



การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟอว์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว  
DESIGN OF A TWO-SWITCH FORWARD CONVERTER



ปฏิญานិพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN OF A TWO - SWITCH FORWARD CONVERTER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BALCHALOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

ผู้จัดทำ

1. นายทศพร เกิดผล
2. นายปริญญา มณีชมภู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

ทศพร เกิดผล

ปริญญา มณีชมภู

ดร.ชรินทร์ บุญลักษณานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว โดยกล่าวถึงหลักการการทำงานของวงจร การออกแบบวงจร และการพัฒนาวงจรต้นแบบ ในส่วนของการทดลองจะแสดงผลการวัดประสิทธิภาพ และการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรต้นแบบ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันที่ใช้วงจรชดเชยป้อนกลับแบบพีไอและแบบลีด-แล็ก

## ABSTRACT

This thesis presents design of a two-switch forward converter. Converter's principle of operation, circuit design, and prototype development are described. Test results on efficiency and output voltage regulation of the prototype converter are reported. Moreover, output voltage regulation characteristics under the Proportional-plus-Integral (PI) and Lead-Lag compensation schemes are studied and compared.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	
สารบัญ.....	
สารบัญตาราง.....	
สารบัญรูป.....	
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบข่ายการทำงาน.....	2
บทที่ 2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์.....	3
2.1 วงจรภาคกำลัง.....	3
2.1.1 วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 1 ตัว.....	3
2.1.2 วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว.....	4
2.2 วงจรพีดับบลิวเอ็ม.....	5
2.3 วงจรชดเชย.....	6
2.3.1 วงจรชดเชยแบบพีไอ (PI compensation circuit).....	7
2.3.2 วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร (two-pole two-zero compensation circuit).....	9
2.4 คุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ.....	10
2.4.1 เสถียรภาพ.....	12
2.4.2 การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต.....	13
2.4.3 ความเร็วในการตอบสนอง.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี.....	14
2.5 การออกแบบวงจรชดเชย.....	15
2.5.1 การออกแบบวงจรชดเชยแบบพีไอ.....	16
2.5.2 การออกแบบวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร.....	16
<b>บทที่ 3 การออกแบบสร้างวงจรรักษากำลังของวงจรแปลงผันแรงดัน</b>	
แบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว.....	18
3.1 การออกแบบสร้างวงจรรักษากำลัง.....	18
3.2 การออกแบบสร้างวงจรพีคดับลิแวม.....	28
3.3 การออกแบบสร้างวงจรขั้วเกิดของมอสเฟตกำลัง.....	30
<b>บทที่ 4 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบ</b>	
ฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว.....	32
4.1 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบพีไอ.....	32
4.1.1 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบพีไอก่อนการปรับปรุง.....	32
4.1.2 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบพีไอหลังการปรับปรุง.....	36
4.2 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร.....	39
4.2.1 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรก่อนการปรับปรุง.....	39
4.2.2 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรหลังการปรับปรุง.....	43
<b>บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....</b>	<b>48</b>
5.1 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต.....	48
5.1.1 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร แปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจร ชดเชยแบบ PI.....	48
5.1.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้ วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การทดสอบการรักษาระดับแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจร แปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อมีการปรับ ปรุวงจรชดเชย.....	50
5.2 การทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด.....	52
5.2.1 การทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว เมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI.....	52
5.2.2 การทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว เมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ สอง โพลสองซีโร.....	54
5.2.3 การทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว เมื่อใช้มีการปรับปรุวงจรชดเชย.....	54
5.3 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด.....	57
5.3.1 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบ ฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบPI.....	57
5.3.2 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์ เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโร.....	59
5.3.3 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อมีการปรับปรุวงจรชดเชย.....	59
5.4 สรุปการรักษาระดับแรงดัน ไฟฟ้าและการตอบสนองต่อการ เปลี่ยนแปลงของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่สร้างขึ้น.....	62
5.4.1 รักษาระดับแรงดัน ไฟฟ้า.....	62
บทที่ 6 วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก โปรแกรม MATLAB .....

กิตติกรรมประกาศ.....

เอกสารอ้างอิง.....



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ผลการวัดระดับแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์คที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI .....	49
5.2 ผลการวัดระดับแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์คที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร.....	50
5.3 ค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบ PI เมื่อมีการปรับปรุงวงจรชดเชยโดยการเพิ่มอัตราขยาย	
5.4 ค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบ PI เมื่อมีการปรับปรุงวงจรชดเชยโดยการเพิ่มอัตราขยาย.....	51
ค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรเมื่อมีการปรับปรุงวงจรชดเชยโดยออกแบบให้ตำแหน่งความถี่ซีโรตัวที่สอง ( $\omega_{zc2}$ ) ของวงจรชดเชยมีตำแหน่งตรงกับตำแหน่งความถี่โพลตัวที่สอง ( $\omega_{pc2}$ ) ของวงจรภาคกำลัง.....	51
5.5 ผลการวัดระดับแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์คที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI โดยเพิ่มอัตราขยาย = 0.33.....	51
5.6 ผลการวัดระดับแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์คที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI โดยเพิ่มอัตราขยาย = 0.66.....	52
5.7 ผลการวัดระดับแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์คที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อออกแบบให้ตำแหน่งความถี่ซีโรตัวที่สอง ( $\omega_{z2}$ ) ของวงจรชดเชยมีตำแหน่งตรงกับตำแหน่งความถี่โพลตัวที่สอง ( $\omega_{p2}$ ) ของวงจรภาคกำลัง.....	52
5.8 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์คที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI (original).....	58
5.9 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์คที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร (original).....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.10 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบPI โดยเพิ่มอัตราขยาย จาก 0.1833 ไปเป็น 0.33.....	60
5.11 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบPI โดยเพิ่มอัตราขยายจาก 0.183 ไปเป็น 0.66.....	60
5.12 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อออกแบบให้ตำแหน่งความถี่ซีโรตัวที่สอง ( $\omega_{ZC2}$ ) ของวงจรชดเชยมีตำแหน่งตรงกับตำแหน่งความถี่โพลตัวที่สอง ( $\omega_{P2}$ ) ของวงจรภาคกำลัง.....	61
5.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดัน แบบฟอร์เวิร์ด.....	62
5.14 แสดงค่าการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดของวงจรแปลงผัน แรงดันแบบฟอร์เวิร์ดเมื่อกระแสไฟฟ้าที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่าง รวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วงจรแปลงผันแรงดันแบบบัค..... 3
2.2	วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 1 ตัว..... 3
2.3	วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว..... 4
2.4	วงจรพีดับบลิวเอ็ม (ก) รูปวงจร (ข) รูปคลื่นสัญญาณ .....6
2.5	วงจรชดเชยที่สร้างด้วยตัวขยายความผิดพลาด.....7
2.6	วงจรชดเชยแบบพีไอ..... 7
2.7	แอสซิมโทตแสดงอัตราขยายของวงจรชดเชยแบบพีไอ..... 8
2.8	วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร.....9
2.9	บล็อกไดอะแกรมสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุมป้อนกลับของแหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์..... 11
2.10	แอสซิมโทตแสดงเฟสมาร์จินและเกนมาร์จินของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด..... 13
2.11	แอสซิมโทตของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ต้องการ..... 15
3.1	การต่อขาต่าง ๆ ของ MC34025 ให้ทำงานโดยวิธีการควบคุมแบบแรงดัน..... 29
3.2	วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์กำลังสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว..... 30
4.1	แผนภาพโบทแสดงอัตราขยายของวงจรชดเชยแบบพีไอก่อนการปรับปรุง ในการออกแบบวงจรชดเชยสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ (ก) วงจรภาคกำลัง (ข) วงจรชดเชย..... 34
4.2	แผนภาพโบทของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรชดเชยแบบพีไอก่อนการปรับปรุง แปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM..... 35
4.3	วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM พร้อมวงจร ป้อนกลับ..... 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	แผนภาพ โบทแสดงอัตราขยายของวงจรชดเชยแบบพีโอหลังการปรับปรุง ในการออกแบบวงจรชดเชยสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ (ก) วงจรภาคกำลัง (ข) วงจรชดเชย..... 37
4.5	แผนภาพ โบทของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรชดเชยแบบพีโอหลังการปรับปรุง แปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM.....38
4.6	วงจรแปลงผันแรงดันแบบแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM พร้อมวงจร ป้อนกลับ..... 39
4.7	แผนภาพ โบทแสดงอัตราขยายของวงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรก่อนการปรับปรุง ในการออกแบบวงจรชดเชยสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ (ก) วงจรภาคกำลัง (ข) วงจรชดเชย..... 40
4.8	แผนภาพ โบทของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรก่อนการปรับ ปรุงแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM..... 42
4.9	วงจรแปลงผันแรงดันแบบแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM พร้อมวงจร ป้อนกลับ..... 43
4.10	แผนภาพ โบทแสดงอัตราขยายของวงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรหลังการปรับปรุง ในการออกแบบวงจรชดเชยสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ (ก) วงจรภาคกำลัง (ข) วงจรชดเชย..... 44
4.11	แผนภาพ โบทของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรหลังการปรับ ปรุงแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM.....46
4.12	วงจรแปลงผันแรงดันแบบแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM พร้อมวงจร ป้อนกลับ.....47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	การจัดชุดทดลองสำหรับการทดสอบการรักษาระดับแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุต ผลการทดลอง.....49
5.2	การจัดชุดทดลองสำหรับการทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด.....53
5.3	ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์ เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว เมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI ที่แรงดัน ไฟฟ้าอินพุต 220 V เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1A ไปเป็น 5 A.....53
5.4	ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของ โหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ดที่ ใช้สวิตช์ 2 ตัว เมื่อใช้วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร ที่แรงดัน ไฟฟ้าอิน พุต 220 V เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A.....54
5.5	ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ด ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว เมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายจาก 0.183 ไปเป็น 0.33 ของวงจรชด เชยแบบ PI ที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการ เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A .....55
5.6	ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์ เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว เมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายจาก 0.183ไปเป็น 0.66 ของ วงจรชดเชยแบบ PI ที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V เมื่อกระแสไฟฟ้า เอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A.....56
5.7	ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด ของวงจรแปลงผันแรงดัน แบบฟอว์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อออกแบบให้ตำแหน่งความถี่ซีโร ตัวที่สอง ( $\omega_{zc2}$ ) ของวงจรชดเชยมีตำแหน่งตรงกับตำแหน่งความถี่ โพลตัวที่สอง ( $\omega_{pp2}$ ) ของวงจรภาคกำลัง ที่แรงดัน ไฟฟ้าอินพุต 220 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1A ไปเป็น 5 A.....	56
5.8	การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุต เพื่อการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงแบบฟอร์เวิร์ด ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว.....	57
5.9	การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต เพื่อการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงแบบฟอร์เวิร์ด ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว.....	58
5.10	รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $V_{M1}$ (CH1), $V_{D1}$ (CH2) และสัญญาณกระแสไฟฟ้า $i_{in}$ (CH3), $i_L$ (CH4) แปลงผันแรงดันแบบ ฟอร์เวิร์ด.....	61

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

a	พื้นที่ตัดขวางของหลอดทองแดง
A	แอมแปร์
$A_c$	พื้นที่ตัดขวางของแกน
$A_p$	ค่าผลคูณพื้นที่ระหว่างพื้นที่ตัดขวางของแกนกับพื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$A_w$	พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$B_{max}$	ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด
C	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C
$C_1$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_1$
$C_2$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_2$
$C_p$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_p$
$C_s$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C_s$
$C_T$	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าตั้งเวลา $C_T$
CCM	การนำกระแสไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง
d	คิวตีไซเคิล
dB	เดซิเบล
$\hat{d}(s)$	คิวตีไซเคิลที่เป็นสัญญาณขนาดเล็กในรูปตัวแปรเชิงซ้อน s
D	คิวตีไซเคิลที่สภาวะคงตัว
$D_1$	ไดโอดเรียงกระแส
$D_{max}$	คิวตีไซเคิลสูงสุด
$D_{min}$	คิวตีไซเคิลต่ำสุด
$D_z$	ซีเนอร์ไดโอด
$D_{IC,max}$	คิวตีไซเคิลสูงสุดของไอซี
E	พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ
ESR	ความต้านทานอนุกรมสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$f$	ความถี่
$f_{sw}$	ความถี่ในการสวิตช์
$F$	ฟารัด
$G_c(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชย
$G_d(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันเอาต์พุตและดิฟเฟอเรนเชียลของวงจรแปลงผันแรงดัน
$G_m(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างดิฟเฟอเรนเชียลและสัญญาณควบคุม
$G_p(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง
$ G_c(s) $	อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชย
$ G_p(s) $	อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง
GM	เกนมารจิ้น
H	เฮนรี
Hz	เฮิรตซ์
$I_{(M1,M2)av}$	กระแสเดรนเฉลี่ยของมอสเฟตกำลัง
$I_{D,av}$	กระแสไปหน้าเฉลี่ยของไดโอดกำลัง
$I_{L,av}$	กระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำ
$I_{L,max}$	กระแสสูงสุดของตัวเหนี่ยวนำ
$I_{L,min}$	กระแสต่ำสุดของตัวเหนี่ยวนำ
$I_0$	กระแสเอาต์พุต
$\Delta I_L$	ริปเปิลของกระแสตัวเหนี่ยวนำ
J	จูล
J	ความหนาแน่นกระแสในเส้นลวดทองแดง
k	กิโล
$k_c$	อัตราส่วนระหว่างกระแสสูงสุดกับกระแสอาร์เอ็มเอสของตัวเหนี่ยวนำ
$k_w$	ค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$K_c$	อัตราขยายดีซีของฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตของวงจรถดเซช
$K_{CCM}$	อัตราขยายดีซีของฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันเอาต์พุตและดิวิตีไซเคิลของวงจรแปลงผันแรงดันที่ทำงานในโหมด CCM
$l_g$	ความยาวของช่องอากาศ
$L$	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ $L$
$L_p$	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ $L_p$
$m$	มิลลิ
$m$	เมตร
$M$	เมกะ
$n$	นาโน
$N$	จำนวนรอบของแผ่นทองแดงของตัวเหนี่ยวนำ
$N_p$	จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า
$N_s$	จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า
PM	เฟสมาร์จิน
$Q$	ค่า quality factor
rad/sec	เรเดียนต่อวินาที
$R$	ความต้านทานของโหลด
$R_1$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_1$
$R_2$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_2$
$R_3$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_3$
$R_4$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_4$
$R_c$	ESR ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า $C$
$R_{di}$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_{di}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$R_{d2}$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_{d2}$
$R_g$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_g$
$R_{gs}$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_{gs}$
$R_{max}$	ความต้านทานสูงสุดของโหลด
$R_{min}$	ความต้านทานสูงสุดของโหลด
$R_T$	ความต้านทานของตัวต้านทาน $R_T$
$s$	วินาที
$t$	เวลา
$t_{on}$	ช่วงเวลาที่มอสเฟตนำกระแส
$t_{off}$	ช่วงเวลาที่มอสเฟตหยุดนำกระแส
$T$	เทสตา
$T_s$	คาบเวลาในการสวิตช์
$T(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุมป้อนกลับ
$ T(s) $	อัตราขยายฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุมป้อนกลับ
$\angle T(s)$	เฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรรบบควบคุมป้อนกลับ
$v_c$	สัญญาณควบคุม
$\hat{v}_c(s)$	สัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณขนาดเล็กในรูปตัวแปรเชิงซ้อน $s$
$v_i$	แรงดันอินพุต
$v_o$	แรงดันเอาต์พุต
$\hat{v}_o(s)$	แรงดันเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณขนาดเล็กในรูปตัวแปรเชิงซ้อน $s$
$\hat{v}'_o(s)$	แรงดันเอาต์พุตของวงจrabแบ่งแรงดันเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณขนาดเล็กในรูปตัวแปรเชิงซ้อน $s$
$v_{ref}$	แรงดันอ้างอิง
$\hat{v}_{ref}(s)$	แรงดันอ้างอิงที่เป็นสัญญาณขนาดเล็กในรูปตัวแปรเชิงซ้อน $s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$v_s$	สัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย
$V$	โวลต์
$V_i$	แรงดันอินพุตที่สภาวะคงตัว
$V_o$	แรงดันเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว
$V_o'$	แรงดันเอาต์พุตของวงจรแบ่งแรงดันเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว
$V_{pri, pk}$	แรงดันสูงสุดทางด้านปฐมภูมิ
$V_{ref}$	แรงดันอ้างอิงที่สภาวะคงตัว
$V_s$	ความสูงของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย
$\Delta v_o$	ริบเบิลของแรงดันเอาต์พุต
$Z_f$	อิมพีแดนซ์ป้อนกลับของวงจรขยายความผิดพลาด
$Z_i$	อิมพีแดนซ์อินพุตของวงจรขยายความผิดพลาด
$\mu$	ไมโคร
$\pi$	ค่าคงที่ประมาณ 3.14
$\Omega$	โอห์ม
$\omega_{pp}$	ความถี่เชิงมุมของโพลคู่เนื่องจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน L-C ของวงจรแปลงผันแรงดัน
$\omega_{pc1}$	ความถี่เชิงมุมของโพลตัวที่หนึ่งของวงจรชดเชย
$\omega_{pc2}$	ความถี่เชิงมุมของโพลตัวที่สองของวงจรชดเชย
$\omega_{zp}$	ความถี่เชิงมุมของซีโร่เนื่องจาก ESR ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C ของวงจรแปลงผันแรงดัน
$\omega_{zc1}$	ความถี่เชิงมุมของซีโร่ตัวที่หนึ่งของวงจรชดเชย
$\omega_{zc2}$	ความถี่เชิงมุมของซีโร่ตัวที่สองของวงจรชดเชย
$\Phi$	เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการทำงาน

อุปกรณ์และระบบอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์และระบบอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ต้องการแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (switching mode power supply) ที่มีประสิทธิภาพสูง มีเสถียรภาพสูง มีความสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคงที่ มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตได้อย่างรวดเร็ว มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ซึ่งแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ สามารถสร้างให้มีความสามารถตามที่กล่าวมาได้ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบลิเนียร์ (linear power supply) ไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตได้ ทั้งยังมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก ใช้เนื้อที่มาก แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบลิเนียร์นั้นจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในอุปกรณ์และระบบอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่มีอยู่ในปัจจุบันนิยมใช้วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าเป็นวงจรหลักในการทำงาน เพราะง่ายต่อการควบคุมการทำงาน ปริมาณพื้นที่นี้เลือกวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว (double-ended forward converter) เป็นวงจรหลักในการทำงาน

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันแบบพื้นฐาน และวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว ออกแบบสร้างวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในการทำงาน

2. ศึกษาทฤษฎีระบบควบคุมวิธีผลตอบสนองเชิงความถี่ (frequency response method) เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบวงจรชดเชย ที่สามารถออกแบบสร้างได้ง่ายใช้งานได้สะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบข่ายการทำงาน

ศึกษาการทำงาน ออกแบบสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ ที่ใช้วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดเป็นวงจรหลักในการทำงาน ศึกษาการทำงาน ออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบ PI (PI compensation circuits) และวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร (two-pole two-zero compensation circuits) เมื่อนำมาใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในการทำงาน ทดสอบความสามารถของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สร้างขึ้น เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวงจร การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

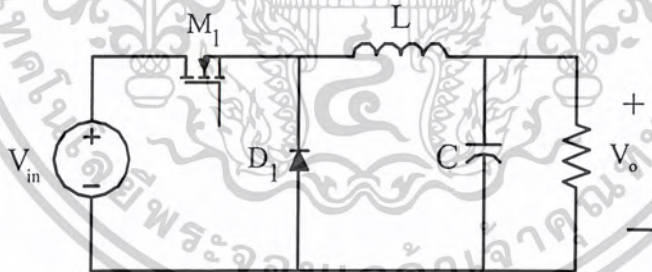
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์

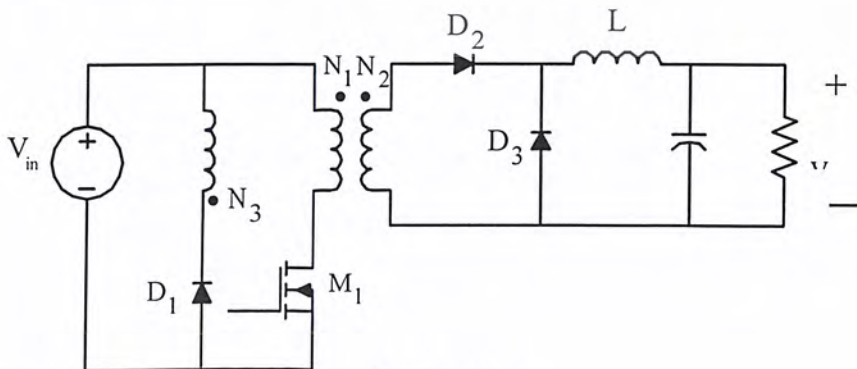
#### 2.1 วงจรภาคกำลัง

##### 2.1.1 วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 1 ตัว

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์นิยมใช้วงจรแปลงผันแรงดันเป็นวงจรหลัก ในการทำงาน วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ด (รูปที่ 2.2) พัฒนามาจากวงจรแปลงผันแรงดันดีซี-ดีซีแบบบัก (DC-DC buck converter) (รูปที่ 2.1) เมื่อค่าแรงดันไฟตรงอินพุตที่มีค่าเฉลี่ยคงที่ถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟตรงเอาต์พุตที่มีค่าเฉลี่ยใหม่ วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ดจะรับค่าแรงดันไฟสลับผ่านวงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟฟ้าตรง (rectifier circuit) เพื่อให้ได้แรงดันไฟตรงคงที่ (ประมาณค่าแรงดันว่าคงที่) อาศัยการทำงานของสวิตช์ (ได้แก่ มอสเฟตกำลัง) ไดโอดกำลัง และหม้อแปลงฟอว์เวิร์ด จะได้แรงดันไฟตรงเฉลี่ยค่าต่ำผ่านเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำที่สร้างจากตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (L-C low-pass filter)



รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันแรงดันแบบบัก

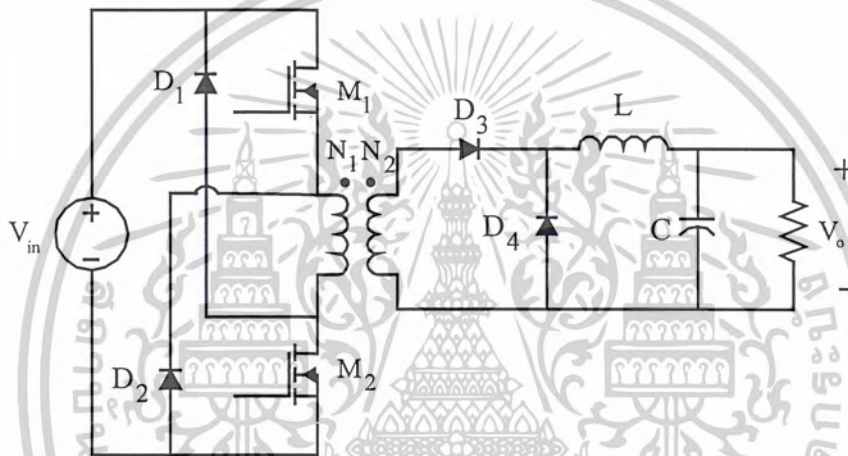


รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว พัฒนามาจากวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 1 ตัว โดยลดขนาดของขดที่ 3 ในหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดแต่เพิ่มสวิตช์ 1 ตัว (รูปที่ 2.3) ข้อดีของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแสมีค่าน้อย และลดความยุ่งยากในการสร้างหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด แต่ค่าใช้จ่ายจะเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันเอาต์พุตและดิวิตีไซเคิลของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว ดังสมการที่ (2.1)

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{nV_o}{D} \frac{1}{LCs^2 + s\left(\frac{R_L + R_c}{L} + \frac{1}{CR}\right) + \left(\frac{R_L + R_c}{LCR} + \frac{1}{LC}\right)} \frac{(R_c C)s + \left(\frac{R_c}{R} + 1\right)}{R} \quad (2.1)$$

โดย

$R_c$  คือ ความต้านทานตัวเก็บประจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- C คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า  
 $R_L$  คือ ความต้านทานตัวเหนี่ยวนำ  
 L คือ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า  
 R คือ ความต้านทานเอาต์พุต

## 2.2 วงจรพีดับบลิวเอ็ม

แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันดิซี-ดิซีสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับคิวดิไซเคลิกของสวิตช์โดยความถี่มีค่าคงที่ โดยมีวิธีการควบคุม 2 แบบ คือ การควบคุมแบบแรงดัน (voltage mode control) และการควบคุมแบบกระแส (current mode control) ในปฏิยานุภาพนี้จะนำเสนอวิธีการควบคุมแบบแรงดันเท่านั้น

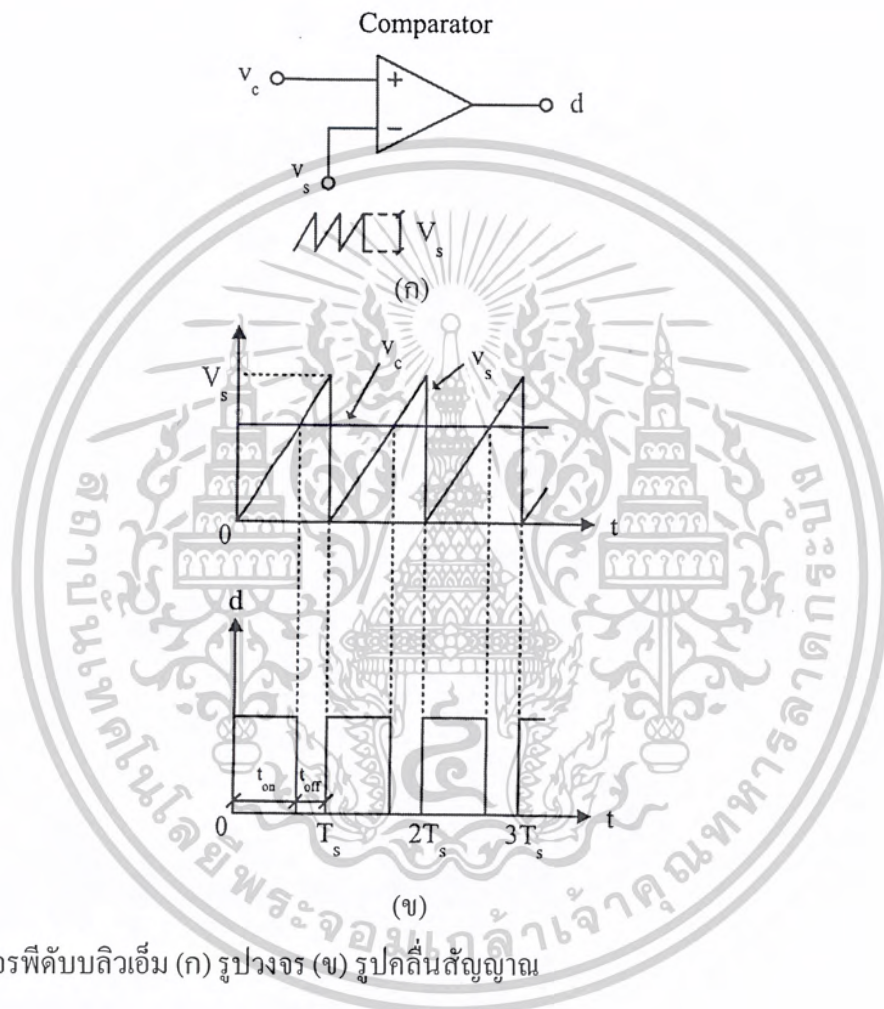
คิวดิไซเคลิกเป็นสัญญาณที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์ สร้างจากวงจรพีดับบลิวเอ็ม โดยการเปรียบเทียบสัญญาณ 2 สัญญาณด้วยตัวเปรียบเทียบ (comparator) (รูปที่ 2.4(ก)) ซึ่งสัญญาณเปรียบเทียบทั้งสอง คือ สัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย (sawtooth signal,  $V_s$ ) ที่มีความสูงของรูปคลื่น (peak to peak) เท่ากับความถี่ในสวิตช์ ( $F_{sw} = 1/T_{sw}$ ) ที่ต้องการ และสัญญาณเปรียบเทียบอีกสัญญาณคือ สัญญาณควบคุม (control signal,  $V_c$ ) เมื่อสัญญาณควบคุมถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อยซึ่งมีความถี่และขนาดของสัญญาณที่แน่นอน สัญญาณเอาต์พุตของตัวเปรียบเทียบที่ได้จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นพัลส์ (คิวดิไซเคลิก) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย (ความถี่ในการสวิตช์) แต่มีความกว้างของสัญญาณเป็นไปตามค่าของสัญญาณควบคุม (รูปที่ 2.4 (ข)) กล่าวคือ หากสัญญาณควบคุมมีค่ามากขึ้น ความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ได้จะมากขึ้นตาม แต่หากแรงดันควบคุมมีค่าน้อยลงความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ได้ก็จะน้อยลงเช่นกัน ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างคิวดิไซเคลิกและสัญญาณควบคุมแสดงได้ดังสมการที่ (2.2) [4]

$$\frac{\hat{d}(s)}{\hat{v}_c(s)} = \frac{1}{V_s} \quad (2.2)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_s$  คือ ความสูงของสัญญาณรูปคลื่นฟันเลื่อย  
 $\hat{V}_C(s)$  คือ สัญญาณควบคุมที่เป็นสัญญาณขนาดเล็กในรูปตัวแปรเชิงซ้อน  $s$

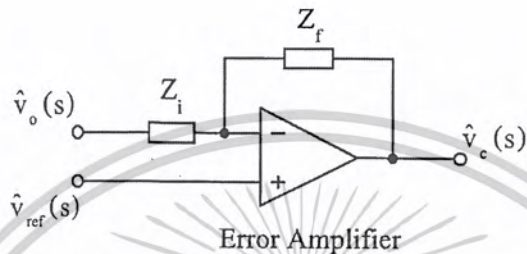


รูปที่ 2.4 วงจรพีดับบลิวเอ็ม (ก) รูปวงจร (ข) รูปคลื่นสัญญาณ

### 2.3 วงจรชดเชย

ในการนำแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ไปใช้งาน แรงดันเอาต์พุตจะต้องมีค่าอยู่ในย่านที่กำหนดถึงแม้แรงดันอินพุตหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง การควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ จะกระทำโดยการป้อนกลับแบบลบ (negative feedback) เพื่อให้ระบบปรับคิตีไซเคลด้วยตัวเอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

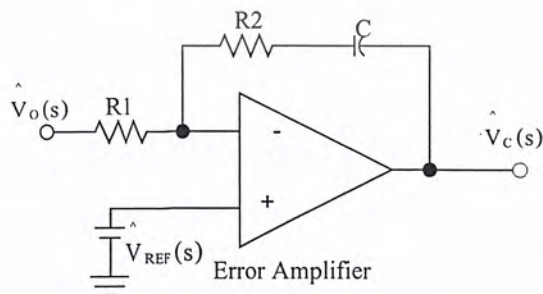
อย่างอัตโนมัติ โดยที่สัญญาณควบคุมความกว้างของดิวตีไซเคิลถูกสร้างจากตัวขยายความผิดพลาด (error amplifier) ซึ่งขยายค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันอ้างอิง (reference voltage,  $V_{ref}$ ) กับค่าแรงดันเอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 2.5 ระบบจะทำการปรับดิวตีไซเคิลไปจนกระทั่งแรงดันเอาต์พุตเท่ากับแรงดันอ้างอิง



รูปที่ 2.5 วงจรชดเชยที่สร้างด้วยตัวขยายความผิดพลาด

แม้ว่าการป้อนกลับจะทำให้ระบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้อย่างอัตโนมัติ แต่อาจเป็นต้นเหตุให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ นอกจากนี้การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่ได้ อาจจะไม่เป็นที่พึงปรารถนา เช่น มีการตอบสนองช้า มีการแกว่งมากเกินไป หรือมีความคลาดเคลื่อนมาก จากค่าที่ต้องการ สิ่งไม่เป็นที่พึงปรารถนาเหล่านี้สามารถป้องกันและควบคุมได้ด้วยการออกแบบวงจรชดเชยให้เหมาะสม การออกแบบวงจรชดเชยจึงเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบเพื่อให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์มีสมรรถนะที่ดี และจะนำเสนอในบทต่อไป ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบของวงจรชดเชย 2 รูปแบบ [2] ที่นิยมใช้ในการชดเชยวงควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ดังนี้

### 2.3.1 วงจรชดเชยแบบ PI



รูปที่ 2.6 วงจรชดเชยแบบพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_c = K_c \frac{(1+W_{zc}s)}{s} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$K_c = \frac{1}{CR_1}$$

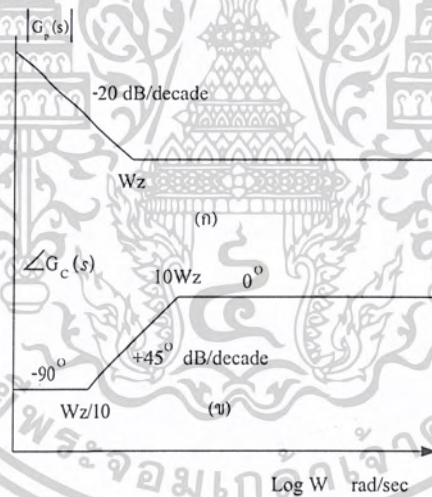
$$W_{zc} = CR_2$$

โดย

$G_c(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเชยแบบพีไอ

$K_c$  คือ อัตราขยายคี่ของฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตของวงจรถดเชย

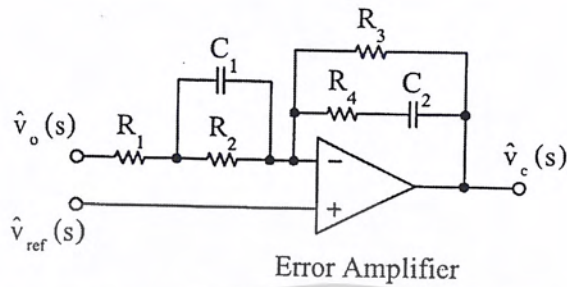
$W_{zc}$  คือ ความถี่เชิงมุมของซีโรของวงจรถดเชย



รูปที่ 2.7 แอสซิมโทตแอสซิมโทตแสดงเฟสมาร์จิ้นและเกนมาร์จิ้นของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร (two-pole two-zero compensation circuit)



รูปที่ 2.8 วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร

วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร แสดงดังรูปที่ 2.8 เป็นวงจรชดเชยที่เหมาะสมสำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode : CCM) ที่ใช้วิธีการควบคุมแบบแรงดัน ฟังก์ชัน ถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตแสดงได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\frac{\hat{v}_c(s)}{\hat{v}_o(s)} = K_c \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{zc1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{zc2}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{pc1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{pc2}}\right)} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$K_c = \frac{R_3}{R_1 + R_2}$$

$$\omega_{zc1} = \frac{1}{R_4 C_2}$$

$$\omega_{zc2} = \frac{1}{R_2 C_1}$$

$$\omega_{pc1} = \frac{1}{(R_3 + R_4) C_2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_{PC2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1}$$

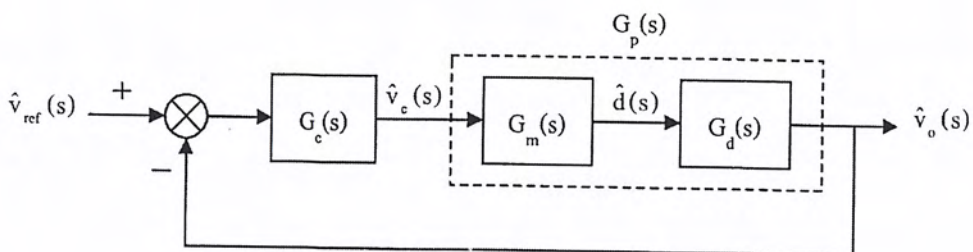
โดยที่

$K_c$	คือ	อัตราขยายดีซีของฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตของวงจรถดเซช
$\omega_{ZC1}$	คือ	ความถี่เชิงมุมของซีโรตัวที่หนึ่งของวงจรถดเซช
$\omega_{ZC2}$	คือ	ความถี่เชิงมุมของซีโรตัวที่สองของวงจรถดเซช
$\omega_{PC1}$	คือ	ความถี่เชิงมุมของโพลตัวที่หนึ่งของวงจรถดเซช
$\omega_{PC2}$	คือ	ความถี่เชิงมุมของโพลตัวที่สองของวงจรถดเซช

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ประกอบด้วยวงจรถดเซชและวงจรถดเซช โดยมีวงจรถดเซชเป็นวงจรหลักในการสร้างแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ ส่วนวงจรถดเซชเป็นวงจรสำหรับควบคุมผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตให้เป็นไปตามคุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ต้องการ อันได้แก่ การมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว และความสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าอยู่ภายในย่านที่กำหนดได้ โดยวิธีการออกแบบวงจรถดเซชที่จะนำเสนอในปริญญานีพนธ์นี้ คือ วิธีผลตอบสนองเชิงความถี่ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป

## 2.4 คุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ดีจะต้องมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน มีการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่ดี และมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว การออกแบบให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวจะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (closed loop transfer function) ของระบบควบคุมป้อนกลับ ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุมป้อนกลับของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดระหว่างแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอ้างอิงแสดงได้ดังสมการที่ (2.5)

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_{ref}(s)} = \frac{T(s)}{1 + T(s)} \tag{2.5}$$

เมื่อ

$$T(s) = G_p(s) G_c(s) = G_d(s) G_m(s) G_c(s)$$

โดยที่

- $\hat{v}_{ref}(s)$  คือ แรงดันอ้างอิงที่เป็นสัญญาณขนาดเล็กในรูปตัวแปรเชิงซ้อน  $s$
- $G_d(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันเอาต์พุตและควิตีไซเคิลของวงจรแปลงผันแรงดัน
- $G_m(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างควิตีไซเคิล และสัญญาณควบคุม
- $G_p(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาพกำลัง
- $G_c(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชย
- $T(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงเปิดของระบบควบคุมป้อนกลับ

คุณสมบัติต่างๆ ของระบบที่ต้องการจะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดสมการที่ (2.5) มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 เสถียรภาพ

เสถียรภาพของระบบ คือ ความสามารถในการกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลเดิมของระบบหลังจากถูกรบกวน สามารถตรวจสอบได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด กล่าวคือ หากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบมีโพลอยู่ทางด้านขวาของระนาบเชิงซ้อน  $s$  ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งจากสมการที่ (2.5) โพลหรือตำแหน่งรากของพหุนามส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดหาได้จากสมการที่ (2.6)

$$1 + T(s) = 0 \quad (2.6)$$

สมการดังกล่าวถูกแสดงในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ดังนั้นเสถียรภาพของระบบจึงสามารถวิเคราะห์ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดโดยการจัดรูปสมการที่ (2.6) ใหม่จะได้สมการที่ (2.7)

$$T(s) = -1 = |1| \angle -180^\circ \quad (2.7)$$

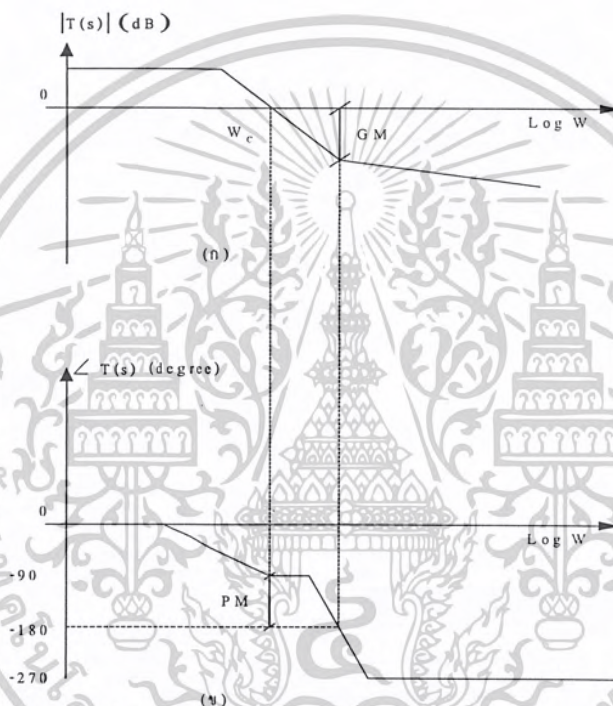
สมการที่ได้แสดงเงื่อนไขที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ กล่าวคือ ระบบจะขาดเสถียรภาพหากเฟสตาม (phase lag) ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ความถี่ครอสโอเวอร์ (crossover frequency,  $W_c$ ) หรือความถี่ที่อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็น 1 (0 dB) มีค่าเท่ากับ  $180^\circ$  คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด ที่ใช้พิจารณาเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ ได้แก่ เฟสมาร์จิน (phase margin, PM) และเกนมาร์จิน (gain margin, GM)

#### ก. เฟสมาร์จิน

คือ ผลต่างระหว่าง  $180^\circ$  กับเฟสตามที่ความถี่ครอสโอเวอร์แสดงดังรูปที่ 2.10 (ก) ระบบที่มีเสถียรภาพจะต้องมีค่าเฟสมาร์จินเป็นบวกซึ่งก็คือ มีค่าเฟสตามที่ความถี่ครอสโอเวอร์น้อยกว่า  $180^\circ$  นั่นเอง โดยที่เฟสมาร์จินนี้ถึงแม้ว่ามีค่าเป็นบวกแต่หากมีค่าเข้าใกล้  $0^\circ$  มากเกินไปจะทำให้ความมีเสถียรภาพของระบบจะลดลงได้ เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเกิดการแกว่งมากเกินไป ในทางปฏิบัติเฟสมาร์จินควรมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า  $45^\circ$

## ข. เกนมาร์จิ้น

คือ ผลต่างระหว่าง 0 dB กับอัตราขยายที่ความถี่ที่เฟสตามเป็น  $180^\circ$  แสดงดังรูปที่ 2.10 (ข) ในทำนองเดียวกับเฟสมาร์จิ้นระบบที่มีเสถียรภาพจะต้องมีค่าเกนมาร์จิ้นเป็นบวกซึ่งก็คือ มีค่าอัตราขยายที่ความถี่ที่เฟสตามเป็น  $180^\circ$  น้อยกว่า 0 dB นั่นเอง ในทางปฏิบัติเกนมาร์จิ้นควรจะมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 6 dB



รูปที่ 2.10 แอสซิม โทคแสดงเฟสมาร์จิ้นและเกนมาร์จิ้นของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

### 2.4.2 การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต

แรงดันเอาต์พุตของระบบจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งทีสภาวะคงตัวแต่หากระบบถูกรบกวนแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการรบกวนที่เกิดขึ้น จนกระทั่งเมื่อระบบเข้าสู่สภาพสมดุลแรงดันเอาต์พุตที่สภาวะคงตัวจะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.5) โดยการแทนด้วยค่าที่สภาวะคงตัวหรือแทนด้วยความถี่เท่ากับศูนย์ ( $s = 0$ ) จะได้สมการที่ (2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_{ref}} = \frac{T(0)}{1+T(0)} \quad (2.8)$$

โดยที่

$V_{ref}$  คือ แรงดันอ้างอิงที่สถานะคงตัวมีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุตเป้าหมาย

จะเห็นว่าหากอัตราขยายดีซีของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่ามาก แรงดันเอาต์พุตที่สถานะคงตัว ( $V_o$ ) จะมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันเอาต์พุตเป้าหมาย ( $V_{ref}$ ) มาก ความคลาดเคลื่อนของแรงดันเอาต์พุตที่สถานะคงตัวจึงมีค่าน้อยหลังจากระบบถูกรบกวน ทำให้มีการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่ดี ดังนั้น เพื่อให้มีการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่ดี อัตราขยายดีซีของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดควรมีค่ามากอย่างเพียงพอ

#### 2.4.3 ความเร็วในการตอบสนอง

การเปลี่ยนแปลงกระแสเอาต์พุตหรือการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตอย่างทันทีทันใด ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงไปและอาจจะมีค่าเกินย่านที่ต้องการได้ วงจรป้อนกลับจะทำการควบคุมให้แรงดันเอาต์พุตกลับสู่ค่าเป้าหมาย ( $V_{ref}$ ) ช่วงเวลาที่แรงดันเอาต์พุตใช้ในการกลับสู่ค่าเป้าหมายเรียกว่า เวลาในการคืนตัว (settling time) ความเร็วในการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับค่าแบนด์วิดธ์ (Bandwidth) ของระบบหรือค่าความถี่ครอสโอเวอร์ ( $\omega_c$ ) หากระบบมีความถี่ครอสโอเวอร์มากจะทำให้ระบบสามารถตอบสนองต่อสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆ ได้ดี ตรงกันข้ามกับระบบที่มีความถี่ครอสโอเวอร์น้อยจะตอบสนองช้า แต่หากความถี่ครอสโอเวอร์มีค่ามากเกินไประบบจะตอบสนองต่อสัญญาณที่มีความถี่สูงมากได้ดี โดยเฉพาะสัญญาณรบกวน (noise) ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ ในทางปฏิบัติความถี่ครอสโอเวอร์ไม่ควรเกิน 0.25 เท่าของความถี่ในการสวิตช์

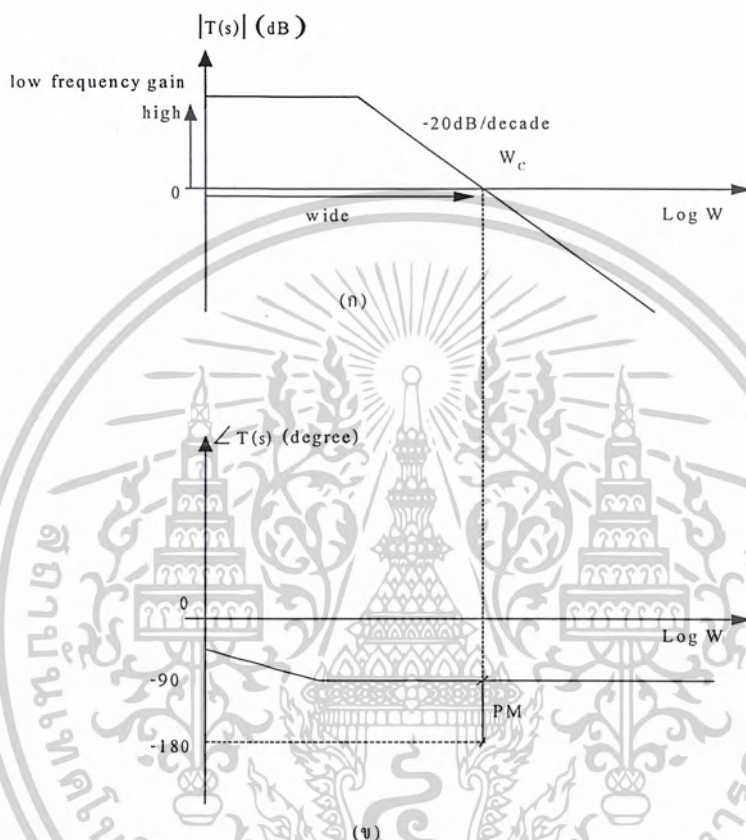
#### 2.4.4 คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี

จากหัวข้อที่ 2.4.1 ถึงหัวข้อที่ 2.4.3 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่จะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เฟสมาร์จินและเกนมาร์จินควรมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า  $45^\circ$  และ 6 dB ตามลำดับเพื่อความมีเสถียรภาพและไม่ให้แรงดันเอาต์พุตแกว่งมากเกินไป
2. อัตราขยายดีซีควรมีค่ามากเพื่อให้มีการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความถี่ครอสโอเวอร์ควรมีค่ามากเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตตอบสนองได้อย่างรวดเร็วแต่ไม่ควรเกิน 0.25 เท่าของความถี่ในการสวิตช์ เพราะอาจทำให้ระบบขาดเสถียรได้ คุณสมบัติดังกล่าวสามารถแสดงเป็นแผนภาพโบคของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แอสซิเมโทคของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ต้องการ

## 2.5 การออกแบบวงจรชดเชย

ในหัวข้อที่ 2.4 จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดได้จากผลคูณระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกาลังกับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชย ( $G_p(s)$   $G_c(s)$  ในรูปที่ 2.9) หรืออีกนัยหนึ่งคือผลรวมของแผนภาพโบคของฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสอง การออกแบบวงจรชดเชยจึงเป็นการออกแบบแผนภาพโบคของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชยซึ่งเมื่อรวมกับแผนภาพโบคของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกาลังแล้วได้แผนภาพโบคของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการดังรูปที่ 2.11 ขั้นตอนการออกแบบวงจรชดเชยมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 การออกแบบวงจรชดเชยแบบพีโอ

1. กำหนดความถี่ซีโรของวงจรชดเชยเท่ากับความถี่ครอสโอเวอร์ แล้วคำนวณค่าอัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชยที่ต้องการ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถูกกำลังแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่าเป็นศูนย์
2. คำนวณค่าอุปกรณืชดเชย

### 2.5.2 การออกแบบวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร

1. กำหนดความถี่ครอสโอเวอร์แล้วคำนวณค่าอัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชยที่ต้องการ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถูกกำลังแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่าเป็นศูนย์
2. วางโพลของวงจรชดเชยที่ความถี่ต่ำหนึ่งตัว เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชยมีค่ามาก ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่ามากเช่นกัน
3. วางโพลอีกหนึ่งตัวของวงจรชดเชยที่ความถี่ใกล้กับความถี่ของซีโรเนื่องจากผลของ ESR ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C ของวงจรแปลงผันแรงดันซึ่งโดยส่วนใหญ่ความถี่นี้จะมีค่าสูง เพื่อหักล้างผลของซีโรดังกล่าวไม่ให้อัตราขยายที่ความถี่สูงของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่ามาก ทำให้สัญญาณรบกวนลดลง
4. วางซีโรทั้งสองตัวของวงจรชดเชยที่ความถี่ใกล้กับความถี่ของโพลคู่เนื่องจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน L-C ของวงจรแปลงผันแรงดัน เพื่อหักล้างผลของโพลคู่ดังกล่าว ไม่ให้เฟสตามของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่ามากเกินไป ทำให้เฟสมาร์จิ้นมีค่ามากขึ้น
5. คำนวณค่าอัตราขยายที่ความถี่ของโพลและซีโรทั้งหมดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชยโดยใช้ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4
6. คำนวณค่าอุปกรณืชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรชดเชยโดยวิธีผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นการออกแบบวงจรชดเชยเพื่อให้ได้แผนภาพโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่มีคุณสมบัติดังนี้ เฟสมาร์จินและเกนมาร์จิน ควรมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า  $45^\circ$  และ 6 dB ตามลำดับ อัตราขยายที่ความถี่ต่ำควรมีค่ามาก และความถี่คrossover ควรมีค่าสูงแต่ไม่ควรเกิน 0.25 เท่าของความถี่ในการสวิตช์ เนื่องจากคุณสมบัติที่กล่าวมาจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยที่แรงดันเอาต์พุตไม่แกว่งมากเกินไป มีการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตที่ดี และสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว ตัวอย่างการออกแบบวงจรชดเชยจะนำเสนอในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบสร้างวงจรภาคกำลังของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ของปริณูณานิพนธ์ประกอบด้วยวงจรรย่อย ได้แก่ วงจรภาคกำลัง วงจรควบคุมค่าความถี่ที่เกิดของสัญญาณขับอุปกรณ์สวิตช์ วงจรขับเคลื่อน และวงจรแปลงไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้าตรง บทนี้นำเสนอรายละเอียดของการออกแบบสร้างวงจรรย่อยดังกล่าว

#### 3.1 การออกแบบสร้างวงจรภาคกำลังของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

คุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical specification) ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวที่สร้างขึ้นมีดังนี้  $V_s = 220 \text{ V}$   $f_s = 50 \text{ Hz}$   $\Delta V_s = \pm 10\%$   $V_s - V_o = 5 \text{ V}$   $\Delta V_o = 1\%$  of  $V_o$   $I_o = 1-10 \text{ A}$   $\Delta I_L = 1 \text{ A}$   $f_{sw} = 100 \text{ KHz}$   $\eta = 80\%$  เมื่อออกแบบให้วงจรทำงานในโหมด นำกระแสแบบต่อเนื่อง โดยที่  $R = 0.5-5 \Omega$

อุปกรณ์ที่สำคัญของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวที่ใช้เป็นวงจรภาคกำลัง คือ หม้อแปลงฟอร์เวิร์ด ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ หม้อแปลงฟอร์เวิร์ดจะต้องไม่อิ่มตัวแม่เหล็กในขณะที่กระแสเอาต์พุตมีค่าสูงสุด และต้องหาอัตราส่วนของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดดังสมการที่ (3.1)[2]

$$n = \frac{V_{O(sec)}}{D_{max} V_{in,min}} \quad (3.1)$$

เมื่อ

$$V_{O(sec)} = (V_o + V_D + V_L)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{in,min} = ((V_{s(ac),rms} - 10\%V_{s(ac),rms}) \times \sqrt{2}) - V_{ripple}$$

โดย

- $n$  คือ อัตราส่วนของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด
- $V_{O(sec)}$  คือ แรงดันไฟฟ้าทางขดทุติยภูมิ
- $D_{max}$  คือ ค่าคิวตีไซเคิลที่สูงที่สุด
- $V_{in,min}$  คือ แรงดันไฟฟ้าตรงอินพุตต่ำสุด
- $V_{s(ac),rms}$  คือ แรงดันไฟฟ้าสลับทางวงจรแปลงไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้าตรง
- $V_{ripple}$  คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าสลับ
- $V_D$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดทางด้านขดทุติยภูมิหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด
- $V_L$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า
- $V_O$  คือ แรงดันไฟฟ้าตรงเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

กำหนดให้  $V_o = 5 \text{ V}$   $D_{max} = 0.45$   $V_D = 0.5 \text{ V}$   $V_L = 0.5 \text{ V}$   $V_{s(ac),rms} = 220 \text{ V}$  สามารถหาค่า  $V_{ripple} = 10\%$  ของ  $V_{s(ac),rms} = 22 \text{ V}$  จำนวนค่า  $V_{in,min} = 258 \text{ V}$  และ  $n = 0.05$  โดยวิธีการออกแบบหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดที่ใช้คือ วิธีการกำหนดขนาดของแกนด้วยค่าผลคูณพื้นที่ (area product,  $A_p$ ) ระหว่างพื้นที่ตัดขวางของแกน (core cross section area,  $A_c$ ) กับพื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด (window area,  $A_w$ ) ซึ่งค่าผลคูณพื้นที่ดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (3.2) [12]

$$A_p = A_c A_w = \frac{\sqrt{D_{max}} P_{O2} (1 + \frac{1}{\eta})}{K_w J B_{max} f_{sw}} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$P_{O2} = (V_o + V_D + V_L) I_{o,max}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$D_{\max}$	คือ ค่าควิตีไซเคิลสูงสุด
$P_{02}$	คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด
$\eta$	คือ ค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด
$f_{sw}$	คือ ความถี่ในการสวิตช์
$A_p$	คือ ค่าผลคูณพื้นที่ระหว่างพื้นที่ตัดขวางของแกนกับพื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$A_c$	คือ พื้นที่ตัดขวางของแกน
$A_w$	คือ พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$k_w$	คือ ค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$J$	คือ ความหนาแน่นกระแสในเส้นลวดทองแดง
$B_{\max}$	คือ ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด
$I_{o,\max}$	คือ ค่ากระแสเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดัน
$V_o$	คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดัน

พิจารณาขณะที่กระแสเอาต์พุตมีค่าสูงสุด  $I_{L,av} = I_o = 10 \text{ A}$  ทำให้ได้  $P_{02} = 60 \text{ Watts}$

$D_{\max} = 0.45$   $V_o = 6 \text{ V}$  โดยกำหนดให้  $k_w = 0.4$   $J = 3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$   $B_{\max} = 0.1 \text{ T}$  และ  $f_{sw} = 100 \text{ KHz}$  ทำให้ได้  $A_p = 7546 \text{ mm}^4$  จึงเลือกแกนเฟอร์ไรต์แบบ ETD 42 ( $A_c = 180 \text{ mm}^2$   $A_w = 276 \text{ mm}^2$   $A_p = 49680 \text{ mm}^4$ ) ซึ่งมีค่าผลคูณพื้นที่  $A_p$  มากกว่าค่าที่คำนวณได้

จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด  $N_p$  คำนวณได้ตามสมการ (3.3)

$$N_p = \frac{V_{in,\max} D_{\min}}{A_c B_{\max} f_{sw}} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$D_{\min} = \frac{V_o}{nV_{in,\min}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$D_{\min}$  คือ ค่าควิตีไซเกิดต่ำสุด

$v_{\min}$  คือ แรงดันไฟฟ้าตรงอินพุตของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดต่ำสุด

จะได้จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ  $N_p = 65$  รอบ และจำนวนรอบของขดทุติยภูมิ  $N_s = n N_p = 4$  รอบ  
กระแสอาร์เอ็มเอสทางดำนปฐมภูมิของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด  $I_{p,rms}$  และกระแสอาร์เอ็มเอสทางดำน  
ทุติยภูมิของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด  $I_{s,rms}$  คำนวณได้ตามสมการ (3.4)

$$I_{s,rms} = I_{o,max} \sqrt{D_{max}} \quad I_{p,rms} = n I_{s,rms} \quad (3.4)$$

ที่  $I_{o,max} = 10A$   $D_{max} = 0.45$  และ  $n = 0.05$  คำนวณได้  $I_{s,rms} = 6.71 A$  และ  $I_{p,rms} = 0.33 A$   
พื้นที่ตัดขวางของลวดทองแดงที่ใช้พันขดลวดปฐมภูมิ  $a_p$  และพื้นที่ตัดขวางของลวดทองแดงที่ใช้  
พันขดลวดทุติยภูมิ  $a_s$  คำนวณได้ตามสมการ (3.5)

$$a_p = \frac{I_{p,rms}}{J} \quad a_s = \frac{I_{s,rms}}{J} \quad (3.5)$$

ที่  $J = 3 \times 10^6 A/m^2$  คำนวณได้  $a_p = 0.11 mm^2$  และ  $a_s = 2.24 mm^2$  จึงเลือกลวดทองแดง  
เบอร์ AWG 26 ( $a_{26} = 0.128 mm^2$ ,  $\Phi = 0.4039 mm^2$ ) จำนวนหนึ่งเส้นสำหรับใช้พันขดลวด  
ปฐมภูมิ และ เลือกลวดทองแดงเบอร์ AWG 23 ( $a_{23} = 0.259 mm^2$ ,  $\Phi = 0.5740 mm^2$ ) จำนวน  
เก้าเส้นสำหรับใช้พันขดลวดทุติยภูมิ ความเป็นไปได้ในการบรรจุขดลวดทั้งหมดลงในพื้นที่ที่ใช้  
พันขดลวดของแกนแบบ ETD 42 สามารถตรวจสอบผลได้ด้วยสมการ (3.6)

$$K_w A_w \geq a_p N_p + a_s N_s \quad (3.6)$$

$$0.4 \times 276 mm^2 \geq 11.272 mm^2 + 11.953 mm^2$$

$$110.4 mm^2 \geq 23.22 mm^2$$

ดังนั้น แกนแบบ ETD 42 ที่เลือกสามารถบรรจุจำนวนขดลวดทั้งหมดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันครน-ซอร์สสูงสุดของมอสเฟตกำลัง (M1,M2) มีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตสูงสุด คือ 342 V และค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุดของไดโอดกำลัง (D3,D4) มีค่าเท่ากับแรงดันเอาต์พุตของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด คือ  $V_{sec} = nV_{in,max} = 17.1 V$  ค่ากระแสไปหน้าเฉลี่ยของไดโอดกำลัง (D3,D4) คำนวณได้จากสมการที่ (3.7) และสมการที่ (3.8) ตามลำดับ และค่ากระแสครนเฉลี่ยของมอสเฟตกำลัง (M1,M2) คำนวณได้จากสมการที่ (3.9) และค่าแรงดันย้อนกลับสูงสุดของไดโอดกำลัง (D1,D2) มีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดสูงสุด คือ 342 V ค่ากระแสไปหน้าเฉลี่ยของไดโอดกำลัง (D1,D2) คำนวณได้จากสมการที่ (3.10) และค่ากระแสครนเฉลี่ย

$$I_{D3,av} = \frac{1}{2} \frac{(I_{L,max} + I_{L,min}) D_{max} T_{sw}}{T_{sw}} \tag{3.7}$$

$$I_{D4,av} = \frac{1}{2} \frac{(I_{L,max} + I_{L,min})(1-D_{min}) T_{sw}}{T_{sw}} \tag{3.8}$$

$$I_{(M1,M2),av} = I_{p,rms} \times D_{max} \tag{3.9}$$

$$I_{(D1,D2),av} = I_{p,rms} \times (1-D_{min}) \tag{3.10}$$

เมื่อ

$$I_{L,min} = I_{L,av} - \frac{\Delta I_L}{2}$$

โดยที่

$I_{(M1,M2),av}$

คือ กระแสครนเฉลี่ยของมอสเฟตกำลัง

$I_{D3,av}, I_{(D1,D2),av}, I_{D4,av}$

คือ กระแสไปหน้าเฉลี่ยของไดโอดกำลัง

$I_{L,min}$

คือ กระแสต่ำสุดของตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$D_{\max}$	คือ ค่าคิวิตีไซเคิลสูงสุด
$D_{\min}$	คือ ค่าคิวิตีไซเคิลต่ำสุด

จากข้อกำหนดในการออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำ(L) จะได้  $I_{L,\min} = 9.5 \text{ A}$  และค่าคิวิตีไซเคิลจะมีค่าสูงสุดเมื่อแรงดันอินพุตมีค่าต่ำสุด จะได้  $D_{\max} = 0.45$  และ  $D_{\min} = 0.34$  จำนวนกระแสไปหน้าเฉลี่ยของไดโอดกำลัง (D3,D4) ได้ 4.5 A และ 7.07 A ตามลำดับ พิกัดแรงดันและกระแสของอุปกรณ์ที่เลือกใช้ต้องมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จึงเลือกไดโอดกำลังชนิดชอตต์กีเบอร์ STPS3045CT ซึ่งมีพิกัดแรงดันสูงสุด 45 V และกระแสเฉลี่ย 15 A

กระแสเรณเฉลี่ยของมอสเฟตกำลังได้ 0.1485 A และ 0.233 A ตามลำดับ พิกัดแรงดันและกระแสของอุปกรณ์ที่เลือกใช้ต้องมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จึงเลือก มอสเฟตกำลังเบอร์ STW16NB60 ซึ่งมีพิกัดแรงดันสูงสุด 600 V และกระแสเฉลี่ย 16 A กระแสไปหน้าเฉลี่ยของไดโอดกำลัง (D1, D2) ได้ 0.1485 A และ 0.233 A ตามลำดับ พิกัดแรงดันและกระแสของอุปกรณ์ที่เลือกใช้ต้องมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จึงเลือกไดโอดกำลังชนิดอัลตราฟาสต์รีโคเวอรี่ไดโอด (Ultrafast Recovery Diode) เบอร์ MUR460 ซึ่งมีพิกัดแรงดันสูงสุด 600 V และกระแสเฉลี่ย 4A

คำนวณหาตัวเก็บประจุอินพุตของวงจรแปลงไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้าตรงโดยใช้สมการที่ (3.11) จึงเลือกตัวเก็บประจุ  $100 \mu\text{F}$  อัตราทนแรงดันไฟฟ้า 400 V

$$C > \frac{V_o I_{o,\max}}{\eta f_s ((V_{in,\min} + V_{in,\text{ripple}})^2 - V_{in,\min}^2)} \quad (3.11)$$

โดย

- C คือ ตัวเก็บประจุอินพุตของวงจรแปลงไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้าตรง
- $V_o$  คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว
- $I_{o,\max}$  คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว
- $\eta$  คือ ประสิทธิภาพหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด
- $f_s$  คือ ความถี่อินพุตของวงจรแปลงไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้าตรง
- $V_{in,\min}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{in,ripple}$  คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสเพื่ออินพุตของวงจรแปลงไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้าตรง  
 จำนวนไดโอดบริดจ์ของวงจรแปลงไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้าตรง โดยใช้สมการที่  
 (3.12) และอสมการที่ (3.13) จึงเลือกไดโอดบริดจ์เบอร์ BR 606 อัตราทนแรงดันไฟ  
 ฟ้า 600 V อัตราทนกระแสไฟฟ้า 6A

$$V_D \geq \hat{V}_{s,max} \quad (3.12)$$

โดย

$V_D$  คือ อัตราทนแรงดันไฟฟ้าไดโอดบริดจ์ของวงจรแปลงไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้าตรง

$\hat{V}_{s,max}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรของวงจรแปลงไฟฟ้าสลับเป็นไฟฟ้าตรงสูงสุด

$$I_D \geq 1.5I_{in,min} \quad (3.13)$$

เมื่อ

$$I_{in,max} = \frac{P_{in}}{V_{in,min}}$$

โดย

$I_D$  คืออัตราทนกระแสไฟฟ้าไดโอดบริดจ์

$I_{in,min}$  คือ กระแสไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดต่ำสุด

$P_{in}$  คือ กำลังไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด

$V_{in,min}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดต่ำสุด

คำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำ โดยให้แปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวทำงานในโหมด  
 การนำกระแสแบบต่อเนื่องจะต้องเป็นไปตามสมการที่ (3.14) [2] เลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ  $66 \mu H$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการตรวจสอบดูว่าตัวเหนี่ยวนำ  $66 \mu\text{H}$  นี้ทำให้  $\Delta I_L$  มีค่าเท่ากับ  $1 \text{ A}$  หรือไม่ จากสมการ (3.15)

$$L > \frac{1}{2} R_{\max} T_{\text{sw}} (1 - D_{\min}) \quad (3.14)$$

$$L = \frac{V_o (1 - D_{\min})}{\Delta I_L f_{\text{sw}}} \quad (3.15)$$

เมื่อ

โดย

$R_{\max}$  คือ ความต้านทานสูงสุดของโหลด

$D_{\min}$  คือ ดิวตีไซเคิลต่ำสุด

$T_{\text{sw}}$  คือ คาบเวลาในการสวิตช์

$V_o$  คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

$I_{o,\min}$  คือ กระแสเอาต์พุตต่ำสุด

$f_{\text{sw}}$  คือ ความถี่ในการสวิตช์

$\Delta I_L$  คือ ริบเปิลของกระแสตัวเหนี่ยวนำ

ดังนั้นสามารถใช้ค่าความเหนี่ยวนำขนาด  $66 \mu\text{H}$  ได้

ในการออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำ (L) สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ ตัวเหนี่ยวนำจะต้องไม่ อิ่มตัวแม้ในขณะที่กระแสเอาต์พุตมีค่าสูงสุด โดยวิธีการออกแบบที่ใช้คือ วิธีการกำหนดขนาด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแกนด้วยค่าผลคูณพื้นที่ (area product,  $A_p$ ) ระหว่างพื้นที่ที่ตัดขวางของแกน (core cross section area,  $A_c$ ) กับพื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด (window area,  $A_w$ ) ซึ่งค่าผลคูณพื้นที่ดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (3.16) [9]

$$A_p = A_c A_w = \frac{2E}{K_w K_c J B_{\max}} \quad (3.16)$$

โดยที่

$A_p$	คือ ค่าผลคูณพื้นที่ระหว่างพื้นที่ที่ตัดขวางของแกนกับพื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$A_c$	คือ พื้นที่ที่ตัดขวางของแกน
$A_w$	คือ พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$E$	คือ พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ
$k_w$	คือ ค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์พื้นที่ที่ใช้บรรจุขดลวด
$k_c$	คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสสูงสุดกับกระแสอาร์เอ็มเอสของตัวเหนี่ยวนำ (crest factor)
$J$	คือ ความหนาแน่นกระแสในเส้นลวดทองแดง
$B_{\max}$	คือ ความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุด

พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำคำนวณได้จากสมการ (3.17)

$$E = \frac{1}{2} L I_{L,\max}^2 \quad (3.17)$$

เมื่อ

$$I_{L,\max} = I_{L,\text{av}} + \frac{\Delta I_L}{2}$$

โดยที่

$I_{L,\max}$	คือ กระแสสูงสุดของตัวเหนี่ยวนำ
$I_{L,\text{av}}$	คือ กระแสเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta I_L$  คือ ริบเปิดของกระแสตัวเหนี่ยวนำ

พิจารณาขณะที่กระแสเอาต์พุตมีค่าสูงสุด  $I_{L,av} = I_o = 10 \text{ A}$  และกำหนดให้  $\Delta I_L = 1\% I_{L,av}$  จะได้  $I_{L,max} = 10.5 \text{ A}$  และ  $E = 3.63 \times 10^{-3}$  โดยกำหนดให้  $k_w = 0.6$   $k_c = 1$   $J = 3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  และ  $B_{max} = 0.1 \text{ T}$  นำไปแทนในสมการที่ (3.16) ทำให้ได้  $A_p = 40425 \text{ mm}^4$  จึงเลือกแกนเฟอร์ไรต์แบบ ETD44 ( $A_c = 174 \text{ mm}^2$   $A_w = 304 \text{ mm}^2$   $A_p = 52896 \text{ mm}^4$ ) ซึ่งมีค่าผลคูณพื้นที่  $A_p$  มากกว่าค่าที่คำนวณได้

ลวดที่ใช้พันตัวเหนี่ยวนำจะใช้แผ่นทองแดงเพื่อช่วยลดปริมาณฟลักซ์รั่วไหลเนื่องจากการพันด้วยลวดทองแดงจำนวนหลายเส้น โดยจำนวนรอบของแผ่นทองแดงคำนวณได้จากสมการที่ (3.18) [9]

$$N = \frac{L I_{L,max}}{A_c B_{max}} \quad (3.18)$$

โดยที่

$N$  คือ จำนวนรอบของแผ่นทองแดงของตัวเหนี่ยวนำ

จะได้  $N = 13$  รอบ ระยะของช่องอากาศ (air gap) ที่ทำให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการคำนวณได้จากสมการที่ (3.19) [9]

$$l_g = \frac{4\pi \times 10^{-7} N^2 A_c}{L} \quad (3.19)$$

โดยที่

$l_g$  คือ ความยาวของช่องอากาศ

จะได้  $l_g = 0.5598 \text{ mm}$

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C$  เป็นไปตามสมการที่ (3.20) [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{V_o}{\Delta V_o} \frac{T_{sw}^2}{8L} (1-D_{min}) \quad (3.20)$$

โดยที่

$\Delta V_o$  คือ ริปเปิลของแรงดันเอาต์พุต

กำหนดให้  $\Delta V_o = 5\%V_o$  จะได้ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า C มีค่า 13.39  $\mu\text{F}$  และเพื่อไม่ให้ริปเปิลของแรงดันเอาต์พุตเกินค่าที่กำหนด ความจุไฟฟ้าจะต้องมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ จึงเลือกตัวเก็บประจุ 300  $\mu\text{F}$  โดยการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีค่าความจุไฟฟ้า 100  $\mu\text{F}$  และมีค่า ESR คือ  $R_c = 0.2487 \Omega$  จำนวน 3 ตัวมาต่อขนานกันเพื่อลดค่า ESR ของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ทำให้ได้ค่า ESR รวม  $R_c = 0.0829 \Omega$

### 3.2 การออกแบบสร้างวงจรพีดีบีเอ็ม

การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวใช้วิธีการควบคุมแบบแรงดันโดยวงจรมีความถี่ในการสวิตช์ คือ 100 kHz ไอซีพีดีบีเอ็มที่เลือกใช้ คือ MC34025 ซึ่งมีวงจรเปรียบเทียบ วงจรขยายความผิดพลาด วงจรสร้างแรงดันอ้างอิง ฯลฯ อยู่ภายในตัวไอซี และสามารถนำไปขับมอสเฟตกำลังได้โดยตรง การสร้างคิวดิไซเคิลหรือสัญญาณเอาต์พุตของไอซีดังกล่าวให้ได้ความถี่ในการสวิตช์ที่ต้องการ ทำได้โดยการเลือกค่าความต้านทานของตัวต้านทานตั้งเวลา  $R_T$  (ต่อที่ขา 5 ของไอซี) และค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าตั้งเวลา  $C_T$  (ต่อที่ขา 6 ของไอซี) ให้เหมาะสม ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.21) และสมการที่ (3.22) ตามลำดับ

$$R_T = \frac{3}{10 \times 10^{-3} (1-D_{IC,max})} \quad (3.21)$$

$$C_T = \frac{0.8D_{IC,max}}{R_T f_{sw}} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

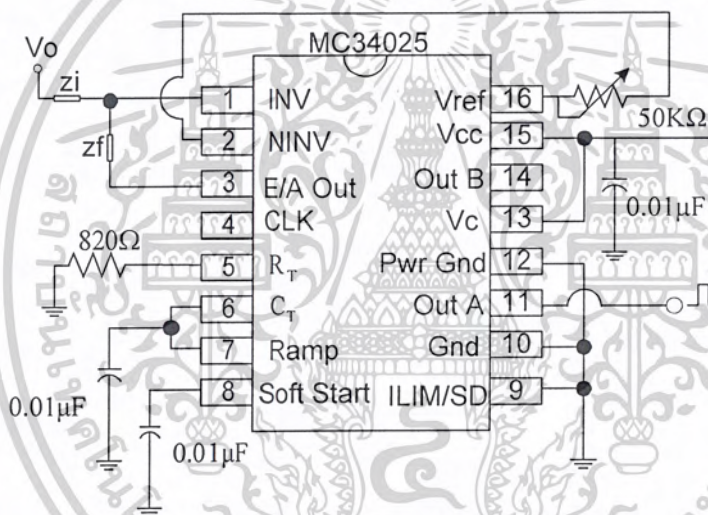
โดยที่

$R_T$  คือ ความต้านทานของตัวต้านทานตั้งเวลา  $R_T$

$C_T$  คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าตั้งเวลา  $C_T$

$D_{IC,max}$  คือ ดิวตี้ไซเคิลสูงสุดของไอซี

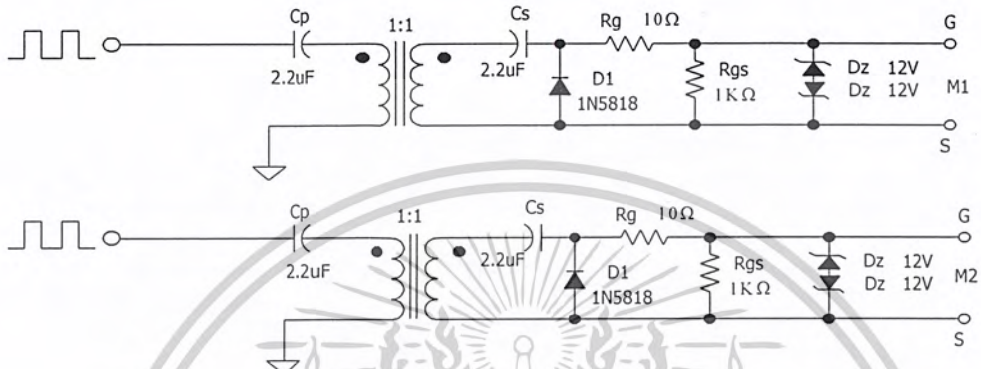
เมื่อ  $D_{IC,max} = 0.85$  จะได้  $R_T = 820 \Omega$  และ  $C_T = 0.01 \mu F$  การต่อขาต่างๆ ของ MC34025 แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การต่อขาต่างๆ ของ MC34025 ให้ทำงาน โดยวิธีการควบคุมแบบแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบสร้างวงจรขั้วเกดของมอสเฟตกำลังสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิทช์ 2 ตัว



รูปที่ 3.2 วงจรขั้วเกดของมอสเฟตกำลังสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิทช์ 2 ตัว

ในการขั้วเกดของมอสเฟตกำลังสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิทช์ 2 ตัว จำเป็นต้องสร้างวงจรขั้วเกดที่มีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรภาคกำลัง โดยวงจรขั้วเกดที่เลือกเป็นแบบใช้หม้อแปลงฟอร์เวิร์ดซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 [11] การออกแบบสร้างหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดดังกล่าวสามารถใช้แกนขนาดเล็กได้เนื่องจากส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจำนวนน้อย จึงเลือกแกนเฟอร์ไรต์แบบ EI-25 ( $A_c = 40.3 \text{ mm}^2$   $A_w = 81.0 \text{ mm}^2$   $A_p = 3264.3 \text{ mm}^4$ ) จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ดคำนวณได้จากสมการที่ (3.23)

$$N_p = \frac{V_{pri, pk} D_{max}}{A_c B_{max} f_{sw}} \quad (3.23)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $N_p$  คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด  
 $V_{pri.pk}$  คือ แรงดันสูงสุดทางด้านปฐมภูมิ

เมื่อ  $V_{pri.pk} = 15 \text{ V}$   $D_{max} = 0.45$  และ  $B_{max} = 0.2 \text{ T}$  จะได้  $N_p = 16$  รอบ และเลือกจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด ( $N_s$ ) ให้เท่ากับจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ คือ  $N_s = N_p = 11$  รอบ โดยลวดทองแดงที่ใช้พัน คือ ลวดทองแดงเบอร์ AWG 30 ( $a_{30} = 0.0507 \text{ mm}^2$   $\phi_{30} = 0.2540 \text{ mm}$ )

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ  $C_p$  ป้องกันกระแสคิซีไหลผ่านหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด เนื่องจากแรงดันอินพุตของวงจรขับเคลื่อนของมอสเฟตกำลัง (แรงดันเอาต์พุตของ MC34025) เป็นสัญญาณพัลส์บวกที่มีระดับอ้างอิงเป็นศูนย์ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_p$  ต้องเลือกค่าที่ทำให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (series resonance) เนื่องจากตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_p$  และตัวเหนี่ยวนำทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงฟอร์เวิร์ด  $L_p$  น้อยกว่าความถี่ในการสวิตช์อย่างเพียงพอ เมื่อเลือกความถี่เรโซแนนซ์เป็น 0.1 เท่าของความถี่ในการสวิตช์ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_p$  คำนวณได้จากสมการที่ (3.24)

$$C_p = \frac{100}{4\pi^2 f_{sw}^2 L_p} \quad (3.24)$$

โดยที่

- $C_p$  คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_p$   
 $L_p$  คือ ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ  $L_p$

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ  $C_s$  ไดโอดเรียงกระแส  $D_1$  ตัวต้านทาน  $R_s$  และ  $R_{s2}$  ต่อกันเป็นวงจรแคลมป์ (clamping circuit) ชนิดที่แรงดันตกคร่อมไดโอด  $D_1$  เป็นสัญญาณพัลส์บวกที่มีระดับอ้างอิงเป็นศูนย์ ค่าคงตัวของวงจรแคลมป์ต้องมากกว่าคาบเวลาในการสวิตช์อย่างเพียงพอเพื่อรักษาให้ขนาดของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_s$  คงที่ เมื่อเลือกค่าคงตัวของวงจรแคลมป์ไม่น้อยกว่า 10 เท่าของคาบเวลาในการสวิตช์ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_s$  คำนวณได้จากสมการที่ (3.25)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_s \geq \frac{10T_{sw}}{R_g + R_{gs}} \quad (3.25)$$

โดยที่

$C_s$  คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_s$

$R_g$  คือ ความต้านทานของตัวต้านทาน  $R_g$

$R_{gs}$  คือ ความต้านทานของตัวต้านทาน  $R_{gs}$

ตัวต้านทาน  $R_g$  ต่อเพื่อป้องกันการออสซิลเลตปรสิติก (parasitic oscillate) ที่ค่าความถี่ในการออสซิลเลตมีค่าสูงมาก การออสซิลเลตสามารถเกิดขึ้นได้จากตัวเก็บประจุไฟฟ้าเกต-ซอร์ส และตัวเหนี่ยวนำปรสิติกที่เกิดจากความยาวของสายนำสัญญาณในวงจรจับเกต นอกจากนี้ค่าความต้านทานของตัวต้านทาน  $R_g$  ยังใช้กำหนดช่วงเวลาขึ้น (rise time) ของแรงดันเกต-ซอร์ส เลือกร  $R_g = 10 \Omega$  เพื่อให้ช่วงเวลาขึ้นของแรงดันเกต-ซอร์สสั้นทำให้มอสเฟตกำลังทำการสวิตช์ด้วยความเร็วสูง ตัวต้านทาน  $R_{gs}$  ต่อเพื่อเป็นเส้นทางนำประจุไฟฟ้าออกจากเกตขณะมอสเฟตกำลังหยุดนำกระแสซีเนอร์ไดโอด  $D_z$  ต่อแบบอนุกรมเพื่อจำกัดขนาดของแรงดันสไปก์ (spike) ที่ตกคร่อมเกต-ซอร์สไม่ให้เกินพิกัดแรงดันเกต-ซอร์สของมอสเฟตกำลัง

## บทที่ 4

### การออกแบบสร้างวงจรถดเชยสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

การออกแบบวงจรถดเชยโดยวิธีผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นวิธีการออกแบบที่ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง และการวิเคราะห์คุณสมบัติรวมทั้งเสถียรภาพของระบบสามารถกระทำโดยพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด (open loop transfer function) ของระบบควบคุมป้อนกลับ การออกแบบวงจรถดเชยโดยวิธีนี้จะทำให้แผนภาพโบด (bode diagram) ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเชยเมื่อรวมกับแผนภาพโบดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเชยแล้วได้แผนภาพโบดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

#### 4.1 การออกแบบสร้างวงจรถดเชยแบบพีไอ

##### 4.1.1 การออกแบบสร้างวงจรถดเชยแบบพีไอก่อนการปรับปรุง

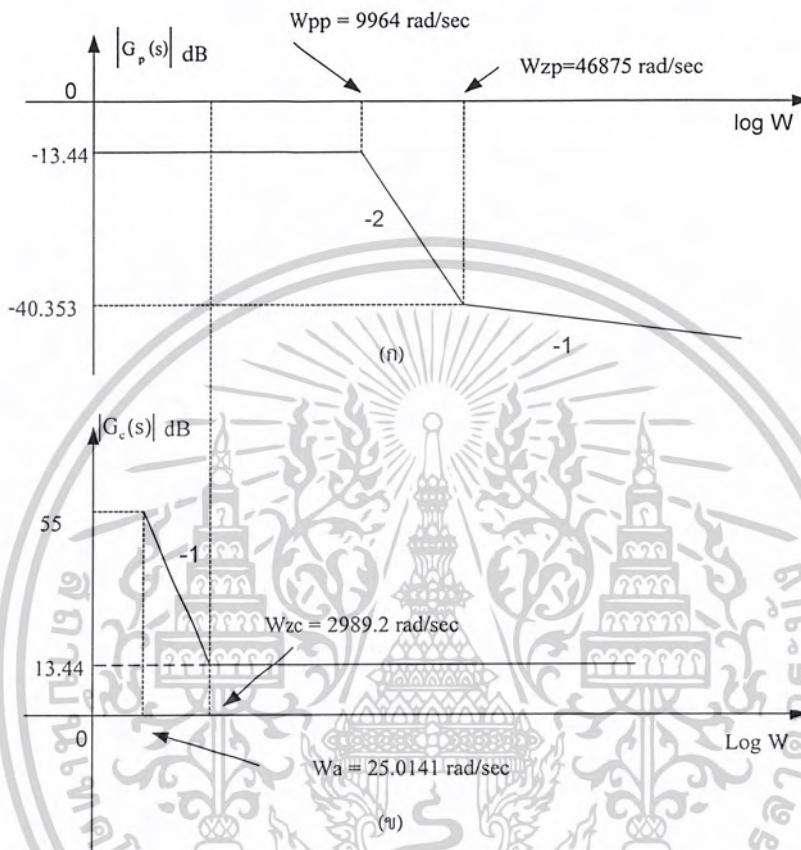
วงจรถดเชยที่เลือกใช้สำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว ทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง และใช้วิธีการควบคุมแบบแรงดัน คือ วงจรถดเชยแบบพีไอ ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตดังสมการที่ (2.3) โดยการออกแบบพิจารณาวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว กรณีที่แรงดันอินพุตต่ำสุด ( $V_{in,min} = 258 \text{ V}$ ) และกระแสเอาต์พุตสูงสุด ( $I_o = 10 \text{ A}$ ) เป็นหลักเนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ผลตอบสนองแย่มากที่สุด ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเชยในกรณีดังกล่าว ซึ่งได้จากผลคูณของสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) เมื่อ  $V_s = 1.8 \text{ V}$  (สำหรับ MC34025) แสดงได้ดังสมการที่ (4.1)

$$G_p(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \frac{\hat{d}(s)}{\hat{v}_c(s)} = 0.2128 \left[ \frac{(1+21.333 \times 10^{-6} s)}{1+140.845 \times 10^{-6} s + 10.072 \times 10^{-9} s^2} \right] \quad (4.1)$$

แผนภาพโบดแสดงอัตราขยายโดยการประมาณแอสซิมโทตแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(-1 คือ -20 dB/decade และ -2 คือ -40 dB/decade) โดยมีซีโรอันเนื่องมาจาก ESR ของตัวเก็บประจุ C อยู่ที่ความถี่  $W_{zp} = 46875 \text{ rad/sec}$  และโพลคู่อยู่ที่ความถี่  $W_{pp} = 9964 \text{ rad/sec}$



รูปที่ 4.1 แผนภาพโบดแสดงอัตราขยายในการออกแบบวงจรชดเชยแบบพีไอคอนการปรับปรุงสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบพอร์เวิร์คที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ (ก) วงจรภาคกำลัง (ข) วงจรชดเชย

การออกแบบวงจรชดเชยซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.1 สามารถแสดงได้เป็นขั้นตอน ดังต่อไปนี้

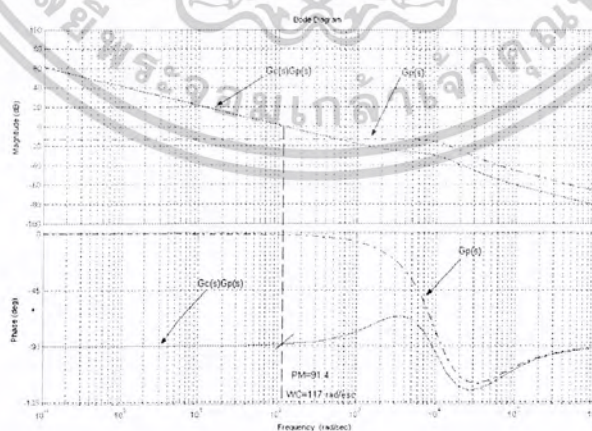
1. กำหนดให้  $W_{zc} = 0.3 W_{pp} = 29892.2 \text{ rad/sec}$  และจากรูปที่ 4.1(ก) อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง คือ -13.44 dB ดังนั้นจะได้อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชยเท่ากับ 13.44 dB
2. วางซีโรของวงจรชดเชยแบบพีไอที่  $W_{zc} = 29892.2 \text{ rad/sec}$
3. คำนวณค่าอุปกรณ์ชดเชยที่ใช้ ได้แก่  $R_1 = 18 \text{ K}\Omega$   $R_2 = 3.3 \text{ K}\Omega$   $C = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าอุปกรณืชดเชยไปแทนในสมการ(2.3)จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเชยดังสมการที่(4.2)

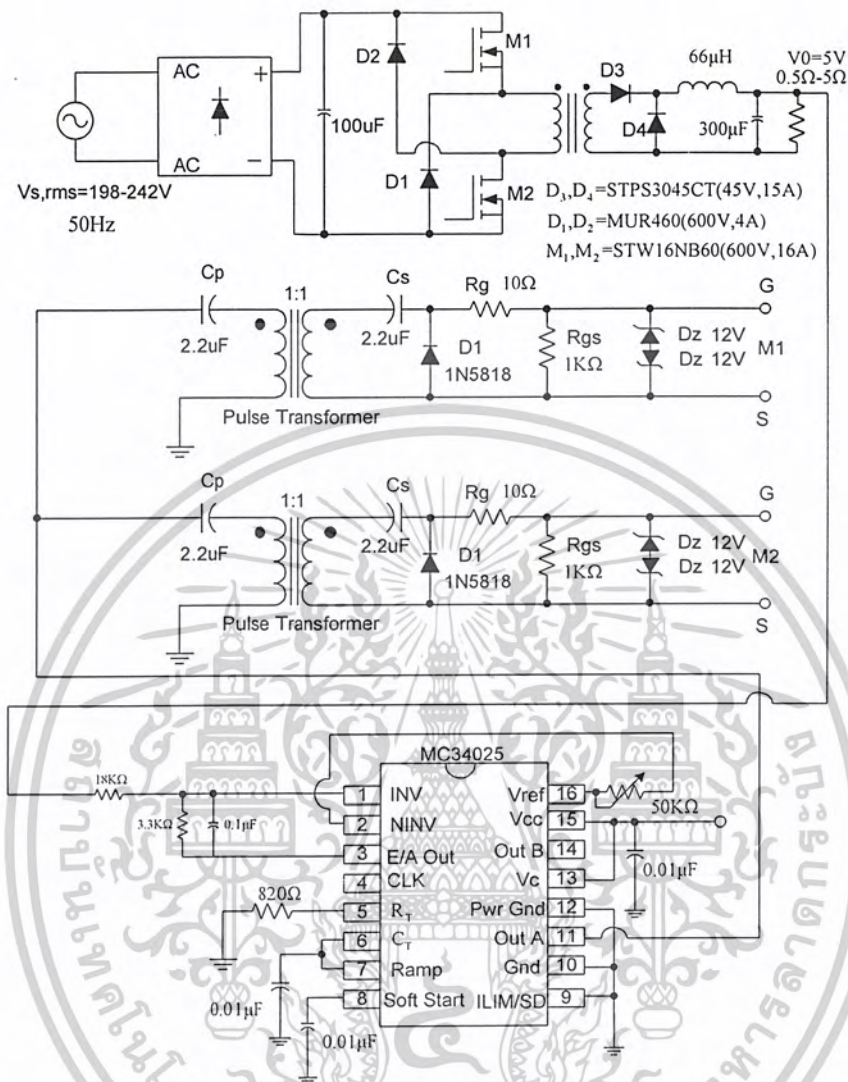
$$G_c(s) = \frac{\hat{v}_c(s)}{\hat{v}_o(s)} = \frac{1+0.33 \times 10^{-3}s}{1.8 \times 10^{-3}s} \quad (4.2)$$

ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากแผนภาพโบลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ได้จากการคูณจากสมการที่ (4.1) ด้วยสมการที่ (4.2) โดยการใช้โปรแกรม MATLAB (โปรแกรมที่ใช้แสดงในภาคผนวก ) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 เส้นประในรูปเป็นแผนภาพโบลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรถดเชย จะเห็นว่าไม่มีความถี่ครอสโอเวอร์ เส้นทึบในรูปที่ 4.2 เป็นแผนภาพโบลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถดเชย จะเห็นว่ามีความถี่ครอสโอเวอร์ มีค่าประมาณ 117 rad/sec ซึ่งน้อยกว่าค่าที่เลือกใช้ในการออกแบบ (29892.2 rad/sec) เนื่องจากแผนภาพโบลที่ใช้ในการออกแบบเป็นแผนภาพโบลโดยการประมาณแอสซิมโทตแต่แผนภาพโบลโดยการใช้โปรแกรม MATLAB เป็นแผนภาพโบลจริงของฟังก์ชันถ่ายโอน รวมถึงค่าอุปกรณืชดเชยที่เลือกใช้ได้มาจากการปิดค่าที่คำนวณได้ให้เป็นค่ามาตรฐาน อัตราขยายที่ความถี่ต่ำมีค่าประมาณ 42 dB และเฟสมาร์จินมีค่าประมาณ 91.4° แสดงว่าวงจรถดเชยที่ออกแบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพวงจรถดเชยแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิทซ์ 2 ตัวในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง พร้อมวงจรถดเชยกลับแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แผนภาพโบลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดก่อนการปรับปรุงของวงจรถดเชยแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิทซ์ 2 ตัวทำงานในโหมด CCM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



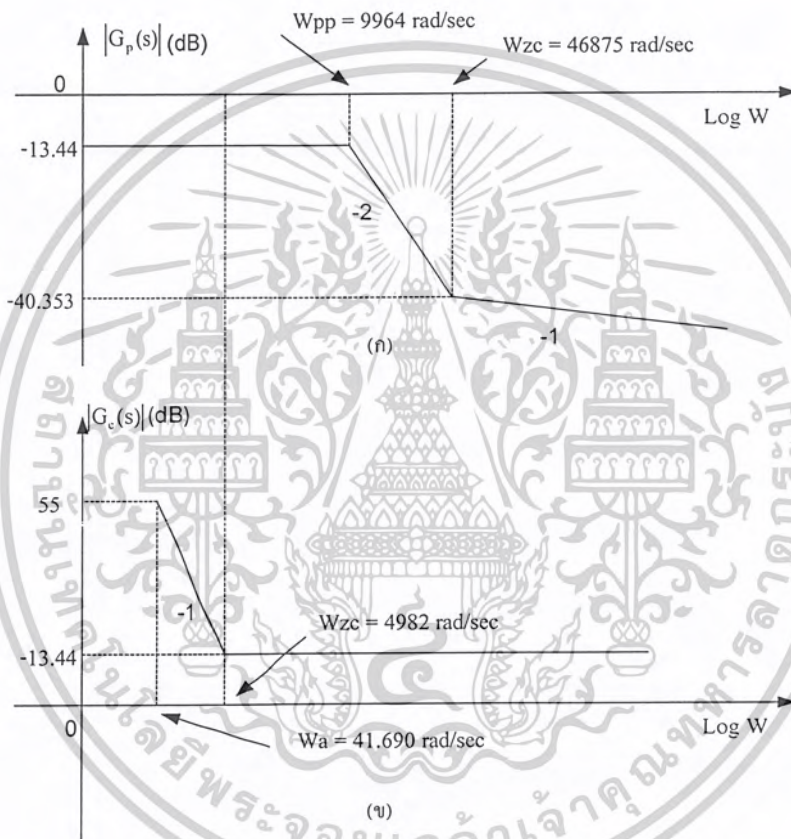
รูปที่ 4.3 วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟูลบริดจ์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM ก่อนการปรับปรุง พร้อมวงจรป้อนกลับ

#### 4.1.2 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบฟีดแบ็กหลังการปรับปรุง

วงจรชดเชยที่เลือกใช้สำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟูลบริดจ์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว ทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง และใช้วิธีการควบคุมแบบแรงดัน คือ วงจรชดเชยแบบฟีดแบ็ก ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุตดังสมการที่ (2.2) โดยในการออกแบบพิจารณาวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟูลบริดจ์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว กรณีที่แรงดันอินพุตต่ำสุด ( $V_{ip,min} = 258 \text{ V}$ ) และกระแสเอาต์พุตสูงสุด ( $I_o = 10 \text{ A}$ ) เป็นหลักเนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองแยกที่สุด ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกำลังในกรณีดังกล่าว ซึ่งได้จากผลคูณของสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) เมื่อ  $V_s = 1.8 \text{ V}$  (สำหรับ MC34025) แสดงได้ดังสมการที่ (4.1)

แผนภาพโบคแสดงอัตราขยายโดยการประมาณแอสซิมโทตแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 (ก) (-1 คือ -20 dB/decade และ -2 คือ -40 dB/decade) โดยมีซีโรอันเนื่องมาจาก ESR ของตัวเก็บประจุ C อยู่ที่ความถี่  $W_{zp} = 46875 \text{ rad/sec}$  และ โพลคู่อยู่ที่ความถี่  $W_{pp} = 9964 \text{ rad/sec}$



รูปที่ 4.4 แผนภาพโบคแสดงอัตราขยายในการออกแบบวงจรชดเชยแบบพีโอหลังการปรับปรุงสำหรับวงจร แปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ (ก) วงจรกำลัง (ข) วงจรชดเชย

การออกแบบวงจรชดเชยซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.1 สามารถแสดงได้เป็นขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้  $W_{zc} = 0.5 W_p = 4982 \text{ rad/sec}$  และจากรูปที่ 4.4(ก) อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกำลัง คือ -13.44 dB ดังนั้นจะได้อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรชดเชยเท่ากับ 13.44 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

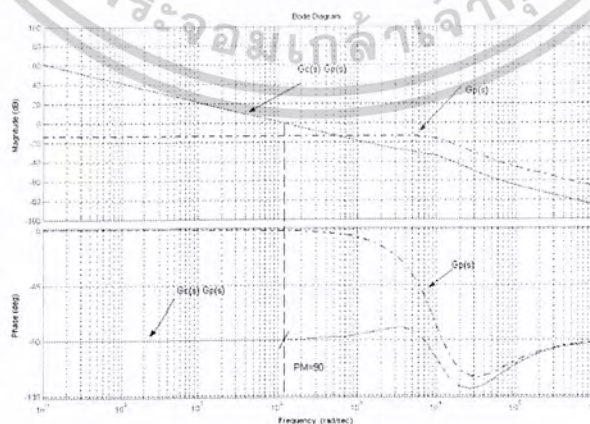
2. วงจรโร้ของวงจรถดเซชพีไอที่  $W_{zc} = 4892 \text{ rad/sec}$

3. คำนวณค่าอุปกรณ์ชดเซชที่ใช้ ได้แก่  $R_1 = 18 \text{ K}\Omega$   $R_2 = 2 \text{ K}\Omega$   $C = 0.1 \mu\text{F}$

นำค่าอุปกรณ์ชดเซชไปแทนในสมการ (2.3) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเซชดังสมการที่ (4.3)

$$G_c(s) = \frac{\hat{v}_c(s)}{\hat{v}_o(s)} = \frac{1+0.2 \times 10^{-3}s}{1.8 \times 10^{-3}s} \quad (4.3)$$

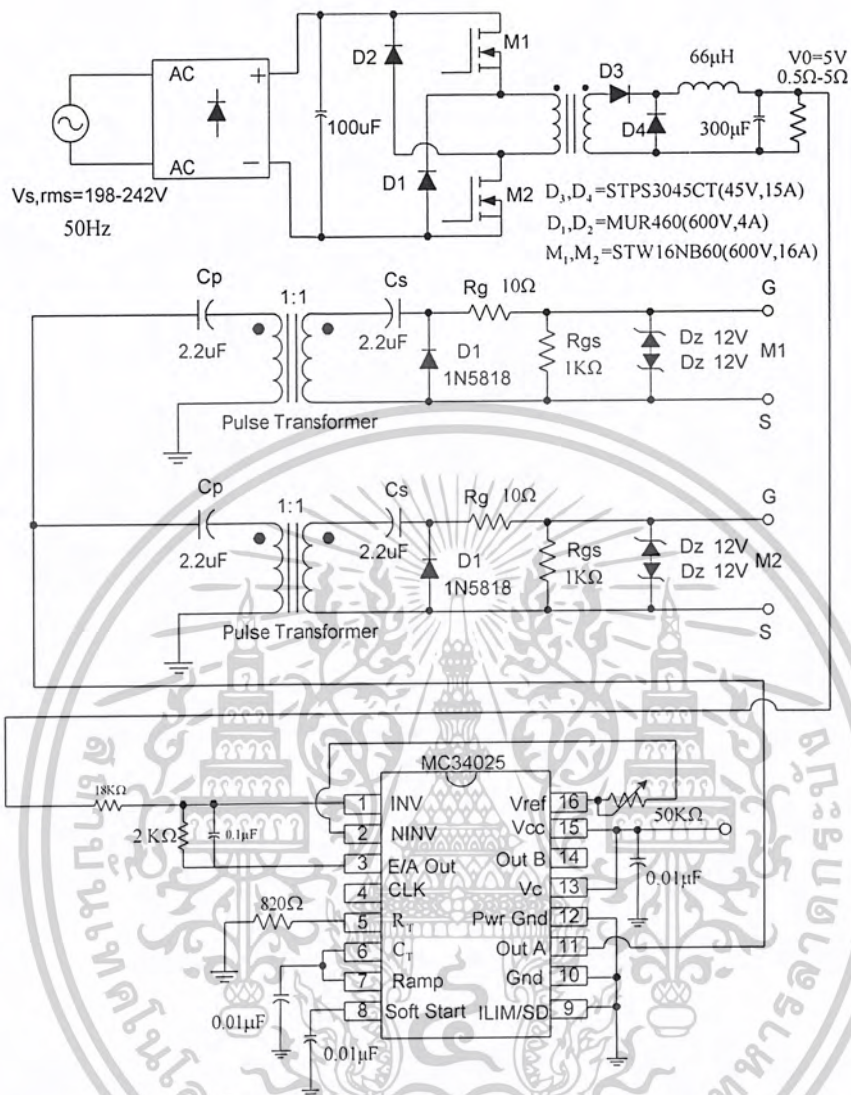
ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากแผนภาพโบลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ได้จากการคูณจากสมการที่ (4.1) ด้วยสมการที่ (4.3) โดยการใช้โปรแกรม MATLAB (โปรแกรมที่ใช้แสดงในภาคผนวก) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 เส้นประในรูปเป็นแผนภาพโบลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรถดเซชกำลัง จะเห็นว่าไม่มีความถี่ครอสโอเวอร์ เส้นทึบในรูปที่ 4.5 เป็นแผนภาพโบลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรถดเซชกำลังเมื่อรวมวงจรถดเซช จะเห็นว่ามีความถี่ครอสโอเวอร์ มีค่าประมาณ  $213 \text{ rad/sec}$  ซึ่งน้อยกว่าค่าที่เลือกใช้ในการออกแบบ ( $4982 \text{ rad/sec}$ ) เนื่องจากแผนภาพโบลที่ใช้ในการออกแบบเป็นแผนภาพโบลโดยการประมาณแอสซิมโทตแต่แผนภาพโบลโดยการใช้โปรแกรม MATLAB เป็นแผนภาพโบลจริงของฟังก์ชันถ่ายโอน รวมถึงค่าอุปกรณ์ชดเซชที่เลือกใช้ได้มาจากการปิดค่าที่คำนวณได้ให้เป็นค่ามาตรฐาน อัตราขยายที่ความถี่ต่ำมีค่าประมาณ  $40.9 \text{ dB}$  และเฟสมาร์จินมีค่าประมาณ  $90^\circ$  แสดงว่าวงจรถดเซชที่ออกแบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพวงจรถดเซชแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิทช์ 2 ตัวในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง พร้อมวงจรถดเซชกลับแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 แผนภาพโบลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดหลังการปรับปรุงของวงจรถดเซชแปลงผันแรงดัน

แบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้ สวิทช์ 2 ตัวทำงานในโหมด CCM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 วงจรแปลงผันแรงดันวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM พร้อมวงจรป้อนกลับ หลังการปรับปรุง

## 4.2 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร

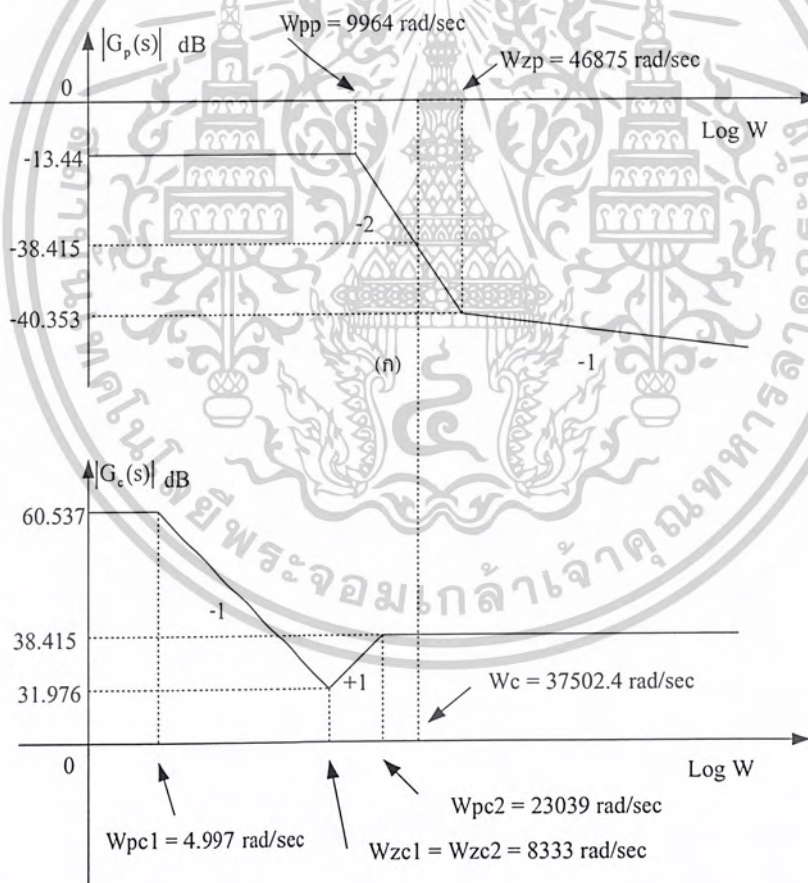
### 4.2.1 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรก่อนการปรับปรุง

วงจรชดเชยที่เลือกใช้สำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวที่ทำงานในโหมด CCM และใช้วิธีการควบคุมแบบแรงดัน คือ วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุต โดยในการออกแบบวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวกรณีที่แรงดันอินพุตต่ำสุด ( $V_{in,min} = 258 \text{ V}$ ) และกระแสเอาต์พุตสูงสุด ( $I_o = 10 \text{ A}$ ) เป็นหลักเนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ผลตอบสนองแย่มาก ฟังก์ชันถ่ายโอนอีกสำเนาเป็นอีกสำเนาที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอบนของวงจรกาศก้าลิ่งในกรณั้ดั่งกล่าว เมื่อ  $V_s = 1.8 \text{ V}$  (สำหรับ MC34025) แสดงได้ดั่งสมการที่ (4.4)

$$G_p(s) = \frac{\hat{v}_o(s) \hat{d}(s)}{\hat{d}(s) \hat{v}_c(s)} = 0.2128 \left[ \frac{(1+21.333 \times 10^{-6} s)}{1+140.845 \times 10^{-6} s+10.072 \times 10^{-9} s^2} \right] \quad (4.4)$$

แผนภาพโอบนแสดงอัตราขยายโดยการประมาณแอสซิมโทตแสดงได้ดั่งรูปที่ 4.7(ก) (-1 คือ -20 dB/decade และ -2 คือ -40 dB/decade) โดยมีซีโอรันเนื่องมาจาก ESR ของตัวเก็บประจุ C อยู่ทีความถี่  $W_{zp} = 46875 \text{ rad/sec}$  และโพลอยู่ทีความถี่  $W_{pp} = 9964 \text{ rad/sec}$



รูปที่ 4.7 แผนภาพโอบนแสดงอัตราขยายในการออกแบบวงจรถดเชยก่อนการปรับปรุงสำหรับวงจรถดเชยแรงดัน แบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ (ก) วงจรกาศก้าลิ่ง (ข) วงจรถดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรชดเชยซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2 สามารถแสดงได้เป็นขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้  $W_c = 0.8 W_z = 37502.4 \text{ rad/sec}$  และจากรูปที่ 4.7(ก) อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถูกกำลัง คือ  $-38.415 \text{ dB}$  ดังนั้นจะได้อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเชยเท่ากับ  $38.415 \text{ dB}$

2. วางโพลตัวที่หนึ่งของวงจรถดเชยที่  $W_{p1} = 4.997 \text{ rad/sec}$  (ที่ความถี่ต่ำ)

3. วางโพลตัวที่สองของวงจรถดเชยที่  $W_{p2} = 23039 \text{ rad/sec}$  (ใกล้กับ  $W_z = 46875 \text{ rad/sec}$ )

4. วางซีโรทั้งสองตัวของวงจรถดเชยที่  $W_{z1} = W_{z2} = 8333 \text{ rad/sec}$  (ใกล้กับ  $W_p = 9964 \text{ rad/sec Hz}$ )

5. คำนวณค่าอัตราขยายจากรูปที่ 4.7(ข) (+1 คือ  $+20 \text{ dB/decade}$ ) จะได้

-อัตราขยายที่  $W_{p2}$  เท่ากับอัตราขยายที่  $W_c$  คือ  $38.4152 \text{ dB}$

-อัตราขยายที่  $W_{z1}$  และอัตราขยายที่  $W_{z2}$  คือ  $31.976 \text{ dB}$

-อัตราขยายที่  $W_{p1}$  คือ  $60.537 \text{ dB}$

-อัตราขยายคี่ซึ่งเท่ากับอัตราขยายที่  $W_{p1}$  คือ  $60.537 \text{ dB}$  ( $1063.8$ )

คำนวณค่าอุปกรณ์ชดเชยที่ใช้ ได้แก่  $R_1 = 680 \Omega$   $R_2 = R_4 = 1200 \Omega$   $R_3 = 2 \text{ M}\Omega$

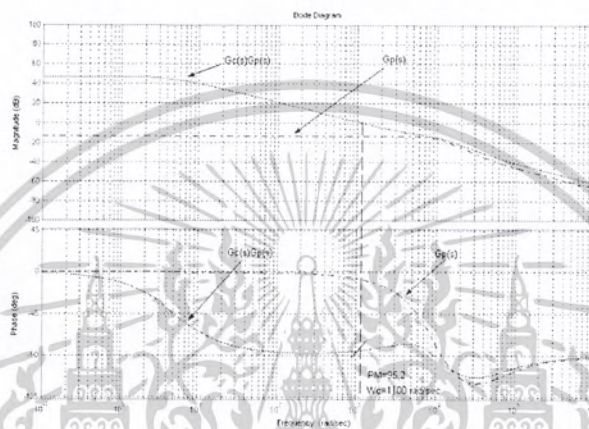
และ  $C_1 = C_2 = 0.1 \mu\text{F}$

นำค่าอุปกรณ์ชดเชยไปแทนในสมการ(2.3)จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเชยดังสมการที่ (4.5)

$$G_p(s) = \frac{\hat{v}_o(s) \hat{d}(s)}{\hat{d}(s) \hat{v}_c(s)} = 1063.8 \left[ \frac{(1+0.12 \times 10^{-3}s)(1+0.12 \times 10^{-3}s)}{(1+0.2s)(1+0.043s)} \right] \quad (4.5)$$

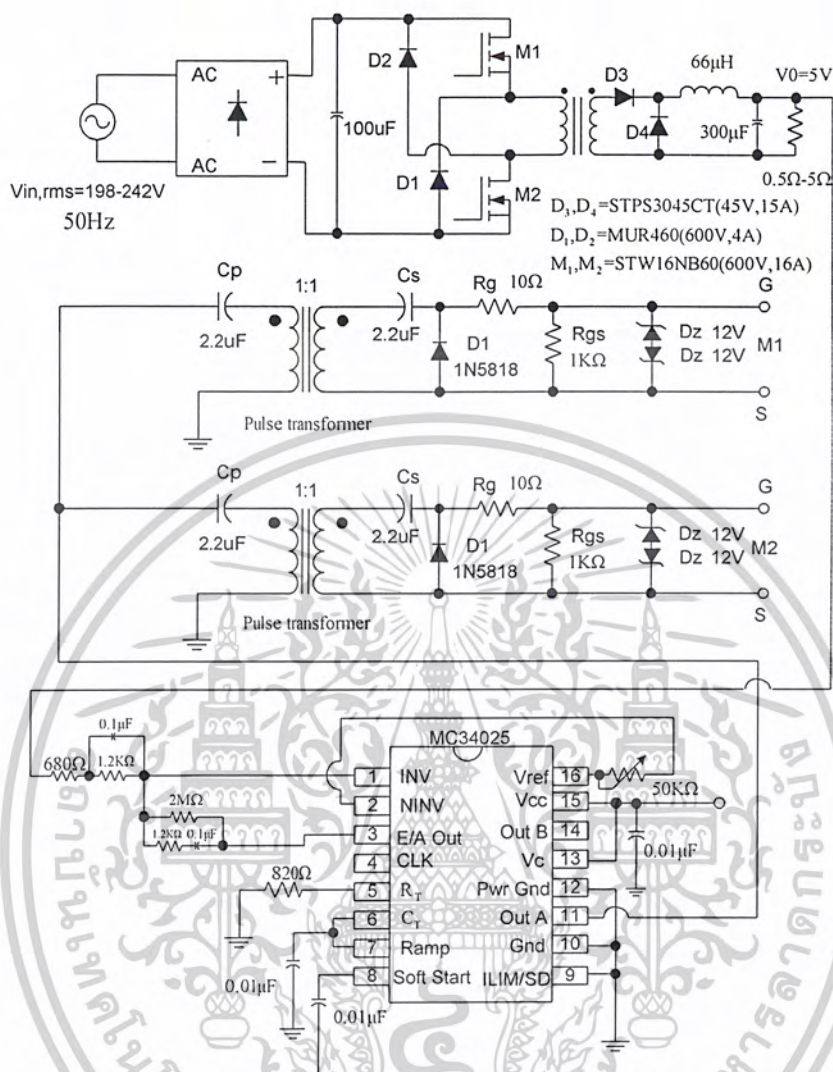
ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากแผนภาพโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ได้จากการคูณจากสมการที่ (4.1) ด้วยสมการที่ (4.20) โดยการใช้โปรแกรม MATLAB (โปรแกรมที่ใช้แสดงในภาคผนวก) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 เส้นประในรูปเป็นแผนภาพโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรถูกกำลัง จะเห็นว่าไม่มีความถี่ครอสโอเวอร์ เส้นทึบในรูปที่ 4.7 เป็นแผนภาพโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรถูกกำลังเมื่อรวมวงจรถดเชย จะเห็นว่ามีความถี่ครอสโอเวอร์ มีค่าประมาณ  $1100 \text{ rad/sec}$  ซึ่งน้อยกว่าค่าที่เลือกใช้ในการออกแบบ ( $37502.4 \text{ rad/sec}$ ) เนื่องจากแผนภาพโพลที่ใช้ในการออกแบบเป็นแผนภาพโพลโดยการประมาณแอสซิมโทตแต่แผนภาพโพลโดยการใช้โปรแกรม MATLAB เป็นแผนภาพโพลจริงของฟังก์ชันถ่ายโอน รวมถึงค่าอุปกรณ์ชดเชยที่เลือกใช้ได้มาจากการปิดค่าที่คำนวณได้ให้เป็นค่ามาตรฐาน อัตราขยายที่ความถี่ต่ำมีค่าประมาณ  $46.9 \text{ dB}$  และเฟสมีาร์จินมีค่าประมาณ  $95.2^\circ$  แต่ต้องระวังวงจรถดเชยที่เอกรวมค่าการประมาณค่าและการประมาณค่าไม่ได้แต่ต้องระวังการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมถึงค่าอุปกรณ์ซดเซชที่เลือกใช้ได้มาจากการปิดค่าที่คำนวณได้ให้เป็นค่ามาตรฐาน อัตราขยายที่ความถี่ต่ำมีค่าประมาณ 46.9 dB และเฟสมาร์จินมีค่าประมาณ  $95.2^\circ$  แสดงว่าวงจรซดเซชที่ออกแบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM พร้อมวงจรป้อนกลับแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนภาพโบดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดก่อนการปรับปรุงของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟูลบริดจ์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM พร้อมวงจรป้อนกลับ ก่อนการปรับปรุง

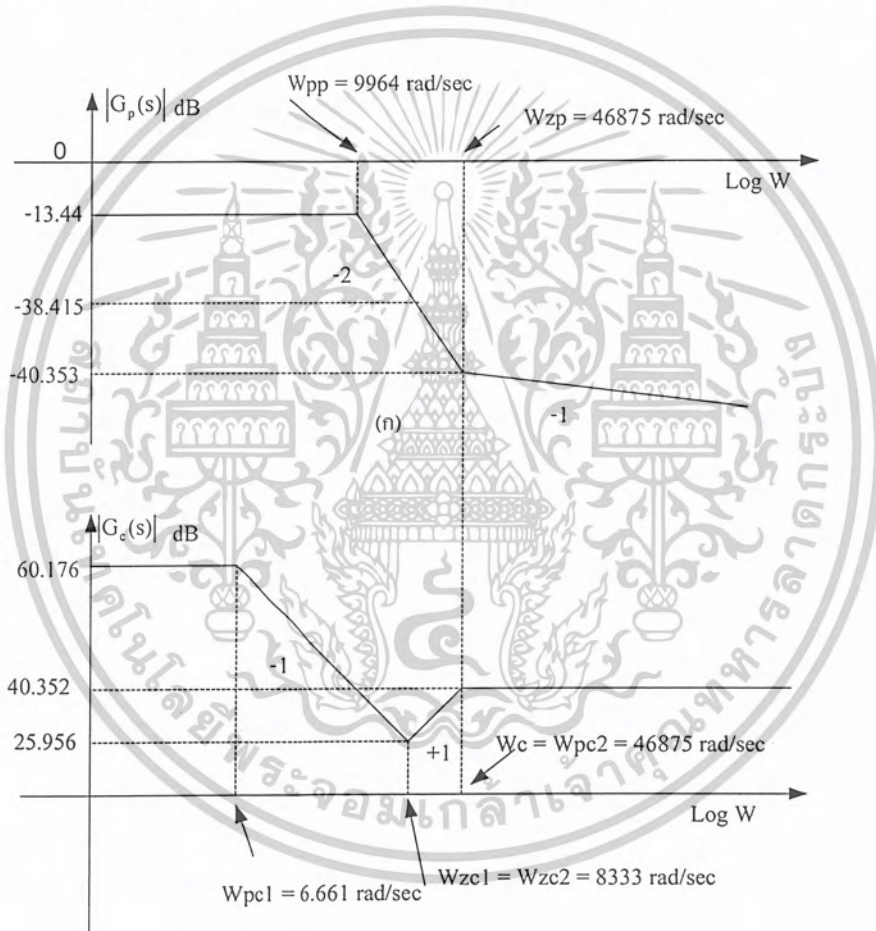
#### 4.2.2 การออกแบบสร้างวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรหลังปรับปรุง

วงจรชดเชยที่เลือกใช้สำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟูลบริดจ์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวที่ทำงานในโหมด CCM และใช้วิธีการควบคุมแบบแรงดัน คือ วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันเอาต์พุต โดยในการออกแบบวงจรแปลงผัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวกรณีที่แรงดันอินพุตต่ำสุด ( $V_{in,min} = 258 \text{ V}$ ) และกระแสเอาต์พุตสูงสุด ( $I_o = 10 \text{ A}$ ) เป็นหลักเนื่องจากเป็นกรณีที่ให้ผลตอบสนองแย่มากที่สุด ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถูกจำลองในกรณีดังกล่าว เมื่อ  $V_s = 1.8 \text{ V}$  (สำหรับ MC34025) แสดงได้ดังสมการที่ (4.4)

แผนภาพโพลแสดงอัตราขยายโดยการประมาณแอสซิมโทตแสดงได้ดังรูปที่ 4.7(ก) (-1 คือ  $-20 \text{ dB/decade}$  และ -2 คือ  $-40 \text{ dB/decade}$ ) โดยมีซีโรอันเนื่องมาจาก ESR ของตัวเก็บประจุ C อยู่ที่ความถี่  $W_{zp} = 46875 \text{ rad/sec}$  และโพลคู่อยู่ที่ความถี่  $W_{pp} = 9964 \text{ rad/sec}$



รูปที่ 4.10 แผนภาพโพลแสดงอัตราขยายในการออกแบบวงจรชดเชยสำหรับวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ (ก) วงจรภาคกำลัง (ข) วงจรชดเชย การออกแบบวงจรชดเชยซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2 สามารถแสดงได้เป็นขั้นตอน ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กำหนดให้  $W_c = W_z = 46875 \text{ rad/sec}$  และจากรูปที่ 4.7(ก) อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอดค่าคือ  $-40.352 \text{ dB}$  ดังนั้นจะได้อัตราขยายที่ความถี่ครอสโอเวอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเชยเท่ากับ  $40.352 \text{ dB}$

2. วางโพลตัวที่หนึ่งของวงจรถดเชยที่  $W_{p1} = 1.773 \text{ rad/sec}$  (ที่ความถี่ต่ำ)

3. วางโพลตัวที่สองของวงจรถดเชยที่  $W_{p2} = 46875 \text{ rad/sec}$  (ใกล้กับ  $W_z = 46875 \text{ rad/sec}$ )

4. วางซีโรทั้งสองตัวของวงจรถดเชยที่  $W_{z1} = W_{z2} = 8935.2 \text{ rad/sec}$  (ใกล้กับ  $W_p = 9964 \text{ rad/sec Hz}$ )

5. คำนวณค่าอัตราขยายจากรูปที่ 4.7(ข) (+1 คือ  $+20 \text{ dB/decade}$ ) จะได้

-อัตราขยายที่  $W_{p2}$  เท่ากับอัตราขยายที่  $W_c$  คือ  $40.352 \text{ dB}$

-อัตราขยายที่  $W_{z1}$  และอัตราขยายที่  $W_{z2}$  คือ  $25.956 \text{ dB}$

-อัตราขยายที่  $W_{p1}$  คือ  $60.17 \text{ dB}$

-อัตราขยายดีซีเท่ากับอัตราขยายที่  $W_{p1}$  คือ  $60.17 \text{ dB}$  (1020)

คำนวณค่าอุปกรณ์ชดเชยที่ใช้ ได้แก่  $R_1 = 270 \Omega$   $R_2 = R_4 = 1200 \Omega$   $R_3 = 1.5 \text{ M}\Omega$

และ  $C_1 = C_2 = 0.1 \mu\text{F}$

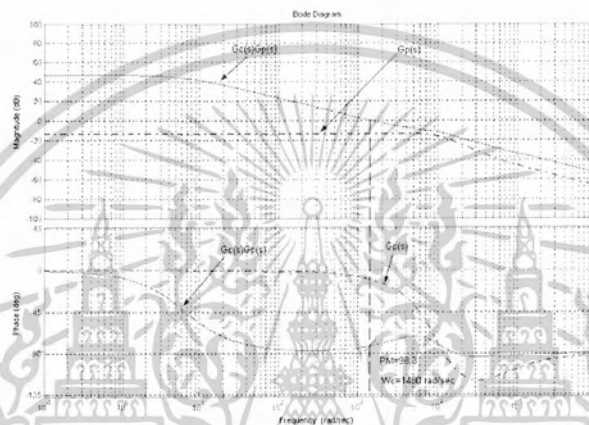
นำค่าอุปกรณ์ชดเชยไปแทนในสมการ(2.3)จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถดเชยดังสมการที่ (4.6)

$$G_p(s) = \frac{\hat{v}_o(s) \hat{d}(s)}{\hat{d}(s) \hat{v}_c(s)} = 1020 \left[ \frac{(1+0.12 \times 10^{-3} s)(1+0.12 \times 10^{-3} s)}{(1+0.15s)(1+0.022 \times 10^{-3} s)} \right] \quad (4.6)$$

ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากแผนภาพโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ได้จากการคูณจากสมการที่ (4.1) ด้วยสมการที่ (4.6) โดยการใช้โปรแกรม MATLAB (โปรแกรมที่ใช้แสดงในภาคผนวก) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 เส้นประในรูปเป็นแผนภาพโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรถอดค่า จะเห็นว่าไม่มีความถี่ครอสโอเวอร์ เส้นทึบในรูปที่ 4.11เป็นแผนภาพโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรถดเชย จะเห็นว่ามีความถี่ครอสโอเวอร์ มีค่าประมาณ  $1480 \text{ rad/sec}$  ซึ่งน้อยกว่าค่าที่เลือกใช้ในการออกแบบ ( $46875 \text{ rad/sec}$ ) เนื่องจากแผนภาพโพลที่ใช้ในการออกแบบเป็นแผนภาพโพลโดยการประมาณแอสซิมโทตแต่แผนภาพโพลโดยการใช้โปรแกรม MATLAB เป็นแผนภาพโพลจริงของฟังก์ชันถ่ายโอน รวมถึงค่าอุปกรณ์ชดเชยที่เลือกใช้ได้มาจากการปิดค่าที่คำนวณได้ให้เป็นค่ามาตรฐาน อัตราขยายที่ความถี่ต่ำมีค่าประมาณ  $46.6 \text{ dB}$  และเฟสมาร์จิ้นมีค่าประมาณ  $98.3^\circ$  แสดงว่าวงจรถดเชยที่ออกแบบทำให้

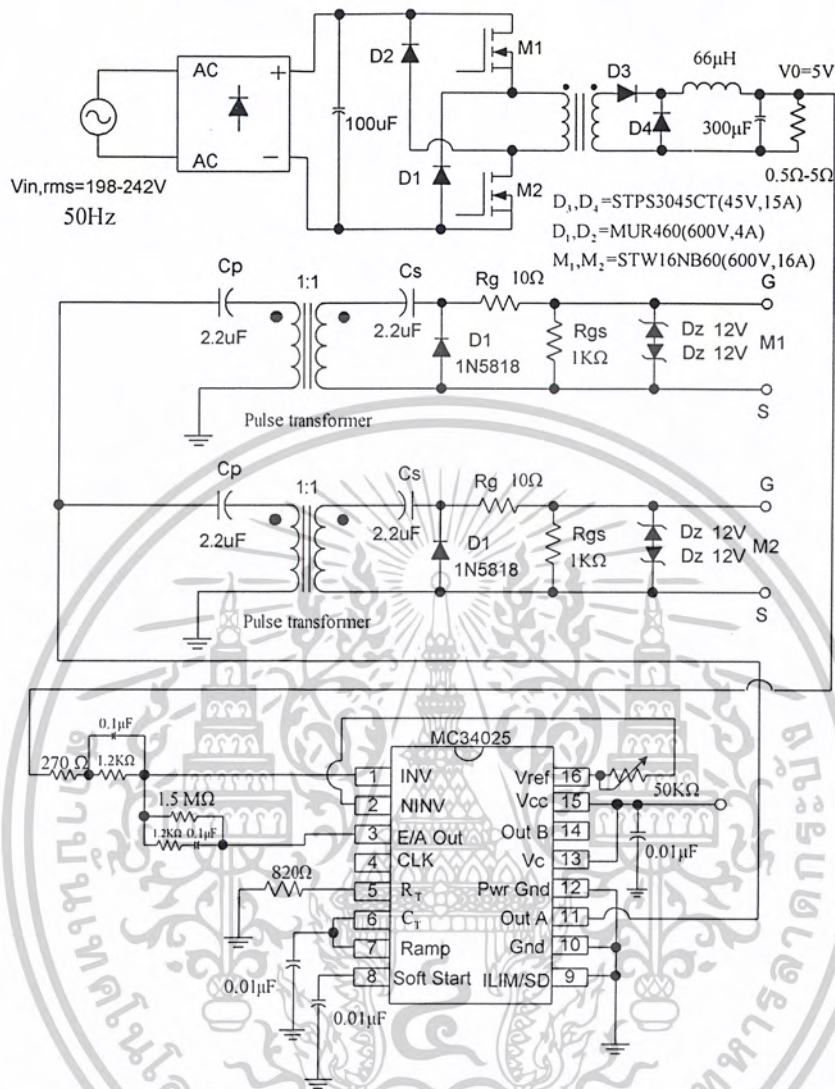
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพโพลไดโกรมที่ใช้โปรแกรม MATLAB เป็นแผนภาพโพลจริงของฟังก์ชันถ่ายโอน รวมถึงค่าอุปกรณ์ชุดเซย์ที่เลือกใช้ได้มาจากการปิดค่าที่คำนวณได้ให้เป็นค่ามาตรฐาน อัตราขยายที่ความถี่ต่ำมีค่าประมาณ 46.6 dB และเฟสมาร์จินมีค่าประมาณ  $98.3^\circ$  แสดงว่าวงจรชุดเซย์ที่ออกแบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM พร้อมวงจรป้อนกลับแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แผนภาพ โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดหลังการปรับปรุงวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วงจรแปลงผันแรงดันแบบฟูลบริดจ์ที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวในโหมด CCM พร้อมวงจรป้อนกลับ หลังการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ ให้ทำงานได้ตรงตามคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical specification) ยังไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานและความต้องการ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ดี ต้องมีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ดี ความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และประสิทธิภาพในการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตช์ การทดลองจะมุ่งเน้นไปที่ความสามารถทั้งสามประการตามที่ได้นำเสนอไปแล้ว โดยอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ ได้แก่

1. Digital Oscilloscope ของ Tektronix รุ่น TDS754D
2. Digital Oscilloscope ของ Yokogawa รุ่น DL1520
3. Voltage Probe ของ Tektronix รุ่น P6139A
4. High-Voltage Differential Probe ของ Tektronix รุ่น P5205
5. Current Probe ของ Tektronix รุ่น TCP202 (15A Max.)
6. DC Power Supply ของ Analab รุ่น APS-1
7. Autotransformer ของ Matsunaga

#### 5.1 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

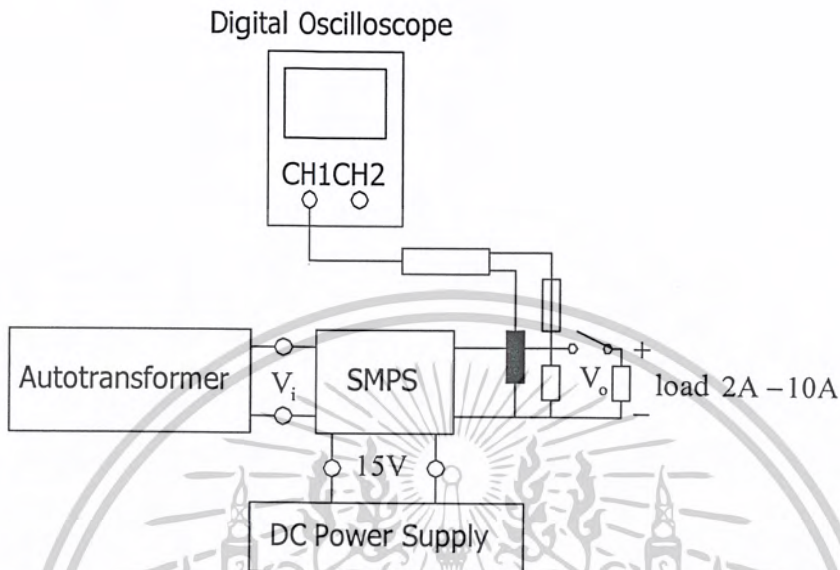
5.1.1 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5.1
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง 15 V จาก DC Power Supply ให้วงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 198 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กระแสเอาต์พุต 1 A จนถึง 10 A
5. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 220 V และ 240 V จาก Autotransformer ให้กับวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคกำลัง ตามลำดับและทำการทดลองตามข้อที่ 4.



รูปที่ 5.1 การจัดชุดทดลองสำหรับการทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์ดที่ใช้ สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI

กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	5.016 V	5.013 V	5.010 V	5.008 V	5.006 V
$V_{in} = 220 \text{ V}$	5.016 V	5.013 V	5.011 V	5.009 V	5.007 V
$V_{in} = 242 \text{ V}$	5.015 V	5.013 V	5.010 V	5.008 V	5.006 V

### 5.1.2 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร

#### วิธีการทดลอง

##### 1. จัดชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง 15 V จาก DC Power Supply ให้วงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 198 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กระแสเอาต์พุต 1 A จนถึง 10 A
5. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 220 V และ 240 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง ตามลำดับและทำการทดลองตามข้อที่ 4.

**ตารางที่ 5.2** ผลการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโร

กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	5.004 V	5.000 V	4.997 V	4.994 V	4.991 V
$V_{in} = 220 \text{ V}$	5.004 V	5.000 V	4.997 V	4.994 V	4.991 V
$V_{in} = 242 \text{ V}$	5.004 V	5.000 V	4.997 V	4.994 V	4.991 V

**5.1.3 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อมีการปรับปรุงวงจรชดเชย**

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5.1
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง 15 V จาก DC Power Supply ให้วงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 198 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. เปลี่ยนค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบ PI ตามตารางที่ 5.3 ตามลำดับ
5. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กระแสเอาต์พุต 1 A จนถึง 10 A
6. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 220 V และ 240 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง ตามลำดับและทำการทดลองตามข้อที่ 4.
7. เปลี่ยนค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบ สอง โพลสองซีโร ตามตารางที่ 5.4 ทำการทดลองตามข้อที่ 5 และข้อที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบ PI เมื่อมีการปรับปรุงวงจรถดเชยโดยการเพิ่มอัตราขยาย

กรณี	ก่อนการปรับปรุง	หลักการปรับปรุง	
	อัตราขยาย=0.183	อัตราขยาย=0.33	อัตราขยาย=0.66
$R_1$	18k $\Omega$	10k $\Omega$	5k $\Omega$
$R_2$	3.3k $\Omega$	3.3k $\Omega$	3.3k $\Omega$
C	0.1 $\mu$ F	0.1 $\mu$ F	0.1 $\mu$ F

ตารางที่ 5.4 ค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรเมื่อมีการปรับปรุงวงจรถดเชยโดยออกแบบให้ตำแหน่งความถี่ซีโรตัวที่สอง ( $\omega_{zC2}$ ) ของวงจรถดเชยมีตำแหน่งตรงกับตำแหน่งความถี่โพลตัวที่สอง ( $\omega_{pC2}$ ) ของวงจรถดเชย

กรณี	ค่าอุปกรณ์ชดเชย					
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$C_1$	$C_2$
ก่อนการปรับปรุง	680 $\Omega$	1.2k $\Omega$	2M $\Omega$	1.2k $\Omega$	0.1 $\mu$ F	0.1 $\mu$ F
หลังการปรับปรุง	270 $\Omega$	1.2k $\Omega$	1.5M $\Omega$	1.2k $\Omega$	0.1 $\mu$ F	0.1 $\mu$ F

ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.5 ผลการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ดที่ใส่สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรถดเชยแบบ PI โดยเพิ่มอัตราขยาย = 0.33

กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	5.010 V	5.007 V	5.004 V	5.002 V	4.999 V
$V_{in} = 220 \text{ V}$	5.010 V	5.007V	5.005 V	5.002 V	4.999 V
$V_{in} = 242 \text{ V}$	5.010 V	5.007 V	5.004 V	5.002 V	4.999 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ผลการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI โดยเพิ่มอัตราขยาย = 0.66

กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	5.005 V	5.002 V	4.999 V	4.9957 V	4.995 V
$V_{in} = 220 \text{ V}$	5.005 V	5.002 V	4.999 V	4.9957 V	4.995 V
$V_{in} = 242 \text{ V}$	5.005 V	5.002 V	4.999 V	4.9957 V	4.995 V

ตารางที่ 5.7 ผลการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อออกแบบให้ตำแหน่งความถี่สวิตช์ที่สอง ( $\omega_{22}$ ) ของวงจรชดเชยมีตำแหน่งตรงกับตำแหน่งความถี่โพลตัวที่สอง ( $\omega_{p2}$ ) ของวงจรภาคกำลัง

กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	5.005 V	5.004 V	5.001 V	4.9998 V	4.992 V
$V_{in} = 220 \text{ V}$	5.005 V	5.004 V	5.001 V	4.9998 V	4.992 V
$V_{in} = 242 \text{ V}$	5.005 V	5.004 V	5.001 V	4.9998 V	4.992 V

## 5.2 การทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด

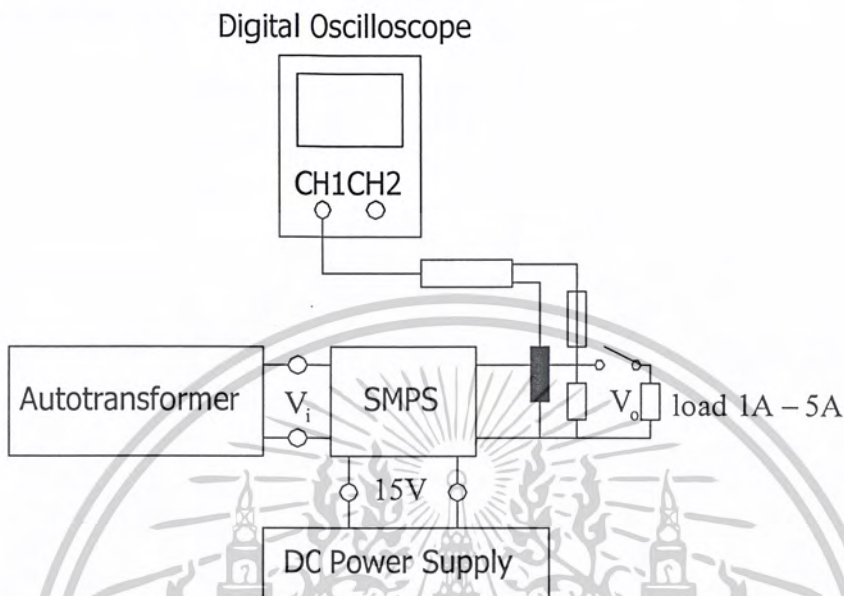
### 5.2.1 การทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI

วิธีการทดลอง

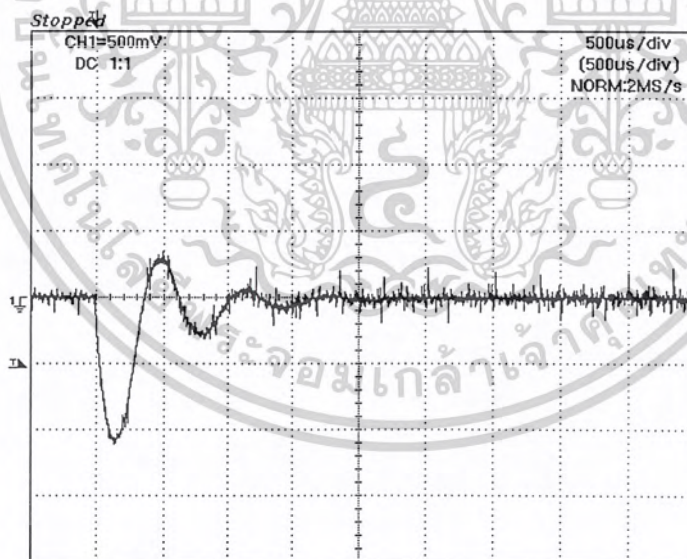
1. จัดชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5.2
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง 15 V จาก DC Power Supply ให้วงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 220 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.บันทึกรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A



รูปที่ 5.2 การจัดชุดทดลองสำหรับการทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด



ผล

การทดลอง

รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลด ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอว์เวิร์ดที่ใช้สวิทช์ 2 ตัว เมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI ที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A

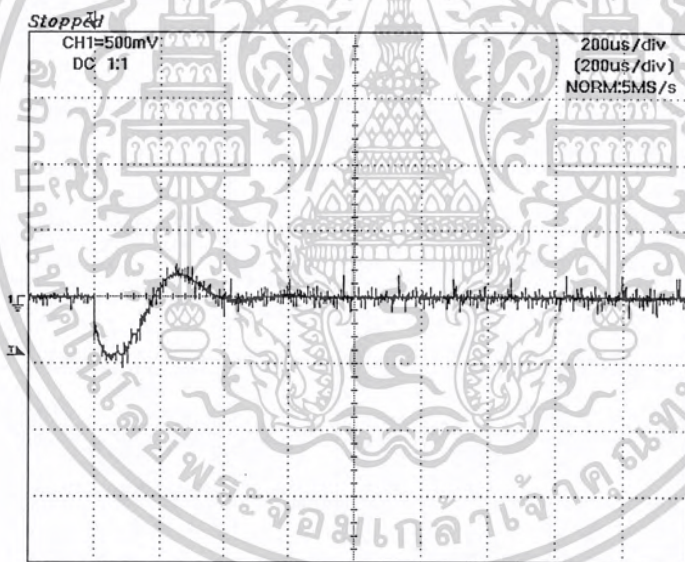
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.2 การทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ สองโพลสองซีโร

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5.2
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง 15 V จาก DC Power Supply ให้วงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 220 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. บันทึกรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A

ผลการทดลอง



รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองการเปลี่ยนของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว เมื่อใช้วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร ที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A

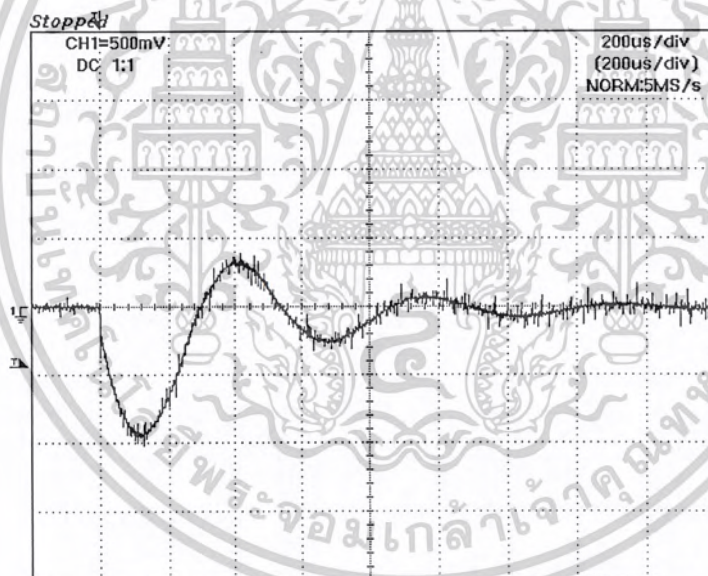
### 5.2.3 การทดสอบการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้มีการปรับปรุงวงจรชดเชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

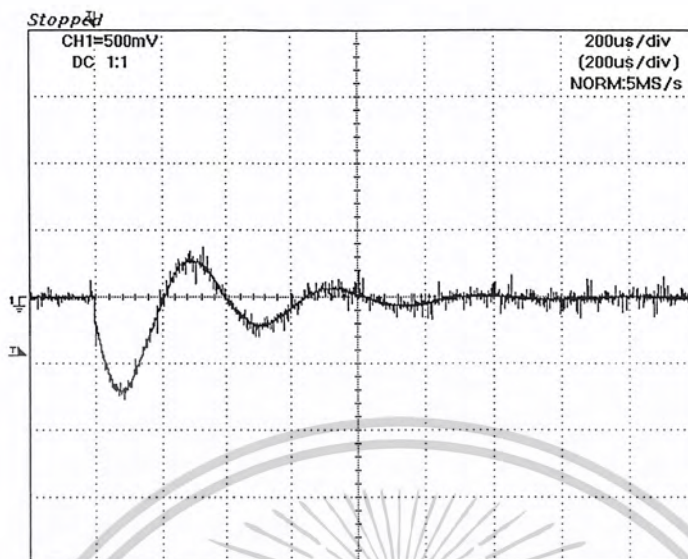
### วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5.2
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง 15 V จาก DC Power Supply ให้วงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 220 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. เปลี่ยนค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบ PI ตามตารางที่ 5.3 ตามลำดับ
5. บันทึกรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A
6. เปลี่ยนค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบ สองโพลสองซีโร ตามตารางที่ 5.4 ทำการทดลองตามข้อที่ 5

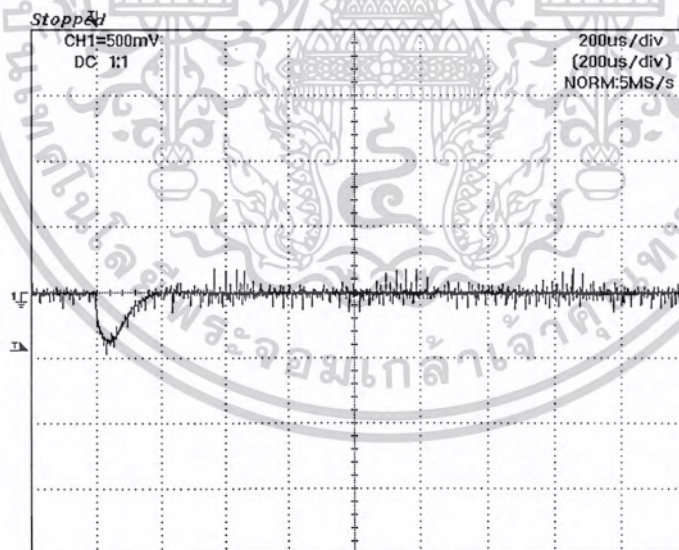
### ผลการทดลอง



- รูปที่ 5.5** ผลตอบสนองการเปลี่ยนของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว เมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายจาก 0.183 ไปเป็น 0.33 ของวงจรชดเชยแบบ PI ที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A



รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองการเปลี่ยนของโพลของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์ดที่ใช้สวิทช์ 2 ตัว เมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายจาก 0.183 ไปเป็น 0.66 ของวงจรชดเชยแบบ PI ที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A



รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโพล ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอ์เวิร์ดที่ใช้สวิทช์ 2 ตัวเมื่อออกแบบให้ตำแหน่งความถี่โพลตัวที่สอง ( $\omega_{zc2}$ ) ของวงจรชดเชยมีตำแหน่งตรงกับตำแหน่งความถี่โพลตัวที่สอง ( $\omega_{pp2}$ ) ของวงจรภาคกำลัง ที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 220 V เมื่อกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1A ไปเป็น 5 A

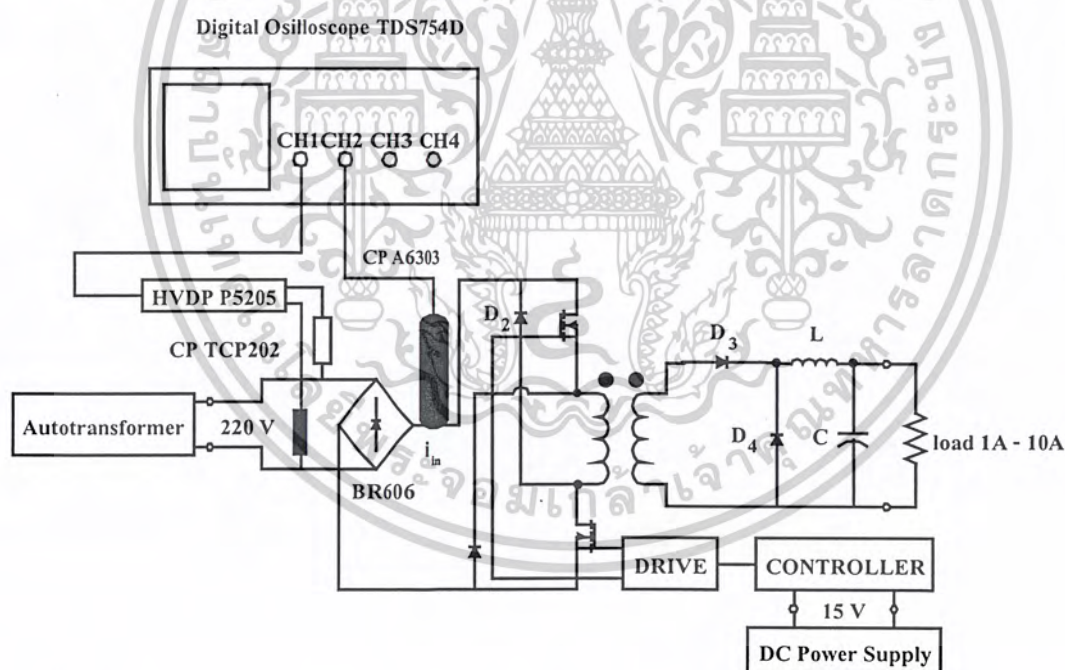
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด

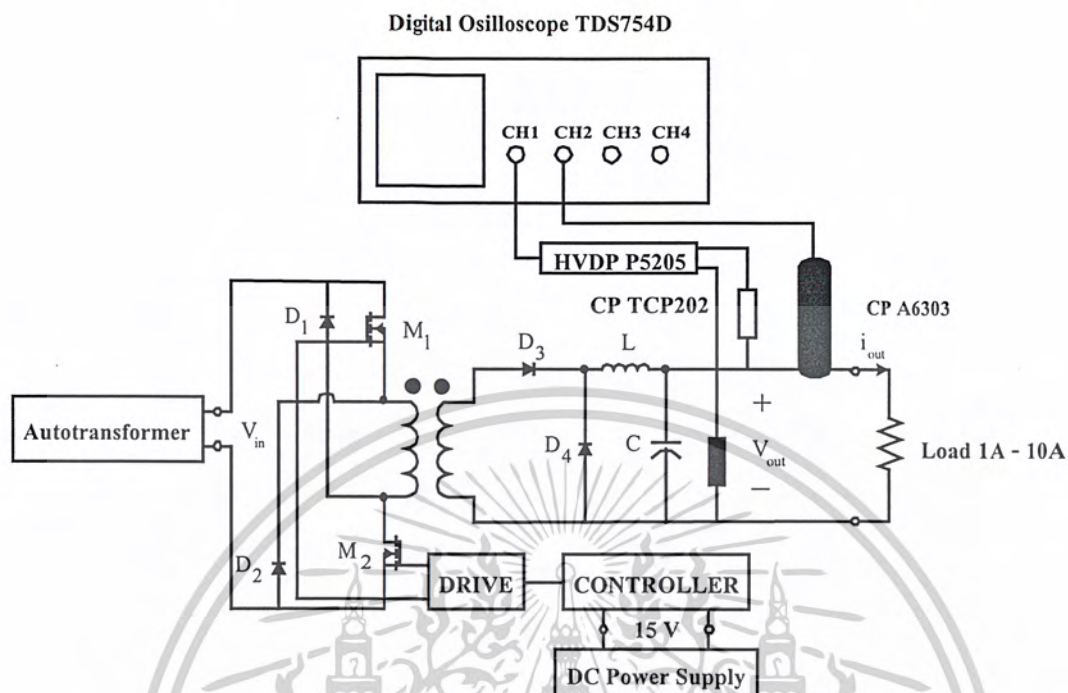
5.3.1 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิทช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบPI

วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง 15 V จาก DC Power Supply ให้วงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 198 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตและกระแสไฟฟ้าอินพุตที่กระแสเอาต์พุต 1 A จนถึง 10 A
5. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตกระแสเอาต์พุต 1 A จนถึง 10 A
6. กำหนดค่าประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด
7. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 220 V และ 240 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง ตามลำดับและทำการทดลองตามข้อที่ 4 จนถึงข้อที่ 6



รูปที่ 5.8 การจัดชุดทดลองสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุต เพื่อการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิทช์ 2 ตัว



รูปที่ 5.9 การจับชุดทดลองสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต เพื่อการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.8 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI (original)

กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	81.2 %	84.4 %	84.3 %	81.4 %	82.1%
$V_{in} = 220 \text{ V}$	78.9 %	82.2 %	82.2 %	79.0 %	79.9 %
$V_{in} = 242 \text{ V}$	75.7 %	81.1 %	81.6 %	77.4 %	78.6 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร

#### วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง 15 V จาก DC Power Supply ให้วงจรควบคุม
3. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 198 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง
4. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตและกระแสไฟฟ้าอินพุตที่กระแสเอาต์พุต 1 A จนถึง 10 A
5. บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตกระแสเอาต์พุต 1 A จนถึง 10 A
6. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด
7. จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 220 V และ 240 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง ตามลำดับและทำการทดลองตามข้อที่ 4 จนถึงข้อที่ 6

#### ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.9 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร (original)

กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	77.1%	80.6%	82.2%	78.9%	79.1%
$V_{in} = 220 \text{ V}$	75.4%	82.0%	83.3%	80.5%	80.8%
$V_{in} = 242 \text{ V}$	73.2%	80.1%	81.1%	78.1%	78.0%

### 5.3.3 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อมีการปรับปรุงวงจรชดเชย

#### วิธีการทดลอง

1. จัดชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 5.8 และ รูปที่ 5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.จ่ายแรงดันไฟฟ้าตรง 15 V จาก DC Power Supply ให้วงจรควบคุม
- 3.จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 198 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง
- 4.เปลี่ยนค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบ PI ตามตารางที่ 5.3 ตามลำดับ
- 5.บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตและกระแสไฟฟ้าอินพุตที่กระแสเอาต์พุต 1 A จนถึง 10 A
- 6.บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตกระแสเอาต์พุต 1 A จนถึง 10 A
- 7.คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด
- 8.จ่ายแรงดันไฟฟ้าสลับอาร์เอ็มเอส 220 V และ 240 V จาก Autotransformer ให้กับวงจรภาคกำลัง ตามลำดับและทำการทดลองตามข้อที่ 5 จนถึงข้อที่ 6
- 9.เปลี่ยนค่าอุปกรณ์วงจรชดเชยแบบ สองโพลสองซีโร ตามตารางที่ 5.4 ทำการทดลองตามข้อที่ 5 และข้อที่ 8

#### ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.10 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตซ์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI โดยเพิ่มอัตราขยาย จาก 0.1833 ไปเป็น 0.33

กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	82.6%	84.7%	85.1%	81.4%	81.3%
$V_{in} = 220 \text{ V}$	79.7%	83.5%	83.7%	80.6%	80.3%
$V_{in} = 242 \text{ V}$	77.6%	82.4%	82.2%	78.8%	79.9%

ตารางที่ 5.11 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตซ์ 2 ตัวเมื่อใช้วงจรชดเชยแบบ PI โดยเพิ่มอัตราขยายจาก 0.183 ไปเป็น 0.66

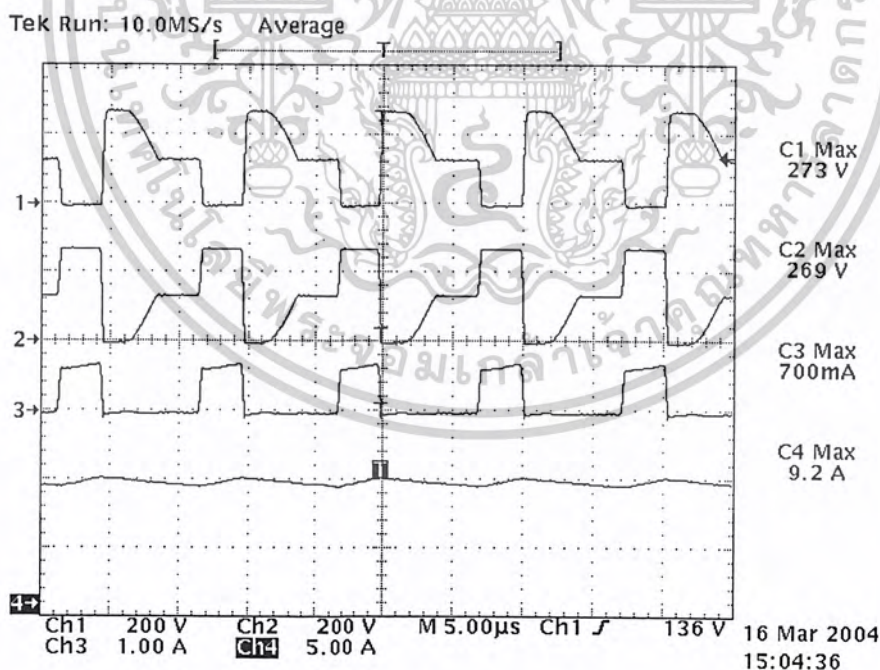
กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	77.9%	81.9%	83.6%	80.0%	81.6%
$V_{in} = 220 \text{ V}$	76.0%	80.7%	82.1%	79.0%	79.8%
$V_{in} = 242 \text{ V}$	75.4%	81.5%	83.2%	80.8%	81.2%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 ผลการวัดประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์คที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวเมื่อ ออกแบบให้ตำแหน่งความถี่รีโวลต์ที่สอง ( $\omega_{2C2}$ ) ของวงจรชดเชยมีตำแหน่งตรงกับตำแหน่ง ความถี่โพลต์ที่สอง ( $\omega_{pp2}$ ) ของวงจรภาคกำลัง

กระแสโหลด	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A
$V_{in} = 198 \text{ V}$	78.78%	84.7%	85.3%	81.8%	82.1%
$V_{in} = 220 \text{ V}$	69.1%	78.8%	82.4%	82.6%	79.8%
$V_{in} = 242 \text{ V}$	77.4%	81.8%	82.3%	79.21%	79.7%

รูปที่ 5.10 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ ( $V_{M1}$ ) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด ( $V_{D1}$ ) สัญญาณกระแสไฟฟ้าอินพุต ( $i_{in}$ ) และสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) ของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์คเมื่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต 198 V และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต 10 A



รูปที่ 5.10 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_{M1}$  (CH1),  $V_{D1}$  (CH2) และสัญญาณกระแสไฟฟ้า  $i_{in}$  (CH3),  $i_L$  (CH4) แปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 สรุปการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าและการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่สร้างขึ้น

### 5.4.1 รักษากระดับแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 5.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ด

	ก่อนการปรับปรุง		หลังการปรับปรุง		
	สองโพล สองซีโร	PI	สองโพล สองซีโร	PI (R1=10k)	PI (R1=10k)
การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต(%)	0.299	0.219	0.259	0.259	0.259

ตารางที่ 5.14 แสดงค่าการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดเมื่อกระแสไฟฟ้าที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก 1 A ไปเป็น 5 A

	ก่อนการปรับปรุง		หลังการปรับปรุง		
	สองโพล สองซีโร	PI	สองโพล สองซีโร	PI (R1=10k)	PI (R1=10k)
เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (ms)	0.39	1.5	0.14	1.3	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

การทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว พร้อมกับ วงจรชดเชยแบบพีไอ และวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรแสดงให้เห็นผล

1. วงจรชดเชยที่ออกแบบให้แรงดันเอาต์พุตมีเสถียรภาพ รักษาาระดับแรงดันเอาต์พุตได้ดี ไม่แกว่งมากเนื่องจากการออกแบบให้อัตราขยายดีซีที่ความถี่ต่ำมีค่ามาก

2. วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดเมื่อ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงจาก 1 A ไปเป็น 5 A ดีกว่าวงจรชดเชยแบบพีไอ เนื่องจาก สามารถออกแบบให้วงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโร มีแบนวิดท์กว้างกว่าวงจรชดเชยแบบพีไอ (เปรียบเทียบรูปที่ 5.3 กับรูปที่ 5.4) เพราะการออกแบบวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรไม่มีข้อ จำกัดในเรื่องการเลือกความถี่ครอสโอเวอร์ของวงจรชดเชยแบบพีไอ ที่กำหนดว่าความถี่ซีโรของวง จจรชดเชยแบบพีไอ ( $W_{zc}$ ) ต้องไม่เกินกว่าครึ่งหนึ่งของความถี่โพลคู่ของวงจรภาคกำลัง ( $W_{pp}$ ) เพื่อ ป้องกันไม่ให้ระบบขาดเสถียรภาพ

3. วงจรชดเชยแบบพีไอหลังการปรับปรุง ที่ออกแบบให้ความถี่ซีโรของวงจรชดเชยมีค่าเท่า กับครึ่งหนึ่งของความถี่โพลคู่ของวงจรภาคกำลัง ( $W_{zc}=0.5W_{pp}$ ) มีการรักษาาระดับแรงดันเอาต์พุต และค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แยกกว่าวงจรชดเชยแบบพีไอก่อนการปรับปรุง เนื่องจากอัตราขยายดี ซีที่ความถี่ต่ำมีค่าน้อยกว่า (แสดงตารางที่ 5.14) และค่าเฟสมาร์จินน้อยกว่า จึงทำให้เกิดโอเวอร์ชูต (overshoot) หรือการแกว่งของแรงดันเอาต์พุต

4. วงจรชดเชยแบบพีไอที่ทดลองเพิ่มอัตราขยายจาก 0.183 ไปเป็น 0.33 และ 0.66 นั้นการ เพิ่มอัตราขยายในลักษณะนี้จะทำให้แผนภาพโบลของวงจรชดเชย มีขนาดสูงขึ้นแต่ยังคงมีลักษณะ เหมือนเดิม ในการพิจารณาจะพิจารณาเปรียบเทียบ ที่อัตราขยาย 0.33 กับที่อัตราขยาย 0.66 เท่านั้น เพราะที่อัตราขยาย 0.183 และที่อัตราขยาย 0.111 นั้น ได้จากการออกแบบวงจรชดเชย

เมื่อพิจารณาที่อัตราขยาย 0.33 จะมีการรักษาาระดับแรงดันเอาต์พุต ความเร็วในการตอบ สอนง และค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของ การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของ โหลดแยกกว่าที่อัตรา ขยาย 0.66 (แสดงตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบรูปที่ 5.5 กับรูปที่ 5.6) เนื่องจากที่อัตราขยาย 0.66 มีค่า อัตราขยายดีซีที่ความถี่ต่ำ ความกว้างของแบนวิดท์ และเฟสมาร์จินมีค่ามาก (ภาคผนวก ข)

5. การออกแบบวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรหลังการปรับปรุง มีการรักษาาระดับแรง ดันเอาต์พุตได้ดีกว่าวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรก่อนการปรับปรุง ในทางทฤษฎีนั้นการรักษา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับแรงดันเอาต์พุตได้ดี เนื่องมาจากอัตราขยายดีซีที่ความถี่ต่ำมีค่ามาก (แสดงตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบวงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง) แต่ในปริยายานิพนธ์นี้จากการผลทดลอง การรักษาระดับแรงเอาต์พุตของวงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรหลังการปรับปรุงมีค่าดีกว่าเพียงเล็กน้อยกว่าการรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตก่อนการปรับปรุง ซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎี เพราะอัตราขยายดีซีที่ความถี่ต่ำของวงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงมีค่าใกล้เคียงกันมาก ในการแก้ไขอาจจะออกแบบวงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรหลังการปรับปรุงมีค่าอัตราขยายดีซีที่ความถี่ต่ำมีค่ามากขึ้น

ความเร็วของการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด และค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของวงจรชดเชยแบบสอง โพลสองซีโรหลังการปรับปรุงดีกว่า วงจรชดเชยสอง โพลสองซีโรก่อนการปรับปรุง (เปรียบเทียบรูปที่ 5.4 กับรูปที่ 5.8) เพราะออกแบบให้วงจรถดเชยสอง โพลสองซีโรหลังการปรับปรุง มีแบนวิดท์ที่กว้างและเฟสมาร์จินมีค่ามากทำให้โอเวอร์ชูต (overshoot) มีค่าน้อยกว่าเป็นผลให้ค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่าน้อยลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

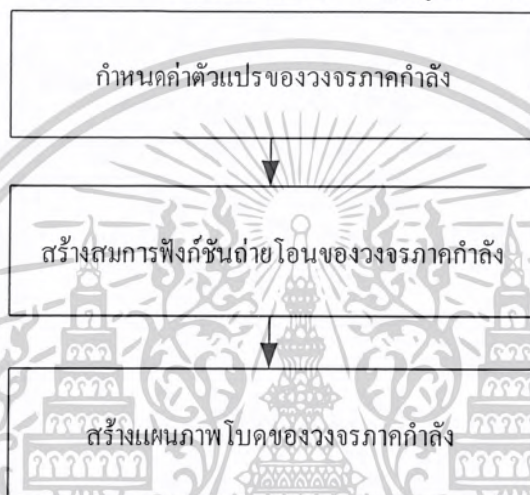
ภาคผนวก ก  
โปรแกรม MATLAB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ก.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบทของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว**

ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบทของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวแสดงดังรูปที่ ก.1



**รูปที่ ก.1** แผนภาพแสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบทของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

**ก.1 โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบทของวงจรภาคกำลัง**

```
%forward double end converter %  
%Transfer Function %  
%Design By Vinmin  
%because  $D_{max}=V_o/V_{inmin}$ ;  
%and  $I_{o,max}$  because  $R_{min}=V_o/I_{o,max}$  %  
% $V_{inmin}(dc)=258$ ;  
% $V_o=5$ ;  
% $L=66e-6$ ;  
% $C=300e-6$ ;  
% $r_l=0.4$ ;  
% $r_c=0.0829$ ;  
% $n=0.05$ ;  
% $V_s=1.8V$   
function []=in(Vinmin,Vo,n,L,C,rl,rc)  
Dmax=Vo/(n*Vinmin)  
Iomax=10;  
Rmin=Vo/Iomax;  
R=Rmin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

a=(n*Vo)/(1.8*Dmax*L*C)
b=rc*C
c=(rc/R)+1
d=((r1+rc)/L)+((1/(C*R)))
e=((r1+rc)/(L*C*R))+((1/(L*C)))
ab=a*b
ac=a*c
numplant=[0,(ab),(ac)]
denplant=[1,d,e]
tfplant=tf(numplant,denplant)
W=logspace(-1,6);
hold on
bode(tfplant)
grid on
Kplant=ac/e
KplantdB=20*log10(Kplant)
Wpplant=sqrt(e)
Wzplant=ac/ab

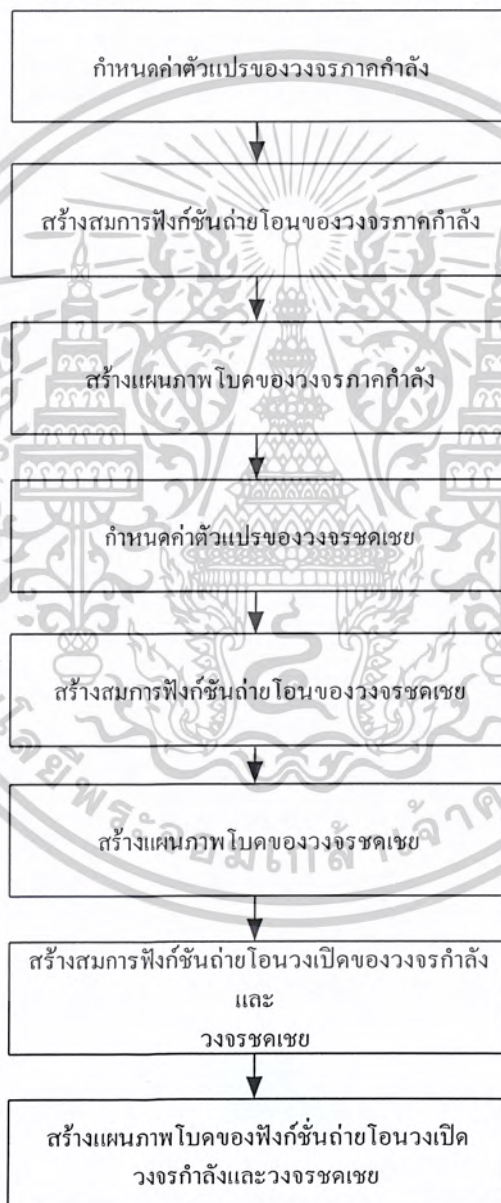
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบคของ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรภาคกำลังและวงจรชดเชยแบบฟีดแบคของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอรัเวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบคของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอรัเวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวแสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบคของ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอรัเวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.2 โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบดรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.5

```
%double end converter forward %
%Transfer Function %
%Design By Vinmin
%because Dmax=Vo/Vinmin;
%and Io,max because Rmin=Vo/Iomax %
%Vinmin(dc)=258;
%Vo=5;
%L=66e-6;
%C=300e-6;
%rl=0.4;
%rc=0.0829;
%n=0.05;
%Vs=1.8V
function[]=in(Vinmin,Vo,n,L,C,rl,rc)
Dmax=Vo/(n*Vinmin)
Iomax=10;
Rmin=Vo/Iomax;
R=Rmin
a=(n*Vo)/(1.8*Dmax*L*C)
b=rc*C
c=(rc/R)+1
d=((rl+rc)/L)+((1/(C*R)))
e=((rl+rc)/(L*C*R))+((1/(L*C)))
ab=a*b
ac=a*c
numplant=[0,(ab),(ac)]
denplant=[1,d,e]
tfplant=tf(numplant,denplant)
W=logspace(-1,6);
hold on
bode(tfplant)
grid on
Kplant=ac/e
KplantdB=20*log10(Kplant)
Wpplant=sqrt(e)
Wzplant=ac/ab
% Design PI Controller %
Wzz=input('Select Wz<(0.5Wpplant)Wz= ');
Wz=Wzz*Wpplant
KcondB=input('Select Gain controller(KcondB)KcondB= ');
SlopecondB=input('Select Slope controller(SlopecondB)SlopecondB= ');
logWa=log10(Wz)-((-KplantdB-KcondB)/(SlopecondB))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Wa=10^(logWa)
C=input('Select Capacitor(C)C= ');
%Find R2 %
R22=1/(Wz*C)
R2=input('Select Resistor(R2)R2= ');
Kcon=(10^(KcondB))^(1/(20))
%Find R1 %
R11=1/(Kcon*C)
R1=input('Select Resister(R1)R1= ');
numcon=[(C*R2),1];
dencon=[(C*R1),0];
tfcon=tf(numcon,dencon);
%bode(tfcon,W)
totaltf=series(tfplant,tfcon)
bode(totaltf,W)

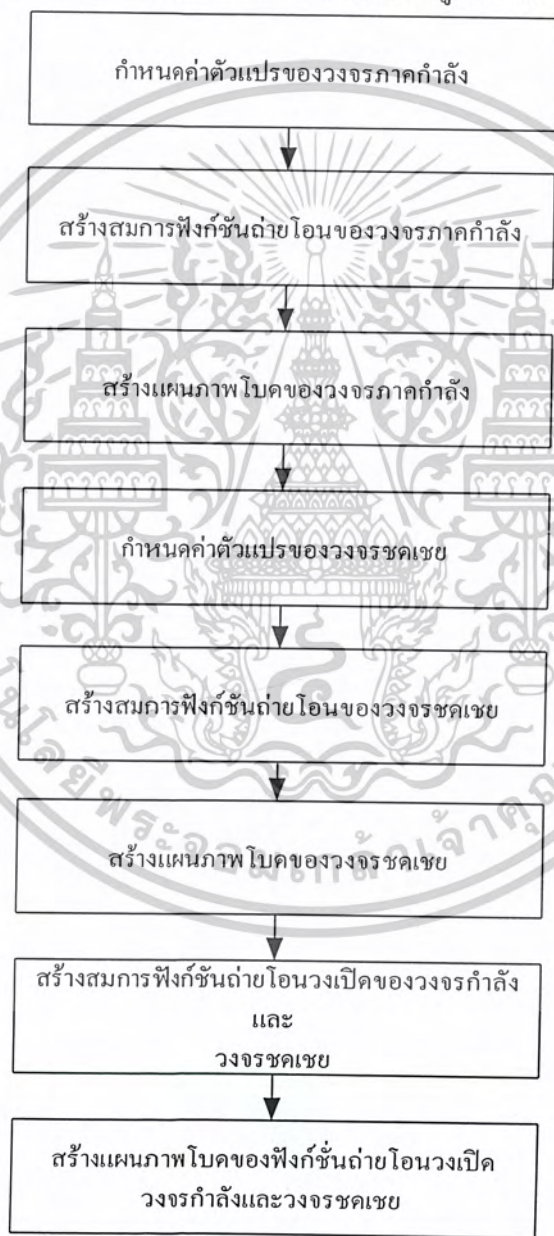
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบคของ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรภาคกำลังและวงจรชดเชยแบบสองโพลสองซีโรของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบคของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัวแสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบคของ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของวงจรแปลงผันแรงดันแบบฟอร์เวิร์ดที่ใช้สวิตช์ 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.3 โปรแกรม MATLAB สำหรับสร้างแผนภาพโบดรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.11

```
%double end converter Forward %
%Transfer Function %
%Design By Vinmin
%because Dmax=Vo/Vinmin;
%and Io,max because Rmin=Vo/Iomax %
%Vinmin(dc)=258;
%Vo=5;
%L=66e-6;
%C=300e-6;
%rl=0.4;
%rc=0.0829;
%n=0.05;
%Vs=1.8V
function[]=in(Vinmin,Vo,n,L,C,rl,rc)
Dmax=Vo/(n*Vinmin)
Iomax=10;
Rmin=Vo/Iomax;
R=Rmin
a=(n*Vo)/(1.8*Dmax*L*C)
b=rc*C
c=(rc/R)+1
d=((rl+rc)/L)+((1/(C*R)))
e=((rl+rc)/(L*C*R))+((1/(L*C)))
ab=a*b
ac=a*c
numplant=[0,(ab),(ac)]
denplant=[1,d,e]
tfplant=tf(numplant,denplant)
W=logspace(-1,6);
hold on
bode(tfplant)
grid on
Kplant=ac/e
KplantdB=20*log10(Kplant)
Wpplant=sqrt(e)
Wzplant=ac/ab
%Find mag Wzplant %
magWzplantdB=((log10(Wzplant)-log10(Wpplant))*-40)-(-KplantdB)
%Design LEAD-LAG compensate(Single Ploe)%
Wc=input('Select Wc= ');
%Find mag Wc %
magWcdB=((log10(Wc)-log10(Wzplant))*-20)-(-magWzplantdB)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Wzcon1=input('Select Wzcon1= ');
Wzcon2=Wzcon1;
Wpcon2=input('Select Wpcon2= ');
%Find mag WZcon1,2 %
magWzcon1dB=((log10(Wzcon1)-log10(Wpcon2))*20)+(-
magWzplantdB)
KcondB=input('Select Gain Controller(KcondB)KcondB=')
logWpcon1=((KcondB-magWzcon1dB)/(-20))+(log10(Wzcon1))
Wpcon1=10^(logWpcon1)
C1=input('Select Capacitor(C1)C1= ');
C2=C1;
%Find R4 %
R44=1/(Wzcon1*C1)
R4=input('Select Resistor(R4)R4= ');
R2=R4;
%Find R1%
R11=R2/((Wpcon2*R2*C1)-1)
R1=input('Select Resistor(R1)R1= ');
Kcon=(10^(KcondB))^(1/20)
R33=Kcon*(R1+R2)
R3=input('Select Resistor(R3)R3= ');
KKc=R3/(R1+R2)
WWz1=1/(R4*C2)
WWz2=WWz1
WWp1=1/((R3+R4)*C2)
WWp2=(R1+R2)/(R1*R2*C1)
n1=(KKc/(WWz1*WWz2))
n2=((WWz1+WWz2)/(WWz1*WWz2))*KKc
n3=((WWz1*WWz2)/(WWz1*WWz2))*KKc
d1=1/(WWp1*WWp2)
d2=(WWp2+WWp1)/(WWp1*WWp2)
d3=(WWp1*WWp2)/(WWp1*WWp2)
numcon=[n1,n2,n3]
dencon=[d1,d2,d3]
tfcon=tf(numcon,dencon);
%bode(tfcon,W)
totaltf=series(tfplant,tfcon)
bode(totaltf,W)

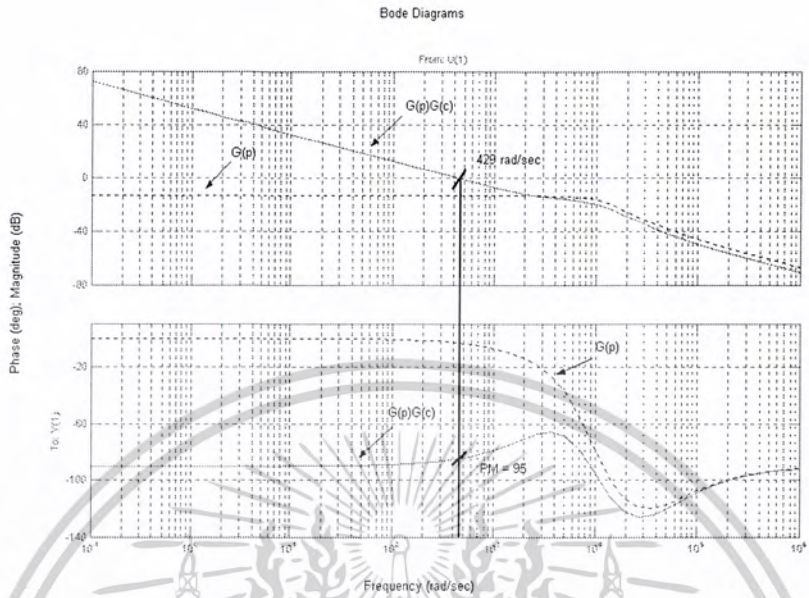
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

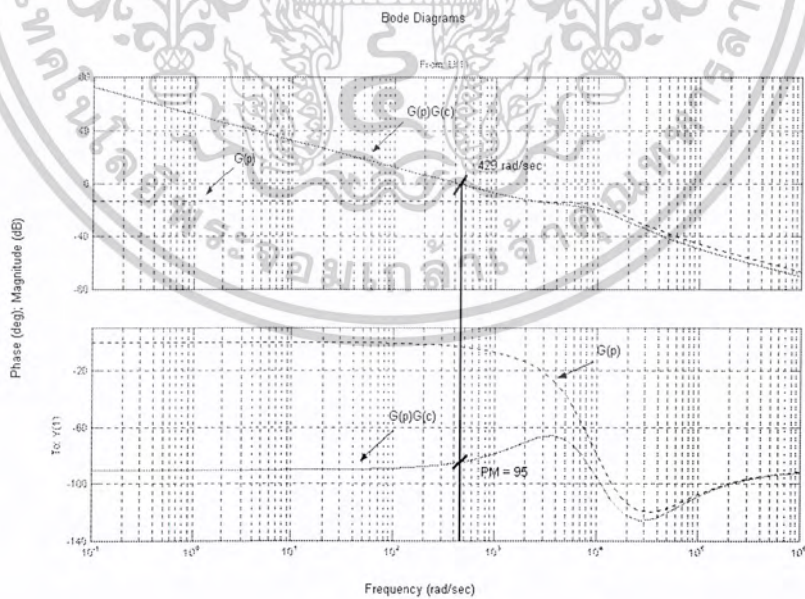
ภาคผนวก ข  
แผนภาพโรคของวงจรชดเชยแบบพีไอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 แผนภาพ โบบของวงจรชดเชยแบบพีไอเมื่อหาคล่องเพิ่มอัตราขยายเป็น 0.33



รูปที่ ข.2 แผนภาพ โบบของวงจรชดเชยแบบพีไอเมื่อหาคล่องเพิ่มอัตราขยายเป็น 0.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณะานุสรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา สำหรับคำแนะนำ ความ  
กรุณาที่ให้ความรู้ในการทำโครงการ และแบบอย่างในการทำงาน

ขอขอบคุณ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ สำหรับคำแนะนำและคำวิจารณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อ  
ปริญญาานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ ธารว เบญจนราษฎร์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในเรื่อง โปรแกรม

ขอขอบคุณ พี่สุภชัย หอวิมานพร สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ  
และอุปกรณ์เสริมต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆ ป.โททุกคนภายในห้องปฏิบัติการ ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือต่างๆ และให้  
กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่กันตixa กิตติพิรัชล ที่ให้คำแนะนำในเรื่องการออกแบบวงจรชุดเซย

ขอขอบคุณ ฐกรภาคที่ให้การดูแลในเรื่องห้องปฏิบัติการอย่างเท่าเทียมกัน โดยที่ไม่แบ่งแยก  
ระหว่างภาคปกติและภาคต่อเนื่อง

สุดท้ายนี้ขอขอบ เตี่ยว ป้อง จีน กาย และเพื่อนๆทุกคนที่เป็นกำลังใจให้กันตลอดมาและหวังว่า  
จะเป็นเพื่อนตลอดไป คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์นี้ขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศาสพร เกิดผล

ปริญญา มณีชมภู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] L.H. Dixon, Jr. "Closing the Feedback Loop," Unitrode Power Supply Design Seminar Manual, 1983. pp. C1.
- [2] H.W. Whittington, et. al. **Switched Mode Power Supplies: Design and Construction.** Research Studies Press Ltd. 1992. pp. 12-26, 131-170.
- [3] R.W. Erickson, D. Maksimovic. **Fundamentals of Power Electronics.** 2<sup>nd</sup> Ed. Kluwer Academic Publishers. 2001. pp. 331-369.
- [4] M.M. Jovanovic. **Principles of Converter Control.** Delta Power Electronics R & D Laboratory. 2002. pp. 1-112, 297-327.
- [5] W.K. Tam, et. al. "Computer-Aided Design of Feedback Compensation Networks for Switching Regulators," Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol. 2, 1994. pp. 1066-1071.
- [6] C. Bunlaksananusorn, D.E. Macpherson. "Design Optimisation of Switched Mode Power Supplies (SMPS) Feedback Control." Proc. 8<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications, Lausanne, 1999.
- [7] S.M.A. Razvi, et. al. "Negative Feedback Control Design for a PWN-Buck Converter," Southcon/95 Conference Record, 1995. pp. 60-67.
- [8] N. Mohan, et. al. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design.** 3<sup>rd</sup> Ed. John Wiley & Sons, Inc. 2003. pp. 161-197.
- [9] L. Umanand, S.R. Bhat. **Design of Magnetic Components for Switched Mode Power Converters.** Wiley Eastern Limited. 1992.
- [10] Unitrode Corporation. **Unitrode's Power Supply Circuits Data Book.** 1993.
- [11] เฉลิมเกียรติ เทพสำราญ "การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังสำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์กระแสไฟฟ้าสลับเฟสเดียวเป็นกระแสไฟฟ้าตรงกำลังต่ำด้วยวิธีควบคุมแบบพาหะชนิดไม่เป็นเชิงเส้น" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ก้นติชา กิตติพิรัชล “การออกแบบวงควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตซ์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้