



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

สำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

Development of Three-level Power Back-to-Back Circuit

for Renewable Energy Source

บุญยัง ปลั่งกลาง

สมชัย หิรัญวโรดม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ
สำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

Development of Three-level Power Back-to-Back Circuit for Renewable Energy Source

บุญยัง ปลั่งกลาง
สมชัย หิรัญวโรดม

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2554



สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาและออกแบบวงจรฯ	10
2.3 โครงสร้างและการทำงาน	12
2.4 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ	13
2.5 การควบคุมวงจรแปลงผันฯด้วยวิธีการควบคุมเชิงแรงดัน	18
2.6 การควบคุมวงจรแปลงผันฯด้วยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรง	19
2.7 การควบคุมวงจรแปลงผันฯด้วยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงบนพื้นฐาน SVM	20
2.8 ตัวควบคุมพีไอแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง	21
2.9 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ	24
2.10 อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	29
2.11 อุปกรณ์อื่นๆ	32
บทที่ 3 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ	39
3.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง	39
3.2 การออกแบบวงจรจำลองการทำงาน	41
3.3 การออกแบบส่วนของวงจรกำลัง	41
3.4 การออกแบบส่วนของวงจรควบคุม	42



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ	47
3.6 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ	49
3.7 การมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์	57
บทที่ 4 การทดสอบการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับฯ	59
4.1 การจำลองการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้าฯ	59
4.2 ผลการจำลองการทำงานวงจรแปลงผันฯ	61
4.3 ผลการทดสอบการทำงานวงจรแปลงผันฯ	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการวิจัย	72
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	73
5.3 ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง	75



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของแผงเซลล์แบ่งตามวัสดุและประสิทธิภาพการใช้งานในห้องทดลองฯ	9
2.2 ขนาดของกังหันลม	10
2.3 สถานะการสวิตช์ในแต่ละเฟส	25
3.1 กลุ่มเวกเตอร์แรงดัน	58
4.1 รายละเอียดของวงจรการจำลองการทำงาน	61



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทนทั่วไป	3
2.1 วงจรแปลงพลังงานและวงจรควบคุมแบบง่าย	5
2.2 กราฟแสดงเป้าหมายของยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนของประเทศไทย	6
2.3 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมในประเทศไทย	7
2.4 Solar Cell	8
2.5 โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ	12
2.6 โครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง	14
2.7 แผนภูมิการไหลของกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผัน	17
2.8 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงผันแบบ VOC	18
2.9 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงผันแบบ DPC	19
2.10 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงผันแบบ DPC-SVM	20
2.11 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอ	21
2.12 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ	22
2.13 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอที่แก้อินทิเกรตสะสมขณะที่เอาต์พุตติดขอบจำกัด	23
2.14 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ	24
2.15 สัญญาณสวิตชิงในแต่ละกลุ่ม	25
2.16 หลักการสร้างรูปแบบพีดับเบิลยูเอ็มแบบ SPWM	26
2.17 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกส์	26
2.18 การสวิตช์แบบคัสคอนทุนิวส์พีดับเบิลยูเอ็ม120	27
2.19 การสวิตช์แบบเจนเนอไรเซชันคัสคอนทุนิวส์พีดับเบิลยูเอ็ม30	27
2.20 ลักษณะการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม	28
2.21 วงจรสมมูลในอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอุดมคติ	29
2.22 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน	30
2.23 สัญลักษณ์ของไอจีบีทีและโครงสร้างไอจีบีที	31
2.24 คุณสมบัติระหว่างกระแส แรงดัน และลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ IGBT	31
2.25 Front Panel และ Block Diagram	32
2.26 Data Acquisition รุ่น NI USB-6008	33
2.27 โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST	35



สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลหลักของ ADMCF326BST	35
2.29 บอร์ด eZdsp TMS 320F2812	36
2.30 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล	36
3.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง	39
3.2 แบบจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันแบบ 3 ระดับ	41
3.3 ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 ระดับแบบ VOC	43
3.4 ส่วนการควบคุมวงจรแปลงผันแบบ VOC ในโปรแกรม MATLAB/Simulink	44
3.5 ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน	44
3.6 ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส abc เป็น d-q	45
3.7 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	45
3.8 ส่วนการปรับค่ากระแส	46
3.9 โค้ดแแกรมการแปลงแบบคาร์ค	46
3.10 โค้ดแแกรมการแปลงแบบปาร์ค	47
3.11 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ	48
3.12 แบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ	48
3.13 ซีซีลิงค์	50
3.14 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ SKM75GB063D	51
3.15 วงจรอินเวอร์เตอร์	52
3.16 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ	53
3.17 ตัวประมวลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812	55
3.18 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ CMOS Hex Buffer/Converters # CD4050B	56
3.19 SKHI 22B board	57
3.20 สถานะสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับ	57
4.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK	59
4.2 บล็อกควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง	60
4.3 บล็อกควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ	60
4.4 กระแสด้านเข้าที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดพลังงาน	61
4.5 ขยายกระแสด้านเข้าที่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที	62



สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แรงดันด้านเข้าที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดพลังงาน	62
4.7 ขยายแรงดันด้านเข้าที่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที	63
4.8 แรงดันที่ DC-Link	63
4.9 ขยายแรงดันที่ DC-Link ที่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที	64
4.10 แรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 1	64
4.11 แรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 2	65
4.12 กระแสด้านออกที่ผ่านวงจรแปลงผันฯ	65
4.13 ขยายกระแสด้านออกที่เวลา 0.1 ถึง 0.3 วินาที	66
4.14 แรงดันด้านออกที่ผ่านวงจรแปลงผันฯ	66
4.15 ขยายแรงดันด้านออกที่เวลา 0.1 ถึง 0.3 วินาที	67
4.16 รูปคลื่นแรงดันทางด้านขาออก ezDSP TMS320F2812	67
4.17 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าทางด้านขาออกของวงจรจับเกด	68
4.18 ค่าแรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแส 3 เฟส	68
4.19 ค่าแรงดันเมื่อต่อคาปาซิเตอร์	69
4.20 สัญญาณขา G1 กับ G3 เฟส A	69
4.21 สัญญาณขา G2 กับ G4 เฟส A	70
4.22 สัญญาณขา G1 กับ G2 เฟส B	70
4.23 เปรียบเทียบสัญญาณ G1 เฟส A กับ สัญญาณ G1 เฟส B	71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การคิดค้นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีขนาดเล็กและมีความเชื่อถือได้สูงได้ทำให้อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรมพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และสามารถตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมด้านการควบคุมกระบวนการผลิตได้ดี หน้าที่อีกอย่างที่สำคัญคือ การนำมาใช้เป็นอุปกรณ์แปลงผันพลังงานให้กับโหลด การแปลงผันพลังงานเช่นนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเพราะกำลังสูญเสียในสวิตช์มีค่าน้อย โดยใช้ไคโอด ทรินสเตอร์ ไอจีบีที มอสเฟต และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนางจรงแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสลับ สามระดับเพื่อใช้กับแหล่งจ่ายพลังงานทดแทนขึ้นมา เพื่อใช้เป็นต้นแบบการพัฒนางจรงแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสลับสามระดับต้นทุนต่ำ โดยอาศัยเทคโนโลยีที่หาได้ในประเทศ ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่จะทำการศึกษา วิจัย พัฒนา และสร้างจรงแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสลับสามระดับขึ้น เพื่อที่จะได้นำไปขยายผลต่อในอนาคตในเรื่องของการพัฒนาเพื่อรองรับปัญหาวิกฤตด้านพลังงาน ลดปัญหาภาวะโลกร้อนจากก๊าซเรือนกระจก อีกทั้งยังเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาบุคลากรทางด้านจรงแปลงผันพลังงาน และสร้างเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเพื่อการพึ่งพาตนเองของประเทศอย่างยั่งยืน

ในโครงการวิจัยจะมุ่งเน้นที่วิจัยในส่วนออกแบบจรงแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสลับสามระดับของแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน:แสงอาทิตย์, กังหันลม, และ เซลล์เชื้อเพลิง เพื่อทดสอบจรงแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสลับสามระดับให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีการออกแบบและคำนวณอย่างละเอียด และทำการสร้างตามทีออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนางจรงแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสลับแบบสามระดับกับแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์

1.2.2 เพื่อศึกษาและพัฒนางจรงแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสลับแบบสามระดับกับแหล่งพลังงานกังหันลม

1.2.3 เพื่อศึกษาและพัฒนางจรงแปลงผันไฟฟ้ากระแสลับเป็นไฟฟ้ากระแสลับแบบสามระดับกับแหล่งพลังงานเซลล์เชื้อเพลิง



1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

พัฒนาวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามระดับกับแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานกังหันลมขนาด และเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 100 kW

1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

จากหลักการทำงานที่มีเสถียรภาพของระบบผลิตไฟฟ้า ดังกล่าวรวมกับสภาวะการขาดแคลนพลังงานในปัจจุบัน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องสร้างระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานขึ้นมาเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนต่อไปในอนาคต

จากโครงสร้างการทำงานของระบบพลังงานทดแทนแนวทางในการทำวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การสร้างระบบผลิตไฟฟ้าขึ้นมา และระบบพลังงานทดแทนนี้จะมีระบบการจัดการแบบอัตโนมัติที่สามารถจัดการพลังงานทดแทนอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อแหล่งพลังงานส่วนใดมีใช้จะนำมาใช้และเก็บประจุไว้ที่ตัวเก็บไฟฟ้า และเมื่อพลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนไม่มีเพียงพอ ชุดแหล่งจ่ายสำรองจะเป็นตัวจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดและถ้าแบตเตอรี่ไม่มีไฟฟ้าเพียงพอ และในขณะเดียวกันถ้าแหล่งพลังงานทดแทนไม่มีเพียงพอ จากแนวความคิดของโครงการวิจัยนี้จะทำให้สามารถสร้างระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานเซลล์เชื้อเพลิงและพลังงานลมที่จ่ายโหลดได้อย่างต่อเนื่องโดยมีระบบการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพเพื่อนำพลังงานไปใช้อย่างสูงสุด องค์ประกอบหลักที่นำมาใช้งานวิจัยนี้คือ

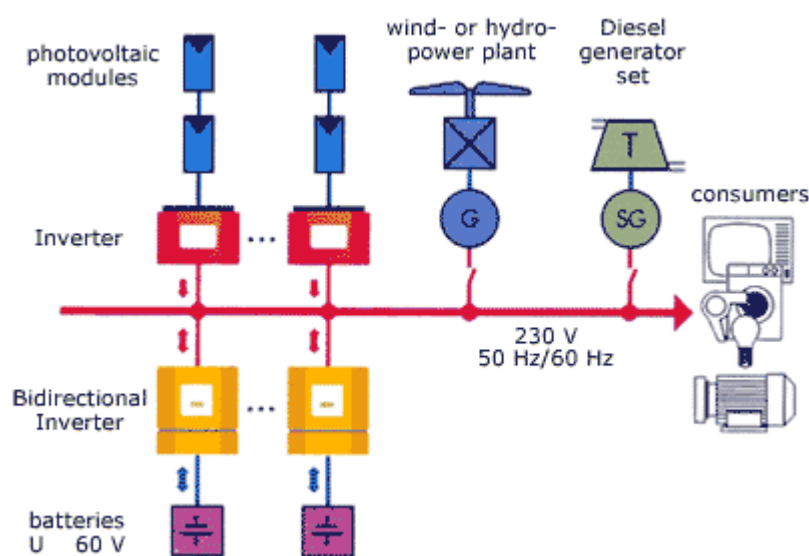
1. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับกับพลังงานแสงอาทิตย์
2. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับกับพลังงานลม
3. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับกับพลังงานแสงอาทิตย์

1.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทน คือระบบผลิตไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แหล่งกำเนิดไฟฟ้าได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) กังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind Turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Gen-set) และเซลล์เชื้อเพลิง ในกรณีนี้ระบบพลังงานทดแทนจะหมายถึงระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตรวมไม่เกิน 300 กิโลวัตต์ โดยมีแหล่งพลังงานหลักมาจากพลังงานหมุนเวียนอย่างน้อยหนึ่งชนิด ตัวอย่างเช่น ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวผลิตไฟฟ้า และมีแบตเตอรี่เป็นตัวเก็บสะสมพลังงาน ข้อดีของระบบผลิตไฟฟ้า คือ มีค่าดำเนินการระบบที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีเฉพาะเครื่องยนต์ดีเซล/เบนซินต่อกับแบตเตอรี่ ระบบมีความน่าเชื่อถือและความมั่นคงของระบบสูงขึ้น จากลักษณะของ



ระบบผลิตไฟฟ้าที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 1.1 การทำงานของระบบอธิบายได้ดังนี้ ในเวลากลางวันเมื่อพลังงานจากแสงอาทิตย์หรือจากลมเพียงพอ เซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม ก็จะผลิตไฟฟ้าออกมา ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสลัโดย Grid Inverter และส่งเข้าสายส่งไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมเป็นไฟฟ้ากระแสลัสามารถส่งเข้าสายส่งได้ทันที กรณีที่หากมีไฟฟ้าเหลือใช้จากระบบ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดย Battery Inverter และประจุไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อใช้ในเวลากลางคืนหรือในเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์และไม่มีลม ในเวลากลางคืนระบบไฮบริดจะจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ โดยใช้ไฟฟ้าที่ประจุอยู่ในแบตเตอรี่ และไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานลม ในกรณีที่ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนต่างๆ และพลังงานในแบตเตอรี่ ไม่เพียงพอต่อความต้องการ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ดีเซลก็จะเดินเครื่องเพื่อผลิตไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ การทำงานทั้งหมดที่กล่าวมานั้นถูกควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทนทั่วไป

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

เมื่อทำการวิจัยเสร็จสิ้นคาดว่าจะได้รับประโยชน์ดังนี้

1. ผู้ประกอบการทางด้านพลังงานทดแทนจะได้ใช้เทคโนโลยีคนไทย
2. การเผยแพร่ผลการวิจัยในการประชุมวิชาการ และวารสารด้านพลังงานทดแทน
3. ส่งเสริมการสร้าง ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าโดยรวมของประเทศ



โดยผู้ที่จะสามารถนำผลจากการวิจัยไปใช้ประโยชน์ดังนี้

1. หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับรับผิดชอบด้านพลังงานทดแทน
2. นักศึกษา นักวิชาการในสถานศึกษา



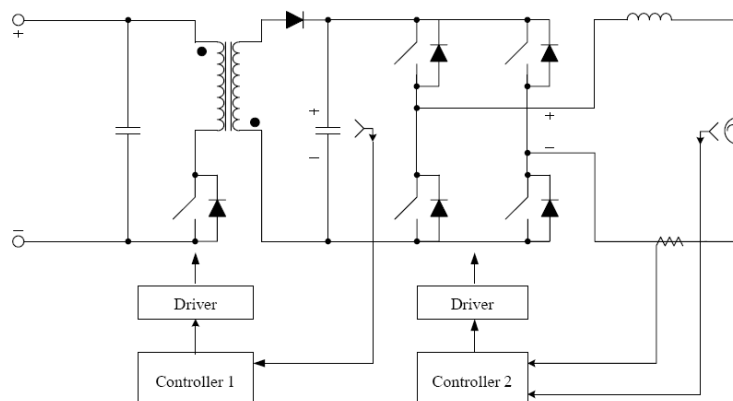
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ เพื่อทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ระบบไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีหลายแบบขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนและภูมิประเทศ ตัวอย่างเช่นการแปลงพลังงานไฟฟ้าได้จากพลังงานทดแทนแสงอาทิตย์จ่ายให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เมื่อพลังงานที่ได้รับมากเกินไปขนาดพิกัดของโหลดพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เหลือใช้จะถูกจ่ายคืนให้กับระบบของการไฟฟ้าหรือเก็บสะสมในรูปของแบตเตอรี่ ซึ่งระบบนี้จะมีเสถียรภาพที่ดี วงจรคอนเวอร์เตอร์เป็นรูปแบบที่ใช้งานกันทั่วไป มีลักษณะของวงจรที่ง่าย และราคาถูก ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์และออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้าสำหรับพลังงานทดแทนแบบเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้า และการควบคุมแรงดันและกระแสอย่างแม่นยำ

ในการวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นที่การสร้างต้นแบบวงจรแปลงผันพลังงานจากพลังงานทดแทนราคาประหยัด ที่ใช้วัสดุส่วนมากในเมืองไทย เพื่อลดการนำเข้าแบ่งออก โดยงานวิจัยนี้จะนำเสนอการพัฒนางจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน (AC-to-AC Converter)

รูปที่ 2.1 แสดงวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟสลับแบบเชื่อมต่อกับระบบของระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นวงจรแปลงผันพลังงานที่ได้มาจากพลังงานทดแทนเพื่อนำไปใช้งาน โดยเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงและผ่านเข้าสู่วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายพลังงานกลับคืนให้กับระบบของการไฟฟ้า

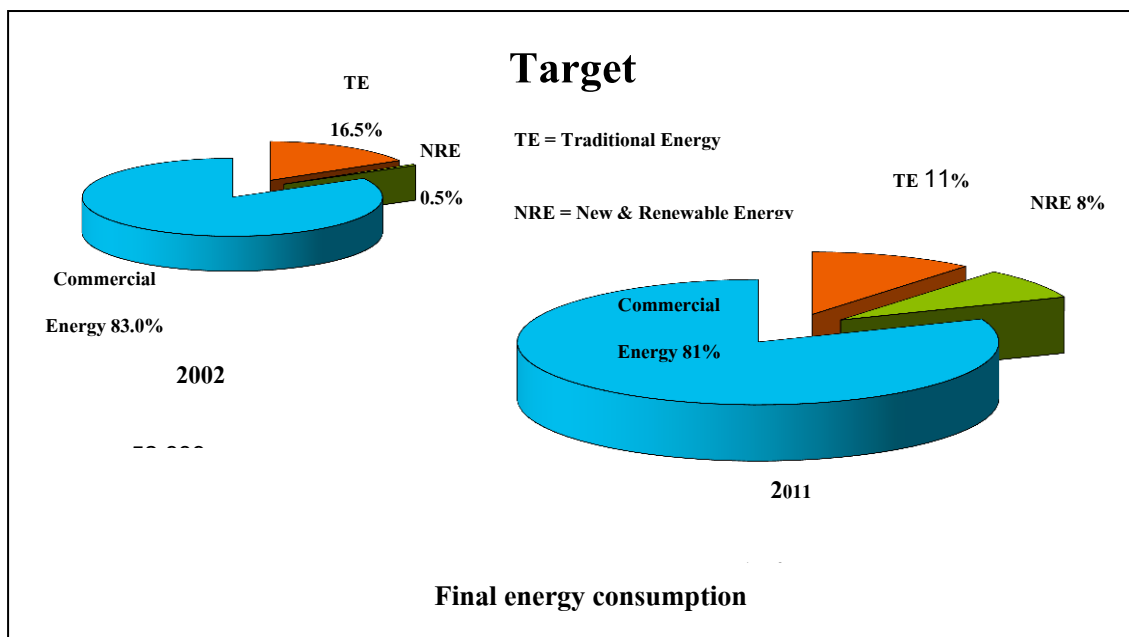


รูปที่ 2.1 วงจรแปลงพลังงานและวงจรควบคุมแบบง่าย



2.1 หลั่งกัณณไฟฟ้าพลังงานทดแทน

งานวิจัยนี้ได้มีการคัณควัและศัษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับชุดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานลม นอกจากนี้พลังงานแสงอาทิตย์ ก็เป็นพลังงานทดแทนที่น่าสนใจมาก เพราะวัในประเทศไทย มีการวิจัยและจัทำข้อมูลศัภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมไว้เมื่อปี 2546 โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.)

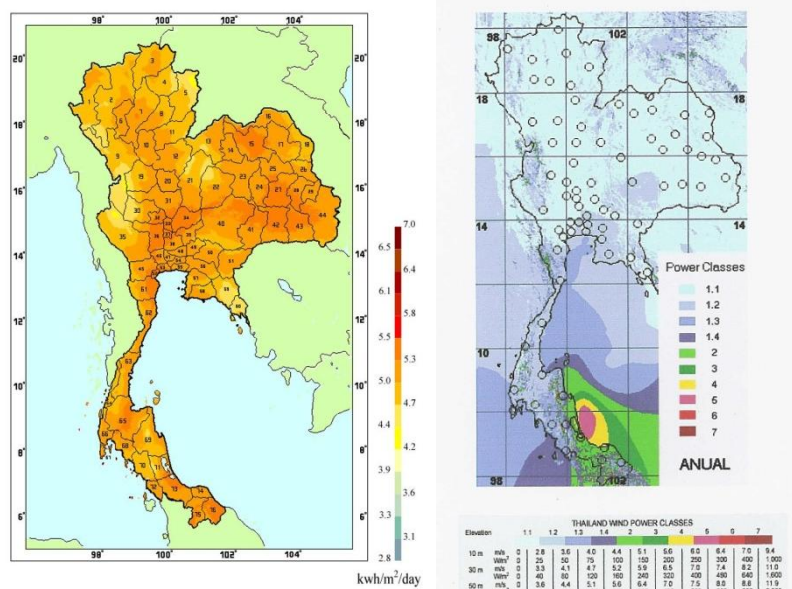


รูปที่ 2.2 กราฟแสดงเป้าหมายของยุทธศาสตร์พลังงานทดแทนของประเทศไทย [14]

จากแผนที่ศัภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศัลปากร พบว่าการกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ทั่วทั้งประเทศ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด ระหว่างเดือนเมษายนและพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m²-day เมื่อพิจารณาแผนที่ศัภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี พบว่าบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวันครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัสุพรรณบุรี ชัยนาท อุดรฯ และลพบุรี โดยได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 19 ถึง 20 MJ/m²-day พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ในช่วง 18-19 MJ/m²-day จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศ พบว่ามีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m²-d จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศัภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง



สำหรับศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทยนั้น พบว่าแหล่งพลังงานลมที่ดีอยู่บริเวณชายทะเลตะวันออกของจังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และพังงา และเขตภาคเหนือที่คอดยอินทนนท์ และจังหวัดตาก และบริเวณภาคกลาง คือ จังหวัดเพชรบุรี กาญจนบุรี มีกำลังลมเฉลี่ยทั้งปี ตั้งแต่ระดับ 1.3 ถึง ระดับ 2 (Class 1.3 – Class 2) ความเร็ว 4.4 เมตร/วินาที คือที่จังหวัดเพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร สุราษฎร์ธานี เชียงใหม่ เพชรบูรณ์ เลย จันทบุรี และระยอง นั้นหมายความว่าศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทยมีสูงพอที่จะนำระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม (Wind turbine generator) มาใช้ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.3 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลมในประเทศไทย

สำหรับจังหวัดนนทบุรี และจังหวัดอื่นๆ ในภาคกลาง เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 จะพบว่าศักยภาพของพลังงานลมในจังหวัดนนทบุรี มีค่าอยู่ในระดับที่ 1.2 ถึง 1.3 (Class 1.2 – Class 1.3) ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ย 3.6 เมตร/วินาที ถึง 5.1 เมตร/วินาที ที่ความสูง 50 เมตร ซึ่งสามารถติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าได้เช่นกัน

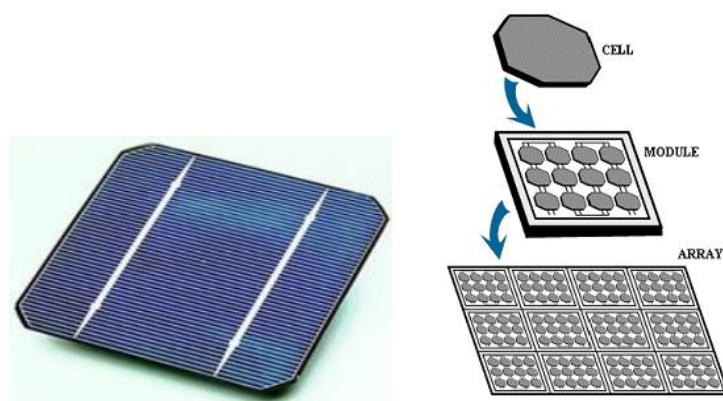
2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก

แผงโซลาร์เซลล์ (Photovoltaic Cell: PV) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถ เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย แชนปิน



(Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) ในปี ค.ศ. 1954 ซึ่งทำงานที่บริษัท เบลเทิลโฟน (Bell Telephone) ซึ่งได้ค้นพบเทคโนโลยี การสร้างรอยต่อ P-N ของผลึกซิลิคอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาเป็นครั้งแรกในโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6 % โดยในระยะเวลาต่อมา มีการพัฒนามาขึ้นมากกว่า 15 % ในระยะแรกเริ่มมีการนำไปใช้งานในการผลิตพลังงาน ไฟฟ้าทางด้าน อวกาศ ดาวเทียม ระบบสื่อสารต่างๆ จนในปัจจุบันมีการผลิตใช้งานอย่างแพร่หลาย มีราคาถูกลง และมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.4 Solar Cell [29]

เซลล์แสงอาทิตย์ทำจากซิลิคอนที่ใช้วัสดุเช่นเดียวกัน ทรานซิสเตอร์ และวงจรรวม (Integrated Circuit :IC) โดยผลึกซิลิคอนจะถูกทำให้ไม่บริสุทธิ์ โดยการเติมธาตุที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดในกลุ่ม 3 และ 5 ซึ่งจะ ได้ผลึกซิลิคอนที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างกัน (P-Type และ N-type) เมื่อนำมาต่อเชื่อมกันด้วยกรรมวิธีการแพร่ สารระหว่างผลึกทำให้ระหว่างรอยต่อมีสถานะที่เป็นกลาง (Depletion Region) ผลึกซิลิคอนจะวางซ้อนกันเป็นชั้น บาง (Layer) เมื่อมีอนุภาคโฟตอน (Photon) มาตกกระทบแผ่นชั้นซิลิคอน อิเล็กตรอนที่ได้รับจะทำให้แผ่นธาตุ ซิลิคอนมีอิเล็กตรอนที่มีอยู่ไม่สมดุลกันระหว่างชั้นเซลล์ เมื่อมีการต่อเชื่อมขั้วไฟฟ้าออกไปก็จะเกิดการความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านั้น เมื่อนำมาต่อเชื่อมกันเป็นวงจรไฟฟ้าก็จะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างขั้ว เกิดมี กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้นมาได้

แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งตามวัสดุที่ใช้ผลิตได้ 3 ชนิด คือ แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการใช้งานในห้องทดลองและใช้งานจริงแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 ชนิดของแผงเซลล์แบ่งตามวัสดุและประสิทธิภาพการใช้งานในห้องทดลองและใช้งานจริง [15]

วัสดุ	ประสิทธิภาพการใช้งาน ในห้องทดลอง (%)	ประสิทธิภาพการใช้งาน ในงานจริง (%)
Monocrystalline Silicon	24	14-17
Polycrystalline Silicon	18	13-15
Amorphous Silicon	13	5-7

2.1.2 กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีต้นทุนต่ำลงมากในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา พลังงานลมจึงเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ขยายตัวเร็วที่สุดในโลก

2.1.2.1 ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมเพื่อใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หลายประเทศทั่วโลกได้ให้ความสนใจ โดยเฉพาะในทวีปยุโรป เช่น ประเทศเดนมาร์ก กังหันลมที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมานั้นจะมีลักษณะและรูปร่างแตกต่างกันออกไป แต่ถ้าจำแนกตามลักษณะแนวแกนหมุนของกังหันจะได้ 2 แบบ คือ

1. กังหันลมแบบแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine) เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลมโดยมีใบพัดเป็นตัวดึงลมรับแรงลม มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง

2. กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine) มีข้อดีกว่าแบบแนวนอนคือในแบบแนวแกนตั้งนั้นไม่ว่าลมจะเข้ามาทิศไหนก็ยังหมุนได้ โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมให้กังหันหันหน้าเข้าหาลม นอกจากนี้แล้วแบบแนวแกนตั้งนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบการส่งกำลังวางไว้ใกล้พื้นดินมากกว่าแบบแนวนอน เวลาเกิดปัญหาแก้ไขง่ายกว่าแบบแนวนอนที่ติดอยู่บนหอคอยสูง

2.1.2.2 ส่วนประกอบของกังหันลมในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้าถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้ตามความต้องการใช้งาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า (Capacity) เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (Rotor Diameter) และพื้นที่กวาดของใบพัด (Swept Area) ของกังหันลมผลิตไฟฟ้ารุ่นนั้น ๆ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 ขนาดของกังหันลม

ขนาดของกังหันลม	ขนาดกำลังผลิต (kW)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่กวาด (m ²)
ขนาดจิ๋ว (Micro Wind Turbine)	< 1.5	< 3	< 7
ขนาดเล็ก (Small Wind Turbine)	1.5-2.0	3-10	7-80
ขนาดกลาง (Medium Wind Turbine)	20-200	10-25	80 - 500
ขนาดใหญ่ (Large Wind Turbine)	200-1,500	25-70	50-3,850
ขนาดใหญ่่มาก (Very Large Wind Turbine)	> 1,500	> 70	> 3,850

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาและออกแบบวงจร

ในการทำงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจากบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ สำหรับการทำการวิจัยครั้งนี้ เอกสารที่ได้ศึกษามาสรุปได้พอสังเขปดังนี้

S. W. Xing, C. D. Peng, Q. J. Yong, C. Chen และ C. G. Cheng [1] บทความนี้ได้ศึกษาโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบตรงระดับ และสมการความสัมพันธ์ในการหมุนกับแกนอ้างอิง (แกน d-q) ภายในวงจรรูปกระแสจะมีหน้าที่สำหรับอ้างอิงกระแสที่เข้ามา และภายนอกูปแรงดันจะทำหน้าที่สำหรับกำหนดโหลด การออกแบบวิธีสำหรับตัวควบคุม PI จะเป็นการนำเสนอสำหรับภายในรูปกระแสและรูปแรงดันตามลำดับ วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง PWM แบบสามระดับที่นำเสนอจะใช้วิธี SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) ในการควบคุมโดยใช้การจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผลการจำลองที่ได้นั้นจะแสดงได้ว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงให้ประสิทธิภาพยอดเยี่ยมทั้งในสถานะสมดุลและที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด รวมทั้งรูปคลื่นไซน์ในกระแสกริดกับค่าตัวประกอบกำลังอีกด้วย นอกจากนี้บทความนี้เสนอขั้นตอนการควบคุมแบบ SVPWM ซึ่งขึ้นอยู่กับแกน d-q ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

Z. Yingchao, Z. Zhengming, L. Ting, Z. Yongchang และ Y. Liqiang [2] งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมแบบใหม่สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ NPC (Neutral Point Clamped) การวิเคราะห์การจำหน่ายและความสมดุลของพลังงานชั่วขณะ และมีการควบคุมแบบ DPC_SVM (Direct Power Control with Space Vector Modulation) สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และการควบคุมแบบ FOC (Field Oriented Control) สำหรับทางด้านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ พลังงานที่ป้อนไปในรูปจากทางด้านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับไปวงจรแปลง



ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับจะมีประสิทธิภาพที่ dc-link ดีขึ้น ผลการทดลองจะแสดงถึงวงจรควบคุมและวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ NPC จะมีประสิทธิภาพที่ดีและสามารถลดความผกผันแรงดันที่ dc-bus กับลดขนาดตัวเก็บประจุที่ dc-bus ได้อีกด้วย ตัวเก็บประจุที่ dc-bus จะเป็นส่วนประกอบหลักที่มีผลต่อความหนาเชื่อถือ ราคา และขนาดสำหรับความเร็วในระบบขับเคลื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานะที่พลังงานสูง กระทั่งการปรับปรุงโครงสร้างการควบคุมสำหรับทางด้านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและการป้อนพลังงานไปข้างหน้า โครงสร้างการควบคุมจะแสดงวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถที่จะปรับปรุง dc-bus ให้มีประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ดังผลการทดลอง อีกทั้งตัวเก็บประจุที่ dc-bus ก็จะสามารถลดขนาดลงได้ด้วย

W. Xu, H. Kaizheng, Y. Shijie และ X. Bin [3] บทความนี้แนะนำเสนอเทคนิค SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) ที่เป็นที่นิยมในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และการควบคุมแบบ SPWM รูปคลื่นที่ได้สามารถรับเข้าไปในเฟสได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการจะซับซ้อนและอัตราส่วนการใช้ของแรงดันก็จะน้อย งานวิจัยนี้จะแสดงการควบคุม SVPWM สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายแรงดันสามเฟส แรงดันที่ dc-bus และตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง PWM จะควบคุมให้มีประสิทธิภาพสูง โดยจะนำเสนอในแบบจำลอง MATLAB/SIMULINK ผลที่ได้จะยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองและวิธีการควบคุม เมื่อเทียบกับวิธี SPWM แบบเดิมและผลการจำลองแสดงวิธีที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบได้ชัดเจน ตัวอย่างการจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้การแปลงทางด้านขาเข้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งสามารถปรับปรุงให้เป็นเชิงเส้นได้ ผลการจำลองจะแสดงการตอบสนองอย่างรวดเร็วจนสามารถทำได้ทั้งในกระแสตรงและควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟอุปกรณ์ควบคุมที่ Space Vector Current จะต้องอุปกรณ์ขนาดเล็กและความเร็วในการสวิตชิง จากการทดลองประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างดี

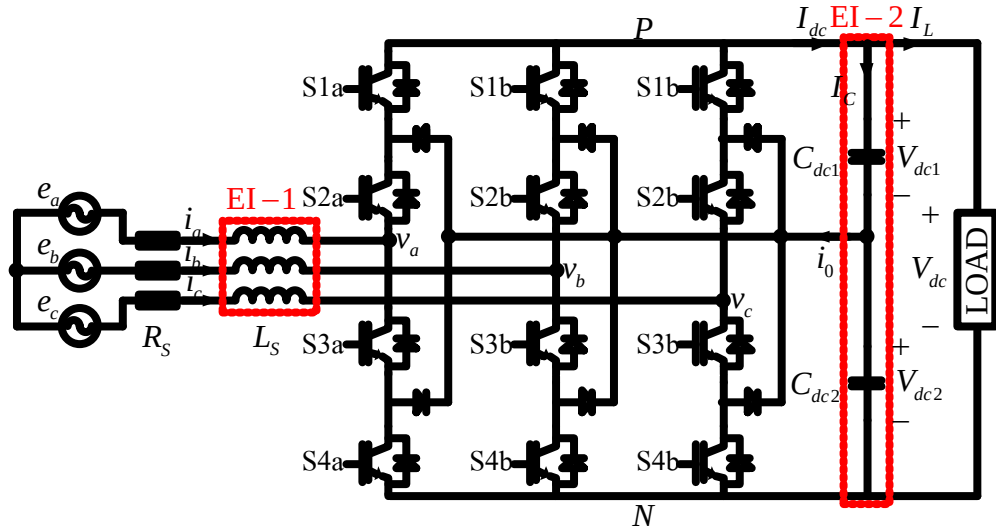
A. Calle, J. Rocabert, S. B. Monge, J. Bordonau, S. Alepuz และ J. Peracaula [4] งานวิจัยนี้แนะนำเสนอวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสามเฟสนิวทริลพอยท์ที่นำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองลม เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมเชื่อมต่อกับกริดวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจะปรับเปลี่ยนพลังงานที่รับมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและควบคุมพลังงานนี้เพื่อนำไปในกริดกับตัวประกอบกำลังที่ต้องการ two pluse locked จะมีการชาร์จทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและทางด้านกริด โดยไม่คำนึงถึงความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันที่จุดนิวทริลของ dc-link จะสมดุลโดยวิธีการปรับของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และผลการจำลองและการทดลองเพื่อยืนยันผลว่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบถูกต้อง



การทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนี้ เริ่มจากรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน เช่น พลังงานจากกังหันลม เป็นต้น ส่งเข้าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำหน้าที่ปรับรูปคลื่นแรงดันกระแสและความถี่ที่ออกจากแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำแรงดันและกระแสไปป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ต่อไป โดยมีตัวเก็บประจุบริเวณ DC-Link เพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่ หลังจากนั้นพลังงานที่ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนได้ปรับเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วนั้น จะถูกส่งไปยังวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อปรับเปลี่ยนรูปคลื่นและความถี่ให้ใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้ากำลังก่อนเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดของระบบไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามารถปรับเปลี่ยนแรงดัน กระแส และความถี่ให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าได้และอีกประการหนึ่ง ข้อดีของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับนี้ คือเมื่อมีระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสเอาต์พุตมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยลง และช่วยลดค่ากระแสพุ่งเข้า (Inrush current) ที่มีผลต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น MOSFET, IGBT เป็นต้น น้อยลง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบสองระดับที่มีการใช้แรงดันที่ DC-Link เท่ากัน

2.4 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ (Three-Level Rectifier)

โครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีคแบบลิแวนต์แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดยที่ S_{ni} ($n = 1, 2, 3, 4$ และ $i = a, b, c$) คืออุปกรณ์สวิตชิงของวงจรแปลงผันจำนวน 12 ตัว, L_s และ R_s คือค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและวงจรแปลงผัน, C_{dc1} และ C_{dc2} คือค่าตัวเก็บประจุสฟิตตรง (dc-link), V_{dc1} และ V_{dc2} คือแรงดันของตัวเก็บประจุสฟิตตรงทั้ง 2 ตัว, V_{dc} คือผลรวมของ V_{dc1} และ V_{dc2} , I_L คือกระแสที่โหลด, I_0 คือกระแสที่ไหลจากจุดกลาง (neutral point) ของบัสไฟตรง, e_i , i_i และ v_i ($i = a, b, c$) คือแรงดันของแหล่งจ่าย 3 เฟส, กระแสของแหล่งจ่ายและแรงดันฝั่งด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันฯ ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีดับบลิวเอ็ม (Three-Level PWM Rectifier) [16]

กำหนดให้แรงดันแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้า 3 เฟสเป็นรูปคลื่นไซน์และสมมูลทั้ง 3 เฟสมุมเฟสของแรงดัน e_a คือ θ ดังนั้นแรงดันของแหล่งจ่ายสามารถหาได้จาก

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \sqrt{2}E \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เมื่อ E คือค่า rms ของแรงดันแหล่งจ่าย

การแปลงแกนจาก 3 เฟส abc ไปยังแกนนิ่ง $\alpha - \beta$ และเป็นแกนหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส $d - q$ ได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

เมื่อ $x \in e, i, v$



จากสมการที่ (2.2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีดับบลิวเอ็มในแกนนิ่ง $\alpha-\beta$ สามารถหาได้จากแกน abc ดังสมการ [17]

$$L_S \frac{di_\alpha}{dt} = -R_S i_\alpha - v_\alpha + e_\alpha \quad (2.4a)$$

$$L_S \frac{di_\beta}{dt} = -R_S i_\beta - v_\beta + e_\beta \quad (2.4b)$$

$$C_{dc1} \frac{dV_{dc1}}{dt} = s_{\alpha p} i_\alpha + s_{\beta p} i_\beta - I_L \quad (2.4c)$$

$$C_{dc2} \frac{dV_{dc2}}{dt} = -s_{\alpha n} i_\alpha - s_{\beta n} i_\beta - I_L \quad (2.4d)$$

เมื่อ $s_{\alpha p}$, $s_{\beta p}$, $s_{\alpha n}$ และ $s_{\beta n}$ คือฟังก์ชันการสวิตช์ในแกน $\alpha-\beta$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (2.3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีดับบลิวเอ็มในแกนหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสสามารถหาได้จาก

$$L_S \frac{di_d}{dt} = -R_S i_d + \omega L_S i_q - v_d + e_d \quad (2.5a)$$

$$L_S \frac{di_q}{dt} = -R_S i_q - \omega L_S i_d - v_q + e_q \quad (2.5b)$$

$$C_{dc1} \frac{dV_{dc1}}{dt} = s_{dp} i_d + s_{qp} i_q - I_L \quad (2.5c)$$

$$C_{dc2} \frac{dV_{dc2}}{dt} = -s_{dn} i_d - s_{qn} i_q - I_L \quad (2.5d)$$

เมื่อ s_{dp} , s_{qp} , s_{dn} และ s_{qn} คือฟังก์ชันการสวิตช์ในแกน $d-q$ $\omega = d\theta/dt$

ความสัมพันธ์ระหว่างฝั่งทางด้านแรงดันกระแสสลับ (ac-side) และแรงดันบัสไฟตรง (dc-link) ในแกน $\alpha-\beta$ และแกน $d-q$ สามารถหาได้จาก

$$v_\alpha = s_{\alpha p} V_{dc1} - s_{\alpha n} V_{dc2} \quad (2.6a)$$

$$v_\beta = s_{\beta p} V_{dc1} - s_{\beta n} V_{dc2} \quad (2.6b)$$

$$v_d = s_{dp} V_{dc1} - s_{dn} V_{dc2} \quad (2.7a)$$



$$v_q = s_{qp} V_{dc1} - s_{qn} V_{dc2} \quad (2.7b)$$

จะสังเกตว่าในแกน $d-q$ ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส เวกเตอร์ของแรงดันแหล่งจ่าย (grid-source voltage) e จะอยู่ในแกน d ซึ่งจะได้ว่า

$$e_d = \sqrt{3}E \quad (2.8a)$$

$$e_q = 0 \quad (2.8b)$$

นำสมการที่ (2.4a) และ (2.4b) มารวมกัน สมการกำลังไฟฟ้าของ EI-1 สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{EI-1:} \quad \frac{dW_{EI-1}}{dt} &= \frac{d \left[\frac{1}{2} L_s (i_\alpha^2 + i_\beta^2) \right]}{dt} \\ &= (e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta) - (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) - R_s (i_\alpha^2 + i_\beta^2) \end{aligned} \quad (2.9a)$$

จากสมการ (2.4d) และ (2.4c) สมการกำลังไฟฟ้าของ EI-2 สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{EI-2:} \quad \frac{dW_{EI-2}}{dt} &= \frac{d \left[\frac{1}{2} C_{dc1} V_{dc1}^2 + \frac{1}{2} C_{dc2} V_{dc2}^2 \right]}{dt} \\ &= (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) - V_{dc} I_L \end{aligned} \quad (2.9b)$$

ในสมการ (2.9a) และ (2.9b), W_{EI-1} และ W_{EI-2} คือพลังงานที่เก็บใน $EI-1$ และ $EI-2$ ตามลำดับ

ตามทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันทีทันใด (Instantaneous power theory) [18] กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟด้านเข้าของวงจรแปลงผันฯ สามารถคำนวณในแกน $\alpha-\beta$ ได้ดังสมการ

$$p_{in} = e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta \quad (2.10a)$$

$$q_{in} = e_\beta i_\alpha - e_\alpha i_\beta \quad (2.10b)$$

และในแกน $d-q$ เมื่อแทนค่าสมการ (2.8a) และ (2.8b) ลงไปจะได้

$$p_{in} = e_d i_d + e_q i_q = \sqrt{3} E I_d \quad (2.11a)$$



$$q_{in} = e_q i_d - e_d i_q = -\sqrt{3}EI_q \quad (2.11b)$$

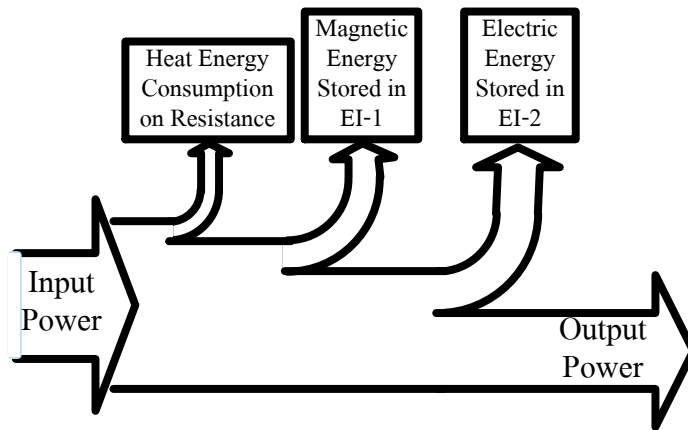
กำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผันคือ

$$P_{out} = V_{dc} I_L \quad (2.12)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกของวงจรแปลงผันฯแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{in} - P_{out} &= (e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta) - V_{dc} I_L \\ &= R_S (i_\alpha^2 + i_\beta^2) + \Delta W_{EI-1}/T_S + \Delta W_{EI-2}/T_S \end{aligned} \quad (2.13)$$

เมื่อ ΔW_{EI-1} และ ΔW_{EI-2} คือเป็นการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่เก็บไว้ใน EI-1 และ EI-2 ในช่วงระยะเวลา T_S จากสมการที่ (2.13) จะเห็นได้ว่าความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผันฯจะประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของตัวต้านทานและอัตราการเปลี่ยนแปลงของส่วนที่เก็บพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมต่อ แผนภูมิการไหลของกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันฯแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

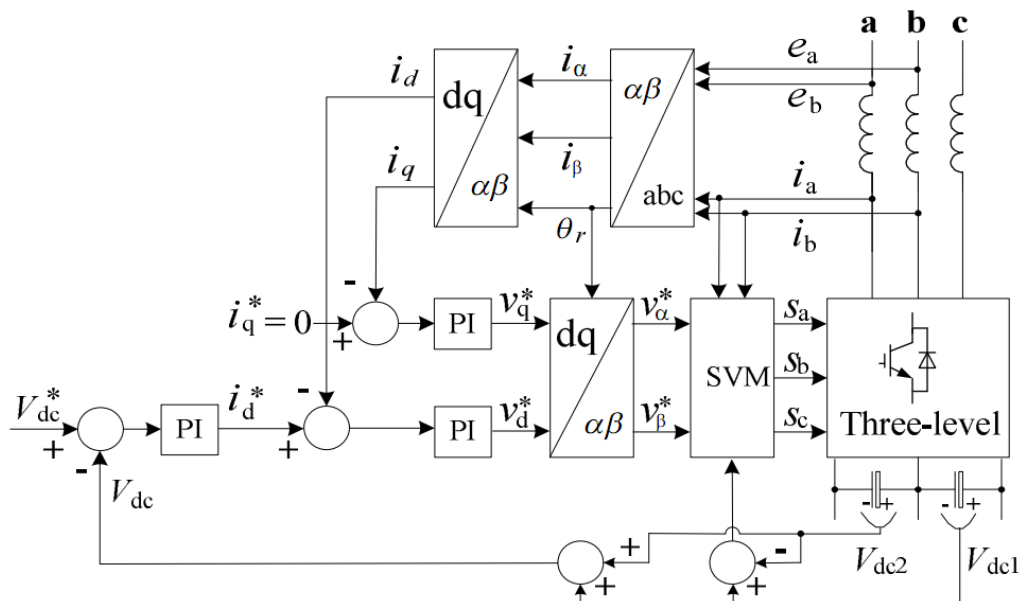


รูปที่ 2.7 แผนภูมิการไหลของกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงสามระดับแบบพีคบัลลิเอ็ม



2.5 การควบคุมจอร์แปลงผันไฟฟ้าด้วยวิธีการควบคุมเชิงแรงดัน (Voltage Oriented Control: VOC)

บล็อกไดอะแกรมของจอร์แปลงผันไฟฟ้าแบบ VOC แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของจอร์แปลงผันไฟฟ้าแบบ VOC

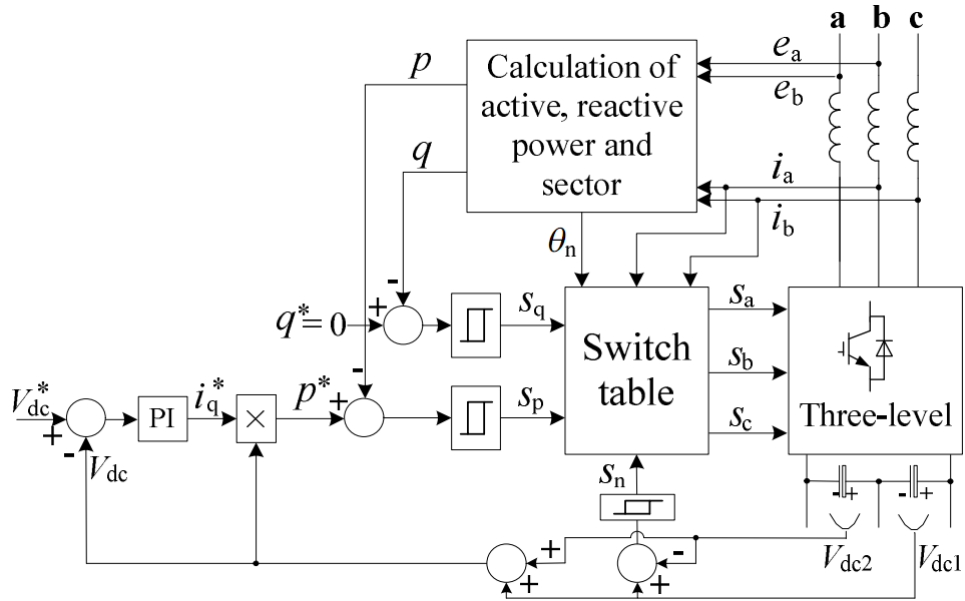
การควบคุมแบบ VOC เป็นวิธีการควบคุมสำหรับการสวิตชิงแบบ PWM และใช้กันอย่างแพร่หลายในโครงสร้างจอร์แปลงผันไฟฟ้าแบบ 2 ระดับ [19], [20] ภายใต้การหมุนในแกน d ที่สอดคล้องกับเวกเตอร์ v และกระแสเวกเตอร์ i สามารถแบ่งออกเป็น i_d และ i_q และจะต้องควบคุมกระแส i_q ให้เป็นศูนย์

จากรูปที่ 2.8 ขั้นแรกจะทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย e_a , e_b และ e_c เพื่อที่จะนำค่ามุม θ_r มาใช้ในการแปลงแกน (Park และ Inverse Park Transformation) กระแสแอกทีฟ i_d^* (มาจาก V_{dc} ผ่านการควบคุมแบบ PI) และกระแสรีแอกทีฟ i_q^* (สถานะ UPF $i_q^* = 0$) นำมาเปรียบเทียบกับกระแสแอกทีฟและกระแสรีแอกทีฟที่ใช้งานจริง ซึ่งก็คือ i_d และ i_q ตามลำดับ ค่า error จะเกิดขึ้นในส่วนกระบวนการแปลงจาก i_d , i_q , i_d^* และ i_q^* เป็นแรงดันอ้างอิง v_d^* และ v_q^* ผ่านการควบคุมแบบ PI ของจอร์แปลงผันไฟฟ้า จากนั้นก็นำแรงดันอ้างอิง v_d^* และ v_q^* มาแปลงเป็นแรงดันอ้างอิง v_α^* และ v_β^* และนำไปเข้าบล็อก SVM (space vector modulation) เพื่อสร้างสัญญาณสวิตชิง S_a , S_b และ S_c สำหรับจอร์แปลงผันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส

วิธีการควบคุมความสมดุลที่จุดศูนย์ (neutral point) และหลีกเลี่ยงผลของแรงดันกระเพื่อม ΔV ในแรงดันเฟสและแรงดันไลน์มากขึ้นไป สามารถทำได้ด้วยการควบคุมใน SVM ของจอร์แปลงผันไฟฟ้า



2.6 การควบคุมวงจรแปลงผันฯด้วยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรง (Direct Power Control: DPC)



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงผันฯแบบ DPC

วิธีการ DPC เป็นวิธีการใหม่ที่ดึงดูดความสนใจของนักวิจัยในปัจจุบันเป็นอย่างมาก ซึ่งมีวรรณกรรมมากมายเกี่ยวกับการควบคุมแบบ DPC สำหรับโครงสร้างแบบ 2 ระดับที่ได้รับการเผยแพร่ในไม่นานมานี้ [21], [22], [13] ความแตกต่างของวิธีการควบคุมแบบ VOC และ DPC คือวิธีการควบคุมแบบ DPC สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้โดยตรงในทันทีทันใดผ่านการใช้อยู่ที่แรงดันที่เหมาะสมในวงจรแปลงผันฯ ในแกน $d-q$ กำลังไฟฟ้าทันทีทันใดสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และกำลังไฟฟ้าสมดุลสามารถหาได้จาก [1]

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_d & 0 \\ 0 & -e_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

และ

$$\frac{L_s}{e_d} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega L_s \\ \omega L_s & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d - v_d \\ v_d \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.14 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในทันทีทันใดสามารถควบคุมผ่านการใช้อยู่ที่แรงดันไฟฟ้าที่ต่างกัน (v_d และ v_q) ของวงจรแปลงผันฯ

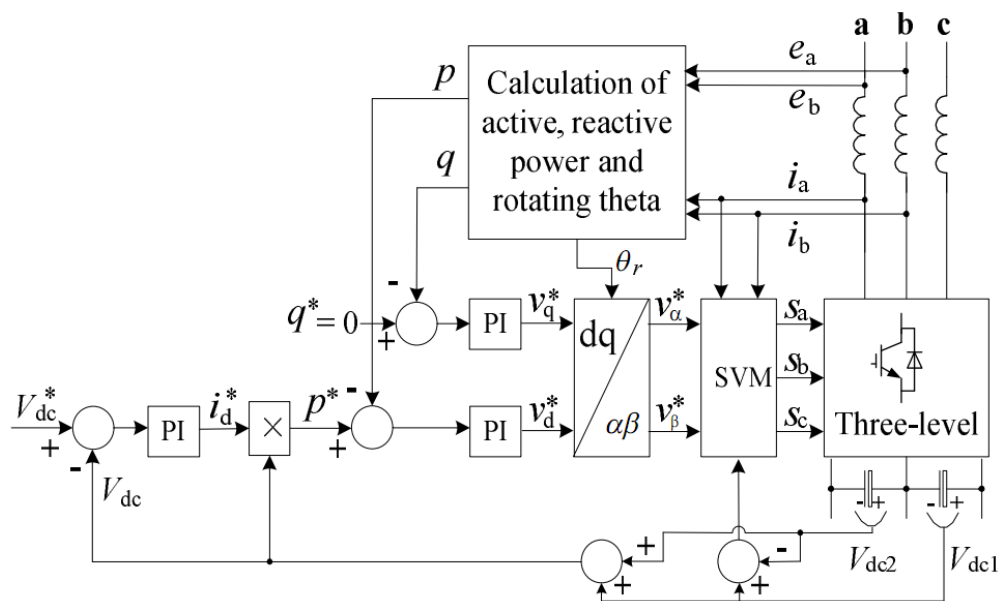
จากรูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ DPC สำหรับวงจรแปลงผันฯ ขั้นแรกจะทำการวัดแรงดันแหล่งจ่าย e_a และ e_b เพื่อนำมูมเฟสของแรงดันแหล่งจ่ายมาใช้งาน



กำลังไฟฟ้าแอคทีฟ p^* (มาจาก V_{dc} ผ่านตัวควบคุม PI) และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ q^* (ในสถานะ UPF $q^* = 0$) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในทันทีทันใด (p และ q) และค่า error ที่เกิดคือการทำงานในตัวควบคุมทั้ง 2 ตัว (bang-bang) ในการสร้างสัญญาณด้านออกเพื่อเข้าสู่บล็อกตารางการสวิตช์ (switching table) นั่นก็คือ S_p และ S_q นอกจากนี้ยังมีค่า error ระหว่างแรงดัน V_{C1} และ V_{C2} ซึ่งก็คือสัญญาณ S_n และมุมเฟสของแรงดันแหล่งจ่ายมีค่าประมาณ θ_n จากนั้น 4 สัญญาณเหล่านี้จะถูกใช้เพื่อเลือกเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันฯ ผ่านตารางการสวิตช์

การสร้างตารางการสวิตช์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันฯ นั้นเป็นเรื่องที่ยุ่งยากมาก ดังในเอกสารอ้างอิงที่ [12] ได้กล่าวถึงการสร้างตารางการสวิตช์ วิธีการควบคุมความสมดุลที่จุดกลาง และการหลีกเลี่ยงผลของ ΔV ที่มากเกินไป

2.7 การควบคุมวงจรแปลงผันฯ ด้วยวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงบนพื้นฐาน SVM (Direct Power Control Based on SVM: DPC-SVM)



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงผันฯแบบ DPC-SVM

การที่จะได้ประสิทธิภาพแบบไดนามิกที่สูงสามารถรับประกันได้โดยการควบคุมแบบ DPC ที่มีการควบคุมโดยตรงที่กำลังในไฟฟ้าทันทีทันใดผ่านตัวควบคุมแบบ bang-bang controller) [23] ดังแสดงในรูปที่ 2.9 อย่างไรก็ตามหนึ่งในข้อเสียของการควบคุมแบบ bang-bang ก็คือการเปลี่ยนแหล่งความถี่ในการสับเปลี่ยนสวิตช์ เพื่อทำให้ความถี่คงที่ในระหว่างการควบคุมที่

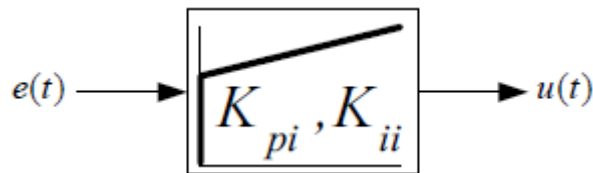


กำลังไฟฟ้าในทันทีทันใดโดยตรง การควบคุมแบบ DPC-SVM สำหรับวงจรแปลงผัน 2 ระดับได้แสดงไว้ใน [24]-[26]

รูปที่ 2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ DPC-SVM สำหรับวงจรแปลงผัน 2 ระดับ จะเห็นว่าการควบคุมแบบ DPC-SVM จะคล้ายกับวิธีการควบคุมแบบ VOC ยกเว้น รูปการควบคุมภายในของกระแสแอกทีฟและกระแสรีแอกทีฟใน VOC ซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยรูป กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรูปกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เป็นผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการ ควบคุมแบบ DPC-SVM มีค่าใกล้เคียงกับวิธีการควบคุมแบบ VOC มากกว่าวิธีการควบคุมแบบ DPC แต่ก็ยังใช้การควบคุมที่กำลังไฟฟ้าในทันทีทันใดโดยตรง

2.8 ตัวควบคุมพีไอแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time PI Controller) [27]

ตัวควบคุมพีไอแบบอนาล็อกถูกใช้อย่างกว้างขวางในระบบควบคุมแบบต่างๆ เป็นเวลาช้านาน บล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมพีไอ

จากบล็อกไดอะแกรมสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_R} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (2.16)$$

สำหรับ Z-transformation ของ Discrete Time PI Controller หาได้จาก

$$U(z) = Z\{m(t)\} = K_p \left[Z\{e(t)\} + \frac{1}{T_R} Z \left\{ \int_0^t e(t) dt \right\} \right] \quad (2.17)$$

กำหนดใช้ Trapezoidal Rule of Integration Back ward Difference ดังนั้นจะได้



$$U(z) = K_p \left[E(z) + \frac{1}{T_R} \times \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} E(z) \right] \quad (2.18)$$

$$U(z) = \left[\left(K_p - \frac{K_p T}{2T_R} \right) + \left(\frac{K_p T}{T_R} \right) \right] E(z) \quad (2.19)$$

จะได้ Z – Transfer Function

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_{pi} + \frac{K_i}{1-z^{-1}} \quad (2.20)$$

โดยที่

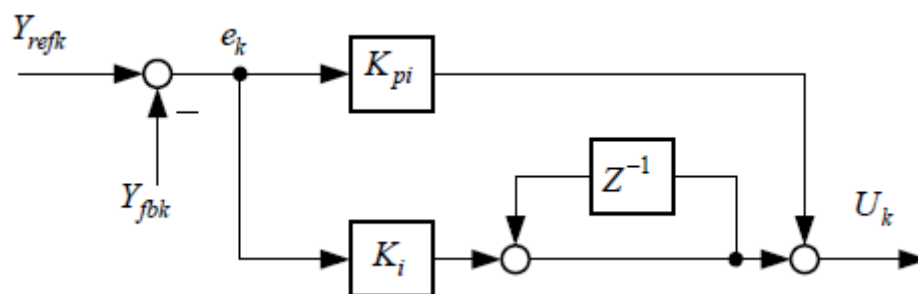
$$K_{pi} = K_p + \frac{K_p T}{2T_R} \quad (2.21)$$

$$K_i = \frac{K_p T}{T_R} \quad (2.22)$$

สำหรับ Discrete Time ของ PI Controller สามารถเขียนได้ดังนี้

$$U_k = K_{pi} e_k + K_i \sum_{i=0}^k e_i \quad (2.23)$$

ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.12

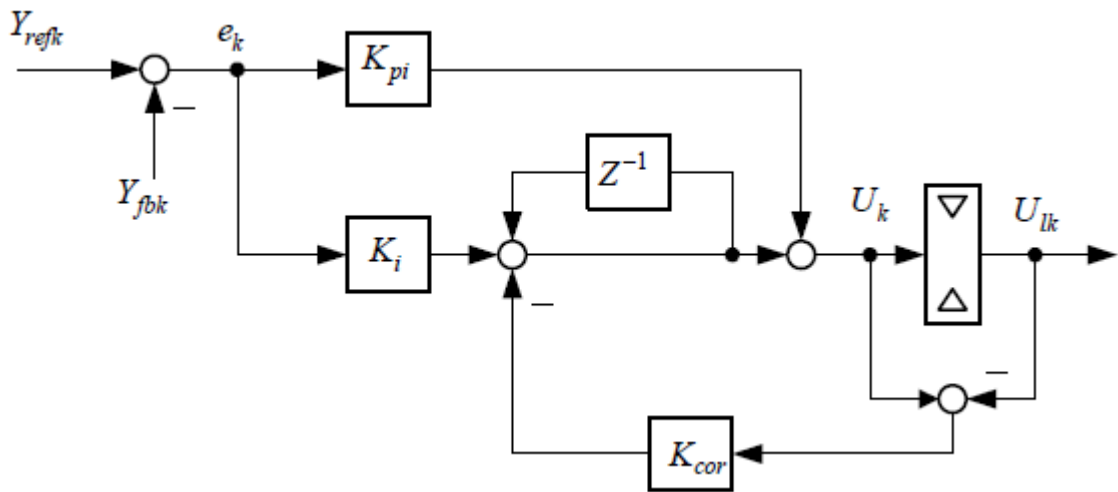


รูปที่ 2.12 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ



เนื่องจากต้องจำกัดค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม ซึ่งมีส่วนการควบคุมแบบอินทิเกรตอยู่ด้วย ซึ่งขณะที่ค่าเอาต์พุตติดขอบจำกัดส่วนอินทิเกรตจะต้องหยุดอินทิเกรต เพื่อมิให้เกิดค่าอินทิเกรตสะสมขณะที่เอาต์พุตไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้ (Integrator Windup) มิฉะนั้นจะทำให้ผลการควบคุมเกิดโอเวอร์ชูตสูงกว่าปกติ ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวควบคุมชนิดที่แก้ผลดังกล่าว ดังรูปที่ 2.13

การแก้ผลของอินทิเกรตสะสมขณะที่เอาต์พุตติดขอบจำกัดนี้ อาศัยผลต่างเอาต์พุตจริง (U_k) และเอาต์พุตที่ติดขอบจำกัด (U_{lk}) ซึ่งจะได้ค่าติดลบเสมอขณะที่ติดขอบจำกัด คูณด้วยค่าคงที่การแก้ อินทิเกรตสะสม (K_{cor}) แล้วนำไปบวกกับค่าที่เกิดจากการควบคุมแบบอินทิเกรต ซึ่งค่าคงที่การแก้อินทิเกรตสะสมมีค่าตามสมการที่ (2.24)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอที่แก้อินทิเกรตสะสมขณะที่เอาต์พุตติดขอบจำกัด

$$K_{cor} = \frac{K_i}{K_{pi}} \quad (2.24)$$

จากโครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอดังรูปที่ 2.13 สามารถเขียนเป็นขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการควบคุมแบบพีไอที่แก้อินทิเกรตสะสมขณะที่เอาต์พุตติดขอบจำกัดได้ดังนี้

INPUT Y_{refk}, Y_{fbk}
 $e_k = Y_{refk} - Y_{fbk}$
 $U_k = x_i + K_{pi}e_k$
 $U_{lk} = U_k$
 IF $U_k > U_{max}$ THEN $U_{lk} = U_{max}$
 IF $U_k < U_{min}$ THEN $U_{lk} = U_{min}$

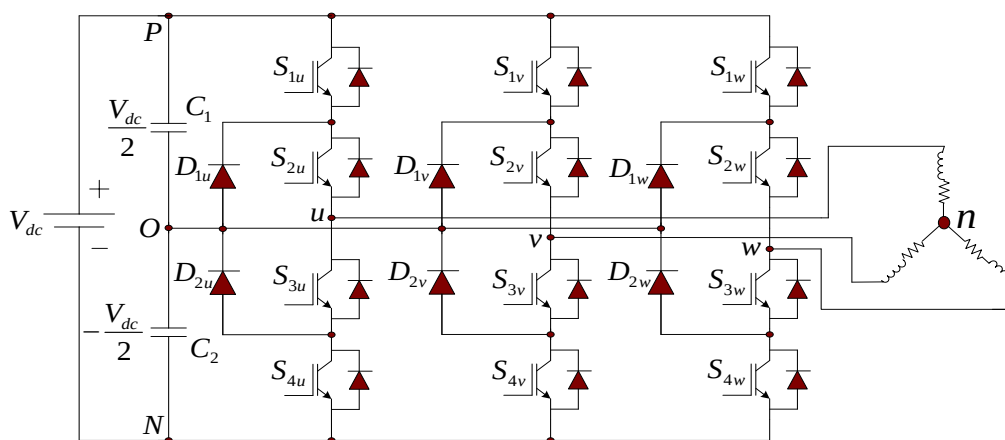


$$\begin{aligned} \text{OUTPUT} \quad & U_{lk} \\ & e_{lk} = U_k - U_{lk} \\ & x_i = x_i + K_i e_k + K_{cor} e_{lk} \end{aligned}$$

2.9 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ (Three-Level Inverter)

2.9.1 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ

วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับจะแตกต่างจากวงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับคือ มีอุปกรณ์ในการสวิตชิงเพิ่มจากหกตัวเป็นสิบสองตัวดังรูปที่ 2.14 และมีการใช้แรงดันไฟตรงเป็นสามระดับ ซึ่งได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตรง วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับมีข้อดีกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับคือ มีระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเอาต์พุตมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อย และช่วยลดค่ากระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ที่มีต่ออุปกรณ์สวิตชิงเช่น มอสเฟต (Metal-Oxide-Semiconductor-Field Effect Transistor, MOSFET) ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT) เมื่อเรานำมาเปรียบเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับที่มีการใช้แรงดันคิซีลิง (DC-Link) เท่ากัน เพราะวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับมีการใช้อุปกรณ์สวิตชิงมาต่ออนุกรมทำให้ได้รับแรงดันน้อยลง



รูปที่ 2.14 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ

วงจรมูลของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับเป็นดังรูปที่ 2.14 แต่ละเฟสนั้นประกอบด้วยฟรีวีลิ่งไดโอด (Free-Wheeling Diode) สี่ตัว แคลมป์ไดโอด (Clamping Diodes) สองตัวต่ออยู่กับจุดนิวทรัลพอยต์ (Neutral Point (O)) เมื่อให้แรงดันทั้งสามจุด (PON) เทียบกับจุดอ้างอิงจุด O จะได้แรงดัน 3 ระดับ ดังนี้

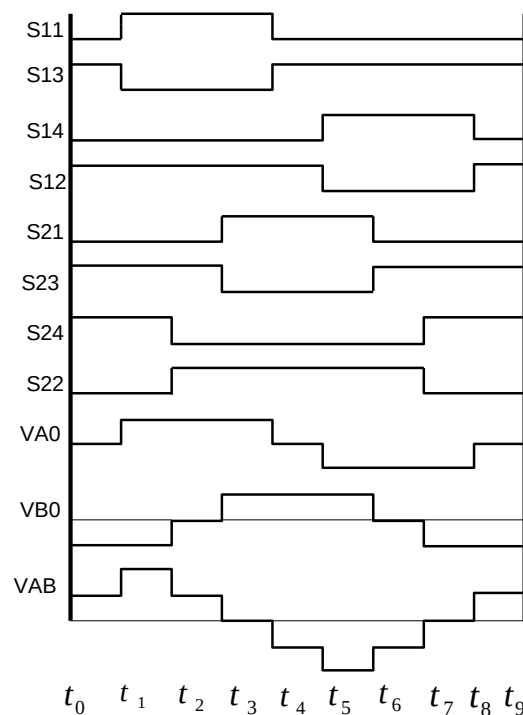
- แรงดัน P (V_{PO}) เป็นแรงดันบัสไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1
- แรงดัน O (V_{OO}) เป็นแรงดันที่จุดอ้างอิง

ตารางที่ 2.3 สถานะการสวิตช์ในแต่ละเฟส

Terminal	Switch State				Terminal
Symbols	S _{1x}	S _{2x}	S _{3x}	S _{4x}	Voltage
P	ON	ON	OFF	OFF	$V_{dc} / 2$
O	OFF	ON	ON	OFF	0
N	OFF	OFF	ON	ON	$-V_{dc} / 2$

2.9.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะประกอบด้วยสวิตช์หลัก S_{11} กับ S_{14} ทำหน้าที่เหมือนในวงจรอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ส่วนสวิตช์ช่วย S_{12} กับ S_{13} ทำหน้าที่แคปซิมป์แรงดันเทียบกับจุดนิวทรัลที่ชั่วเอาท์พุทร่วมกับไดโอดช่วย D_{11} กับ D_{12} ส่วนแหล่งจ่ายไฟตรงเกิดจากตัวเก็บประจุทั้งสองตัว แบ่งแรงดันบัสตรงตัวละครึ่งสัญญาณ PWM ที่ใช้ควบคุมแต่ละตัว ในหนึ่งกิ่งสามารถแสดงได้ดังรูป ซึ่งสามารถแบ่งโหมคการทำงานในหนึ่งไซเคิลของแรงดัน V_{ab} ออกเป็น 9 โหมคดังแสดงดังรูปที่ 2.15



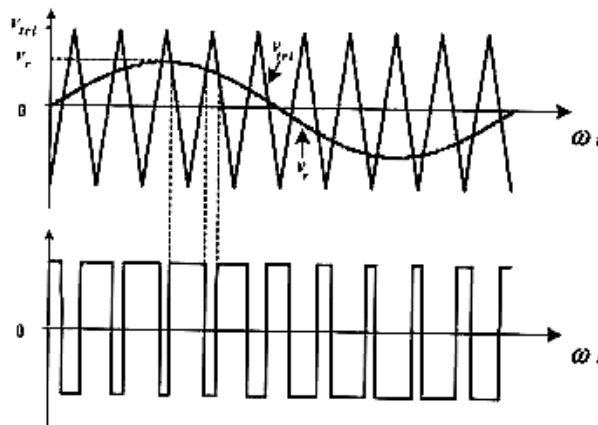
รูปที่ 2.15 สัญญาณสวิตชิงในแต่ละกลุ่ม



2.9.3 เทคนิคการสร้างสัญญาณควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับ

2.9.3.1 เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม (Sinusoidal Pulse Width Modulation: SPWM)

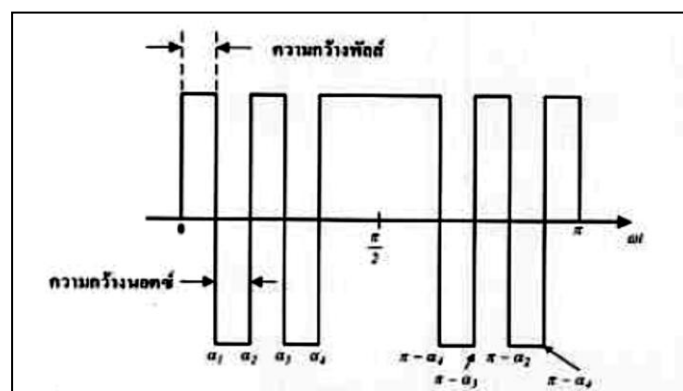
เทคนิคนี้จะใช้หลักการโดยการนำรูปคลื่นไซน์เป็นสัญญาณอ้างอิงที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานที่ต้องการออกมาเปรียบเทียบกับคลื่นพาหนะ โดยทั่วไปจะเป็นรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ที่ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 หลักการสร้างรูปแบบพีดับเบิลยูเอ็มแบบ SPWM

2.9.3.2 เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบกำจัดฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Elimination Method)

รูปคลื่นของเทคนิคนี้จากทฤษฎีการวิเคราะห์รูปคลื่นด้วยอนุกรมฟูเรียร์พบว่าหากมีการกำหนดมุม $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ให้เหมาะสมจะสามารถกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการรวมถึงสามารถควบคุมแรงดันมูลฐานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.17

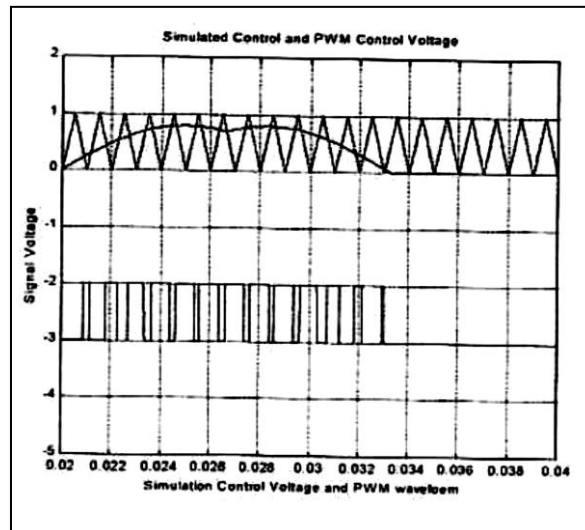


รูปที่ 2.17 รูปคลื่นพีดับเบิลยูเอ็มแบบเทคนิคการกำจัดฮาร์โมนิกส์

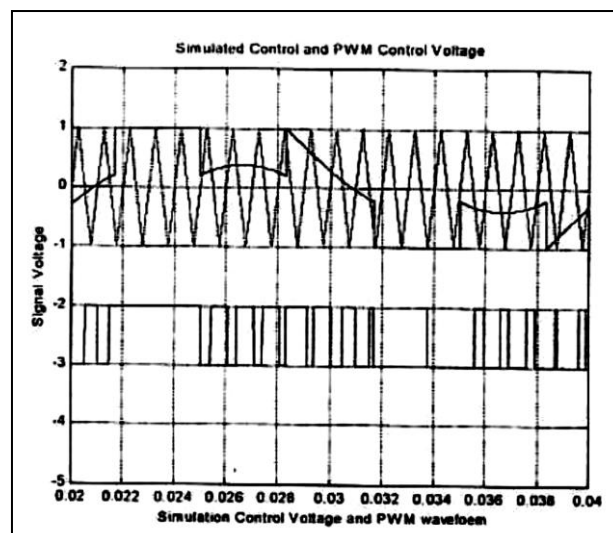


2.9.3.3 เทคนิคแบบดิสคอนทิวอิวส์พีดับบลิวเอ็ม (Discontinuous PWM)

เทคนิคการสวิตช์นี้จะมีช่วงหนึ่งของสัญญาณที่มีระดับสัญญาณเป็นศูนย์ หรือเท่ากับระดับของสัญญาณแคเรียร์ที่นำมาเปรียบเทียบ ทำให้มีช่วงหนึ่งใน 1 รอบของคาบเวลาความถี่มูลฐานไม่มีการสวิตช์ โดยเทคนิคการสวิตช์แบบนี้จะมีรูปแบบอยู่ สองแบบคือ เทคนิคดิสคอนทิวอิวส์พีดับบลิวเอ็ม 120 องศาและเทคนิคแบบเจนเนอไรเซชันดิสคอนทิวอิวส์พีดับบลิวเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19 ตามลำดับ



รูปที่ 2.18 การสวิตช์แบบดิสคอนทิวอิวส์พีดับบลิวเอ็ม 120 องศาที่ค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz ความถี่สัญญาณแคเรียร์ = 1 kHz



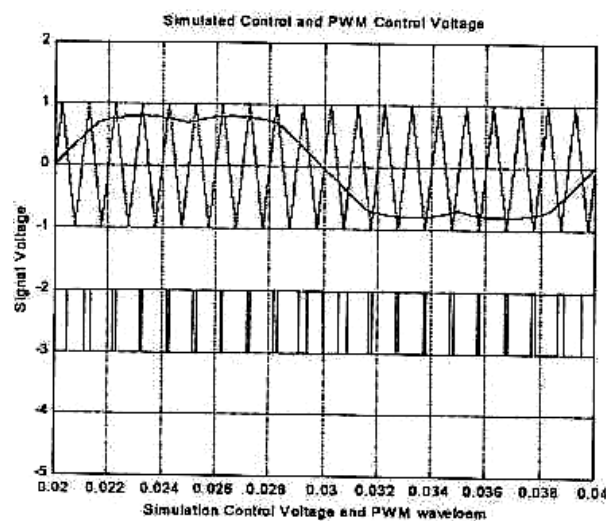
รูปที่ 2.19 การสวิตช์แบบเจนเนอไรเซชันดิสคอนทิวอิวส์พีดับบลิวเอ็ม 30 องศาที่ค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz ความถี่สัญญาณแคเรียร์ = 1 kHz



2.9.3.4 เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบสเปซเวกเตอร์ (Space Vector PWM, SVPWM)

เทคนิคนี้จะใช้หลักการสวิตช์ที่วิเคราะห์จากสภาวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีการวิเคราะห์และการสร้างขึ้นโดยแรงดันควบคุมของเทคนิคนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.25

$$V_{control,a} = \sin(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{3}\pi} \sum_{r=0}^{\alpha} \left[\frac{(-1)^r}{(2r+1) - \frac{2}{s}} \right] \left[\frac{(2r+1) + \frac{2}{s}}{(2r+1) - \frac{2}{s}} \right] \sin[(2r+1)3\omega t] \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.20 ลักษณะการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์พีดับเบิลยูเอ็ม ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็คซ์เท่ากับ 0.8 ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง = 50 Hz และความถี่สัญญาณแคเรียร์ = 1 kHz

โดยเทคนิคนี้จะเหมาะสมสำหรับการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพราะมีความเหมาะสมของสมการที่ใช้คำนวณ และจะมีย่านเชิงเส้นของการมอดูเลตสูงกว่า SPWM ประมาณ 15% รูปคลื่นสมมูลของเทคนิคนี้สามารถสร้างด้วยวงจรทางอนาล็อกซึ่งทำได้โดยการผสมสัญญาณไซน์อ้างอิงกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของสัญญาณไซน์อ้างอิงด้วยขนาด 25% ของสัญญาณอ้างอิง

2.9.4 วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit)

วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital Filter) และวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อก (Analog Filter) โดยวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อกนั้น ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบด้วยกันคือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างจากอุปกรณ์จำพวกพาสซีฟเท่านั้น เช่น สร้างจากขดลวด



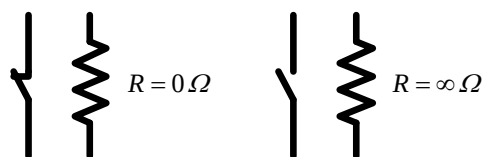
ตัวนำกับตัวต้านทานหรือสร้างจากตัวเก็บประจุกับตัวต้านทาน และวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter) จะสร้างจากอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ เช่น ทรานซิสเตอร์ ออปแอมป์ มาต่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ

2.10 อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำงานใน 2 สถานะคือ สถานะนำกระแส และสถานะหยุดนำกระแส ทั้งนี้ในเชิงทฤษฎี อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกสมมติให้เป็นสวิตช์อุดมคติ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์วงจร อย่างไรก็ตามความเข้าใจคุณลักษณะแรงดัน-กระแสของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละชนิดมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังควรมีคุณลักษณะทางอุดมคติดังนี้

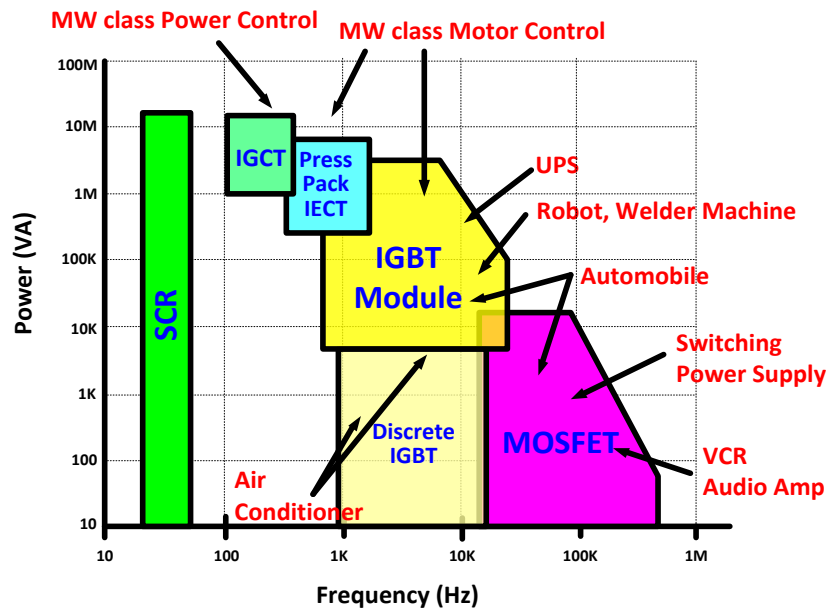
1. สามารถทนแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ได้สูงซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันใช้งาน
2. มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำ
3. มีความเร็วสูงในการเปลี่ยนสถานะการทำงาน
4. ทนต่ออุณหภูมิสูงขณะใช้งาน
5. ควบคุมได้ง่าย

โดยทั่วไปอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทำงานเป็นสวิตช์ในวงจร ซึ่งขณะนำกระแส ค่าความต้านทานของอุปกรณ์จะต่ำมาก (ใกล้เคียงศูนย์) และขณะหยุดนำกระแส ค่าความต้านทานของอุปกรณ์จะสูงมาก (ใกล้เคียงค่าอนันต์) ดังวงจรสมมูลในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลในอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอุดมคติ

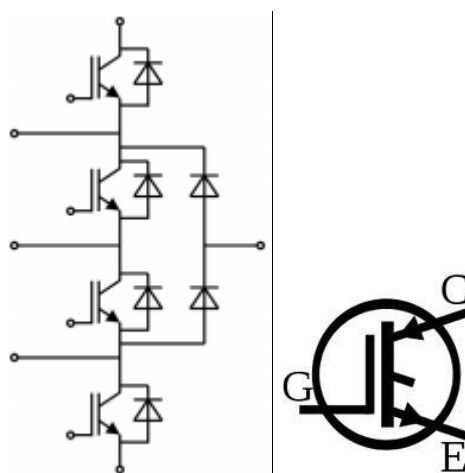
ขณะอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเปลี่ยนสถานะทำงานจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าประสิทธิภาพของวงจรโดยรวม ทั้งนี้ช่วงเวลาในการทำงานของสวิตช์ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการทำงานทั้ง 2 สถานะ นอกจากนี้การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันสามารถพัฒนาไปที่พิกัดสูงขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 2.22 สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเลือกใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์



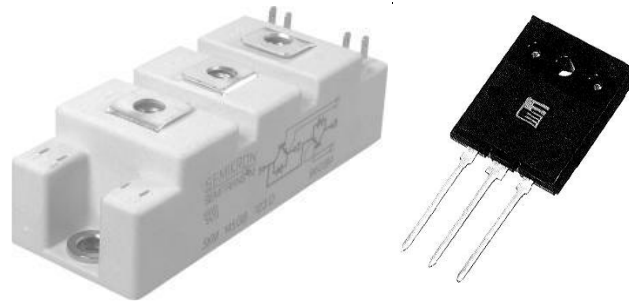
รูปที่ 2.22 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน

2.10.1 ไอจีบีที (Insulate Gate Bipolar Transistor)

ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ที่มีข้อดีในด้านความเร็วในการสวิตซ์ที่สูงเกือบเท่ามอสเฟต และมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถขับไอจีบีทีที่มีความถี่สูงและเกิดความร้อนน้อยในการใช้งานเนื่องมาจากกำลังการสูญเสียที่ตกคร่อมบนตัวไอจีบีทีมีค่าต่ำ ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ไอจีบีทีแบบโมดูลดังรูปที่ 2.23 ซึ่งทำให้สะดวกต่อการติดตั้งและนำไปใช้ในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับนั่นเอง



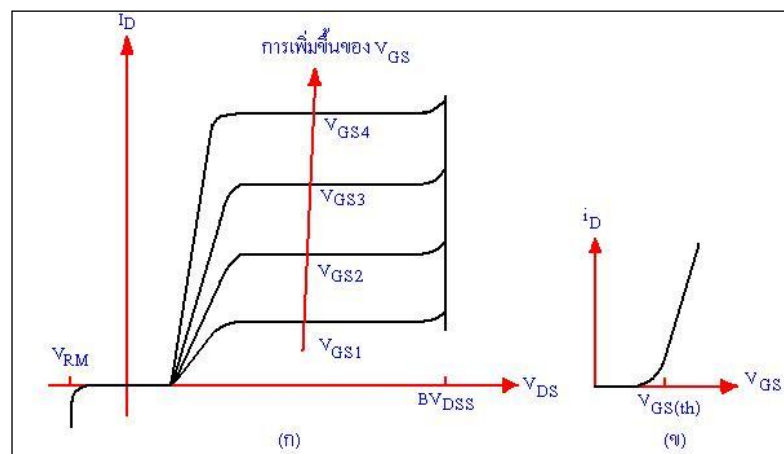
ก) สัญลักษณ์ไอจีบีที



ข) โครงสร้าง

รูปที่ 2.23 สัญลักษณ์ของไอจีบีทีและโครงสร้างไอจีบีที

โครงสร้างของไอจีบีทีส่วนมากจะมีลักษณะเหมือนมอสเฟตจะแตกต่างตรงที่ไอจีบีทีจะมีชั้น P+ หรือชั้นอิงเจกต์ติ้ง (injecting) ต่ออยู่ระหว่างขาเกรน ซึ่งใน MOSFET จะไม่มี จากการที่ขาเกตถูกกั้นด้วยชั้นของซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) เป็นผลทำให้ความต้านทานอินพุตที่ขาเกตมีค่าสูงมากเหมือนกับเพาเวอร์มอสเฟต โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ช่วง 10 จิกะโอห์ม จากผลดังกล่าวทำให้ลักษณะของกราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ ไอจีบีทีมีลักษณะคล้ายกับกราฟของทรานซิสเตอร์ แต่การควบคุมกระแสเกรนจะอาศัยการควบคุมแรงดันระหว่างขาเกตและขาซอร์สมา กกว่าการควบคุมกระแสที่ขาอินเหมือนทรานซิสเตอร์ ซึ่งกราฟแสดงแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของ IGBT แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นกราฟคุณสมบัติการถ่ายโอนกระแสและแรงดัน



รูปที่ 2.24 (ก) คุณสมบัติระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT

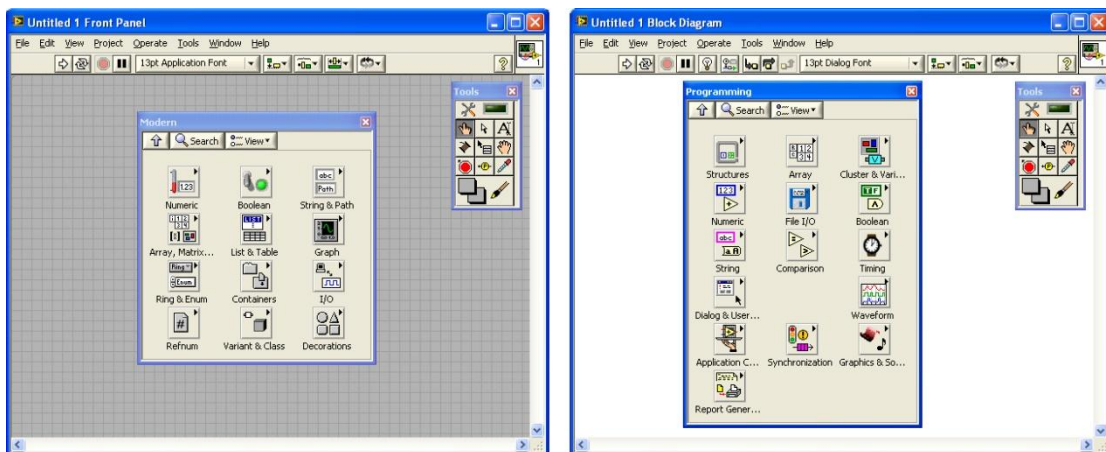
(ข) ลักษณะสมบัติการถ่ายโอนของ IGBT



2.11 อุปกรณ์อื่นๆ

2.11.1 โปรแกรม LabVIEW

LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อสร้างโปรแกรมสำหรับการเก็บข้อมูล การเชื่อมต่อกับ อุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดและการควบคุมระบบต่างๆ LabVIEW จะใช้ภาษากาแฟในการสร้าง โปรแกรม ซึ่งแตกต่างจากโปรแกรมอื่นที่ใช้ตัวอักษรเพื่อสร้างโปรแกรม เช่น C/C++, Visual C++, Visual Basic เป็นต้น โปรแกรม มีฟังก์ชันและเครื่องมือดังรูปที่ 2.23 เพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถนำมา สร้างโปรแกรมสำหรับงานประยุกต์ต่างๆ โปรแกรม LabVIEW โดยปกติจะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Front Panel และ Block Diagram ดังรูปที่ 2.25 โดยแต่ละส่วนจะใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.25 Front Panel และ Block Diagram [20]

2.11.1.1 Front Panel

เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน สำหรับใส่ค่าและแสดงผลของตัวโปรแกรมที่ สร้างขึ้นมา โดยส่วนของการใส่ค่าจะเรียกว่า “Control” ส่วนการแสดงผลจะเรียกว่า “Indicator” ที่ ถูกนำมาใช้ใน Front Panel ซึ่งจะมีจุดต่อเชื่อมอยู่ที่ Block Diagram เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงานตัว Control ที่ Front Panel จะทำการส่งข้อมูลผ่านไปยัง Block Diagram และตัวแสดงผลจะส่งค่าจาก Block Diagram กลับมาแสดงผลที่ Front Panel ผ่านตัว Indicator ที่กำหนดไว้

2.11.1.2 Block Diagram

เป็นส่วนที่เก็บ Source code ของโปรแกรม LabVIEW ซึ่งตัวโปรแกรม LabVIEW จะ เรียกว่า “VI” ตัว Code ในโปรแกรม LabVIEW เป็นกราฟฟิคที่เรียกกันว่า Graphical Programming หลักการของโปรแกรมจะเชื่อมต่อตัวจุดเชื่อมต่างๆ เข้าด้วยกันแทนที่จะเขียนโดยใช้คำสั่งต่างๆ

ดังที่ใช้ทั่วไปในโปรแกรมอื่นๆ เช่น C/C++, Visual C++ ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่า LabVIEW ใช้หลักการเดียวกับการเขียน Flow chart

2.11.1.3 ฟังก์ชันอื่นๆ

โปรแกรม LabVIEW มีฟังก์ชันต่างๆ ที่ช่วยในการพัฒนาโปรแกรมที่มีความซับซ้อน เช่น Operation (+, -, *, /, ^) ค่าคงที่ (π , e, ln2, lne, log10) ฟังก์ชันตรีโกณมิติ (sin, cos, tan) Loop & Case Structure (While Loop, For Loop, Case) และฟังก์ชัน File Input/Output (File I/O) เป็นต้น

2.11.2 อุปกรณ์เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ Data Acquisition

Data Acquisition หรือ DAQ คือกระบวนการอ่านค่าสัญญาณทางไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ แล้วนำมาเก็บไว้บนคอมพิวเตอร์เพื่อการวัด วิเคราะห์ จัดเก็บหรือแสดงผลด้วยซอฟต์แวร์ โดย DAQ แบบพื้นฐานจะสามารถทำหน้าที่ได้หลายหน้าที่พร้อมกัน โดยมีหน้าที่หลักคือ

- Analog Input สำหรับรับสัญญาณอนาล็อก ใช้วัดค่าสัญญาณแรงดันจากเซนเซอร์ต่างๆ
- Analog Output สำหรับสร้างสัญญาณอนาล็อกทั้งแบบ DC และ AC ที่เป็น Waveform
- Digital I/O ใช้ในการรับหรือสร้างสัญญาณดิจิทัล เพื่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์ภายนอก
- Counter I/O ทำหน้าที่วัดสัญญาณจาก Encoder หรือสร้างสัญญาณ Pulse



รูปที่ 2.26 Data Acquisition รุ่น NI USB-6008 [28]

2.11.3 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล [22]

การพัฒนาด้านการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ที่มีความเร็วสูง ทำให้มีการคิดค้นประดิษฐ์ตัวประมวลผลที่ใช้สำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล หรือที่เรียกว่า ดีเอสพี (DSP) โดยตัวประมวลผลดังกล่าวจะเน้นที่ความเร็วของคำสั่งทาง



คณิศาสตร์ ในปัจจุบันที่บริษัทผู้ผลิตชิปดีเอสฟืออยู่หลายบริษัทและชิปของแต่ละบริษัทยังแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันไป

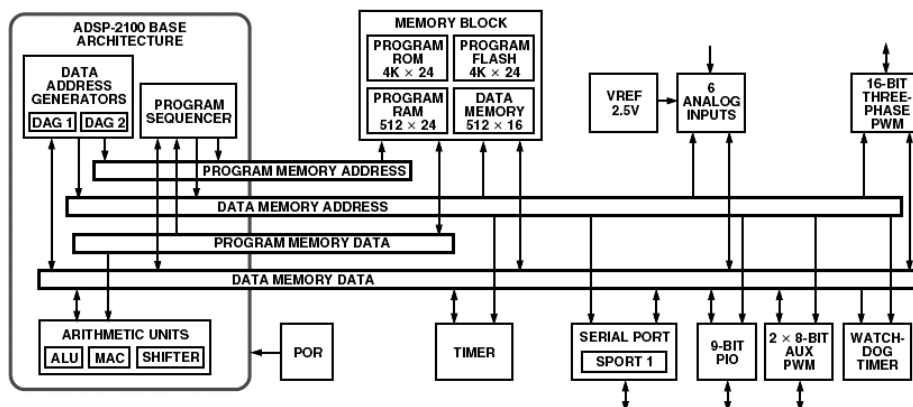
ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST ของบริษัท Analog Device มีโครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเป็นแบบจุดทศนิยมคงที่ขนาด 16 บิต (16 bit fixed-point digital signal processing) โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขนาด 16 บิต ใช้แรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์
- ความเร็วในการประมวลผล 20 MIPS (ล้านคำสั่งในหนึ่งวินาที) ต่อ 1 แมกซีนไซเคิล
- ฮาร์ดแวร์การคูณแบบขนานขนาด 16 บิต มีผลลัพธ์เป็น 32 บิต
- มี Accumulator ขนาด 32 บิต และ Arithmetic logic unit ขนาด 32 บิต
- มีพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตขนาด 24 บิต
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบแรม ขนาด 512 x 24 บิต แบบรอม ขนาด 4k x 24 บิต
- หน่วยความจำข้อมูลแบบแรม ขนาด 512 x 16 บิต
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ขนาด 4k x 24 บิต
- ตัวสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม (Pulse width modulation, PWM) ขนาด 16 บิต
- ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 12 บิต จำนวน 7 ช่อง รับค่าอนาล็อกได้ 4

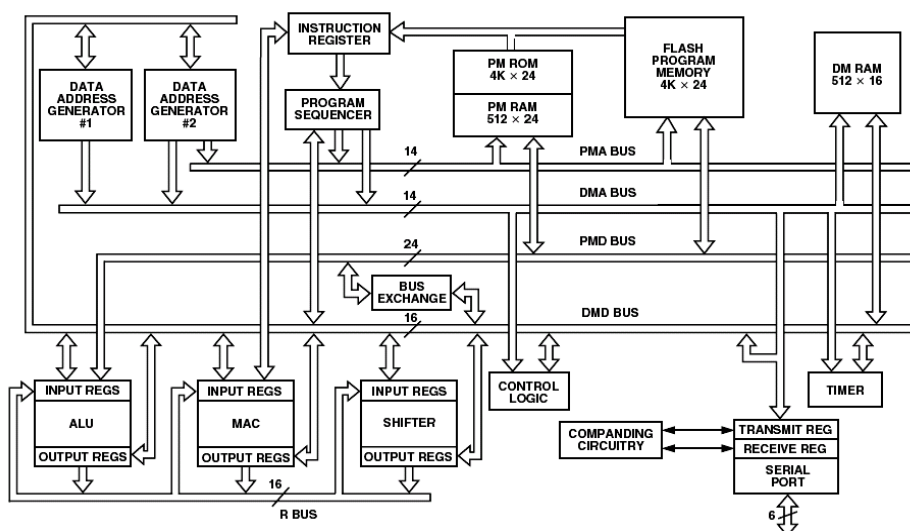
ช่องในเวลาเดียวกัน

- มีตัวโปรแกรมการประวิงเวลา (Dead time) และตัวยกเลิกพัลส์ที่แคบ (Narrow Pulse Deletion)
- มีขาทรูปของพีดับบลิวเอ็มจากภายนอก (External PWM Trip)
- มีย่านอุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส
- มีปริโปรแกรมฟังก์ชันทางคณิศาสตร์
- ติดต่อกับดีบั๊กเจอร์ (Debugger) ผ่านทางพอร์ตอนุกรมด้วยบอด (Baud) แบบอัตโนมัติ

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST จะประกอบไปด้วยระบบประมวลผลอิสระ 3 ชุดคือ ส่วนประมวลผลทางคณิศาสตร์ (Arithmetic and Logic Unit : ALU) ฮาร์ดแวร์การคูณ และฮาร์ดแวร์การบวก (Multiplier/Accumulator : MAC) และฮาร์ดแวร์การชิฟท์ (Shift) โดยกระบวนการประมวลผลจะเป็นแบบ 16 บิต โดยมีหน่วยความจำทั้งแบบรอม แบบแรม และแบบแฟลชติดต่อกับดีบั๊กเจอร์ (Debugger) ผ่านพอร์ตอนุกรม



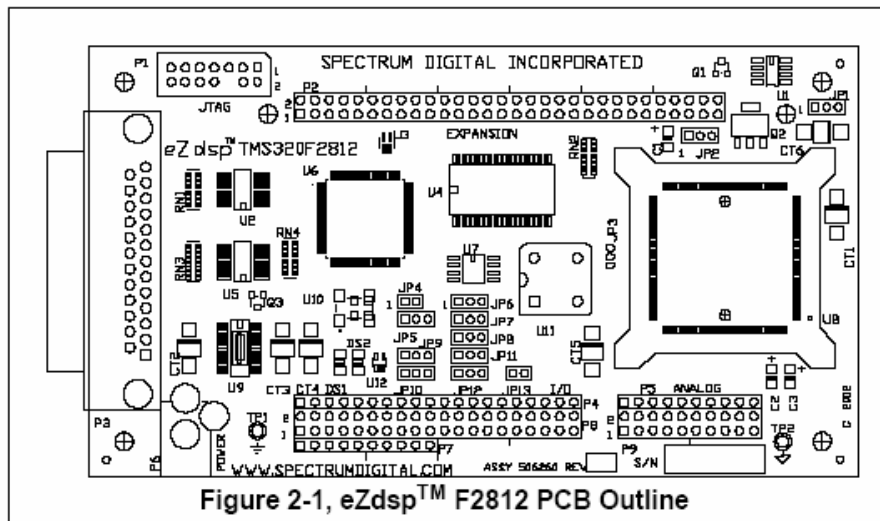
รูปที่ 2.27 โครงสร้างของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ADMCF326BST



รูปที่ 2.28 สถาปัตยกรรมของตัวประมวลผลหลักของ ADMCF326BST



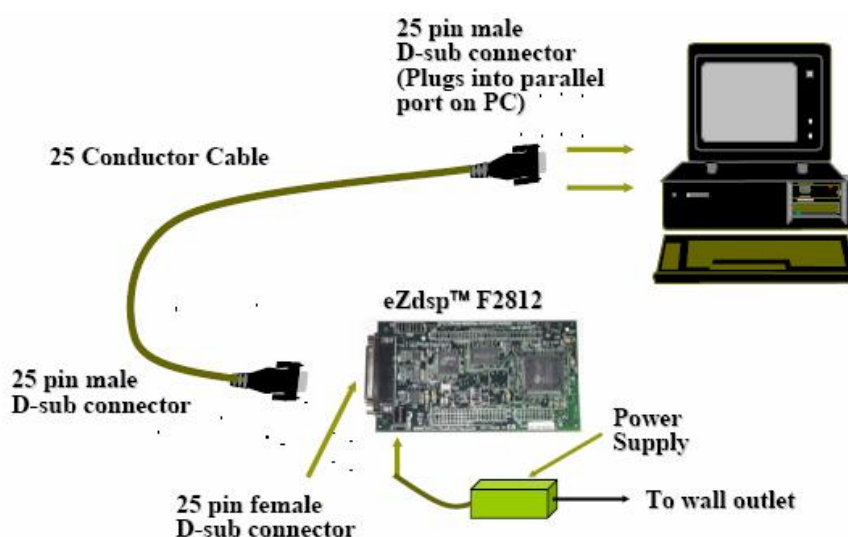
2.11.4 ตัวประมวลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812



รูปที่ 2.29 บอร์ด eZdsp TMS 320F2812

ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทเทกซัส อินสตรูเมนต์ (Texas Instruments) ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในงานควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะเนื่องจาก โครงสร้างภายในมีความยืดหยุ่นเหมาะสำหรับประยุกต์ ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์หลายชนิดเช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ, มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน, ซิงโครนัสมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและ รีแอกแตนซ์มอเตอร์ เป็นต้น

อุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล กับตัวประมวลสัญญาณดิจิทัลต่อ ผ่านทางช่องสัญญาณเครื่องพิมพ์ (Printer Port)



รูปที่ 2.30 การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกับตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล



2.11.4.1 คุณสมบัติของ eZdsp TMS32F2812

- 150 MIPS operating speed
- 18K words on-chip RAM
- 128K words on-chip Flash memory
- 18K words on-chip RAM
- 128K words on-chip Flash memory
- 64K words off-chip SRAM memory
- 30 MHz. clock
- 2 Expansion Connectors (analog, I/O)
- Onboard IEEE 1149.1 JTAG Controller
- 5-volt only operation with supplied AC adapter
- TI F28xx Code Composer Studio tools driver
- On board IEEE 1149.1 JTAG emulation connector

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาในตอนต้นจะเห็นว่าบอร์ด eZdsp TMS 320F2812 มีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้ในการออกแบบโปรแกรมควบคุมอินเวอร์เตอร์สามระดับ เนื่องจากสามารถสร้างสัญญาณพัลส์ได้ 12 พัลส์โดยใช้ Event Manager EVA และ EVB จากคุณสมบัติข้างต้นสามารถสรุปเหตุผลในการเลือกใช้ตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล (DSP) ในงานควบคุมได้ดังนี้

1. การใช้ DSP สามารถใช้การโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้ และสามารถคำนวณแบบเวลาจริง (real-time) ได้ และปัจจุบันความเร็วในการประมวลผลสัญญาณอยู่ในระดับ 40 ถึง 150 ล้านคำสั่งต่อวินาที ซึ่งเป็นผลดีต่อการตอบสนองต่ออินพุตทำให้การควบคุมถูกต้องและแม่นยำ

2. ประสิทธิภาพของ DSP ในปัจจุบันสามารถที่จะรวมเอาวงจรต่างๆเข้าไปไว้ในชิพเดียวกัน เช่น วงจรจับ PWM, วงจรสื่อสารแบบอนุกรม, วงจรถอดรหัส เป็นต้น

3. ในการกำหนดคุณสมบัติการทำงานจะใช้โปรแกรม ทำให้ DSP มีความยืดหยุ่นในการแก้ไขหรือเพิ่มเติมอัลกอริทึม ดังนั้นการใช้ DSP จะช่วยลดเวลาในการพัฒนาระบบได้

4. การใช้ DSP จะมีความถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งความแม่นยำในการประมวลผลนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้แทนสัญญาณและพารามิเตอร์ต่างๆ



จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนนั้นจะพบว่าในส่วนของการศึกษาทฤษฎีจะต้องทำความเข้าใจแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆคือ 1. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และ 2. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ อีกทั้งวงจรแปลงผันไฟฟ้านี้ต้องใช้อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 2 เท่าเมื่อเทียบวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบ 2 ระดับ และในส่วนของการควบคุมค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนกว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสองระดับมาก นอกจากนี้ในส่วนองงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นก็ได้อธิบายแต่เพียงการจำลองในโปรแกรมเท่านั้นและจะเน้นหนักไปในเรื่องของระบบควบคุม โดยผู้วิจัยจะนำมาศึกษา จำลองการทำงาน ออกแบบ สร้างและทดสอบวงจรแปลงผันฯต่อไป

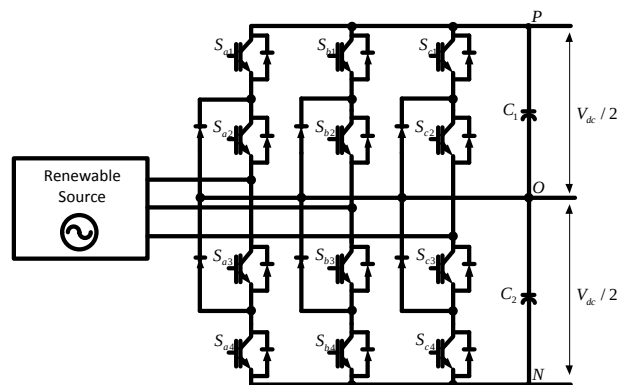


บทที่ 3

การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการสร้างแบบจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ เพื่อจำลองการทำงานของวงจรฯ และตรวจสอบระบบควบคุมการทำงานของวงจรฯ ว่ามีการทำงานอย่างปกติหรือไม่ และนำมาวิเคราะห์ ปรับปรุง แก้ไขแบบจำลองฯ แล้วจึงทำการออกแบบและสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับที่น่าเสนอ

3.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) [1]



รูปที่ 3.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับประกอบด้วยไอจีบีที (IGBT) ไคโอด และตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 ที่ DC-Link ดังรูปที่ 3.1

โดยทั่วไปแล้ววงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับจะมีรูปคลื่นเป็นรูปคลื่นไซน์ โดยใช้ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเพื่อกำหนดสถานะในแต่ละกิ่งเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งทั้งสามกิ่งจะได้รับแรงดันเท่ากับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ พลังงานไฟฟ้าจากกริดจะไหลไปทางด้านโหลด ในขณะที่พลังงานไฟฟ้าจะไหลย้อนกลับจากทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงไปที่กริดเพื่อช่วยให้สถานะของการทำงานเหมือนกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

สมการ (3.1) และ (3.2) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการหมุนของแกนหมุนอ้างอิง (แกน d-q) ตามโครงสร้างของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง



$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) = v_{dc} i_{dc} \quad (3.2)$$

เมื่อ e_d, e_q คือเวกเตอร์ของแรงดันกริด และ e_d, e_q, e_c คือส่วนประกอบเวกเตอร์ d-q ของ E_{dq} หลังจากมีการแปลงแกน V_d, V_q จะได้ส่วนประกอบเวกเตอร์แรงดันของ V_{dq} ที่ด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แกนหมุน d-q ของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการแสดงส่วนประกอบกระแสของแกน d-q (i_d และ i_q) ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาในการออกแบบตัวควบคุมกระแส บทความนี้จะแนะนำให้ i_d และ i_q ใช้การป้อนไปข้างหน้าด้วยตัวควบคุมที่แยกออกจากอุปกรณ์กระแสของ i_d และ i_q โดยใช้ตัวควบคุม PI ซึ่งโครงสร้างแรงดันของตัวควบคุมกระแสในแกนหมุนอ้างอิง (แกน d-q) คือ

$$\begin{cases} v_d^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d \\ v_q^* = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (3.3)$$

เมื่อ K_{ip}, K_{il} คือสัดส่วนของค่าสัมประสิทธิ์ และเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญในอุปกรณ์ i_d^*, i_q^* ที่เป็นพฤติกรรมของกระแส i_d, i_q ดังแสดงในสมการ (3.4)

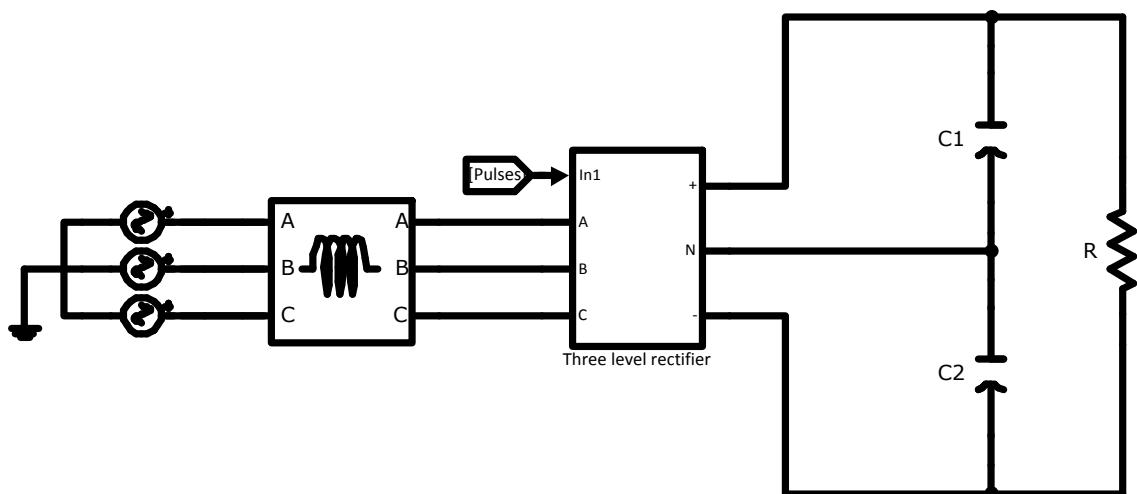
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)\right]/L & 0 \\ 0 & -\left[R - \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)\right]/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right) \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

วงจรทั้งหมดประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อุปกรณ์ควบคุมกระแสแกน d-q และส่วนของการมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและตัวประกอบกำลังของกริดให้มีเสถียรภาพตามความต้องการได้ นอกจากนี้ระบบจะเพิ่มสถานะกระแสไหลย้อนกลับและค่าชดเชยการไหลไปข้างหน้าของแรงดันที่ผิดเพี้ยนที่กริด ซึ่งทำให้สามารถควบคุมแรงดันได้สมบูรณ์ เมื่อแรงดันในสัญญาณสวิตช์เปลี่ยนแปลงโดยการมอดูเลตสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ป้อนให้กับวงจรหลักเป็นการช่วยเสริมการควบคุมแรงดันทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับตามที่ต้องการ



3.2 การออกแบบวงจรจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานของระบบจะจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 3.2 โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนที่จ่ายไฟออกมาในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสสลับ จากนั้นแรงดันที่ได้จากแหล่งกำเนิดก็จะนำไปเข้าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วนำไปใช้งานในส่วนอื่นต่อไป เช่น นำไปเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายไปยังกริด หรือนำแรงดันที่ได้ไปชาร์จแบตเตอรี่ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เลือกใช้ในวงจรแปลงผันฯคือ IGBT



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันฯแบบ 3 ระดับ

3.3 การออกแบบส่วนของวงจรกำลัง

ดีซีลิงก์ (DC Link) C_1 และ C_2 หรือวงจรเชื่อมโยงทางดีซี ดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า โดยแรงดันที่ได้จะนำไปใช้งานในส่วนอื่นต่อไป ซึ่งจะมีอยู่ 3 ขั้วคือ $+V_{dc}$, $-V_{dc}$ และ $V_{dc}/2$

จากสมการแรงดันเฉลี่ยขาออกของวงจรแปลงผันฯ 3 เฟสคือ

$$V_{dc} = V_{o,av} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{m,Line} \cos \alpha \quad (3.5)$$

เมื่อ $V_{m,Line}$ คือค่าสูงสุดของกระแสไลน์



$$0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$$

ดังนั้นเราต้องการแรงดัน $V_{dc} = 600 \text{ V}$ จะได้

$$600 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \times 537 \cos \alpha$$

$$\alpha = 47.5^\circ$$

$$\begin{aligned} V_{\text{ripple, p-p}} &= V_{\text{peak}} \times 0.05 \\ &= 600 \times 0.05 \\ &= 30 \text{ V} \end{aligned} \quad (3.6)$$

ประจุไฟฟ้าที่คายจากตัวเก็บประจุในช่วงเวลา

$$t = \frac{t_{\text{rate}}}{6} = \frac{1}{50 \times 6} = 3.333 \text{ ms} \quad (3.7)$$

$$I_L = \frac{P}{V_{dc}} = \frac{100000}{600} = 166.67 \text{ A} \quad (3.8)$$

$$C = \frac{I_{dc} \times t}{V_{\text{ripple}}} = \frac{166.67 \times 3.333 \times 10^{-3}}{30} = 18,500 \text{ } \mu\text{F} \quad (3.9)$$

เพราะฉะนั้นจึงเลือกคาปาซิเตอร์ขนาด $37000 \text{ } \mu\text{F}$ 2 ตัว ต่ออนุกรมกันซึ่งจะได้ค่าความจุรวมเท่ากับ $18,500 \text{ } \mu\text{F}$

สำหรับวิธีการควบคุม ในงานวิจัยนี้จะเลือกวิธีการควบคุมแบบ VOC เพราะเป็นวิธีการควบคุมที่ง่ายและสะดวก ไม่ยุ่งยากซับซ้อนอีกทั้งยังสามารถใช้งานได้ดียิ่งอีกด้วย

3.4 การออกแบบส่วนของวงจรควบคุม

3.4.1 ระบบควบคุมวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ VOC

ลักษณะการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ VOC ตามรูปที่ 3.3 คล้ายๆกับการควบคุมอินดักชันมอเตอร์ (Induction Motor) แบบ Field Oriented Control: FOC ซึ่งมีลักษณะพื้นฐานที่เหมือนกันในเรื่องของการแปลงแกน นั่นคือการแปลงจากระบบสาม



แกน a-b-c เป็นแกนนิ่ง $\alpha-\beta$ (Stationary $\alpha-\beta$) และแปลงจากแกนนิ่ง $\alpha-\beta$ เป็น แกนหมุน $d-q$ (Rotating $d-q$) [17]

ลักษณะการควบคุมแบบนี้มีข้อดีคือ

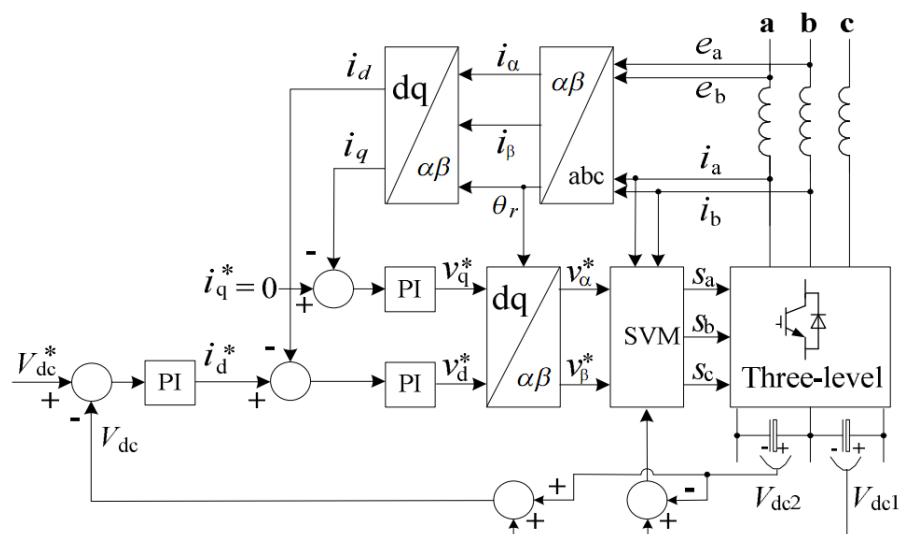
1. ทำให้กระแสด้านเข้าใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์
2. ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

3.4.2 ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุม

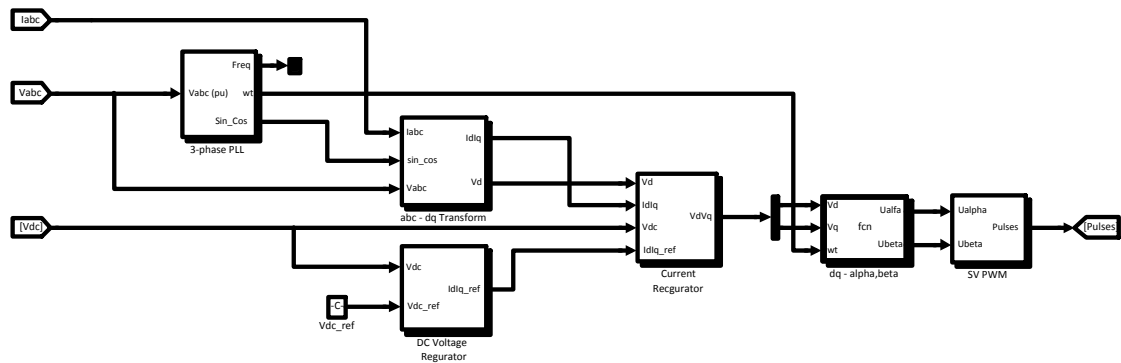
จากรูปที่ 3.3 กระแสในระบบสามเฟส (i_a, i_b, i_c) จะถูกแปลงเป็นกระแสในแกนนิ่ง $\alpha-\beta$ (i_α, i_β) จากนั้น ก็จะถูกแปลงเป็นกระแสในแกนหมุน $d-q$ (i_d, i_q) กระแสในแกนหมุน i_d, i_q ที่ได้จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพี-ไอ (P-I Controller) ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกัน โดยกระแสอ้างอิงของ i_d (i_d^*) ได้จากการนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) มาผ่านตัวควบคุมแบบพี-ไอ (P-I Controller) ส่วนกระแสอ้างอิงของ i_q (i_q^*) ถูกตั้งค่าไว้ให้เท่ากับศูนย์ เพื่อให้ได้ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

กระแส i_d และ i_q ที่ถูกควบคุมแล้วจะได้เป็นแรงดันในแกนหมุน (v_d, v_q) และผ่านการแปลงแกนกลับเป็นแรงดันในแกนนิ่ง (v_α, v_β) เพื่อนำไปแปลงเป็นฟังก์ชันการสวิตช์ที่ตัวมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ (Space Vector Modulator) ต่อไป

สำหรับแรงดันในระบบสามเฟส (e_a, e_b, e_c) จะถูกแปลงเป็นแรงดันในแกนนิ่ง $\alpha-\beta$ (e_α, e_β) จากนั้นนำไปสร้างสัญญาณ $\sin(\omega t)$ และ $\cos(\omega t)$ เพื่อนำไปอ้างอิงสองส่วนคือในการแปลงแกนนิ่ง $\alpha-\beta$ เป็น แกนหมุน $d-q$ และ แปลงกลับจากแกนหมุน $d-q$ เป็นแกนนิ่ง $\alpha-\beta$



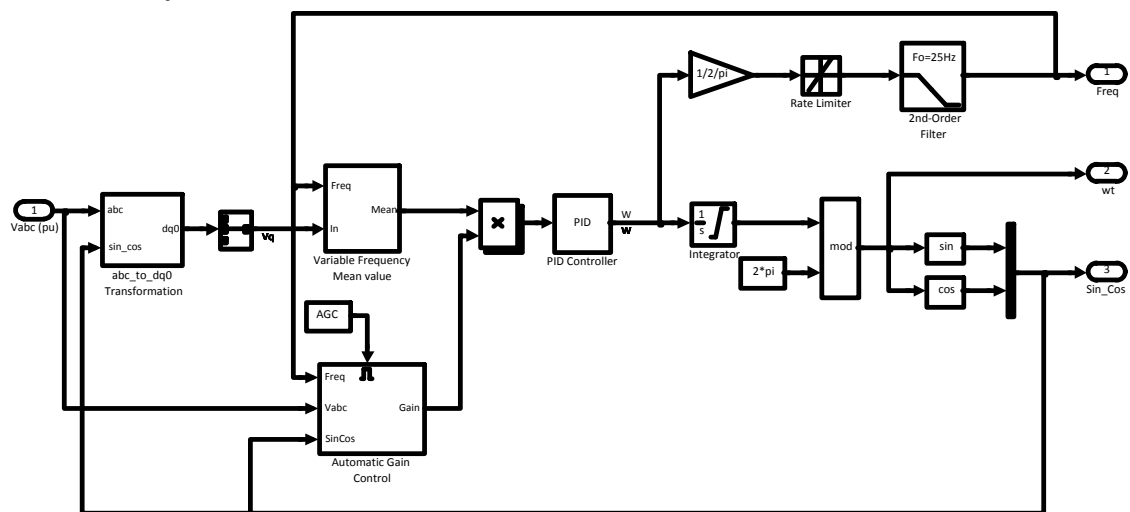
รูปที่ 3.3 ระบบควบคุมของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3 ระดับแบบ



รูปที่ 3.4 ส่วนการควบคุมจอร์แปลงผันฯแบบ VOC ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

3.4.3 ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน

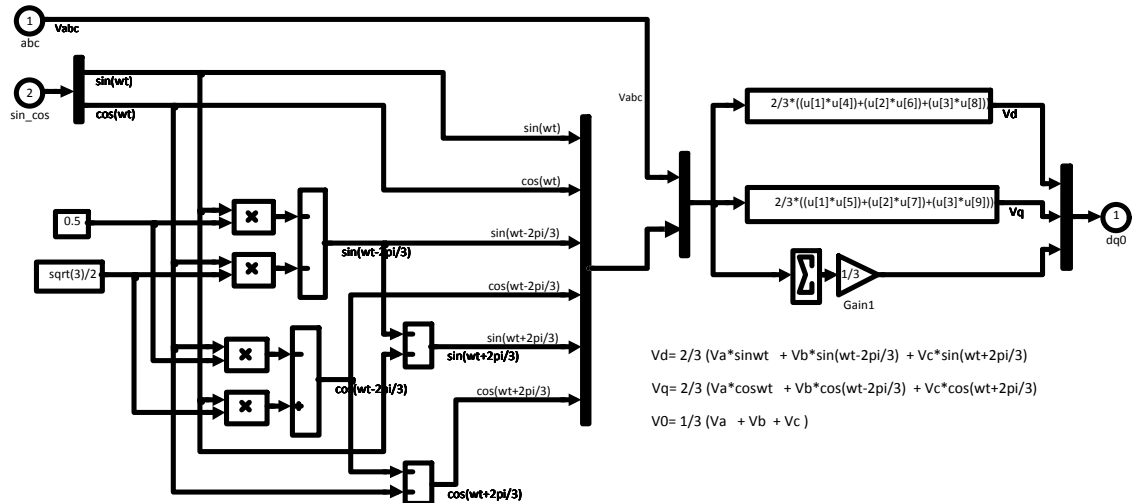
ส่วนนี้จะทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย e_a , e_b และ e_c เพื่อที่จะนำค่ามุม θ_r มาใช้ในการแปลงแกน (Park และ Inverse Park Transformation) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 หรือที่เรียกกันว่า วงจรเฟสล็อกลูป (Phase-Lock-Loop: PLL) นั่นเอง



รูปที่ 3.5 ส่วนการตรวจจับมุมเฟสของแรงดัน

3.4.4 ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส abc เป็น $d-q$

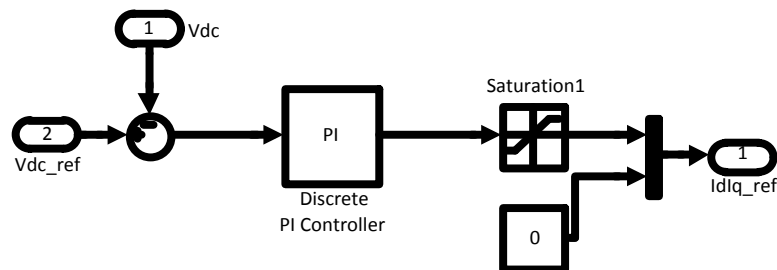
ส่วนนี้เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแปลงแกนจากแกน 3 เฟส abc เป็นแกนนิ่ง $d-q$ โดยจะใช้มุมที่ได้จากส่วนการตรวจจับมุมเฟสมาช่วยในการแปลงแกนดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ส่วนการแปลงแกนจาก 3 เฟส abc เป็น d-q

3.4.5 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

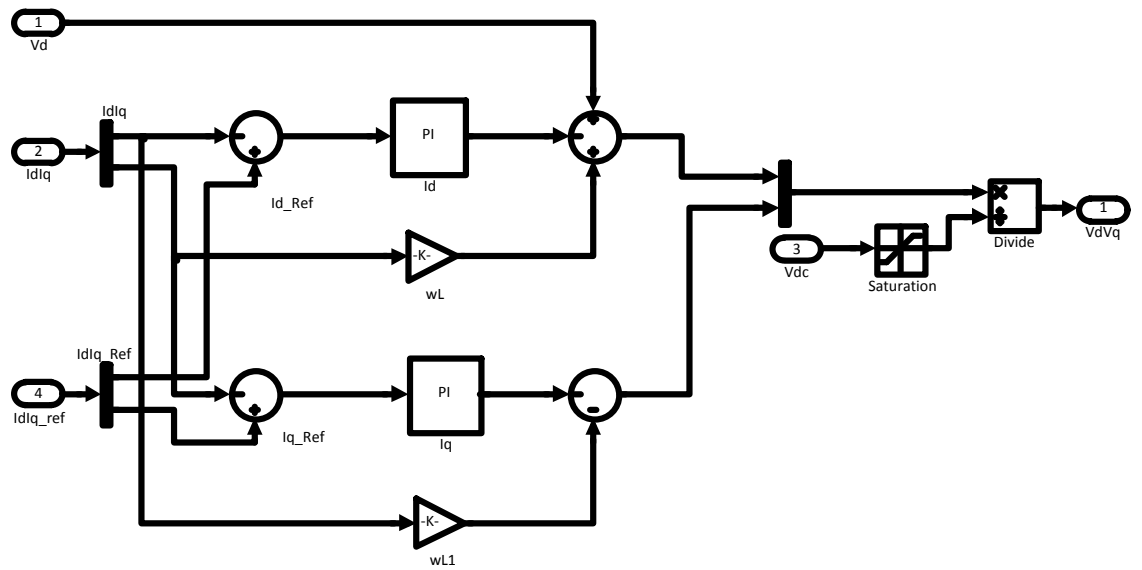
ส่วนนี้จะทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันตามค่าที่เราต้องการ ซึ่งจะถูกรควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PI โดยจะได้เป็นกระแสอ้างอิงของวงจรควบคุม ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

3.4.6 ส่วนการปรับค่ากระแส

การทำงานในส่วนนี้จะนำกระแสที่วัดได้จากการใช้งานจริงมาเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านตัวควบคุมแบบ PI จากนั้นก็จะได้แรงดันในแกน $d-q$ (v_d , v_q) ดังแสดงในรูปที่ 3.8

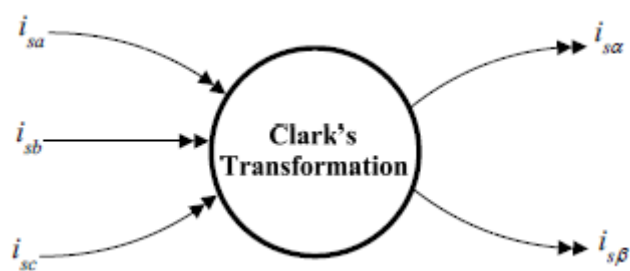


รูปที่ 3.8 ส่วนการปรับค่ากระแส

เมื่อได้แรงดัน v_d , v_q จากส่วนนี้แล้วก็จะนำไปแปลงให้อยู่ในแกน $\alpha - \beta$ จะได้แรงดัน v_α, v_β ออกมา จากนั้นก็จะนำแรงดัน v_α, v_β ไปเข้าสู่กระบวนการ SVM และนำสัญญาณที่ได้จาก SVM นี้ไปขับนำสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

3.4.7 การแปลงคาร์ค (Clark's Transformation)

คือการแปลงจากระบบสามแกน (a, b, c) เป็นสองแกน ($\alpha - \beta$) มีลักษณะดังในรูปที่ 3.9



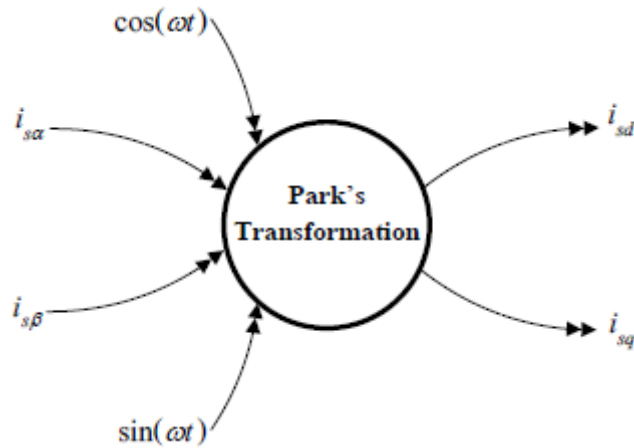
รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมการแปลงแบบคาร์ค

$$i_\alpha = i_a \quad (3.10)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(2i_b + i_c) \quad (3.11)$$



3.4.8 การแปลงปาร์ค (Park's Transformation)



รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมการแปลงแบบปาร์ค

$$i_d = i_\alpha \cos(\omega t) + i_\beta \sin(\omega t) \quad (3.12)$$

$$i_q = -i_\alpha \sin(\omega t) + i_\beta \cos(\omega t) \quad (3.13)$$

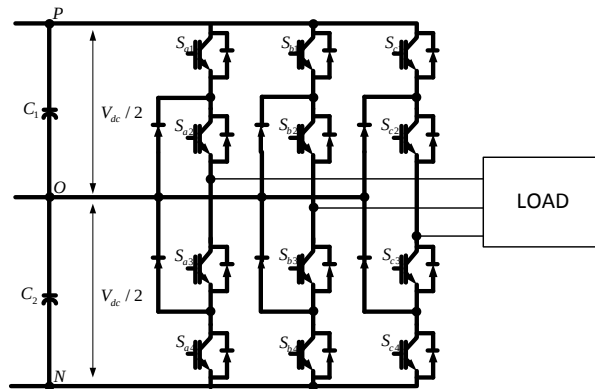
3.5 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) [12]

การคล้ายกันของนิยามฟังก์ชันสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองระดับกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับก็เป็นเช่นเดียวกัน ในการวิเคราะห์จะง่ายขึ้นเมื่อทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดเป็นสวิตช์ในอุดมคติ ทำให้แรงดันทั้งสามเฟสเท่ากันที่ทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ฟังก์ชันสวิตช์สำหรับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับคือ

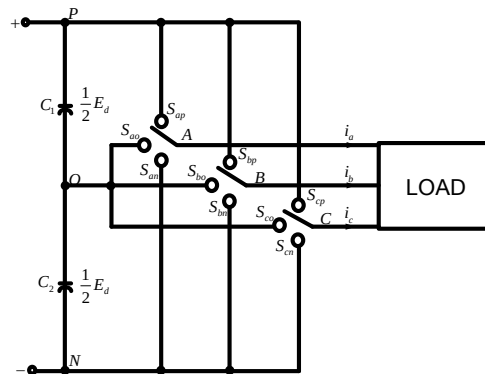
$$s_i = \begin{cases} 1 & \left(u_i = \frac{1}{2} E_d \right) \\ 0 & (u_i = 0) \\ -1 & \left(u_i = -\frac{1}{2} E_d \right) \end{cases} \quad (i = a, b, c) \quad (3.14)$$



นอกจากนี้แต่ละกิ่งยังสามารถเปลี่ยนสถานะโดยใช้สวิตช์ เพราะฉะนั้นแบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสองระดับ(รวมทั้งโหลด) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และฟังก์ชันสวิตช์ s_i จะแบ่งออกเป็น s_{ip} , s_{io} และ s_{in} เมื่อเปิดแต่ละอันค่าของอันแรกจะเท่ากับหนึ่ง และเมื่อปิดมันก็จะป็นศูนย์เพราะว่าสองสวิตช์ที่แต่ละเฟสไม่สามารถเปิดและปิดที่เวลาเดียวกันได้ ดังนั้น s_{ip}, s_{io}, s_{in} จะได้ว่า $s_{ip} + s_{io} + s_{in} = 0$



รูปที่ 3.11 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.12 แบบจำลองอย่างง่ายของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

จากรูปที่ 3.12 จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสามเฟสคือ

$$\begin{cases} u_{AN'} = Ri_a + L \frac{d}{dt} i_a + E_a \\ u_{BN'} = Ri_b + L \frac{d}{dt} i_b + E_b \\ u_{CN'} = Ri_c + L \frac{d}{dt} i_c + E_c \end{cases} \quad (3.15)$$

เขียนในรูปเมตริกซ์ดังสมการ (3.16)



$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} i_b \\ \frac{d}{dt} i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่โหลดและแรงดันของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้านขาออกจะสามารถหาได้จาก

$$\begin{bmatrix} u_{AN'} \\ u_{BN'} \\ u_{CN'} \end{bmatrix} = \frac{1}{6} E_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

ดังนั้นเมื่อนำสมการ (3.17) แทนในสมการ (3.16) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} i_b \\ \frac{d}{dt} i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E_d}{6L} \times (3S_a - S^*) - \frac{E_a}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_b - S^*) - \frac{E_b}{L} \\ \frac{E_d}{6L} \times (3S_c - S^*) - \frac{E_c}{L} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\text{เมื่อ } S^* = S_a + S_b + S_c$$

3.6 การออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ (Inverter)

3.6.1 การออกแบบส่วนของวงจรกำลัง

ดีซีลิงก์ (DC Link) หรือวงจรเชื่อมโยงทางดีซี ดังรูปที่ 3.13 คือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 800 VDC ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสเรกติไฟเออร์ให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า โดยแรงดันที่ออกจากดีซีลิงก์เพื่อจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์จะมี 3 ขั้ว คือ +Vdc, -Vdc และ Vdc/2



รูปที่ 3.13 ดีซีลิงก์ (DC Link)

สำหรับการกำหนดค่าของตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$V_{ripple, p-p} = V_{peak} \times 0.05 \quad (3.19)$$

$$= 537 \times 0.05$$

$$= 26.85 \text{ V}$$

ประจุไฟฟ้าที่คายจากตัวเก็บประจุในช่วงเวลา $t = \frac{t_{rate}}{6}$

$$I_{dc} = \frac{P}{V_{dc}} = \frac{1000}{537} = 1.86 \text{ A}$$

$$t = \frac{1}{50 \times 6} = 3.333 \text{ ms}$$

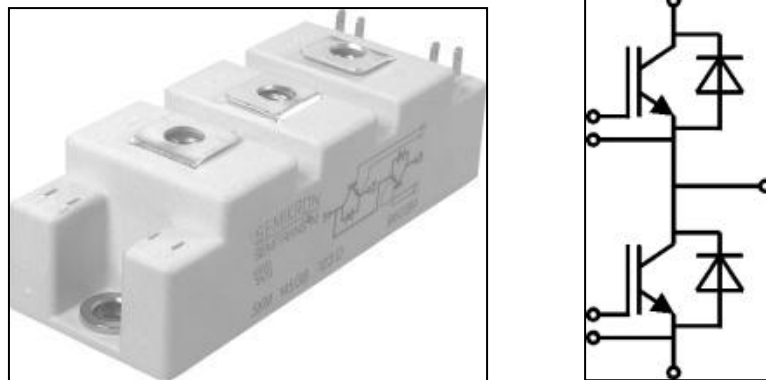
$$C = \frac{I_{dc} \times t}{V_{ripple}} = \frac{1.86 \times 3.333 \times 10^{-3}}{26.85} = 240 \text{ } \mu F$$

เพราะฉะนั้นจึงเลือก คาปาซิเตอร์ขนาด 2200 μF 450 V 2 ตัว ต่ออนุกรมกันได้ค่าความจุ 1100 μF เพื่อให้แรงดันเรียบขึ้น

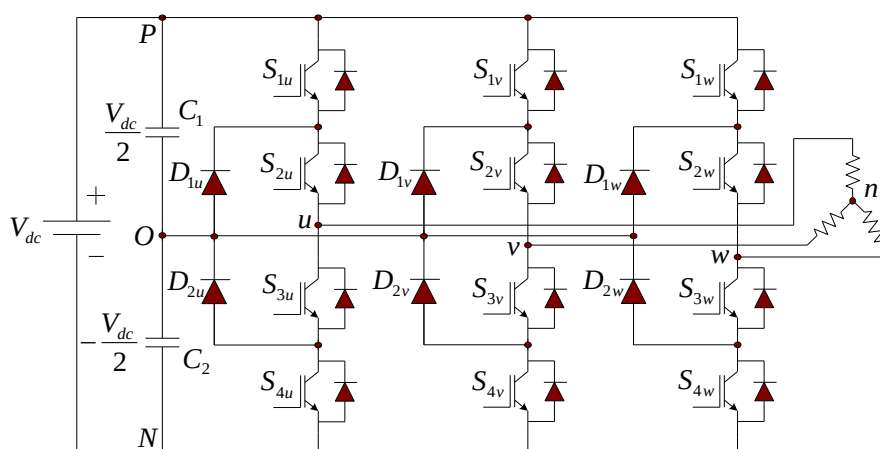
3.6.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ (Equivalent Inverter)

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการกรองจากวงจรดีซีลิงค์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับวงจรจะประกอบด้วยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ชุด ซึ่งในที่นี้จะใช้ IGBT ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse Width Modulation) เนื่องจากไอจีบีทีมีข้อดีในด้านความเร็วในการสวิตช์ที่สูงเกือบเท่ามอสเฟตและมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถขับไอจีบีทีที่มีความถี่สูงและเกิดความร้อนน้อยในการใช้งานเนื่องมาจากกำลังการสูญเสียที่ตกคร่อมบนตัวไอจีบีทีมีค่าต่ำ

ในส่วนของวงจรที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้นใช้อุปกรณ์ สวิตชิงซึ่งในวงจรนี้เลือกใช้ไอจีบีทีโมดูลของเซมิคอน SKM75GB063D มีขนาด 600 V, 50 A เป็นอุปกรณ์สวิตชิงซึ่งไอจีบีทีซึ่งใช้ 6 ตัว โดยในหนึ่งโมดูลนั้นประกอบด้วยไอจีบีที 2 ตัว ดังนั้นใน วงจรจึงมีไอจีบีทีทั้งหมด 12 ตัวดังรูปที่ 3.15 ซึ่งมีในแต่ละตัวฟริววลิ่งไดโอดประกอบอยู่ในตัวแล้ว ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ SKM75GB063D





รูปที่ 3.15 วงจรอินเวอร์เตอร์

3.6.3 วงจรกรองสัญญาณ (LC filter)

3.6.3.1 การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้เก็บพลังงาน

เนื่องจากตัวเก็บประจุเป็นที่ใช้เก็บพลังงานที่มีความจำกั้ด ดังนั้นจึงต้องกำหนดขอบเขตความสามารถในการชดเชยแรงดันแต่ก็ยั้งต้องมีข้อกำหนดอื่น ๆ ร่วมด้วยซึ่งข้อกำหนดทั้งหมดในการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุมีดังนี้

สามารถชดเชยแรงดันตกชั่วขณะได้สูงสุดเท่ากับ 110 V (50% ของแรงดันปกติ) ที่กระแส 5 A ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 (Unity) และเป็นการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบปกติกรณีชดเชยตรงเฟสกับแรงดันตกชั่วขณะซึ่งเป็นกรณีที่ใช้กำลังจริงมากที่สุด เป็นระยะเวลา 0.1 วินาที โดยมีแรงดันที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 600 V เนื่องจากขณะทำการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแรงดันที่บัสไฟตรงจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจึงต้องกำหนดค่าแรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรงที่สามารถสร้างแรงดันชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ โดยพิจารณาแรงดันสูงสุดที่ต้องการชดเชยได้นั้นคือ 110 V ซึ่งมีค่ายอดแรงดันเท่ากับ 156 V และเมื่อค่าแรงดันที่ลดลงเนื่องจากความสูญเสียต่างๆในระบบ ดังนั้นจึงกำหนดให้แรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 200 V จากข้อกำหนดข้างต้นสามารถหาขนาดตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ (3.20)

$$C_{bus} = \frac{2V_{com(max)}I_{com(max)}t_{com(max)}}{(V_{bus(max)}^2 - V_{bus(min)}^2)} \quad (3.19)$$

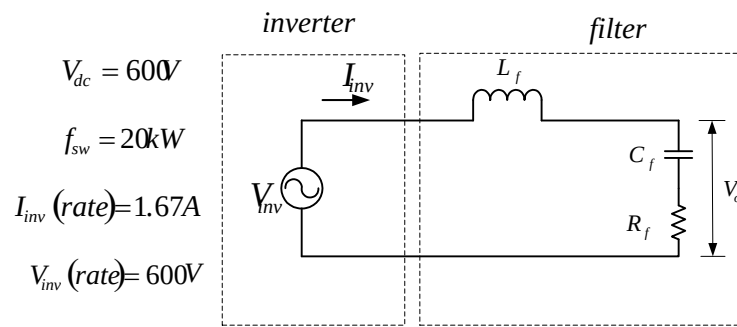
ดังนั้นเราจะทำการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้เก็บพลังงานได้ดังนี้

$$C_{bus} = \frac{2 \times 110 \times 5 \times 0.1}{(600^2 - 200^2)} = 343 \mu F$$



3.6.3.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เนื่องจากแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อวงจรกรองที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เพื่อกรองความถี่ที่ไม่ต้องการไม่ให้เข้าไปในระบบไฟฟ้ามากเกินไป โดยในการออกแบบจะละเลยผลกระทบของโหลดและแรงดันในระบบไฟฟ้าเพื่อให้่ายในการออกแบบและสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.16 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ

กำหนดให้แรงดันความถี่หลักมูลที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองมีค่าไม่เกิน 5% ของแรงดันในระบบไฟฟ้าปกติซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่ามากที่สุดที่สามารถใช้งานได้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.20)

$$L \leq \frac{0.05V_{normal}}{2\pi f I_{inv}} \quad (3.20)$$

$$\leq \frac{0.05 \times 220}{2\pi \times 50 \times 1.67} = 20.96mH$$

กำหนดให้ค่ายอดของกระแสกระเพื่อมสูงสุดที่ผ่านวงจรกรองมีค่าไม่เกิน 15% ของพิกัดอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.21) โดยพิจารณาจากแรงดันขณะที่วัฏจักรงาน (Duty cycle) 50% ซึ่งจะมีค่ายอดของกระแสกระเพื่อมสูงสุด

$$L \geq \frac{V_{Lf}}{2\Delta I_{inv} f_h} \quad (3.21)$$

$$\geq \frac{600}{2 \times 0.15 \times 1.67 \sqrt{2} \times 20 \times 10^3} = 42.34mH$$



กำหนดค่ากระแสกระเพื่อมที่โหลดไม่เกิน 5% ของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุวงจรกรอง ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเก็บประจุค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้โดยพิจารณาการแบ่งโหลดของกระแสกระเพื่อมจากอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุกับโหลด โดยโหลดจะคิดที่กรณีที่แย่ที่สุดคือมีเพียงตัวต้านทานที่พิกัดเดียว สามารถหาได้จากสมการ

$$C = \frac{20}{2\pi f_h R_{rate}} \quad (3.22)$$

$$= \frac{20}{2\pi \times 20 \times 10^3 \times 1k\Omega} = 0.159\mu F$$

กำหนดค่า Damping factor เท่ากับ 1 สามารถเขียนอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างได้ดังสมการที่ (3.23)

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{C_f R_f s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f R_f s + 1} \quad (3.23)$$

จากสมการที่ (3.24) สามารถหาค่า Damping factor ได้ดังสมการที่ (3.24) เราจะใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำจากสมการที่ (3.25)

$$R_f = 2\sqrt{\frac{L_f}{C_f}} = 2\sqrt{\frac{42.34mH}{0.159\mu F}} = 1.03k\Omega \quad (3.24)$$

$$\xi_f = \frac{R_f}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} = \frac{1.03k\Omega}{2} \sqrt{\frac{0.159\mu F}{42.34mH}} = 263.83 \quad (3.25)$$

กำหนดการลดทอนแรงดันกระเพื่อมให้มีค่าไม่น้อยกว่า 15 เท่าที่ฮาร์โมนิก $20kHz$ และ 3 เมื่อแทนค่า R_f สมการที่ (3.24) ลงในสมการที่ (3.23) จะได้สมการที่ (3.26)

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{2\sqrt{C_f L_f} s + 1}{C_f L_f s^2 + 2\sqrt{C_f L_f} s + 1} \quad (3.26)$$

เราสามารถที่จะคำนวณหาค่าต่างๆ ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้โดยจะทำการกำหนดค่า ตัวเก็บประจุให้เท่ากับ $0.159\mu F$ ความถี่ที่ใช้ในการคัตออฟเท่ากับ $50Hz$ และค่าอัตรา การหน่วงเท่ากับ 263.83 และค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ $42.34mH$ ดังนั้นเราจึงนำค่าตัวแปรที่ได้นำมา คำนวณในฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้ค่าในฟังก์ชันเป็นดังนี้คือ

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{2\sqrt{0.159\mu F \times 42.34mHs} + 1}{(0.159\mu F \times 42.34mH)s^2 + 2\sqrt{(0.159\mu F \times 42.34mH)s} + 1}$$

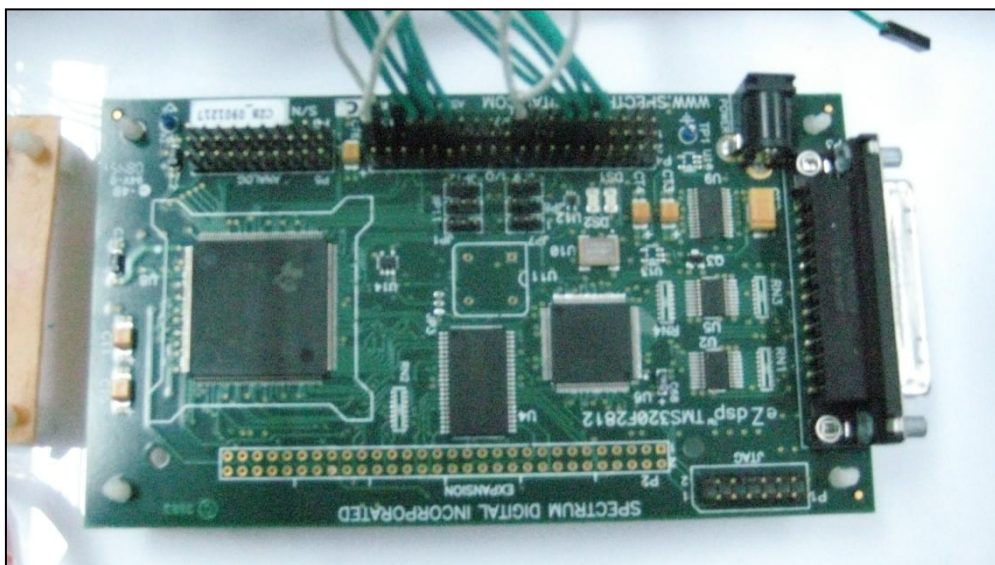
$$\therefore \frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{0.164 \times 10^{-3}s + 1}{6.73 \times 10^{-9}s^2 + 0.164 \times 10^{-3}s + 1}$$

$$Q_{factor} = \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{2 \times 263.83} = 1.895 \times 10^{-3} \text{ Var}$$

3.6.4 การออกแบบส่วนของวงจรควบคุม

3.6.4.1 ตัวประมวลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812

ตัวประมวลสัญญาณดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812 ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ผลิตภัณฑ์ของ บริษัท Texas Instrument ซึ่งเป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP Controller) ที่เหมาะสำหรับ ประยุกต์ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะเนื่องจากโครงสร้างภายในมีความอ่อนตัวเหมาะ สำหรับประยุกต์ใช้ในงานควบคุมมอเตอร์หลายชนิด เช่นมอเตอร์เหนี่ยวนำ, มอเตอร์กระแสตรง แบบไร้แปรงถ่าน, ซิงโครนัสมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและรีแอคแตนซ์มอเตอร์ เป็นต้น

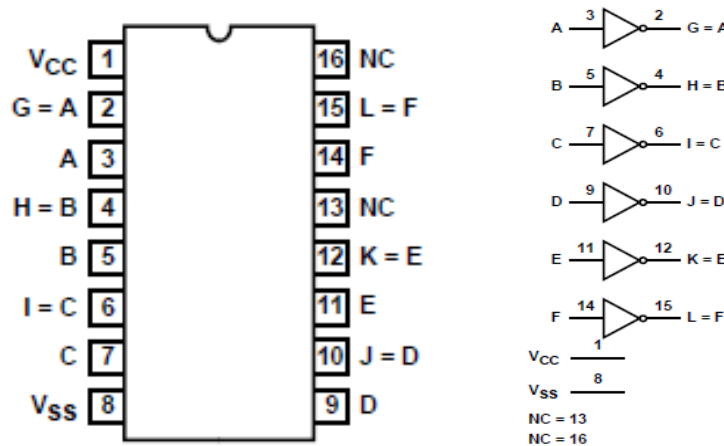


รูปที่ 3.17 ตัวประมวลเชิงดิจิทัลเบอร์ TMS320F2812



3.6.4.2 HEX BUFFER (OPEN DRAIN)

สัญญาณที่ออกจาก ezDSP TMS320F2812 มีแรงดันออก 3.3 V ซึ่งเมื่อจ่ายสัญญาณเข้าวงจรขับเคลื่อน SKHI 22B ของ Semikron สัญญาณออกมาไม่สามารถนำไปขับเคลื่อนได้ จึงต้องใช้ CD4050B ดังแสดงดังรูปที่ 3.18 ช่วยในการเพิ่มสัญญาณด้านเข้า SKHI 22B ของ Semikron หลักการทำงานคือ เมื่อสัญญาณจาก DSP ส่งมาในสถานะเป็นลอจิก 1 แรงดัน 3.3 โวลต์ สัญญาณที่ออกไปจาก CD4050B ก็จะมีค่า ประมาณ 5 โวลต์ และ ในสถานะเป็นลอจิก 0 แรงดัน 0 โวลต์ สัญญาณที่ออกไปจาก CD4050B ก็จะมีค่า ประมาณ 0 โวลต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังอุณหภูมิในขณะนั้น และแรงดันที่ออกมาจาก DSP ด้วย อีกทั้งยังมีข้อดี ก็ยังเป็นบัฟเฟอร์ (BUFFER) ได้อีก



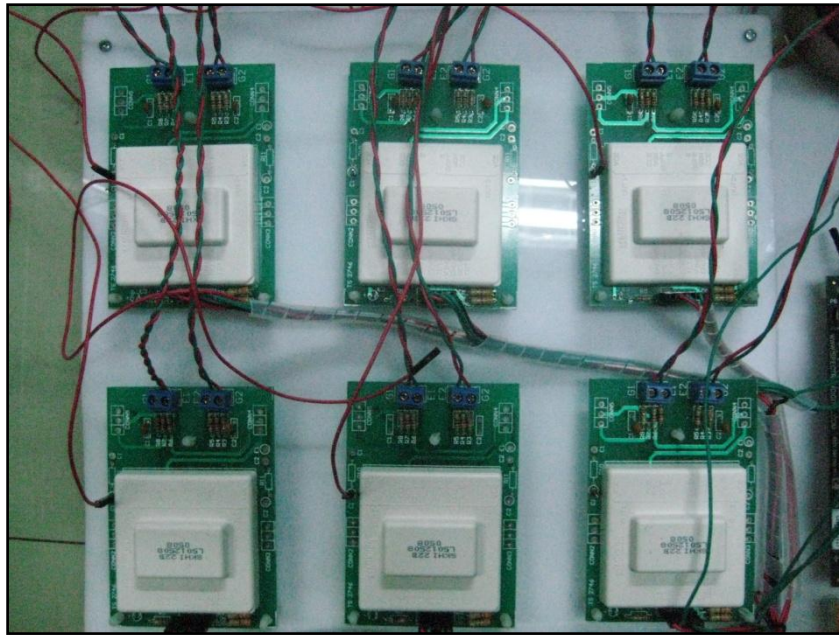
รูปที่ 3.18 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของ CMOS Hex Buffer/Converters # CD4050B

3.6.4.3 วงจรขับเคลื่อนของไอจีบีที

ชุดขับเคลื่อนของวงจรไอจีบีทีทั้ง 12 ตัวนั้น ได้ใช้ชุดขับเคลื่อนของเซมิคอน (SKHI 22B) เป็นจำนวน 6 ชุดดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยที่ 1 ตัวสามารถขับเคลื่อนได้ 2 ตัว คู่บนและคู่ล่าง ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะของชุดขับเคลื่อนของไอจีบีทีที่มีลักษณะดังนี้

1. ป้องกันไอจีบีทีจากการลัดวงจร โดยวงแรงดันที่ขาคอลเลกเตอร์และขาอีมิเตอร์ ซึ่งถ้าเกิดการลัดวงจรจะสั่งให้ไอจีบีทีเปิดวงจรออก
2. การขับเคลื่อนอินเตอร์ล๊อคระหว่างไอจีบีทีตัวบนและตัวล่าง
3. มีหม้อแปลงความถี่สูงแยกกราวด์ (Ground) ภายใน
4. สร้างเวลาหน่วง (Delay Time) ระหว่างไอจีบีทีตัวบนและตัวล่าง
5. รับสัญญาณขับเคลื่อนของไอจีบีที โดยจะปิดสวิตช์ถ้าแรงดันจุดชนวนมากกว่า 12.9 โวลต์ (ไม่เกิน 15.6 โวลต์) และเปิดสวิตช์ถ้าแรงดันจุดชนวนน้อยกว่า 2.1 โวลต์
6. แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 15 โวลต์ บวกลบ 0.6 โวลต์

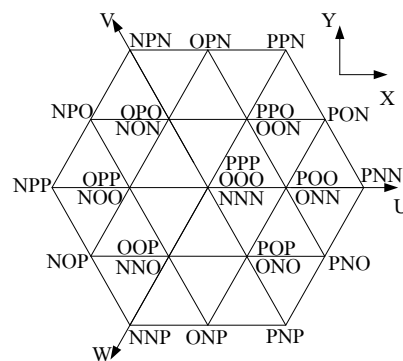
เมื่อใช้วงจรขับเคลื่อน SKHI 22B ดังแสดงดังรูปที่ 3.19 ไปขับ ไอจีบีทีที่พิกัดแรงดัน 1700 V ต่อค่าความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม ต่ออนุกรมที่ระหว่างขาคอลเลกเตอร์และอิมิตอร์ และขาเบสของ ไอจีบีทีจะต้องต่อเข้ากับขั้ว VCE ของชุดวงจรขับเคลื่อนเพื่อป้องกันการลัดวงจรของ ไอจีบีที



รูปที่ 3.19 SKHI 22B board

3.7 การมอดูเลตสัญญาณพัลส์บวลิเอ็มด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) [3], [6], [12]

แต่ละเฟสของวงจรสามระดับมีสถานะของสวิตช์อยู่สามสถานะ ดังนั้นวงจรแบบสามระดับจึงสามารถสร้างเวกเตอร์แรงดันได้ทั้งหมด 27 สถานะ (3³) โดยแสดงในแต่ละสถานการณ์สวิตช์บนรูปหกเหลี่ยมได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 สถานะสวิตช์ของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบสามระดับ [3], [6], [12]



จากรูปที่ 3.20 สามารถแบ่งเวกเตอร์ออกเป็น 5 กลุ่มและสรุปในตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

- เวกเตอร์ศูนย์ Zero Voltage Vector (ZVV)
- เวกเตอร์ขนาดกลาง Medium Voltage Vector (MVV)
- เวกเตอร์ขนาดใหญ่ Large Voltage Vector (LVV)
- เวกเตอร์ขนาดเล็กตัวบน Upper Small Voltage Vector (USVV)
- เวกเตอร์ขนาดเล็กตัวล่าง Lower Small Voltage Vector (LSVV)

ตารางที่ 3.1 กลุ่มเวกเตอร์แรงดัน

Voltage Vector	Symbols
ZVV	(PPP), (OOO), (NNN)
MVV	(PON),(ONP),(NPO) (NOP), (ONP), (PNO)
LVV	(PNN), (PPN), (NPN) (NPP), (NNP), (PNP)
USVV	(POO), (PPO), (OPO) (OPP), (OOP), (POP)
LSVV	(ONN), (OON), (NON) (NOO), (NNO), (ONO)

ดังข้างต้นในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองการทำงาน และการออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ ซึ่งจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นทั้งของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง(Rectifier) และวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) แล้วจึงนำแบบจำลองที่ได้มาจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และเมื่อได้ผลการจำลองการทำงานเป็นที่น่าพอใจก็จะทำการสร้างวงจรแปลงผันฯต่อไป



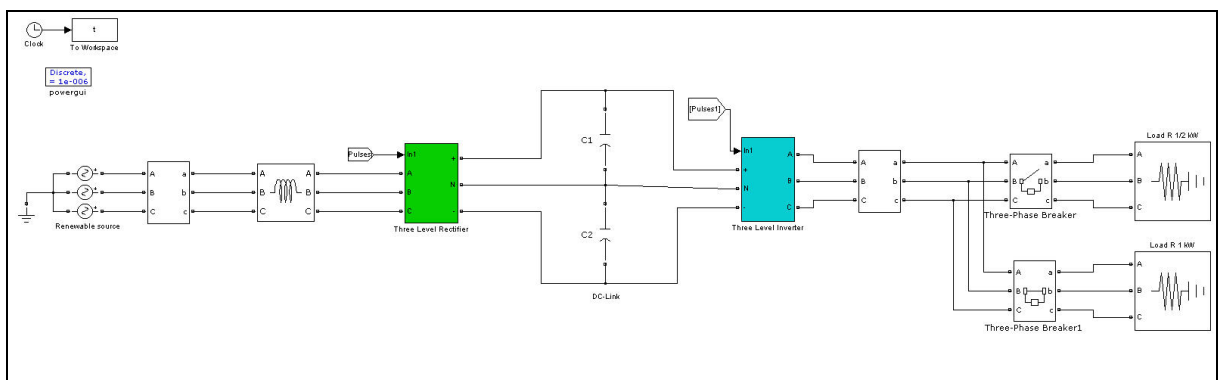
บทที่ 4

การทดสอบการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แบบสามระดับสำหรับแหล่งกำเนิดพลังงานทดแทน

ในบทนี้จะนำเสนอการจำลองการทำงานและผลการจำลองของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ ซึ่งจะใช้แหล่งกำเนิดพลังงานทดแทนจากกังหันลม และกำหนดให้พลังงานที่ได้จากกังหันลมนั้นมีแรงดันสม่ำเสมอ โดยจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK

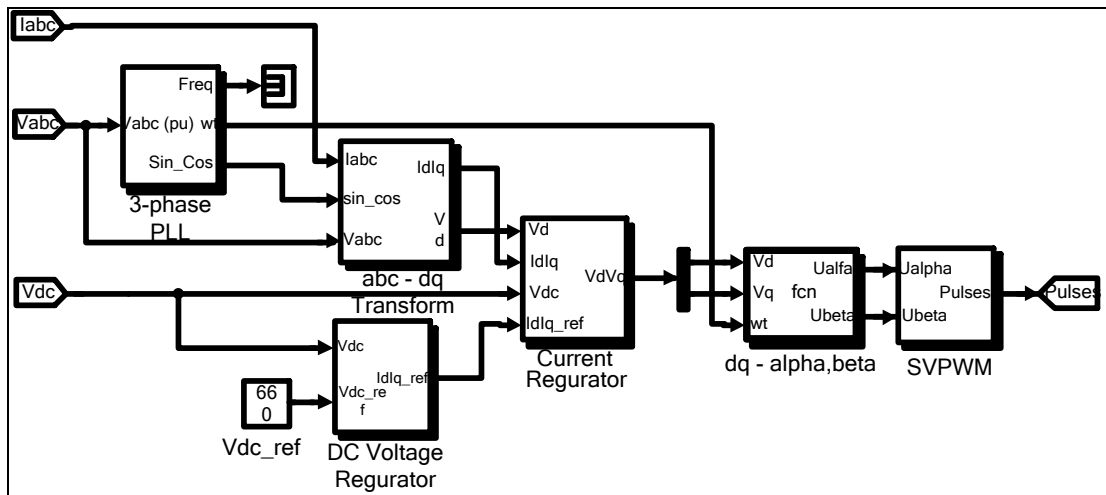
4.1 การจำลองการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้า

โครงสร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับที่นำมาจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดพลังงาน วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ (Rectifier) วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ (Inverter) ตัวเก็บประจุจำนวน 2 ตัว และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 4.1 นอกจากนี้จะประกอบด้วยบล็อกควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันทั้งสองวงจรแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

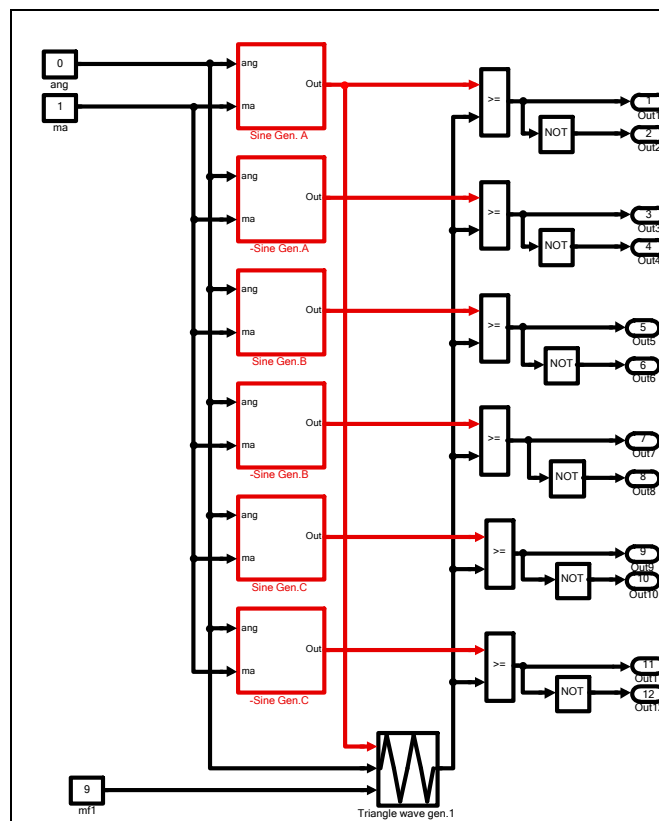


รูปที่ 4.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับในโปรแกรม

MATLAB/SIMULINK



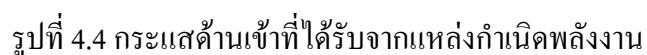
รูปที่ 4.2 บล็อกควบคุมจอร์แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Rectifier) ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

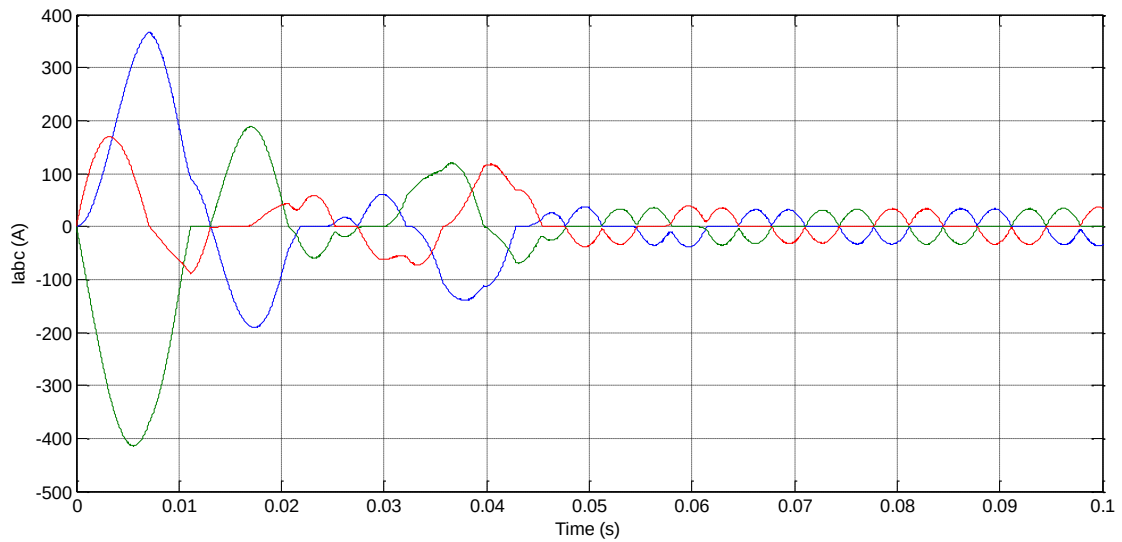


รูปที่ 4.3 บล็อกควบคุมจอร์แปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Inverter) ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

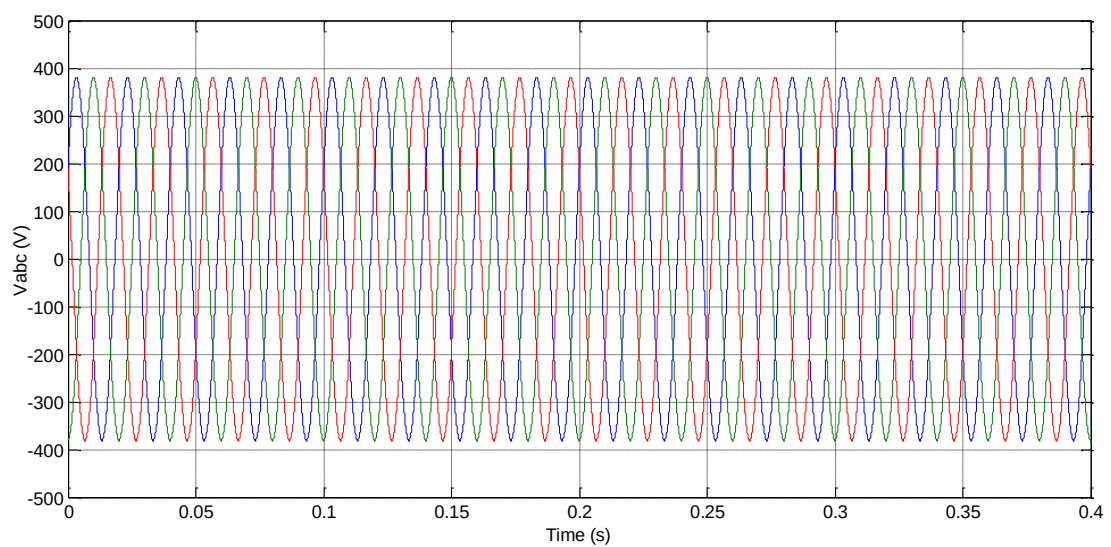
พารามิเตอร์	รายละเอียด
ระบบไฟฟ้า	3 เฟส 3 สาย
แรงดันใช้งานระหว่างสาย	380 โวลต์
ความถี่	50 Hz
กำลังไฟฟ้าที่ภาระสูงสุด	100 kW
ความถี่สวิตช์	10 kHz

การจำลองการทำงานวงจรแปลงผันไฟฟ้าใช้นั้นจะใช้เวลา 0.4 วินาที โดยรูปคลื่นกระแส
ด้านเข้าที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.4, 4.5 และมีการแบ่งตามเฟส A, เฟส B,
เฟส C แสดงดังรูปที่ 4.6, 4.7, 4.8 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสมีสัญญาณรบกวน
ค่อนข้างมากซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน นอกจากนี้รูปคลื่นแรงดันด้านเข้าจะแสดงดังรูปที่ 4.9
– 4.13 ซึ่งดังที่กล่าวข้างต้นคือกำหนดระดับรูปคลื่นแรงดันที่ 380 โวลต์ รูปคลื่นแรงดันที่บริเวณ
DC-Link แสดงดังรูปที่ 4.14 – 4.19 ในส่วนของรูปคลื่นกระแสด้านออกแสดงดังรูปที่ 4.20 – 4.24
และรูปคลื่นแรงดันด้านออกแสดงดังรูปที่ 4.25 – 4.29

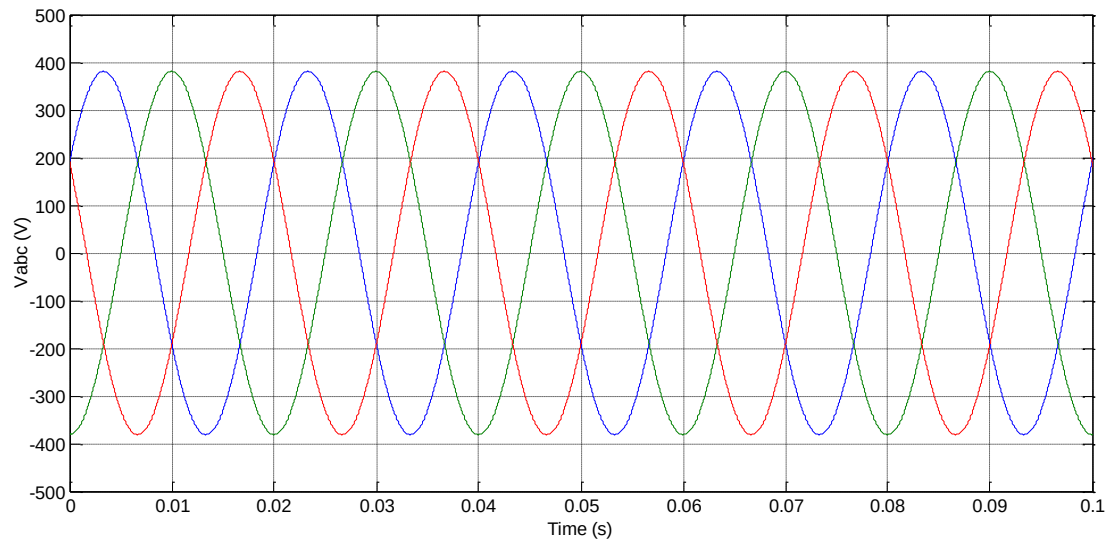




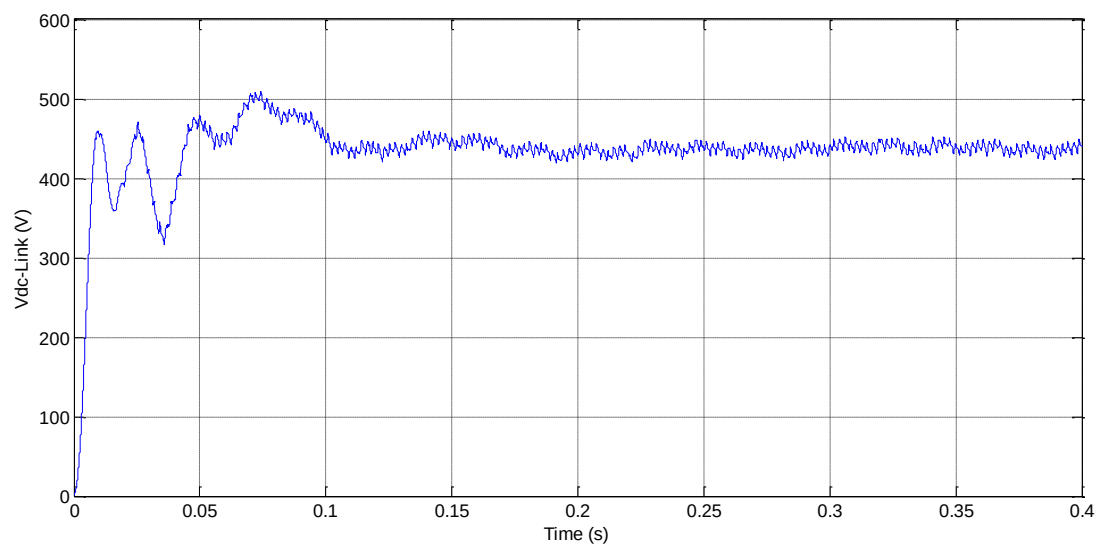
รูปที่ 4.5 ขยายกระแสด้านเข้าที่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที



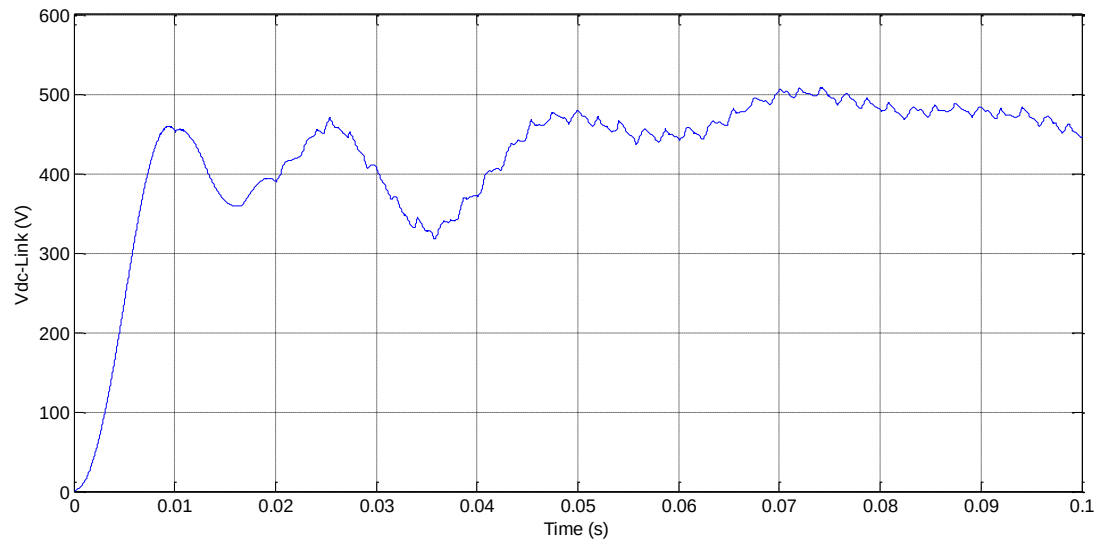
รูปที่ 4.6 แรงดันด้านเข้าที่ได้รับจากแหล่งกำเนิดพลังงาน



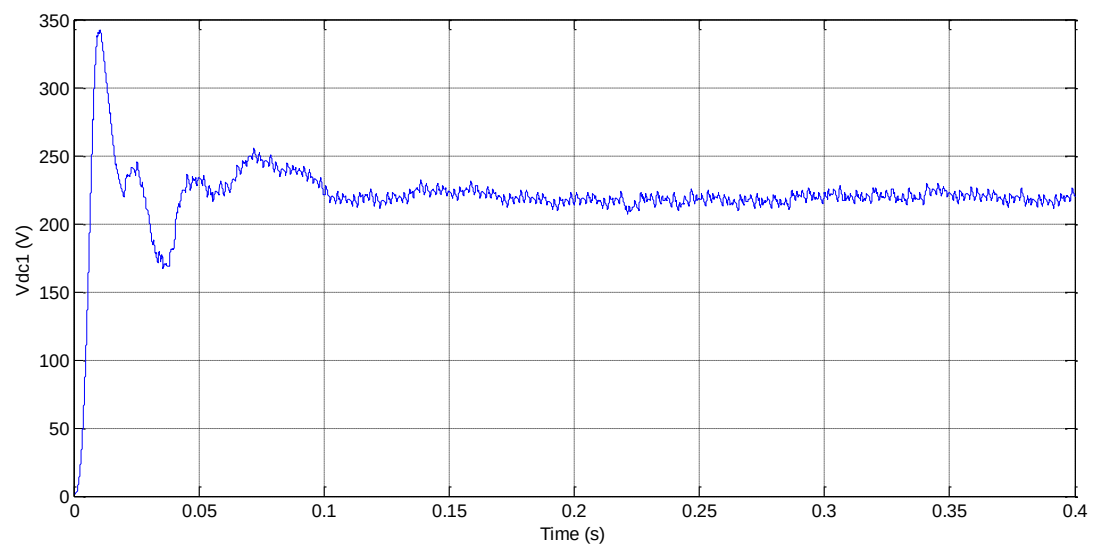
รูปที่ 4.7 ขยายแรงดันด้านเข้าที่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที



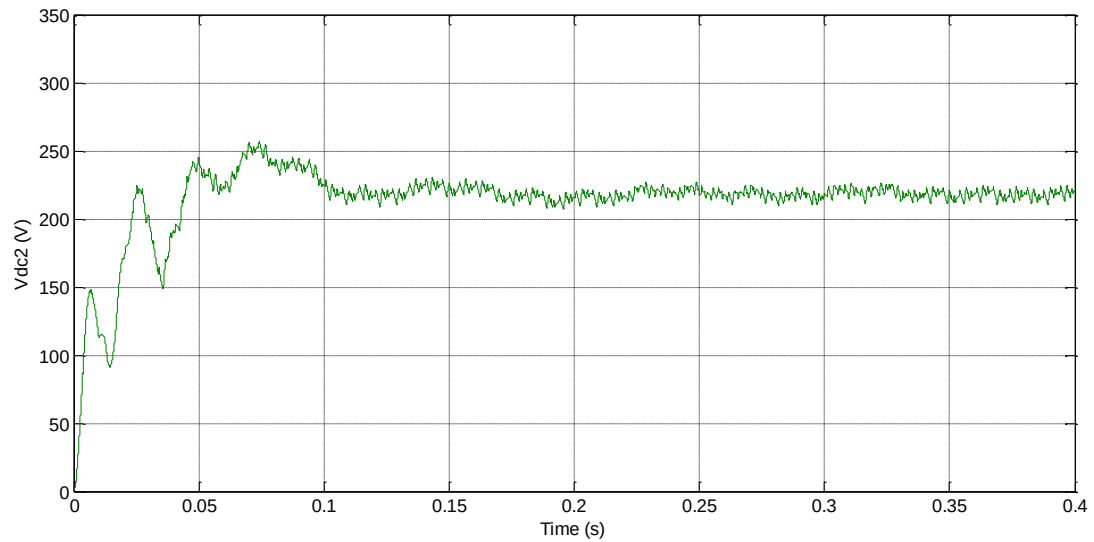
รูปที่ 4.8 แรงดันที่ DC-Link



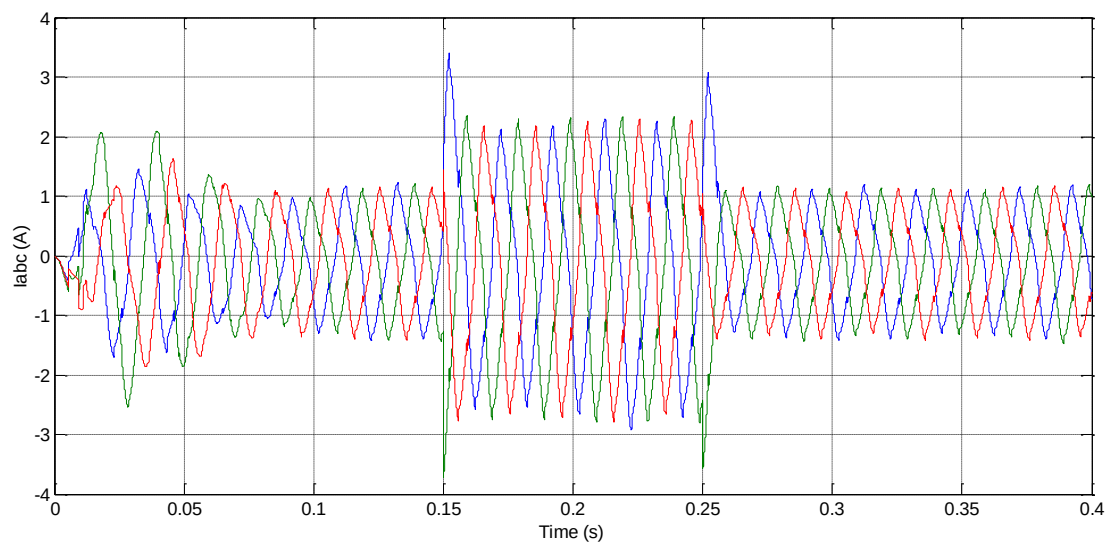
รูปที่ 4.9 ขยายแรงดันที่ DC-Link ที่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที



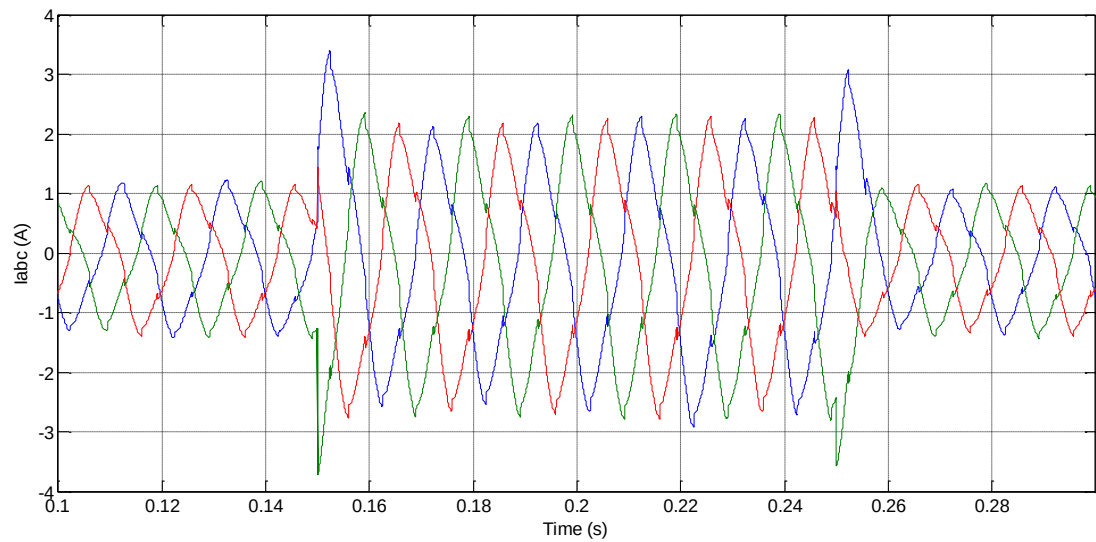
รูปที่ 4.10 แรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 1



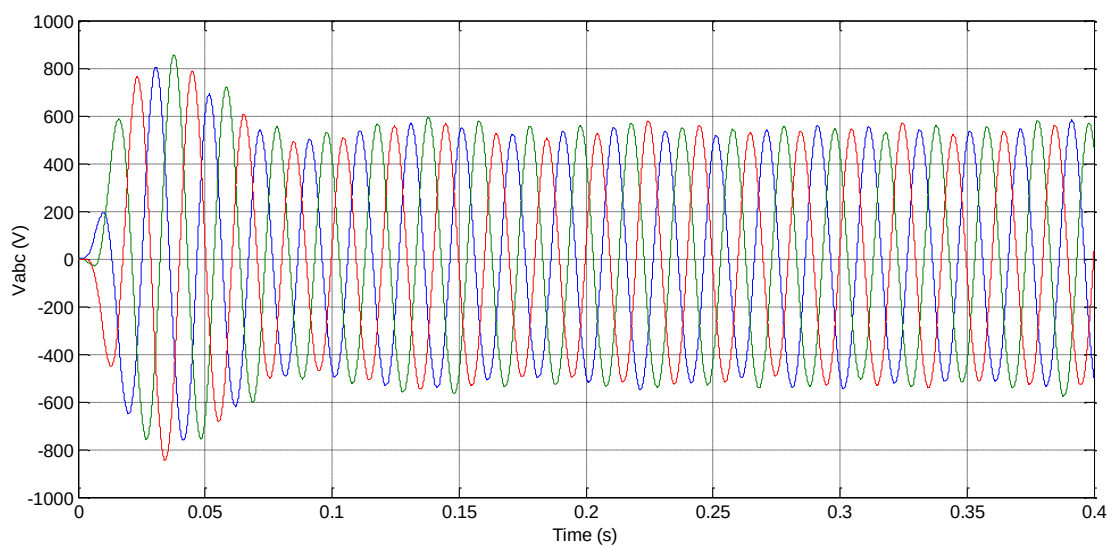
รูปที่ 4.11 แรงดันที่ตัวเก็บประจุตัวที่ 2



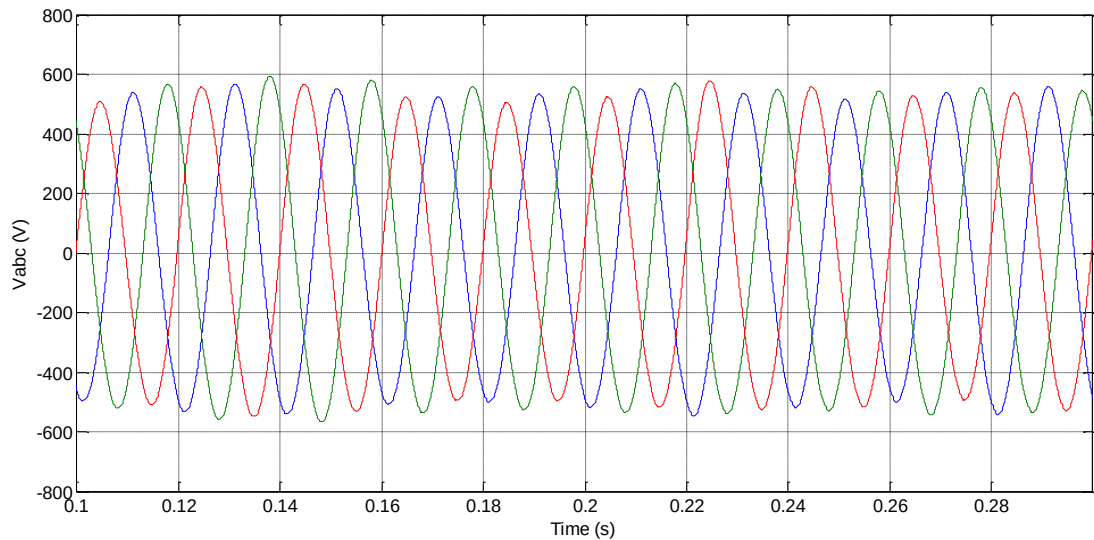
รูปที่ 4.12 กระแสด้านออกที่ผ่านวงจรแปลงผันฯ



รูปที่ 4.13 ขยายกระแสด้านออกที่เวลา 0.1 ถึง 0.3 วินาที



รูปที่ 4.14 แรงดันด้านออกที่ผ่านวงจรแปลงผันฯ



รูปที่ 4.15 ขยายแรงดันด้านออกที่เวลา 0.1 ถึง 0.3 วินาที

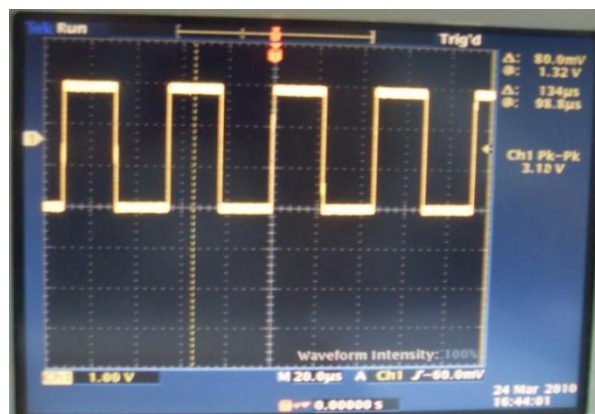
จากผลการจำลองการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ จะเห็นว่าระบบของวงจรฯทำงานได้ค่อนข้างดีถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ส่วนรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านออกที่ได้จากการจำลองนั้นทางผู้วิจัยจะได้นำมาวิเคราะห์ต่อไป

4.3 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันฯ

4.3.1 ผลของสัญญาณภาคควบคุม

4.3.1.1 สัญญาณจาก ezDSP TMS320F2812

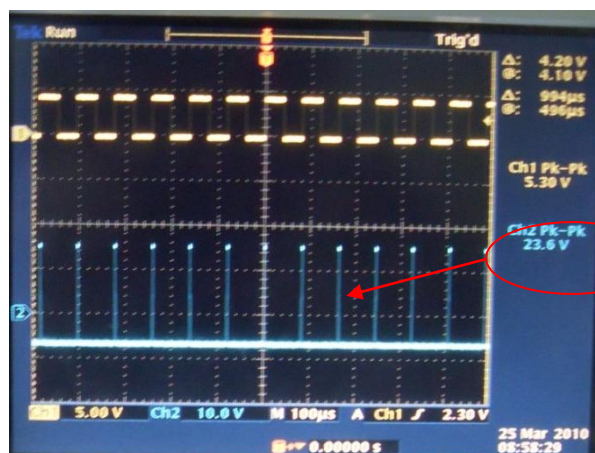
เมื่อทำการเขียนวงจรสร้างสัญญาณ PWM ในโปรแกรม MATLAB R2006b แล้วส่งสัญญาณเข้าไปในตัว ezDSPTMS320F2812 แล้วทำการวัดสัญญาณที่ออกจาก ezDSPTMS320F2812 มีสัญญาณออกอยู่ระหว่าง 0-3.3 โวลต์ (Vpeak)



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นแรงดันทางด้านขาออก ezDSP TMS320F2812

4.3.2 ผลของสัญญาณที่ออกจากวงจรขับเคลื่อน

เมื่อทำการวัดสัญญาณ ที่ผ่านวงจรขับเคลื่อน (SKHI 22B) ดังแสดงในรูปที่ 4.31 จะเห็นว่าค่าสัญญาณที่ได้มีค่าเพียงพอที่จะนำไปขับขาเกตของไอจีบีทีให้ทำงานได้ โดยแรงดันขาเกตที่ ไอจีบีทีเบอร์ SKM75GB063D ต้องการให้ทำงานอยู่ที่บวกลบ 20 โวลต์ ซึ่งสัญญาณที่ได้จากชุดขับเคลื่อนมีค่าแรงดันอยู่ที่ 23 โวลต์ (Vpeak) ซึ่งสัญญาณที่ได้เพียงพอต่อการนำไปขับไอจีบีทีได้ แต่สัญญาณที่ได้ค่อนข้างมีช่วงเวลาเปิดการทำงานน้อยอันเนื่องมาจากการกำหนดค่าความต้านทานช่วงเปิดการทำงานทางด้านขาออกมากเกินไปแต่ก็ยังสามารถนำไปใช้งานได้ตามปกติดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าทางด้านขาออกของวงจรขับเคลื่อน

4.3.3 ผลสัญญาณภาคกำลัง

4.3.3.1 ผลของแรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแส

เมื่อทำการจ่ายแรงดันกระแสสลับ 380 โวลต์ ให้กับวงจรเรียงกระแส สามารถวัดแรงดันทางด้านเอาต์พุตได้แรงดันกระแสตรง 531 โวลต์ ซึ่งยังไม่ผ่าน DC Link



รูปที่ 4.18 ค่าแรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแส 3 เฟส

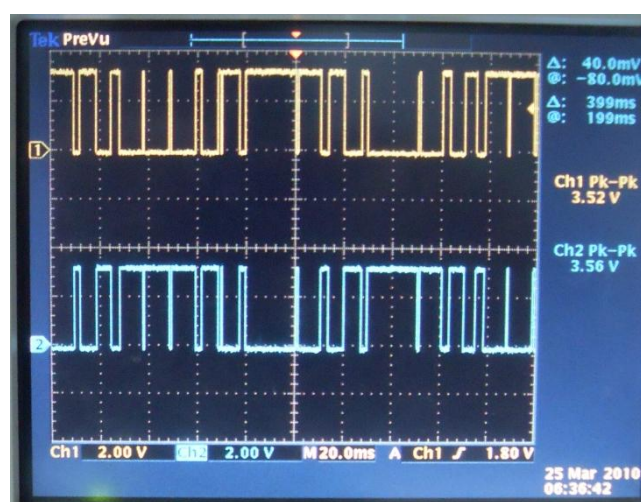
4.3.3.2 ผลของแรงดันที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์ดีซีลิง

เมื่อทำการจ่ายแรงดันกระแสสลับ 380 โวลต์ ให้กับวงจรเรียงกระแสสามารถวัดแรงดันเอาท์พุทได้แรงดันกระแสตรง 531 โวลต์ โดยแรงดันที่ได้จากวงจรเรียงกระแสจะต้องนำมาผ่านคาปาซิเตอร์อีกครั้งเพื่อทำการกรองแรงดันให้เรียบยิ่งขึ้นก่อนนำไปเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยในที่นี้ใช้คาปาซิเตอร์สองตัวนำมาอนุกรมกันเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสามระดับ โดยใช้คาปาซิเตอร์ขนาด $2200\ \mu\text{F}$ 450 V 2 ตัว ตัวอนุกรมกัน วัดแรงดันตกคร่อมทางด้านคาปาซิเตอร์ได้แรงดัน 562 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.19 ค่าแรงดันเมื่อต่อคาปาซิเตอร์

4.3.4 ผลของสัญญาณควบคุมที่ออกจาก DSP ที่นำไปเป็น INPUT ของตัวขับไอจีบีที

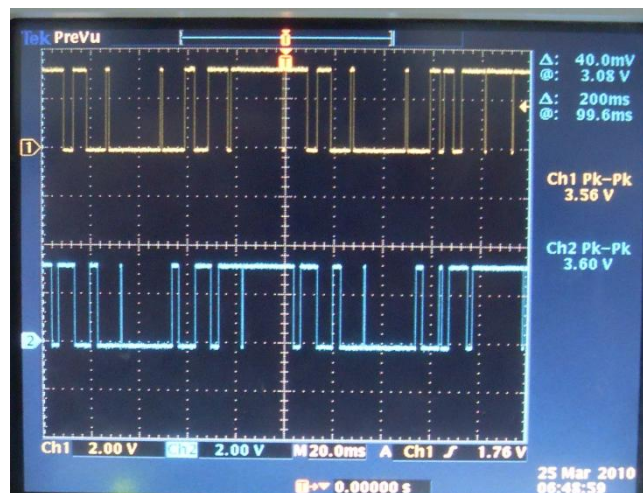


รูปที่ 4.20 สัญญาณขา G1 กับ G3 เฟส A



ช่วงเวลาเดดไทม์
ของสวิตช์แต่ละตัวซึ่ง
มีความสำคัญในการ

รูปที่ 4.21 สัญญาณขา G2 กับ G4 เฟส A



รูปที่ 4.22 สัญญาณขา G1 กับ G2 เฟส B



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การพัฒนางจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

ในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับนั้น แรงดันด้านออก (V_{dc}) ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ระดับ และมีอัตราการกระเพื่อมของแรงดันด้านออก (ΔV) น้อยกว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ระดับ นอกจากนั้นอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละตัวในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับยังสามารถรับแรงดันได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมน้อยนั่นเอง

5.1.1.1 ข้อดีของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

1. ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสไม่เกิน 5%
2. ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง
3. ความถี่ในการสวิตซ์คงที่เพราะเป็นการมอดูเลชันแบบพีดับบลิวเอ็ม (PWM)
4. ทำให้สามารถนำไปใช้ในพิกัดแรงดันที่สูงขึ้นได้เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมที่อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยลง
5. ทำให้ระบบกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.1.1.2 ข้อบกพร่องของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

1. วงจรต้องใช้อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 2 เท่าเมื่อเทียบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ระดับ
2. ระบบควบคุมค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนกว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ระดับมาก
3. หากนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์จะมีต้นทุนในการผลิตสูง

5.1.2 การพัฒนางจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

ในส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการทดสอบระบบด้วยคำสั่งที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ ได้ผลการทดสอบดีและจากผลการวิเคราะห์ทำให้เราทราบถึงปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้แรงดันนิวทรัลเปลี่ยนแปลง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วย ขนาดของกระแสไหลด ดัชนีการมอดูเลตและตัว



ประกอบกำลังของโหลด โดยที่ถ้าตัวประกอบกำลังยิ่งมาก จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันนิวทรัลที่เร็วขึ้น ไม่ขึ้นกับชนิดว่าเป็นแบบล้าหลังหรือนำหน้า สำหรับวิธีการชดเชยค่าแรงดันนิวทรัล เพื่อแก้ปัญหาความเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสโหลดในขณะที่มีการเปลี่ยนโหมดการทำงาน สำหรับการ ทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟสในการทำงานแบบพีคเบิลยูเอ็มย่านเชิงเส้น จะมีข้อดีในการ ควบคุมและสามารถรองความถี่ให้เหลือเฉพาะความถี่หลักมูลได้ง่าย แต่ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ ความถี่หลักมูลจะปรับค่าได้ไม่มาก

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันบริเวณ DC-Link มีลักษณะไม่เรียบ หรือไม่เป็นเส้นตรงเท่าที่ควร ซึ่งอาจจะมีสาเหตุจากการที่ระดับแรงดันบริเวณตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 มีค่าไม่เท่ากัน อีกสาเหตุหนึ่งอาจเป็นเพราะระบบควบคุมของวงจรแปลง ผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงมีการสร้างสัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ที่ยังอาจมี ข้อบกพร่องอยู่ นอกจากนี้รูปคลื่นกระแสที่ด้านออกจะมีสัญญาณรบกวนอยู่เล็กน้อย ซึ่งอาจจะมี สาเหตุมาจากวงจรกรองที่จะต้องคำนวณอย่างละเอียด และหาค่าที่เหมาะสมกับวงจรแปลงผันนี้ โดยทางผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมและแก้ไขต่อไป

5.2.1 การพัฒนางจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบสามระดับ

1. ในการเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน
2. การพัฒนางจรควบคุมเพื่อให้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแบบ สามระดับมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น
3. สามารถนำไปพัฒนาเป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบ สามระดับได้ (back-to-back three-level converter)

5.2.2 การพัฒนางจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามระดับ

1. การสร้างสัญญาณพีคเบิลยูเอ็มออกมาจาก DSP นั้นต้องใช้เวลาศึกษาและการสร้างที่ นานเนื่องจากการไม่เข้าใจหลักการและทฤษฎีอย่างถ่องแท้
2. เมื่อทำการสร้างสัญญาณพีคเบิลยูเอ็มได้แล้วยังมีปัญหาที่วงจรจับเกตของ SKHI 22B เนื่องจากสัญญาณที่ออกมาน้อยเกิดไปวงจรจับเกตไม่ทำงาน
3. เมื่อทำการสร้างวงจรขับเฟ้อร์แล้วลองจ่ายสัญญาณพีคเบิลยูเอ็มเข้าวงจรจับเกตแล้ววัด สัญญาณที่ออกจากวงจรจับเกต บางครั้งสัญญาณออกมาไม่ชัดเจนซึ่งเป็นอุปสรรคอย่างมากซึ่งถ้า หากสัญญาณออกมาไม่ถูกต้อง ก็ไม่สามารถขับวงจรภาคกำลังได้ ถ้าหากขับวงจรภาคกำลังหากเกิด ความผิดพลาดก็จะทำให้ลัดวงจรได้



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบสัญญาณ G1 เฟส A กับ สัญญาณ G1 เฟส B

จากรูปเป็นสัญญาณที่ได้จากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งใช้เป็นสถานะของการสวิตซ์ในการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับซึ่งมีค่าเคดไทม์กำหนดอยู่ด้วย

หลังจากได้ทำการจำลองการทำงานและทดสอบวงจรแปลงผันฯ แล้วนั้น ส่วนของการควบคุมวงจรแปลงผันฯ ทำงานออกมาได้ค่อนข้างดี ระดับแรงดันและกระแสที่ด้านขาออกมีสัญญาณรบกวนน้อยกว่าด้านขาเข้าอย่างชัดเจน แต่รูปคลื่นที่ได้นั้นก็ยังไม่เรียบละเอียดทีเดียวซึ่งอาจมีผลมาจากวงจรกรองที่ยังมีข้อผิดพลาดอยู่บ้าง โดยผู้วิจัยจะทำการปรับปรุงต่อไป



5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ และทดสอบการทำงานสวิตช์ ในโปรแกรม Matlab & Simulink ให้ลึกซึ้ง เพื่อการนำมาประยุกต์ใช้งานที่กว้างขึ้นและรวดเร็ว
2. แหล่งจ่ายไฟตรงซึ่งใช้ตัวเก็บประจุ 2 ตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อสร้างแรงดัน 3 ระดับนั้น มีส่วนเกี่ยวข้องกับวิธีการปรับความกว้างพัลส์ที่น่าเสนอ ดังนั้น จึงควรที่จะมีการพิจารณาถึงผลของ ขนาดตัวเก็บประจุและพิจารณาในเรื่องของ Voltage Balance ด้วย
3. เนื่องจากการออกแบบและการสร้างอินเวอร์เตอร์มีข้อบกพร่องอยู่หากมีการพัฒนาควร จะคำนึงถึงขนาดอินเวอร์เตอร์ด้วยจะเป็นสิ่งที่ดี ออกแบบให้มีความเร็วในการทำงานและมี เสถียรภาพมากขึ้น วงจรอินเวอร์เตอร์ควรออกแบบให้ใช้กับแรงดันและกระแสได้สูงขึ้นอีก
4. ในวงจรขับเคลื่อน SKHI 22B ของ Semikron ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ แต่ที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ก็เพราะได้ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานอย่างดีแล้วว่าสร้าง สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับได้ แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่คือ วงจรขับเคลื่อนในหนึ่ง ตัวสามารถขับไอจีบีทีได้สองตัวก็จริง แต่ไม่สามารถควบคุมให้ทำงานในลักษณะที่อิสระต่อกันได้
5. การใช้ TLP 250 แยกกราวด์ในวงจรขับเคลื่อน จะทำให้การควบคุมง่ายขึ้น
6. เพื่อการลดผลของสัญญาณรบกวน ที่อาจเกิดขึ้นกับตัวประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล ควรออกแบบวงจรให้มีการต่อโยงสายไฟให้น้อยที่สุดและเพื่อความสะดวกต่อการซ่อมแซมรวมทั้ง เพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบ
7. เนื่องจาก DSP เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แหล่งจ่ายกระแสตรง 5 โวลต์ และมีราคาแพง เพื่อความ ปลอดภัยเมื่อนำไปต่อใช้งานจริงควรมีวงจรป้องกัน (buffer) ด้วย



เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Wen-xiang, C. Da-peng and Q. Jin-yong, “Study on the Control Strategy of Three-level PWM Rectifier Based on SVPWM”, Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC'09, IEEE 6th International., pp.1622-1625, 17-20 May 2009.
- [2] Z. Yingchao, Z. Zhengming, L. Ting, Z. Yingchang and Y. Liqiang, “A Novel Control Scheme for Three-Level NPC Back-to-Back Converter”, Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '08, IEEE., pp.1-5, 3-5 Sep. 2008.
- [3] W. Xu, H Kaizheng, Y. Shijie and X. Bin, “Simulation of three-phase voltage source PWM rectifier based on the Space Vector Modulation”, Control and Decision Conference, CCDC, Chinese., pp.1881-1884, 2-4 July 2008.
- [4] A. Calle, J. Rocabert, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, S. Alepuz and J. Peracaula “Three-Level Three-Phase Neutral-Point-Clamped Back-to-Back Converter Applied To a Wind Emulator”, Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on, pp.1-10, 8-10 Sept. 2009.
- [5] Z. Jinghua, M. Yongqing, L. Zhengxi and L. Kun “Research on Control Method of Three-Level NPC Voltage Source Rectifier”, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE pp.1-6, 3-5 Sept. 2008.
- [6] N. Meejit, A. Jaruensri, “Design and Implementation of 1 kW Diode-Clamped Three-level Inverter” Thesis, Electrical Engineering, Rajamangara University of Technology Thanyaburi, 2010.
- [7] Muhammad H. Rashid, “Power Electronics, Circuit, Devices, and Applications”, Third Edition, Pearson Education, Inc., pp.271
- [8] เกียรติ ออดทรัพย์, เอกลักษณ์ แสนวงษา “การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส”, วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2548
- [9] นิรุต มีจิตต์, อมร เจริญศรี “การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอดแคปซิมขนาด 1 กิโลวัตต์”, วิทยานิพนธ์ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553



เอกสารอ้างอิง (ค่อ)

- [10] นายภูวคค มังขวัญ “การมอดูละทความก้างพัลส์ด้วยว้สเปลขเวกเดอร้แรงคัณแบบลคก้างสูลยเลาะการสวคซ้สำหรบัอินเวอร้เดอร้สามระคับนั”, ว้ทยานัพนัษัประัญญามหาบัณัคค, ภาคว้ชาว้สวกรรมไฟฟ้า, คณะว้สวกรรมสาสตร้, บัณัคคว้ทยาลัยสถาบันเทคโนโลย้พระจอมเกล้้า-พระนครนัหะนั, 2549
- [11] สุธี ร้้วจรรูญ “ว้สัประัคความก้างพัลส์อย่าง่ายสำหรบัอินเวอร้เดอร้”, ว้ทยานัพนัษัประัญญามหาบัณัคคภาคว้ชาว้สวกรรมไฟฟ้า, คณะว้สวกรรมสาสตร้, จุฬาลงกรณัมหาวิทยาลัย, 2540
- [12] Y. Zhezhi, Y. Lingzhi, P. Hanmei, F. Xi and D. Dong, “Study of Simplified SVPWM Algorithm Based on Three-Level Inverter”, Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International, 17-20 May 2009, pp.876-881.
- [13] J. Jaroenkiattrai, “SVPWM-Rectifier with a Small DC-Link Capacitor by using Feedforward Disturbance Rejection Technique”Thesis 2006, Electrical Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology North Bangkok, Thailand.
- [14] กรมพัฒนาและสงัเสริมปลังานและคณะว้ทยาสาสตร้. มหาวิทยาลัยสคิลปากร. DEDE
- [15] Hovel, H.J., Semiconductor Semimetals Vol 11 (A.C. Beer, R.K. Willardson), new York, Academic Press,1975
- [16] Ting Lu; Zhengming Zhao; Yingchao Zhang; Liqiang Yuan; Chongjian Li; Zhihua Wang; “A Novel Direct Power Control Strategy Based on Energy Interface Concept for Three-level PWM Rectifier” Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE, 7-10 Sept. 2009, pp. 1573 – 1580.
- [17] C. J. Zhan, Y. Han, T. Xie, Z. Y. Zhao, and M. C. Wong, “Mathematical model and dual-DSP control of tri-level PWM reversible rectifier,” in Proc. PEDS’99, vol. 1, 1999, pp. 174-179.
- [18] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, “Instantaneous rective power compensators comprising switching devices without energy storage components,” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 20, no. 3, pp. 625-630, May/June 1984.
- [19] [ออนไลนั] เข้าถ้ถึงได้จ้าก : http://eng.rmuts.ac.th/coen/sunya_web/pe/pe.htm
- [20] นัพนัษั เกตุจ้อย และ อช้คพล สคคิธานุวัณันั เทคโนโลย้ปลังานลม. Naresuan University Journal 2004 ; 12(2) : 57-73.
- [21] OMRON ELECTRONICS. Temperature Controller กับการควบคุมอุณหภูมิ. [ออนไลนั] เข้าถ้ถึงได้จ้าก : <http://www.plceasy.com/Knowledge/Temp.htm> (10 มกราคม 2553).



เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] มนตรี เภาเดช, การชดเชยแรงดันตกชั่วขณะของระบบขับแบบปรับความเร็วได้โดยใช้บูสคอนเวอร์เตอร์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [23] Y. C. Zhang, Z. M. Zhao, Y. CH. Zhang, T. Lu, M. Eltawil, and L. Q. Yuan, “Direct Power Control for Three-Level Neutral Point Clamped PWM Rectifier Based on Virtual Flux,”unpublished.
- [24] M. Malinowski, M. Jasinski and M. P. Kazmierkowski, “Simple direct power control of three-phase PWM rectifier using space-vector modulation,”IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 51, no. 2, 2004, pp: 447- 453.
- [25] D. W. Zhi and L. Xu, “Direct power control of DFIG with constant switching frequency and improved transient performance,”IEEE Trans. Energ. Convers., vol. 22, no. 1, 2007, pp: 110-118.
- [26] J. Restrepo, J. Viola, J. M. Aller, and A. Bueno, “A simple switch selection state for SVM direct power control,”in Proc. IEEE ISIE’06, vol. 2, 2003, pp. 1112-1116.
- [27] S. A. Larrinaga, M. A. R. Vidal, E. Oyarbide, and J. R. T. Apraiz, “Predictive control strategy for DC/AC converter based on direct power control,”IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 3, 2007, pp: 1261-1271.
- [28] OMRON ELECTRONICS. Temperature Controller กับการควบคุมอุณหภูมิ. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.plceasy.com/Knowledge/Temp.htm> (10 มกราคม 2553).
- [29] Debra Lew. (2001). Micro-hybrids in rural China : Rural electrification with wind/PV hybrids. *Refocus, Volume 2, Issue 3*, April 2001, Pages 30-33