

การวิเคราะห์และออกแบบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคด้วยเทคนิคการควบคุม
กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละวงจรโดยการวัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

นายกิตติพงษ์ จุลโบล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายกิตติพงษ์ จุลโกลบล
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์และออกแบบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคด้วย
เทคนิคการควบคุมกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละวงจรโดยการวัด
แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอ การออกแบบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยทำการเพิ่มตัวเก็บประจุและตัวต้านทานในวงจรแปลงผัน โดยจะนำเสนอความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{CX}) กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L) เพื่อนำแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมาทำการประยุกต์ใช้ควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผัน ซึ่งเทคนิคนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับระบบแปลงผันที่ต้องมีการควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้าในแต่ละวงจรแปลงผันย่อยที่นำมาขนานกันเนื่องจากเทคนิคนี้จะช่วยลดขนาดของวงจรแปลงผันซึ่งจะเป็นการเพิ่มกำลังไฟฟ้าต่อขนาดของวงจรแปลงผันและยังช่วยลดต้นทุนของการสร้างวงจรแปลงผันลง ในส่วนของภาคควบคุมจะแสดงวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่ใช้กับวงจรแปลงผันและจะแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของวงจรแปลงผัน วงจรแปลงผันที่นำเสนอในบทความนี้ใช้ความถี่ของการสวิตช์ (f_{sw}) เป็นแบบความถี่คงที่เท่ากับ 100 kHz

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 69 หน้า)

คำสำคัญ : กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ, วงจรแปลงผันแบบบัค

Name : Mr.Kitipong Junlobun
Thesis Title : Analysis and design of Parallel DC-DC buck Converter using Voltage Across
A Capacitor for Controlling Inductor Current
Major Field : Electric Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor Dr.Viboon Chunkag
Academic Year : 2006

Abstract

In this research, an average voltage across an auxiliary input capacitor is used to control the inductor current of DC-DC buck converter which designed to operate in continuous conduction mode (CCM). This technique could be applied for parallel architecture in DC-Distributed Power System (DC-DPS) when the balancing of output current in each converter module is claimed. By this technique, power density would be increased when its size is decreased. In power stage design, the relation of average values of inductor current (I_L) and capacitor voltage (V_{cx}) is presented. In controller path, both of voltage loop and current loop controller are described, and then, based on frequency response, the stability of control system is analysis. The performance of proposed method is verified by experimental results at the 100 kHz switching frequency.

(Total 69 pages)

Keywords : Inductor Current, Buck Converter

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้มอบทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้แก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก ที่กรุณาให้คำแนะนำสั่งสอน หลักการคิด แนวทางการแก้ปัญหา ตลอดจนความรู้วิทยาการต่างๆ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าไม่ว่าจะเหน็ดเหนื่อยหรือยามสุข ตลอดจนพี่ๆและเพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และในบริษัท ทีโอที จำกัด(มหาชน) ที่ช่วยสนับสนุน แนะนำ และคอยเป็นกำลังใจตลอดมา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณผู้มีคุณและครูบาอาจารย์ทุกท่านที่เคยให้การสนับสนุนอบรมสั่งสอนข้าพเจ้า ให้มีความรู้และสติปัญญา รวมทั้งสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายที่ช่วยสร้างกำลังใจให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

กิตติพงษ์ จุลโบล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.2 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.3 วิธีวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย	3
1.5 แผนงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง แบบบัค	5
2.2 การขนานวงจรแปลงผัน	10
2.3 ผลกระทบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค โดยไม่ทำการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ	14
2.4 เสถียรภาพของวงจรควบคุม	18
2.5 สรุป	25
บทที่ 3 การวิเคราะห์และจำลองการทำงานของระบบแปลงผัน	26
3.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค ที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้า ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	26
3.2 การออกแบบวงจรควบคุม	32
3.3 การจำลองการทำงาน	34
3.4 สรุป	45
บทที่ 4 การออกแบบสร้างวงจรแปลงผันและระบบควบคุม	46
4.1 การออกแบบวงจรภาคกำลังและภาคการระ	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การออกแบบวงจรภาคควบคุม	47
4.3 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณอ้างอิง วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้กับวงจรควบคุมและ วงจรขับนำสวิตช์	48
4.4 สรุป	51
บทที่ 5 ผลการทดสอบวงจรแปลงผัน	52
5.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันด้วยการเพิ่มและลดระดับกำลังไฟฟ้า	52
5.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับ กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ	54
5.3 ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ขดลวดเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผัน	56
5.4 ทดสอบการตัดวงจรแปลงผันย่อยของระบบแปลงผัน	58
5.5 สรุป	59
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	60
6.1 สรุปผลการวิจัย	60
6.2 ข้อดีของระบบแปลงผันที่ใช้วิธีควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยการวัดแรงดันไฟฟ้า ของตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผัน	60
6.3 ข้อเสียของระบบแปลงผันที่ใช้วิธีควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยการวัดแรงดันไฟฟ้า ของตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผัน	61
6.4 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก ก วงจรที่ใช้ในการทดลอง	63
ประวัติผู้วิจัย	69

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	ข้อกำหนดการออกแบบสร้างเครื่องแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค	2
1-2	แผนงานในการดำเนินงาน	4
3-1	ค่าที่ใช้ในการออกแบบจำลองการทำงาน	35

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 วงจรแปลงผันแบบบัค	5
2-2 วงจรแปลงผันแบบบัคขณะสวิตช์ปิด	6
2-3 วงจรแปลงผันแบบบัคขณะสวิตช์เปิด	7
2-4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของวงจรแปลงผันแบบบัค	9
2-5 การขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค	10
2-6 วงจรแบ่งกระแสแบบ Droop Control	11
2-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Droop Gain กับ ค่า Output Voltage Regulation Performance	12
2-8 วงจรแบ่งกระแสแบบ Automatic Current Sharing Average Current Method	13
2-9 วงจรแบ่งกระแสแบบ Master-Slave control	14
2-10 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่มีความต้านทานภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ	15
2-11 การตอบสนองของวงจรแปลงผันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด	19
2-12 อัตราขยายและมุมเฟส ของระบบที่มีเสถียรภาพ	20
2-13 โบทพลอตภาคกำลังของวงจรแปลงผัน	20
2-14 โบทพลอตภาคกำลังของวงจรแปลงผันกรณีที่เกิดค่าความต้านทานภายใน	21
2-15 การต่อวงจรขยายความแตกต่าง	21
2-16 การต่อวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 1	22
2-17 โบทพลอตของวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 1	22
2-18 การต่อวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 2	23
2-19 โบทพลอตของวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 2	23
2-20 การต่อวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 3	24
2-21 โบทพลอตของวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 3	24
3-1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า ของวงจรแปลงผันในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ	26
3-2 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า ของวงจรแปลงผันในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ปิด	27
3-3 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า ของวงจรแปลงผันในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำขณะสวิตช์เปิด	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-4 ภาควิชาควบคุมของวงจรแปลงผัน	32
3-5 Magnitude และ Phase ของ Open Loop Transfer Function, Compensator Transfer Function และ Close loop Transfer Function ของ $G_1(s)H_1(s)$	36
3-6 Magnitude และ Phase ของ Open Loop Transfer Function, Compensator Transfer Function และ Close Loop Transfer Function ของ $G_2(s)H_2(s)$	38
3-7 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองการทำงานจำนวน 1 วงจร	39
3-8 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเมื่อทำการ Step Load ที่เวลา 0.03 sec และ 0.04 sec	39
3-9 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเมื่อทำการลดระดับกำลังไฟฟ้าจาก 100% มาที่ 50%	40
3-10 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าจาก 50% มาที่ 100%	40
3-11 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าเมื่อทำการลดระดับกำลังไฟฟ้าจาก 100% มาที่ 50%	41
3-12 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าจาก 50% มาที่ 100%	41
3-13 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ที่ใช้ในการจำลองการทำงานจำนวน 3 วงจร	42
3-14 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงทั้ง 3 วงจรที่นำมาต่อขนาน เมื่อทำการ Step Load	43
3-15 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงทั้ง 3 วงจรที่นำมาต่อขนาน เมื่อทำการ ลดระดับกำลังไฟฟ้าจาก 100% มาที่ 50%	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-16 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงทั้ง 3 วงจรที่นำมาต่อขนาน เมื่อทำการ เพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าจาก 50% มาที่ 100%	44
3-17 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า เมื่อทำการ Step Load	44
3-18 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน เมื่อทำการ ดัดการทำงานของวงจรแปลงผันตัวที่ 1 ที่เวลา 0.3 sec และ ทำการต่อวงจร ที่เวลา 0.4 sec	45
4-1 ภาคลำดับของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค ที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า	46
4-2 ภาคลำดับของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค ที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า	46
4-3 วงจรควบคุมสำหรับรูปแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ	48
4-4 วงจรควบคุมสำหรับรูปแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบแปลงผัน	48
4-5 วงจรสร้างสัญญาณอ้างอิง วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้กับวงจรควบคุมรูปแรงดันไฟฟ้าขาออก	49
4-6 วงจรปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้กับวงจรควบคุมรูปแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าและ วงจรตัดสัญญาณเฉพาะช่วงบวกเพื่อนำไปใช้กับวงจรขับนำสวิตช์	50
4-7 วงจรขับนำสวิตช์	50
4-8 วงจรแยกกราวด์ทางไฟฟ้าภาคลำดับกับภาคควบคุมและขยายสัญญาณสำหรับนำไปขับสวิตช์	51
5-1 แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าขาออกเมื่อทำการลดระดับกำลังไฟฟ้า	52
5-2 แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันย่อยเมื่อทำการลดระดับกำลังไฟฟ้า	53
5-3 แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าขาออกเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5-4 แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ของวงจรแปลงผันย่อยเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า	54
5-5 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ของวงจรแปลงผันย่อยที่ 1 เมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า	55
5-6 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ของวงจรแปลงผันย่อยที่ 2 เมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า	55
5-7 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ของวงจรแปลงผันย่อยที่ 3 เมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า	56
5-8 ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าขาออก และกระแสไฟฟ้าขาออก	57
5-9 ค่าการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ	57
5-10 ทำการตัดวงจรย่อยที่ 1 ของระบบแปลงผัน	58
5-11 ทำการต่อวงจรย่อยที่ 1 ของระบบแปลงผัน	59
ก-1 วงจรแปลงผันที่ใช้ในการทดลอง	64
ก-2 วงจรภาคกำลัง	65
ก-3 วงจรจ่ายกำลังด้านขาเข้า	65
ก-4 วงจรจ่ายไฟเลี้ยง	66
ก-5 วงจรแยกกราวด์ทางไฟฟ้า	66
ก-6 ภาคจ่ายไฟเลี้ยง	67
ก-7 วงจรควบคุม	67
ก-8 วงจรรวมที่ใช้ในการทดลอง	68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ΔI	อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
C_0	ตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับภาระ
C_X	ตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มเพื่อใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
D	ค่าวัฏจักรงานหรือดัชนีเวลาในการนำกระแสของสวิตช์ใน 1 คาบเวลา
f_{esr}	ค่าความถี่หักมุมอันเนื่องมาจากผลของความต้านทานภายใน
f_C	ค่าความถี่หักมุมของโบทที่ได้จากการออกแบบ
f_s	ความถี่ในการสวิตช์
f_{osc}	ความถี่ของชุด PWM
$GC_1(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมลูปใน
$GC_2(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมลูปนอก
I_L	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
L	ค่าตัวเหนี่ยวนำ
P_O	กำลังงานไฟฟ้าขาออก
t_{on}	ช่วงเวลานำกระแสของสวิตช์
t_{off}	ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของสวิตช์
R_X	ค่าความต้านทานที่ต่อเพิ่มเพื่อใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
R_{esr}	ความต้านทานภายใน
R_L	ความต้านทานภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ
V_{c_0}	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านขาออก
V_{C_X}	แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่นำมาต่อเพิ่มเพื่อใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
V_g	แรงดันไฟฟ้าขาเข้า
V_o	แรงดันไฟฟ้าขาออก
V_L	แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ
V_e	สัญญาณที่ออกมาจากชุด ขยายสัญญาณผิดพลาด
V_p	แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของสัญญาณฟันเลื่อย

บทที่ 1

บทนำ

ในระบบแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงที่ต้องการกำลังไฟฟ้าขนาดสูงๆนั้น ในปัจจุบันนิยมนำวงจรแปลงผันที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าต่ำๆมาต่อขนานกันเพื่อช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระของระบบไฟฟ้า ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีข้อดีในหลายๆด้าน เช่น การต่อขยายระบบแปลงผัน ความน่าเชื่อถือในระบบจ่ายพลังงาน ขนาดของวงจรแปลงผัน และ ราคาของวงจรแปลงผันเมื่อเทียบกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากวงจรแปลงผันที่ทำการออกแบบวงจรแปลงผันให้มีขนาดกำลังไฟฟ้าสูงๆเพียงวงจรเดียว[1]

แต่การนำวงจรแปลงผันมาขนานกันเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้านั้นก็มีข้อเสียที่สำคัญคือจะต้องทำการออกแบบวงจรควบคุมให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรแปลงผันย่อยที่นำมาขนานกันเป็นระบบแปลงผันมีขนาดเท่ากันเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวงจรแปลงผันและยังช่วยให้อายุการใช้งานของวงจรแปลงผันมีขนาดใกล้เคียงกัน[2] ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการออกแบบวงจรควบคุมเพื่อนำมาแก้ไขปัญหาดังกล่าวเป็นจำนวนมากโดยจะควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำด้วยการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าโดยตรงด้วยชุดวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจคือสามารถควบคุมขนาดของกระแสที่ไหลผ่านวงจรแปลงผันย่อยของระบบแปลงผันให้มีขนาดเท่ากันได้[3] แต่ในปัจจุบันการออกแบบระบบแปลงผันนั้นจะเป็นการพัฒนาอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น การนำอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้ามาใช้ในวงจรควบคุมนั้นทำให้ให้วงจรแปลงผันที่ได้มีขนาดใหญ่ เพราะต้องมีวงจรไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์วัดกระแส อีกทั้งอุปกรณ์วัดกระแสโดยทั่วไปนั้นมีราคาแพง

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรแปลงผันย่อยของระบบแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบักให้มีขนาดเท่ากันโดยประยุกต์ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบักเพื่อใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเทคนิคนี้จะช่วยลดขนาดและราคาของวงจรแปลงผันเนื่องจากไม่ต้องใช้อุปกรณ์ควบคุมกระแส อีกทั้งยังสามารถแบ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรแปลงผันย่อยแต่ละวงจรของระบบแปลงผันให้มีขนาดเท่ากันทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของวงจรแปลงผัน[4],[5]

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์และออกแบบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้คงที่และสามารถควบคุมขนาดกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันย่อยของระบบแปลงผันให้มีขนาดเท่ากัน เพื่อให้วงจรแปลงผันที่นำมาต่อขนานกันนั้นสามารถรับภาระการทำงานที่เท่ากัน ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวงจรแปลงผัน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของวงจรแปลงผัน และประสิทธิภาพของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

1.2 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาและออกแบบสร้างวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคโดยใช้มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) เป็นสวิตช์กำลัง โดยที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกให้คงที่โดยมีระบบควบคุมพื้นฐาน และสามารถควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันย่อยของระบบแปลงผันให้มีขนาดเท่ากัน โดยมีวงจรควบคุมขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันย่อยของระบบแปลงผันให้มีขนาดเท่ากัน โดยมีข้อกำหนดดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ข้อกำหนดการออกแบบสร้างเครื่องแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค

รายการ	ข้อกำหนด
พิกัดแรงดันไฟตรงขาเข้า	48V
พิกัดแรงดันไฟตรงขาออก	12 V
พิกัดกำลังไฟฟ้าขาออกรวม	60 W
พิกัดกำลังไฟฟ้าขาออกของแต่ละเซลล์	20 W/cell
ความถี่การสวิตช์	100 kHz
ระบบควบคุม	PI Controller

1.3 วิธีวิจัย

- 1.3.1 ศึกษา ค้นคว้าและสำรวจงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 ศึกษาหลักการและทฤษฎีการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง และวงจรควบคุม
- 1.3.3 ศึกษาการประยุกต์ใช้งานวงจรควบคุมกระแสในแต่ละเซลล์ของวงจรแปลงผันให้มีขนาดเท่ากัน
- 1.3.4 ออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง และวงจรควบคุมเพื่อจำลองการทำงาน (Simulation) ตามขอบเขตที่กำหนด
- 1.3.5 สร้างเครื่องแปลงผันแรงดันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้และแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้น
- 1.3.6 ทดสอบเครื่องแปลงผันแรงดันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่สร้างขึ้นและเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองการทำงาน
- 1.3.7 วิจัย สรุปผลการวิจัยเพื่อจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์และนำเสนอผลการวิจัย

1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.4.1 ได้แนวทางในการออกแบบ การขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง และวงจรควบคุม
- 1.4.2 กระตุ้นให้เกิดการวิจัยในหัวข้อที่มีวัตถุประสงค์หลักเดียวกัน
- 1.4.3 ได้แนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าให้มีมาตรฐานตามข้อกำหนด
- 1.4.4 เสริมสร้างศักยภาพเทคโนโลยีภายในประเทศด้วยตัวเอง

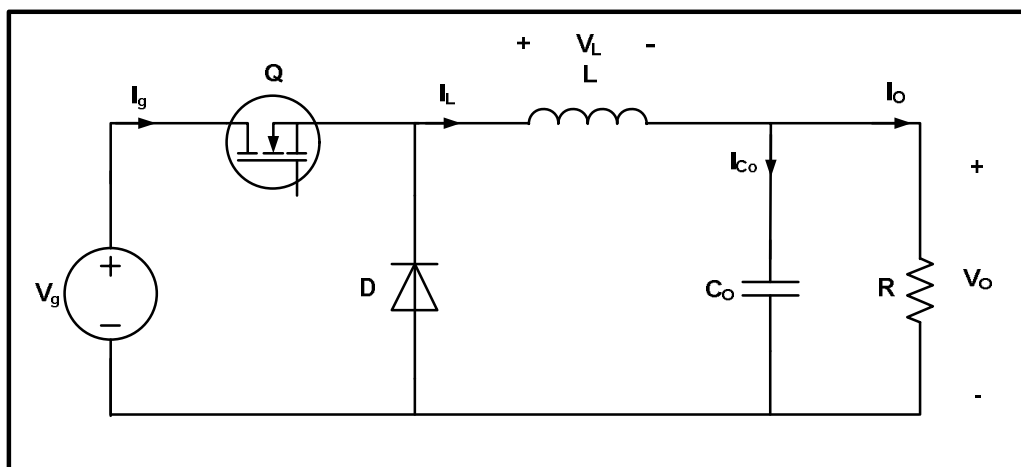
1.5 แผนงานวิจัย

แผนงานในการวิจัยแสดงเป็นขั้นตอนในการดำเนินงานและระยะเวลาได้ดังตารางที่ 1-2

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

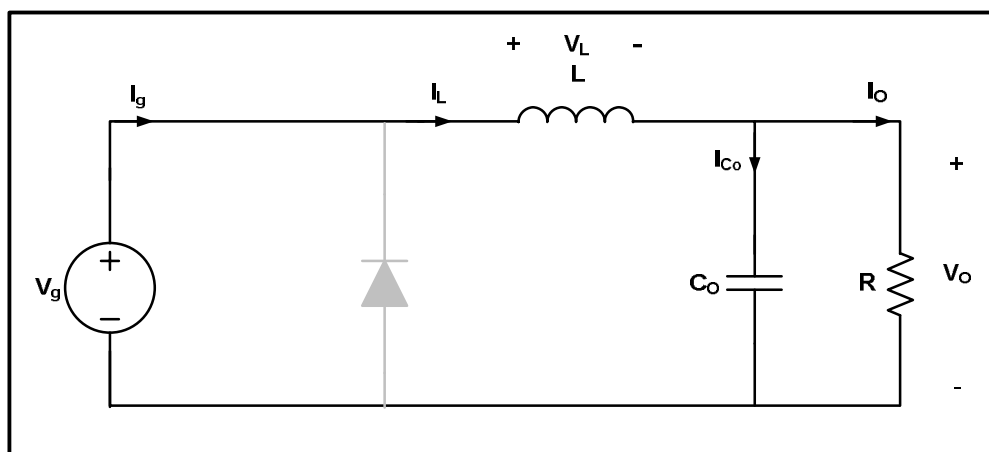
2.1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรง แบบบัค



ภาพที่ 2-1 วงจรแปลงผันแบบบัค

วงจรแปลงผันแบบบัคเป็นวงจรแปลงผันแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 2-1 ซึ่งมีความเหมาะสมกับภาระ ที่ต้องการปริมาณกระแสไฟฟ้าสูง และปริมาณแรงดันไฟฟ้าต่ำ อีกทั้งโมดการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคไม่มีความซับซ้อนสามารถออกแบบวงจรควบคุมได้ง่าย โดยโมดการทำงานของวงจรจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการทำงานใน โมดกระแสต่อเนื่อง ซึ่งจะสามารถแบ่งช่วงเวลาในการทำงานได้ดังนี้[6],[7]

2.1.1 ที่ช่วงเวลา t_{on} เมื่อสวิตช์เริ่มนำกระแสที่เวลา $t = 0$ และหยุดนำกระแสที่เวลา $t = t_1$ ลักษณะของวงจรแปลงผันจะแสดงดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 วงจรแปลงผันแบบบัคขณะสวิตช์ปิด

จากภาพที่ 2-2 ระดับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input Voltage) จะมีค่ามากกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกเฉลี่ย (Average Output Voltage) ส่งผลให้ระดับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมีปริมาณมากขึ้นอย่างสม่ำเสมอจาก I_1 ไป I_2 โดยสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

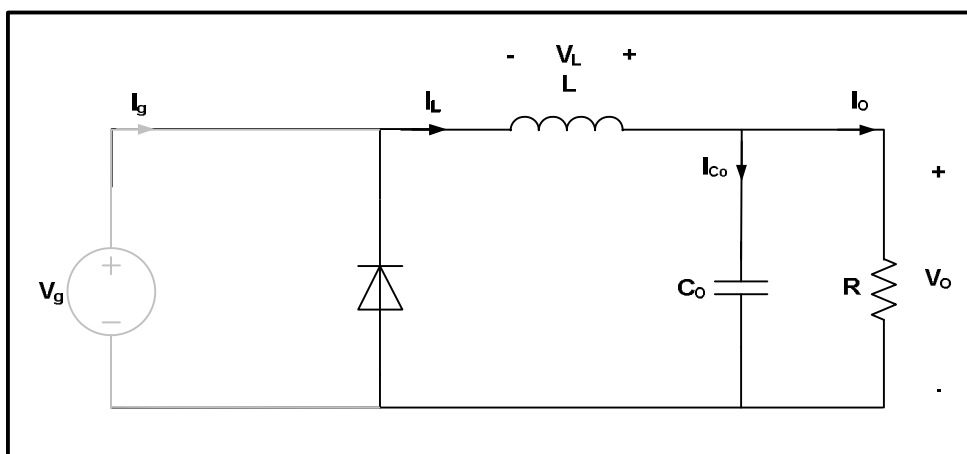
$$V_L(t) = L \frac{I_2 - I_1}{t_{on}} \quad (2-1)$$

$$V_g - V_o = L \frac{I_2 - I_1}{t_{on}} = L \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad (2-2)$$

ดังนั้น

$$t_{on} = L \frac{\Delta I}{V_g - V_o} \quad (2-3)$$

2.1.2 ในช่วงเวลา t_{off} เมื่อสวิตช์หยุดนำกระแสที่เวลา $t = t_1$ และไดโอดเริ่มนำกระแส ลักษณะของวงจรแปลงผันเป็นดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 วงจรแปลงผันแบบบัคขณะสวิตช์เปิด

จากภาพที่ 2-3 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะกลับทิศแต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้แบบทันทีทันใด ทำให้ระดับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมีปริมาณลดลงอย่างสม่ำเสมอจาก I_2 ไป I_1 โดยสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_L(t) = L \frac{\Delta I}{t_{off}} \quad (2-4)$$

$$V_o = L \frac{I_2 - I_1}{t_{off}} = L \frac{\Delta I}{t_{off}} \quad (2-5)$$

ดังนั้น

$$t_{off} = L \frac{\Delta I}{V_o} \quad (2-6)$$

การเปลี่ยนแปลงค่ายอดถึงยอดของกระแส ที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (ΔI) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสและหยุดนำกระแสมีค่าเท่ากัน การทำงานที่สภาวะคงตัว สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta I = \frac{(V_g - V_o)t_{on}}{L} = \frac{V_o t_{off}}{L} \quad (2-7)$$

แทนค่า $t_{on} = DT$ และ $t_{off} = (1 - D)T$ ในสมการที่ 2-7 จะได้

$$(V_g - V_o)DT = V_o(1 - D)T \quad (2-8)$$

พบว่าสมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคเป็นฟังก์ชันของ D แบบแปรผันตรงทำให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านขาออกของวงจรแปลงผันมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า ดังนี้

$$V_o = \frac{V_g DT}{T} = V_g D \quad (2-9)$$

เวลาในการสวิตช์นั้นเป็นผลรวมของช่วงเวลา t_{on} และช่วงเวลา t_{off}

$$T = \frac{1}{f_s} = t_{on} + t_{off} = \frac{L\Delta I}{V_g - V_o} + \frac{L\Delta I}{V_o} = \frac{LV_g \Delta I}{V_o(V_g - V_o)} \quad (2-10)$$

จัดสมการใหม่จะได้สมการการกระเพื่อมของกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำเป็น

$$\Delta I = \frac{V_o(V_g - V_o)T}{LV_g} = \frac{DV_g(1 - D)}{Lf_s} \quad (2-11)$$

ที่สภาวะคงตัวกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (C_o) ช่วงสวิตช์นำกระแสกับหยุดนำกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยสามารถหาค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$V_{c_o}(t) = V_{c_o}(0) = \frac{1}{C_o} \int_0^{T/2} i_{c_o} dt \quad (2-12)$$

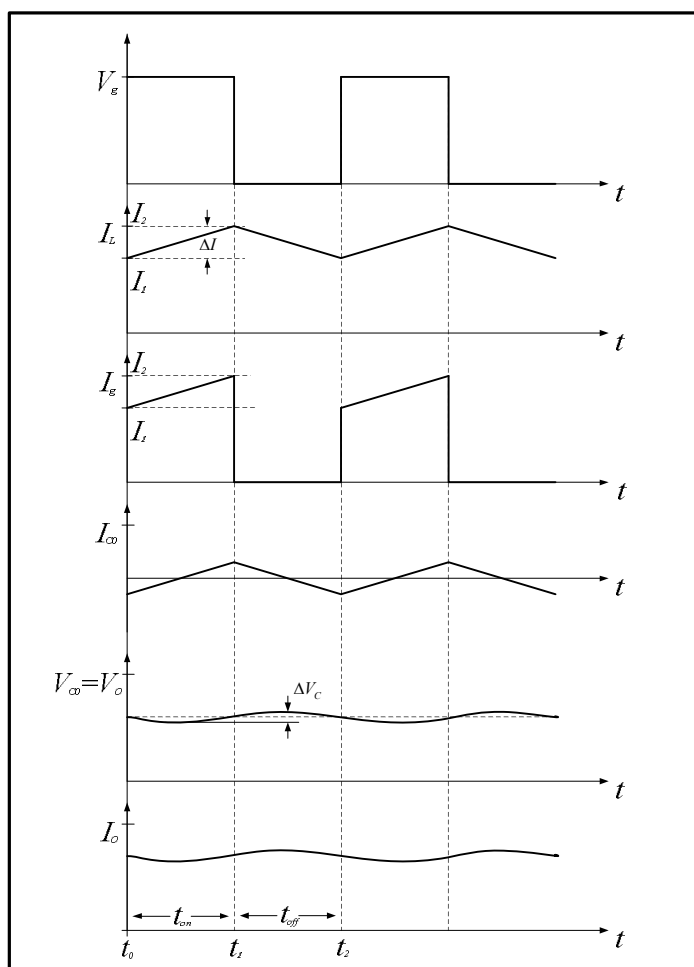
$$I_{c_o} = \frac{\Delta I}{4} \quad (2-13)$$

$$\Delta V_{c_0} = V_{c_0}(t) - V_{c_0}(0) = \frac{1}{C_0} \int_0^{T/2} \frac{\Delta I}{4} dt = \frac{T\Delta I}{8C_0} = \frac{\Delta I}{8f_s C_0} \quad (2-14)$$

จัดสมการใหม่จะได้สมการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุดังสมการที่ 2-15

$$\Delta V_{c_0} = \frac{V_g D(1-D)}{8LC_0 f_s^2} \quad (2-15)$$

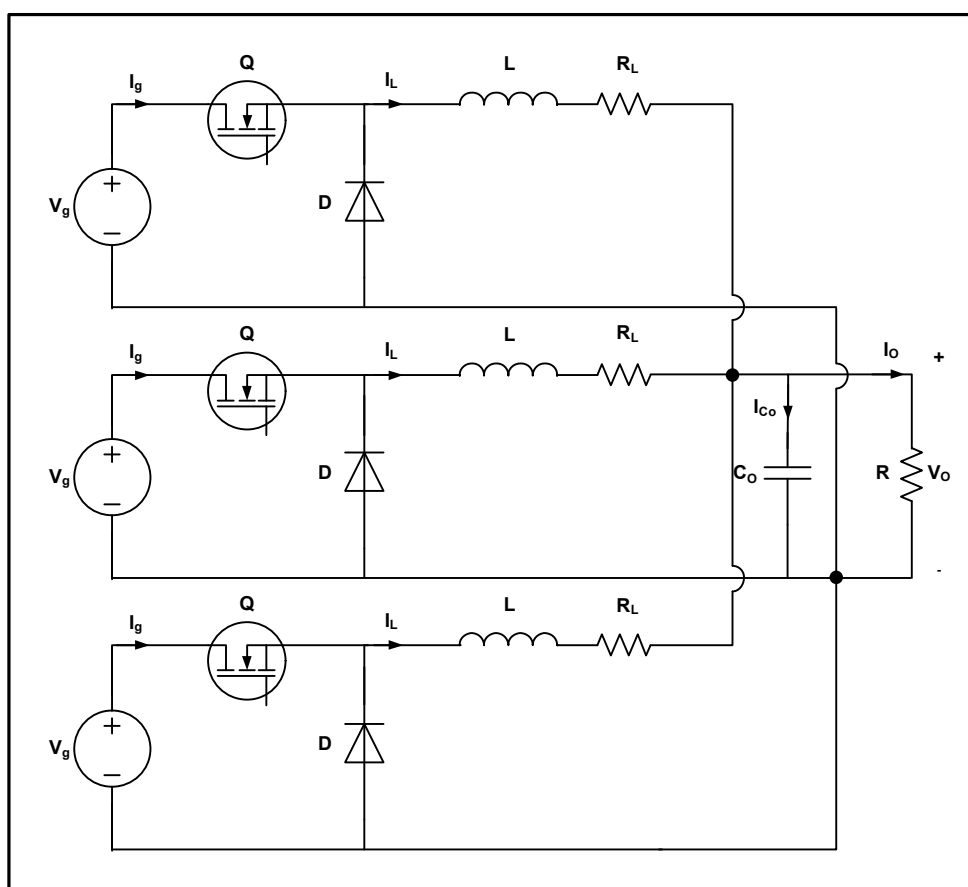
โดยรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าขาออกกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคในรูปการทำงานสามารถแสดงดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของวงจรแปลงผันแบบบัค

2.2 การขนานวงจรแปลงผัน

การขนานวงจรแปลงผันเป็นเทคนิคการเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับระบบแปลงผันเพื่อนำไปจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง โดยเทคนิคนี้จะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้ารวมที่สามารถจ่ายได้ของระบบแปลงผันสูงขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเท่าเดิม[4] โดยรูปแบบการขนานวงจรแปลงผันแสดงดังภาพที่ 2-5

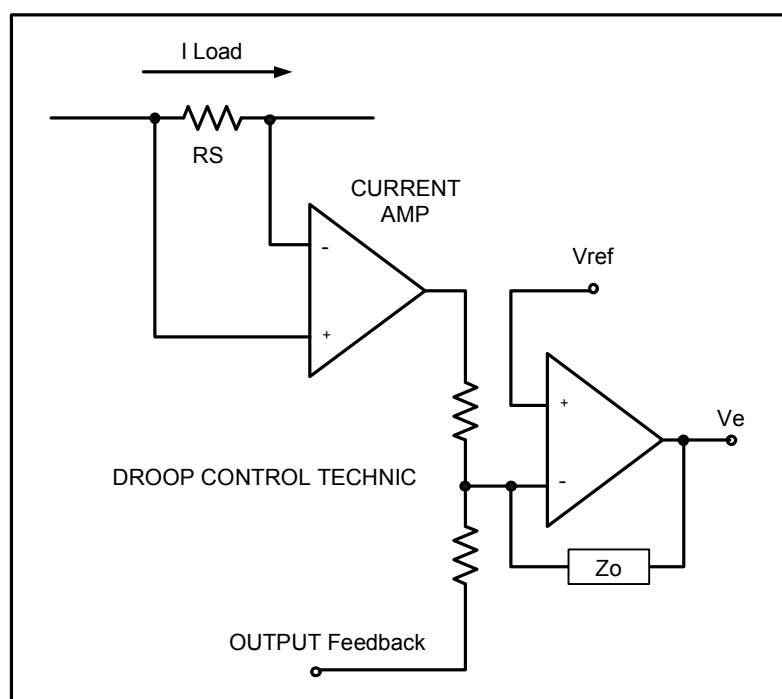


ภาพที่ 2-5 การขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค

ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีข้อเสียที่สำคัญคือจะต้องมีวงจรสำหรับควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากวงจรแปลงผันย่อยแต่ละวงจรให้มีขนาดเท่ากันเพื่อป้องกันความเสียหายของวงจรแปลงผันกรณีจ่ายกระแสไฟฟ้าเกินกำลังของวงจรแปลงผันนั้นๆ และการที่วงจรแปลงผันจ่ายพลังงานใกล้เคียงกันก็จะเป็นการยืดอายุการใช้งานของวงจรแปลงผันอีกด้วย ซึ่งสาเหตุที่ทำให้วงจรแปลงผันที่นำมาต่อขนานกันจ่ายกำลังไฟฟ้าไม่เท่ากัน เกิดจากค่าความต้านทานภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ(R_L) เอง ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการออกแบบวงจรสำหรับควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

วงจรย่อยของระบบแปลงผันแบบขนาน ซึ่งในที่นี้จะนำเสนอวิธีที่ได้รับความนิยมซึ่งมีทั้งข้อดีและเสียแตกต่างกันไป เช่น ครูปคอนโทรล (Droop Control), การควบคุมโดยใช้กระแสเฉลี่ย (Average Current Control) และ มาสเตอร์-สเลฟ (Master-Slave) โดยเทคนิคดังกล่าวนี้มีหลักการทำงานเบื้องต้นดังนี้

2.2.1 ครูปคอนโทรล (Droop Control) เป็นเทคนิคการแบ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรแปลงผันย่อยแต่ละวงจรของระบบแปลงผัน โดยจะใช้หลักการของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม โดยจะใช้ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าขาออก ไปปรับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 วงจรแบ่งกระแสแบบ Droop Control

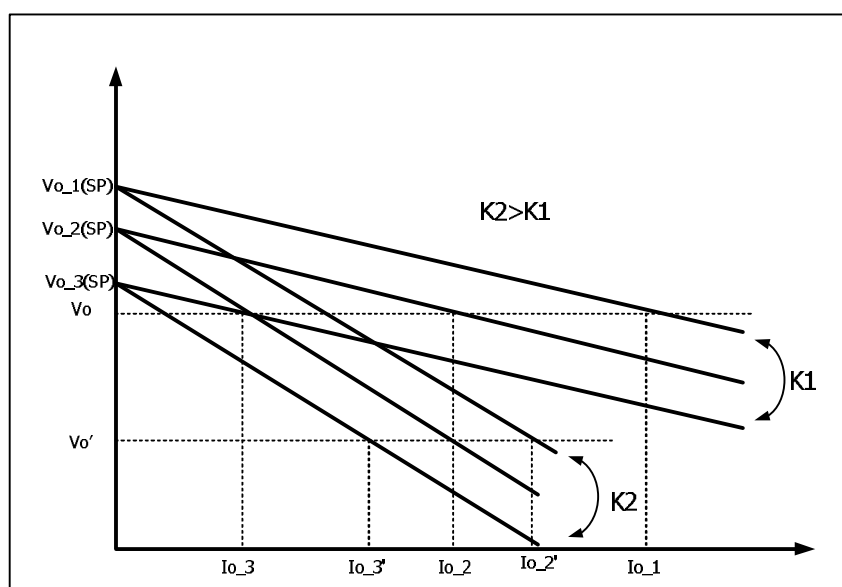
วิธีแบ่งกระแสไฟฟ้าบนหลักการของ Droop นี้ใช้วิธีการควบคุมการแบ่งกระแสไฟฟ้าโดยประมาณผลต่างของค่ากระแสไฟฟ้าจาก ค่าสโลป (Slope) ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันภาระ (Load Regulation Slope) ของวงจรแปลงผันย่อยที่นำมาต่อ ดังสมการที่ 2-16

$$Vo_n = Vo_n(SP) - (K \times Io_n) \quad (2-16)$$

Vo_n คือแรงดันขาออกของวงจรแปลงผันย่อยที่ N

$Vo_n(SP)$	คือค่า เซ็ตพอยท์ (Set Point) ของแรงดันขาออกของวงจรแปลงผัน
K	คือค่าเกน(Gain) ของ ดรูล(Droop)
Io_n	คือกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันย่อยที่ N

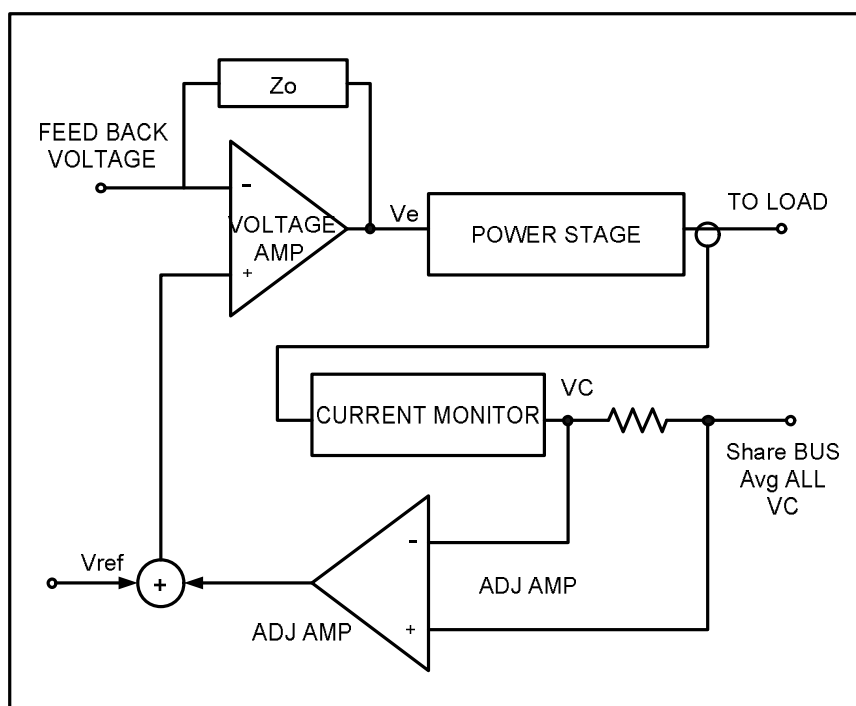
เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันที่นำมาต่อขนานกันแต่ละวงจรมีขนาดเท่ากัน ปัจจัยที่มีผลกับค่ากระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันย่อยแต่ละวงจรนั้น คือค่า Set Point ของแรงดันไฟฟ้าขาออกและค่า Droop Gain ซึ่งถ้า Droop Gain มีค่ามากจะทำให้ผลของการแบ่งกระแสดี แต่จะทำให้ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าขาออกกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าขาออกที่เราต้องการมีค่ามาก (Low Output Voltage Regulation Performance) ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Droop Gain กับ ค่า Output Voltage Regulation Performance

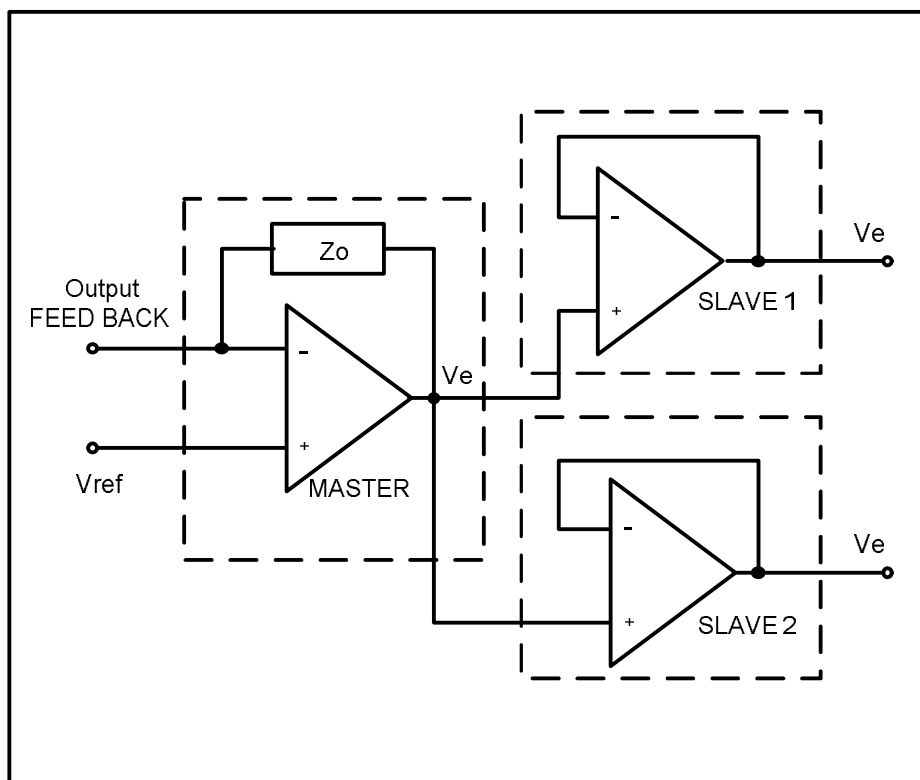
2.2.2 การควบคุมโดยใช้กระแสเฉลี่ย (Average Current Control) หรือ Automatic Current Sharing Average Current Method เทคนิคนี้มีลักษณะคล้ายกับ Droop Control คือเป็นเทคนิคการปรับระดับแรงดันอ้างอิง โดยไม่ต้องต่ออุปกรณ์ภายนอกเพื่อควบคุมกระแสที่ไหลในแต่ละวงจรแปลงผัน โดยเทคนิคนี้จะทำการสร้าง Sharing Bus เพื่อเป็นจุดรวมกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันย่อยก่อนจะต่อไปยังภาระและจะทำการป้อนกลับสัญญาณจาก Sharing Bus ในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านวงจรแปลงผันย่อย ซึ่งมีข้อเสียที่ทำให้ไม่สามารถทำการแยกวงจรแปลงผันย่อยไปจ่าย

พลังงานให้กับภาระอื่นๆได้ อีกทั้งถ้าใช้วงจรแปลงผันที่เป็น โมดูล(Module)ต่างชนิดกันก็จะไม่สามารถแบ่งกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพวงจรแสดง ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 วงจรแบ่งกระแสแบบ Automatic Current Sharing Average Current Method

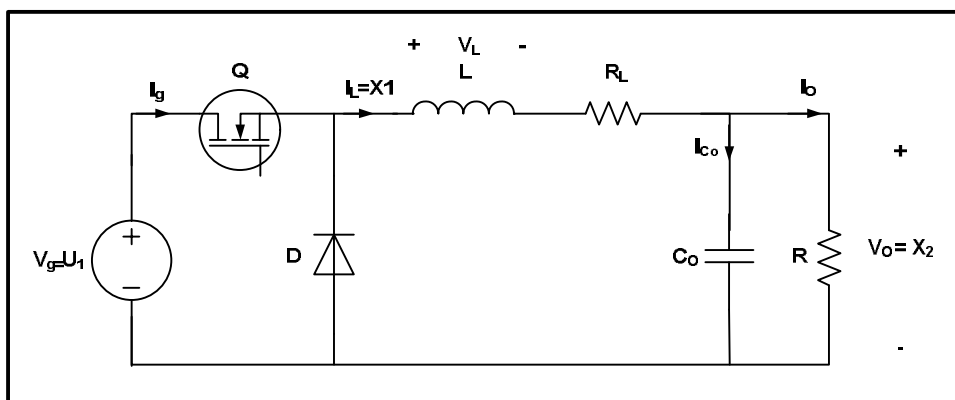
2.2.3 การควบคุมแบบ มาสเตอร์-สเลฟ (Master-Slave Control) เป็นวิธีการออกแบบวงจรแบ่งกระแสไฟฟ้าที่ง่ายไปยังภาระที่แตกต่างจากวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นคือ ระบบควบคุมจะมีการออกแบบตัวควบคุมทั้งลูกระแสและลูประดัน โดยลูประดัน (Master) จะใช้ควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออก และ ลูกระแส (Slave) จะถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรแปลงผันย่อย ดังภาพที่ 2-9 ซึ่งเทคนิคดังกล่าวสามารถทำการควบคุมระดับของกระแสที่ไหลผ่านวงจรแปลงผันย่อยได้ใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากลูประดันไฟฟ้าขาออก นั้นไม่มีการป้อนกลับ (Feed Back) ของกระแสไฟฟ้ามาที่วงจรควบคุมของมันเองทำให้มีปัญหาเรื่องโอเวอร์ชูต (Over Shoot) ในสภาวะเริ่มต้น (Transient) อีกทั้งการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าเพื่อต่อไปยังชุดควบคุมยังต้องใช้ชุดวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งทำให้ขนาดของวงจรแปลงผันมีขนาดใหญ่แต่วิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถแบ่งกระแสไฟฟ้าในแต่ละวงจรแปลงผันย่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2-9 วงจรแบ่งกระแสแบบ Master-Slave Control

2.3 ผลกระทบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคโดยไม่ทำการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

ในระบบที่ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีกำลังไฟฟ้าสูงๆนั้นในปัจจุบันนิยมนำเครื่องแปลงผันที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำมาขนานกันเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบดังแสดงในภาพที่ 2-5 ซึ่งผลกระทบจากค่าความต้านทานภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ (R_L) จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของเครื่องแปลงผันย่อยมีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้เครื่องแปลงผันแต่ละเครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระของระบบไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลทำให้เครื่องแปลงผันย่อยแต่ละเครื่องเกิดความเสียหายได้ โดยปกติแล้วจะทำการควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโดยการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าและนำค่าที่วัดได้มาผ่านชุดควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อทำการควบคุมขนาดของกระแสไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากัน



ภาพที่ 2-10 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่มีความต้านทานภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ

สามารถหาผลกระทบจากค่าความต้านทานภายในของขดลวดเหนี่ยวนำกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำได้ดังสมการต่อไปนี้ (โดย $X_1 = I_L$ และ $X_2 = V_o$)

ในช่วงเวลา t_{on} เมื่อสวิตช์เริ่มนำกระแสที่เวลา $t = 0$ และหยุดนำกระแสที่เวลา $t = t_1$

$$U_1 = L\dot{X}_1 + X_2 + R_L X_1 \quad (2-17)$$

$$X_1 = C\dot{X}_2 + \frac{X_2}{R} \quad (2-18)$$

จัดสมการได้ดังนี้

$$\dot{X}_1 = \frac{U_1}{L} - \frac{X_2}{L} - \frac{R_L X_1}{L} \quad (2-19)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{X_1}{C} - \frac{X_2}{RC} \quad (2-20)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -R_L/L & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} U \quad (2-21)$$

ในช่วงเวลา t_{off} เมื่อสวิตช์หยุดนำกระแสที่เวลา $t = t_1$ และไดโอดเริ่มนำกระแส

$$0 = L\dot{X}_1 + X_2 + R_L X_1 \quad (2-22)$$

$$X_1 = C\dot{X}_2 + \frac{X_2}{R} \quad (2-23)$$

จัดสมการได้ดังนี้

$$\dot{X}_1 = -\frac{X_2}{L} - \frac{R_L X_1}{L} \quad (2-24)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{X_1}{C} - \frac{X_2}{RC} \quad (2-25)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -R_L/L & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} U \quad (2-26)$$

ทำการรวมสมการที่ 2-21 กับ 2-26 จะได้ผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำกับแรงดันไฟฟ้าขาออกในหนึ่งวัฏจักรงาน

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -R_L/L & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \end{bmatrix} U \quad (2-27)$$

ทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กโดยต้องทำการกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้[2],[10]

$$X_1 = X_{10} + \hat{x}_1 \quad (2-28)$$

$$X_2 = X_{20} + \hat{x}_2 \quad (2-29)$$

$$U_1 = U_{10} + \hat{u}_1 \quad (2-30)$$

$$D = D_0 + \hat{d} \quad (2-31)$$

แทนค่าสมการที่ (2-28 ถึง 2-31 ในสมการที่ 2-27)

$$\frac{d\hat{x}_1}{dt} = \frac{-R_L(X_{10} + \hat{x}_1)}{L} - \frac{X_{20} + \hat{x}_2}{L} + \frac{(D_0 + \hat{d})(U_{10} + \hat{u}_1)}{L} \quad (2-32)$$

$$\frac{d\hat{x}_2}{dt} = \frac{(X_{10} + \hat{x}_1)}{C} - \frac{(X_{20} + \hat{x}_2)}{RC} \quad (2-33)$$

ทำการจัดสมการใหม่โดยการแยกส่วนที่เป็นสภาวะคงตัวกับส่วนที่เป็นสภาวะชั่วขณะ

$$\frac{d\hat{x}_1}{dt} = \left(\frac{DU_{10} - X_{20} - R_L X_{10}}{L} \right) + \left(\frac{D\hat{u}_1 + \hat{d}U_{10} - R_L \hat{x}_1 - \hat{x}_2}{L} \right) \quad (2-34)$$

$$\frac{d\hat{x}_2}{dt} = \left(\frac{X_{10}}{C} - \frac{X_{20}}{RC} \right) + \left(\frac{\hat{x}_1}{C} - \frac{\hat{x}_2}{RC} \right) \quad (2-35)$$

จัดให้ส่วนที่เป็นสภาวะคงตัวให้มีค่าเท่ากับศูนย์จะได้

$$DU_{10} = X_{20} + R_L X_{10} \quad (2-36)$$

$$X_{10} = \frac{X_{20}}{R} \quad (2-37)$$

สมการที่มีแต่ส่วนที่เป็นสภาวะชั่วขณะคือ

$$L\dot{\hat{x}}_1 = D\hat{u}_1 + \hat{d}U_{10} + R_L \hat{x}_1 + \hat{x}_2 \quad (2-38)$$

$$C\dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_1 - \frac{\hat{x}_2}{R} \quad (2-39)$$

จะได้สมการเชิงเส้นของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีความต้านทานภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ

ดังนี้

$$L\dot{x}_1 = DU_1 + X_2 + R_L X_1 + \dot{d}U_{10} \quad (2-40)$$

จัดสมการใหม่ได้ดังนี้

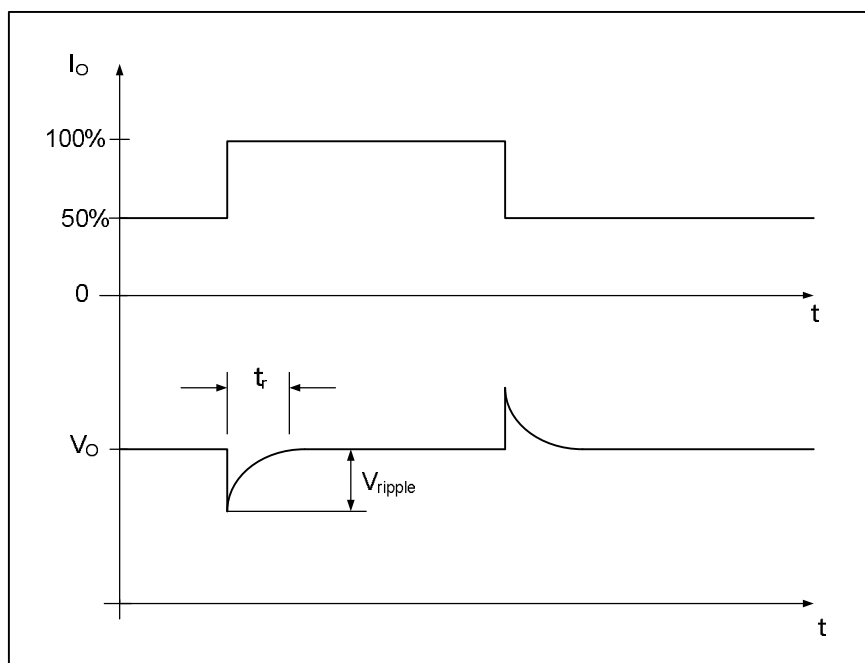
$$X_1 = \frac{(L\dot{x}_1 - DU_1 - X_2 - \dot{d}U_{10})}{R_L} \quad (2-41)$$

จากสมการพบความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำกับความต้านทานภายในของขดลวดเหนี่ยวนำเป็นแบบผกผันซึ่งกรณีที่นำวงจรแปลงผันที่มีความต้านทานภายในไม่เท่ากันมาต่อขนานกันเพื่อช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระโดยมีแต่เพียงวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออก จะทำให้วงจรแปลงผันแต่ละวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าไม่เท่ากัน

2.4 เสถียรภาพของวงจรควบคุม

โดยทั่วไปการกำหนดขนาดของแรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เป็นตัวกำหนดค่าดังกล่าว อาจจะกล่าวได้ว่าเสถียรภาพการทำงานของวงจรแปลงผันจะขึ้นอยู่กับเสถียรภาพการทำงานของวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ ถ้าออกแบบตัวชดเชยที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ ระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Time Respond) ช้าเกินไป หรือ เกิดการแกว่งตัว (Oscillation) ของแรงดันไฟฟ้าขาออกเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว [7],[9]

2.4.1 การทดสอบเสถียรภาพการทำงานของวงจรควบคุม เสถียรภาพการทำงานของวงจรควบคุม จะสามารถ สังเกตได้จากการตอบสนองของวงจรแปลงผันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด(Transient Response) ดังภาพที่ 2-11 สามารถทดสอบได้โดยการกำหนดให้กระแสไฟฟ้าขาออกเปลี่ยนแปลงค่าไปมา เช่น จากค่ากระแสไฟฟ้าขาออกที่ 50% ไปเป็น 100% ของค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งถ้าวงจรควบคุมของวงจรแปลงผันไม่มีเสถียรภาพจะทำให้เกิดการแกว่งของระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกหรือกระแสไฟฟ้าขาออกที่เราทำการควบคุมได้



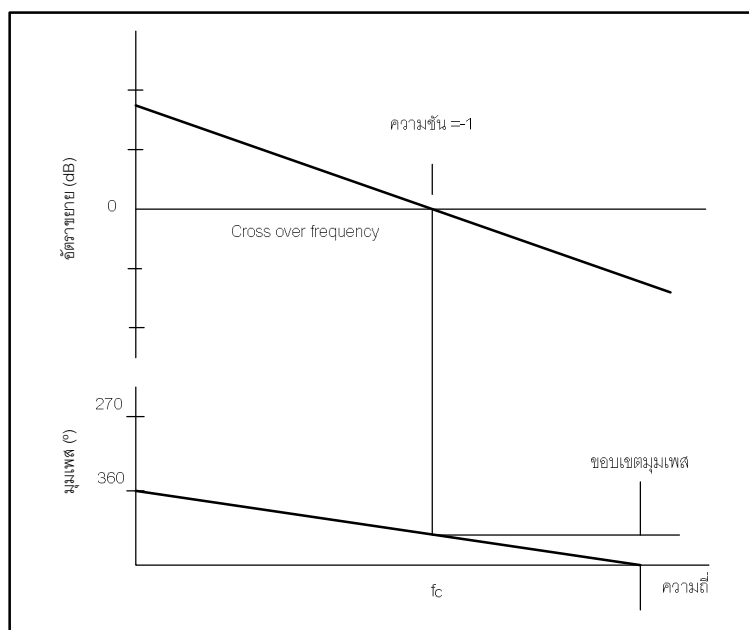
ภาพที่ 2-11 การตอบสนองของวงจรแปลงผันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด

2.4.2 ทฤษฎีการออกแบบวงจรแปลงผันให้มีเสถียรภาพ วงจรควบคุมแบบป้อนกลับนั้นจะไม่มีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อมีจุดใดจุดหนึ่งในลูป (Loop) มีอัตราขยายเท่ากับ 1 (0dB) และมีการเลื่อนเฟสของสัญญาณเท่ากับ 360° ในเวลาเดียวกัน ในการออกแบบลูปป้อนกลับนั้นจำเป็นที่จะต้องหลีกเลี่ยงเงื่อนไขดังกล่าวเพราะจะทำให้ไม่สามารถควบคุมวงจรแปลงผันให้ทำงานตามที่กำหนดได้ โดยตัวอย่างของอัตราขยายและเฟสของลูปป้อนกลับที่มีเสถียรภาพแสดงดังภาพที่ 2-12 ซึ่งการออกแบบลูปป้อนกลับจะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้[9]

ข้อที่ 1 จุดที่ลูปมีอัตราขยายเท่ากับ 1 (0dB) ผลรวมของมุมเฟสที่เลื่อนไปทั้งหมดต้องน้อยกว่า 360°

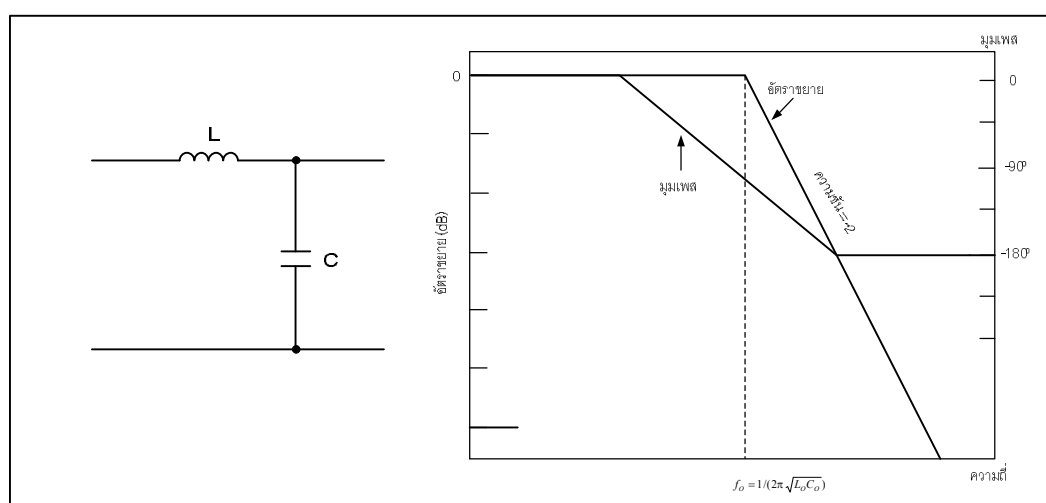
ข้อที่ 2 เพื่อป้องกันการเลื่อนมุมเฟสอย่างรวดเร็วค่าความชัน (Slop) ของกราฟอัตราขยายขอลูปที่ตำแหน่ง f_c (Crossover Frequency) ที่ลูปมีอัตราขยายเท่ากับ 1 (0dB) ต้องมีค่าเท่ากับ -1 หรือ -20dB

ข้อที่ 3 เพื่อป้องกันการแกว่ง จะต้องกำหนดขอบเขตของมุมเฟส (Phase Margin) ไว้อย่างน้อยที่สุด 45° (มุมเฟสเลื่อนได้สูงสุดไม่เกิน 315°)



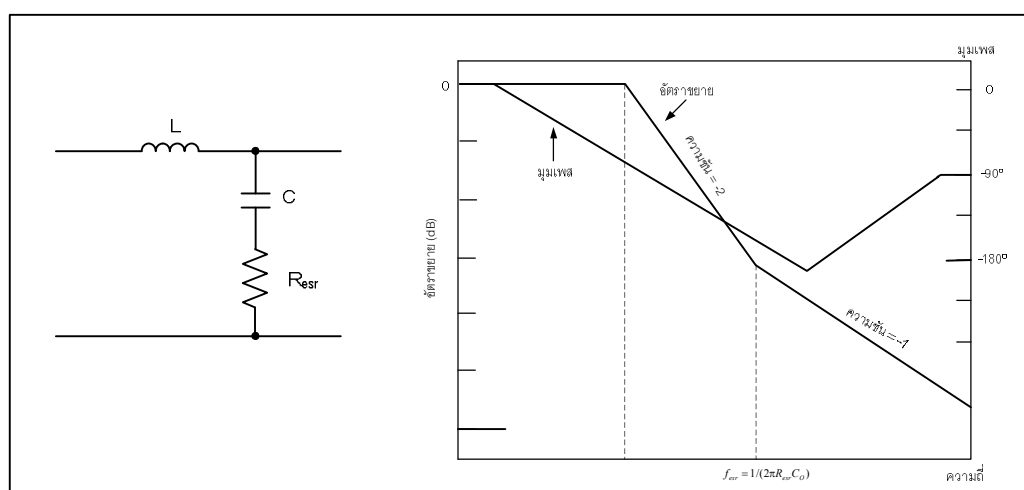
ภาพที่ 2-12 อัตราขยายและมูมเฟส ของระบบที่มีเสถียรภาพ

การจะออกแบบวงจรควบคุมเพื่อกำหนดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันนั้น จำเป็นต้องหาสมการการถ่ายโอน(Transfer Function) ของระบบแปลงผันก่อน โดยจะต้องรวมอัตราขยายของส่วนต่างๆ ซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการการทำงานของวงจรแปลงผัน จากนั้นทำการ พล็อต (Plot) กราฟอัตราขยายและการเลื่อนเฟสในโบดพลอต (BODE)

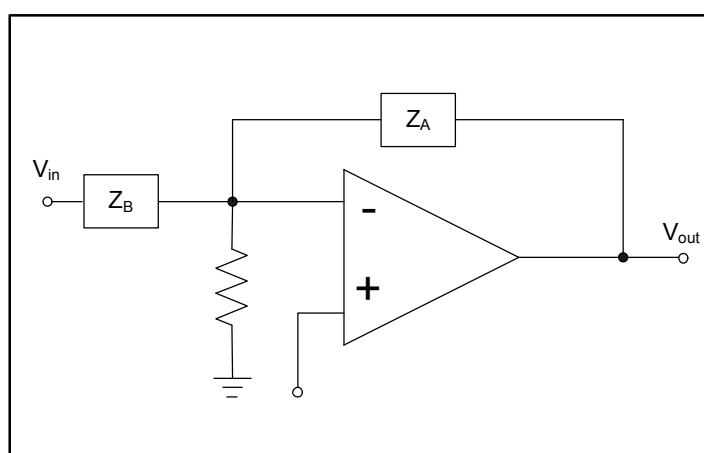


ภาพที่ 2-13 โบดพลอตภาคกำลังของวงจรแปลงผัน

การต่อกันของขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัค จะมีลักษณะเหมือนวงจรฟิลเตอร์ (Filter) ที่มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณขาเข้า โขดพลอดของวงจรจะเป็นดังภาพที่ 2-13 จะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำอัตราขยายของวงจรจะมีค่าเท่ากับ 0 dB จนถึงค่าความถี่หักมุม (f_c : Corner Frequency) $f_c = 1/(2\pi\sqrt{L_o C_o})$ อัตราขยายจะลดลงอย่างรวดเร็วด้วยความชัน -40dB และมุมเฟสจะเลื่อนไปล้าหลัง (Lag) จนมีค่า -180° กรณีที่คิดผลของค่าความต้านทานภายในของตัวเก็บประจุ R_{esr} ก็จะมีผลกับโขดพลอดของวงจรโดยที่ความถี่ $f_{esr} = 1/(2\pi R_{esr} C_o)$ ค่าความชันและอัตราขยายจะกลายเป็น -20dB และมุมเฟสจะเลื่อนกลับมาที่ -90° ดังแสดงในภาพที่ 2-14



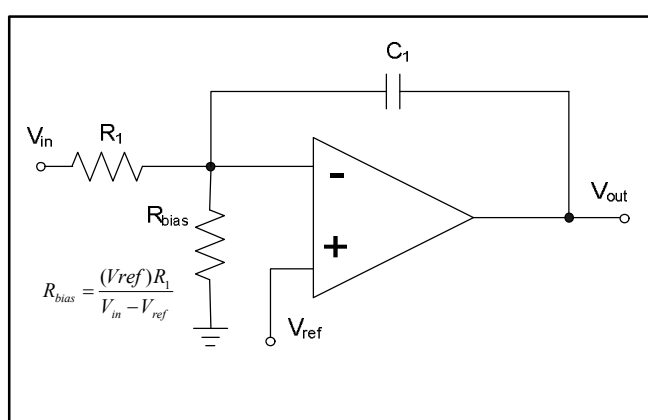
ภาพที่ 2-14 โขดพลอดภาคกำลังของวงจรแปลงผันกรณีที่เกิดค่าความต้านทานภายใน



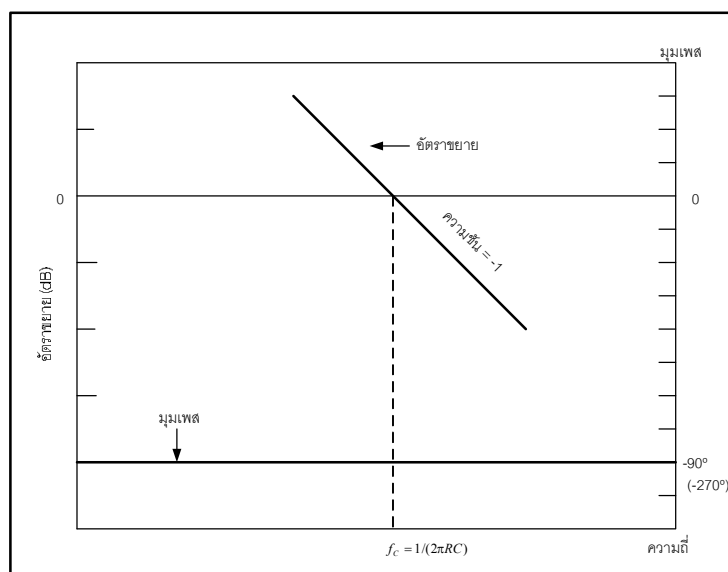
ภาพที่ 2-15 การต่อวงจรขยายความแตกต่าง

อัตราขยายของวงจรขยายความแตกต่าง โดยทั่วไปวงจรขยายที่ใช้ ออปแอมป์เพียงตัวเดียว ผลตอบสนองทางความถี่และอัตราขยายสามารถคำนวณได้จากค่าอิมพีแดนซ์ ของ Z_u และ Z_b ดังภาพที่ 2-15 โดยการจัดวงจรของ R และ C ในรูปแบบต่างๆโดยทั่วไปนิยมออกแบบเป็นสามลักษณะดังนี้ คือ

วงจรขยายแบบที่ 1 (Type 1 Amplifier) เป็นวงจรขยายแบบที่ง่ายที่สุด สามารถจัดรูปวงจรได้ดังภาพที่ 2-16 และลักษณะการตอบสนองของวงจรจะเป็นดังภาพที่ 2-17 ความชันของอัตราขยายมีค่าเท่ากับ -1 ขณะที่มีการเลื่อนเฟสไป -90°

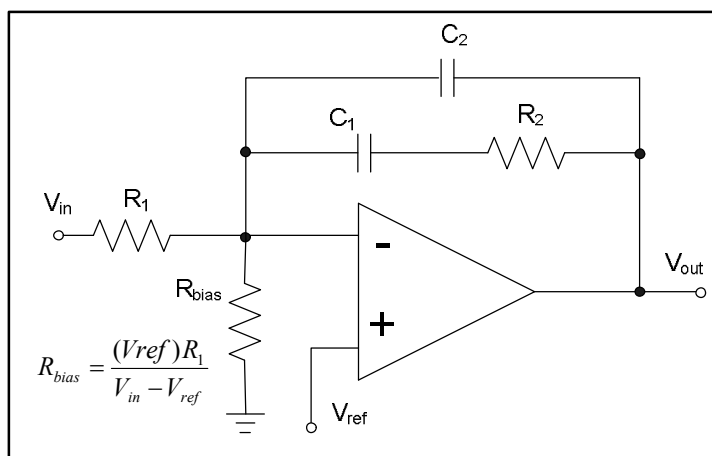


ภาพที่ 2-16 การต่อวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 1

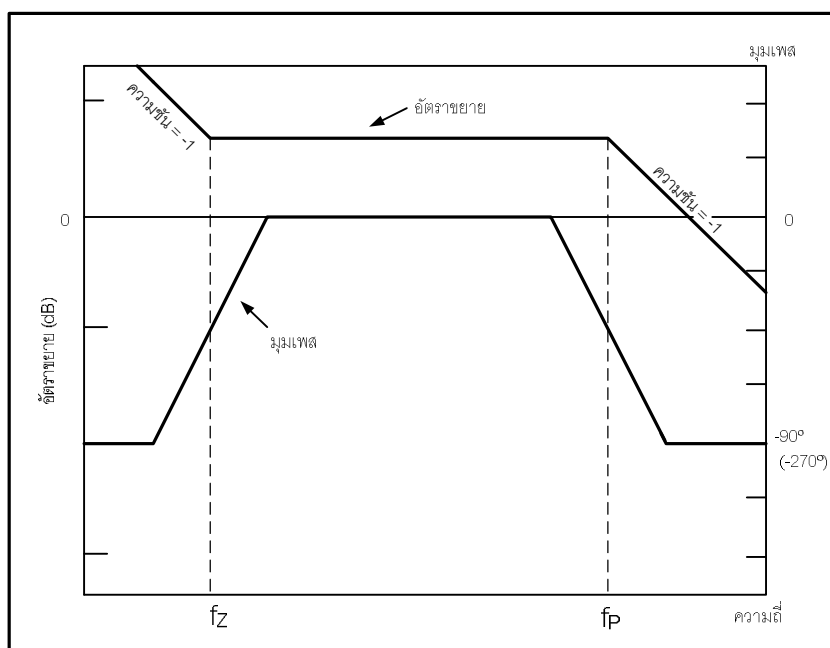


ภาพที่ 2-17 โบทพลอตของวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 1

วงจรขยายแบบที่ 2 (Type 2 Amplifier) สามารถจัดรูปวงจรได้ดังภาพที่ 2-18 และลักษณะการตอบสนองของวงจรจะเป็นดังภาพที่ 2-19 ความชันของอัตราขยายมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก -1 ไปที่ 0 และกลายเป็น -1 ขณะที่มีการเลื่อนเฟสจาก -90° ไปที่ 0° และกลายเป็น -90° ซึ่งมีลักษณะของการคิงเพส

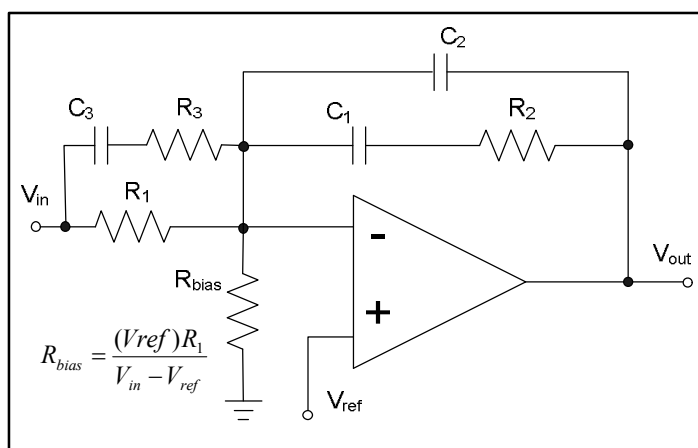


ภาพที่ 2-18 การต่อวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 2

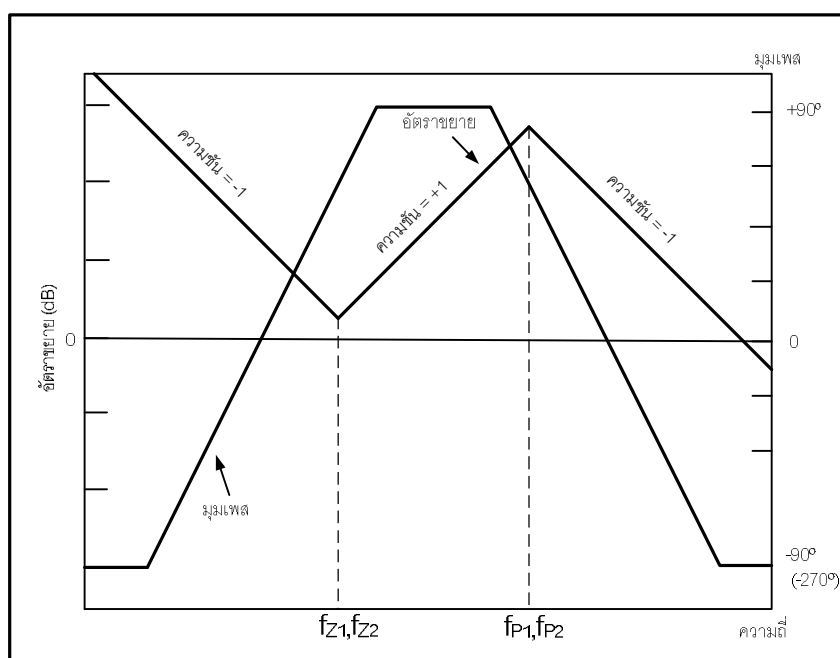


ภาพที่ 2-19 โบทพลอตของวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 2

วงจรขยายแบบที่ 3 (Type 3 Amplifier) สามารถจัดรูปวงจรได้ดังภาพที่ 2-20 และลักษณะการตอบสนองของวงจรจะเป็นดังภาพที่ 2-21 ความชันของอัตราขยายเปลี่ยนแปลงจาก -1 ไปที่ +1 และกลายเป็น -1 ขณะที่มีการเลื่อนเฟสจาก -90° ไปที่ $+90^\circ$ และกลายเป็น -90° และมีลักษณะของการคั้งเฟส



ภาพที่ 2-20 การต่อวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 3



ภาพที่ 2-21 โปดพลอตของวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 3

รูปแบบของวงจรขยายความแตกต่างทั้งสามวงจรเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยม ซึ่งตำแหน่งที่เกิดการหักมุมของโบดพลอตจะมีผลในการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟส โดยการเปลี่ยนความชันที่มีลักษณะเป็นบวก มุมเฟสจะเปลี่ยนเป็นล้าหน้า ในทางกลับกันการเปลี่ยนแปลงความชันให้มีลักษณะความชันเป็นลบ มุมเฟสจะเปลี่ยนเป็นล้าหลัง ยกเว้นวงจรขยายความแตกต่างแบบที่ 1 ที่จะไม่มีการดิ่งเฟส

การจัดวางค่าตัวต้านทาน และ ตัวเก็บประจุในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับวงจรขยายความแตกต่างเพื่อชดเชยรูปให้มีเสถียรภาพนั้น ยังช่วยเพิ่มความเร็วของการเข้าสู่สภาวะคงตัวอีกทั้งยังสามารถกำจัดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่สภาวะคงตัว (ess: Steady-State Error) เพราะการจัดรูปแบบการวางตัวต้านทานและตัวเก็บประจุในวงจรขยายความแตกต่างเสมือนกับเป็นการจัดวางโพล (Pole) และซีโร่ (Zero) ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า โพลเพรชเมนต์ (Pole Placement) โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้[2],[10]

ข้อที่ 1 กำหนดค่าความถี่ผ่าน f_c ค่าความถี่ผ่านคือค่าความถี่ที่ทำให้ผลรวมของอัตราขยายทั้งหมดของ ลูปมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 0dB โดยกำหนดให้ f_c มีค่าไม่มากกว่าหนึ่งในสองของความถี่ใช้งาน ในทางปฏิบัติเลือกที่หนึ่งในสี่หรือหนึ่งในห้า

ข้อที่ 2 เขียนกราฟอัตราขยายรวมหรือโบดพลอต ที่ทำการรวมค่าอัตราขยายที่ได้ทำการชดเชยแล้ว

ข้อที่ 3 คำนวณค่า เกนมาจิ้น (Gain Margin) และ เฟสมาจิ้น (Phase Margin) โดยให้ Gain Margin มีค่าเป็น บวก และ Phase Margin มีค่ามากกว่า 45 องศา

2.5 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคในโหมดกระแสต่อเนื่อง จากนั้นกล่าวถึงวิธีการขนานวงจรแปลงผันแบบต่างๆและผลกระทบจากการขนานวงจรแปลงผันเข้าด้วยกัน จากนั้นจะเป็นทฤษฎีการออกแบบวงจรแปลงผันให้มีเสถียรภาพโดยใช้วิธีโพลเพรชเมนต์

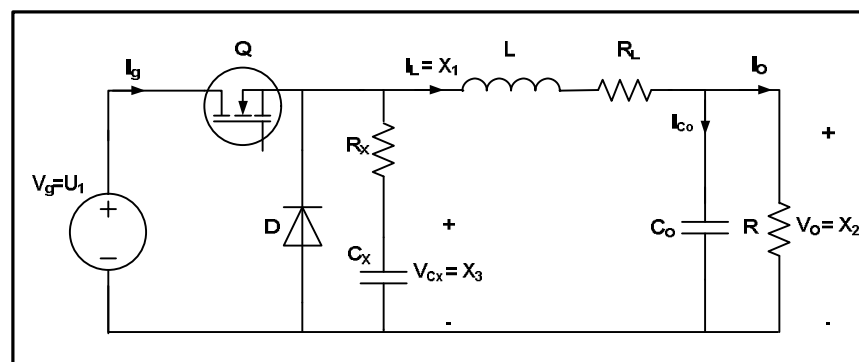
บทที่ 3

การวิเคราะห์และจำลองการทำงานของระบบแปลงผัน

บทนี้จะเป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์การทำงานของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค ที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า จากนั้นทำการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผัน และทำการจำลองการทำงานโดยใช้ Simulink ของ MATLAB

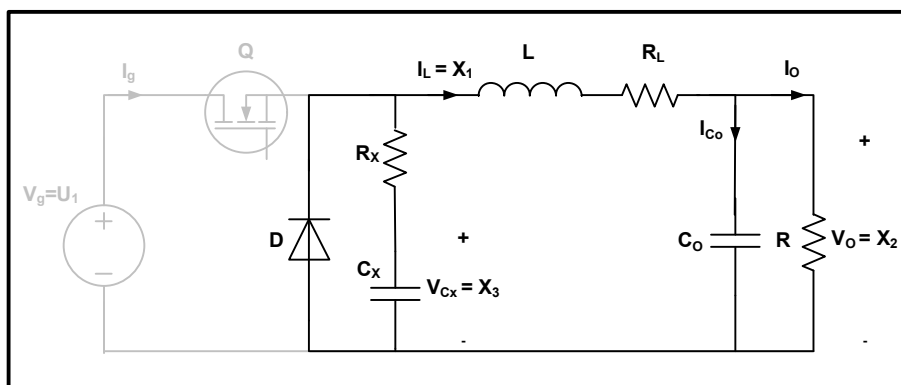
3.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

ในงานวิจัยนี้วงจรสำหรับควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะใช้เทคนิคการควบคุมกระแสไฟฟ้าโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าแต่จะใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{C_x}) ที่ต่อเพิ่มเข้าไปในวงจรแปลงผันแบบบัคแทนดังแสดงในภาพที่ 3-1 (โดย $X_1 = I_L$ $X_2 = V_O$ และ $X_3 = V_{C_x}$)



ภาพที่ 3-1 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

ที่ช่วงเวลา t_{on} เมื่อสวิตช์เริ่มนำกระแสที่เวลา $t = 0$ และหยุดนำกระแสที่เวลา $t = t_1$ ลักษณะของวงจรแปลงผันจะแสดงดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-3 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำขณะสวิตช์เปิด

ความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าขาออก และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าในช่วงสวิตช์เปิดแสดงได้ดังสมการ 3-8

$$\dot{X}_1 = -\frac{X_1 R_L}{L} - \frac{X_2}{L} \quad (3-5)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{X_1}{C_o} - \frac{X_2}{RC_o} \quad (3-6)$$

$$\dot{X}_3 = -\frac{X_3}{C_x R_x} \quad (3-7)$$

จัดสมการใหม่จะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_L/L & -1/L & 0 \\ 1/C_o & -1/RC_o & 0 \\ 0 & 0 & -1/R_x C_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} U_1 \quad (3-8)$$

ทำการรวมสมการที่ 3-4 กับ 3-8 จะได้ผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำกับแรงดันไฟฟ้าขาออกในหนึ่งวัฏจักรงาน

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_L/L & -1/L & 0 \\ 1/C_o & -1/RC_o & 0 \\ 0 & 0 & -1/R_X C_X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \\ D/R_X C_X \end{bmatrix} U_1 \quad (3-9)$$

ทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กโดยต้องทำการกำหนดตัวแปรต่างๆ
ดังนี้

$$X_1 = X_{10} + \hat{x}_1 \quad (3-10)$$

$$X_2 = X_{20} + \hat{x}_2 \quad (3-11)$$

$$X_3 = X_{30} + \hat{x}_3 \quad (3-12)$$

$$U_1 = U_{10} + \hat{u}_1 \quad (3-13)$$

$$D = D_0 + \hat{d} \quad (3-14)$$

แทนค่าสมการที่ (3-10 ถึง 3-14 ในสมการที่ 3-9)

$$\frac{d\hat{x}_1}{dt} = -\frac{R_L(X_{10} + \hat{x}_1)}{L} - \frac{(X_{20} + \hat{x}_2)}{L} + \frac{(D_0 + \hat{d})(U_{10} + \hat{u}_1)}{L} \quad (3-15)$$

$$\frac{d\hat{x}_2}{dt} = \frac{X_{10} + \hat{x}_1}{C} - \frac{(X_{20} + \hat{x}_2)}{RC} \quad (3-16)$$

$$\frac{d\hat{x}_3}{dt} = -\frac{(X_{30} + \hat{x}_3)}{R_X C_X} + \frac{(D_0 + \hat{d})(U_{10} + \hat{u}_1)}{R_X C_X} \quad (3-17)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_L/L & -1/L & 0 \\ 1/C_o & -1/RC_o & 0 \\ 0 & 0 & -1/R_X C_X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \\ D/R_X C_X \end{bmatrix} U_1 + \begin{bmatrix} U_{10}/L \\ 0 \\ U_{10}/R_X C_X \end{bmatrix} \dot{\hat{d}} \quad (3-18)$$

จัดสมการใหม่จะได้

$$\frac{d\hat{x}_1}{dt} = -\frac{R_L X_{10}}{L} - \frac{R_L \hat{x}_1}{L} - \frac{X_{20}}{L} - \frac{\hat{x}_2}{L} + \frac{D_0 U_{10}}{L} + \frac{D_0 \hat{u}_1}{L} + \frac{\hat{d}U_{10}}{L} \quad (3-19)$$

$$\frac{d\hat{x}_2}{dt} = \frac{X_{10}}{C} + \frac{\hat{x}_1}{C} - \frac{X_{20}}{RC} - \frac{\hat{x}_2}{RC} \quad (3-20)$$

$$\frac{d\hat{x}_3}{dt} = -\frac{X_{30}}{R_X C_X} - \frac{\hat{x}_3}{R_X C_X} + \frac{D_0 U_{10}}{R_X C_X} + \frac{D_0 \hat{u}_1}{R_X C_X} + \frac{\hat{d}U_{10}}{R_X C_X} \quad (3-21)$$

ทำการแยกส่วนที่เป็นสภาวะคงตัวกับส่วนที่เป็นสภาวะชั่วขณะ

$$\frac{d\hat{x}_1}{dt} = -\left(\frac{R_L X_{10}}{L} + \frac{X_{20}}{L} - \frac{D_0 U_{10}}{L}\right) - \left(\frac{R_L \hat{x}_1}{L} + \frac{\hat{x}_2}{L} - \frac{D_0 \hat{u}_1}{L} - \frac{\hat{d}U_{10}}{L}\right) \quad (3-22)$$

$$\frac{d\hat{x}_2}{dt} = \left(\frac{X_{10}}{C} - \frac{X_{20}}{RC}\right) + \left(\frac{\hat{x}_1}{C} - \frac{\hat{x}_2}{RC}\right) \quad (3-23)$$

$$\frac{d\hat{x}_3}{dt} = -\left(\frac{X_{30}}{R_X C_X} - \frac{D_0 U_{10}}{R_X C_X}\right) - \left(\frac{\hat{x}_3}{R_X C_X} - \frac{D_0 \hat{u}_1}{R_X C_X} - \frac{\hat{d}U_{10}}{R_X C_X}\right) \quad (3-24)$$

ทำการจัดส่วนที่เป็นสภาวะคงตัวให้เท่ากับศูนย์จากสมการ 3-21

$$0 = R_L X_{10} + X_{20} - D_0 U_{10} \quad (3-25)$$

จะได้

$$D_0 U_{10} = R_L X_{10} + X_{20} \quad (3-26)$$

ทำการจัดส่วนที่เป็นสภาวะคงตัวให้เท่ากับศูนย์จากสมการ 3-22

$$0 = X_{10} - \frac{X_{20}}{R} \quad (3-27)$$

จะได้

$$X_{10} = \frac{X_{20}}{R} \quad (3-28)$$

ทำการจัดส่วนที่เป็นสภาวะคงตัวให้เท่ากับศูนย์จากสมการ 3-23

$$0 = X_{30} - D_0 U_{10} \quad (3-29)$$

จะได้

$$X_{30} = D_0 U_{10} \quad (3-30)$$

คิดเฉพาะส่วนที่เป็นสภาวะชั่วขณะของสมการที่ 3-21 กับ 3-23

$$L\dot{\hat{x}}_1 = -R_L \hat{x}_1 - \hat{x}_2 + D_0 \hat{u}_1 + \hat{d}U_{10} \quad (3-31)$$

$$R_X C_X \dot{\hat{x}}_3 = -\hat{x}_3 + D_0 \hat{u}_1 + \hat{d}U_{10} \quad (3-32)$$

จัดสมการใหม่จะได้

$$L\dot{\hat{x}}_1 + R_L \hat{x}_1 + \hat{x}_2 = D_0 \hat{u}_1 + \hat{d}U_{10} \quad (3-33)$$

$$R_X C_X \dot{\hat{x}}_3 + \hat{x}_3 = D_0 \hat{u}_1 + \hat{d}U_{10} \quad (3-34)$$

ทำการรวมสมการที่ 3-32 กับ 3-33 จะได้

$$L\dot{\hat{x}}_1 + R_L\hat{x}_1 + \hat{x}_2 = R_X C_X \dot{\hat{x}}_3 + \hat{x}_3 \quad (3-35)$$

คิดเฉพาะที่สภาวะคงตัว

$$R_L\hat{x}_1 + \hat{x}_2 = \hat{x}_3 \quad (3-36)$$

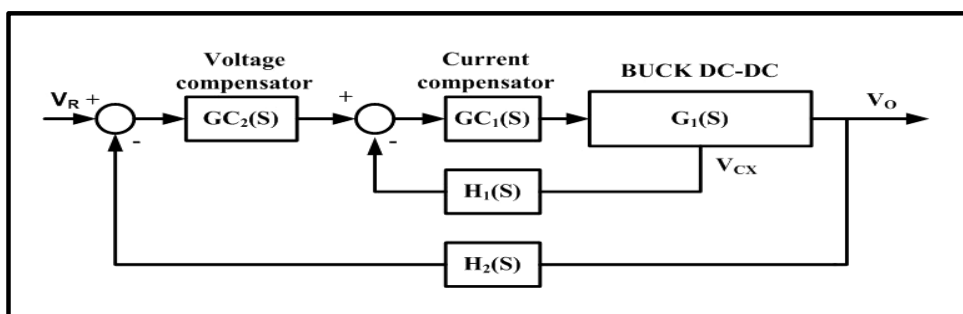
จะได้

$$V_{C_X} = V_O + R_L I_L \quad (3-37)$$

จะสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ได้ดังสมการที่ 3-36 ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว ถ้าเราทำการควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค จะสามารถควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำได้

3.2 การออกแบบวงจรควบคุม

เทคนิคการออกแบบวงจรควบคุมของวงจรแปลงผันที่นำเสนอในงานวิจัยนี้นั้นทำการออกแบบตัวควบคุมเป็นสองลูปคือ ลูปแรงดันไฟฟ้าขาออก (V_O) กับลูปแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{C_X}) ดังภาพที่ 3-4 การออกแบบตัวควบคุมของลูปแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($GC_1(s)$) โดยการออกแบบจาก Open loop Transfer function ของระบบ และทำการออกแบบตัวควบคุมของลูปแรงดันไฟฟ้าขาออก ($GC_2(s)$) ด้วยเทคนิคเดียวกัน



ภาพที่3-4 ภาควงจรควบคุมของวงจรแปลงผัน

จากสมการที่ 3-18 ทำการจัดภาพสมการให้สอดคล้องกับสมการที่ 3-38 เพื่อหา Open loop Transfer Function ของ $G(s)H_1(s)$

$$\dot{X} = \bar{A}_0 x + \bar{B}_0 u + \bar{E} \hat{d} \quad (3-38)$$

โดยที่

$$\hat{d}(s) = \bar{F}^T(s) \bar{V}(s) + \bar{Q}^T(s) \bar{U}(s) \quad (3-39)$$

$$d(s) = \frac{V_e(s)}{V_p} \quad (3-40)$$

โดยที่ V_e คือสัญญาณที่ออกมาจากชุด ขยายสัญญาณผิดพลาด(Error Amplifier) V_p คือค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณพื้นเลื้อย โดยสามารถหาค่าของ V_e ได้จากสมการที่ 3-40

$$V_e(s) = [1 + H(s)]V_{ref} - H(s)X_3(s) \quad (3-41)$$

จะได้

$$d(s) = \frac{[1 + H(s)]V_{ref} - H(s)X_3(s)}{V_p} \quad (3-42)$$

เพราะฉะนั้น

$$\hat{d}(s) = -\frac{H(s)X_3(s)}{V_p} \quad (3-43)$$

เพราะค่า V_{ref} เป็นค่าคงที่ จากนั้นทำการเปรียบเทียบสมการที่ 3-42 กับ 3-43 เพื่อหาค่า $F^T(s)$ จะได้

$$F^T = [0 \quad 0 \quad -H(s)/V_p] \quad (3-44)$$

จากนั้นทำการหา Open Loop Transfer Function ของ รูป $G_1(s)H_1(s)$ โดยหาจากสมการที่ 3-45 และ -3-46

$$G(s)H(s) = - \left[\frac{X1(s)}{V1(s)} + \frac{X2(s)}{V2(s)} + \frac{X3(s)}{V3(s)} + \dots \right] \quad (3-45)$$

โดยที่

$$\frac{X(s)}{V(s)} = (S\bar{I} - \bar{A}_0)^{-1} \bar{E}(s) \bar{F}^T(s) \quad (3-46)$$

ตัวแปรต่างๆจะมีค่าดังนี้

$$A_0 = \begin{bmatrix} -R_L/L & -1/L & 0 \\ 1/C_0 & -1/RC_0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/R_X C_X \end{bmatrix} \quad (3-47)$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} D/L \\ 0 \\ D/R_X C_X \end{bmatrix} \quad (3-48)$$

$$E_0 = \begin{bmatrix} U_{10}/L \\ 0 \\ U_{10}/R_X C_X \end{bmatrix} \quad (3-49)$$

นำค่าตัวแปรต่างๆแทนลงในสมการที่ 3-46 จะได้

$$\frac{X(s)}{V(s)} = \begin{bmatrix} S + \frac{R_L}{L} & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{C_0} & S + \frac{1}{RC_0} & 0 \\ 0 & 0 & S + \frac{1}{R_X C_X} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{H(s)U_{10}}{V_p L} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{H(s)U_{10}}{R_X C_X} \end{bmatrix} \quad (3-50)$$

$$\frac{X(s)}{V(s)} = \frac{\begin{bmatrix} 0 & 0 & -\left(-S^2 + \frac{S(RC_0 + R_X C_X)}{R_X C_X RC_0} + \frac{1}{R_X C_X RC_0}\right) \frac{H(s)U_{10}}{V_P} \\ 0 & 0 & -\left(-\frac{S}{L} - \frac{1}{R_X C_X L}\right) \frac{H(s)U_{10}}{V_P} \\ 0 & 0 & -\left(S^2 + \frac{S(L + R_L R_X C_X)}{R_X C_X L} + \frac{R_L C_0 + R_X C_X}{R_X C_X LC_0}\right) \frac{H(s)U_{10}}{V_P} \end{bmatrix}}{S^3 + S^2 \left(\frac{1}{R_X C_X} + \frac{1}{RC_0} + \frac{R_L}{L} \right) + S \left(\frac{1}{R_X C_X RC_0} + \frac{R_L}{R_X C_X L} + \frac{R_L}{RC_0 L} \right) + \frac{R_L}{R_X C_X RLC_0}} \quad (3-51)$$

จะได้ Open loop Transfer Function ดังสมการที่ 3-52

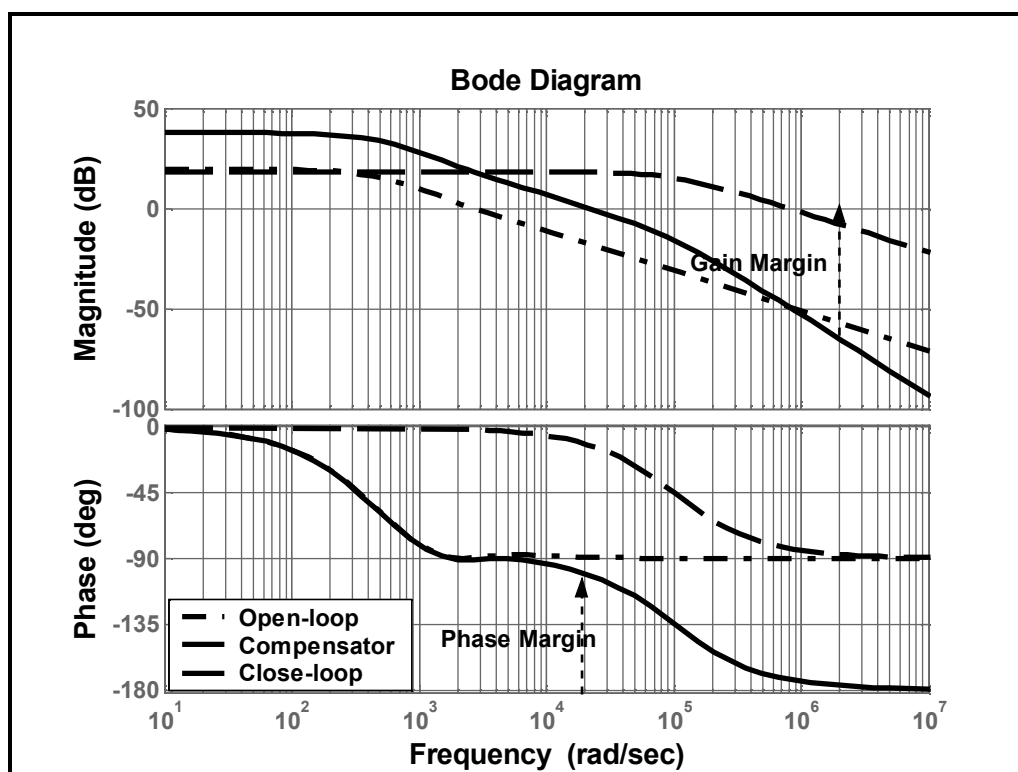
$$G(s)H(s) = -\left| \frac{X_3(s)}{V_3(s)} \right| = \frac{\left(S^2 + \frac{S(L + R_L R_X C_X)}{R_X C_X L} + \frac{R_L C_0 + R_X C_X}{R_X C_X LC_0} \right)}{S^3 + S^2 \left(\frac{1}{R_X C_X} + \frac{1}{RC_0} + \frac{R_L}{L} \right) + S \left(\frac{1}{R_X C_X RC_0} + \frac{R_L}{R_X C_X L} + \frac{R_L}{RC_0 L} \right) + \frac{R_L}{R_X C_X RLC_0}} \quad (3-52)$$

ทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆจากตารางที่ 3-1 ลงไปในสมการที่ 3-52 โดยวิธีการหาค่าตัวแปรต่างๆจะแสดงในบทที่4 (การออกแบบสร้างวงจรแปลงผันและระบบควบคุม)

ตารางที่ 3-1 ค่าที่ใช้ในการออกแบบจำลองการทำงาน

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ	Value
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V_g)	48 V
แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_o)	12 V
ขนาดกำลังไฟฟ้า (P_o)	60 W
ความถี่ในการสวิตช์ (f_s)	100 kHz
ค่าตัวเก็บประจุ (V_{C_x})	100 μF
ค่าตัวเหนี่ยวนำ (C_o)	0.6 mH
ความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำ (R_L)	1.12 Ω
ค่า ($R_X C_X$)	7.2×10^{-4}
แรงดันสูงสุดของสัญญาณพื้นเลื้อย (V_P)	3 V

การออกแบบวงจรรควบคุมใช้วิธี Pole Placement โดยการวางโพล (Pole) เข้าไปในระบบ เพื่อให้ได้ Bode Plot ของ Close Loop Transfer Function ตามที่ต้องการ ซึ่งจะต้องทำการปรับ Gain และ Phase ของระบบให้เป็นไปตามค่าที่เราต้องการ โดยเลือกให้ค่า Magnitude มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ประมาณ 1/5 เท่าของความถี่สวิทช์ และปรับให้ค่า Gain Margin มากกว่า 6 dB และ Phase Margin มากกว่า 45° โดย Open loop Transfer function, Compensate และ Close loop Transfer function ของรูป $G_1(s)H_1(s)$ เป็นดังสมการที่ 3-53 ,3-54 และ 3-55 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-5 Magnitude และ Phase ของ Open loop Transfer function, Compensator Transfer function และ Close loop Transfer function ของ $G_1(s)H_1(s)$

$$G(s)H(s) = \frac{2778(s^2 + 422e3s + 5.6e6)}{s^3 + 4.643e3s^2 + 5.69e6s + 1.639e9} \quad (3-53)$$

$$GC_1(s) = \frac{8.04e5}{s + 1e5} \quad (3-54)$$

$$GC_1(s)G(s)H(s) = \frac{2.23e9s^2 + 9.45e12s + 1.25e16}{s^4 + 1e4s^3 + 4.7e8s^2 + 5.7e11s + 1.64e14} \quad (3-55)$$

Bode Plot ของ Magnitude และ Phase ของ Open loop Transfer function, Compensate และ Close loop Transfer function ของรูป $G_1(s)H_1(s)$ แสดงดังภาพที่ 3-5 ตัวควบคุมของรูป แรงดันไฟฟ้าขาออก ($GC_2(s)$) สามารถคำนวณได้จากการชุกรวม Transfer function ดังสมการที่ 3-56 จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมของรูป แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ($GC_1(s)$)

$$G_2(s) = \left(\frac{GC_1(s)G(s)}{1 + GC_1(s)G(s)H_1(s)} \right) \quad (3-56)$$

Open loop Transfer function จะมีค่าดังสมการที่ 3-57

$$G_2(s)H_2(s) = \left(\frac{GC_1(s)G(s)H_1(s)}{1 + GC_1(s)G(s)H_1(s)} \right) H_2(s) \quad (3-57)$$

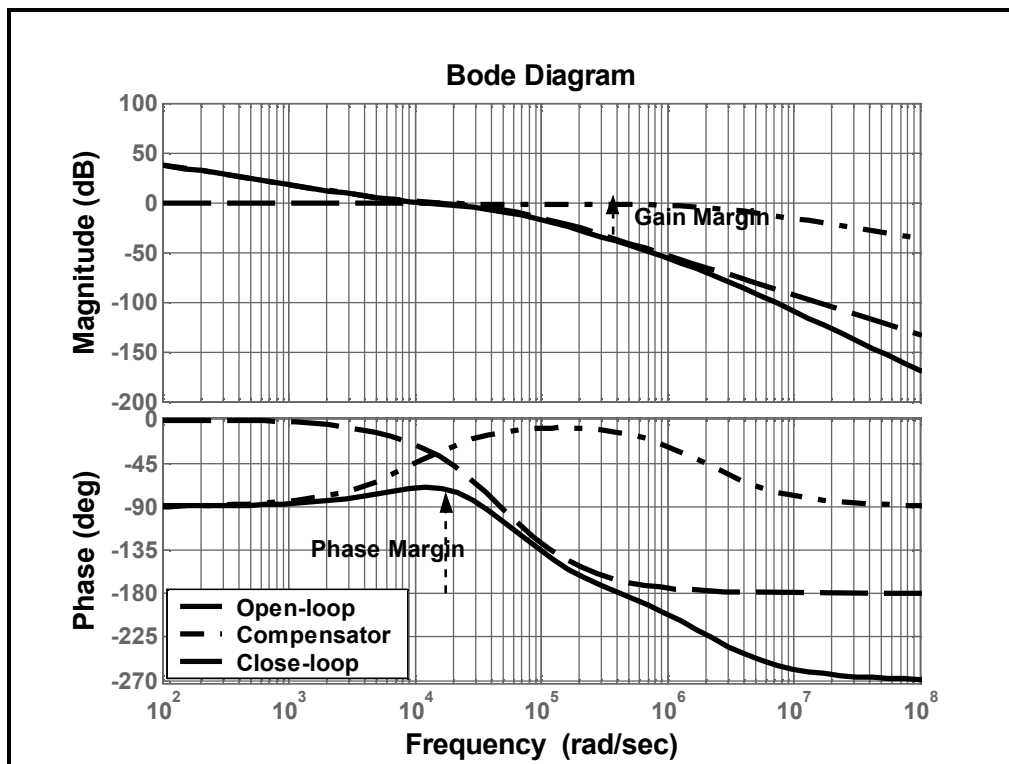
โดย Open loop Transfer function, Compensate และ Close loop Transfer function ของรูป $G_1(s)H_1(s)$ เป็นดังสมการที่ 3-58, 3-59 และ 3-60 ตามลำดับ

$$G_2(s)H_2(s) = \frac{2.23e9s^2 + 9.45e12s + 1.25e16}{s^4 + 1e5s^3 + 2.7e9s^2 + 1.26e16} \quad (3-58)$$

$$GC_2(s) = \frac{1.558e6(s + 1e4)}{s(s + 2e6)} \quad (3-59)$$

$$GC_2G_2(s)H_2(s) = \frac{3.48e15s^3 + 4.8e19s^2 + 16.6e22s + 1.95e26}{s^6 + 2e6s^5 + 5.4e15s^4 + 20e18s^2 + 2.52e22s} \quad (3-60)$$

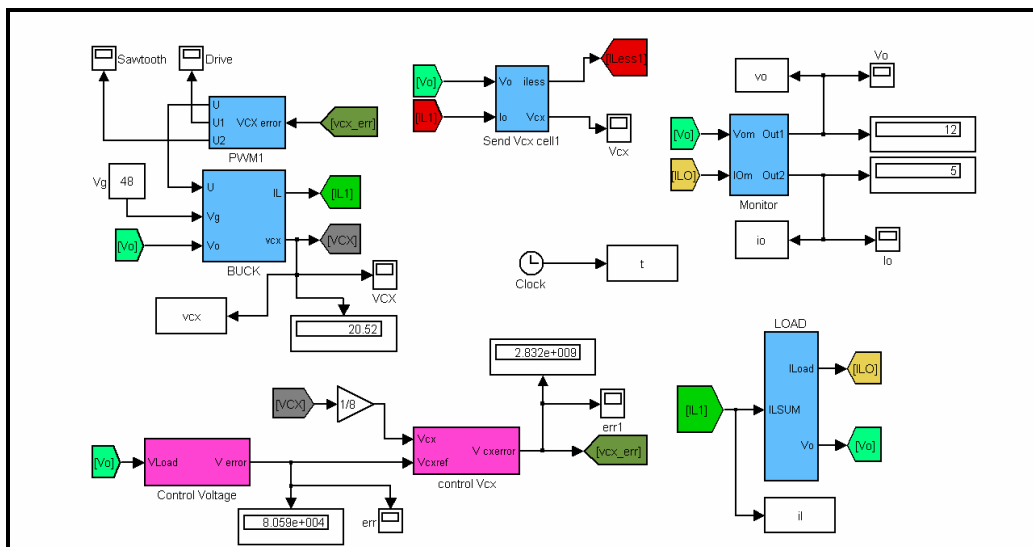
Bode Plot ของ Magnitude และ Phase ของ Open loop Transfer function, Compensate และ Close loop Transfer function ของรูป $G_2(s)H_2(s)$ แสดงดังภาพที่ 3-6



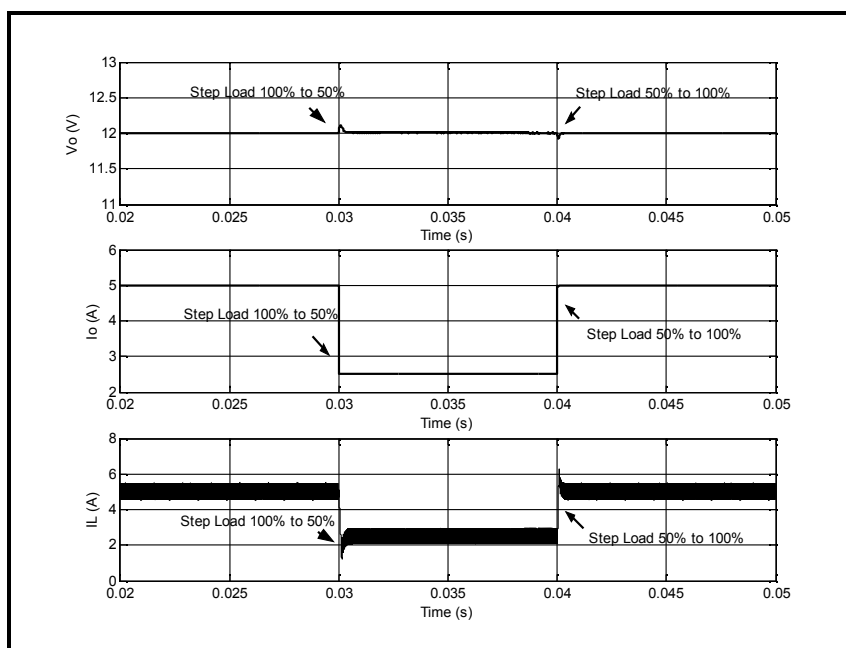
ภาพที่ 3-6 Magnitude และ Phase ของ Open loop Transfer function, Compensator Transfer function และ Close loop Transfer function ของ $G_2(s)H_2(s)$

3.3 การจำลองการทำงาน

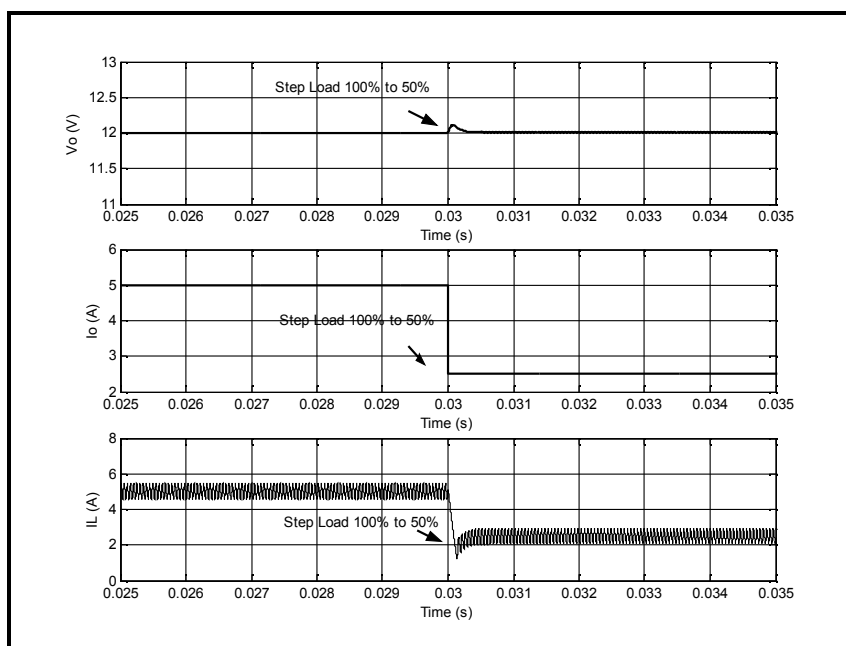
นำตารางที่ 3-1 แทนค่าลงในสมการที่ 3-18 และ จัดรูปแบบของสมการให้เหมาะสมและทำการแปลงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาใช้กับโปรแกรม Simulink ของ MATLAB ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และแรงดันไฟฟ้าขาออก สามารถนำ Transfer Function ของสมการที่ 3-54 และ 3-59 มาใช้ได้ตามลำดับ โดยวงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานแสดงดังภาพที่ 3-7



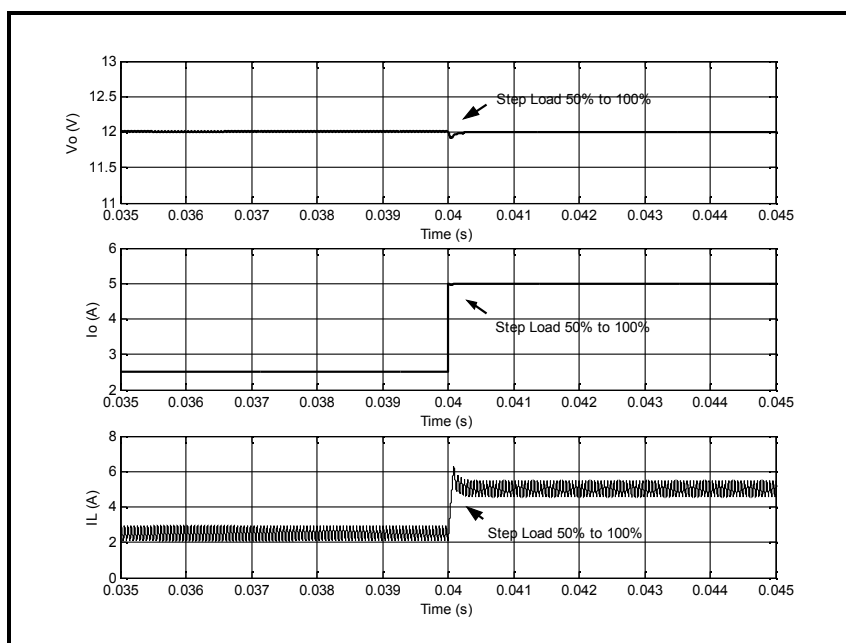
ภาพที่ 3-7 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า
ของวงจรแปลงผันในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลอง
การทำงานจำนวน 1 วงจร



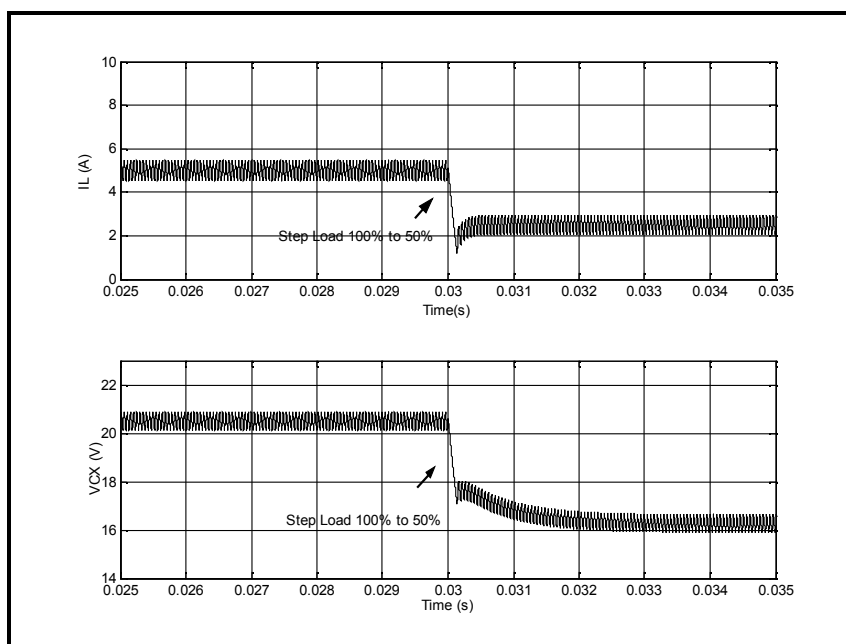
ภาพที่ 3-8 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
เมื่อทำการ Step Load ที่เวลา 0.03 sec และ 0.04 sec



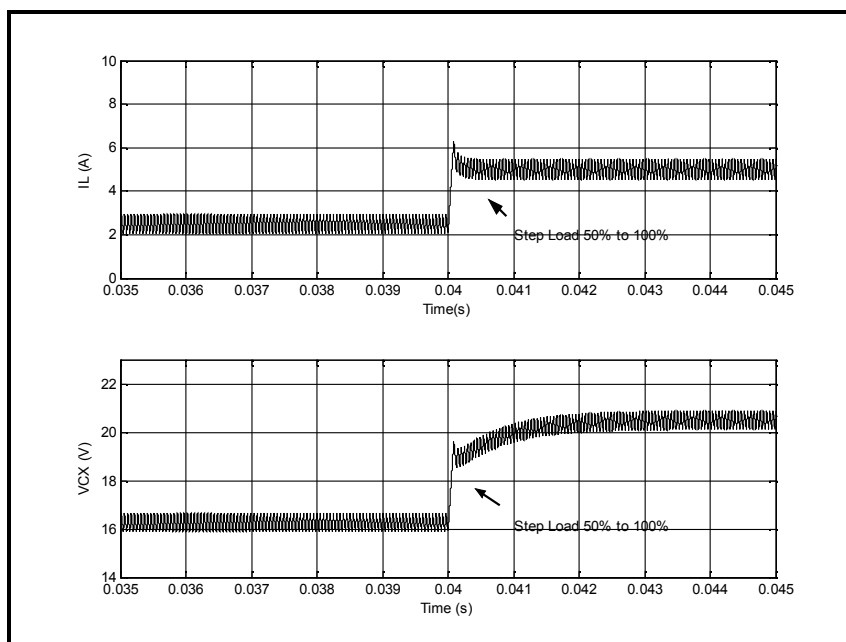
ภาพที่ 3-9 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
เมื่อทำการลดระดับกำลังไฟฟ้าจาก 100% มาที่ 50%



ภาพที่ 3-10 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
เมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าจาก 50% มาที่ 100%

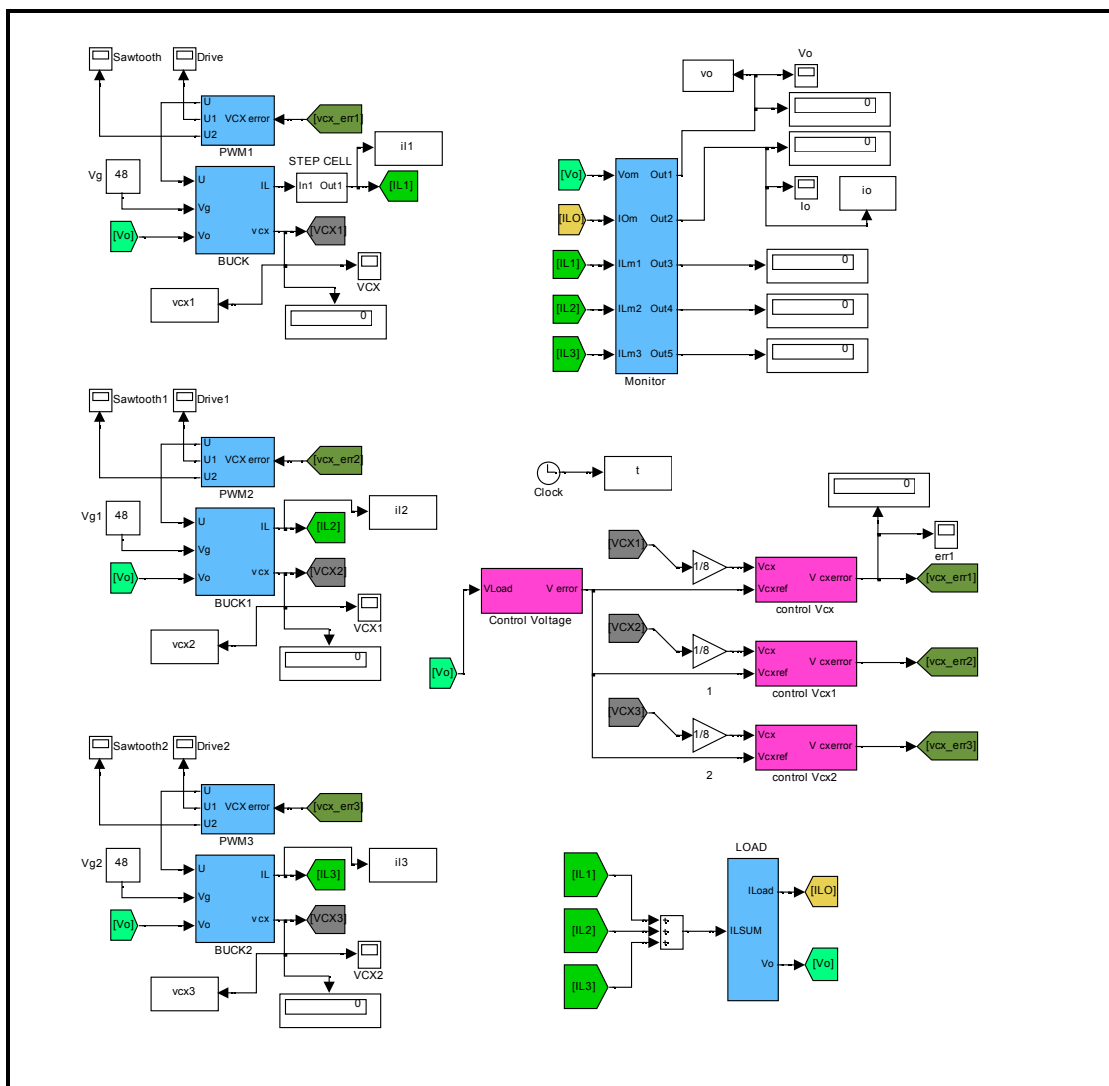


ภาพที่ 3-11 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วน
หน้าเมื่อทำการลดระดับกำลังไฟฟ้าจาก 100% มาที่ 50%

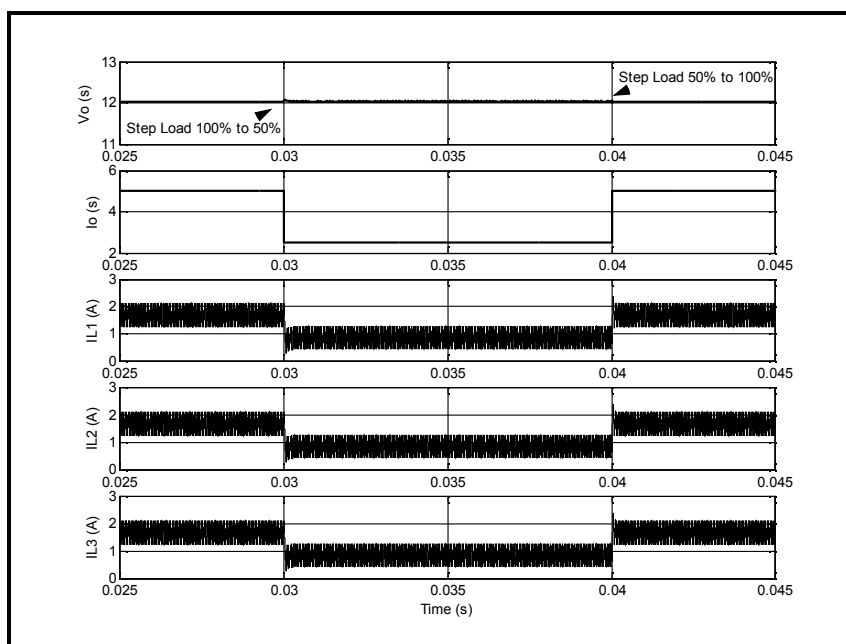


ภาพที่ 3-12 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วน
หน้าเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าจาก 50% มาที่ 100%

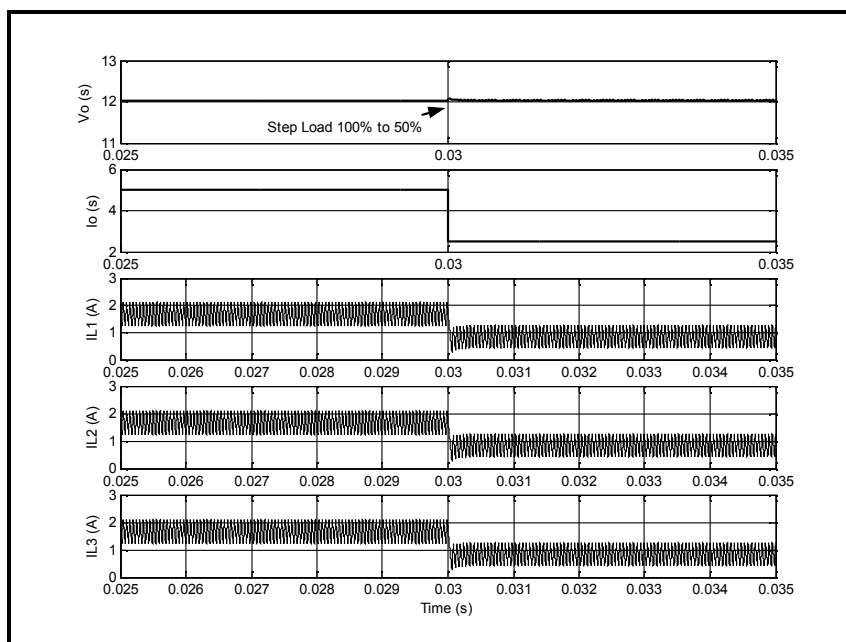
ความสัมพันธ์ของ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผัน กับ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแสดง ดังภาพที่ 3-11 และ 3-12 จากนั้นนำวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้เทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผัน ในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ มาต่อขนานกันจำนวน 3 วงจร



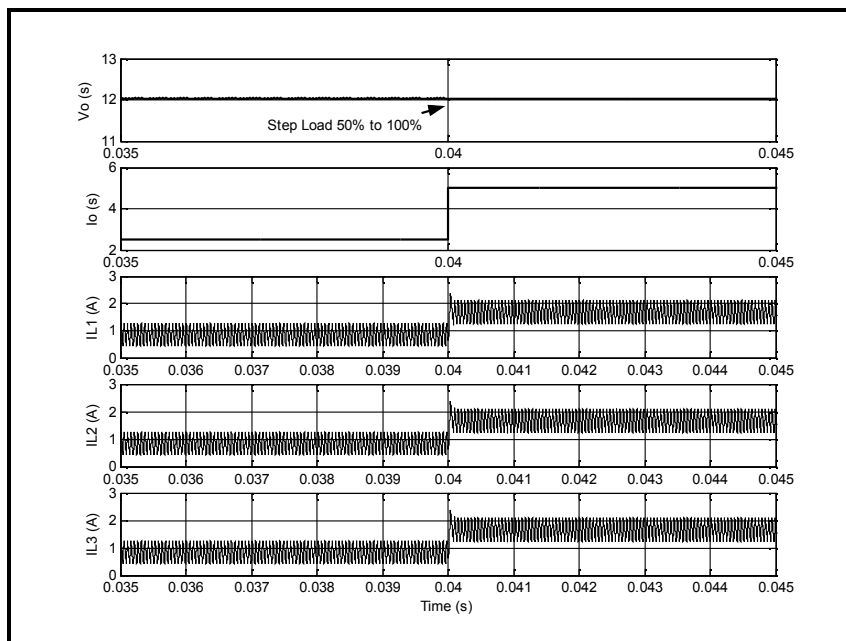
ภาพที่ 3-13 วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคที่ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ในการจำลองการทำงานจำนวน 3 วงจร



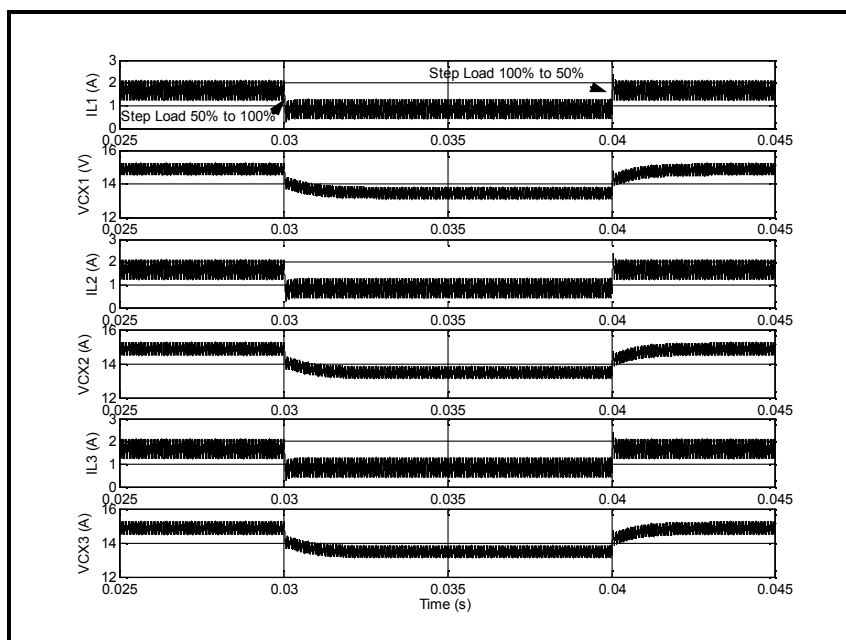
ภาพที่ 3-14 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงทั้ง 3 วงจรที่นำมาต่อขนาน เมื่อทำการ Step Load



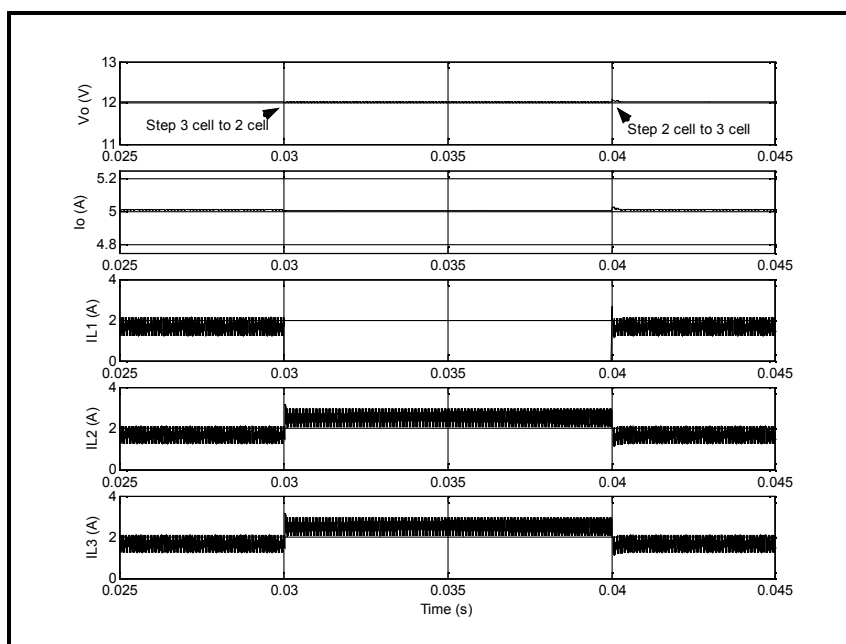
ภาพที่ 3-15 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงทั้ง 3 วงจรที่นำมาต่อขนาน เมื่อทำการลดระดับ
กำลังไฟฟ้าจาก 100% มาที่ 50%



ภาพที่ 3-16 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
ของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงทั้ง 3 วงจรที่นำมาต่อขนาน เมื่อทำการเพิ่มระดับ
กำลังไฟฟ้าจาก 50% มาที่ 100%



ภาพที่ 3-17 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วน
หน้า เมื่อทำการ Step Load



ภาพที่ 3-18 แรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก และ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน เมื่อทำการ ตัดการทำงานของวงจรแปลงผันตัวที่ 1 ที่เวลา 0.3 sec และ ทำการต่อวงจร ที่เวลา 0.4 sec

3.4 สรุป

จากการจำลองการทำงานโดยใช้ Simulink ของ MATLAB พบว่าวงจรที่ทำการออกแบบมีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดี จากการทดสอบโดยวิธี Step Load จากนั้นทำการขนานวงจรแปลงผันจำนวน 3 วงจร เพื่อทดสอบสภาวะการทำงานของวงจรแปลงผัน ด้วยการ Step Load และการตัดการทำงานของวงจรแปลงผัน 1 วงจรเพื่อให้วงจรแปลงผันที่เหลือทำงานแทนพบว่าสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ และมีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดี

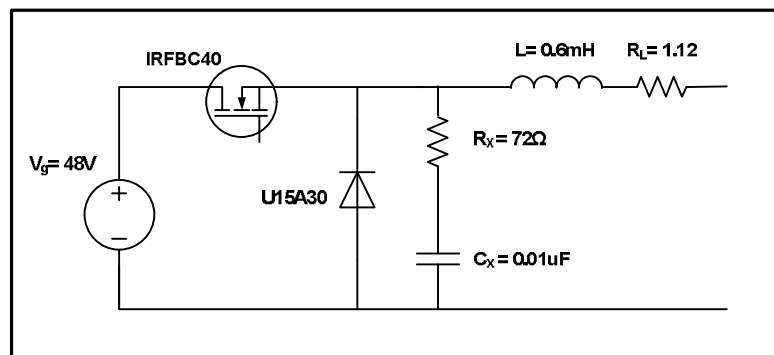
บทที่ 4

การออกแบบสร้างวงจรแปลงผันและระบบควบคุม

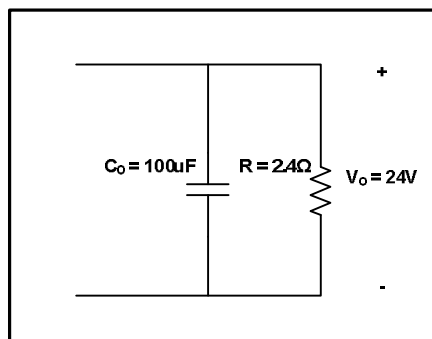
บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสร้างวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค ที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า วงจรควบคุม และวงจรต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย รายละเอียดในการออกแบบแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

4.1 การออกแบบวงจรภาคกำลังและภาคการะ

วงจรที่ใช้ในการออกแบบแสดงดังภาพที่ 4-1 และ 4-2



ภาพที่ 4-1 ภาคกำลังของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค ที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า



ภาพที่ 4-2 ภาคการะของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค ที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า

จากภาพที่ 4-1 วงจรแปลงผันต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟตรงขนาด 48 โวลต์ ภาระของวงจรแปลงผันเป็นตัวต้านทานดังภาพที่ 4-2 โดยวงจรแปลงผันที่นำมาต่อขนานกันจะใช้ ตัวเก็บประจุเพียงชุดเดียว การออกแบบหาอุปกรณ์ต่างๆของวงจรแปลงผันสามารถหาได้ดังนี้

4.1.1 การออกแบบหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำ การหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อใช้กับวงจรแปลงผันสามารถหาได้จากการกำหนดค่าการกระเพื่อมสูงสุดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (Maximum Ripple Current) ซึ่งในที่นี้เราออกแบบโดยให้วงจรแปลงผันทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ซึ่งสมการค่าการกระเพื่อมสูงสุดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำนั้นคือสมการที่ 2-11 นำค่าพิกัดที่ต้องการจากตารางที่ 3-1 มาแทนค่า ได้ดังสมการที่ 4-1 ค่าการกระเพื่อมสูงสุดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (ΔI) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.15A จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.6mH

$$\Delta I = \frac{DV_g(1-D)}{Lf_s} = \frac{0.25 \times 48(1-0.25)}{L \times 100 \times 10^3} \quad (4-1)$$

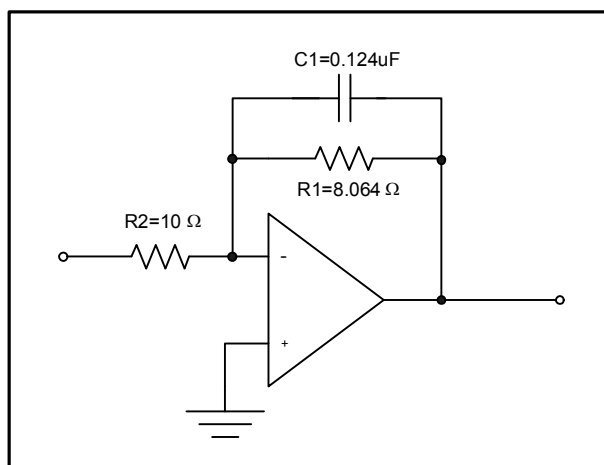
4.1.2 การออกแบบหาค่าของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับภาระ การหาค่าของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับภาระนั้นสามารถหาได้จากการกำหนดค่าการกระเพื่อมสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระ (Maximum Ripple Output Voltage) ซึ่งในที่นี้เราออกแบบโดยให้วงจรแปลงผันทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ซึ่งสมการค่าการกระเพื่อมสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระนั้นคือสมการที่ 2-15 นำค่าพิกัดที่ต้องการจากตารางที่ 3-1 มาแทนค่า ได้ดังสมการที่ 4-2 ค่าการกระเพื่อมสูงสุดของของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภาระ (ΔV_{C_o}) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10mV จะได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 18.75 μF เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 100 μF

$$\Delta V_{C_o} = \frac{V_g D(1-D)}{8LC_0 f_s^2} = \frac{48 \times 0.25(1-0.25)}{8 \times 0.6 \times 10^{-3} \times C_0 \times (100 \times 10^3)^2} \quad (4-2)$$

4.2 การออกแบบวงจรภาคควบคุม

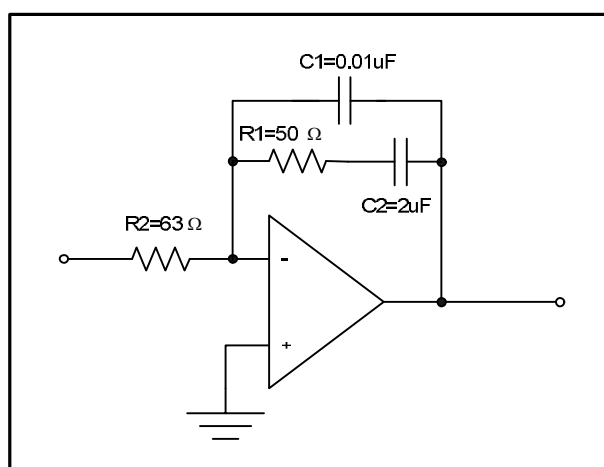
วงจรควบคุมแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ วงจรควบคุมสำหรับรูปแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ และ วงจรควบคุมสำหรับรูปแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบแปลงผัน

4.2.1 วงจรควบคุมสำหรับรูปแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ สามารถออกแบบได้จาก Transfer Function ของสมการที่ 3-18 โดยสามารถแปลงเป็นวงจรควบคุมได้ดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 วงจรควบคุมสำหรับรูปแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

4.2.2 วงจรควบคุมสำหรับรูปแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบแปลงผัน สามารถออกแบบได้จาก Transfer Function ของสมการที่ 3-23 โดยสามารถแปลงเป็นวงจรควบคุมได้ดังภาพที่ 4-3

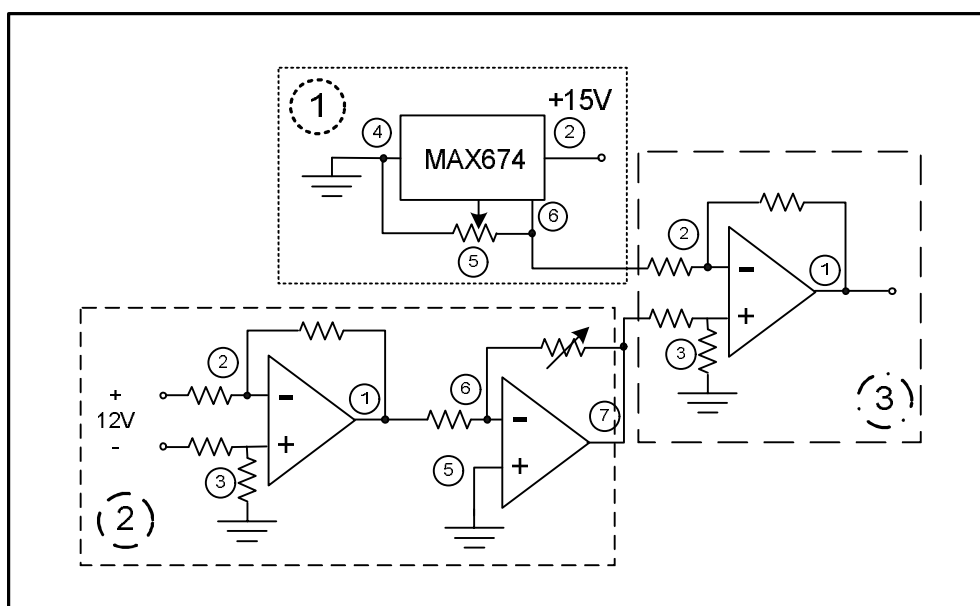


ภาพที่ 4-4 วงจรควบคุมสำหรับรูปแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบแปลงผัน

4.3 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณอ้างอิง วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้กับวงจรควบคุม และ วงจรขับนำสวิตช์

วงจรสร้างสัญญาณอ้างอิง ดังภาพที่ 4-5 วงจรชุดที่ 1 ใช้ ไอซี(IC) เบอร์ MAX674 เป็นตัวสร้างสัญญาณอ้างอิงและใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ทำการลดหรือเพิ่มระดับสัญญาณอ้างอิงให้เป็นไปตามที่ต้องการ วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้กับวงจรควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

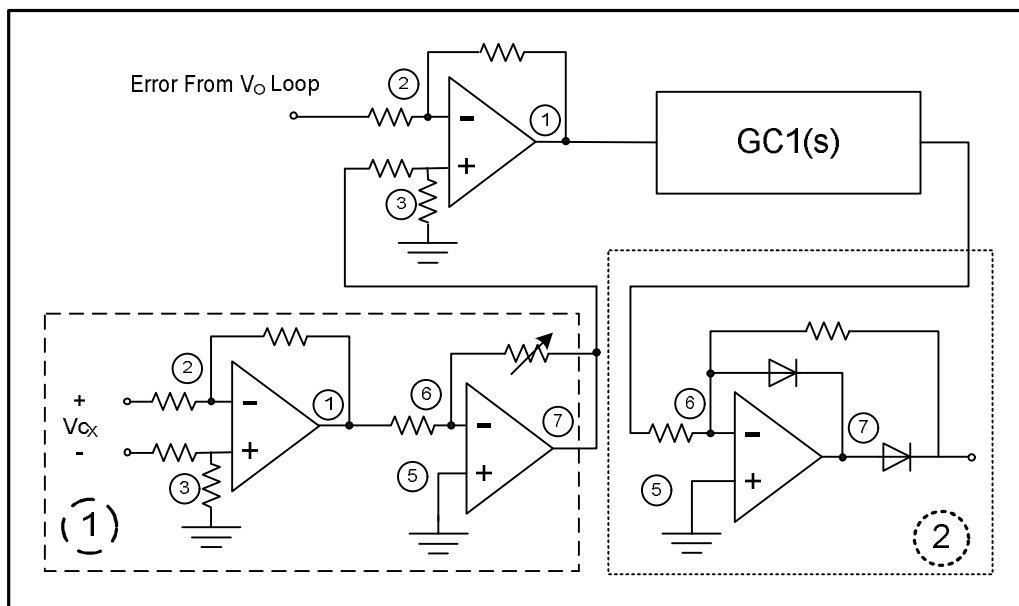
ขาออก ดังภาพที่ 4-5 วงจรชุดที่ 2 จะทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกให้มีความสัมพันธ์กับขนาดแรงดันไฟฟ้าจากวงจรสร้างสัญญาณอ้างอิง จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาเข้าวงจรเปรียบเทียบความต่างของสัญญาณ ดังภาพที่ 4-5 วงจรชุดที่ 3 เพื่อนำสัญญาณไปเข้าวงจรควบคุมในภาพที่ 4-4 ในลำดับต่อไป



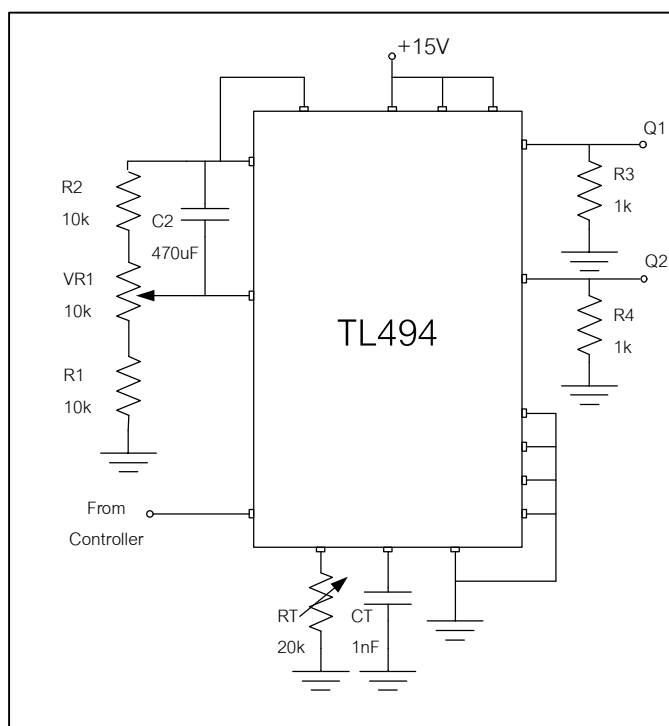
ภาพที่ 4-5 วงจรสร้างสัญญาณอ้างอิง วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้กับวงจรควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้าขาออก

สำหรับลูปแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่ตกร่อมตัวเก็บประจุทำการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่วัดมาจากตัวเก็บประจุให้มีค่าเหมาะสมดังภาพที่ 4-6 วงจรชุดที่ 1 จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของระบบแปลงผันนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าชุดควบคุมของลูปแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่ตกร่อมตัวเก็บประจุนำสัญญาณที่ได้มาเข้าชุดวงจรตัดสัญญาณเฉพาะช่วงบวกดังภาพที่ 4-6 วงจรชุดที่ 2 เพื่อนำไปใช้กับวงจรขับนำสวิตช์เนื่องจากวงจรขับนำสวิตช์ที่ใช้ในงานวิจัยจะทำงานในช่วงสัญญาณที่เป็นบวกเท่านั้น การเลือกค่าตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับค่าความต้านทานของวงจรแปลงผันจะต้องทำการเลือกค่าที่ทำให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าที่ตกร่อมตัวเก็บประจุยังคงไหลต่อเนื่อง จะได้ค่าดังตารางที่ 3-1

$$\tau = R_X C_X \quad (4-3)$$



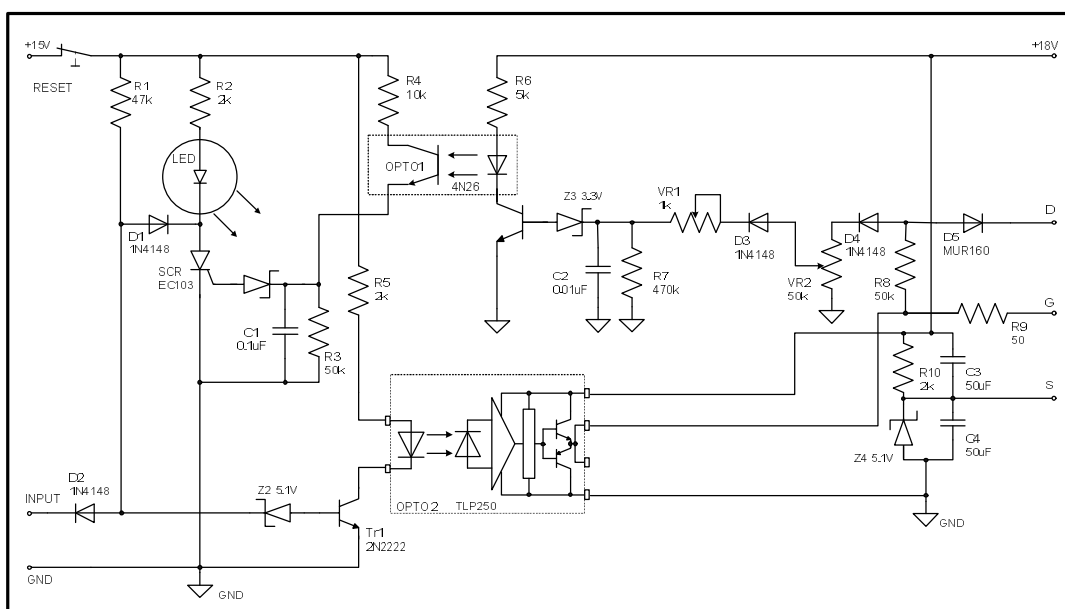
ภาพที่ 4-6 วงจรปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้กับวงจรควบคุมรูปแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าและ วงจรตัดสัญญาณเฉพาะช่วงบวกเพื่อนำไปใช้กับวงจรขับนำสวิตช์



ภาพที่ 4-7 วงจรขับนำสวิตช์

วงจรขับนำสวิตช์นั้นจะใช้เป็นแบบความถี่คงที่ 100 kHz โดยใช้ ไอซีเบอร์ TL494 ดังภาพที่ 4-7 โดยจะรับสัญญาณมาจากวงจรควบคุม ดังภาพที่ 4-6 ซึ่งสัญญาณที่จะนำไปขับสวิตช์จะนำไปผ่านวงจรในภาพที่ 4-8 ซึ่งจะทำหน้าที่แยกกราวด์ทางไฟฟ้าภาคกำลังกับภาคควบคุมและขยายสัญญาณที่ใช้ขับสวิตช์ของวงจรแปลงผัน ซึ่งวงจรขับนำสวิตช์ จะสามารถออกแบบความถี่ของสัญญาณฟันเลื่อยได้จากสมการ ที่ 4-3

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T \times C_T} \quad (4-3)$$



ภาพที่ 4-8 วงจรแยกกราวด์ทางไฟฟ้าภาคกำลังกับภาคควบคุมและขยายสัญญาณสำหรับนำไปขับสวิตช์

4.4 สรุป

การออกแบบวงจรสร้างแปลงผันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบสร้างโดยอ้างอิงจากแบบจำลองการทำงานในบทที่ 4 โดยผลที่ได้จากการทดลองการทำงานแสดงในบทที่ 5 ผลการทดลองการทำงาน

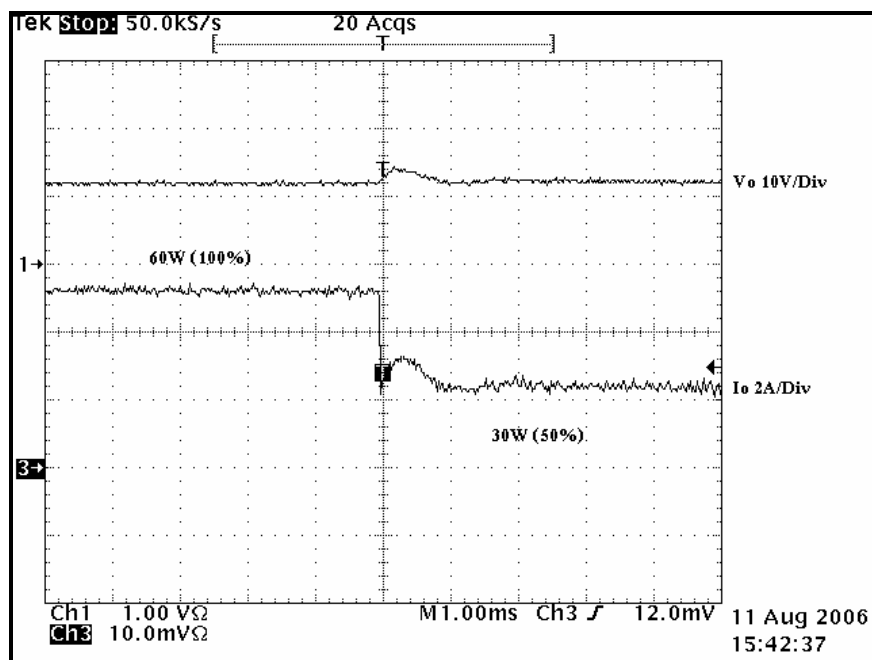
บทที่ 5

ผลการทดสอบวงจรแปลงผัน

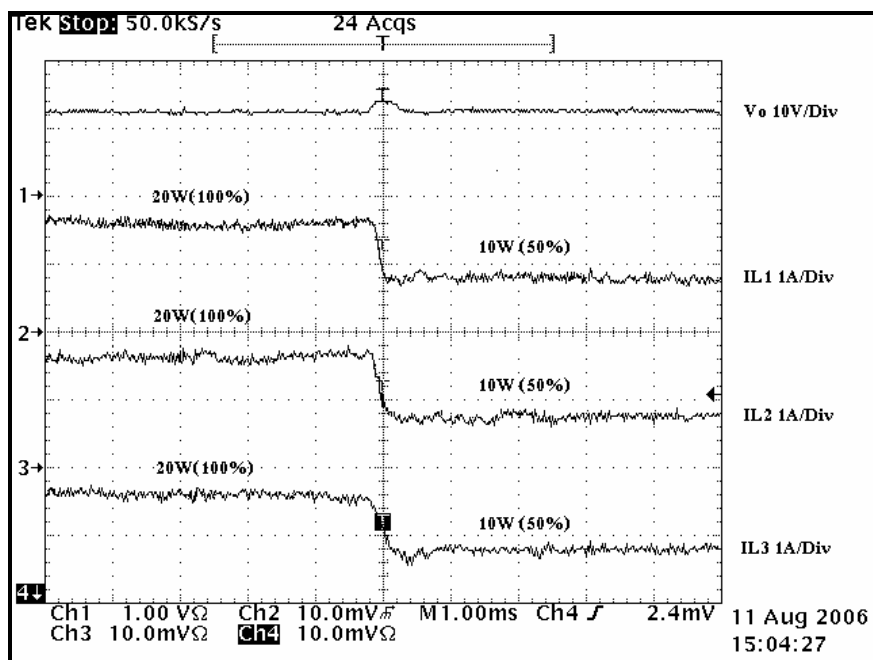
บทนี้จะแสดงผลการทดสอบวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค ที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า การทดสอบนี้จะใช้ดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope) ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 420A ในการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ โดยทำการทดสอบเพื่อดูผลการทำงานของวงจรแปลงผันให้เป็นตามจุดประสงค์ และเพื่อดูผลตอบสนองทางพลวัตของวงจรแปลงผัน ด้วยวิธีลดและเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าขาออก และ วิธีตัดวงจรแปลงผันย่อยบางวงจรออกจากระบบแปลงผัน รายละเอียดในการทดสอบแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

5.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันด้วยการเพิ่มและลดระดับกำลังไฟฟ้า

5.1.1 การทดสอบโดยการลดระดับกำลังไฟฟ้าจาก 60W(100%) เป็น 30W(50%)

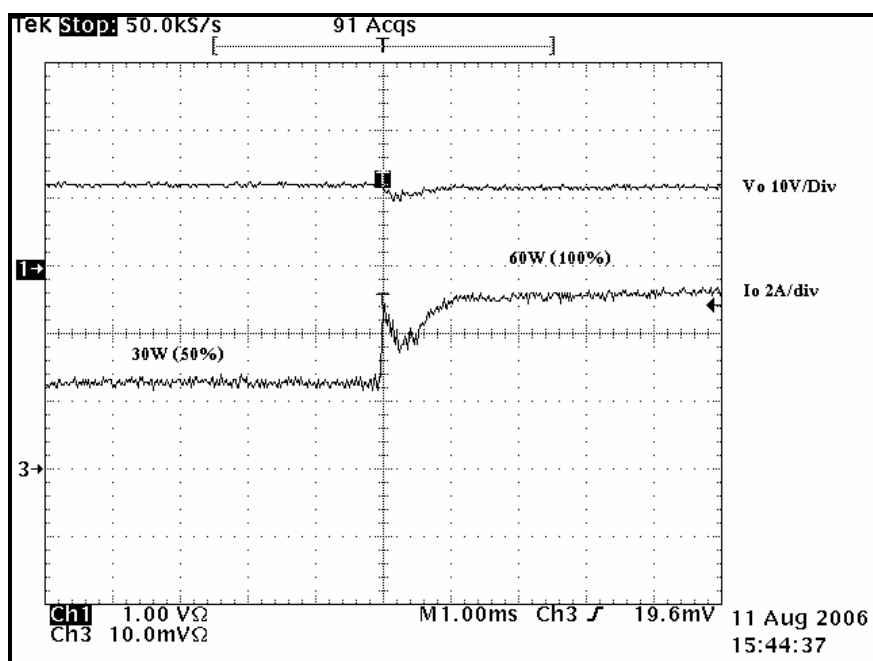


ภาพที่ 5-1 แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าขาออกเมื่อทำการลดระดับกำลังไฟฟ้า

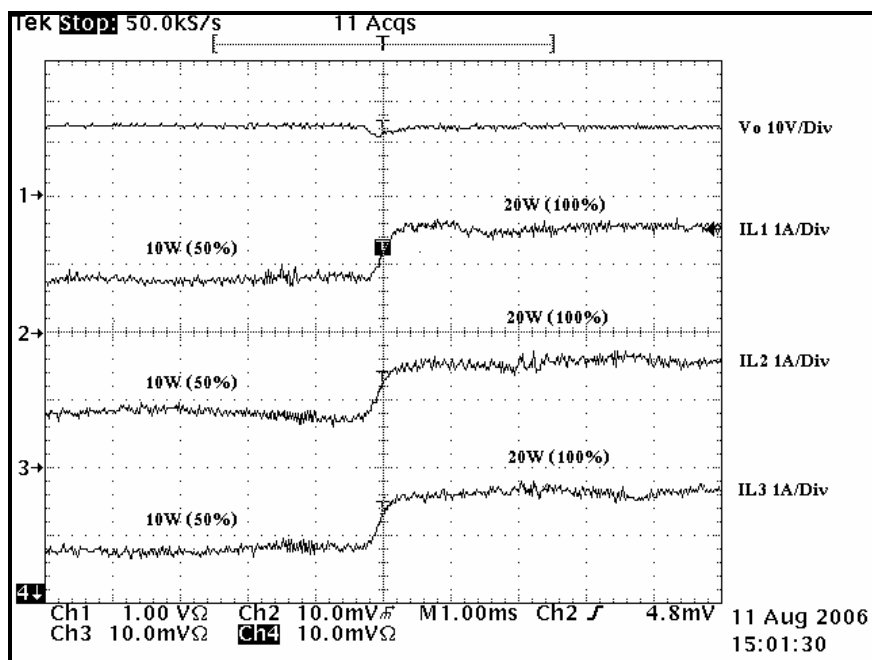


ภาพที่ 5-2 แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
ขั้วเมื่อทำการลดระดับกำลังไฟฟ้า

5.1.2 การทดสอบโดยการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าจาก 60W(100%) เป็น 30W(50%)



ภาพที่ 5-3 แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าขาออกเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า

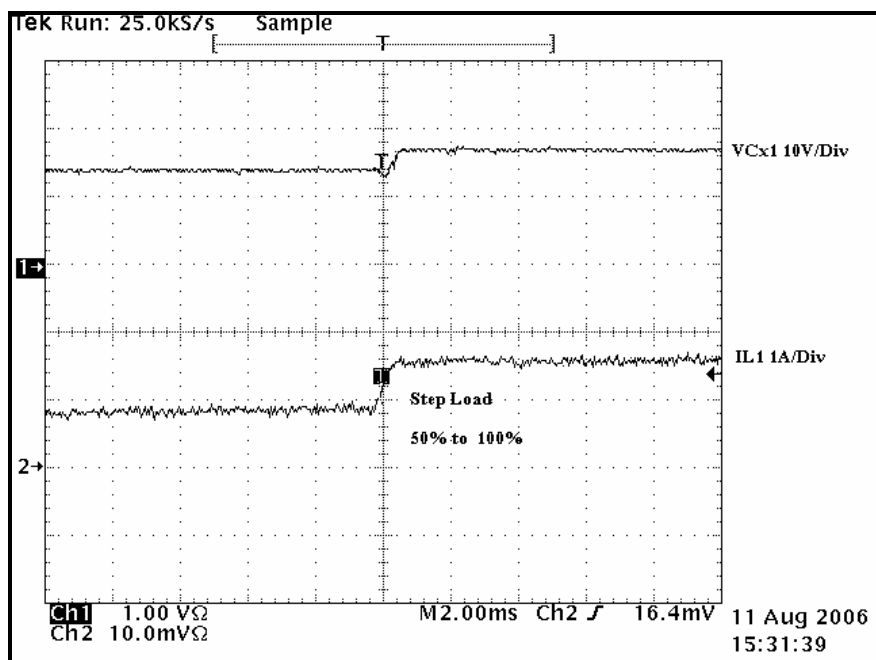


ภาพที่ 5-4 แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผัน
ย่อยเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า

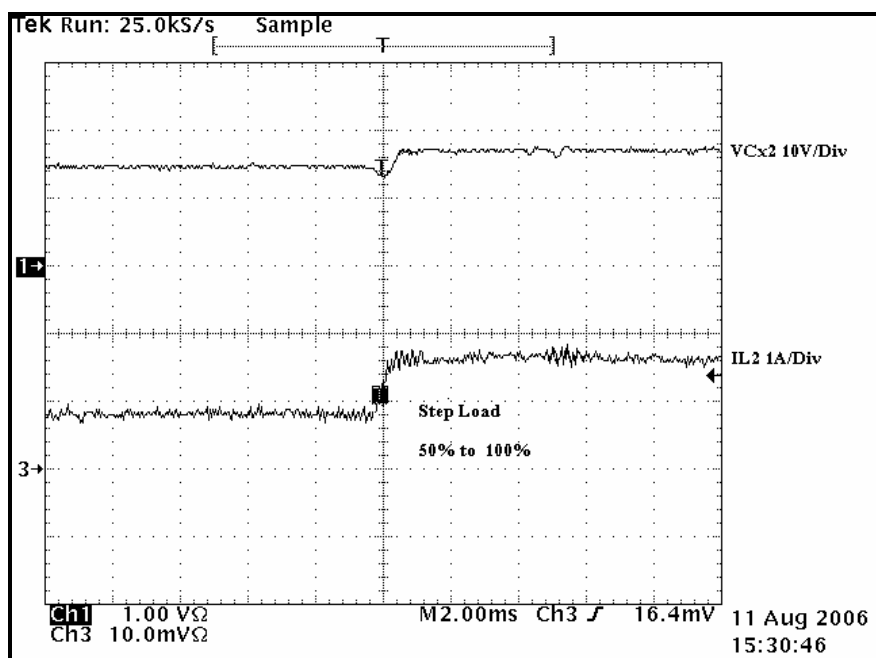
จากผลการทดสอบวงจรแปลงผันดังภาพที่ 5-1 ถึง 5-4 พบว่า วงจรแปลงผันที่ทำการออกแบบสร้างสามารถใช้งานได้ตามจุดประสงค์เมื่อทำการเพิ่ม และ ลดระดับกำลังไฟฟ้า คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าขาออก และกระแสไฟฟ้าขาออก ได้ค่าตามจุดประสงค์ ผลตอบสนองทางพลวัตของวงจรแปลงผัน วงจรแปลงผันจะเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยใช้เวลาประมาณ 1ms ทั้งการเพิ่มและลดระดับกำลังไฟฟ้า เทคนิคการออกแบบวงจรควบคุมที่ออกแบบสร้างสามารถใช้งานได้ตามจุดประสงค์คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าใกล้เคียงกันดังภาพที่ 5-2 และ 5-4

5.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

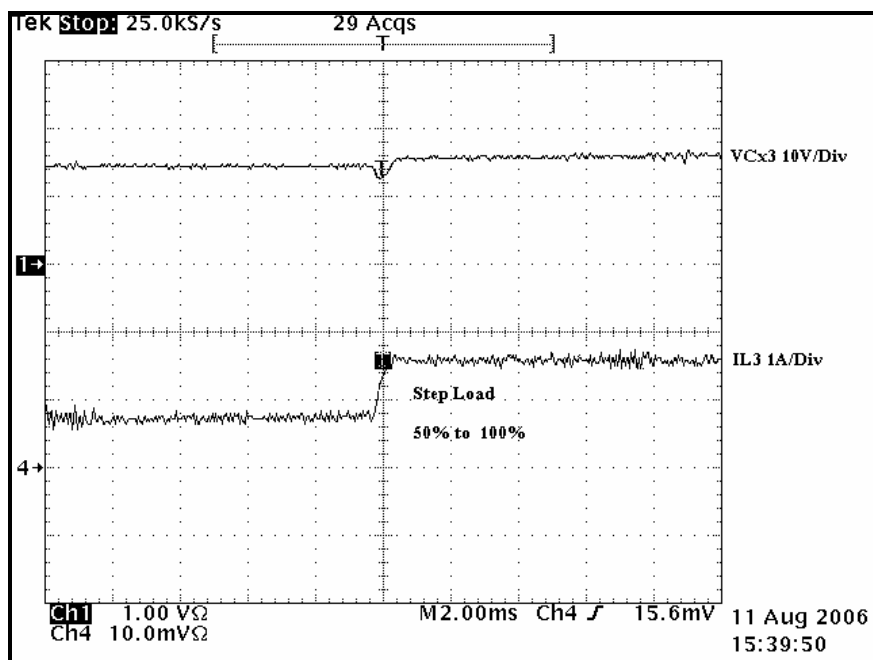
ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันย่อยทั้ง 3 วงจรแสดงดังภาพที่ 5-5 ถึง 5-7 โดยเป็นสภาวะที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าออกจาก 50% มาที่ 100%



ภาพที่ 5-5 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันย่อยที่ 1 เมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า



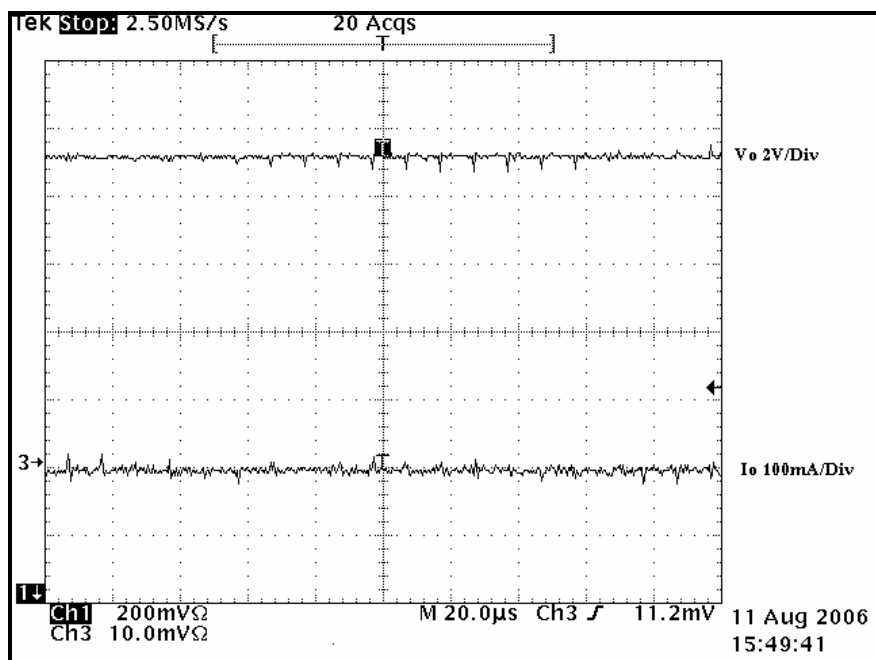
ภาพที่ 5-6 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันย่อยที่ 2 เมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า



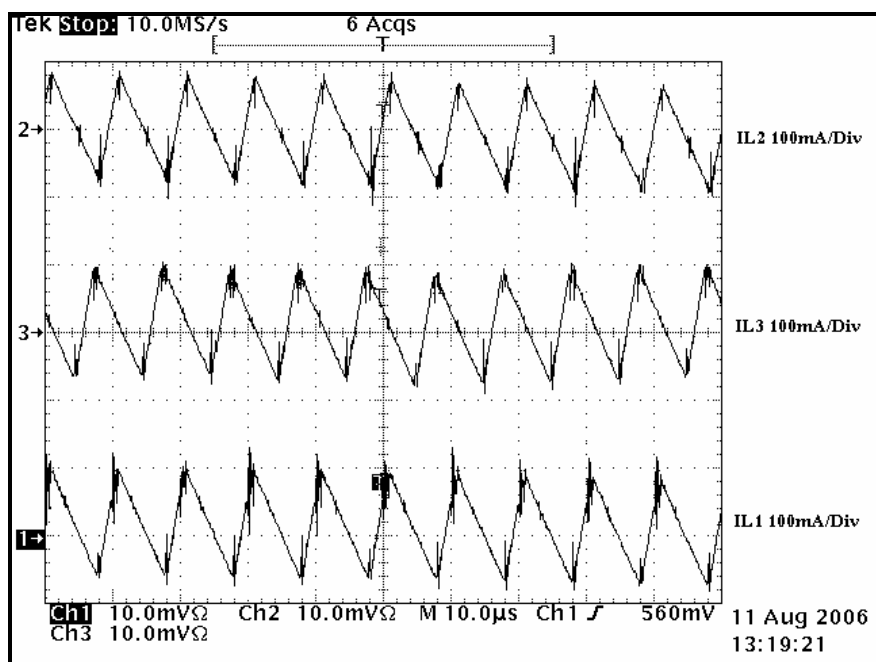
ภาพที่ 5-7 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้ากับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันย่อยที่ 3 เมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้า

5.3 ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าขาออก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผัน

ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าขาออกนั้นเป็นผลมาจากการเลือกค่าตัวเก็บประจุที่ต่อคร่อมกับภาระของวงจรแปลงผันส่วนค่าการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำนั้นเป็นผลมาจากการเลือกขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรแปลงผัน ดังที่อธิบายในบทที่ 2 ซึ่งผลที่ได้จะแสดงในภาพที่ 5-8 และ 5-9 ตามลำดับ



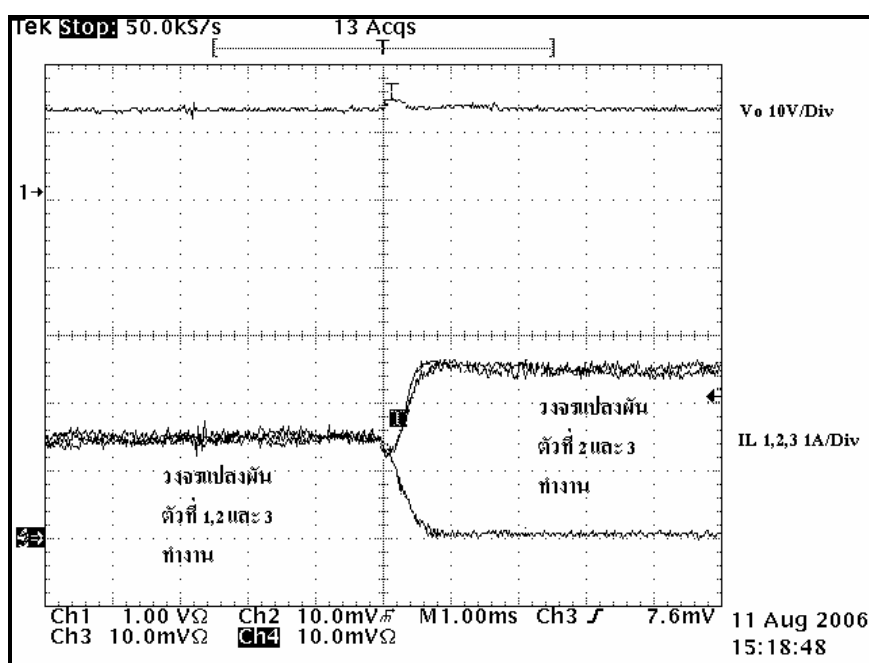
ภาพที่ 5-8 ค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าขาออก และกระแสไฟฟ้าขาออก



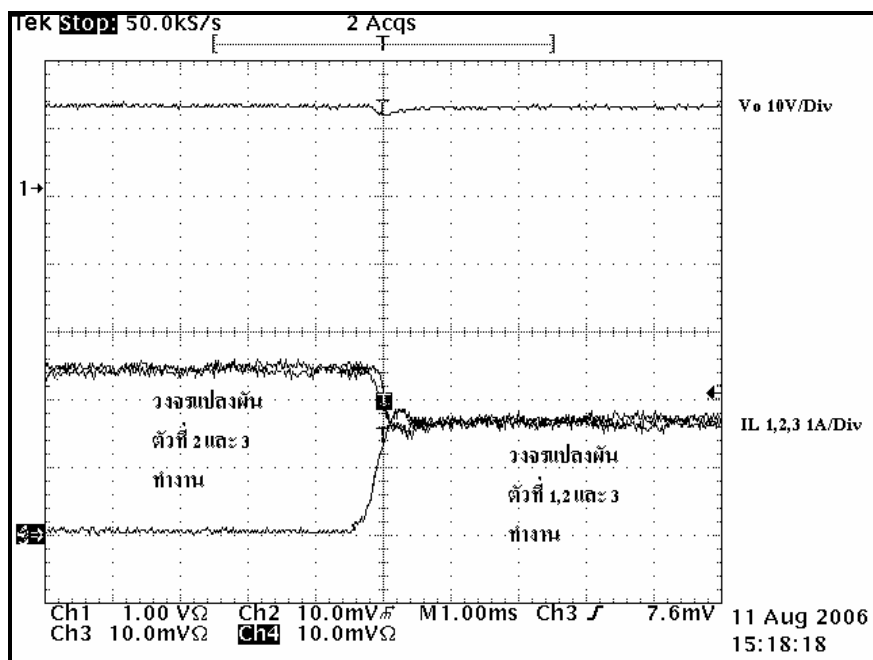
ภาพที่ 5-9 ค่าการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

5.4 ทดสอบการตัดวงจรแปลงผันย่อยของระบบแปลงผัน

การตัดวงจรย่อยของระบบแปลงผันเพื่อแสดงให้เห็นว่าเมื่อวงจรแปลงผันย่อยบางวงจรของระบบแปลงผันไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ระบบแปลงผันจะยังสามารถทำงานได้ที่วงจรแปลงผันย่อยที่เหลือจะต้องมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำในปริมาณที่เท่ากัน ดังภาพที่ 5-10 จะเป็นสภาวะการทำงานที่วงจรแปลงผันตัวที่ 1 ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ทำให้วงจรแปลงผันตัวที่ 2 และ 3 ต้องทำจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระของระบบแปลงผันแทนและภาพที่ 5-11 จะเป็นสภาวะการทำงานที่วงจรแปลงผันตัวที่ 1 สามารถใช้งานได้ตามปรกติวงจรแปลงผันตัวที่ 2 และ 3 ก็จะลดการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระของระบบ



ภาพที่ 5-10 ทำการตัดวงจรย่อยที่ 1 ของระบบแปลงผัน



ภาพที่ 5-11 ทำการต่อวงจรย่อยที่ 1 ของระบบแปลงผัน

5.5 สรุป

จากผลการทดลอง วงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัค ที่ใช้วิธีควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ด้วยเทคนิคการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้า ที่ทำการออกแบบสร้างสามารถใช้งานได้ตามจุดประสงค์ คือ ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกและสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ อีกทั้งวงจรแปลงผันย่อยแต่ละวงจรยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกัน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษา ค้นคว้า ออกแบบ สร้างและทดสอบ การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรแปลงผันย่อยของระบบแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคให้มีขนาดเท่ากันโดยประยุกต์ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคเพื่อใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเทคนิคนี้จะช่วยลดขนาดและราคาของวงจรแปลงผันเนื่องจากไม่ต้องใช้อุปกรณ์ ควบคุมกระแสอีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนการสร้างวงจรแปลงผันซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์มากในภาคอุตสาหกรรม

ซึ่งเป้าหมายของงานวิจัยนี้ต้องการให้วงจรแปลงผันย่อยที่นำมาต่อขนานกันจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เท่ากัน โดยสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกและระดับกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันย่อยแต่ละวงจร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าด้านขาออกแบบทันทีทันใด และเมื่อมีวงจรแปลงผันตัวใดตัวหนึ่งเสียหายระบบแปลงผันก็จะต้องสามารถทำงานต่อไปได้โดยเงื่อนไขของการแบ่งกระแสไฟฟ้าให้วงจรแปลงผันย่อยแต่ละวงจรเช่นเดิม วงจรมีการตอบสนองทางพลวัตที่ดี

การทดสอบการทำงานของระบบแปลงผันที่สร้างขึ้นได้ผลสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานโดยสามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงภาระแบบทันทีทันใดได้ดี และสามารถควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าขาออกได้คงที่ อีกทั้งวงจรแปลงผันย่อยแต่ละวงจรยังสามารถแบ่งกระแสไฟฟ้าขนาดเท่ากัน

6.2 ข้อดีของระบบแปลงผันที่ใช้วิธีควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยการวัดแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผัน

6.2.1 วงจรแปลงผันย่อยแต่ละวงจรที่นำมาต่อขนานกันสามารถแบ่งกระแสไฟฟ้าได้เท่ากันตามจุดประสงค์

6.2.2 ระบบแปลงผันสามารถจ่ายระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกได้ค่าที่ต้องการ

6.2.3 ระบบแปลงผันมีการตอบสนองทางพลวัตที่ดี

6.2.4 การใช้เทคนิคการออกแบบชุดควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยสามารถใช้งานได้ตามจุดประสงค์ และวงจรควบคุมเนื่องจากไม่ต้องใช้อุปกรณ์วัดกระแสทำให้มีราคาถูกและมีขนาดเล็ก

6.2.5 เมื่อระบบแปลงผันมีวงจรแปลงผันย่อยตัวใดตัวหนึ่งเสียหายระบบยังคงทำงานได้ปกติ

6.3 ข้อเสียของระบบแปลงผันที่ใช้วิธีควบคุมกระแสไฟฟ้าด้วยการวัดแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผัน

6.3.1 เนื่องจากการใช้การควบคุมแบบที่มีหลักการคล้าย Master-Slave ถ้าวงจรควบคุมแบบ Master เสียหายจะทำให้วงจรแปลงผันไม่สามารถใช้งานได้

6.3.2 เนื่องจากขั้นตอนการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงผลของความต้านทานภายในที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความร้อนทำให้ในกรณีที่ระบบแปลงจ่ายกำลังฟ้าจนเกิดความร้อนสะสมจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายจากวงจรแปลงผันย่อยมีค่าไม่เท่ากัน

6.3.3 เทคนิคการออกแบบวงจรควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยเหมาะสมกับวงจรแปลงผันที่จ่ายกำลังให้ภาระแบบคงที่ กรณีที่ต้องนำวงจรแปลงผันมาใช้งานแบบ Light Load หรือแบบ Open Load จะทำให้วงจรแปลงผันไม่สามารถแบ่งกระแสได้เท่ากันเนื่องจากความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำกับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะไม่เป็นไปตามที่ออกแบบ

6.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 เพื่อให้วงจรแปลงผันมีเสถียรภาพที่ดีขึ้นควรมีการออกแบบระบบควบคุมที่คิดถึงผลของความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

6.4.2 ควรมีการออกแบบตัวควบคุมสำรองที่จะสามารถทำงานแทนตัวควบคุมหลักกรณีตัวควบคุมหลักเสียหาย

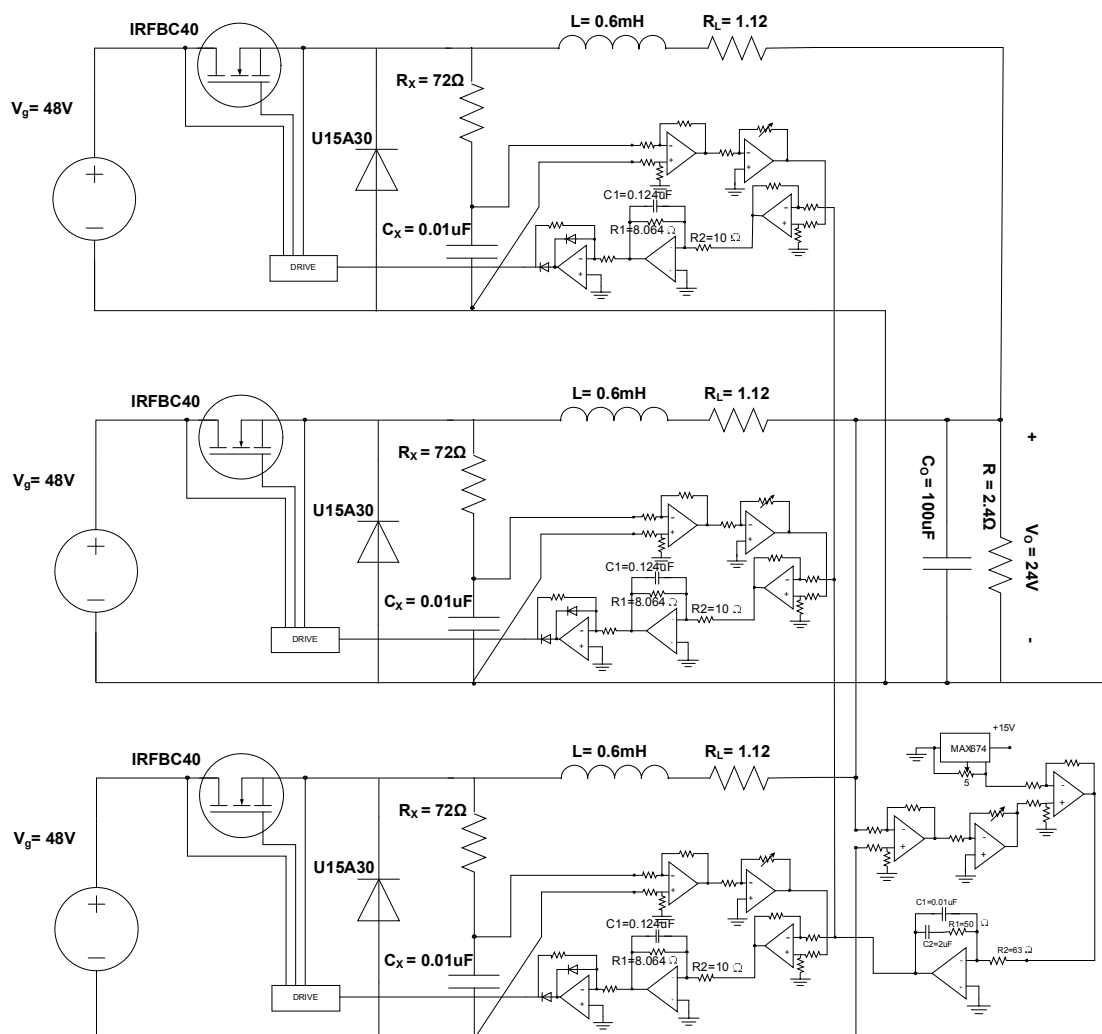
6.4.3 ควรมีการออกแบบวงจรควบคุมหรือวงจรป้องกันกรณีต้องนำวงจรแปลงผันไปทำงานที่สถานะ Light Load หรือ Open Load

เอกสารอ้างอิง

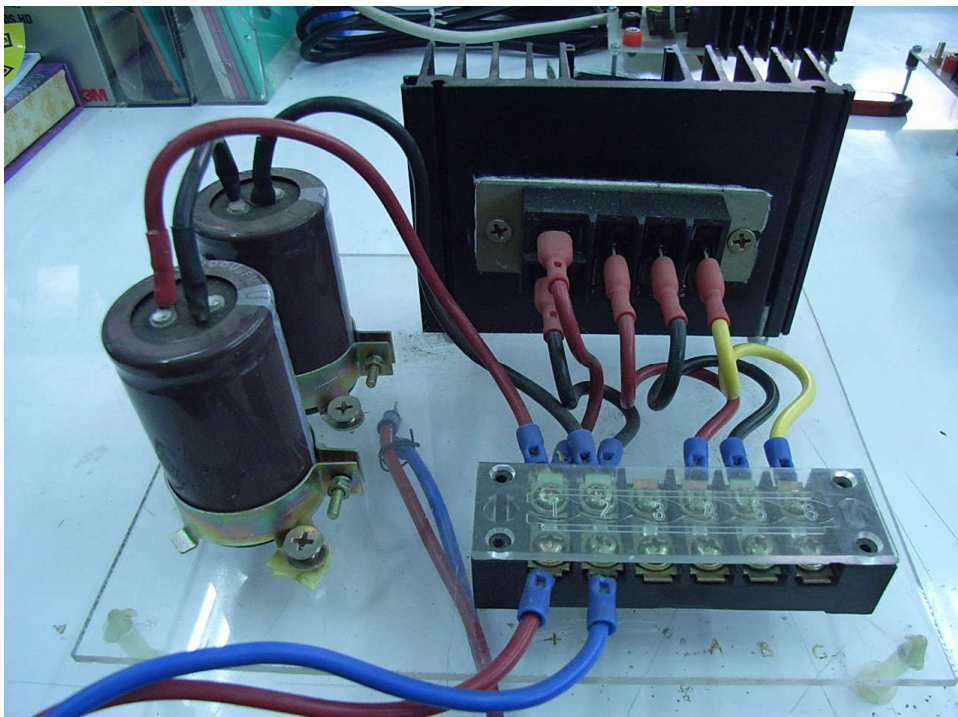
1. Constance C, Heath “The Market for Distributed Power System”, IEEE Transactions on power electronic, 1991
2. Z.Moussaoui, I. Batarseh “An Overview of The Control Scheme for Distributed Power Systems” NASA Florida Space Grant Consortium-Research Program, 1995
3. Joseph Thottuvelil and George C. Verghese “Stability analysis of paralleled DC_DC converters with active current sharing” IEEE Transactions on power electronic, 2001
4. Lee, F. C. “A Novel Current-Sharing Control Technique for Low-Voltage High Current Voltage Regulator Module Applications” IEEE Transactions on power electronic 15, (November 2000)
5. กิติพงษ์ จุลโลบล อุเทน คำน่าน และ วิบูลย์ ชื่นแขก “การประยุกต์ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุส่วนหน้าของวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบักเพื่อใช้ควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 28
6. Ang, Simon S. Power-switching converters. Imprint New York : Marcel Dekker, 1995
7. Ned Mohan, Tore M. Underland and William P. Robbins .Power Electronics Converter, Applications and Design. 2nd ed. New York, NY : John Wiley & Sons, Inc. 1995.
8. อุเทน คำน่าน และ วิบูลย์ ชื่นแขก “การขนานเครื่องแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรงแบบแบบบักโดยใช้เทคนิคการควบคุมสมดุลกำลังไฟฟ้า” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 27 หน้า 353-356
9. สุวัฒน์ แซ่ตัน. เทคนิคและการออกแบบสวิตซ์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: เอนเทลไทย, 2538.
10. Robert W. Erickson and Dragon Maksimovic. Fundamental of Power Electronic Converter, Applications, and Design. 2nd ed. New York, NY :John Wiley & Sons, Inc. 1995

ภาคผนวก ก

วงจรที่ใช้ในการทดลอง



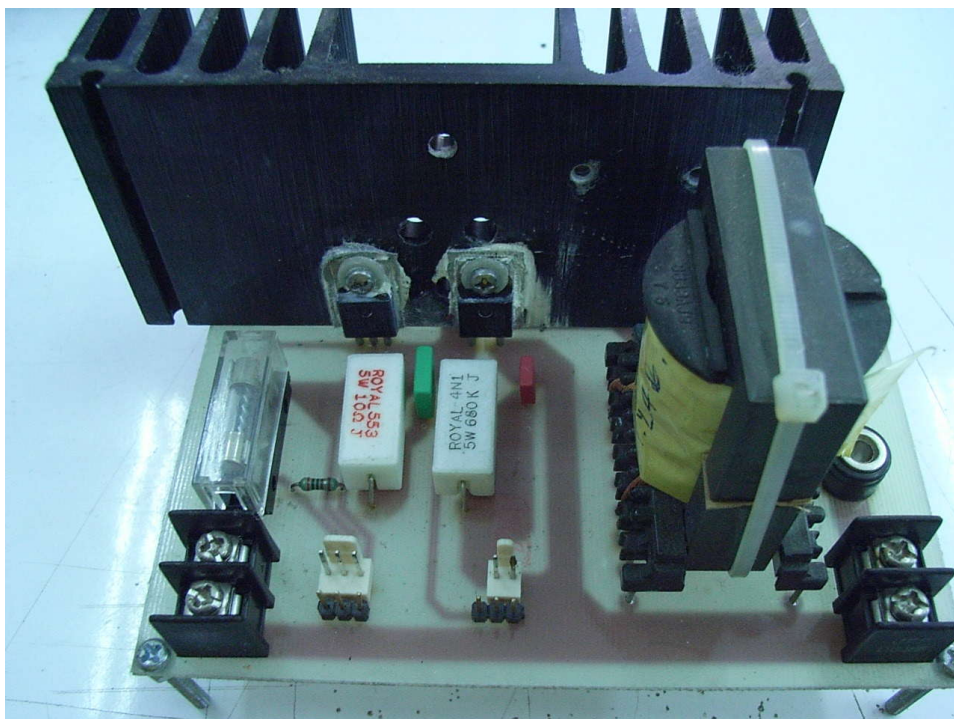
ภาพที่ ก-1 วงจรแปลงผันที่ใช้ในการทดลอง



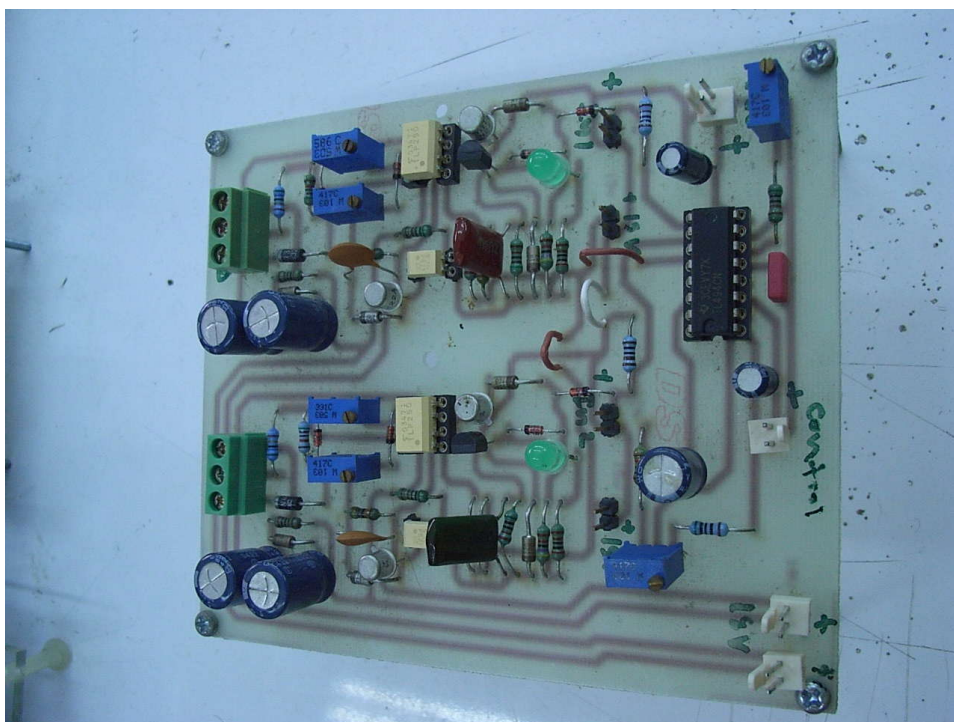
ภาพที่ ก-2 วงจรจ่ายกำลังด้านขาเข้า



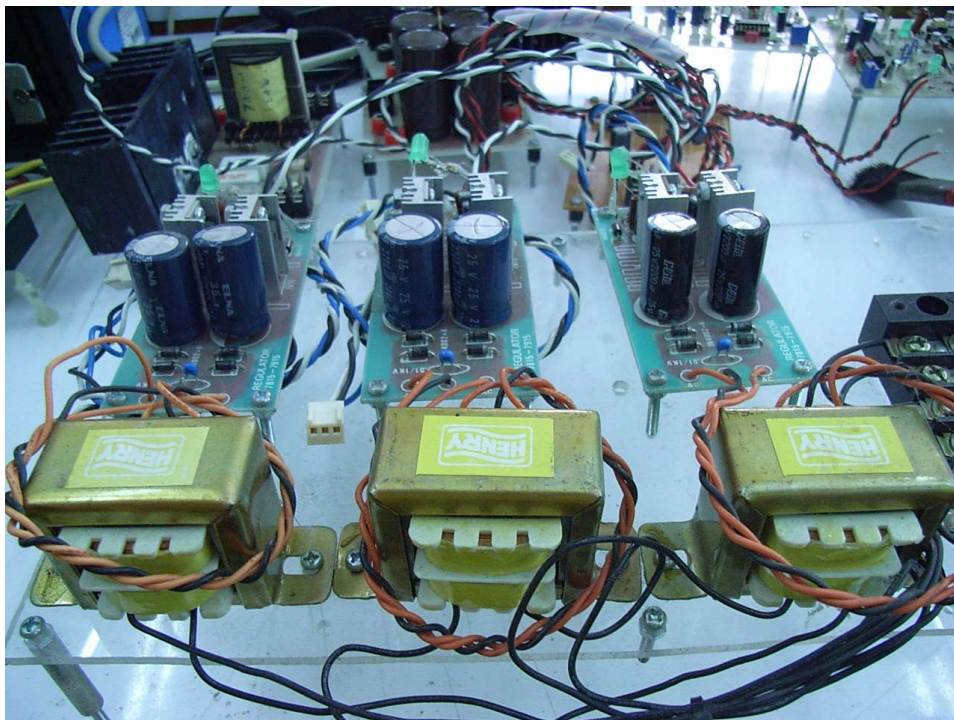
ภาพที่ ก-3 ตัวเก็บประจุที่กรองแรงดันไฟฟ้าขาเข้า



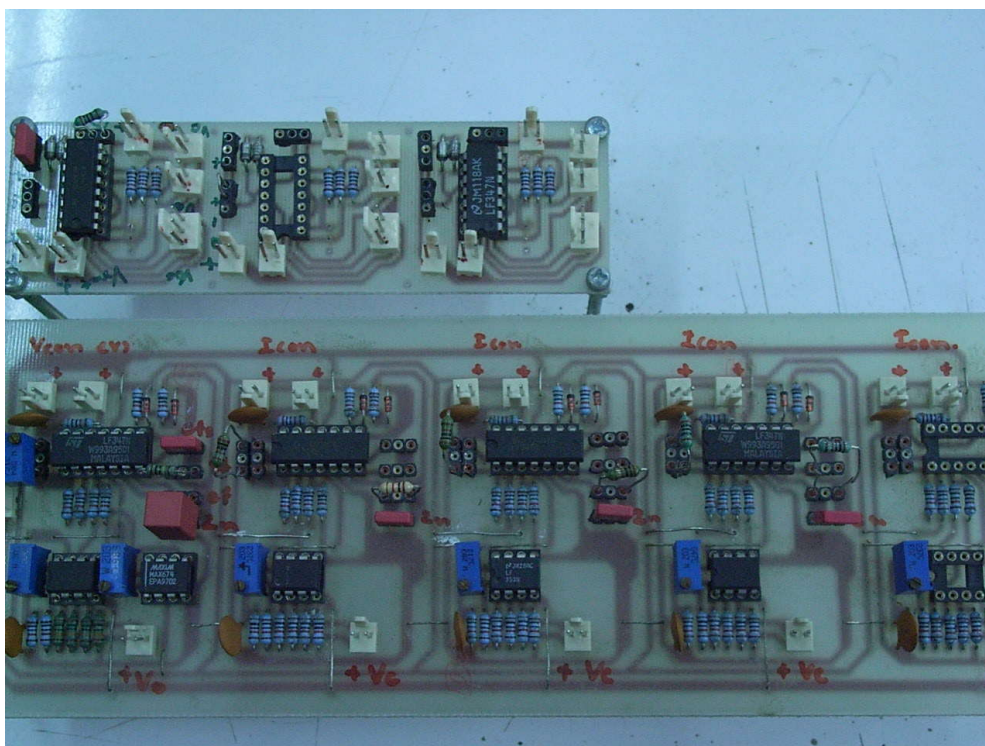
ภาพที่ ก-4 วงจรภาคกำลัง



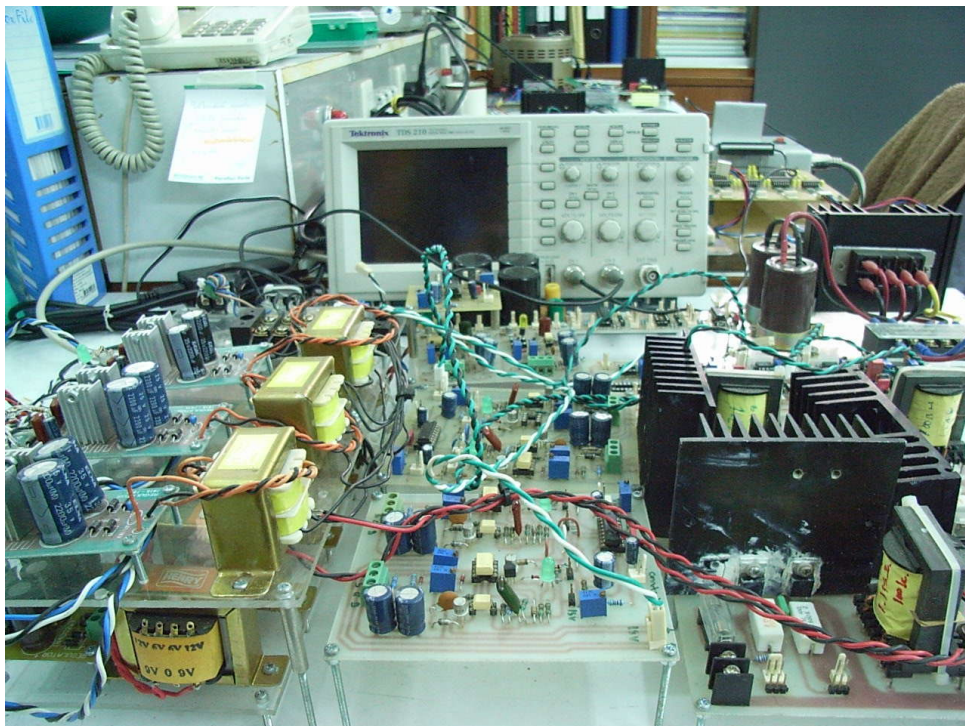
ภาพที่ ก-5 วงจรแยกกราวด์ทางไฟฟ้า



ภาพที่ ก-6 วงจรจ่ายไฟเลี้ยง



ภาพที่ ก-7 วงจรควบคุม



ภาพที่ ก-8 วงจรรวมที่ใช้ในการทดลอง

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายกิตติพงษ์ จุลโบล
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์และออกแบบการขนานวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงแบบบัคด้วยเทคนิค
 การควบคุมกระแสในแต่ละวงจรให้มีค่าเท่ากันบนหลักการสมดุลกำลังไฟฟ้า
 สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ.2522 ที่กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขา
 วิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ. 2544 จากนั้นเข้า
 ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปีการศึกษา 2545

ประวัติการทำงาน ปัจจุบันทำงานที่ บริษัท ทีโอที จำกัด(มหาชน) ตำแหน่งวิศวกร 4

สถานที่ติดต่อ บริษัท.ทีโอที จำกัด(มหาชน) 89/2 หมู่ 3 ถนนแจ้งวัฒนะ เขตหลักสี่

กรุงเทพมหานคร 10210 Email : j_kitipong@yahoo.com