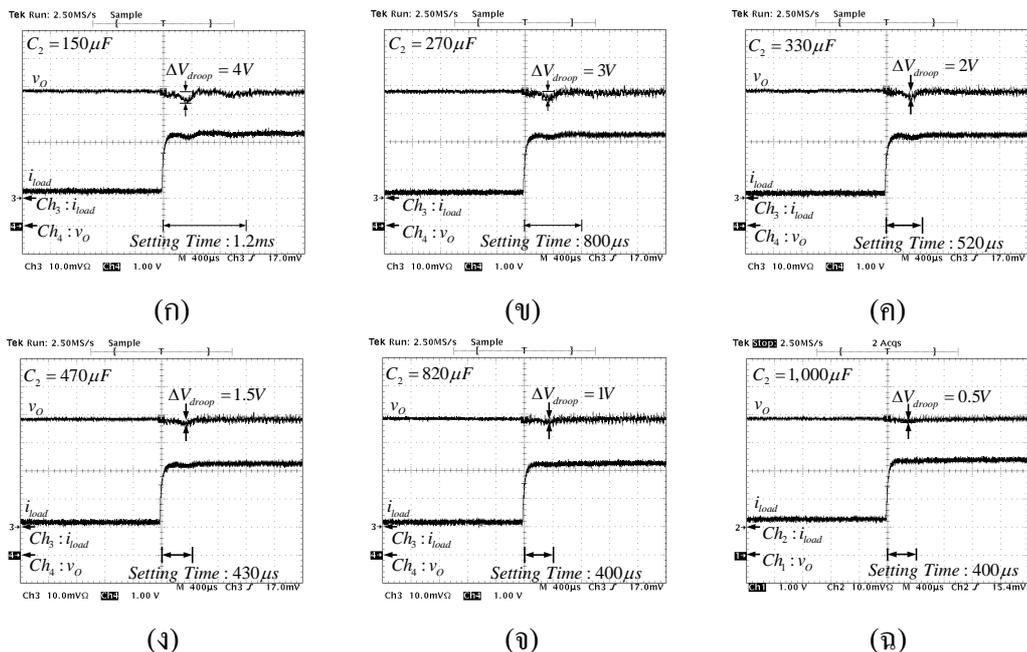
การทำงานภายใต้สภาวะชั่วคราวของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเก็บประจุบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สิ่งที่ใช้ในการพิจารณาและตัดสินใจเลือกขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตนั้นขึ้นอยู่กับเทอมของ ΔV_{droop} , $\Delta V_{overshoot}$ และช่วงเวลาของการคืนตัวถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-22



ภาพที่ 4-22 สมรรถนะที่เป็นฟังก์ชันตามขนาดของตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงภายใต้สภาวะเงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 600 W ไปที่ 60 W และกลับไปไปที่ 600 W (แรงดันอินพุต 220 V แรงดันเอาต์พุต 48 V)

ค่าของแรงดัน V_{droop} และ $V_{overshoot}$ โดยทั่วไปแล้วมีรูปแบบที่ไม่สมมาตร เป็นไปตามที่ได้คาดการณ์ไว้ว่า ค่าของเวลาการคืนตัวของระบบลดลงเมื่อค่าของตัวเก็บประจุถูกทำให้เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4-22 ระบบที่ถูกนำเสนอนี้สามารถจำแนกแยกเส้นกราฟออกเป็น 4 ช่วงได้ดังนี้คือ

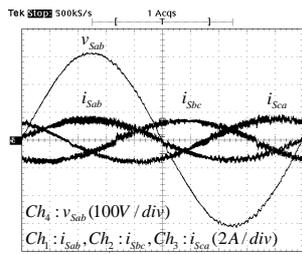
1. ช่วงของตัวเก็บประจุเอาต์พุต $C_2 \geq 3,000 \mu F$ ในช่วงนี้ค่าของเวลาการคืนตัวลดลงมาอยู่ที่ $100 \mu s$ ซึ่งกรณีนี้ค่าแรงดัน ΔV_{droop} และ $\Delta V_{overshoot}$ มีค่าลดลงไปสู่ค่า 0 V
2. ช่วงของตัวเก็บประจุเอาต์พุต $C_2 < 1,000 \mu F$ ค่าแรงดัน ΔV_{droop} มีค่ามากกว่า $\Delta V_{overshoot}$ ในช่วงนี้
3. ช่วงของตัวเก็บประจุเอาต์พุต $C_2 < 470 \mu F$ ระบบที่นำเสนอให้ผลรวมของค่าแรงดัน ΔV_{droop} และแรงดัน $\Delta V_{overshoot}$ มีค่าเกิน 5% และค่า Δ_t ของเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ได้มีค่าสูงมากเกินไป
4. ช่วงของตัวเก็บประจุเอาต์พุต $3,000 \mu F \leq C_2 \leq 13,600 \mu F$ ค่าของแรงดัน ΔV_{droop} และแรงดัน $\Delta V_{overshoot}$ ใกล้เคียงศูนย์และเวลา ค่า Δ_t ของเวลาคืนตัวมีค่าใกล้เคียงศูนย์เช่นกัน



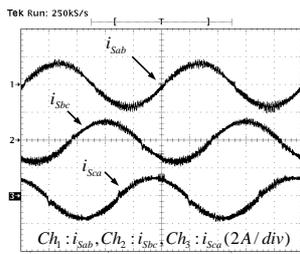
ภาพที่ 4-23 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ ขณะทีภาระเปลี่ยนแปลงจาก 10% (60 W) ไปที่ 100% (600 W) (v_o : 10V / div, i_{load} : 5A / div , Time:400 μ s/div) เมื่อใช้ค่าตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันเอาต์พุตที่ (ก) 150 μ F (ข) 270 μ F (ค) 330 μ F (ง) 470 μ F (จ) 820 μ F (ฉ) 1,000 μ F

โดยทั่วไป ข้อกำหนดของค่าแรงดันตกและแรงดันเกินในช่วงของการทดสอบระบบภายใต้เงื่อนไขสภาวะชั่วคราวนั้นมีความใกล้เคียงกันมากและโดยทั่วไปถูกกำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน $\pm 5\%$ [35] โดยได้เปรียบเทียบกับค่าแรงดันเอาต์พุตปกติ การที่จะให้ได้มาซึ่งผลการตอบสนองต่อสภาวะชั่วคราวภายใต้การเปลี่ยนแปลงของภาระให้เป็นไปตามข้อกำหนดนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงวิธีการเลือกตัวเก็บประจุของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอันดับแรก การเลือกนี้ต้องประเมินประนอมระหว่างค่าความจุเอาต์พุตและการควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อเป็นการจำกัดผลตอบสนองทางพลวัตของระบบที่ถูกนำเสนอ ผลการทดสอบของระบบที่นำเสนอนี้กำหนดให้ระบบทำงานอยู่ทีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 60 W ไปที่ 600 W ภายใต้การเปลี่ยนค่าของตัวเก็บประจุเอาต์พุตจำนวน 6 ค่าที่มีความแตกต่างกัน (150 μ F 270 μ F 330 μ F 470 μ F 820 μ F และ 1,000 μ F) ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-23 (ก) ถึง (ฉ) ตามลำดับ การเปรียบเทียบระหว่างผลการตอบสนองที่ได้รับแสดงให้เห็นว่าเกิดการลดลงของค่าแรงดันเพียงเล็กน้อยและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้อยมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการประยุกต์ใช้หลักการเทคนิคการควบคุมแบบสมดุลย์กำลังไฟฟ้กับระบบที่นำเสนอ ในทางปฏิบัติ ถ้าเราได้กำหนดให้ช่วงที่มีความเหมาะสมของตัวเก็บประจุบัสไฟฟ้ากระแสตรงเป็น C_{2optR}

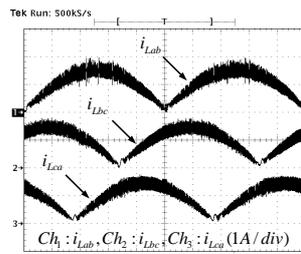
ซึ่งสามารถนิยามได้ว่าเป็นช่วงของค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้ระบบกลับคืนตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วที่สุดภายใต้สภาวะชั่วคราว นั่นก็หมายความว่าถ้าสมการ $\% \Delta v_o \leq \% \Delta v_{tran_spec} (5\%)$ นี้เป็นจริงระบบที่ได้ถือว่ามี การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้ดีและระบบต้องมีเวลาในการคืนตัวเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว ช่วงของค่าตัวเก็บประจุบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมที่สุดคือ $470 \mu F \leq C_2 \leq 1,000 \mu F$ ผลรวมของ $(\%) \Delta V_{droop}$ และ $(\%) \Delta V_{overshoot}$ ถูกกำหนดให้มีค่าน้อยกว่า 5% และค่า Δt ของเวลาการคืนตัวของระบบต้องเล็กมากแต่ต้องไม่เข้าใกล้ค่าศูนย์ในระบบที่ถูกนำเสนอนี้ค่า Δt อยู่ที่ประมาณ 30 μs จากมุมมองตรงจุดนี้ จึงสามารถกล่าวสรุปได้ว่า เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส นี้สามารถให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ดีเมื่อได้เลือกค่าของตัวเก็บประจุค่าใดค่าหนึ่งที่อยู่ในช่วงของตัวเก็บประจุเอาต์พุตที่เหมาะสมนี้มาใช้งาน



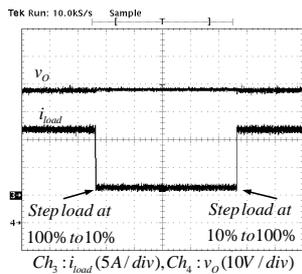
(ก)



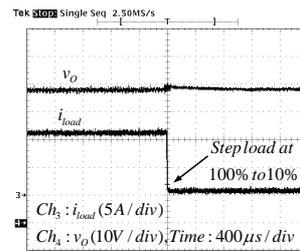
(ข)



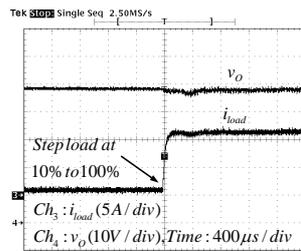
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

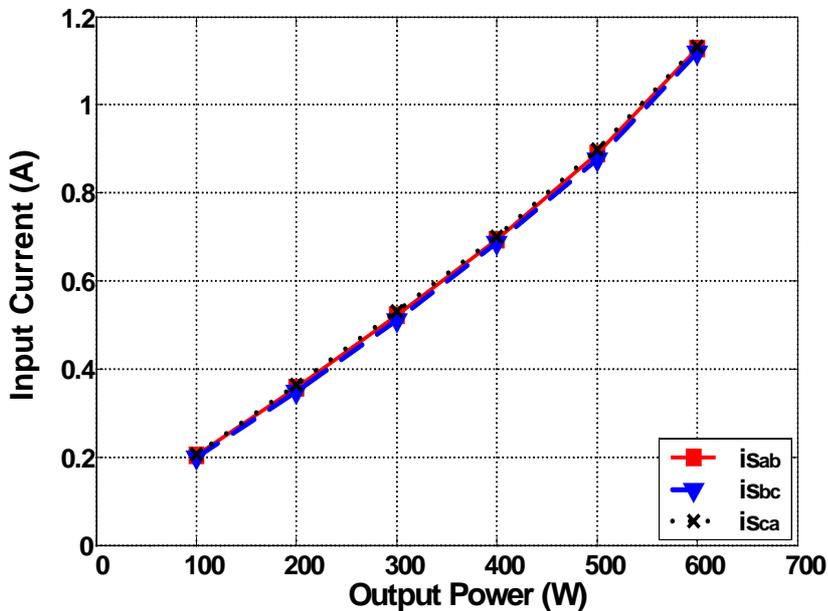
ภาพที่ 4-24 ผลการทดสอบของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส ด้วยค่าตัวเก็บประจุเอาต์พุต 470 μF (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสอินพุต (ค) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำ (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (จ) ภาระถูกเปลี่ยนจาก 600 W ไปที่ 60 W (ฉ) ภาระถูกเปลี่ยนจาก 60 W ไปที่ 600 W

ตารางที่ 4-8 การเปรียบเทียบของตัวชี้วัดสมรรถนะในสภาวะชั่วคราว

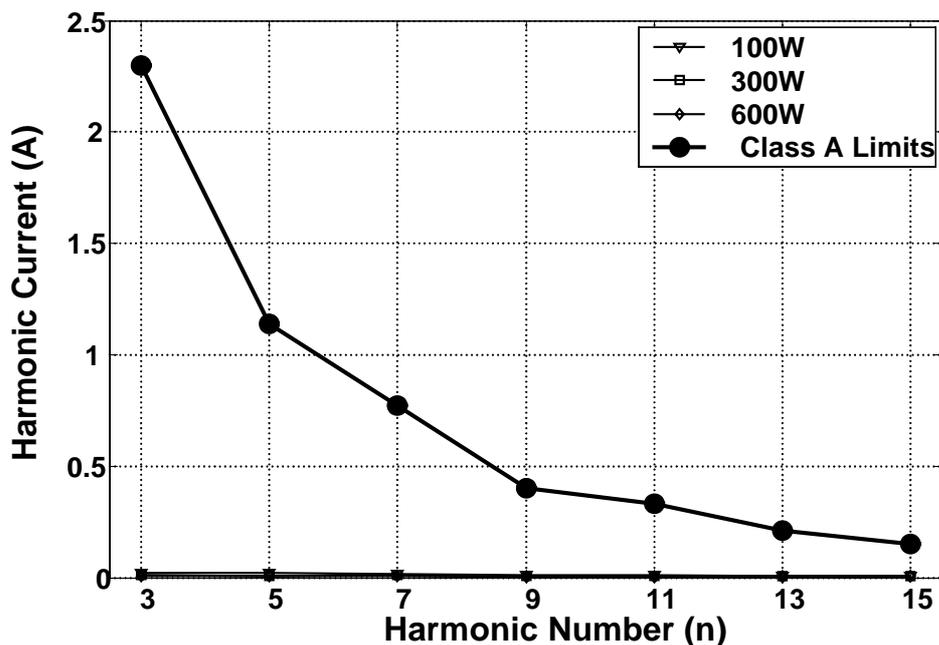
C_2 (μF)	เวลาดำเนินตัว (μs)	% แรงดันตก	% แรงดันเกิน	กระแสภาระสูงสุด (A)
150 μF	1,200	8.33	6.25	12.5
270 μF	800	6.25	4.16	12.5
330 μF	520	4.61	2.08	12.5
470 μF	430	3.12	1.04	12.5
820 μF	400	2.08	1.04	12.5
1,000 μF	400	1.04	1.04	12.5

ตารางที่ 4-8 แสดงค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะในสภาวะชั่วคราวที่ได้มาจากผลของการทดสอบระบบภายใต้ช่วงของตัวเก็บประจุบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้กำหนดไว้ สังเกตได้ว่า เวลาการคืนตัว ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันตกและแรงดันเกินมีค่าลดลงในขณะที่ค่าของตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น แม้ว่า ค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมจะถูกเลือกไปแล้ว การประเมินประนอมระหว่างสมรรถนะของการควบคุมและตัวเก็บประจุเอาต์พุตควรที่จะได้รับการพิจารณาเสมอ ดังนั้นที่ค่า $C_2 = 470 \mu\text{F}$ จึงถูกเลือกนำมาใช้ในการทดสอบระบบเพื่อที่จะศึกษาถึงเงื่อนไขการตอบสนองในสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วคราวของระบบที่นำเสนอที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุเอาต์พุตบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ค่าเล็กที่สุดถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-24 (ก) ถึง (จ) ตามลำดับ ภาพที่ 4-24 (ก) แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุต 3 เฟส ของระบบที่ถูกนำเสนอ กระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส นั้นมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุตของแต่ละเฟสเช่นกันและมีรูปคลื่นสัญญาณที่ใกล้เคียงไซน์ ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังอินพุตเข้าใกล้หนึ่ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่ได้รับนั้นให้ค่าตัวประกอบกำลังที่สูง ภาพที่ 4-24 (ข) และ (ค) แสดงกระแสอินพุตทั้ง 3 เฟสและกระแสโหลดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลในสภาวะคงตัว ภาพที่ 4-24 (ง) แสดงผลตอบสนองทางพลวัตของแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระของระบบที่ถูกนำเสนออันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงภาระจากพิกัดกำลังไฟฟ้า 100 % ไปที่ 10 % และกลับมาที่ 100% อีกครั้ง ภาพที่ 4-24 (จ) และ (ฉ) แสดงภาพขยายของสภาวะผลตอบสนองทางพลวัตอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100 % ไปที่ 10% และ จากที่ 10% กลับไปที่ 100% อีกครั้งหนึ่ง ตามลำดับ แรงดันตกและแรงดันเกินที่วัดได้มีลักษณะที่ไม่สมมาตร โดยค่าที่วัดได้ของเปอร์เซ็นต์แรงดันตกและแรงดันเกินคือ 3.12% และ 1.04% ตามลำดับ ช่วงเวลาการกลับคืนตัวเท่ากับ 430 μs ซึ่งจากผลการทดสอบในสภาวะเงื่อนไขนี้แสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิผลและให้การตอบสนองทางพลวัตที่ดีมากถึงแม้ว่าจะมีการลดขนาดของตัวเก็บประจุลงมาแล้วก็ตาม

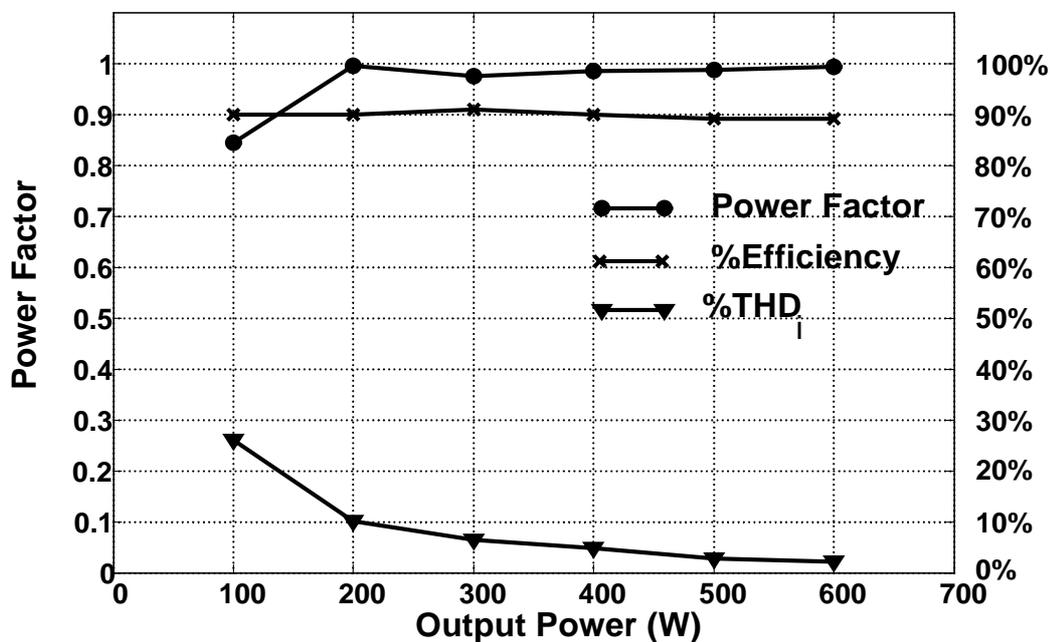
4.3.2.5 การทดสอบสมรรถนะของระบบ ในตอนนี้อยู่ของบทที่ 4 ผลของการทดสอบระบบที่ได้นำเสนอได้นั้นได้ถูกแสดงอยู่ในเทอมของ กระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพ ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมของกระแสอินพุตและปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC 1000-3-2 class A limits ผลของการแบ่งกระแสด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4-25 รายละเอียดของภาพแสดงถึงผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานภายในที่มีต่อพฤติกรรมกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของระบบ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วปริมาณของค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานภายในมีความยากที่จะควบคุมให้มีค่าเท่ากัน กระแสอินพุตนี้ถูกทดสอบด้วยการปรับเปลี่ยนค่าของภาระจากค่าน้อยไปหาค่ามากที่สุด ภาพที่ 4-26 แสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ของระบบที่นำเสนอเปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงของภาระ รายละเอียดของภาพแสดงปริมาณของกระแสฮาร์โมนิกส์อินพุตที่ถูกวัดของระบบ 3 เฟส ที่ทำงานอยู่ภายใต้สภาวะการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ค่าต่างๆ แสดงให้เห็นว่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้อยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน IEC 61000-3-2 class A limits มีเพียงฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เท่านั้นที่มีขนาดของกระแสที่มากอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับอันดับอื่นๆ ดังนั้นจากมุมมองตรงนี้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบเรียงกระแส 3 เฟส อาจสามารถเพิ่มและขยายพิกัดกำลังไฟฟ้าให้สามารถจ่ายกำลังได้มากกว่า 600 W



ภาพที่ 4-25 กระแสอินพุตที่ถูกวัดเมื่อภาระถูกเปลี่ยนแปลงจาก 100 W ไปที่ 600 W ของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 3 สาย (ระบบถูกวัดด้วย Digital Power Meter Model 2531 A)



ภาพที่ 4-26 ฮาร์มอนิกกระแสอินพุตที่ถูกวัดจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจากค่าต่ำสุดไปทีค่าสูงสุดของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 3 สาย



ภาพที่ 4-27 ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพและความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของกระแสอินพุตที่ถูกวัดภายใต้การทดสอบการเปลี่ยนแปลงภาระจากค่าต่ำสุดไปทีค่าสูงสุดของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 3 สาย

ภาพที่ 4-27 แสดงถึงสมรรถนะหลักของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส 3 สาย ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงของภาระทางด้านเอาต์พุต เส้นโค้งบนสุดในภาพที่ 4-27 ได้แสดงถึงค่าตัวประกอบกำลังที่วัดได้ในภาวะการเปลี่ยนแปลงของภาระที่สภาวะการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัดค่าตัวประกอบกำลังที่วัดได้มีค่ามากกว่า 0.99 เส้นโค้งกลางได้แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบ มันมีค่าอยู่ประมาณที่ 90% เส้นโค้งล่างสุดแสดงถึงความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของกระแสอินพุตที่ถูกวัดในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของภาระ รายละเอียดแสดงให้เห็นถึง ค่า *THD* ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 3 % ที่แรงดันอินพุต 220 V

4.3.3 สรุปลงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซิงค์ทริก บนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า ในตอนที่ 4.3 นี้ได้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้งานของโมดูลเรียงกระแสแบบซิงค์ทริก ที่แยกโคจรทางไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ในจำนวนทั้งหมด 3 โมดูล ซึ่งทั้งหมดถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ใน 2 รูปแบบดังนี้คือ โครงสร้างในรูปแบบของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย (สตาร์) และระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย (เดลต้า) ทั้งสองระบบถูกวิเคราะห์และออกแบบบนหลักการพื้นฐานเทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้า กระบวนการของการวิเคราะห์ที่นำเสนอ นั้นง่ายและมีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้มาซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งรวมไปถึงความสามารถในการออกแบบรูปควบคุมแรงดันและรูปคำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำ ระบบที่ถูกรับเสนอ นี้มีข้อดีดังนี้คือ

4.3.3.1 ให้ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมกระแสอินพุตต่ำ

4.3.3.2 สามารถควบคุมการแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำได้ดี

4.3.3.3 ผลตอบสนองของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะชั่วคราวสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ภายใน 100 μ s เมื่อภาระถูกเปลี่ยนแปลงจาก 10 % ไปที่ 100% (ค่า $C_2 = 13,600 \mu$ F)

4.3.3.4 ผลตอบสนองของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะชั่วคราวสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ภายใน 430 μ s เมื่อภาระถูกเปลี่ยนแปลงจาก 10 % ไปที่ 100% (ค่า $C_2 = 470 \mu$ F)

4.3.3.5 ระบบสามารถสร้างได้จริงด้วยวงจรแอนะล็อก

โมเดลต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการได้ถูกสร้างและทดสอบ ผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลของการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Simulink และเป็นการยืนยันว่าระบบที่ถูกรับเสนอมีความเป็นไปได้และถูกต้อง ผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะโดยรวมคือ ตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99 ค่า *THD* ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 3 % และค่าประสิทธิภาพที่ได้มากกว่า 90% ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบที่ถูกรับเสนอนี้ อยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 class A limits

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงการจำลองและทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่มีรูปแบบของการต่อโครงสร้างระบบดังนี้

1. วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซึกแยกโคจรทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล บนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า
2. วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซึกแยกโคจรทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล บนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า
3. วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส 3 สาย (แบบเดลต้า) ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซึกแยกโคจรทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล บนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า

ระบบที่ได้นำเสนอทั้งหมดในบทที่ 4 นี้ ได้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ในข้างต้นทุกประการ คือ

1. ระบบสามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังให้ได้ค่ามากกว่า 0.99
2. ระบบสามารถควบคุมการแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสได้ ซึ่งส่งผลถึงกระแสอินพุตที่ได้มีรูปคลื่นของสัญญาณเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุตของแต่ละเฟส ยิ่งไปกว่านั้น ระบบที่นำเสนอยังคงทำงานอยู่ภายใต้สภาวะสมมูลกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส
3. ระบบสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตให้มีผลการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระ
4. ระบบที่นำเสนอสามารถลดขนาดตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตได้
5. ระบบทำงานอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 class A limits

จากผลของการจำลองและทดสอบระบบที่ปรากฏอยู่ในบทที่ 4 นี้ ทำให้ได้แนวคิดของการทำงานวิจัยเพิ่มเติมต่อไปว่า วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซึกและซึก จำนวน 3 โมดูลนี้ น่าจะสามารถเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าและความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่จะถูกต่อเพิ่มเติมเข้ามาในระบบได้ทั้งในปัจจุบันและในอนาคต ซึ่งแนวคิดนี้จะอาศัยการใช้โครงสร้างแบบขนานมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างแบบ 3 เฟส ดังกล่าว

ดังนั้น ในบทที่ 5 จะได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานโมดูลเรียงกระแสแบบซึกที่แยกโคจรทางไฟฟ้าชนิด 1 เฟส จำนวนทั้งสิ้น 6 โมดูล ซึ่งได้ถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างแบบขนานของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยระบบจะถูก

วิเคราะห์และออกแบบบนหลักการสมมูลย์กำลังไฟฟ้า เพื่อให้จะได้มาซึ่งวัตถุประสงค์ที่ได้คาดการณ์ไว้ในข้างต้น ตารางที่ 4-9 แสดงถึงกระบวนการเปรียบเทียบระบบเครื่องแปลงผันชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ จำลองและทดสอบที่ปรากฏอยู่ในบทที่ 3 และ 4 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้ถูกใช้เพื่อเป็นการตัดสินใจในการทำงานวิจัยต่อไปในบทที่ 5

ตารางที่ 4-9 สรุปผลการเปรียบเทียบระบบเครื่องแปลงผันชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส

รายละเอียด	การขนาน 1 เฟส	3 เฟส ต่อแบบ Y	3 เฟส ต่อแบบ D
ระบบประธาน	1P/2W หรือ 3P/4W 220V หรือ 220/380V	3P/4W ระบบประธาน เป็นแบบทั่วไป 220/380V	3P/3W ระบบประธาน ใช้หม้อแปลงแบบเคลด้า แรงดันเฟส 220V
ตัวประกอบกำลัง	ใกล้เคียงหนึ่ง	ใกล้เคียงหนึ่ง	ใกล้เคียงหนึ่ง
ค่า THD _i	ต่ำกว่า 5 % ที่พิกัด	ต่ำกว่า 5 % ที่พิกัด	ต่ำกว่า 5 % ที่พิกัด
แรงดันปลิวเอาต์พุต			
- ความถี่	- 100 Hz	- ความถี่สวิตซ์	- ความถี่สวิตซ์
- ขนาด	- 4 % (750 W)	- ต่ำกว่า 1% (750W)	- ต่ำกว่า 1 % (750W)
สถานะสมมูลย์เฟส ในระบบประธาน	มีโอกาศในการเกิด สถานะเฟสไม่สมมูลย์	เฟสสมมูลย์	เฟสสมมูลย์
ตัวเก็บประจุ (C_p)	ไม่สามารถลดขนาด ของตัวเก็บประจุได้	สามารถลดขนาดของ ตัวเก็บประจุได้	สามารถลดขนาดของตัว เก็บประจุได้
ผลจากมูมเฟสและ แรงดันอินพุต	ไม่มี	มี	มี
ระบบการเผื่อ	$n_M=N+1$	$n_M=3N+x$	$n_M=3N+x$
สถานะการแปลง	ใช้ 2 ตอน	ใช้ 1 ตอน	ใช้ 1 ตอน

หมายเหตุ บทสรุปที่ได้อยู่บนพื้นฐานการใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกที่ถูกออกแบบให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 250 W ต่อโมดูล โดยนำมาประกอบกันเป็น 3 โครงสร้างหลักดังนี้คือ ระบบการขนานเครื่องแปลงผันชนิด 1 เฟส เครื่องแปลงผันชนิด 3 เฟส ที่ระบบถูกต่อเป็นแบบวาย และเครื่องแปลงผันชนิด 3 เฟสที่ระบบถูกต่อแบบเคลด้า ระบบถูกทดสอบที่แรงดันเอาต์พุต -48 V พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมด้านเอาต์พุต 750 W

บทที่ 5

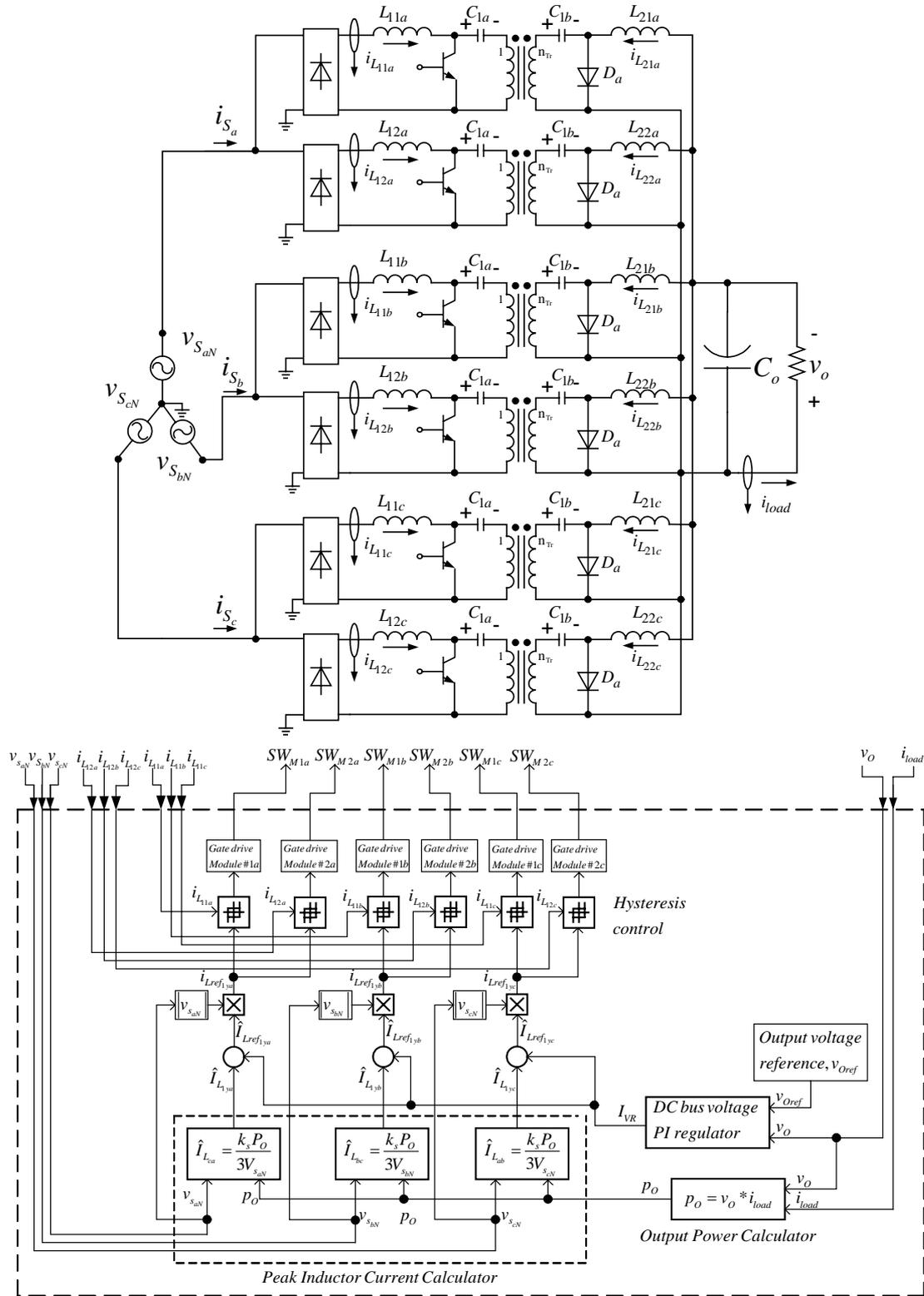
การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก ด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

ปัญหาที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกส์สามารถแก้ไขให้หมดไปได้โดยการใช้เทคนิคการแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟซึ่งเทคนิคดังกล่าวถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในระบบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในโครงข่ายคอมพิวเตอร์ ระบบการควบคุมอัตโนมัติและระบบการสื่อสาร วงจรแปลงผันแบบบวสต์ บัค บัค-บวสต์ ซีพิกและซุก เมื่อต่อร่วมกับวงจรเรียงกระแสไดโอดแบบบริดจ์สามารถประกอบขึ้นเป็นวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบแอกทีฟได้ แต่วงจรแบบบวสต์ ซีพิกและซุก ให้คุณลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแสซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ให้ค่าตัวประกอบกำลังสูง

ในปัจจุบัน โครงสร้างของการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบวสต์ ซีพิกและซุก ที่ถูกประกอบขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดสถาปัตยกรรมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงยังคงได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส กลับได้รับความนิยมอย่างสูง โดยระบบต้องมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้ คือ ต้องมีการแยกโคจรทางไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังต้องใกล้เคียงหนึ่ง มีการจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์ ระบบมีประสิทธิภาพและความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง

การวิเคราะห์และออกแบบการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าได้ถูกนำเสนอในบทที่ 5 นี้ ระบบที่นำเสนอถูกประกอบขึ้นจากภาคอินพุตที่ต่อแบบระบบ 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ของโมดูลเรียงกระแสแบบซุก จำนวนทั้งหมด 6 โมดูล พร้อมกับภาคเอาต์พุตที่ถูกต่อขนานเข้ากับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วัตถุประสงค์หลักของการควบคุมที่ได้นำเสนอนี้ประกอบด้วย ต้องสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ สามารถแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสได้และสามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังให้ใกล้เคียงหนึ่งได้ นอกจากนี้ระบบที่นำเสนอนี้ยังมีความง่ายต่อการออกแบบอีกด้วย

5.1 โครงสร้างระบบ



ภาพที่ 5-1 โครงสร้างภาควงจรกำลังและบล็อกโอดีแแกรมของระบบควบคุมของระบบควบคุมของกรณานระบบ
เรียงกระแส 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

โครงสร้างวงจรกำลัง การขนานเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-1 วงจรกำลังของระบบแก้ไขตัวประกอบกำลังประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์ชนิด 1 เฟส และวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบซุกชนิดแยกโคคทางไฟฟ้าถูกต่อรวมแบบอันดับขึ้นเป็นโมดูลเรียงกระแส ระบบถูกประกอบขึ้นจากการเชื่อมต่อกันในลักษณะโครงสร้างแบบระบบ 3 เฟส 4 สาย (แบบสตาร์) ของโมดูลเรียงกระแสแบบซุกดังกล่าวจำนวน 6 โมดูล พร้อมกับการต่อแบบขนานกันทางด้านเอาต์พุตของแต่ละโมดูลที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุด้านเอาต์พุต C_o ถูกต่อใช้งานร่วมกันที่ตำแหน่งบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

เทคนิคการควบคุมแบบสมมูลกำลังไฟฟ้าถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-1 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมประกอบด้วย สัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการวัดสัญญาณแรงดันอินพุตทั้ง 3 เฟส (แรงดันเฟส) ถูกควบคุมแรงดันเอาต์พุต 1 ลูป โดยใช้ชุดควบคุมชนิดพีไออย่างง่าย (PI controller) และชุดคำนวณค่าสูงสุดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟส ระบบควบคุมมีขั้นตอนของการทำงานทั้งหมดดังนี้ ชุดคำนวณกระแสทำหน้าที่คำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำตามความต้องการที่ได้ถูกกำหนดไว้ แรงดันเอาต์พุตถูกวัดเข้ามาเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ผลต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตถูกส่งต่อไปยังวงจรแก้ไขสัญญาณแบบพีไอ (เมื่อค่าผิดพลาดแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นศูนย์จะได้สัญญาณด้านเอาต์พุตของชุดควบคุมแบบพีไอเป็นศูนย์เช่นกัน) ผลรวมของสัญญาณที่ได้จากชุดคำนวณกระแสและชุดควบคุมแรงดันถูกคูณกับสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากแรงดันอินพุตของแต่ละเฟส (สัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณเต็มคลื่นมีค่าขดเป็น 1 V เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 220 V ในแต่ละเฟส) จากนั้นสัญญาณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิงถูกนำไปเปรียบเทียบกับกระแสขดลวดเหนี่ยวนำจริงที่ถูกวัดออกมาจากแต่ละโมดูลของแต่ละเฟส ผลค่าความผิดพลาดของกระแสที่ได้ถูกส่งต่อไปยังชุดควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิสและถูกส่งออกไปเป็นสัญญาณขับนำสวิตช์กำลังในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสต่อไป

ไดอะแกรมของระบบการควบคุมมีรูปแบบที่เข้าใจได้ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งง่ายต่อการสร้างวงจรควบคุมจริงด้วยอุปกรณ์แอนะล็อก โดยส่งผลดีต่อการลดต้นทุนในการผลิต ข้อเด่นของระบบที่นำเสนอนี้คือ ตัวประกอบกำลังสูง ระบบมีโครงสร้างเป็นโมดูลที่ถูกแยกเป็นสัดส่วน มีแบบแผนการควบคุมและออกแบบง่าย กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ในตัวเก็บประจุเอาต์พุตถูกทำให้หมดไป เป็นผลให้ความร้อนในตัวเก็บประจุเอาต์พุตลดลงและเพิ่มอายุการใช้งานตัวเก็บประจุอีกทั้งยังสามารถลดขนาดของตัวเก็บประจุลงได้ ขนาดแรงดันกระแสเพื่อเอาต์พุตมีค่าต่ำและแรงดันเอาต์พุตถูกควบคุมให้ระบบมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างรวดเร็ว

5.2 การวิเคราะห์และออกแบบระบบ

โมเดลสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่ได้ถูกนำเสนอขึ้นตั้งอยู่บนพื้นฐานของหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า โดยที่ระบบที่นำเสนอต้องพิจารณาถึง 2 ปัจจัยหลักดังนี้คือ

1. วงจรควบคุมต้องบังคับสัญญาณกระแสอินพุตให้เป็นไปตามสัญญาณแรงดันอินพุต
2. การวิเคราะห์วงจรตั้งอยู่บนพื้นฐานการทำงานในแต่ละวงรอบต่อวงรอบการทำงาน

โดยกำหนดให้ระบบไม่มีความสูญเสีย ดังนั้น สมการดุลกำลังไฟฟ้าของระบบที่ได้ถูกนำเสนอสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum_{z=a}^c \sum_{y=1}^N V_{gz} I_{L_{yz}} = V_o I_o \quad (5-1)$$

เมื่อ

y คือ ตัวบ่งชี้ลำดับของโมดูลในแต่ละเฟส

z คือ ตัวบ่งชี้ลำดับของเฟสในระบบ (a , b และ c)

N คือ จำนวนโมดูลทั้งหมดในแต่ละเฟส ($1 \dots N$)

V_{gz} คือ ค่าประสิทธิภาพของแรงดันเรียงกระแส

$I_{L_{yz}}$ คือ ค่าประสิทธิภาพของกระแสชดวอดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลในแต่ละเฟส

V_o คือ แรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรง

I_o คือ กระแสเอาต์พุตที่ถูกเฉลี่ยบนครึ่งคาบเวลาของความถี่กระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ

จากแนวคิดของการดุลกำลังไฟฟ้างกล่าวสามารถเขียนสมการกำลังไฟฟ้าทั้งหมดของระบบที่ถูกนำเสนอเพื่อหารค่าเทอมของกระแสชดวอดเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$\sum_{z=a}^c \sum_{y=1}^N V_{gz} \hat{I}_{L_{yz}} = k_s V_o I_{load} \quad (5-2)$$

เมื่อ

k_s คือ ค่าเกณฑ์การแปลงผัน

กำหนดให้ $\hat{I}_{L_{11a}} = \hat{I}_{L_{12a}} = \hat{I}_{L_{11b}} = \hat{I}_{L_{12b}} = \hat{I}_{L_{11c}} = \hat{I}_{L_{12c}}$ เพื่อเป็นการลดผลกระทบที่เกิดมาจาก

สาเหตุกระแสภาระและแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ จึงได้นำเสนอชุดป้อนสัญญาณเพื่อที่จะได้มีการชดเชยกระแสชดวอดเหนี่ยวนำ เพราะเนื่องจากกระแสแหล่งจ่ายที่ต้องการถูกปรับเปลี่ยนตาม

กระแสการะ แรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นสมการค่ายอดของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในโมดูลใดๆ ในแต่ละเฟสสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\hat{I}_{L_{1,yz}} = \frac{k_s V_o I_{load}}{3NV_{gz}} \quad (5-3)$$

และ

$$\hat{I}_{L_{ref1,yz}} = \hat{I}_{L_{1,yz}} + I_{VR} \quad (5-4)$$

เมื่อ

$\hat{I}_{L_{1,yz}}$ คือ ปริมาณค่ายอดกระแสขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณ

I_{VR} คือ สัญญาณที่รับการแก้ไขแล้วจากชุดควบคุมแบบพีโอ ในรูปควบคุมแรงดัน

เนื่องจากสัญญาณคำสั่งของกระแสที่หาได้จากสมการที่ (5-4) ถูกนำไปคูณเข้ากับสัญญาณอ้างอิงกระแสที่ได้จากการวัดสัญญาณแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจึงสามารถกำหนดสมการของการแสดขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละเฟสได้ดังนี้

$$i_{L_{ref1,ya}} = \hat{I}_{L_{ref1,ya}} |\sin(\omega t)| \quad (5-5)$$

$$i_{L_{ref1,yb}} = \hat{I}_{L_{ref1,yb}} |\sin(\omega t - 120^\circ)| \quad (5-6)$$

$$i_{L_{ref1,yc}} = \hat{I}_{L_{ref1,yc}} |\sin(\omega t - 240^\circ)| \quad (5-7)$$

สมการพลวัตของระบบที่ได้นำเสนอนี้พิจารณาจากจุดต่อร่วมด้านเอาต์พุตของระบบ ณ ตำแหน่งบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{z=a}^c \sum_{y=1}^N n I_{L_{2,yz}} = C_o n^2 \frac{d(V_o / n)}{dt} + n I_{load} \quad (5-8)$$

เมื่อ

I_{load} คือ กระแสการะของระบบที่ถูกนำเสนอ

สำหรับการหาโมเดลสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่นำเสนอต้องกำหนดปริมาณต่างๆ ดังนี้

$$V_{gz} = \bar{V}_{gz} + \tilde{v}_{gz} \quad (5-9)$$

$$I_{L1z} = \bar{I}_{L1z} + \tilde{i}_{L1z} \quad (5-10)$$

$$V_o = \bar{V}_o + \tilde{v}_o \quad (5-11)$$

$$I_o = \bar{I}_o + \tilde{i}_o \quad (5-12)$$

$$\hat{I}_{Lref1z} = \bar{\hat{I}}_{Lref1z} + \tilde{\hat{i}}_{Lref1z} \quad (5-13)$$

$$I_{VR} = \bar{I}_{VR} + \tilde{i}_{VR} \quad (5-14)$$

$$I_{load} = \bar{I}_{load} + \tilde{i}_{load} \quad (5-15)$$

ขณะที่

\bar{V} คือ ปริมาณค่าสถานะคงตัว

\tilde{v} คือ ปริมาณค่าสัญญาณขนาดเล็ก

นำปริมาณต่างๆ ที่ได้จากสมการที่ (5-9) ถึง (5-15) นำมาแทนลงในสมการที่ (5-1) (5-2) (5-4) และ สมการที่ (5-8) โดยกำหนดเทอมที่ได้จาก $\tilde{v} \cdot \tilde{v} = 0$ จึงได้

$$\tilde{i}_o = \frac{3Nk_{rms} \bar{V}_{gz}}{\bar{V}_o} \tilde{\hat{i}}_{Lref1z} + \frac{3Nk_{rms} \bar{\hat{I}}_{Lref1z}}{\bar{V}_o} \tilde{v}_{gz} - \frac{\bar{I}_o}{\bar{V}_o} \tilde{v}_o \quad (5-16)$$

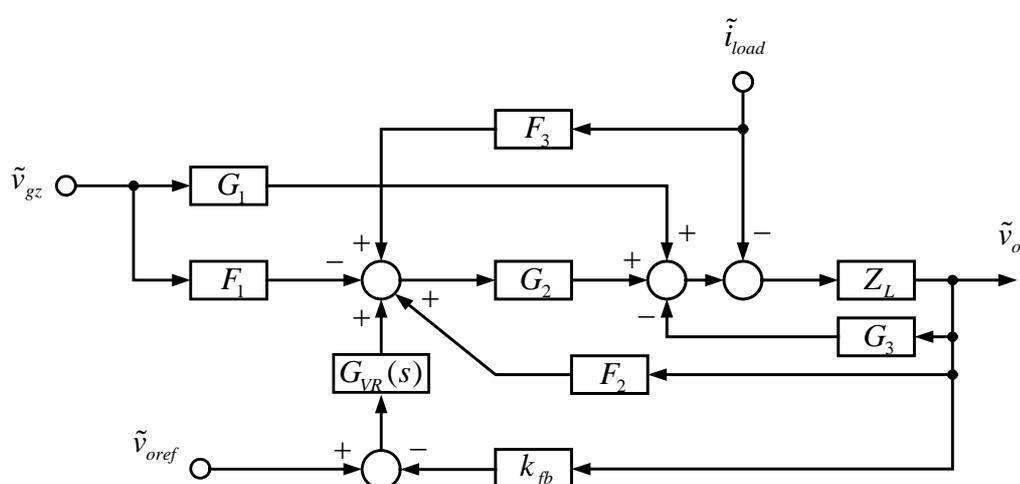
$$\tilde{i}_{L1z} = \frac{k_s \bar{V}_o}{3N\bar{V}_{gz}} \tilde{i}_{load} + \frac{k_s \bar{I}_{load}}{3N\bar{V}_{gz}} \tilde{v}_o - \frac{k_s \bar{V}_o \bar{I}_{load}}{3N(\bar{V}_{gz})^2} \tilde{v}_{gz} \quad (5-17)$$

$$\tilde{i}_{Lref1z} = \tilde{i}_{L1z} + \tilde{i}_{VR} \quad (5-18)$$

$$\tilde{i}_o = C_o \frac{d\tilde{v}_o}{dt} + \tilde{i}_{load} \quad (5-19)$$

ตารางที่ 5-1 ค่าตัวแปรขององค์ประกอบสัญญาณขนาดเล็กสำหรับระบบที่นำเสนอ

ตัวแปร	G_1	G_2	G_3	F_1	F_2	F_3
ปริมาณ	$\frac{3Nk_{rms}\bar{I}_{Lref11z}}{\bar{V}_o}$	$\frac{3Nk_{rms}\bar{V}_{gz}}{\bar{V}_o}$	$\frac{\bar{I}_o}{\bar{V}_o}$	$\frac{k_s\bar{V}_o}{3N\bar{V}_{gz}}$	$\frac{k_s\bar{I}_{load}}{3N\bar{V}_{gz}}$	$\frac{k_s\bar{V}_o\bar{I}_{load}}{3N(\bar{V}_{gz})^2}$



ภาพที่ 5-2 ไลอะแกรมวงจรสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่นำเสนอ

อ้างอิงสมการที่ (5-16) ถึงสมการที่ (5-19) และร่วมกับสมการของชุดควบคุมแบบพีไอ จึงสามารถเขียนเป็นบล็อกไลอะแกรมของระบบควบคุมสัญญาณขนาดเล็ก ดังถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-2 ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 5-1 เพราะฉะนั้น สมการแรงดันเอาต์พุตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tilde{v}_o = T_1\tilde{v}_{oref} + T_2\tilde{v}_{gz} - Z_o\tilde{i}_{load} \quad (5-20)$$

ใช้กฎของ Mason Gain Formula กับบล็อกไลอะแกรมดังแสดงอยู่ในภาพที่ 5-2 โดยกำหนดให้ปริมาณของสมการโอนย้ายต่างๆ ปรากฏดังนี้

T_1 คือ สมการโอนย้ายของฟังก์ชันการควบคุมระบบ

T_2 คือ สมการ โอนย้ายของฟังก์ชันการบวก

Z_o คือ สมการ โอนย้ายของฟังก์ชันอิมพีแดนซ์เอาต์พุต

สมการ โอนย้ายของฟังก์ชันการควบคุมระบบ T_1 คือ

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_{oref}} = \frac{G_{VR}(s)G_2}{(1/Z_L) + G_{VR}(s)G_2k_{fb} + G_3 - G_2F_2} \quad (5-21)$$

สมการ โอนย้ายของฟังก์ชันการบวก T_2 คือ

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_{gz}} = \frac{G_{VR}(s) - F_1G_2}{(1/Z_L) + G_{VR}(s)G_2k_{fb} + G_3 - G_2F_2} \quad (5-22)$$

สมการ โอนย้ายของฟังก์ชันอิมพีแดนซ์เอาต์พุต Z_o คือ

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{i}_{load}} = \frac{1 - F_3G_2}{(1/Z_L) + G_{VR}(s)G_2k_{fb} + G_3 - G_2F_2} \quad (5-23)$$

จากสมการที่ (5-21) ถึง (5-23) สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าระบบที่นำเสนอขึ้นให้ผลการตอบสนองที่ดีเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของภาระ โดยการกำหนดให้สมการ $T_2=0$ และ $Z_o=0$ เพราะฉะนั้น จึงสามารถหาค่าเกณฑ์ของ $k_s = \sqrt{2}$ จากนั้นจึงสามารถเขียนสมการโอนย้ายของแรงดันเอาต์พุตใหม่ได้ดังนี้

สมการ โอนย้ายของฟังก์ชันการควบคุมระบบ T_1 ใหม่ คือ

$$\frac{\tilde{v}_o}{\tilde{v}_{oref}} = \frac{G_{VR}(s)G_2Z_L}{1 + G_{VR}(s)G_2Z_Lk_{fb}} \quad (5-24)$$

ขณะที่

k_{rms} คือ เกณฑ์ประสิทธิภาพ

k_{fb} คือ เกณฑ์สัญญาณป้อนกลับ

นั่นก็หมายความว่าแรงดันเอาต์พุตของเครื่องแปลงผันเป็นอิสระต่อการเปลี่ยนแปลงในกระแสภาระและแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ จากมุมมองตรงจุดนี้ของการควบคุม ค่าพารามิเตอร์

มิเตอร์ของชุดควบคุมแบบพีไอจึงต้องถูกเลือกอย่างเหมาะสมเพื่อที่จะให้ระบบที่นำเสนอมี
 ก ๑ ร
 ตอบสนองที่ดีเมื่อมีการรบกวนปรากฏขึ้นในรูปการควบคุมและต้องควบคุมให้ค่าความผิดพลาดที่
 เกิดจากสภาวะคงตัวที่จะเกิดกับแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
 อ้างถึงสมการที่ (5-24) สามารถนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายที่ประกอบไปด้วย
 ลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตเพียงลูปเดียว ซึ่งถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-3 โดยสมการ
 ฟังก์ชันโอนย้ายของชุดควบคุมแบบพีไอแสดงด้วยสมการดังนี้

$$G_{VR}(s) = \frac{k_p(s + \omega_z)}{s} \quad (5-25)$$

เมื่อ

k_p คือ เกณฑ์ของชุดควบคุมแบบพีไอ

ω_z คือ ตำแหน่งของซีโร

จากนั้นสามารถหาสมการ โอนย้ายของระบบ (Plant Transfer Function : PTF) คือ

$$PTF = \frac{3Nk_{rms} \bar{V}_{gz} k_{fb}}{\bar{V}_o C_o S} \quad (5-26)$$

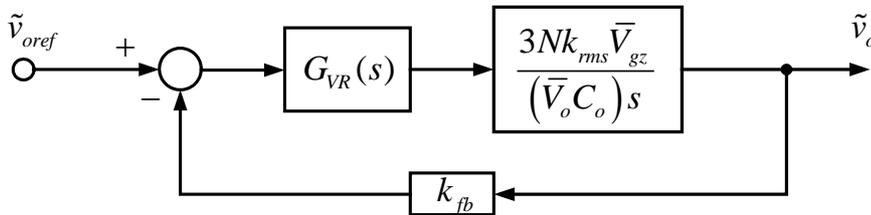
สมการฟังก์ชันโอนย้ายลูปเปิด (Open loop Transfer Function : OLTF) คือ

$$OLTF = G_{VR}(s) \left(\frac{3Nk_{rms} \bar{V}_{gz} k_{fb}}{\bar{V}_o C_o S} \right) \quad (5-27)$$

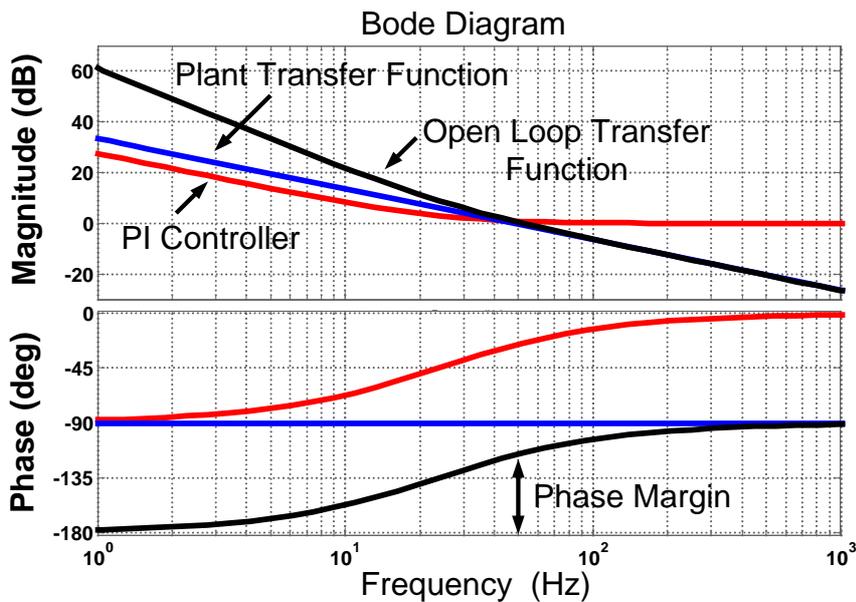
หน้าที่หลักของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ คือ ต้องการควบคุม
 ให้กระแสอินพุตเป็นไปตามสัญญาณไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต ซึ่งโดยทั่วไปในกรณี
 ระบบ 1 เฟส ผู้ออกแบบต้องออกแบบให้ค่าความถี่ตัดผ่านเกณฑ์ศูนย์ของลูปควบคุมแรงดันมีค่าต่ำ
 กว่าความถี่ไลน์ (50Hz) เพราะไม่อย่างนั้นแล้วกระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดความผิดเพี้ยน
 สูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าช่วงความถี่ที่เหมาะสมสำหรับกรณีระบบ 1 เฟส จะอยู่ที่ประมาณ 1/3 หรือ
 1/2 ของความถี่ไลน์ แต่สำหรับในกรณีของระบบ 3 เฟส ที่ระบบทำงานอยู่ในสภาวะที่
 สมดุลนี้ ผู้ออกแบบสามารถเลือกค่าของ เกณฑ์และตำแหน่งของซีโรเพื่อวางลงไปในลูปควบคุม
 เพื่อที่จะให้ระบบมีช่วงของความถี่ที่ค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าความถี่ของไลน์ได้ ดังนั้นเป้าหมาย

หลักของการเลือกค่าพารามิเตอร์ของพีไอจึงถูกกำหนดเพื่อหาผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่ดีที่สุดและไม่มีความผิดพลาดในสภาวะคงตัว

ไคอะแกรมของการวาดจากสมการที่ (5-25) ถึง (5-27) พร้อมกับข้อมูลในตารางที่ 5-2 ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-4 เพราะเนื่องจาก ระบบที่ได้นี้เป็นระบบเชิงเส้น จึงสามารถนำเทคนิคการแทนที่มาเพื่อใช้วิเคราะห์หาฟังก์ชันโอนย้ายระบบโดยรวมได้ ด้วยการพิจารณาค่าเกนซ์และเฟสของแต่ละฟังก์ชันที่ได้จากสมการของแต่ละขั้นภายในรูปของการควบคุม ค่าเกนซ์ความถี่สูงและค่าตำแหน่งของซีโรของชุดควบคุมแบบพีไอสามารถเลือกนำมาวางเพื่อให้ระบบที่นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีได้ ดังนั้นรูปควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตจึงถูกออกแบบให้มีความถี่ตัดผ่านเกนซ์ศูนย์เท่ากับ 50 Hz และระบบให้ค่าของเฟสส่วนเพื่อเท่ากับ 60°



ภาพที่ 5-3 บล็อกไคอะแกรมระบบควบคุมของรูปควบคุมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต

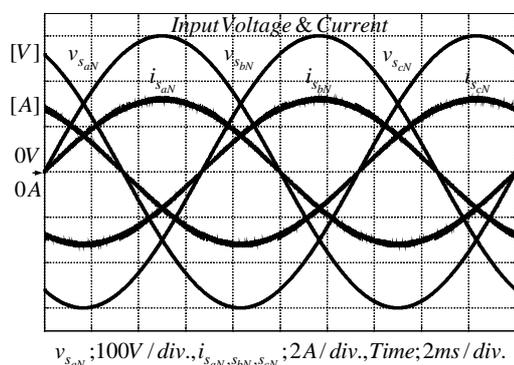


ภาพที่ 5-4 Bode diagram ของระบบที่นำเสนอ

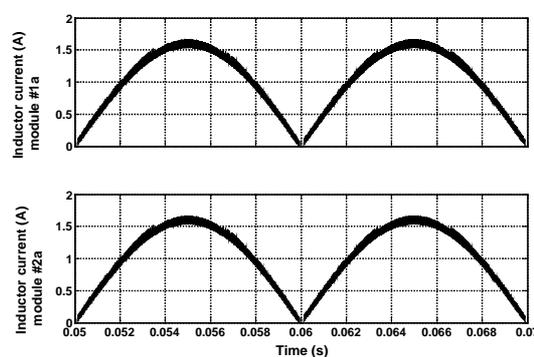
5.3 การจำลองการทำงาน

ผลของการใช้เทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้ากับการควบคุมการทำงานการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกได้ถูกแสดงให้เห็นด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ $k_p = 1$ และ $\omega_z = 150$ ถูกกำหนดให้กับชุดควบคุมบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตแบบพีไอ C_{1x}, C_o, L_{1yz} และ L_{2yz} ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $0.68 \mu\text{F}$ $13,600 \mu\text{F}$ 5 mH และ 1 mH ตามลำดับ วัตถุประสงค์ของการจำลองการทำงานนี้คือ เพื่อที่จำแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมที่นำเสนอ เพื่อปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบมา เพื่อศึกษาสมรรถนะทั้งในสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วคราวของระบบก่อนที่จะทำการสร้างระบบจริงขึ้นมา ผลของการจำลองการทำงานของระบบที่นำเสนอในพิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต $1,500 \text{ W}$ และแรงดันเอาต์พุต -48 V ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-5 ถึง ภาพที่ 5-7

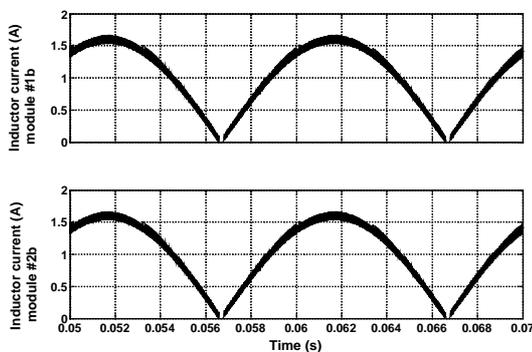
5.3.1 การจำลองสภาวะคงตัว รูปคลื่นแรงดันและกระแสอินพุต กระแสควดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลในภาพที่ 5-1 เมื่อ $N=2$ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-5 และ 5-6 แรงดันและกระแสอินพุตที่ได้จากการจำลองการทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต $1,500 \text{ W}$ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-5 (ก)



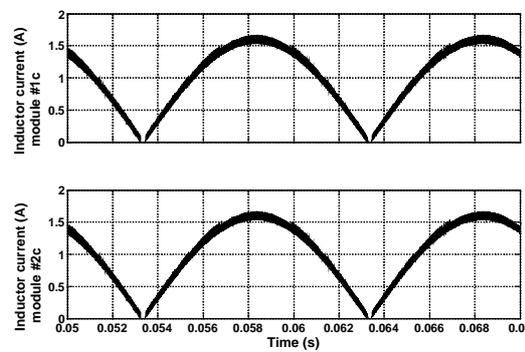
(ก)



(ข)

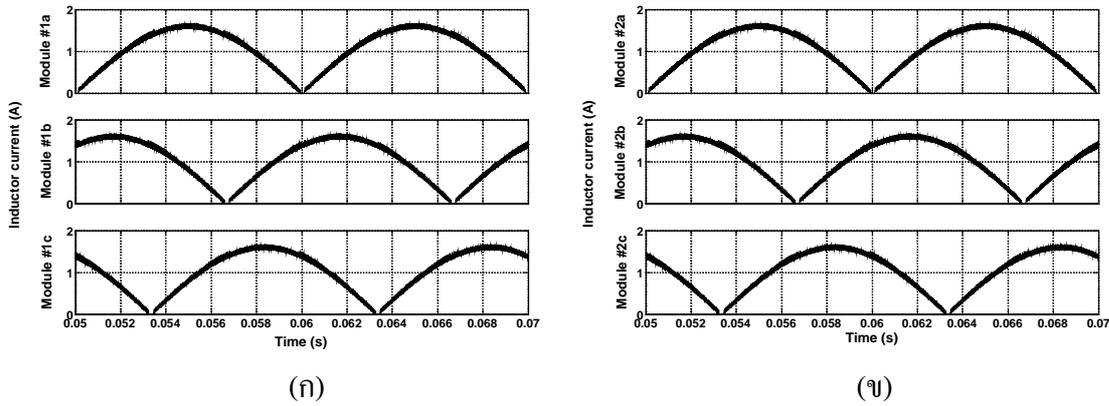


(ค)



(ง)

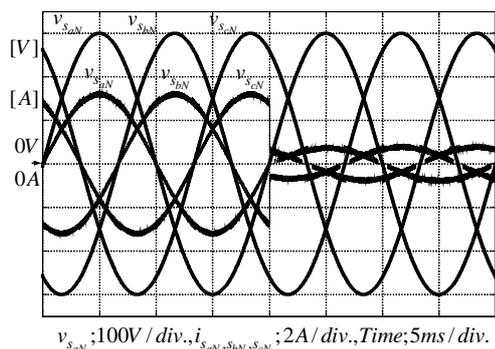
ภาพที่ 5-5 ผลของการจำลอง (ก) แรงดันและกระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ (ข) กระแสควดเหนี่ยวนำเฟส a (ค) กระแสควดเหนี่ยวนำเฟส b (ง) กระแสควดเหนี่ยวนำเฟส c



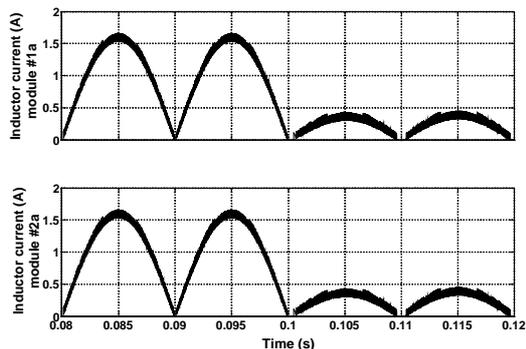
ภาพที่ 5-6 ผลการจำลอง (ก) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในโมดูลที่ 1 ของเฟส *ab* และ *c* (ข) กระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 2 ของเฟส *ab* และ *c*

จากผลการจำลองดังกล่าวแสดงถึงกระแสอินพุตที่ได้รับมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุตและมีรูปสัญญาณใกล้เคียงไซน์ ดังนั้นตัวประกอบกำลังอินพุตที่ได้จึงใกล้เคียงหนึ่ง ผลการจำลองของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-5 (ข) ถึง 5-5 (ค) ผลที่ได้รับจากการออกแบบด้วยหลักการสมดุลย์กำลังไฟฟ้านี้สามารถแสดงให้เห็นว่าเครื่องแปลงผันสามารถแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสได้อย่างเท่าเทียมกัน ในขณะที่ยังคงรักษาค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ภาพที่ 5-6 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของระบบในภาพที่ 5-1 ในแ่งโมดูลชุดที่ 1 และโมดูลชุดที่ 2 ของทั้ง 3 เฟส ผลการจำลองที่ได้แสดงว่าระบบควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสเพื่อให้เกิดสภาวะการสมดุลย์ของกระแสอินพุตของแต่ละเฟสได้เป็นอย่างดี

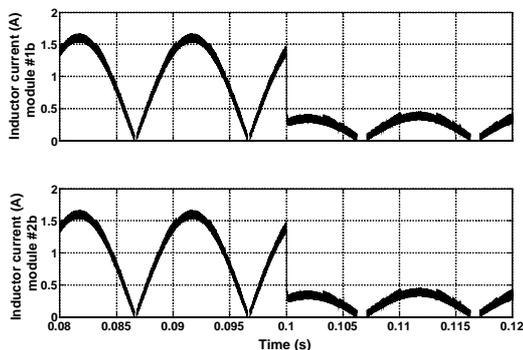
5.3.2 การจำลองสถานะชั่วคราว ผลการจำลองการทำงานของระบบในภาพที่ 5-1 เมื่อ $N=2$ โดยที่ระบบถูกกำหนดให้ทำงานภายใต้สภาวะเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 1,500 W ไปที่ 360 W และกลับมาที่ 1,500 W อีกครั้งหนึ่ง ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-7 ถึงภาพที่ 5-8 ผลการจำลองการทำงานของสภาวะชั่วคราวของกระแสและแรงดันอินพุตที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1,500 W ไปที่ 360 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-7 (ก) ผลการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสถูกจำลองภายใต้สภาวะที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1,500 W ไปที่ 360 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-7 (ข) ถึง (จ) และผลการจำลองการทำงานภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 360 W ไปที่ 1,500W ของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแ่งโมดูลชุดที่ 1 ของเฟส *ab* และ *c* ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-7 (ฉ) ผลการจำลองในสภาวะชั่วคราวของแรงดันเอาต์พุตที่กระแสภาระถูกทำให้เปลี่ยนแปลงไปจาก 1,500 W ไปที่ 360 W และกลับมาที่ 1,500 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-8 (ก) ส่วนภาพขยาย ณ ที่ตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-8 (ข) และ (ค) ตามลำดับ



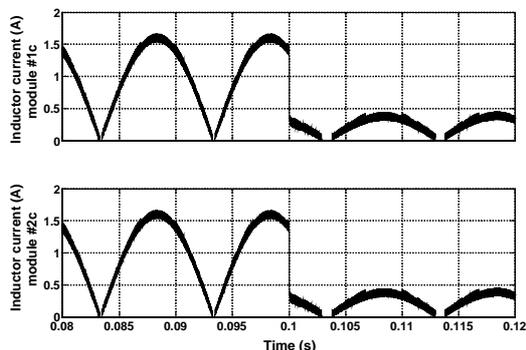
(ก)



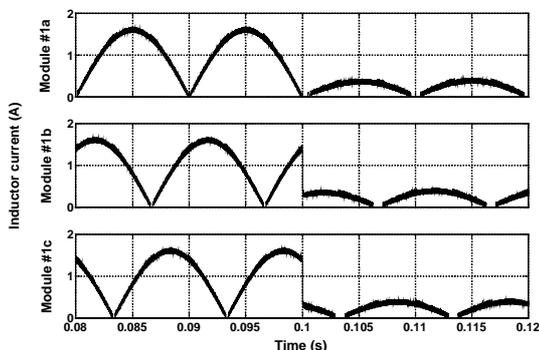
(ข)



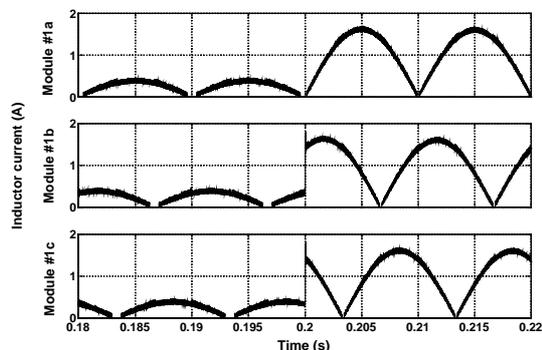
(ค)



(ง)



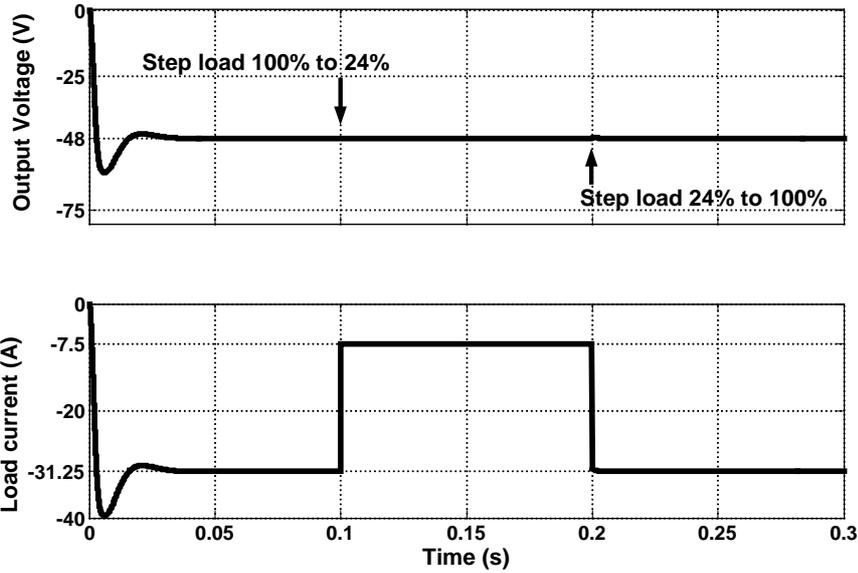
(จ)



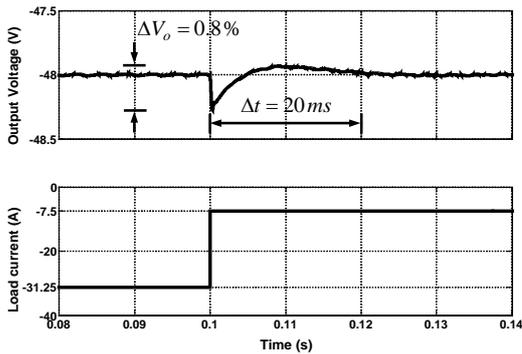
(ฉ)

ภาพที่ 5-7 ผลของการจำลองภายใต้สภาวะชั่วคราว (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) กระแสคลวดเหนี่ยวนำในโมดูลเฟส *a* (ค) กระแสคลวดเหนี่ยวนำในโมดูลเฟส *b* (ง) กระแสคลวดเหนี่ยวนำในโมดูลเฟส *c* (จ)-(ฉ) กระแสคลวดเหนี่ยวนำในโมดูลแผงชุดที่ 1 ของเฟส *ab* และ *c* ที่ตำแหน่งเวลาการจ่ายภาระ $t=0.1$ และ $t=0.2$ ตามลำดับ

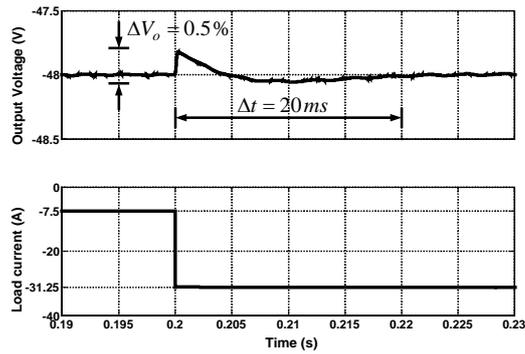
ส่วนขยายของภาพที่ 5-8 (ก) ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-8 (ข) และ (ค) ภาพทั้งสองแสดงให้เห็นว่าเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1,500 W ไปที่ 360 W และจากสภาวะ 360 W ไปที่ 1,500 W ระบบยังคงให้ผลตอบสนองอยู่ใน 20 ms (1 วนรอบความถี่อินพุต) ที่ $\% \Delta V_o = 0.8\%$ และ 0.5% ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 5-8 ผลการจำลอง (ก) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ข)-(ค) ภาพขยายแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่เวลา $t=0.1$ และ $t=0.2$ ตามลำดับ

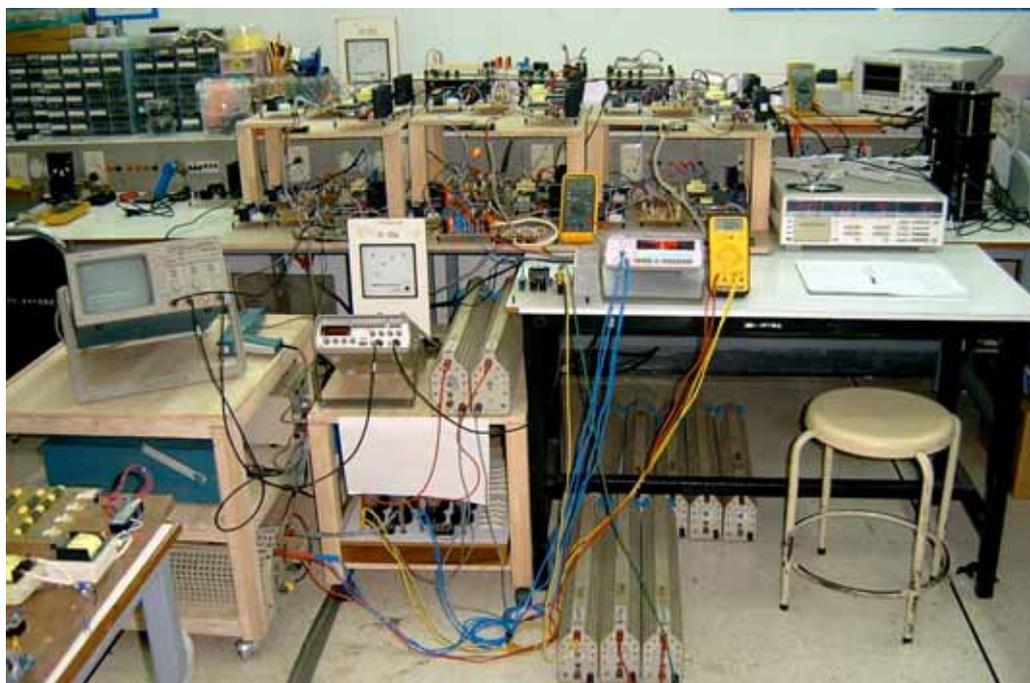
ในตอนที่ 5-3 ของบทที่ 5 นี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลของการจำลองการทำงานของระบบของการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการพื้นฐานสมดุลกำลังไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม Simulink ระบบให้ผลลัพธ์ของการตอบสนองที่ดีทั้งภายใต้เงื่อนไขสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วขณะ อาทิเช่น ระบบให้คุณลักษณะของตัวประกอบกำลังสูง สามารถแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำได้เท่ากันเป็นผลทำให้เกิดสภาวะเฟสสมดุล ให้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้ดีและรวดเร็ว ในขณะที่กระแสอินพุตยังคงมีสัญญาณเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต

5.4 การทดสอบการทำงาน

ภาพถ่ายจากห้องการทดสอบระบบต้นแบบการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าได้ถูกนำเสนออยู่ในภาพที่ 5-9 ระบบประกอบไปด้วยโมดูลเรียงกระแสที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 250 W ต่อ 1 โมดูล โมดูลทั้งจำนวน 6 ชุด ถูกนำมาต่อทางด้านอินพุตเป็นแบบระบบ 3 เฟส 4 สาย และด้านเอาต์พุตของแต่ละโมดูลถูกต่อขนานเข้ากับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ชุดควบคุมระบบกำลังถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่หลัก 4 ประการคือ

1. เพื่อที่จะควบคุมกระแสอินพุตให้มีสัญญาณเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุต
2. เพื่อที่จะควบคุมการแบ่งกระแสของแต่ละโมดูลในแต่ละเฟสให้มีค่าใกล้เคียงกัน
3. เพื่อที่จะควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต
4. เพื่อเพิ่มความสามารถในการเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าให้กับภาระในอนาคต

ผลที่ได้จึงนำไปสู่ค่าตัวประกอบกำลังด้านอินพุตมีค่าสูงใกล้เคียงหนึ่งและลดการแพร่กระจายกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า วงจรแบบแอนะล็อกถูกใช้ในระบควบคุมของวงจรชุดต้นแบบนี้ โดยมีค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ได้นำเสนอแสดงอยู่ในตารางที่ 5-2

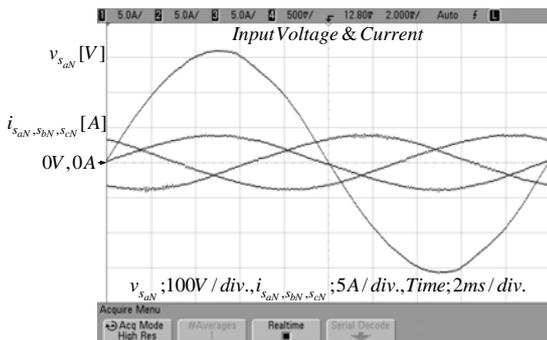


ภาพที่ 5-9 ภาพถ่ายการทดสอบระบบต้นแบบของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

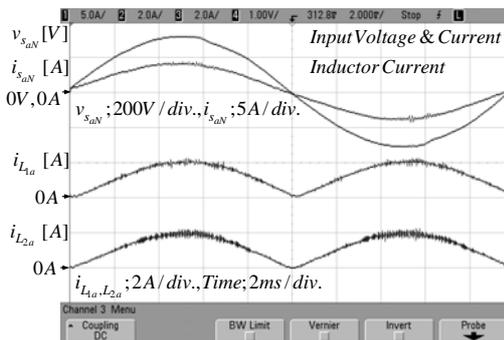
ตารางที่ 5-2 รายละเอียดด้านเทคนิคของโมดูลเรียงกระแส

คุณลักษณะ	รายละเอียด
แรงดันอินพุต $V_{saN}, V_{sbN}, V_{scN}$	220 V \pm 15%
ความถี่ไลน์	50 Hz
พิกัดกำลังไฟฟ้าแต่ละโมดูล	250 W/Module
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมที่จ่ายภาระ	1,500 W
แรงดันเอาต์พุต	-48 V
$L_{11a}, L_{21a}, r_{11a}, r_{21a}$	5.069 mH, 1.066 mH, 1.329 Ω , 0.320 Ω
$L_{12a}, L_{22a}, r_{12a}, r_{22a}$	5.054 mH, 1.050 mH, 1.310 Ω , 0.309 Ω
$L_{11b}, L_{21b}, r_{11b}, r_{21b}$	5.068 mH, 1.086 mH, 1.280 Ω , 0.320 Ω
$L_{12b}, L_{22b}, r_{12b}, r_{22b}$	5.078 mH, 1.079 mH, 1.289 Ω , 0.339 Ω
$L_{11c}, L_{21c}, r_{11c}, r_{21c}$	5.066 mH, 1.044 mH, 1.279 Ω , 0.319 Ω
$L_{12c}, L_{22c}, r_{12c}, r_{22c}$	5.056 mH, 1.055 mH, 1.319 Ω , 0.329 Ω
C_{1x}, C_o	0.68 μF , 1,470 μF
$k_p, \omega_z, n_{Tr} (N_z/N_I)$	1, 150, 0.5

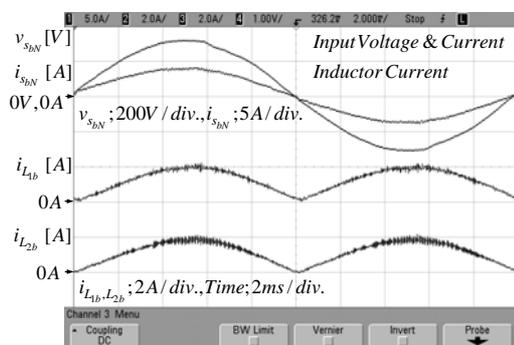
5.4.1 การทดสอบในสภาวะคงตัว ผลการทดลองที่ได้จากการขนานระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ในสภาวะคงตัวได้ถูกนำเสนอ พร้อมกับกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสถูกควบคุมให้ทำงานอยู่ในโหมดของกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง เมื่อ $N=2$ ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-10 ถึง ภาพที่ 5-12 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสอินพุตในระบบ 3 เฟส 4 สาย ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-10 (ก) ในขณะที่กระแสไลน์นั้นมีรูปคลื่นใกล้เคียงสัญญาณไซน์และมีค่าเฟสเกือบตรงกันกับแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังอินพุตใกล้เคียงหนึ่ง สามารถวัดค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกสร่วมได้ 2.54 % ซึ่งอ่านค่าได้จากการวัดโดยใช้ Digital Power Meter YOKOGAWA Model 2531 A กระแสขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 6 โมดูลที่พิกัดกำลังไฟฟ้าภาระเท่ากับ 1,500 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-10 (ข) ถึง (ฉ) เพราะเนื่องจากผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานแฝงของแต่ละโมดูลที่ไม่สามารถควบคุมให้มีค่าเท่ากันได้ในทุกๆ โมดูล จึงเป็นผลให้กระแสในแต่ละโมดูลมีค่าต่างกันบ้างเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลสามารถประมาณได้ว่ามีขนาดของกระแสที่เท่ากัน



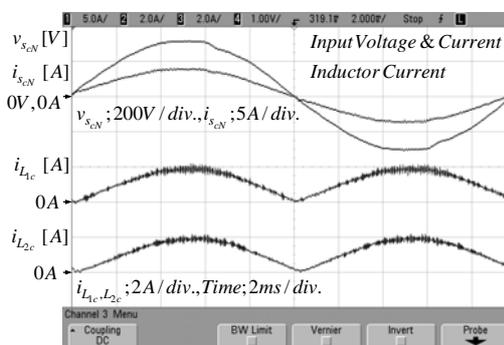
(ก)



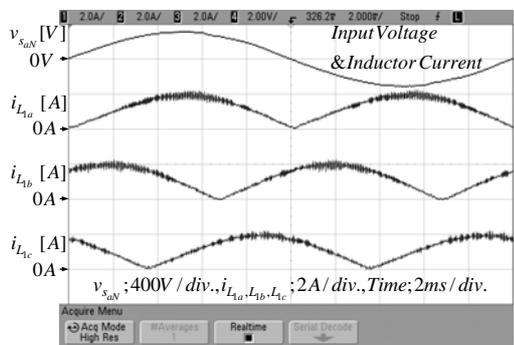
(ข)



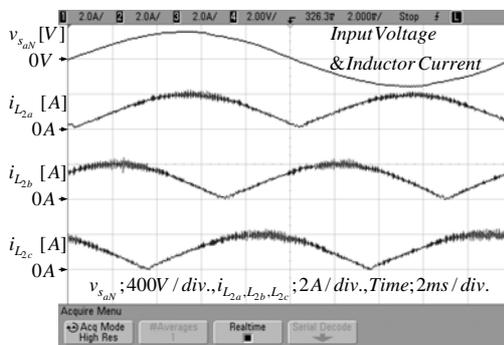
(ค)



(ง)

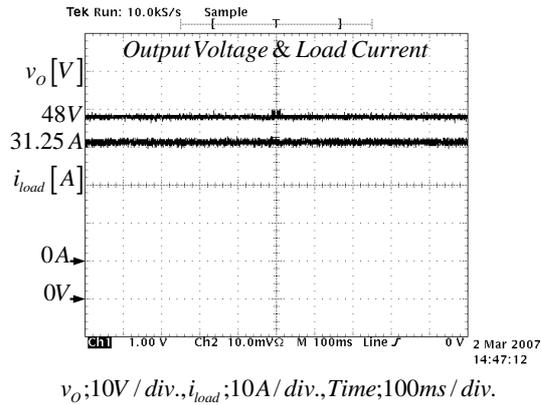


(จ)

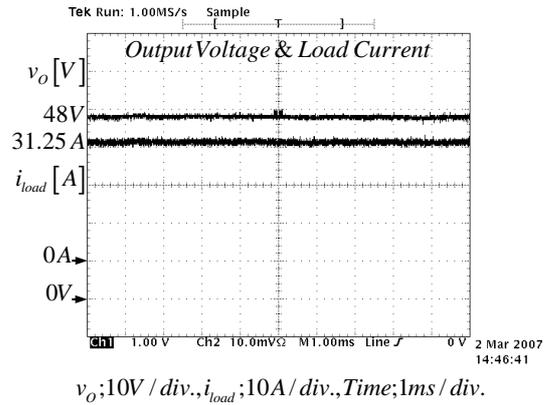


(ฉ)

ภาพที่ 5-10 ผลการทดสอบระบบที่พิกัดภาระ 1,500 W (ก) แรงดันและกระแสอินพุต (ข) แรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 และ 2 ของเฟส a (ค) แรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 และ 2 ของเฟส b (ง) แรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 และ 2 ของเฟส C (จ) แรงดันอินพุต เฟส a และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 ของเฟส a b และ c (ฉ) แรงดันอินพุต เฟส a และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 2 ของเฟส a b และ c



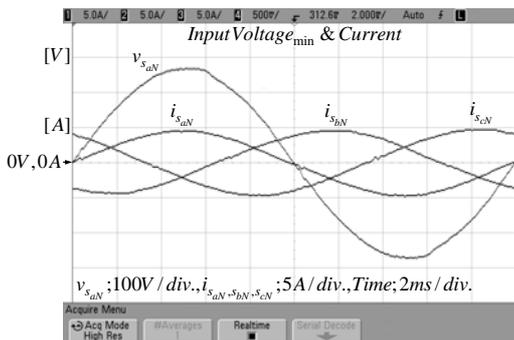
(ก)



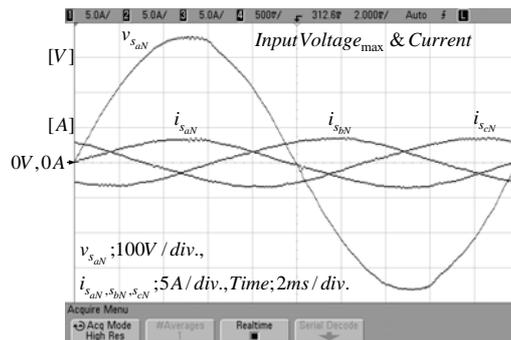
(ข)

ภาพที่ 5-11 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่พิกัดภาระ 1,500 W (ก) ที่ฐานเวลา 100 ms/div (ข) ที่ฐานเวลา 1 ms/div

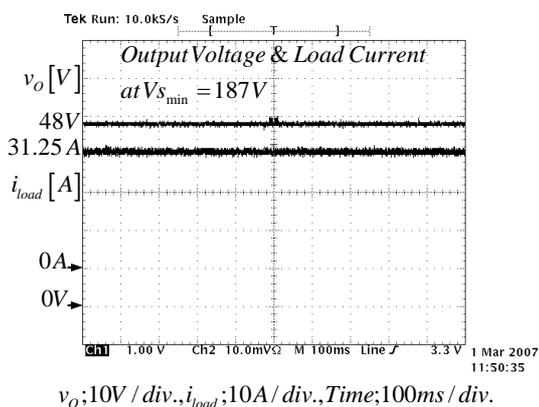
ภาพที่ 5-10 (ข) (ค) และ (ง) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันและกระแสอินพุตกับกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟส ในเฟส *a b* และ *c* ตามลำดับ ภาพที่ 5-10 (จ) และ (ฉ) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณของแรงดันอินพุตอ้างอิงในเฟส *a* กับกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแผงโมดูลชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ของเฟส *a b* และ *c* ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ถูกต้องแสดงอยู่ในภาพที่ 5-10 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า แบบแผนของการควบคุมที่ได้จากแนวคิดบนหลักการควบคุมแบบสมมูลกำลังไฟฟ้านี้ สามารถควบคุมการแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสได้ดี ในขณะที่ระบบยังคงถูกควบคุมให้ค่าตัวประกอบกำลังของอินพุตใกล้เคียงหนึ่งอยู่ตลอดเวลา ภาพที่ 5-11 (ก) แสดงผลตอบสนองในสภาวะคงตัวของแรงดันเอาต์พุตที่ -48 V ระบบถูกวัดในรูปแบบที่มีการกลับขั้วของสายสัญญาณจากออสซิลโลสโคป กระแสภาระที่พิกัดสามารถวัดค่าได้เท่ากับ -31.25 A ระบบถูกวัดบนฐานเวลาเท่ากับ 100 ms ต่อช่องสัญญาณ เพื่อให้ให้เห็นภาพในมุมมองกว้างของค่าสัญญาณแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตได้อย่างชัดเจน ส่วนภาพขยายที่มีขนาดเป็น 10 เท่า บนฐานเวลาเท่ากับ 1 ms ต่อช่องสัญญาณถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-11 (ข) ผลของการทดสอบระบบที่นำเสนอภายใต้สภาวะของแรงดันอินพุตที่มีค่าเท่ากับ 187 V ($V_{s,\min}$) และ 253 V ($V_{s,\max}$) โดยที่ระบบยังคงจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัดเท่ากับ 1,500 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-12 แรงดันอินพุตและกระแสอินพุต 3 เฟสกับแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระภายใต้สภาวะแรงดันอินพุตเท่ากับ 187 V ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-12 (ก) และ (ค) ส่วนการทดสอบที่พิกัดแรงดันอินพุตเท่ากับ 253 V ของกระแสและแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-12 (ข) และ (ง)



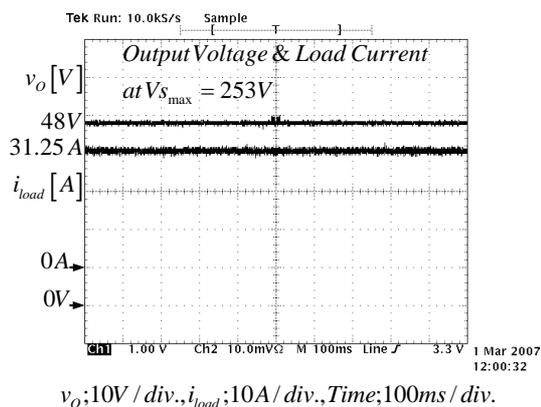
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 5-12 ผลของการทดสอบ (ก) แรงดันและกระแสเฟสที่ค่าแรงดันอินพุตต่ำสุด (ข) แรงดันและกระแสเฟสที่ค่าแรงดันอินพุตสูงสุด (ค) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระที่ค่าแรงดันอินพุตต่ำสุด (ง) แรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ ที่ค่าแรงดันอินพุตสูงสุด

จากผลการทดสอบของระบบที่นำเสนอภายใต้สภาวะคงตัวที่ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 5-10 ถึง ภาพที่ 5-12 นั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระบบสามารถควบคุมกระแสอินพุตให้มีรูปคลื่นใกล้เคียงสัญญาณไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต ดังนั้น จึงส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอินพุตเข้าใกล้หนึ่งและปริมาณกระแสฮาร์มอนิกก็ถูกจำกัดมิให้แพร่กระจายเข้าไปในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

2. ระบบสามารถควบคุมกระแสโหลดเฉลี่ยของแต่ละโมดูลในแต่ละเฟสให้มีค่าใกล้เคียงกันได้ ในขณะที่ระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง

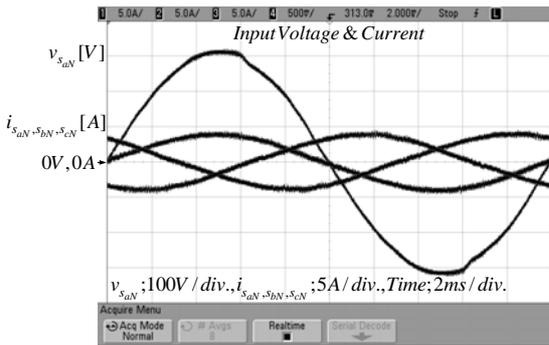
3. ระบบสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าคงที่ได้ทั้งในสภาวะที่ค่าของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับอยู่ในสภาวะปกติและสภาวะ $V_s \pm 15\%$ ในขณะที่ระบบที่นำเสนอยังคงสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้ตามที่พิกัดที่กำหนดไว้

5.4.2 การทดสอบสภาวะชั่วขณะ การทดสอบนี้กระทำเพื่อศึกษาผลตอบสนองทางพลวัตของระบบที่นำเสนอ โดยได้แบ่งการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงภาระไว้ 2 เงื่อนไข คือ

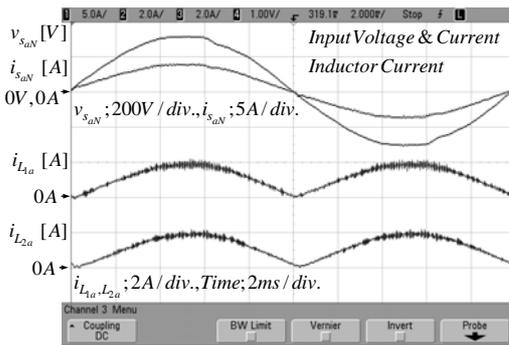
5.4.2.1 ภาระถูกเปลี่ยนแปลง 1,500 W (100%) ไป 150 W (10%) และกลับไปที่ 1,500 W (100%)

5.4.2.2 ภาระถูกเปลี่ยนแปลง 1,500 W (100%) ไป 360 W (24%) และกลับไปที่ 1,500 W (100%)

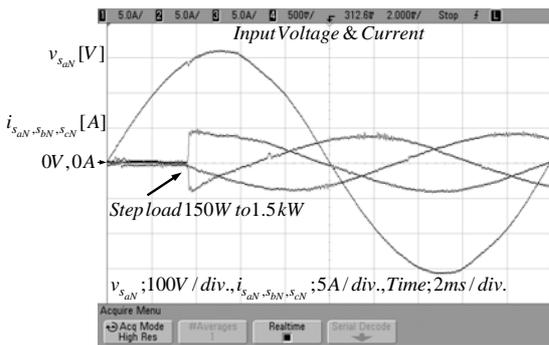
ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ได้รับการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 1,500 W ไปที่ 150 W และกลับไปที่ 1,500 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-13 ผลการทดลองของสภาวะชั่วครู่ของแรงดันและกระแสอินพุตที่ภาระได้มีการเปลี่ยนแปลงจาก 10 % ไปยัง 100% ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-13 (ค) ภาพส่วนขยายของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแผงชุดที่ 1 ของเฟส *a b* และ *c* ขณะจ่ายภาระจาก 100% ไปที่ 10% ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-13 (ง)



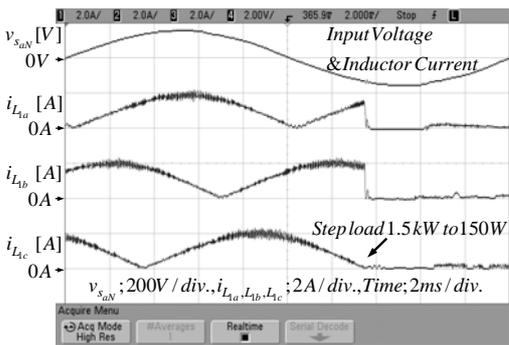
(ก)



(ข)



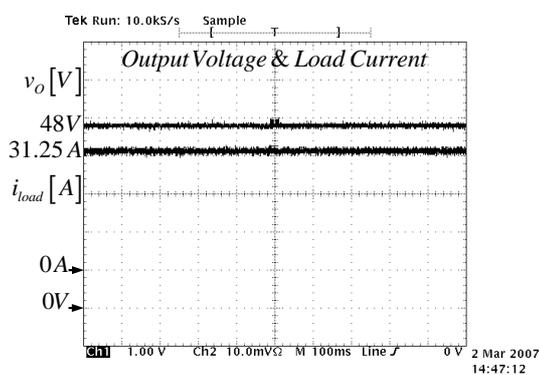
(ค)



(ง)

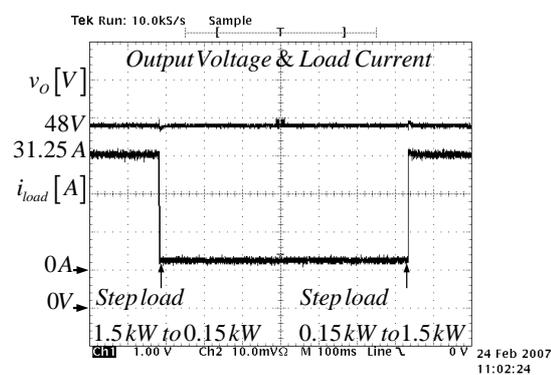
ภาพที่ 5-13 ผลของการทดสอบ (ก) แรงดันและกระแสอินพุตที่พิกัดภาระ 1.5 kW (ข) แรงดันและกระแสอินพุตพร้อมกับกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในเฟส *a* ที่พิกัดกำลังภาระ 1.5 kW (ค) แรงดันและกระแสอินพุตขณะที่จ่ายภาระจาก 0.15 kW ไปที่ 1.5 kW (ง) แรงดันอินพุตของเฟส *a* และกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในโมดูลที่ 1 ของทั้ง 3 เฟส ขณะจ่ายภาระจาก 0.15 kW ไปที่ 1.5 kW

ผลการทดสอบในภาพที่ 5-13 (ค) เมื่อได้ทำการเปรียบเทียบกับผลในภาพที่ 5-13 (ก) พบว่าระบบควบคุมที่ได้นำเสนอสามารถควบคุมให้กระแสอินพุตติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ดี เป็นผลให้สัญญาณกระแสอินพุตมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดัน อีกทั้งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วในขณะที่มีการต่อเพิ่มภาระเข้าไปอย่างฉับพลัน ผลของการทดสอบในภาพที่ 5-13 (ข) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในภาพที่ 5-13 (ง) พบว่าระบบควบคุมที่ได้นำเสนอสามารถควบคุมกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแฉงโมดูลชุดที่ 1 ของเฟส a b และ c ให้สามารถแบ่งกระแสเท่ากันได้ทั้ง 3 โมดูล และกระแสเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม การทดสอบระบบภายใต้เงื่อนไขนี้พบว่าที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 150 W ระบบให้ค่า $THD_i = 16\%$ ซึ่งถือว่ายังมีค่าสูงเกินไป ดังนั้นจึงได้กำหนดพิกัดค่าสูงสุดของการเปลี่ยนแปลงภาระใหม่ที่ 360 W



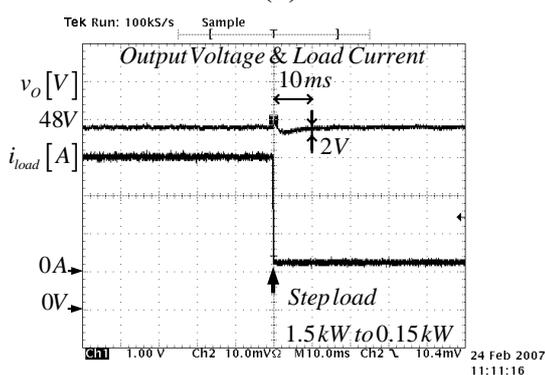
v_o ; 10V / div., i_{load} ; 10A / div., Time; 100ms / div.

(ก)



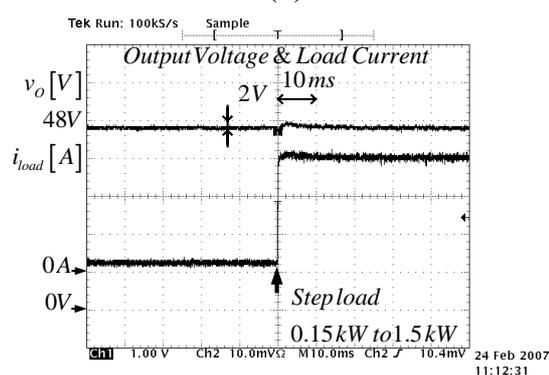
v_o ; 10V / div., i_{load} ; 10A / div., Time; 100ms / div.

(ข)



v_o ; 10V / div., i_{load} ; 10A / div., Time; 10ms / div.

(ค)

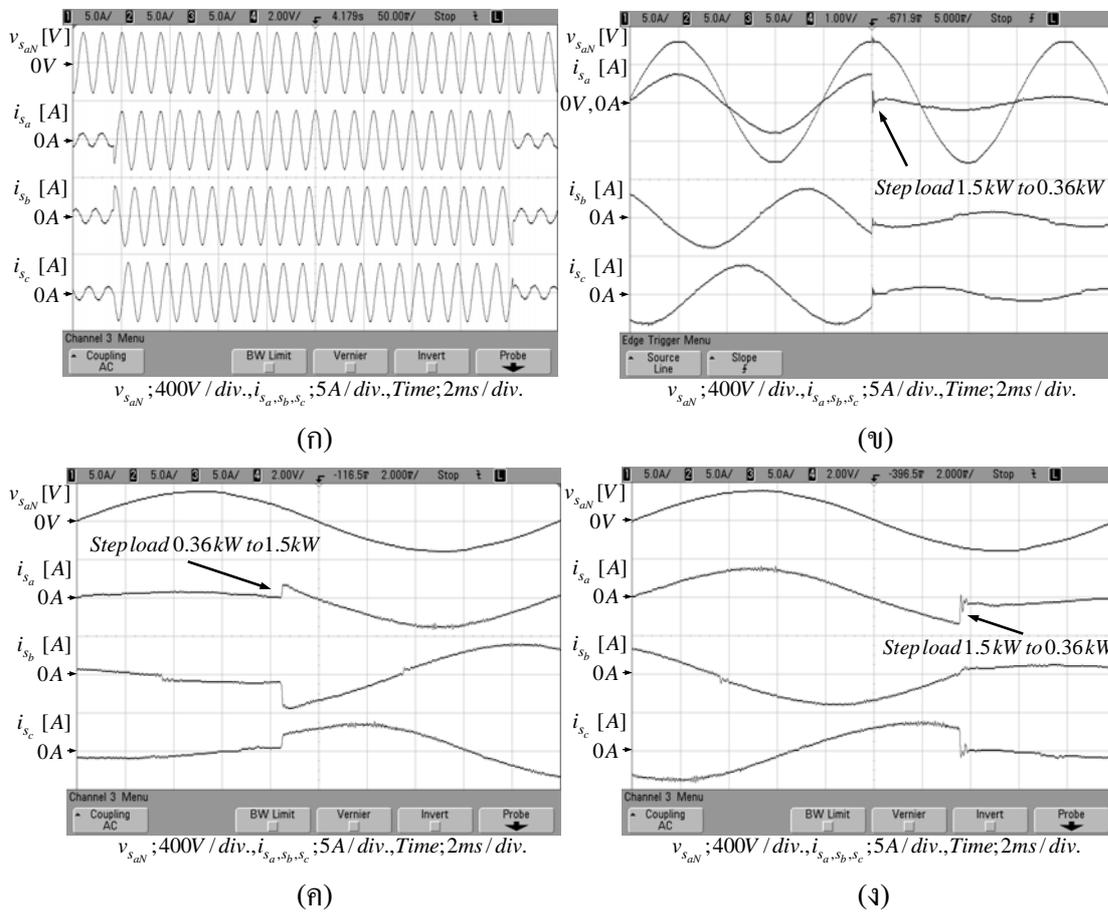


v_o ; 10V / div., i_{load} ; 10A / div., Time; 10ms / div.

(ง)

ภาพที่ 5-14 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ก) ที่พิกัดภาระ 1.5 kW (ข) เมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1.5 kW ไปที่ 0.15 kW และกลับไปที่ 1.5 kW (ค) ส่วนขยายเมื่อจ่ายภาระ 1.5 kW ไปที่ 0.15 kW (ง) ส่วนขยายเมื่อจ่ายภาระจาก 0.15 kW ไปที่ 1.5 kW

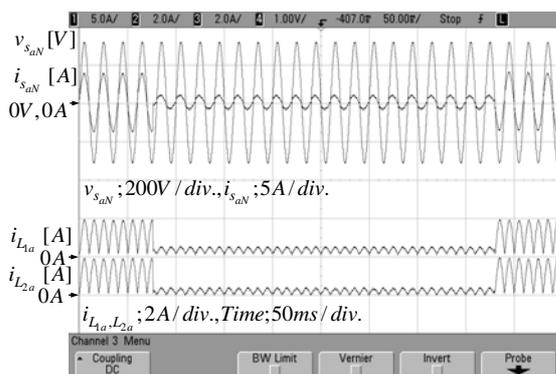
ผลการทดสอบสภาวะชั่วคราวของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจาก 100% ไปที่ 10% และกลับมาที่ 100% ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-14 ซึ่งผลที่ได้เกิดจากการวัดโดยการกลับขั้วของชุดวัดสัญญาณของแรงดันและกระแสของออสซิลโลสโคป ในภาพที่ 5-14 (ข) เมื่อได้ถูกเปรียบเทียบกับภาพที่ 5-14 (ก) แล้ว แสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงภาระในภาพกว้าง ระบบสามารถให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 100% ไปที่ 10% และกลับมาที่ 100% ภาพที่ 5-14 (ค) แสดงส่วนขยายเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 100% มาที่ 10% และภาพที่ 5-14 (ง) แสดงส่วนขยายเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 10% มาที่ 100% ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 10 ms และให้ค่า ΔV_o ของระบบไม่เกิน $\pm 2\%$



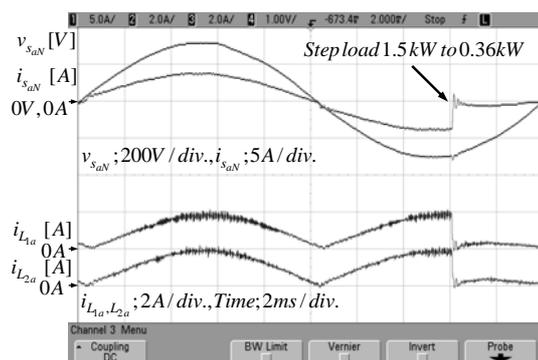
ภาพที่ 5-15 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสอินพุต (ก) สภาวะภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW และกลับมาที่ 0.36 kW (ข) สภาวะจ่ายภาระที่ตำแหน่งสูงสุดของกระแสเฟส a (ค) ส่วนขยายที่ภาระเปลี่ยนจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW (ง) ส่วนขยายที่ภาระเปลี่ยนจาก 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW

ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขสภาวะการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 100% ไปที่ 24% และกลับไปที่ 100% ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-15 ถึง ภาพที่ 5-21 ผลการทดสอบสภาวะชั่วครู่ของแรงดันและกระแสอินพุตที่ภาระเปลี่ยนแปลงจาก 360 W ไปที่ 1,500 W และกลับไปที่ 360 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-15 (ก) ภาพขยายของกระแสทั้ง 3 เฟส โดยได้รับการอ้างอิงกับแรงดันไฟฟ้าในเฟส a ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-15 (ข) ถึง (ง) ผลการทดสอบในภาพที่ 5-15 แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบให้ผลของการตอบสนองที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระ ค่า THD_i ของกระแสอินพุตที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 360 W มีค่าอยู่ที่ 5.96 %

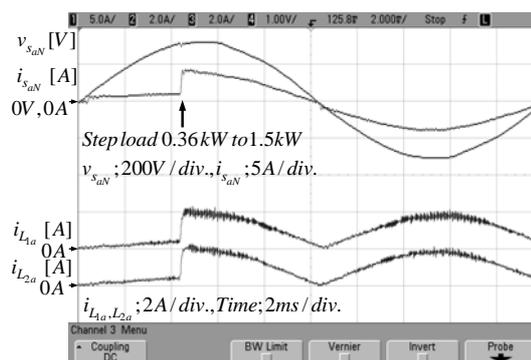
ผลการทดสอบกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของโมดูลที่ 1 และ 2 ในเฟส a เปรียบเทียบกับปริมาณแรงดันและกระแสอินพุตในเฟส a โดยที่ระบบได้รับการทดสอบภายใต้เงื่อนไขสภาวะการเปลี่ยนแปลงของภาระจาก 1,500 W ไปที่ 360 W และกลับไปที่ 1,500 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-16



(ก)

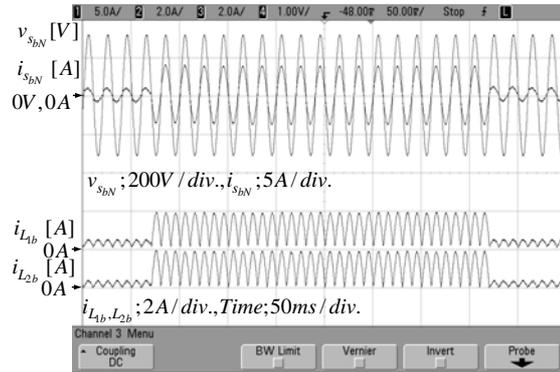


(ข)

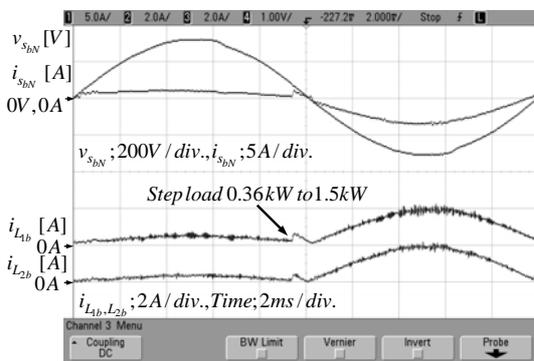


(ค)

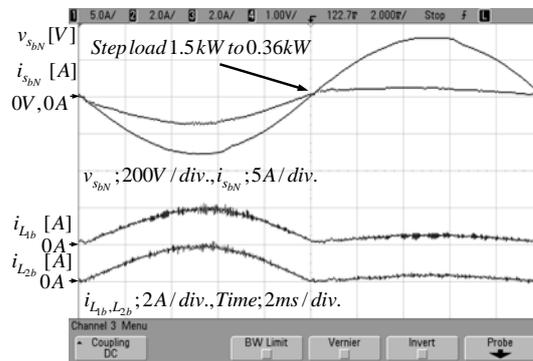
ภาพที่ 5-16 ผลการทดสอบ แรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำของโมดูลที่ 1 และ 2 ของเฟส a (ก) ผลตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW และกลับไปที่ 1.5 kW (ข) ส่วนขยายที่ 1.5 kW ไป 0.36 kW (ค) และ 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW



(ก)



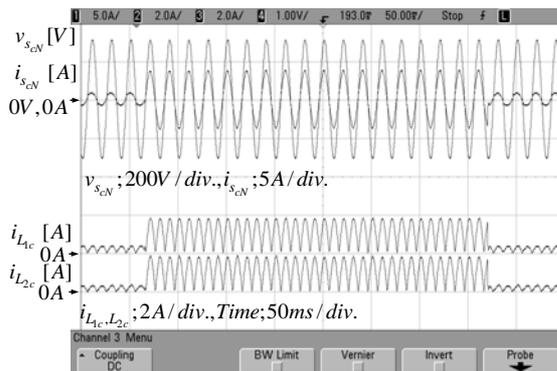
(ข)



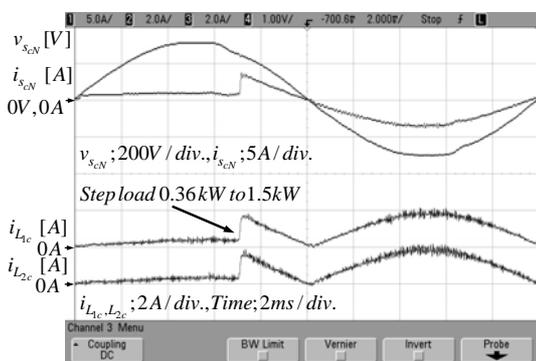
(ค)

ภาพที่ 5-17 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำของโมดูลที่ 1 และ 2 ของเฟส *b* (ก) ผลการตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW และกลับมาที่ 0.36 kW (ข) ส่วนขยายที่ 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW (ค) ส่วนขยายที่ 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW

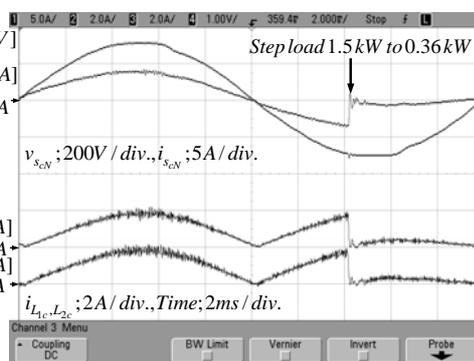
ผลของการทดสอบของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำโมดูลที่ 1 และ 2 ในเฟส *b* ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบกับปริมาณแรงดันและกระแสอินพุตในเฟส *b* โดยกำหนดให้ระบบได้รับการทดสอบอยู่ภายใต้เงื่อนไขสถานะของการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 360 W ไปที่ 1,500 W และกลับมาที่ 360 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-17 และผลการทดสอบกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของโมดูลที่ 1 และ 2 ในเฟส *C* โดยถูกเปรียบเทียบกับปริมาณแรงดันและกระแสอินพุตในเฟส *C* ภายใต้เงื่อนไขสถานะของการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 360 W ไปที่ 1,500 W และกลับมาที่ 360 W ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-18 จากภาพที่ 5-16 ถึง ภาพที่ 5-18 พบว่าระบบที่นำเสนอสามารถควบคุมให้กระแสขดลวดเหนี่ยวนำสามารถแบ่งกระแสให้มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟส และให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงภาระได้เป็นอย่างดี ระบบไม่มีการแกว่งของสัญญาณกระแสโดยสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 5-16 (ค) 5-17 (ข) และ 5-18 (ข) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 24 % ไปที่ 100 %



(ก)



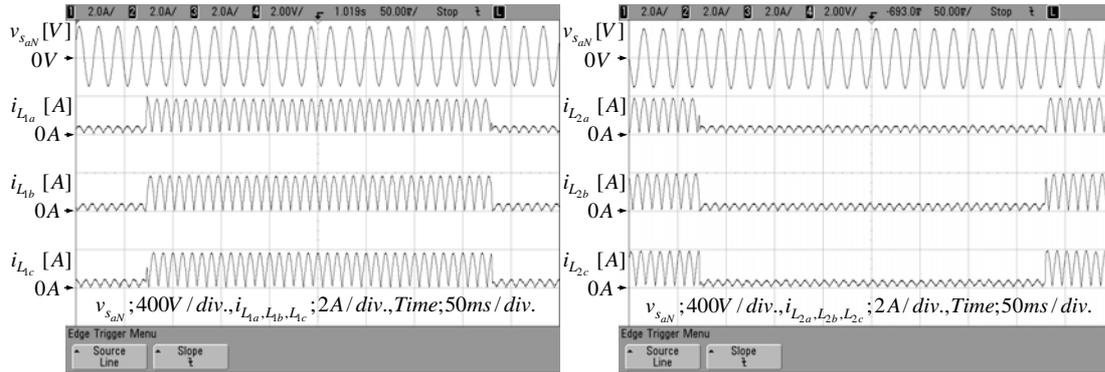
(ข)



(ค)

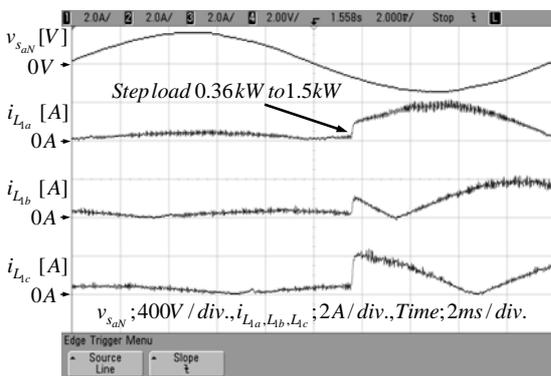
ภาพที่ 5-18 ผลการทดสอบแรงดันและกระแสอินพุต กระแสขดลวดเหนี่ยวนำของ โมดูลที่ 1 และ 2 ของเฟส C (ก) ผลการตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW และ กลับมาที่ 0.36 kW (ข) ส่วนขยายที่ 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW (ค) ส่วนขยายที่ 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW

ผลการทดสอบที่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-19 แสดงถึงกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแผงโมดูล ชุดที่ 1 และ 2 ของเฟส a b และ c ซึ่งระบบถูกทดสอบให้ทำงานอยู่ภายใต้สภาวะของการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 24 % ไปที่ 100 % และกลับไปที่ 24% ภาพที่ 5-19 (ก) และ (ข) แสดงภาพรวมของทั้งสองเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงภาระ ส่วนภาพที่ 5-19 (ค) ถึง (ฉ) แสดงภาพขยายของการเปลี่ยนแปลงภาระภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว ซึ่งในภาพที่ 5-19 นี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าด้วยระบบของการควบคุมที่ได้ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถทำการควบคุมให้วงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสแบบซุก จำนวน 6 โมดูล ให้สามารถทำการขนานระบบเพื่อเป็นการเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าให้กับระบบเมื่อระบบมีภาระมาต่อเพิ่มมากขึ้นได้ ในขณะที่ระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังอินพุตใกล้เคียง 1 และให้ผลการตอบสนองทางพลวัตที่ดีภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

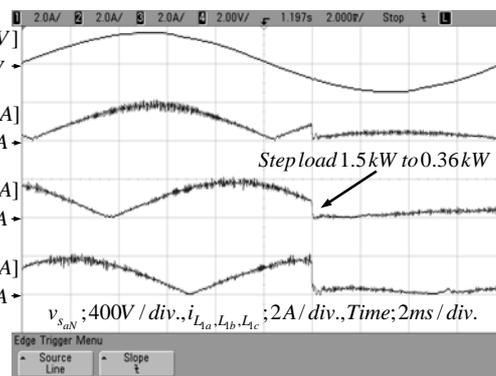


(ก)

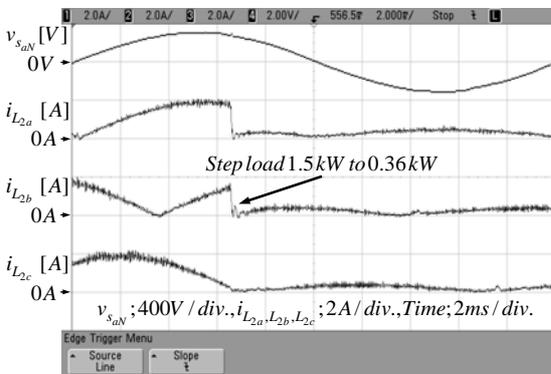
(ข)



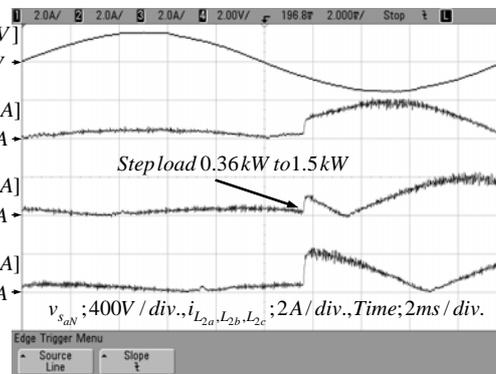
(ค)



(ง)

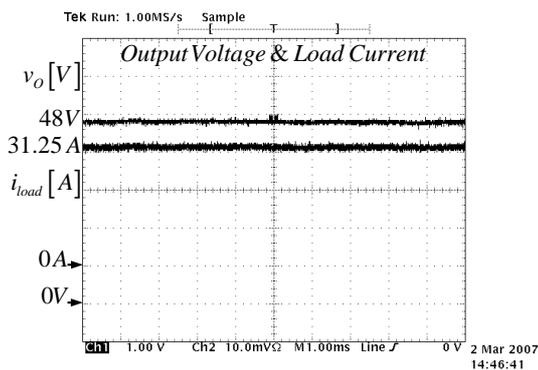


(จ)



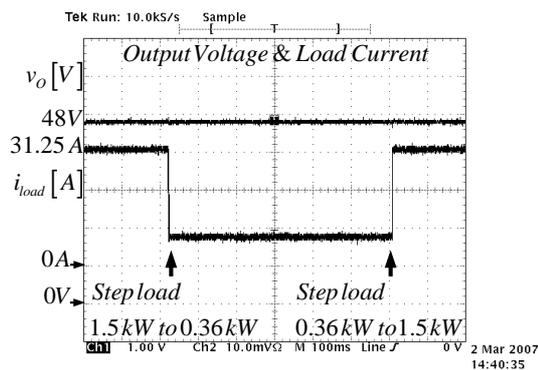
(ฉ)

ภาพที่ 5-19 ผลการทดสอบกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแผงโมดูลชุดที่ 1 และ 2 ของเฟส *ab* และ *c*
 (ก) ผลการตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW และกลับไปที่ 0.36 kW ของแผงโมดูลชุดที่ 1 (ข) ผลตอบสนองเมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW และกลับไปที่ 1.5 kW ของแผงโมดูลชุดที่ 2 (ค)-(ง) ส่วนภาพขยายของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแผงโมดูลในชุดที่ 1 (จ)-(ฉ) ภาพขยายของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำของแผงโมดูลในชุดที่ 2



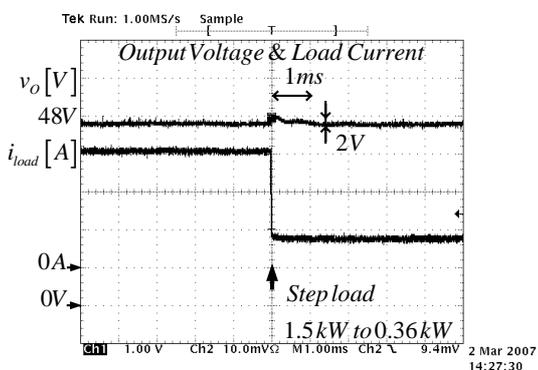
v_o ; 10V / div., i_{load} ; 10A / div., Time; 100ms / div.

(ก)



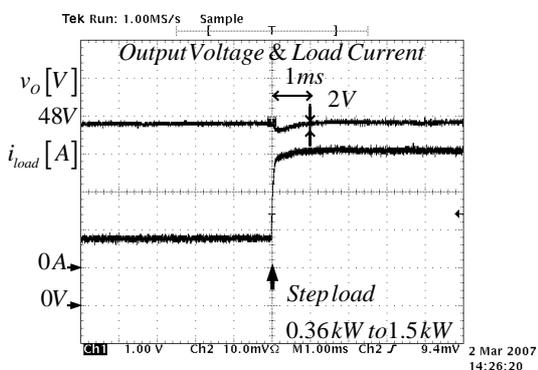
v_o ; 10V / div., i_{load} ; 10A / div., Time; 100ms / div.

(ข)



v_o ; 10V / div., i_{load} ; 10A / div., Time; 1ms / div.

(ค)



v_o ; 10V / div., i_{load} ; 10A / div., Time; 1ms / div.

(ง)

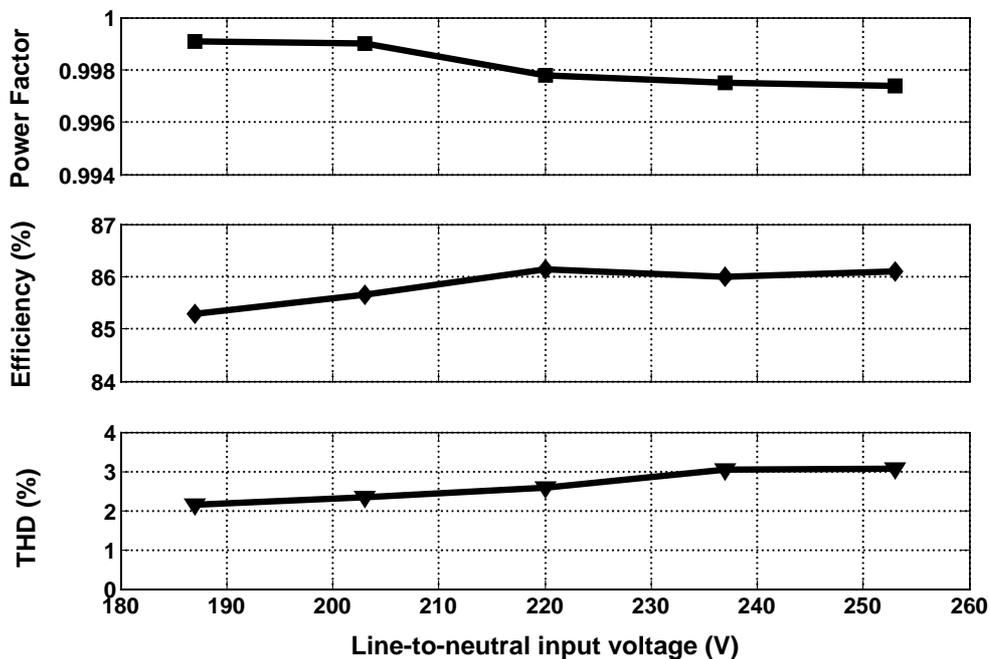
ภาพที่ 5-20 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตและกระแสภาระ (ก) ที่พิกัดภาระ 1.5 kW (ข) เมื่อภาระเปลี่ยนแปลงจาก 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW และกลับไปที่ 1.5 kW (ค) ส่วนขยายเมื่อจ่ายภาระ 1.5 kW ไปที่ 0.36 kW (ง) ส่วนขยายเมื่อจ่ายภาระจาก 0.36 kW ไปที่ 1.5 kW

ผลการทดสอบที่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-20 (ก) ถึง (ง) วัดได้จากสภาวะที่กำหนดให้มีกรกลับหัวของสายสัญญาณที่ออสซิลโลสโคป ภาพที่ 5-20 (ข) แสดงผลการทดสอบของระบบที่นำเสนอภายใต้การเปลี่ยนแปลงภาระจาก 1,500 W ไปที่ 360 W และกลับไปที่ 1,500 W ระบบให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้เป็นอย่างดีเมื่อทำการเปรียบเทียบกับภาพที่ 5-20 (ก) ให้สังเกตภาพที่ 5-20 (ค) และ (ง) ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแรงดันของแบตเตอรี่กระแสตรงเอาต์พุตสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วภายใน 1 ms ระบบให้ค่า $\pm \Delta V_o$ ไม่เกิน 2 V ดังนั้นจึงพอที่จะสามารถสรุปได้ในเบื้องต้นนี้ว่าการทดสอบการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ภายใต้ข้อกำหนดเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 1,500 W (100%) ไปที่ 360 W (24%) และกลับไปที่ 1,500 W (100%) ให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ

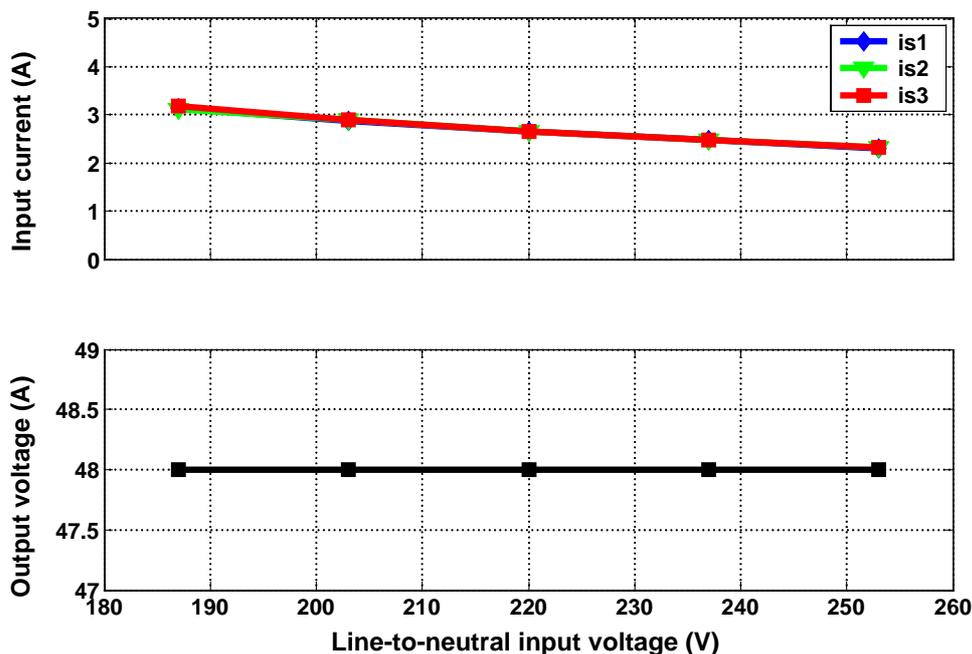
5.4.3 การทดสอบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ ในตอนนี้ ผลของการทดสอบสมรรถนะของระบบการขนานวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ได้ถูกนำเสนอ ในเทอมของกำลังไฟฟ้าในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟส กระแสอินพุต แรงดันเอาต์พุต กระแสภาระ ตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพ ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมของกระแสอินพุตและมาตรฐาน IEC 1000-3-2 class A limits ปริมาณทั้งหมดถูกวัดโดยใช้ Digital Power Meter YOKOGAWA โมเดล 2531 A การทดสอบสมรรถนะของระบบนี้ได้แบ่งเงื่อนไขของการทดสอบไว้ 2 สถานะคือ

1. สถานะเมื่อระบบปรับแรงดันไฟฟ้าอินพุตจาก 187 V ไปที่ 253 V ขณะที่ระบบกำลังทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัด 1,500 W
2. สถานะเมื่อระบบปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจาก 1,500 W ไปที่ 120 W ในขณะที่ระบบถูกกำหนดให้ $V_{sN} = 220$ V และ $V_o = -48$ V

ผลของการทดสอบสมรรถนะของระบบที่นำเสนอภายใต้เงื่อนไขสถานะของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับถูกนำเสนออยู่ในภาพที่ 5-21 ถึงภาพที่ 5-23



ภาพที่ 5-21 ผลการทดสอบ ค่าตัวประกอบกำลัง ค่าประสิทธิภาพและค่า THD_i ของกระแสอินพุต เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงระดับของพิกัดแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับจาก $V_{smin} = 187$ V ไปที่ $V_{smax} = 253$ V



ภาพที่ 5-22 ผลการทดสอบ กระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับทั้ง 3 เฟส และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ

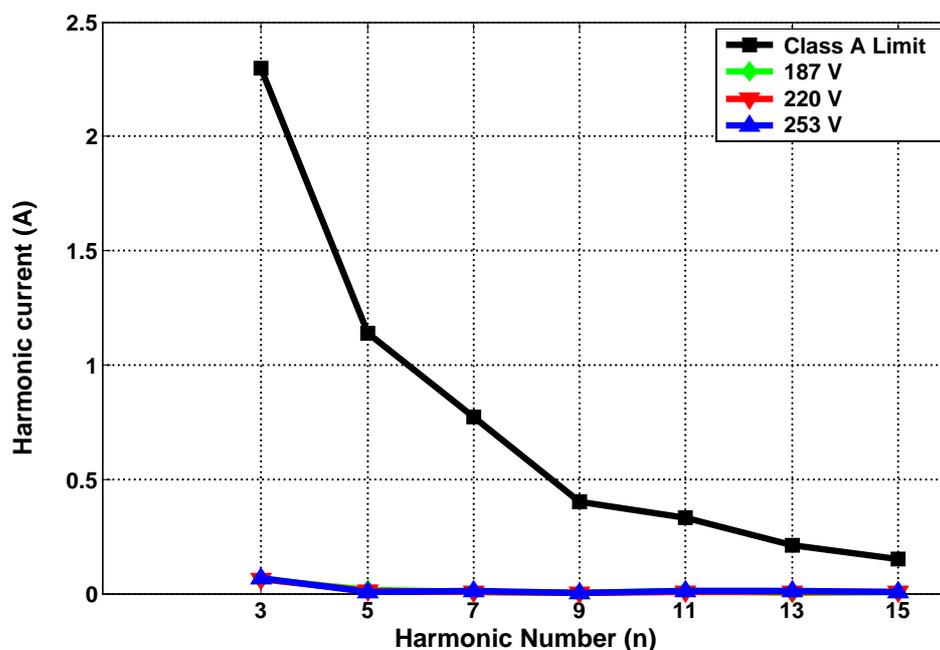
$$V_{s_{\min}} = 187 \text{ V} \text{ และ } V_{s_{\max}} = 253 \text{ V}$$

ภาพที่ 5-21 แสดงสมรรถนะหลักของระบบที่นำเสนอที่มีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุต 5 ลำดับขึ้น จากค่าต่ำสุดคือ $V_{s_{\min}} = 187 \text{ V}$ ไปจนถึงค่า $V_{s_{\max}} = 253 \text{ V}$ รูปคลื่นบนสุดในภาพที่ 5-21 แสดงปริมาณค่าตัวประกอบกำลังเมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนไป สังเกตได้ว่าที่ค่าแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับต่ำกว่าค่าพิกัด ($V_{s_{\text{norm}}} = 220 \text{ V}$) ค่าตัวประกอบกำลังของระบบที่ได้รับมีค่าสูงกว่าและในส่วนของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับที่สูงกว่าค่า $V_{s_{\text{norm}}} = 220 \text{ V}$ ระบบให้ค่าของตัวประกอบกำลังต่ำกว่า ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงที่ได้รับดังกล่าวเป็นไปตามกฎทรงกำลังไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังที่สูงกว่า 0.966 ในตลอดทั้งย่านของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอินพุต รูปคลื่นกลางแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบที่เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 85% และ 86% ตลอดทั้งย่านของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน แต่อย่างไรก็ตามระบบยังคงให้ค่าประสิทธิภาพประมาณ 86% ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า รูปคลื่นต่ำสุดแสดงความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสอินพุตสำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่เปลี่ยนแปลงไป สังเกตได้ว่า ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 2% ถึง 3% ในช่วงของแรงดันอินพุตที่เปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าค่า THD ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 3% เป็นดัง

ที่ได้คาดการณ์ไว้ว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเหตุให้ค่าตัวประกอบกำลังลดลง โดยเฉพาะเมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่ำ

กระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับของทั้ง 3 เฟส และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต ที่ระบบถูกควบคุมด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขการทดสอบให้มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-22 กราฟบนของภาพที่ 5-22 แสดงถึงปริมาณกระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส ที่มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบค่าความชันเป็นลบเมื่อระบบเพิ่มค่าแรงดันอินพุตขึ้น ซึ่งจากผลของการทดสอบดังกล่าวนี้เป็นเครื่องยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าระบบดังกล่าวทำงานเป็นไปตามกฎการทรงกำลังไฟฟ้า ส่วนเส้นกราฟด้านล่างของภาพที่ 5-22 แสดงถึงปริมาณแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกควบคุมให้คงที่ตลอดเวลาของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ

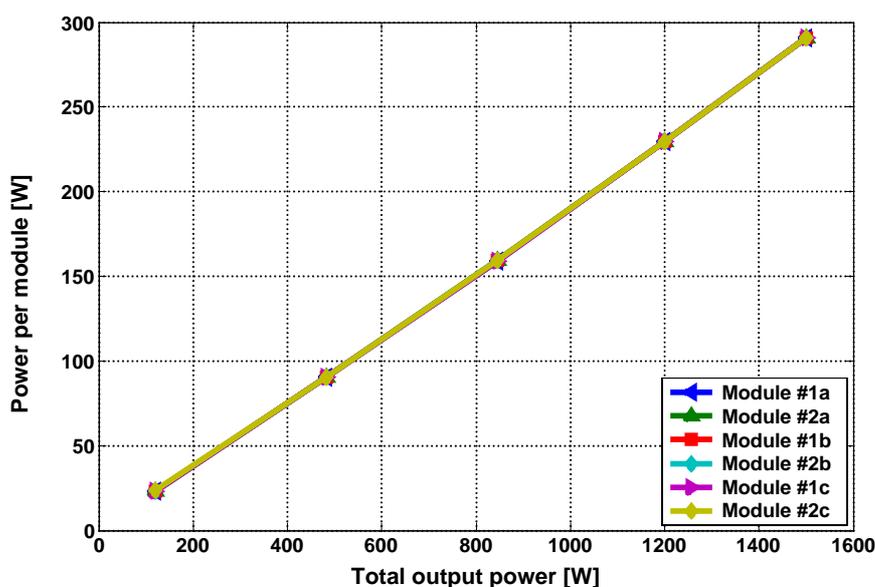
ภาพที่ 5-23 แสดงกระแสฮาร์โมนิกที่อันดับเลขคี่จาก 3 ถึง 15 ของระบบที่นำเสนอโดยปริมาณที่วัดได้ให้เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับที่เปลี่ยนแปลงไปเป็น 3 ระดับคือ จาก 187 V ไป 220 V และสิ้นสุดที่ 253 V กราฟที่ได้รับแสดงให้เห็นถึงปริมาณขนาดของกระแสฮาร์โมนิกอินพุตที่ถูกวัดได้มีค่าอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEC-1000-3-2 class A limits จากภาพสังเกตได้ว่ามีเพียงกระแสฮาร์โมนิกในอันดับที่ 3 เพียงอันดับเดียวเท่านั้นที่มีขนาดของกระแสสูงมากพออย่างมีนัยสำคัญจากจำนวนอันดับฮาร์โมนิกอื่นๆ



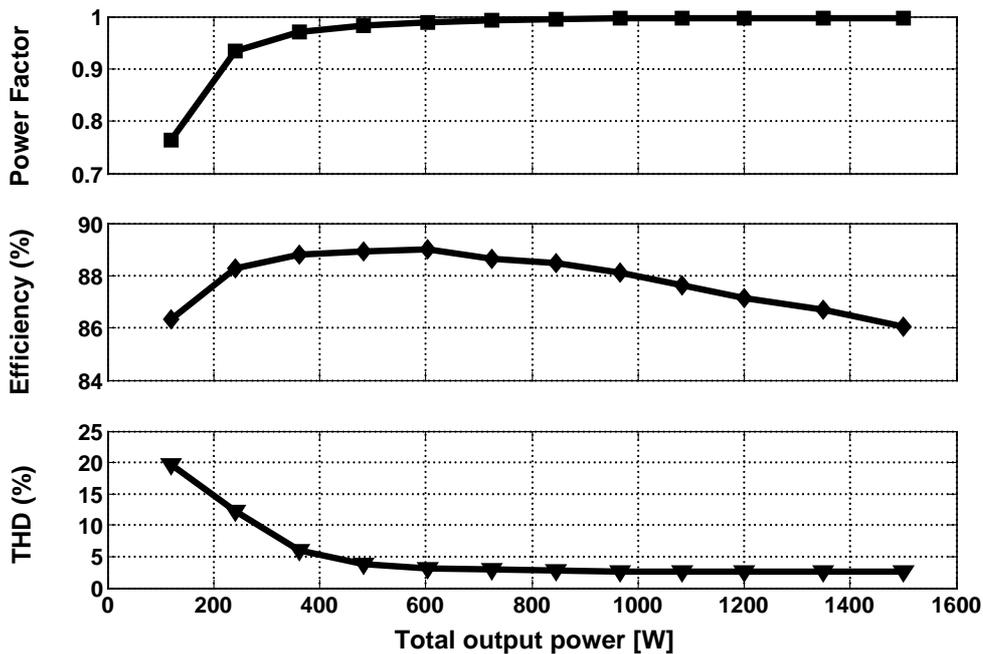
ภาพที่ 5-23 ผลการทดสอบปริมาณกระแสฮาร์โมนิกในสภาวะเมื่อระบบที่นำเสนอถูกปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับให้มีการเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ

ในส่วนนี้ ได้แสดงผลของการทดสอบสมรรถนะของระบบภายใต้เงื่อนไขสถานะที่ 2 คือเมื่อระบบถูกกำหนดให้แรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าคงที่และจากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงระดับของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระจากระดับกำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่ 120 W ไปสู่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงที่สุดที่ 1,500 W ซึ่งผลของการทดสอบกับเงื่อนไขดังกล่าวถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-24 ถึง ภาพที่ 5-27

ผลของการแบ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสให้กับภาระบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 5-24 ระบบถูกทดสอบด้วยการเปลี่ยนแปลงภาระจากค่าต่ำสุดที่ 120 W ไปจนถึงค่าสูงสุดที่ 1,500 W ในภาพนั้นแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานแฝงของแต่ละโมดูลที่ไม่เท่ากัน ในทางปฏิบัตินั้น เราไม่สามารถควบคุมค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานแฝงภายในขดลวดเหนี่ยวนำของแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสให้มีค่าเท่ากันได้ แต่อย่างไรก็ตามระบบยังคงแสดงให้เห็นถึงผลของการควบคุมของการแบ่งกระแสในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสได้ให้มีค่าใกล้เคียงกัน ภาพที่ 5-25 แสดงสมรรถนะหลักของระบบที่ถูกนำเสนอจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่มีการเปลี่ยนแปลงไป กราฟบนสุดของภาพที่ 5-25 แสดงค่าตัวประกอบกำลังที่วัดได้เมื่อภาระเปลี่ยนแปลงไป สำหรับที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของภาระค่าตัวประกอบกำลังที่วัดได้มีค่ามากกว่า 0.99 เส้นกราฟกลางแสดงประสิทธิภาพของระบบซึ่งมีค่าอยู่ประมาณที่ 86% กราฟต่ำสุดแสดงค่า *THD* ของกระแสอินพุตที่ภาระเปลี่ยนแปลงไป ค่าของ *THD* ของกระแสอินพุตมีค่าต่ำกว่า 5% ตลอดช่วงของการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 0.4 kW จนถึง 1.5 kW

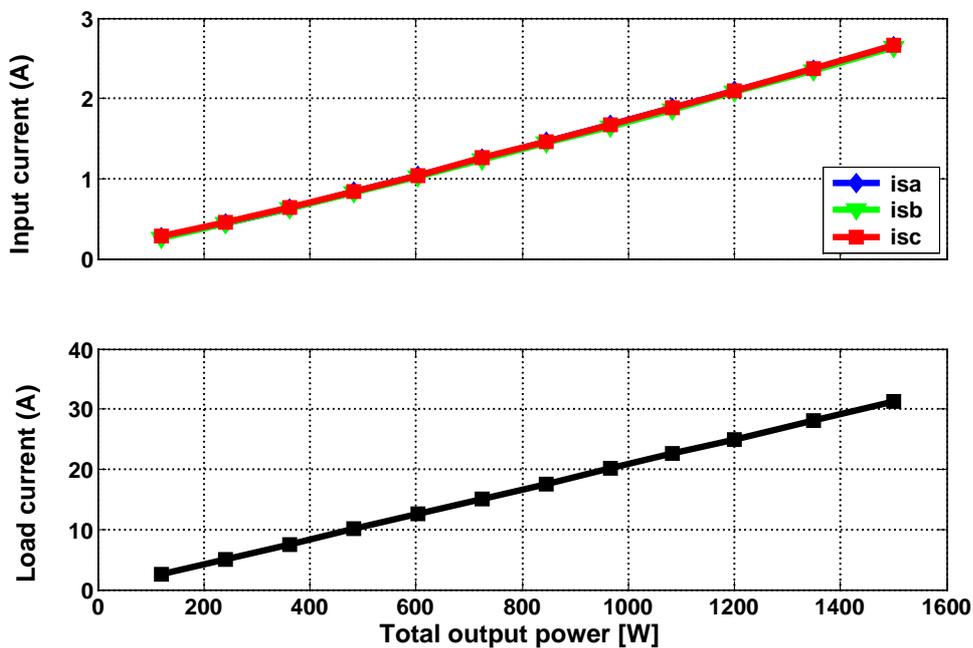


ภาพที่ 5-24 ผลของการทดสอบ การจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละ โมดูล โดยเปรียบเทียบกับปริมาณของกำลังไฟฟารวมด้านเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไป

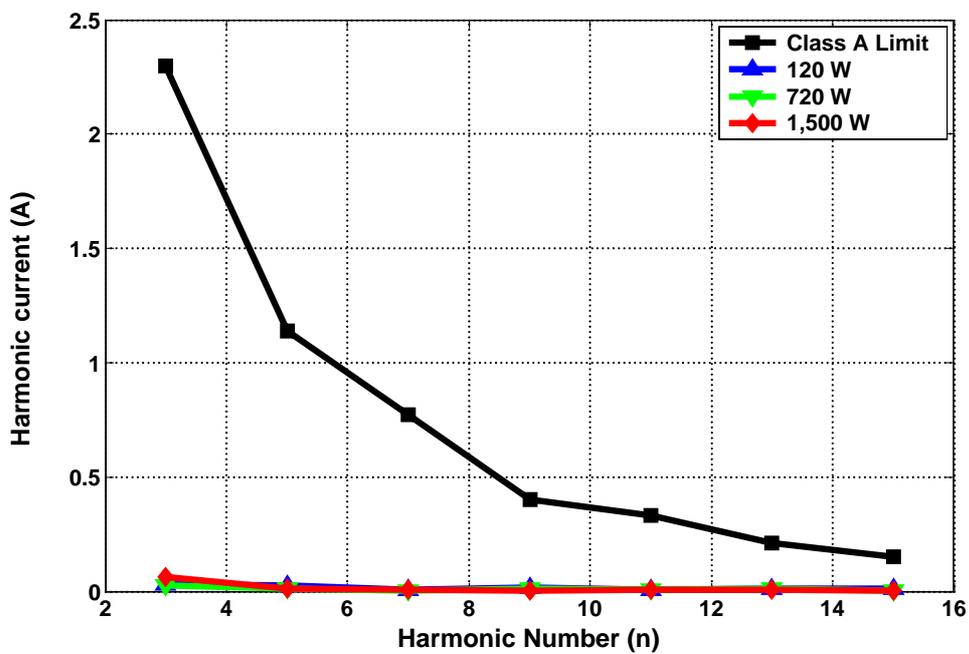


ภาพที่ 5-25 ผลการทดสอบ ค่าตัวประกอบกำลัง ค่าประสิทธิภาพและค่า THD ของกระแสอินพุต โดยเปรียบเทียบกับปริมาณของกำลังไฟฟ้ารวมของภาระที่เปลี่ยนแปลงไป

ภาพที่ 5-26 แสดงกระแสอินพุตและกระแสภาระที่ถูกทดสอบด้วยการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 120 W ไปจนถึง 1,500 W เส้นกราฟของทั้งสองปริมาณมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบขนานและตามกัน แสดงให้เห็นถึงว่าระบบที่ถูกนำเสนอ นั้นสามารถถูกควบคุมให้มีพฤติกรรมเป็นภาระเป็นแบบเชิงเส้นได้ เส้นกราฟบนของภาพที่ 5-26 แสดงถึงปริมาณของกระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตลอดย่านของการทดสอบแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ของกระแสเฟสที่เกิดความสมดุล ส่วนกราฟเส้นด้านล่างแสดงกระแสภาระที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระเพิ่มมากขึ้น นั่นก็หมายความว่าเราสามารถเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้เมื่อภาระมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่แรงดันด้านเอาต์พุตถูกควบคุมให้คงที่ ภาพที่ 5-27 แสดงกระแสฮาร์มอนิกส์ของระบบที่นำเสนอเทียบกับการเปลี่ยนแปลงภาระของระบบ มันแสดงถึงขนาดของฮาร์มอนิกส์กระแสอินพุตที่ถูกวัดเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ภาระเป็น 3 ขั้นตอน คือ 120 W 720 W และที่ 1,500 W เส้นกราฟแสดงให้เห็นถึงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้ในแต่ละอันดับนั้นมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน IEC-1000-3-2 class A limits มีเพียงกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 เท่านั้นซึ่งมีขนาดมากอย่างมีนัยสำคัญ นั่นก็หมายความว่าเราสามารถเพิ่มความสามารถของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระต่อไปได้อีกในอนาคตด้วยการเพิ่มจำนวนโมดูลในแต่ละเฟส โดยที่ระบบยังคงอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEC-1000-3-2



ภาพที่ 5-26 ผลการทดสอบ กระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส และกระแสภาระเมื่อได้มีการเปรียบเทียบกับปริมาณกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตรวมของภาระที่เปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 5-27 ผลการทดสอบ ฮาร์โมนิกส์กระแสอินพุตสำหรับระบบที่นำเสนอ

5.5 สรุปผล

การขนานระบบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกจำนวน 6 โมดูล บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าได้ถูกนำเสนอในบทนี้ โมดูลเรียงกระแสแบบซุกที่พิกัด 250 W ต่อ 1 โมดูล ซึ่งถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นระบบต้นแบบเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้ารวม 1,500 W ที่พิกัดแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง -48 V กระแสการะสูงสุด -31.25 A ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการควบคุมระบบด้วยหลักการที่ได้ถูกนำเสนอไป ผลการทดสอบระบบแสดงให้เห็นว่าระบบที่ได้ถูกนำเสนอนี้ทำงานได้เป็นอย่างดีทั้งในสภาวะคงตัวและในสภาวะชั่วคราว ระบบที่นำเสนอได้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ 3 ประการคือ สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ดี สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังอินพุตให้ใกล้เคียง 1 และสามารถควบคุมการแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสให้มีค่าใกล้เคียงกัน ระบบที่ได้นำเสนอให้ข้อดีเพิ่มเติมดังต่อไปนี้ คือ ระบบออกแบบและควบคุมง่าย ระบบให้ผลการตอบสนองทางพลวัตได้ดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างทันทีทันใด ระบบต้นแบบที่ถูกทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 1,500 W แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V ให้ค่าตัวประกอบกำลังที่มากกว่า 0.99 ประสิทธิภาพประมาณ 86 % และสามารถวัดค่า *THD* ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 3%

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

6.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบการสื่อสารสมัยใหม่ ระบบคอมพิวเตอร์หลักและเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องหลักในระบบเครือข่าย ข้อดีที่เห็นได้ชัดของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย คือ ระบบมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่มีขนาดใหญ่ในขณะที่ความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น ระบบมีการเผื่อและระบบมีข้อได้เปรียบมากกว่าระบบเชิงเดี่ยวเมื่อเทียบกับที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากัน ระบบมีความยืดหยุ่นต่อการขยายขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าไปในอนาคตเมื่อมีภาระถูกนำมาต่อเพิ่มมากขึ้นและสามารถทำการเปลี่ยนถ่ายซ่อมแซมชุดโมดูลที่ได้รับความเสียหายได้อย่างรวดเร็ว เครื่องแปลงผันส่วนหน้านี้ถูกออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการคือ แก๊วตัวประกอบกำลังและควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกกระจายออกไปในระบบบัสรวม โดยทั่วไปมีขนาดของแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตเป็น -48 V หรือ 48 V

ฟังก์ชันของการแก๊วตัวประกอบกำลังถูกบังคับให้เป็นส่วนหนึ่งในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้งานในแถบประเทศภาคพื้นยุโรปและนานาชาติเพราะเนื่องจากถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานฮาร์โมนิกส์ แต่อย่างไรก็ตาม ในตลาดการค้าขายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในอเมริกาได้มีการกำหนดคุณสมบัติของการแก๊วตัวประกอบกำลังดังกล่าวไว้ในเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าส่วนหน้าสำหรับการนำไปใช้งานในระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเช่นกัน นั่นก็หมายความว่าระบบเครื่องแปลงผันส่วนหน้าจำเป็นต้องมีภาคส่วนของเครื่องแปลงผันที่แตกต่างกัน 2 ส่วน ที่มีลักษณะการต่อในแบบอันดับ คือ ส่วนที่ต้องทำหน้าที่แก๊วตัวประกอบกำลังและส่วนที่ต้องทำหน้าที่ควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่บัลแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยที่ระบบดังกล่าวจะต้องถูกออกแบบให้มีสมรรถนะโดยรวมของระบบที่ดีดังต่อไปนี้ คือ ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังสูง ความผิดพลาดฮาร์โมนิกส์รวมกระแสอินพุตต่ำ รักษาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ดี มีผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระได้อย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพสูง ระบบมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูง ความเชื่อถือได้สูงและมีการรบกวนอันเกิดมาจากการสอดแทรกทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ

ดังนั้น จึงส่งผลให้ผู้ออกแบบและนักวิจัยมีเหตุและปัจจัยหลากหลายประการเพื่อที่จะทำการวิจัยและพัฒนาให้การควบคุมเครื่องแปลงผันส่วนหน้าดังกล่าวให้มีสมรรถนะผลตอบสนองที่ดีเมื่อถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง

อ้างอิงการวิเคราะห์จากเหตุและผลดังที่ได้กล่าวมา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอทางเลือกของเทคนิคการควบคุมที่ง่ายแต่มีประสิทธิผลกับการวิเคราะห์และออกแบบการขนานวงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโคคทางไฟฟ้าจำนวน 6 โมดูล บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมแบบสมมูลกำลังไฟฟ้า ซึ่งเทคนิคการควบคุมแบบสมมูลกำลังไฟฟ้านี้เป็นวิธีการควบคุมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยหลักของการออกแบบระบบที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีการออกแบบระบบที่เป็นเชิงเส้น ระบบมีแบบแผนของการควบคุมที่ประกอบไปด้วยลูปป้อนสัญญาณไปหน้าและลูปป้อนกลับของสัญญาณควบคุมตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งรูปแบบของการควบคุมดังกล่าวนี้เป็นอีกวิธีทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิงได้ดี เป้าประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการพัฒนาวงจรส่วนหน้าที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 1.5 kW ขณะที่ระบบให้คุณสมบัติที่ดีดังนี้คือ

1. ระบบควบคุมมีความง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อนต่อการออกแบบและสร้างวงจรต้นแบบจริง
2. ระบบกำลังสามารถแปลงแรงดันจากอินพุตไปเป็นแรงดันเอาต์พุตได้ภายในตอนเดียว
3. ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99
4. ระบบให้ค่า *THD* ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 3 %
5. ระบบให้ค่าประสิทธิภาพที่ 86 %
6. ระบบมีการตอบสนองทางพลวัตอย่างรวดเร็วและมีเวลาดำเนินตัวอยู่ภายใน 20 ms
7. ระบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 1,500 W

บทที่ 1 ได้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาสำหรับเครื่องแปลงผันส่วนหน้าที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ จากการวิเคราะห์หาเหตุและผลดังที่ได้กล่าวมา สองวงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้าจึงได้ถูกเลือกมาเพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบกัน คือ วงจรซีพิกที่ทำงานอยู่ในโหมดกระแสไหลต่อเนื่องและวงจรส่วนหน้าแบบ 2 ตอน โดยใช้วงจรแบบบรูสซึ่งทำงานอยู่ในโหมดกระแสไหลอย่างต่อเนื่องที่ระบบถูกต่ออันดับกับวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบเต็มบริด ซึ่งวงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้าแบบ 2 ตอนดังกล่าวนี้ได้รับความนิยมน้อยแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิงเพื่อที่จะแก้ไขปัญหาฟังก์ชันการแก้ไขตัวประกอบกำลังในวงจรเครื่องแปลงผันส่วนหน้าดังกล่าว

บทที่ 2 ได้นำเสนอ คุณสมบัติของภาระแบบไม่เป็นเชิงเส้น มาตรฐาน หลักการเบื้องต้นของระบบการแก้ไขตัวประกอบกำลัง วงจรต้นแบบของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังได้ที่ใช้โมดูลมาตรฐานของเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบบวสต์ บัค-บวสต์ ซีพิก และ ชุก อีกทั้งยังได้กล่าวถึงรูปแบบและโมดของการควบคุมกระแสและแรงดันของระบบวงจรเรียงกระแสที่ให้ค่าตัวประกอบกำลังสูงด้วย รูปแบบของวงจรต้นแบบและระบบควบคุมถูกจำแนกแยกแยะให้เห็นถึงข้อดีและข้อด้อยของแต่ละโมดูลเรียงกระแสและวิธีที่ใช้ในการควบคุม ส่วนสุดท้ายของตอนนี้ได้กล่าวถึงรูปแบบของระบบการกระจายแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าซึ่งแต่ละรูปแบบของโครงสร้างนั้นให้ข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันไป

บทที่ 3 ได้นำเสนอการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบมาตรฐาน โดยที่ระบบดังกล่าวถูกประกอบขึ้นเป็น 3 โครงสร้างหลักดังนี้ การขนานระบบโดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบวสต์จำนวน 3 โมดูล ระบบถูกออกแบบบนหลักการควบคุมกระแสแบบพีดีบิลิเอม การขนานระบบโดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีพิกชนิดแยกโคดทางไฟฟ้า 3 โมดูล ระบบถูกออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า และสุดท้ายเป็นการขนานระบบโดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุกชนิดไม่แยกโคดทางไฟฟ้าจำนวน 3 โมดูล ระบบถูกออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าเช่นกัน ระบบที่ถูกนำเสนอดังกล่าวให้ค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99 กระแสอินพุตปรากฏค่า *THD* ต่ำ ระบบสามารถควบคุมการแบ่งกระแสลดลดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลได้ดี ระบบทำงานอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 class A limits การขนานโมดูลเรียงกระแสแบบซีพิกและชุก ชนิด 1 เฟส โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบสมดุลกำลังไฟฟ้า ให้คุณสมบัติของการตอบสนองทางพลวัตที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระเมื่อเทียบกับหลักการออกแบบในโมดการควบคุมกระแสแบบพีดีบิลิเอม แต่อย่างไรก็ตาม การขนานวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบบวสต์ ซีพิกและชุก ปรากฏแรงดันกระแสเพื่อมเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ระบบต้องถูกออกแบบให้มีตัวเก็บประจุเอาต์พุตขนาดใหญ่เพื่อที่จะกรองแรงดันกระแสเพื่อมดังกล่าวให้ลดลง อีกทั้งระบบยังมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องแปลงผันอีก 1 ตอนเพื่อควบคุมและแปลงระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเดียวกับบัสแรงดันไฟฟ้าที่ถูกกระจายออกไป ผลที่ตามมาคือ ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง ระบบวงจรกำลังมีขนาดใหญ่ ทำให้ต้นทุนของการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้ ระบบวงจรเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟสแบบ 1 ตอน จึงเป็นทางเลือกที่ดีต่อการพัฒนาและวิจัยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต้องทำหน้าที่แก้ไขตัวประกอบกำลังและควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตต่อไป

บทที่ 4 ได้กล่าวถึง เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส แบบตอนเดียว โดยอาศัยโมดูลเรียงกระแสชนิดแยกโคคทางไฟฟ้าแบบซีพิกและชุก ระบบถูกประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างหลักดังต่อไปนี้คือ วงจรเรียงกระแสชนิด 3 เฟส 4 สาย แบบสตาร์ ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสชนิดแยกโคคทางไฟฟ้าแบบซีพิกและชุกจำนวน 3 โมดูล และวงจรเรียงกระแสชนิด 3 เฟส 3 สาย แบบเดลต้า ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซีพิกแยกโคคทางไฟฟ้าจำนวน 3 โมดูล ทั้งหมดถูกวิเคราะห์และออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า ผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ถูกวิเคราะห์และออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้านี้ คือ ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.99 ระบบสามารถควบคุมรูปร่างและการแบ่งไหลของกระแสชดวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสได้ดี ซึ่งส่งผลถึงกระแสอินพุตที่ได้มีรูปคลื่นของสัญญาณกระแสเป็นไซน์และมีเฟสตรงกันกับแรงดันอินพุตของแต่ละเฟส ยิ่งไปกว่านั้น ระบบที่นำเสนอยังคงทำงานอยู่ภายใต้สภาวะสมดุลกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ระบบดังกล่าวสามารถควบคุมให้แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วดต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระ ระบบที่นำเสนอสามารถลดขนาดของตัวเก็บประจุที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตได้ ระบบทำงานอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEC 1000-3-2 Class A Limits แต่เมื่อระบบต้องการเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่จะถูกต่อเพิ่มเติมเข้ามาทั้งในปัจจุบันและอนาคต ทำให้เหตุและปัจจัยนี้จึงกลายเป็นเงื่อนไขและปัญหาที่สำคัญสำหรับผู้ออกแบบที่ต้องค้นหาวิธีการเพื่อแก้ไขปัญหการเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าง่ายๆ แนวทางแรกเป็นการเพิ่มค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของแต่ละโมดูลเพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟารวมเพิ่มขึ้น แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดตรงที่ว่า เครื่องแปลงผันแบบซีพิกและชุกที่เลือกใช้มีความเหมาะสมกับการออกแบบให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าอยู่ในระดับกลางคือช่วงพิกัดกำลังไฟฟ้าจาก 300 W ถึง 500 W และอีกแนวทางหนึ่งคือ จะอาศัยการใช้โครงสร้างแบบขนานมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างแบบ 3 เฟส ดังกล่าว ดังนั้นในบทที่ 5 จึงจะได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานของโมดูลเรียงกระแสแบบชุกชนิดแยกโคคทางไฟฟ้า จำนวน 6 โมดูล ซึ่งได้ถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างการขนานวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยระบบจะถูกวิเคราะห์และออกแบบบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นแนวคิดของการออกแบบที่ถูกนำไปใช้เพื่อรองรับการทำงานของระบบนี้ได้

บทที่ 5 ได้กล่าวถึง การขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุกจำนวน 6 โมดูล บนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า โมดูลเรียงกระแสแบบชุกถูกออกแบบที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 250 W ต่อ 1 โมดูล ซึ่งถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นระบบต้นแบบเพื่อจ่ายกำลังไฟฟารวมเท่ากับ 1.5 kW ที่พิกัดแรงดันบัสไฟฟ้า

กระแสตรง -48 V กระแสการะสูงสุด -31.25 A ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการควบคุมระบบด้วยหลักการที่ได้ถูกนำเสนอไป ผลการทดสอบระบบแสดงให้เห็นว่าระบบที่ได้ถูกนำเสนอนี้ทำงานได้เป็นอย่างดีทั้งในสภาวะคงตัวและในสภาวะชั่วครู่ ระบบที่นำเสนอได้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ คือ สามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าจากอินพุตไปเอาต์พุตได้ภายในตอนเดียว สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ดี สามารถแก้ไขตัวประกอบกำลังอินพุตให้ใกล้เคียง 1 และสามารถควบคุมการแบ่งกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสให้มีค่าใกล้เคียงกัน ระบบที่ได้นำเสนอให้ข้อดีเพิ่มเติมดังต่อไปนี้ คือ ระบบออกแบบและควบคุมง่าย ระบบให้ผลการตอบสนองทางพลวัตได้ดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างทันทีทันใด ระบบต้นแบบที่ถูกทดสอบที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 1.5 kW แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V ให้ค่าตัวประกอบกำลังที่มากกว่า 0.99 ประสิทธิภาพประมาณ 86 % และค่า THD ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 3%

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

6.2.1 ส่วนที่ 1 ระบบการควบคุมการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ออกแบบบนหลักการควบคุมสมมูลกำลังไฟฟ้านี้ถูกสร้างขึ้นด้วยวงจรแอนะล็อก ซึ่งมีข้อดีที่เป็นประเด็นสำคัญ คือ ระบบการทำงานขนานเครื่องแปลงผันต้องกระทำอยู่ภายใต้สภาวะที่โมดูลทั้งหมดทำงานครบตามจำนวนทั้ง 6 โมดูลเท่านั้น เพราะลูปคำนวณกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสนั้นต้องคำนวณปริมาณกระแสที่ถูกต้องออกมาโดยใช้สัญญาณที่ได้คำนวณมาจากการผ่านเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ในลูปของแต่ละเฟส ซึ่งในวงจรแอนะล็อก ค่าเกณฑ์นี้ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อโมดูลใดโมดูลหนึ่งเกิดความเสียหาย ลูปควบคุมที่เป็นแอนะล็อกไม่สามารถตรวจจับได้ว่าเกิดความเสียหายขึ้นที่เฟสใดและจำนวนที่โมดูลจึงส่งผลให้เกิดการคำนวณสัญญาณการควบคุมกระแสเป็นไปอย่างไม่ถูกต้อง เป็นผลให้ระบบเกิดสภาวะกระแสเฟสไม่สมดุลทันที ซึ่งเมื่อมองตามสภาวะตามความเป็นจริงแล้วโอกาสของการเกิดความเสียหายขึ้นกับโมดูลเรียงกระแสแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสสามารถเกิดขึ้นได้แน่นอน ดังนั้นทางออกของการแก้ไขปัญหานี้สำหรับงานในอนาคต คือ ระบบควบคุมต้องถูกสร้างลงบนชุดควบคุมแบบดิจิทัล ไม่ว่าจะป็นชุดประมวลผลสัญญาณขนาดเล็กหรือเป็นชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เพราะต้องอาศัยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประมวลผลและเปรียบเทียบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นและตัดสินใจกำหนดค่าคงที่ในลูปการคำนวณกระแสให้ถูกต้องต่อไป ซึ่งผลของการกระทำดังกล่าวจะได้เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบต่อไป

6.2.2 ส่วนที่ 2 ระบบกำลังไฟฟ้าของโครงสร้างการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟสนี้ สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 1.5 kW แต่ในสภาวะ

ปกติระบบต้องจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมที่ 750 W เท่านั้น เนื่องจากว่า โมดูลเรียงกระแสแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสถูกออกแบบให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 250 W ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นที่โมดูลใดโมดูลหนึ่งในเฟสใดๆ โมดูลที่เหลือในแต่ละเฟสนั้นจะสามารถจ่ายภาระได้ตามพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ (บนเงื่อนไขสภาวะสมดุลกระแสเฟส) แนวทางการแก้ไขปัญหาี้ คือ ระบบการขนานดังกล่าวนี้ต้องมีโมดูลเรียงกระแสสำรองไว้ 1 โมดูล โดยหน้าที่หลักของโมดูลสำรองนี้ต้องสามารถต่อขนานเข้าแทนที่โมดูลใดโมดูลหนึ่งที่ได้รับ ความเสียหายจากการทำงาน โดยที่ไม่ต้องปิดกำลังไฟฟ้าของระบบ ทำให้ระบบกำลังสามารถขยับจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัด 750 W ไปที่พิกัด 1,500 W ซึ่งสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เต็มกำลังความสามารถของการออกแบบในแต่ละโมดูลนั้นก็หมายความว่า ระบบควบคุมดังกล่าวต้องถูกออกแบบและสร้างงานจริงบนชุดควบคุมแบบดิจิทัลเท่านั้นจึงจะทำให้ระบบเป็นไปตามแนวคิดที่ได้เสนอไว้

6.2.3 ส่วนที่ 3 ระบบแนวคิดของการออกแบบบนหลักการเทคนิคสมดุลกำลังไฟฟ้านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับเครื่องแปลงผันหรือระบบการแปลงผันชนิดอื่นๆ ที่ไม่ได้ถูกจำกัดไว้เพียงในเนื้อหาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้เท่านั้น เพราะฉะนั้นแนวคิดดังกล่าวจึงสามารถแพร่ขยายนำไปใช้กับระบบใดๆ ก็ได้ที่ต้องการให้ผลการตอบสนองของระบบมีสมรรถนะที่ดี

6.2.4 ส่วนที่ 4 เพื่อให้ได้ผลของการทดสอบระบบที่นำเสนออย่างสมบูรณ์ กระบวนการทดสอบระบบที่นำเสนอนี้ต้องทำเพิ่มเติมในประเด็นของการทดสอบการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 1000-4-11

เอกสารอ้างอิง

1. Tabisz, W.A., Jovanovic, M., and Lee, F.C. "Present and Future of Distributed Power Systems." Applied Power Electronics Conference and Exposition. (1992) : 11-18.
2. Bodi, F. "Distributed Power Systems (Telecommunication Power Supply)." INTELEC. (1988) : 143-150.
3. Heath, C.C. "The Market for Distributed Power Systems." Applied Power Electronics Conference and Exposition. (1991) : 225-229.
4. IEC 61000-3-2 "Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current $\leq 16A$ per Phase)." (1998) : Edition 1.2.
5. IEC 61000-3-2 "Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits-Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current $\leq 16A$ per Phase)." (2000) : Edition 2.
6. IEEE Standard 519. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems." (1993).
7. Chapman, D., James, D., and Tuck, C.J. "A High Density 48V 200A Rectifier with Power Factor Correction." INTELEC. (1993) : 188-125.
8. Heldwein, M.L., Souza, A.F., and Barbi, I. "A Simple Control Strategy Applied to Three-Phase Rectifier Units for Telecommunications Applications Using Single-Phase Rectifier Modules." Power Electronics Specialists Conference. (1999) : 795-800.
9. Alecks, F., Ford, M., and Tuffs, M. "Design of an Advanced High Power Density 1U Intelligent Rectifier." INTELEC. (2000) : 17-23.
10. Spiazzi, G., and Lee, F.C. "Implementation of Single-Phase Boost Power-Factor-Correction Circuits in Three-Phase Applications." IEEE Transactions on Industrial Electronics. vol. 44 no. 3, (June 1997) : 365-371.
11. Pinheiro, J.R., and Barbi, I. "The Three-Level ZVS PWM Converter A New Concept in High-Voltage DC-to-DC Conversion." IEEE IECON. (1992) : 173-178.
12. Pinheiro, J., and Barbi, I. "Wide Load Range Three-Level ZVS-PWM DC-to-DC converter." IEEE PESC. (1993) : 171-177.
13. Kutkut, N.H., Luckjiff, G., and Divan, D.M. "A Dual Bridge High Current DC-to-DC Converter with Soft Switching Capability." IEEE IAS Annual Meeting. (1997) : 1398-1405.
14. Canales, F., Barbosa, P., and Lee, F.C. "A Zero Voltage, Zero Current Three-Level DC/DC Converter." APEC. (2000) : 314-320.
15. Manias, S., and Ziogas, P.D. "A novel sine wave ac to dc converter with high frequency transformer isolation." IEEE Transaction on Industrial Electronic. (1985) : 430-438.

16. Manias, S. "A 3 phase inductor fed SMR converter with high frequency transformer isolation, high power density and improved power factor." IEEE PESC. (1987) : 253-263.
17. Ismail, E., and Erickson, R.W. "A single transistor three phase resonant switch for high quality rectification." IEEE PESC. (1992) : 1341-1351.
18. Ayyanar, R., Mohan, N., and Sun, J. "Single-Stage Three-Phase Power-Factor-Correction Circuit Using Three Isolated Single-Phase Sepic Converters Operating in CCM," PESC. 2000 : 353-358.
19. อุเทน คำนำน, วิบูลย์ ชื่นแขก, สุทินกร พรรณคำ, ศักดา สมกุล และ พนาฤทธิ์ เสรยสูงกุล "การขนานวงจรเรียงกระแสแบบบรูสชนิด 1 เฟส ที่ถูกควบคุมด้วยชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล" การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (2549) : 381-384.
20. Kamnarn, U., and Chunkag, V. "Power balance control technique applied to parallel AC to DC converters using single-phase SEPIC rectifier modules." Proc. of the 2004 Analog and Digital Techniques in Electrical Engineering Conference. (2004) : 57-60.
21. Kamnarn, U., and Chunkag, V. "Analysis and Design of a Parallel and Source Splitting Configuration Using SEPIC Modules Based on Power Balance Control Technique." IEEE ICIT. (2005) : 1415-1420.
22. Kamnarn, U., and Chunkag, V. "Analysis and design of a parallel CUK PFC circuit based on power balance control technique." International Power Electronics Conference. (2005) : 1155-1162.
23. Kamnarn, U., and Chunkag, V. "Analysis and design of a parallel CUK Power Factor Correction circuit based on power balance control technique." IEEEJ Transaction on Industry Application. (2005) : 533-540.
24. Kamnarn, U., and Chunkag, V. "Power balance technique of the modular three-phase ac to dc converter with fast transient response." Electric Power Systems Research. (2006) doi : 10.1016/j.epsr.2006.11.005
25. Kamnarn, U., and Chunkag, V. "A Power balance control technique for operating a three-phase ac to dc converter using single-phase CUK rectifier modules." IEEE ICIEA. (2006) : 557-562.
26. Ward, J., and Danie, J.W. "Single phase harmonic limits." PSERC EMI. (2002) : 1-7.
27. Spiazzi, G., Tenti, P., and Mattavelli, P. "High-quality rectifiers with high-frequency insulation-an overview." IEEE IAS. (1994) : 1180-1188.
28. Huai. Wei, and Batarseh, I. "Comparison of basic converter topologies for power factor correction." Southeast conference. (1998) : 348-353.
29. Sebastian, J., Jaureguizar, M., and Uceda, J., "An Overview of Power Factor Correction in Single-Phase Off-Line Power Supply Systems." IEEE IECON. (1994) : 1688-1693.
30. Kelley, A.W., Yadusky, W.F. "Rectifier design for minimum line-current harmonics and maximum power factor." IEEE Transaction on Power Electronics. 7 (1992) : 332-341.
31. Redl, R. "Power-factor correction in single-phase switching-mode power supplies-an overview." International Journal Electronics. 77 (1994) : 555-582

32. Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P. Power Electronics : Converters, Applications, and Design. New York, NY, USA, : John Wiley&Sons, Inc., 1995.
33. Jha, A.K. "A single phase single stage AC/DC converter with high input power factor and tight output voltage regulation." Progress In Electromagnetics Research Symposium. (2006) : 322-329.
34. Rossetto, L., Spiazzi, G., and Tenti, P. "Control technique for power factor correction converters." IEEE EPE. (1994).
35. Hernandez, M., Aguilar, C., Arau, J. and Uceda, J. "Comparative analysis of boost and buck-boost derived topologies used as power factor correctors." IEEE IECON. (1995) : 335-340.
36. Wang, J., Dunford, W.G., and Mauch, K. "A comparison between two proposed boost topologies and conventional topologies for power factor correction." IEEE IAS. (1996) : 1210-1217.
37. Wang, J., Dunford, W.G., and Mauch, K. "A comparison of modified boost converters with continuous inductor current mode and ripple free input current with conventional converters." IEEE IAS. (1996) : 878-885.
38. Spiazzi, G., and Mattavelli, P. "Design Criteria for Power Factor Preregulators Based on Sepic and Cuk Converters in Continuous Conduction Mode." IEEE IASA Meeting. (1994) : 1084-1089.
39. Simonetti, D.S.L., Sebastian, J., and Uceda, J. "The discontinuous conduction mode Sepic and Cuk power factor preregulators : Analysis and design." IEEE Transaction on Industrial Electronics. 44 (Oct. 1997) : 630-637.
40. Buso, S., Spiazzi, G., and Tagliavia, D. "Simplified control technique for high-power-factor flyback Cuk and Sepic rectifiers operating in CCM." IEEE Transaction on Industry Applications. 36 (Sept.-Oct. 2000) : 1413-1418.
41. Ya-Tsung Feng, Gow-Long Tsai and Ying-Yu Tzou "Digital control of a single-state single-switch flyback PFC AC/DC converter with fast dynamic response." IEEE PESC. (2001) : 1251-1256.
42. Buso, S., Spiazzi, G., and Tagliavia, D. "Simplified control technique for highpower-factor flyback Cuk anf Sepic rectifiers operating in CCM." IEEE Transaction on Industrial Electronics. 36 (2000) : 1413-1418.
43. Tanitteerapan, T., and Mori, S. "Simplified input current waveshaping technique by using inductor voltage sensing for high power factor isolated Sepic, Cuk and flyback rectifiers." IEEE APEC. (2002) : 1208-1214.
44. Lee, F.C., Barbosa, P., Peng Xu, Jindong Zhang, Bo Yang, and Canales, F. "Topologies and design considerations for distributed power system applications." Proceedings of the IEEE. (June 2001) : 939-950.
45. Sebastian, J., Uceda, J., Cobos, J.A., Arau, J., and Aldana, F. "Improving power factor correction in distributed power supply systems using PWM and ZCS-QR SEPIC topologies." IEEE PESC. (1991) : 780-791.
46. Newton, A., Green, T.C. and Andrew, D. "AC/DC power factor correction using interleaved boost and Cuk converters." Proce. of the 2000 Power Electronics and Variable Speed Drives Conference. (2000) : 293-298.

47. Zhu, G., Wei, H., Iannello, C., and Batarseh, I., "Closed-loop design for two parallel connected converters with power factor correction." IEEE PESC. (1999) : 698-703.
48. Sangsun Kim and Enjeti, P.N. "A modular single-phase power-factor correction scheme with a harmonic filtering function." IEEE Transactions on Industrial Electronics. 50 (2003) : 328-335.
49. Kim, S., and Enjeti, P.N. "Control of multiple single-phase PFC modules with a single low-cost DSP." IEEE Transactions on Industry Applications. 39 (2003) : 1379-1385.
50. Hui, S.Y.R., and Chung, H. "Paralleling power converters for AC-DC step-down power conversion with inherent power factor." IEE Conference Electric Power Application. 146 (2000) : 247-252.
51. Robinson, F.V.P., and Chunkag, V., "Parallel Connection of Single-Switch Three-Phase Power-Factor Correction Converters for Interleaved Switching." IEE Electric Power Applications. (1997) : 423-433.
52. Li, S.H., and Liaw, C.M. "Development of three-phase switch-mode rectifier using single-phase modules." IEEE Transaction Aerospace Electronic System. 40 (2004) : 70-79.
53. Eric Ho, Y.K., Hui, S.Y.R., and Lee, Y.S. "Characterization of single-stage three phase power-factor-correction circuit using modular single-phase PWM DC-to-DC converters." IEEE Transaction Power Electronics. (2000) : 235-242.
54. Bor-ren Lin and Tsang-sum Huang "Zero current switching cuk converter for power factor correction." ARTICLE Electric Power Systems Research. 41 (1997) : 91-98.
55. Spiazzi, G., and Lee, F.C. "Implementation of Single-Phase Boost Power-Factor-Correction Circuits in Three-Phase Applications." IEEE Transaction on Industrial Electronics. 44 (1997) : 365-371.
56. Hahn, J., Enjeti, P.N. and Pitel, I.J. "A New Three-Phase Power-Factor Correction (PFC) Scheme Using Two Single-Phase PFC Modules." IEEE Transaction on Industry Application. 38 (2000) : 123-130.
57. Robert W. Erickson. Fundamentals of Power Electronics Design. New York : Chapman and Hall, 1997.
58. สกล ศรีจันทร์งาม. วงจรแปลงผันไฟสลับเป็นไฟตรงแบบซัคไนโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.

ภาคผนวก ก

การออกแบบโมดูลเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโคดทางไฟฟ้า 1 เฟส

1. การออกแบบโมดูลเรียงกระแสแบบชุกชนิดแยกโคตทางไฟฟ้า 1 เฟส [57, 58]

ตารางที่ ก-1 ค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ถูกต้องใช้ในการออกแบบหม้อแปลงแยกโคต

รายละเอียด	พารามิเตอร์	หน่วย
Wire effective resistivity	ρ	Ω -cm
Total rms winding currents, referred to primary	$I_{tot} = \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{n_i} I_j$	A
Desired turns ratios	$n_2 / n_1, n_3 / n_1, etc.$	
Applied primary volt-seconds	$\lambda_1 = \int_{\text{positive portion of cycle}} v_1(t) dt$	V-sec
Allowed total power dissipation	P_{tot}	W
Winding fill factor	K_u	
Core loss exponent	β	
Core loss coefficient	K_{fe}	$W/cm^3 T^\beta$

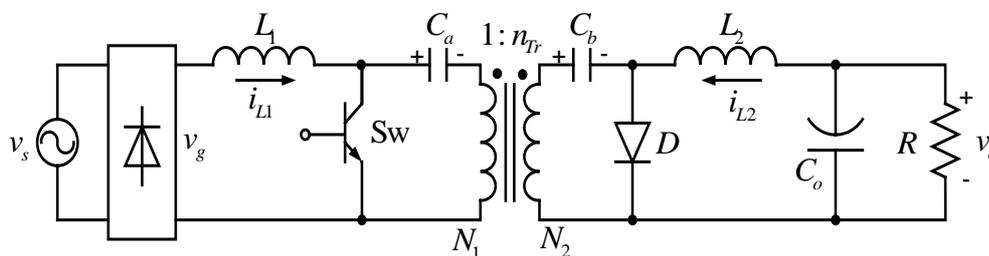
ตารางที่ ก-2 ค่ามิติของแกนที่ถูกต้องใช้ในการออกแบบหม้อแปลงแยกโคต

รายละเอียด	พารามิเตอร์	หน่วย
Core cross-sectional area	A_c	cm^2
Core window area	W_A	cm^2
Mean length per turn	MLT	cm
Magnetic path length	l_m	cm
Peak ac flux density	ΔB	Tesla
Wire area	A_{w1}, A_{w2}, \dots	cm^2

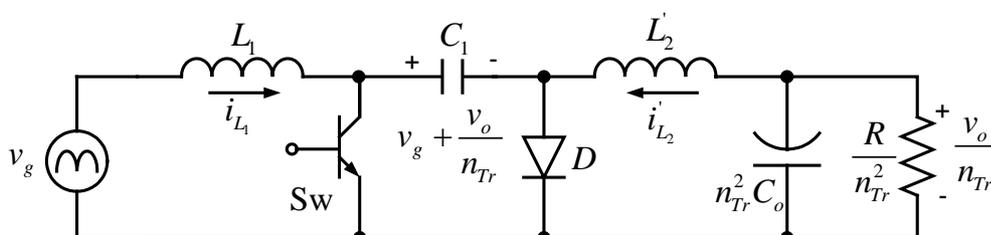
หมายเหตุ

การออกแบบหม้อแปลงด้วยวิธีนี้ไม่ได้รวมรายละเอียดของการชนวนที่ต้องการ ความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนในตัวนำ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และกรณีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง หน่วยที่ถูกต้องแสดงอยู่ในตารางที่ ก-1 และ ตารางที่ ก-2 เป็นเส้นตีพิมพ์ เพราะเนื่องจาก เป็นหน่วยที่ช่วยให้การคำนวณในกระบวนการออกแบบทำได้ง่ายและมีความเหมาะสม

1.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของโมดูลเรียงกระแสแบบซุก



ภาพที่ ก-1 วงจรโมดูลเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโคตทางไฟฟ้า



ภาพที่ ก-2 วงจรเทียบเคียงโมดูลเรียงกระแสแบบซุกชนิดแยกโคตทางไฟฟ้า

ตารางที่ ก-3 ค่าพิกัดทางไฟฟ้าของวงจรเรียงกระแสแบบซุก

รายละเอียด	พารามิเตอร์
แรงดันอินพุต	$V_g = 311 \sin(\omega t) $
แรงดันเอาต์พุต	$v_o = -48$
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตแต่ละโมดูล	$P_o = 250 \text{ W}$
ความถี่สวิตช์โดยประมาณ	$f_{sw} \approx 30 \text{ kHz}$
ภาระตัวต้านทาน	$R = 9.216 \ \Omega$
อัตราส่วนรอบ	$n_{Tr} = 0.5$
ค่าเปอร์เซ็นต์กระแสปลิว	$I_{rip} = 30 \%$

1. การคำนวณหาอัตราส่วนของการแปลงผัน

$$M = \frac{V_o}{\hat{V}_g} = \frac{48}{311} = 0.1543 \quad (\text{ก-1})$$

$$k_{crit} = \frac{1}{2(M + n_{Tr})^2} = \frac{1}{2(0.1543 + 0.5)^2} = 1.1677 \quad (\text{ก-2})$$

2. โมดูลเรียงกระแสถูกกำหนดให้ทำงานอยู่ในโหมดกระแสชดวดเหนี่ยวนำไหลอย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดให้ค่า $k_a > k_{crit}$ ดังนี้

$$k_a = \frac{2L_e}{RT_{sw}} = 2 \quad (\text{ก-3})$$

3. การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำอ้างอิง

$$L_e = \frac{RT_{sw}k_a}{2} = \frac{9.216 \times 33.33 \times 10^{-6} \times 2}{2} = 0.3072 \text{ mH} \quad (\text{ก-4})$$

4. การคำนวณหาค่ากระแสกระเพื่อม

$$I_{Lrip} = \frac{0.30 \times 2 \times P_o}{\hat{V}_g} = \frac{0.30 \times 2 \times 250}{311} = 0.4823 \text{ A} \quad (\text{ก-5})$$

5. การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำด้านเข้าและด้านออก

เมื่อ $M = 0.1543$ จะได้ค่าอัตราส่วนภาระงาน $D = 0.2358$ ดังนั้นสามารถคำนวณหาความเหนี่ยวนำอินพุตจากสมการการกระเพื่อมกระแสอินพุตได้ดังนี้

$$L_1 = \frac{\hat{V}_g DT_{sw}}{\Delta i_{L_1}} = \frac{311 \times 0.2358 \times 33.33 \times 10^{-6}}{0.4823} = 5.068 \text{ mH} \quad (\text{ก-6})$$

คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำด้านนอก

$$L_2 = \frac{n_{Tr}^2 L_1 L_e}{L_1 - L_e} = \frac{0.5^2 \times 5.068 \times 10^{-3} \times 0.3072 \times 10^{-3}}{5.068 \times 10^{-3} - 0.3072 \times 10^{-3}} = 81 \mu\text{H} \quad (\text{ก-7})$$

ในทางปฏิบัติใช้ค่าความเหนี่ยวนำอินพุตเป็น 5 mH และได้เพิ่มค่าความเหนี่ยวนำด้านนอกเป็น 1 mH เพื่อให้ระบบยังคงทำงานอยู่ภายใต้สภาวะกระแสไหลอย่างต่อเนื่อง

6. คำนวณค่าตัวเก็บประจุเชื่อมโยงส่วนกลาง

$$C_1 = \frac{1}{\omega_r^2 (L_1 + L_2)} = \frac{1}{(2\pi \times 3000)^2 (5.068 \times 10^{-3} + 81 \times 10^{-6})} = 0.55 \mu\text{F} \quad (\text{ก-8})$$

7. การคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุต ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1.5 kW โดยระบบกำหนดให้มีค่าเวลา hold-up time เท่ากับ 20 ms และแรงดันเอาต์พุตต่ำสุดที่ 15%

$$C_o = \frac{2P_o \Delta_{th}}{V_o^2 - V_{o,\min}^2} = \frac{2 \times 1500 \times 20 \times 10^{-3}}{48^2 - 40.8^2} = 93,843 \mu\text{F} \quad (\text{ก-9})$$

1.2 การออกแบบหม้อแปลงของโมดูลเรียงกระแสแบบซุก

ตารางที่ ก-4 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงความถี่สูง

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต	$P_o = 250 \text{ W}$
ความถี่สวิตช์โดยประมาณ	$f_{sw} = 30 \text{ kHz}$
ค่าอัตราส่วนภาระงาน	$D = 0.07164$
ค่าอัตราส่วนการพันหม้อแปลง	$n_{Tr} = 0.5$
ความสูญเสียกำลังไฟฟารวมที่ยอมรับได้	$P_{tot} = 2 \text{ W}$
ค่าตัวประกอบการพันหม้อแปลง	$K_u = 0.5$

หมายเหตุ

แกนหม้อแปลงที่เลือกใช้เป็นชนิด EE Ferrite Core ใช้วัสดุรหัส 6H20 ที่ประกอบด้วยค่าที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 25 kHz มีค่า $K_{fe} = 5$ และ $\beta = 2.6$

1. การคำนวณหาค่า Applied Primary Volt-Second

$$\lambda_1 = DT_{sw}V_{ca} = 0.2358 \times 33.33 \times 10^{-6} \times 359 = 2,821 \text{ V-}\mu\text{s} \quad (\text{ก-10})$$

2. การคำนวณหาค่า Applied Primary RMS Current

$$I_1 = \sqrt{D \left(\frac{I_o}{n} \right)^2 + D' I_g^2} \quad (\text{ก-11})$$

$$= \sqrt{0.2358 \times \left(\frac{5.2083}{0.5} \right)^2 + 0.7641 \times (1.1363)^2} = 5.1548$$

ดังนั้นเมื่อ $I_2 = n_{Tr} I_1 = 0.5 \times 5.1548 = 2.5774$

กระแสรวมคือ

$$I_{tot} = I_1 + I_2 = 7.73 \text{ A} \quad (\text{ก-12})$$

3. การคำนวณหาค่า Geometrical Constant เพื่อเลือกขนาดแกนหม้อแปลง

$$K_{gfe} \geq \frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2 K_{fe}^{(2/\beta)}}{4K_u (P_{tot})^{((\beta+2)/\beta)}} 10^8$$

$$K_{gfe} \geq \frac{1.724 \times 10^{-6} \cdot (2821 \times 10^{-6}) \cdot (4.4929^2) \cdot 5^{(2/2.6)}}{4(0.5)(2)^{(4.6/2)}} 10^8 \geq 28.72 \times 10^{-3} \quad (\text{ก-13})$$

จากค่า $K_{gfe} \geq 28.72 \times 10^{-3}$ นำไปเปรียบเทียบกับตารางคุณสมบัติทั่วไปของแกนเฟอร์ไรต์ โดยต้องเลือกค่าขนาดของแกนไม่ต่ำกว่าขนาด 50 mm

4. กำหนดค่าฟลักซ์สูงสุดในแกนเหล็กเมื่อใช้แกนเฟอร์ไรต์ขนาด EE55

$$\Delta B = \left[10^8 \frac{\rho \lambda_1^2 I_{tot}^2 (MLT)}{2K_u W_A A_c^3 l_m \beta K_{fe}} \right]^{\left(\frac{1}{\beta+2} \right)}$$

$$\Delta B = 10^8 \frac{1.724 \times 10^{-6} \cdot (2821 \times 10^{-6}) \cdot (7.7322^2)}{2(0.5)(0.5)} \frac{12}{(4)(3.52)^3 (12.4)} \frac{1}{(2.6)(5)}$$

$$\Delta B = 0.1074 \text{ T} \quad (\text{ก-14})$$

5. กำหนดค่ารอบของขดลวดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$$N_1 = \frac{\lambda_1}{2\Delta B A_c} 10^4 = \frac{2821 \times 10^{-6}}{2 \times 0.1074 \times 3.52} = 38 \text{ รอบ} \quad (\text{ก-15})$$

เมื่อ $N_1 = 38$ รอบ จะได้ $N_2 = 19$ รอบ

6. กำหนดค่าตัวแปรเพื่อหาขนาดของเส้นลวดที่ใช้พัน

$$\alpha_1 = \frac{N_1 I_1}{N_1 I_{tot}} = \frac{38 \times 5.1548}{38 \times 7.7322} = 0.666 \quad (\text{ก-16})$$

$$\alpha_2 = \frac{N_2 I_2}{N_1 I_{tot}} = \frac{19 \times 2.5774}{38 \times 7.7322} = 0.166 \quad (\text{ก-17})$$

8. การกำหนดหาขนาดของลวดตัวนำ

$$A_{w1} \leq \frac{\alpha_1 K_u W_A}{N_1} = \frac{0.666 \times 0.5 \times 4}{38} = 0.03505 \text{ cm}^2 \quad (\text{ก-18})$$

$$A_{w2} \leq \frac{\alpha_2 K_u W_A}{N_2} = \frac{0.166 \times 0.5 \times 4}{19} = 0.0175 \text{ cm}^2 \quad (\text{ก-19})$$

ในทางปฏิบัติได้ใช้จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิเท่ากับ 72 รอบ และขดลวดทุติยภูมิที่ 36 รอบ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากกระแสไหลที่ผิวของตัวนำ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้ลวดตัวนำเป็นทองแดงชนิด Litz wire เบอร์ 38 AWG# ของบริษัท Thai Hitachi ทนต่ออุณหภูมิได้ที่ 130°C สามารถรองรับกระแสได้ 0.1 A ต่อเส้น ที่เวลามากกว่า 2 นาที เส้นลวดถูกตีเกลียวด้วยจำนวน 50 เส้น ดังนั้นตัวนำทั้งหมดจึงสามารถรองรับกระแสได้ 5 A

1.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำด้านเข้าของโมดูลเรียงกระแสแบบซุก

ตารางที่ ก-5 ปริมาณที่ถูกกำหนดเพื่อออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

รายละเอียด	ตัวแปร	หน่วย
Wire resistivity	ρ	$\Omega - \text{cm}$
Peak winding current	I_{max}	A
Inductance	L	H
Winding resistance	R	Ω
Winding fill factor	K_u	
Maximum operating flux density	B_{max}	T

ตารางที่ ก-6 ปริมาณมิติของแกนที่ถูกแสดงในหน่วยของเซ็นติเมตร

รายละเอียด	ตัวแปร	หน่วย
Core cross-sectional area	A_c	cm^2
Core window area	W_A	cm^2
Mean length per turn	MLT	cm

1.3.1 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำด้านเข้า ที่ค่าความเหนี่ยวนำ $L = 5 \text{ mH}$ และกระแสอินพุต 1.13 A พิจารณาได้ดังนี้

1. การออกแบบขนาดของแกนหม้อแปลงความถี่สูง

$$K_g \geq \frac{\rho L^2 I_{max}^2}{B_{max}^2 R K_u} 10^8 \geq \frac{1.724 \times 10^{-6} (5 \times 10^{-3})^2 (1.607)^2 \times 10^8}{0.25^2 \times 0.5 \times 0.44} = 0.8094 \text{ cm}^5 \quad (\text{ก-20})$$

2. การคำนวณค่าระยะห่างของช่องอากาศ

$$l_g = \frac{\mu_o L I_{\max}^2}{B_{\max}^2 A_c} 10^4 = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(5 \times 10^{-3})(1.607)^2 \times 10^4}{0.25^2 \times 3.52} = 0.73 \text{ mm} \quad (\text{ก-21})$$

3. การคำนวณหาค่าจำนวนรอบ

$$n_{L1} = \frac{L I_{\max}}{B_{\max} A_c} 10^4 = \frac{5 \times 10^{-3} \times 1.607 \times 10^4}{0.25 \times 3.52} = 91.3 \text{ รอบ} \quad (\text{ก-22})$$

4. การคำนวณหาค่าขนาดตัวนำ

$$A_w \leq \frac{K_u W_A}{n} \leq \frac{0.5 \times 4}{91.3} \leq 21.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \quad (\text{ก-23})$$

เลือกใช้ขนาดตัวนำ 14 AWG#

การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำด้านเข้าได้เลือกใช้วัสดุเฟอร์ไรต์ 6H20 ของบริษัท FDK รุ่น EE55/55A ซึ่งมีค่า $AL = 6700 \text{ nH/N}^2$ ใช้ลวดตัวนำเป็นทองแดง Litz wire เบอร์ 38 AWG# ของบริษัท Thai Hitachi ทนต่ออุณหภูมิได้ที่ 130°C สามารถรองรับกระแสได้ 0.1 A ต่อเส้น ที่เวลามากกว่า 2 นาที เส้นลวดถูกตีเกลียวด้วยจำนวน 50 เส้น ดังนั้นตัวนำทั้งหมดจึงสามารถรองรับกระแสได้ 5 A พันด้วยจำนวน 120 รอบ

1.3.2 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำด้านออก ที่ค่าความเหนี่ยวนำ $L = 1 \text{ mH}$ และกระแสเอาต์พุต 5.208 A พิจารณาดังนี้

1. การออกแบบขนาดของแกนหม้อแปลงความถี่สูง

$$K_g \geq \frac{1.724 \times 10^{-6} (1 \times 10^{-3})^2 (10.4166)^2 \times 10^8}{0.25^2 \times 0.5 \times 0.46} \geq 1.3013 \text{ cm}^5 \quad (\text{ก-24})$$

2. การคำนวณค่าระยะห่างของช่องอากาศ

$$l_g = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(1 \times 10^{-3})(10.4166)^2 \times 10^4}{0.25^2 \times 3.52} = 6.19 \text{ mm} \quad (\text{ก-25})$$

3. การคำนวณหาค่าจำนวนรอบ

$$n_{L2} = \frac{1 \times 10^{-3} \times 10.4166 \times 10^4}{0.25 \times 3.52} = 118 \text{ รอบ} \quad (\text{ก-26})$$

4. การคำนวณหาค่าขนาดตัวนำ

$$A_w \leq \frac{0.5 \times 4}{118} \leq 16.949 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \quad (\text{ก-27})$$

เลือกใช้ขนาดตัวนำ 15 AWG#

ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบได้ใช้ลวดตัวนำ Litz wire เบอร์ 38 AWG# ที่เกี่ยวข้องกับจำนวน 100 เส้น เพื่อให้สามารถรองรับกระแสเฉลี่ยเอาต์พุต 5.208 A พันด้วยจำนวน 62 รอบ แกนของขดลวดเหนี่ยวนำได้เลือกใช้วัสดุเฟอร์ไรต์ 6H20 ของบริษัท FDK รุ่น EE55/55A ซึ่งมีค่า $AL = 6700 \text{ nH/N}^2$

1.4 การกำหนดค่าพิกัดของอุปกรณ์ในวงจรเรียงกระแสแบบซุก

1. กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์กำลัง

$$I_{sw} = \hat{I}_s + n_{Tr} I_{load} = 1.607 + 2.604 = 4.211 \text{ A} \quad (\text{ก-28})$$

2. แรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลัง

$$V_{sw} = \frac{V_o}{n_{Tr}} + \hat{V}_g = \frac{48}{0.5} + 311 = 407 \text{ V} \quad (\text{ก-29})$$

3. กระแสไดโอด

$$I_D = I_{load} + n_{Tr} \hat{I}_g = 5.2083 + (0.5 \times 1.607) = 6.0118 \text{ A} \quad (\text{ก-30})$$

4. แรงดันตกคร่อมไดโอด

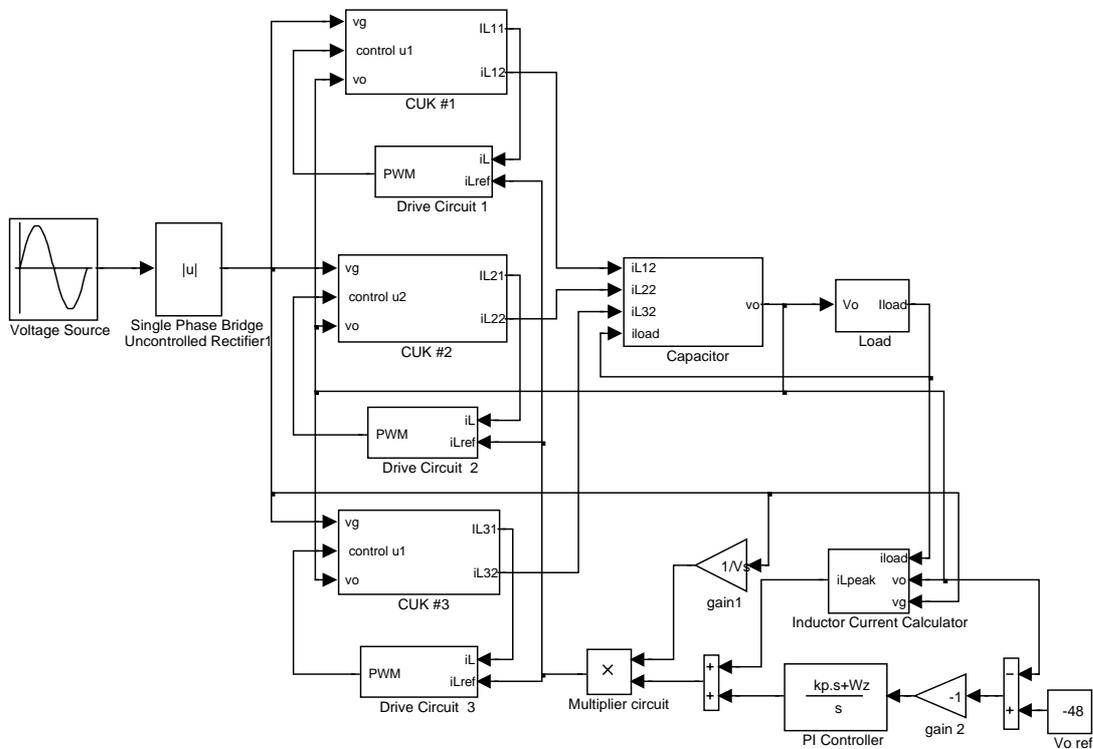
$$V_D = n_{Tr} \hat{V}_g + V_o = (0.5 \times 311) + 48 = 203 \text{ V} \quad (\text{ก-31})$$

ภาคผนวก ข

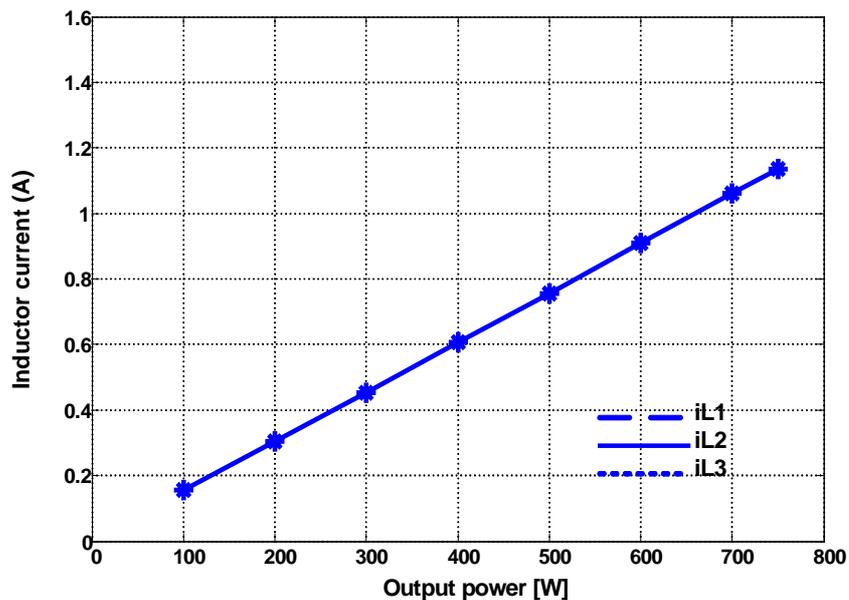
ผลการจำลองสมรรถนะของระบบที่นำเสนอ

1. การจำลองระบบขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกบนพื้นฐานหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า

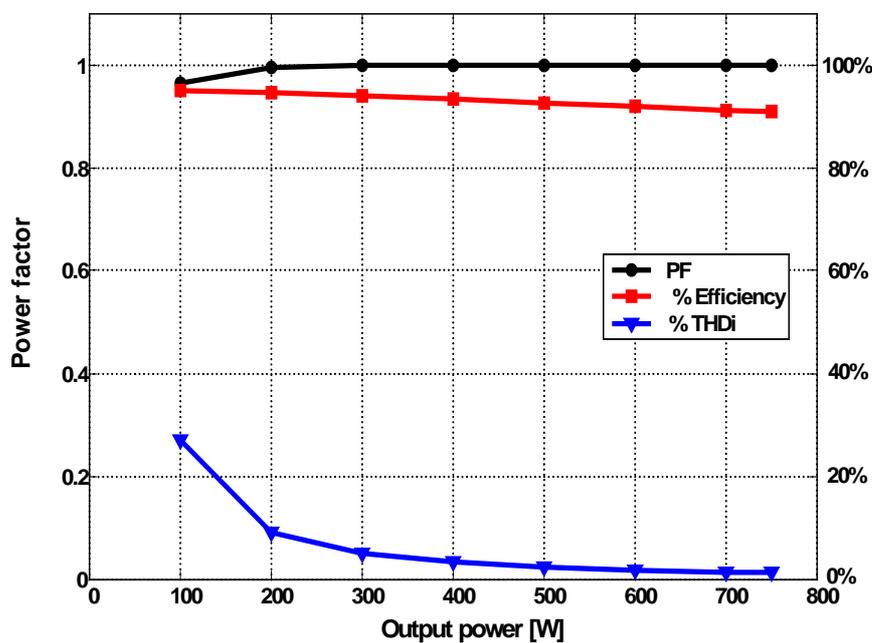
ผลของการจำลองสมรรถนะของการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุก จำนวน 3 โมดูล ได้ถูกนำเสนอในตอนนี้ ปริมาณทางไฟฟ้าที่สำคัญถูกแสดงอยู่ในเทอมของกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูล ค่าของตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของกระแสอินพุตและมาตรฐาน IEC 1000-3-2 class A limits ปริมาณทั้งหมดถูกจำลองโดยใช้โปรแกรม Simulink การจำลองสมรรถนะของระบบนี้ได้กำหนดเงื่อนไขดังนี้ คือ สภาวะเมื่อระบบปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจาก 100 W ไปที่ 750 W ในขณะที่ระบบถูกกำหนดให้พารามิเตอร์ $V_s=220$ V และ $V_o = -48$ V ภาพที่ ข-1 แสดงโมเดลของการขนานระบบเครื่องแปลงผันชนิด 1 เฟส ซึ่งถูกเขียนอยู่บนโปรแกรม Simulink ผลที่ได้จากการจำลองถูกแสดงอยู่ในภาพที่ ข-2 ถึง ภาพที่ ข-5 ผลของการแบ่งจ่ายกระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละโมดูลให้กับภาระด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าถูกแสดงอยู่ในภาพที่ ข-2 ระบบถูกจำลองด้วยการเปลี่ยนแปลงภาระจากค่าต่ำสุดที่ 100 W ไปจนถึงค่าสูงสุดที่ 750 W ระบบควบคุมสามารถแบ่งกระแสได้เท่ากันทุกโมดูล



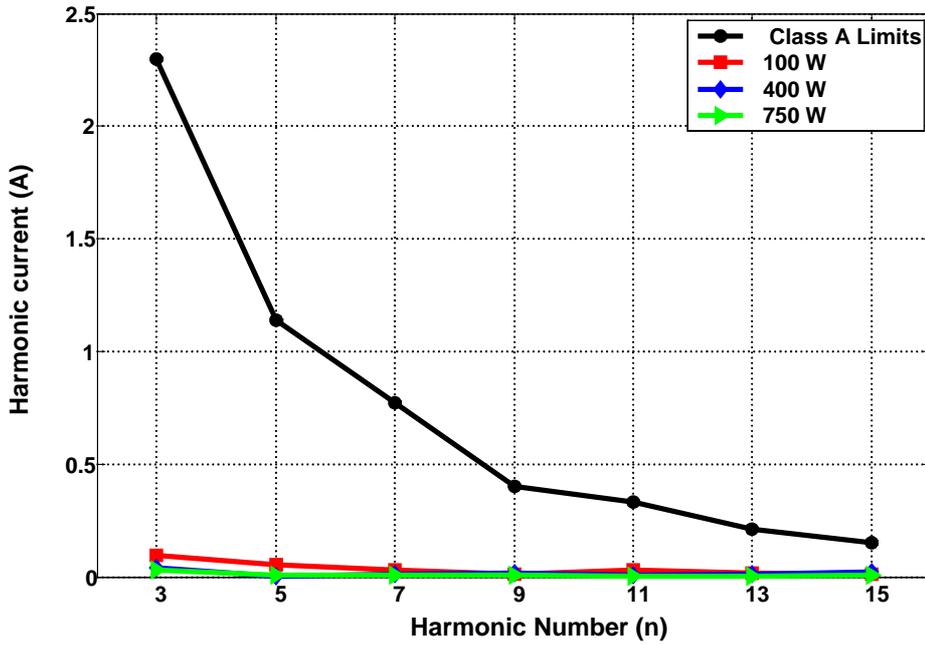
ภาพที่ ข-1 บล็อกโคแอดแกรมของโมเดลการขนานเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้โปรแกรม Simulink



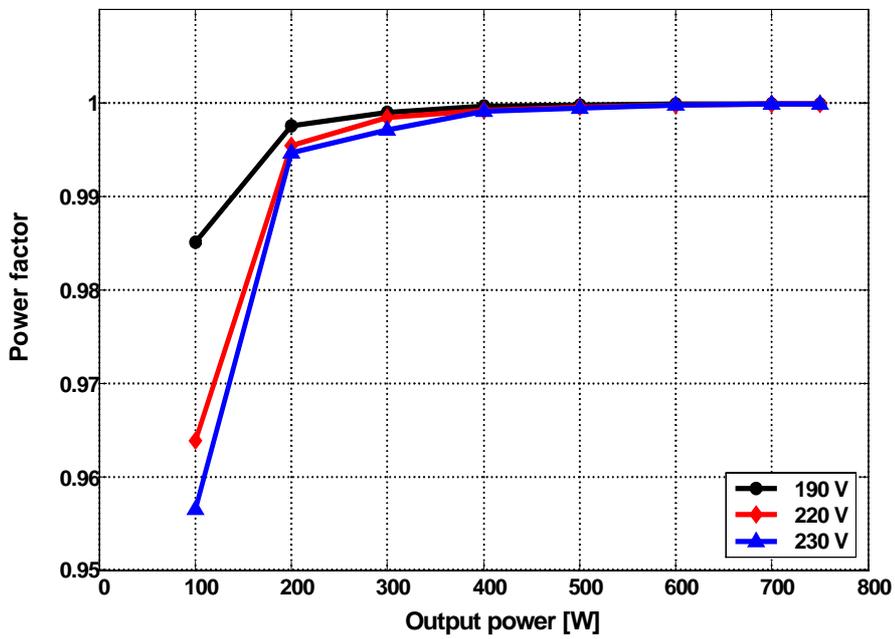
ภาพที่ ข-2 ผลการจำลองสมรรถนะของระบบ กระแสขดลวดเหนี่ยวนำในแต่ละ โมดูลเปรียบเทียบกับภาระที่เปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ ข-3 คุณสมบัติสมรรถนะหลักของระบบการขนานวงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุก (แรงดันอินพุต 220 V)



ภาพที่ ข-4 ฮาร์มอนิกกระแสอินพุตของระบบที่นำเสนอเมื่อถูกวัดที่พิกัดแรงดันอินพุต 220 V



ภาพที่ ข-5 ผลการจำลองตัวประกอบกำลังเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ภาระและแรงดันที่อินพุตเปลี่ยนแปลง

ภาพที่ ข-3 แสดงสมรรถนะหลักของระบบที่ถูกจำลอง อยู่ภายใต้เงื่อนไขการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้าถูกเปลี่ยนแปลงจาก 100 W ไปที่ 750 W เส้นกราฟบนสุดแสดงเส้นโค้งของตัวประกอบกำลังของระบบ ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง เส้นกลางแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบซึ่งมีค่าประมาณที่ 95% เส้นโค้งต่ำสุดแสดงปริมาณ *THD* ของกระแสอินพุต ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 3 % ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 750 W

ภาพที่ ข-4 แสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์จากระบบที่นำเสนอโดยปริมาณทั้งหมดถูกจำลองจากสภาวะเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของภาระที่ 100 W 400 W และที่ 750 W เส้นกราฟที่ได้แสดงกระแสฮาร์มอนิกส์ที่จำลองได้ในแต่ละอันดับนั้นมีค่าต่ำกว่าที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC-1000-3-2 Class A Limits

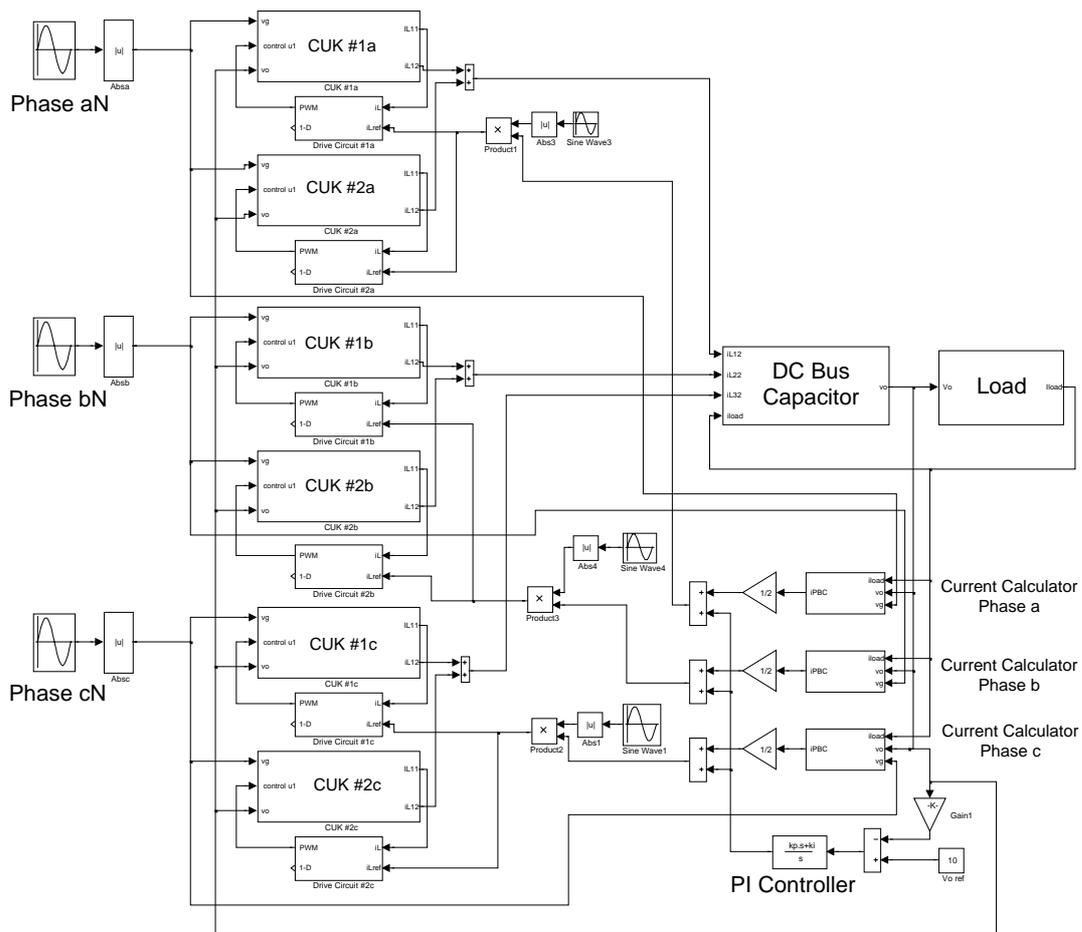
ภาพที่ ข-5 แสดงปริมาณของตัวประกอบกำลังที่จำลองได้ภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงของ 2 ตัวแปรดังนี้ คือ ภาระที่ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงไปจากค่า 100 W ไปจนถึง 750 W และแรงดันอินพุตที่ถูกปรับเปลี่ยน 3 ระดับ จากค่าต่ำสุดที่ 190 V 220 V และค่าสูงสุดที่ 230 V เป็นไปดังที่ได้คาดการณ์ไว้ การเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุตเป็นผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังลดลง โดยเฉพาะที่ค่าพิกัดภาระต่ำสุด แต่อย่างไรก็ตาม ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าและที่แรงดันไฟฟ้าอินพุตเท่ากับ 220 V ระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง

สรุปการจำลองการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกที่ไม่แยกโคตทางไฟฟ้า จำนวน 3 โมดูล บนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Simulink ได้ถูกนำเสนอในภาคผนวก ข นี้ โดยแต่ละโมดูลเรียงกระแสแบบซุกถูกออกแบบให้มีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 375 W เพื่อที่จะจ่ายกำลังไฟฟารวมให้กับภาระที่ 750 W ที่แรงดันเอาต์พุต 48 V กระแสภาระสูงสุดที่ 31.25 A โมเดลแบบ Simulink ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการควบคุมระบบด้วยหลักการที่ได้ถูกนำเสนอไป ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นการทำงานที่เป็นไปได้ด้วยดีทั้งในสภาวะคงตัวและในสภาวะชั่วคราว ระบบให้ผลการตอบสนองทางพลวัตได้ดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระอย่างทันทีทันใด ระบบให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต 750 W ที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V ให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง ประสิทธิภาพประมาณ 95 % และค่า *THD* ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 3%

ระบบการขนานเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 1 เฟส บนหลักการควบคุมแบบสมมูลกำลังไฟฟ้าสามารถยืนยันความถูกต้องของแนวคิดและวิธีการออกแบบได้จากผลของการจำลองด้วยโปรแกรม Simulink และผลที่ได้จากการทดสอบระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลที่ได้แสดงถึงระบบที่นำเสนอมีแนวโน้มและทิศทางเป็นไปตามกัน

2. การจำลองสมรรถนะของระบบการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกด้วยหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้า

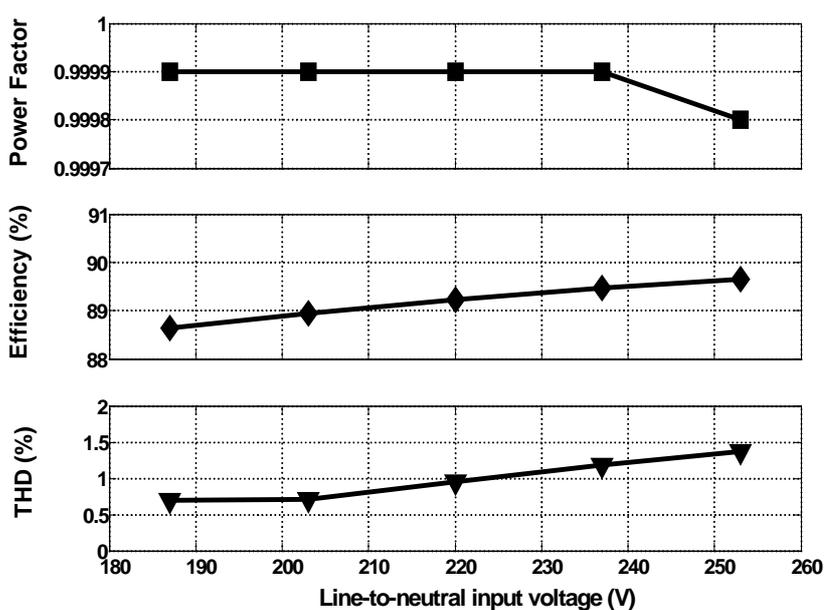
โมเดลการจำลองการขนานเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1,500 W ที่แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง -48 V ถูกแสดงในภาพที่ ข-5 ประสิทธิภาพของเทคนิคสมมูลกำลังไฟฟ้าถูกแสดงด้วยผลการจำลองโดยโปรแกรม Simulink เป้าหมายหลักของการจำลองการทำงานนี้คือ เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงกระบวนการของระบบควบคุมที่น่าเสนอ เพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมของระบบภายใต้เงื่อนไขสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ก่อนที่จะได้ดำเนินการสร้างและทดสอบระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ ผลของการจำลองสมรรถนะของระบบที่น่าเสนอภายใต้เงื่อนไขสภาวะของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับถูกนำเสนออยู่ในภาพที่ ข-7 ถึงภาพที่ ข-14



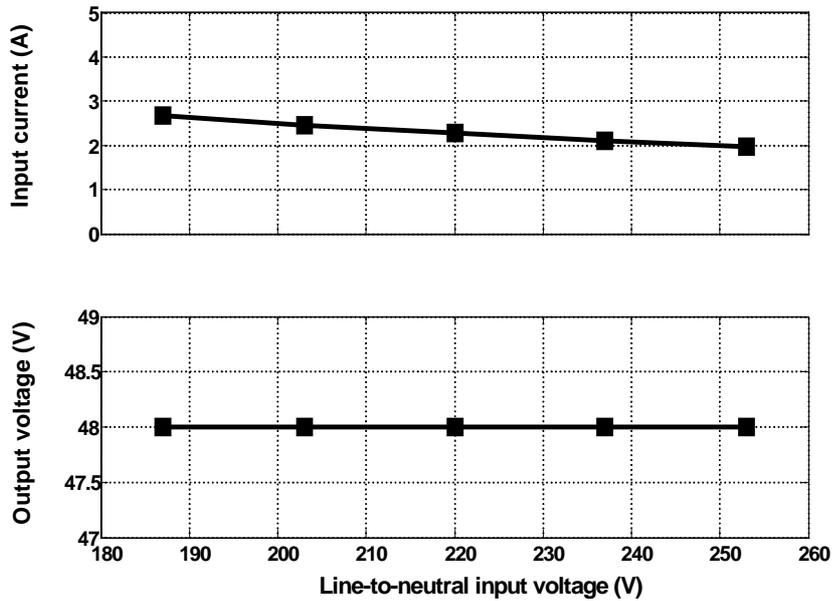
ภาพที่ ข-6 โมเดลบล็อกโคอะแกรมการขนานเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส โดยใช้โปรแกรม Simulink

ภาพที่ ข-7 แสดงสมรรถนะหลักของระบบที่มีการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุต 5 ลำดับขั้น จากค่าต่ำสุดคือ $V_{smin} = 187 \text{ V}$ ไปจนถึงค่า $V_{smax} = 253 \text{ V}$ รูปคลื่นบนสุดในภาพที่ ข-7 แสดงปริมาณค่าตัวประกอบกำลัง ที่ค่าแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับต่ำกว่าค่าพิกัด ($V_{snorm} = 220 \text{ V}$) ค่าตัวประกอบกำลังของระบบที่ได้รับมีค่าสูงกว่าและในส่วนของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับที่สูงกว่าค่า $V_{snorm} = 220 \text{ V}$ ระบบให้ค่าของตัวประกอบกำลังต่ำกว่า ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามกฎทรงกำลังไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามระบบยังคงให้ค่าตัวประกอบกำลังที่สูงกว่า 0.9997 ในตลอดทั้งย่านของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอินพุต รูปกลางแสดงค่าประสิทธิภาพของระบบที่เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 88% และ 90% ตลอดทั้งย่านของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน แต่อย่างไรก็ตามระบบยังคงให้ค่าประสิทธิภาพมากกว่า 89 % ที่พิกัดกำลังไฟฟ้า รูปคลื่นต่ำสุดเป็นค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วมของกระแสมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 0.5% ถึง 1.5% ในช่วงของแรงดันอินพุตที่เปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าค่า THD ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 1% เพราะเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเหตุให้ค่าตัวประกอบกำลังลดลง โดยเฉพาะเมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่พิกัดกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตค่าต่ำ

กระแสอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับของทั้ง 3 เฟส และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุต ภายใต้เงื่อนไขการจำลองให้มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอินพุตถูกแสดงอยู่ในภาพที่ ข-8 กราฟบนของภาพที่ ข-8 แสดงถึงปริมาณกระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส ที่มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบค่าความชันเป็นลบเมื่อระบบเพิ่มค่าแรงดันอินพุตขึ้น ซึ่งจากผลของการจำลองดังกล่าวนี้เป็นเครื่องยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าระบบดังกล่าวทำงานเป็นไปตามกฎการทรงกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ ข-7 ผลการจำลอง ค่าตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพและค่า THD ของกระแสอินพุต



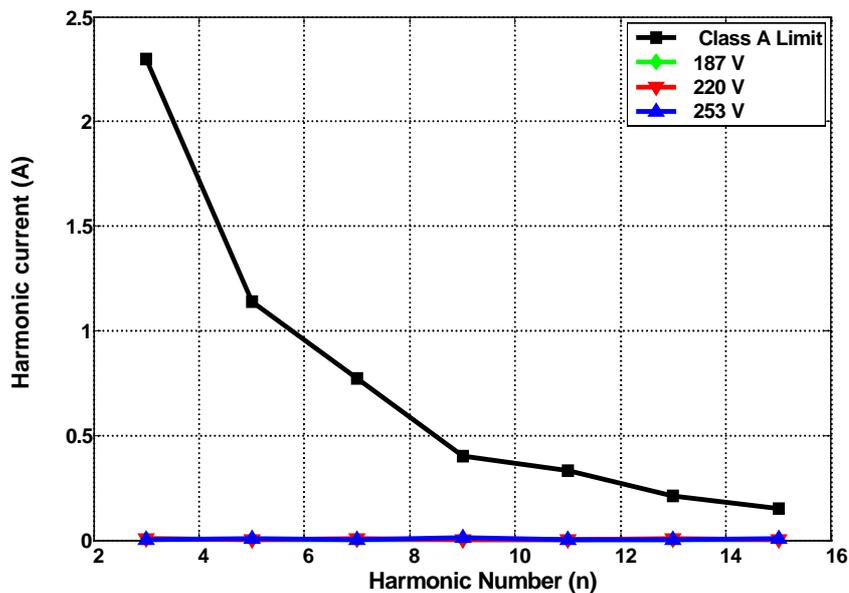
ภาพที่ ข-8 ผลการจำลอง ค่ากระแสอินพุต 3 เฟส และแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนเส้นกราฟด้านล่างของภาพที่ ข-8 แสดงถึงปริมาณแรงดันเอาต์พุตไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกควบคุมให้คงที่ตลอดเวลาของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ

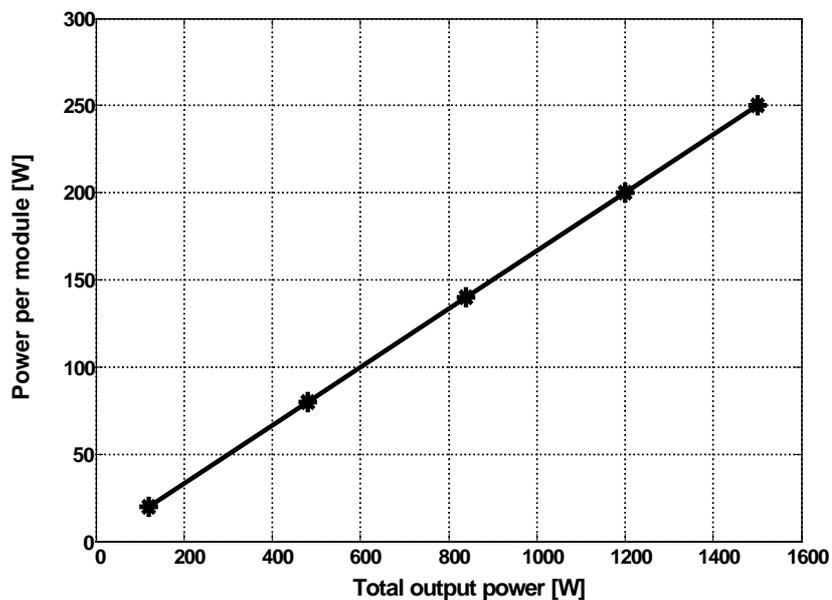
ภาพที่ ข-9 แสดงกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับเลขที่จาก 3 ถึง 15 ระบบที่นำเสนอถูกจำลองอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ 3 ระดับ คือ จาก 187 V 220 V และที่ 253 V ผลของการจำลองแสดงกระแสฮาร์มอนิกอินพุตที่ถูกวัดได้มีปริมาณอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEC-1000-3-2 class A limits

ผลของการแบ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสให้กับภาระด้วยหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้าถูกแสดงอยู่ในภาพที่ ข-10 ระบบถูกจำลองด้วยการเปลี่ยนแปลงภาระจากค่าต่ำสุดที่ 120 W ไปจนถึงค่าสูงสุดที่ 1,500 W ระบบแสดงให้เห็นถึงผลของการควบคุมของการแบ่งกระแสในแต่ละโมดูลของแต่ละเฟสได้เท่ากันทุกโมดูล

ภาพที่ ข-11 แสดงสมรรถนะหลักของระบบที่ถูกนำเสนอจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่มีการเปลี่ยนแปลงไป กราฟบนสุดของภาพที่ ข-11 แสดงค่าตัวประกอบกำลัง สำหรับที่พิกัดกำลังไฟฟ้าของภาระค่าตัวประกอบกำลังที่จำลองได้มีค่ามากกว่า 0.99 เส้นกราฟกลางแสดงประสิทธิภาพของระบบซึ่งมีค่าอยู่ประมาณที่ 86% กราฟต่ำสุดแสดงค่า *THD* ของกระแสอินพุตที่ภาระเปลี่ยนแปลงไป ค่าของ *THD* ของกระแสอินพุตมีค่าต่ำกว่า 5% ตลอดช่วงของการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 0.4 kW จนถึง 1.5 kW



ภาพที่ ข-9 ผลการจำลองปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ

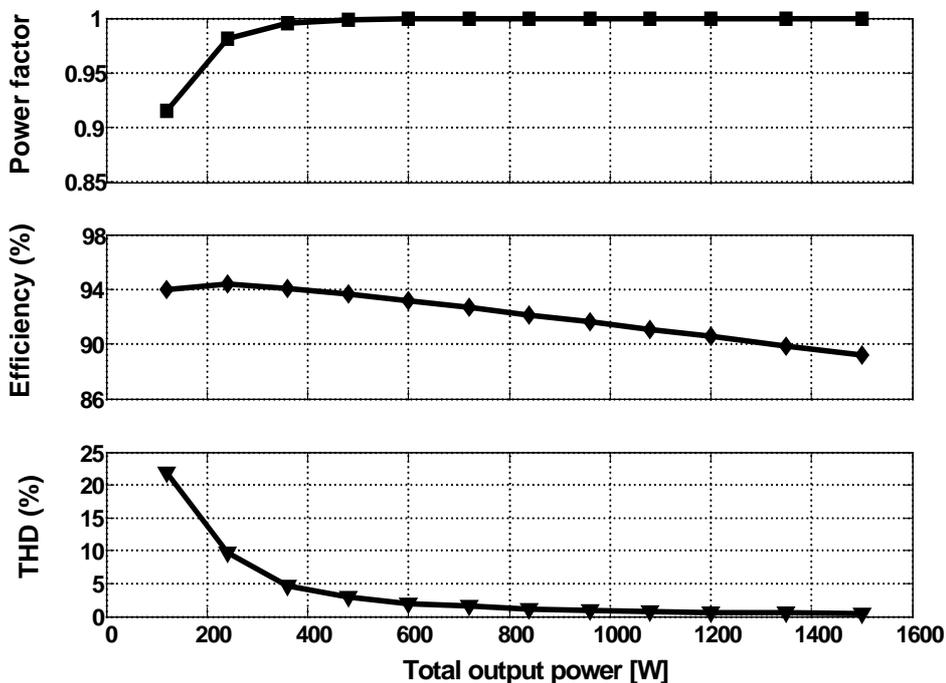


ภาพที่ ข-10 ผลการจำลอง การจ่ายกำลังไฟฟ้าของแต่ละโมดูล โดยเทียบกับกำลังไฟฟ้ารวมเอาต์พุต

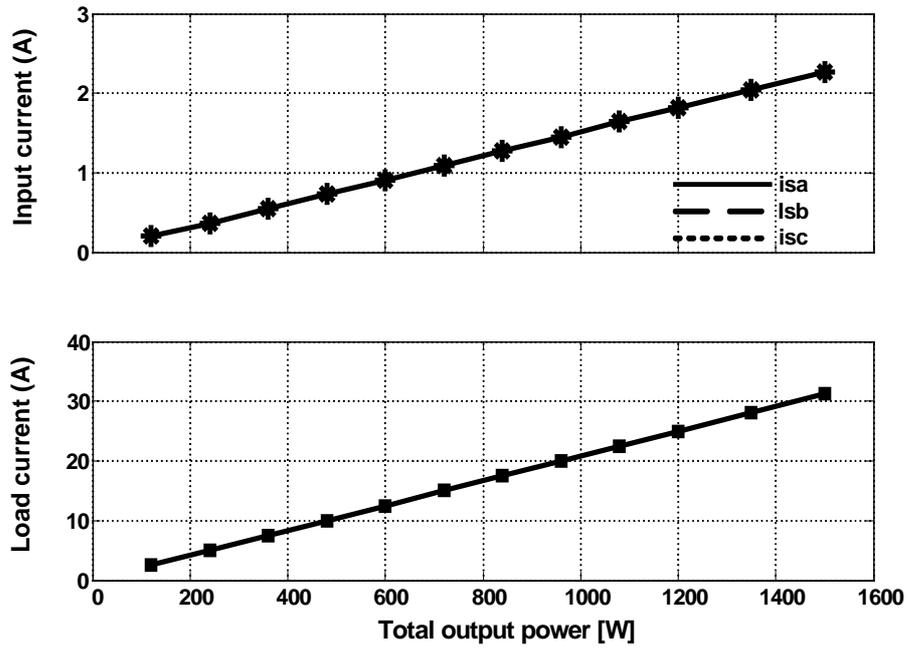
ภาพที่ ข-12 แสดงกระแสอินพุตและกระแสภาระที่ถูกจำลองด้วยการเปลี่ยนแปลงภาระจาก 120 W ไปจนถึง 1,500 W เส้นกราฟของทั้งสองปริมาณมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบขนานและตามกัน แสดงให้เห็นถึงว่าระบบที่ถูกนำเสนอ นั้นสามารถถูกควบคุมให้มีพฤติกรรมเป็น

ภาระเป็นแบบเชิงเส้นได้ เส้นกราฟบนของภาพที่ ข-12 แสดงถึงปริมาณของกระแสอินพุตทั้ง 3 เฟส โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตลอดย่านของการทดสอบแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ของกระแสเฟสที่เกิดความสมดุล ส่วนกราฟเส้นด้านล่างแสดงกระแสภาระที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระเพิ่มมากขึ้น นั่นก็หมายความว่าเราสามารถเพิ่มพิกัดกำลังไฟฟ้าให้กับระบบได้เมื่อภาระมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในขณะที่แรงดันด้านเอาต์พุตถูกควบคุมให้คงที่

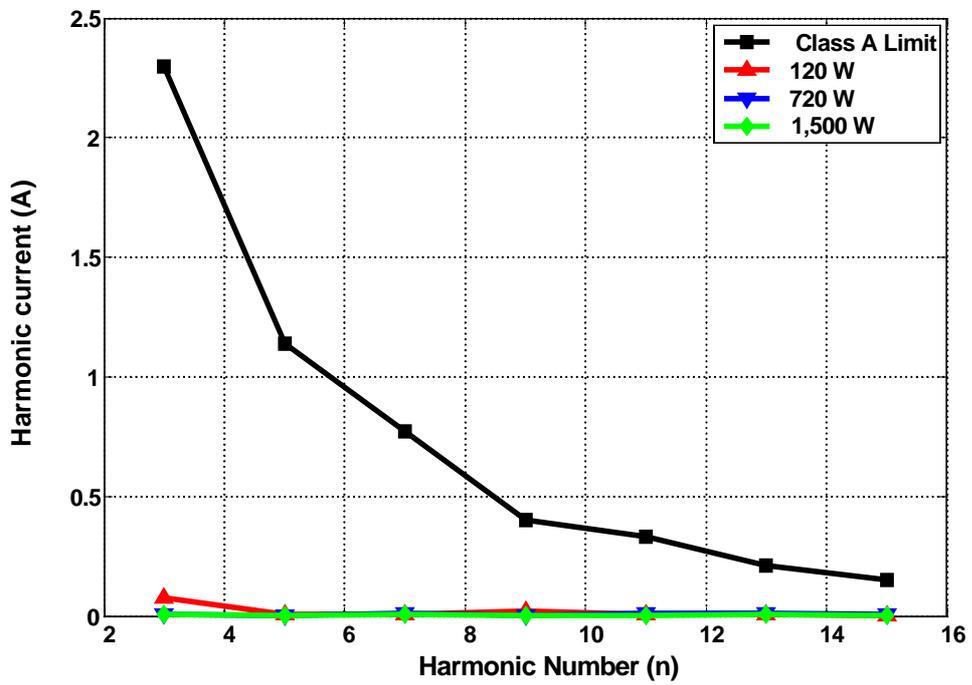
ภาพที่ ข-13 แสดงกระแสฮาร์มอนิกส์ของระบบที่นำเสนอเทียบกับการเปลี่ยนแปลงภาระของระบบ เส้นกราฟแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์อินพุตเมื่อระบบเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าภาระเป็น 3 ชั้น คือ 120 W 720 W และที่ 1,500 W เส้นกราฟแสดงถึงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่จำลองได้ในแต่ละอันดับนั้นมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน IEC-1000-3-2 class A limits มีแต่เพียงกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 เท่านั้นซึ่งมีขนาดมากอย่างมีนัยสำคัญ นั่นก็หมายความว่าเราสามารถเพิ่มความสามารถของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในการกำลังไฟฟ้าให้กับภาระต่อไปได้ในอนาคตด้วยการเพิ่มจำนวนโมดูลในแต่ละเฟส โดยที่ระบบยังคงอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEC-1000-3-2



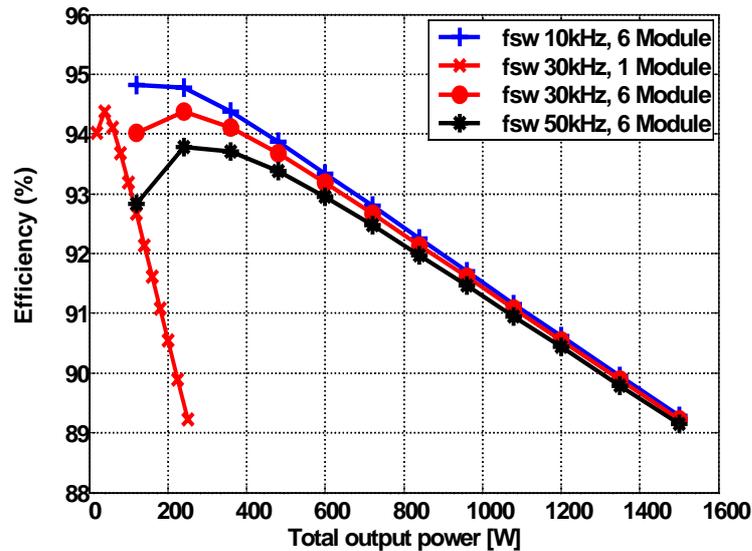
ภาพที่ ข-11 ผลการจำลอง ค่าตัวประกอบกำลัง ประสิทธิภาพและค่า THD ของกระแสอินพุต โดยเปรียบเทียบกับปริมาณของกำลังไฟฟารวมของภาระที่เปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ ข-12 ผลการจำลองกระแสคลื่นเหนี่ยวนำและกระแสภาระเมื่อเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ ข-13 ผลการจำลองกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับ 3 ถึง 15 เมื่อเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า 3 ระดับ



ภาพที่ ข-14 ผลการจำลองประสิทธิภาพเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ภาระและความถี่การสวิตช์เปลี่ยนแปลง

ภาพที่ ข-14 แสดงปริมาณประสิทธิภาพของระบบที่ได้จากการคำนวณ บนเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจาก 120 W ไปที่ 1,500 W ที่ความถี่การสวิตช์ 3 ระดับ คือ 10 kHz 30 kHz และที่ 50 kHz พร้อมกันนั้นที่ความถี่สวิตช์ 30 kHz ได้ทำการจำลองหาค่าประสิทธิภาพของระบบแต่ละโมดูลด้วยเช่นกัน จากภาพที่ ข-14 พอที่จะสรุปได้ว่า ระบบเกิดความสูญเสียขึ้นจาก 2 ส่วนคือ ที่ช่วงพิกัดกำลังไฟฟ้าจาก 120 W ไปจนถึง 800 W ความสูญเสียจากการสวิตช์มีผลกระทบต่อระบบมากที่สุดและที่พิกัดกำลังไฟฟ้าจาก 800 W ไปจนถึง 1,500 W ความสูญเสียจากการนำมีผลกระทบต่อระบบมากที่สุดโดยสังเกตได้จากช่องว่างระหว่างเส้นกราฟทั้งสามจะเล็กลงเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ภาระเพิ่มขึ้น

สรุป การจำลองการขนานวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส โดยใช้โมดูลเรียงกระแสแบบซุกจำนวน 6 โมดูล บนหลักการสมมูลกำลังไฟฟ้าได้ถูกนำเสนอในตอนนี โมดูลเรียงกระแสแบบซุกที่พิกัด 250 W ต่อ 1 โมดูล ซึ่งถูกนำมาประกอบกันขึ้นเป็นระบบต้นแบบเพื่อจ่ายกำลังไฟฟารวม 1,500 W ที่พิกัดแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง -48 V กระแสภาระสูงสุด -31.25 A ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการควบคุมระบบด้วยหลักการที่ได้ถูกนำเสนอไป ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าระบบที่ได้ถูกนำเสนอนี้ทำงานได้เป็นอย่างดีทั้งในสถานะคงตัวและในสถานะชั่วคราว ระบบให้ค่าตัวประกอบกำลังที่ใกล้เคียงหนึ่ง ประสิทธิภาพประมาณ 89 % และค่า *THD* ของกระแสอินพุตต่ำกว่า 3% ซึ่งผลดังกล่าวเป็นเครื่องยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าระบบที่นำเสนอได้ให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับระบบที่ได้จากการทดสอบจริง

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. บทความวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. Kamnarn, U., Chunkag, V. “Analysis and Design of a Parallel CUK Power Factor Correction Circuit Based on Power Balance Control Technique.” IEEJ Transaction on Industry Applications, Volume 126-D, Number 5, May 2006, Page(s) : 533-540.
2. Kamnarn, U., Chunkag, V. “Power Balance Control Technique of the Modular Three-Phase AC to DC Converter with Fast Transient Response” Electric Power Systems Research (2006), doi:10.1016/j.epsr.2006.11.005

2. บทความประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. Kamnarn, U.; Chunkag, V.; “Power balance control techniques applied to parallel AC to DC converters using single-phase SEPIC rectifier modules” IEEE TENCON (2004) : 57–60.
2. Kamnarn, U.; Chunkag, V.; “Analysis and Design of a Parallel and Source Splitting Configuration Using SEPIC Modules Based on Power Balance Control Technique” IEEE ICIT (2005) : 1415 – 1420.
3. Kamnarn, U.; Chunkag, V.; “A Power Balance Control Technique for Operating a Three-Phase AC to DC Converter Using Single-Phase CUK Rectifier Modules” IEEE ICIEA (2006) : 557-562.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายอุเทน คำน่าน
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์และออกแบบการขนานเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็น
 ไฟฟ้ากระแสตรงชนิด 3 เฟส ที่ใช้โมดูลเรียงกระแสแบบชุก ด้วยเทคนิคสมมูล
 กำลังไฟฟ้า
 สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ

นายอุเทน คำน่าน เกิดเมื่อวันที่ 20 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2517 ที่อำเภอ น้ำปาด จังหวัดอุดรดิตถ์ เป็นลูกชายคนโตจากจำนวนพี่น้อง 2 คน ของคุณพ่ออำพล คำน่านและคุณแม่ทวิวรรณ คำน่าน ในช่วงวัยประถมและมัธยมได้เติบโตและเรียนหนังสือที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จนกระทั่งย้ายเข้ามาพักอาศัยอยู่ที่อำเภอเมืองตากและจบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตตาก จังหวัดตาก เมื่อปี พ.ศ. 2535 จากนั้นเข้าเรียนต่อในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ จังหวัดเชียงใหม่ จนกระทั่งจบการศึกษาระดับ ป.ว.ส. สาขาวิชาไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2537 และต่อมาได้เข้ามาศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีที่ศูนย์กลางการศึกษาศาสนาเทคโนโลยีราชมงคล จนจบการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า เมื่อปีการศึกษา 2539

หลังจากที่สำเร็จการศึกษาได้เข้ารับราชการที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคพายัพตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 และในปีการศึกษาที่ 2542 ได้เข้ามาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาและได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าเมื่อปีการศึกษา 2545

ปัจจุบันยังคงรับราชการเป็นอาจารย์ในสังกัดของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ จังหวัดเชียงใหม่