

การควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชซีออปเปอร์เฟสเดียว

INSTANTANEOUS VOLTAGE CONTROL OF A SINGLE-PHASE
AC CHOPPER

เอกวัฒน์ สุขประจันทร
EAKAWAT SUGPRAJUN

๒๕๕๑
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชซีช็อปเปอร์เฟสเดียว

INSTANTANEOUS VOLTAGE CONTROL OF A SINGLE-PHASE
AC CHOPPER

เอกวัฒน์ สุขประจันตร์

EAKAWAT SUGPRAJUN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 74522
วัน,เดือน,ปี..... 2 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**INSTANTANEOUS VOLTAGE CONTROL OF A SINGLE-PHASE
AC CHOPPER**

EAKAWAT SUGPRAJUN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPY RIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADGRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชซีซีโอปเปอร์เฟสเดียว
นักศึกษา	นายเอกวัฒน์ สุขประจันตร์
รหัสนักศึกษา	48060202
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. สมภพ ผลไม้

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชซีซีโอปเปอร์เฟสเดียว โดยใช้หลักการสร้างสัญญาณ PWM จากสัญญาณควบคุมที่เป็นไซน์ และการป้อนกลับแรงดันเอาต์พุตด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ โดยในการสร้างสัญญาณ PWM นั้นประกอบด้วยการสร้างสัญญาณแคเรียร์จากสัญญาณไซน์ของแรงดันแหล่งจ่าย ซึ่งทำให้ได้สัญญาณแคเรียร์ที่มีค่าแอมพลิจูดแปรผันตามค่าแรงดันชั่วขณะของแหล่งจ่าย จากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ของแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการควบคุม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตที่ต้องการควบคุมไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของแหล่งจ่าย เช่น แรงดันตกหรือแรงดันเกินชั่วขณะ เป็นต้น ในส่วนของระบบควบคุมของแรงดันเอาต์พุตนั้น ใช้การป้อนกลับของกระแสและแรงดันเอาต์พุต ทำให้ได้รูปคลื่นแรงดันด้านขาออกมีความทนทานเมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนหรือเมื่อใช้กับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยทฤษฎีและหลักการทำงานของเอชซีซีโอปเปอร์ การสร้างสัญญาณแคเรียร์ตามวิธีการที่นำเสนอ การออกแบบระบบควบคุมแรงดันชั่วขณะ โดยได้นำเสนอทั้งการจำลองและการทดลองกับวงจรเครื่องต้นแบบเพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอ

Thesis Title	Instantaneous Voltage Control of A Single-Phase AC Chopper
Student	Mr. Eakawat Sugprajun
Student ID	48060202
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical of Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Dr. Sompob Polmai

ABSTRACT

This thesis proposes instantaneous voltage control of a single-phase ac chopper, in which the pwm signal is generated from sinusoidal control signal and the instantaneous value of the output voltage is used for closed-loop control. The supply voltage is used as the input of the resettable integrator to produce sine-amplitude modulation carrier signal. This signal is then compared to the sinusoidal control signal to generate pwm signal. The amplitude of the sawtooth carrier is proportional to the amplitude of ac supply voltage, therefore the output voltage is not affected by suddenly supply voltage changes, i.e. voltage sag or swell. The output voltage control system is proposed using both the load current and voltage feedback. The load current is used for compensating for the voltage drop across the filter reactor while the load voltage is fed back to the main control loop. Applying the proposed technique, fast response of the output voltage can be achieved. Furthermore, the output voltage will not affect by the nonlinearity of the load current. The validation of the proposed method is confirmed by both simulation and experimented results.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ และการให้คำปรึกษาจาก คร. สมภพ ผลไม้ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุพัฒน์ กิตติรัตนัสัจจา และ รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณและความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสามท่าน จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ตั้งแต่สมัยศึกษาระดับปริญญาตรี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ พี่ๆ ในห้องทำวิจัย Power Applications and Energy Conversion Research Laboratory (Pearl lab) Room ECC407 ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ พี่ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ พี่ๆ ทุกๆ คน ของช่างไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตพระนครเหนือ ที่คอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และกำลังใจจากครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกวัฒน์ สุขประจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้วิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 วงจรเอชซีซีโอปเปอร์เฟสเดียว.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 สมการของเอชซีซีโอปเปอร์เฟสเดียว.....	6
2.3 การทำงานของวงจรเอชซีซีโอปเปอร์.....	9
2.3.1 โหมดแอกทีฟ.....	11
2.3.2 โหมดฟรีวิลลิ่ง.....	12
2.3.3 โหมดเดดไทม์.....	15
บทที่ 3 การควบคุมแรงดันของเอชซีซีโอปเปอร์.....	18
3.1 บทนำ.....	18
3.2 การควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีซีโอปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันเฉลี่ย.....	18
3.3 การควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีซีโอปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การสร้างสัญญาณฟันเลื่อยแบบมีแอมพลิฟายด์เปลี่ยนแปลงตามแรงดันขาเข้า...22	
3.3.2 การควบคุมแรงดันชั่วขณะ..... 28	
บทที่ 4 การจำลองการควบคุมแรงดันของเอชซีซีโอพีเออร์เฟสเดียว..... 36	
4.1 บทนำ.....36	
4.2 การจำลองการทำงานของเอชซีซีโอพีเออร์เฟสเดียว..... 36	
4.2.1 วงจรสร้างสัญญาณ PWM.....37	
4.2.2 วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์..... 38	
4.2.3 วงจรประวิงเวลา..... 38	
4.2.4 วงจรรวมสัญญาณ..... 39	
4.2.5 วงจรกำลัง..... 40	
4.3 การจำลองการทำงานการควบคุมแรงดันด้านขาออกแบบไม่มีการป้อนกลับ..... 41	
4.3.1 ผลการตอบสนอง..... 42	
4.3.2 ผลของของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น..... 45	
4.3.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด..... 47	
4.3.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด..... 48	
4.3.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด..... 50	
4.4 การจำลองการทำงานการควบคุมแรงดันด้านขาออกแบบใช้ค่าเฉลี่ย..... 52	
4.4.1 ผลการตอบสนอง..... 53	
4.4.2 ผลของของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น..... 56	
4.4.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด..... 57	
4.4.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด..... 57	
4.4.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด..... 59	
4.5 การจำลองการทำงานการควบคุมแรงดันด้านขาออกแบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ..... 60	
4.5.1 ผลการตอบสนอง.....61	
4.5.2 ผลของของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น..... 64	
4.5.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด..... 65	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด	65
4.5.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด	67
บทที่ 5 การทดลองการควบคุมแรงดันของเอชซีซีโอปเปอร์เฟสเดียว.....	68
5.1 บทนำ.....	68
5.2 การทดลองวงจรเอชซีซีโอปเปอร์.....	68
5.2.1 วงจรสร้างสัญญาณ PWM.....	69
5.2.2 วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์.....	70
5.2.3 วงจรประวิงเวลา.....	71
5.2.4 วงจรรวมสัญญาณ.....	71
5.2.5 วงจรขับนำ.....	72
5.2.6 วงจรกำลัง.....	73
5.2.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับ ค่าของแรงดันด้านขาออก....	73
5.2.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับ ค่าของ THD.....	76
5.2.6.3 ประสิทธิภาพของวงจรเอชซีซีโอปเปอร์ที่ใช้ทดลอง.....	78
5.3 การทดลองการควบคุมแรงดันด้านขาออกแบบไม่มีการป้อนกลับ.....	80
5.3.1 ผลการตอบสนอง.....	80
5.3.2 ผลของของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	84
5.3.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด	85
5.3.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด	86
5.3.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด	88
5.4 การทดลองการควบคุมแรงดันด้านขาออกแบบใช้ค่าเฉลี่ย.....	89
5.4.1 ผลการตอบสนอง.....	90
5.4.2 ผลของของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	93
5.4.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด	94
5.4.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด	94
5.4.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด	96
5.5 การทดลองการควบคุมแรงดันด้านขาออกแบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ.....	97

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5.1 ผลการตอบสนอง.....	98
5.5.2 ผลของของไหลคที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	100
5.5.3 ผลเมื่อไหลคเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด	101
5.5.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด	102
5.5.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด	103
5.6 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	104
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	105
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	105
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	107
บรรณานุกรม.....	108
ภาคผนวก	109
ภาคผนวก ก.....	110
ภาคผนวก ข.....	113
ภาคผนวก ค.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	131

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	37
4.2 ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในการจำลอง.....	46
4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้ในการจำลอง.....	53
4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ในการจำลอง.....	61
5.1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรเอชซีซีอปเปอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	69
5.2 ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพของเอชซีซีอปเปอร์.....	79
5.3 ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในการทดลอง.....	84
5.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้ในการทดลอง.....	90
5.5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ในการทดลอง.....	97

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	บล็อกไดอะแกรมของแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย..... 3
2.1	วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์..... 6
2.2	วงจรเอชซีช็อปเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 6
2.3	รูปบล็อกไดอะแกรมของการสร้างสัญญาณขับเกท..... 7
2.4	รูปคลื่นสัญญาณขับเกทของ IGBT และสัญญาณแรงดันที่ถูกสับ..... 7
2.5	สัญญาณของการสวิตช์เป็นฟังก์ชันแบบคู่..... 8
2.6	รูปคลื่นของแรงดันไฟสลับก่อนเข้าและหลังเข้าวงจรเอชซีช็อปเปอร์..... 10
2.7	รูปคลื่นของแรงดันไฟสลับก่อนเข้าและหลังเข้าวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ..... 10
2.8	รูปคลื่นของเอชซีช็อปเปอร์ที่โหมดการทำงานต่างๆ..... 10
2.9	รูปคลื่นการทำงานของโหมดแอกทีฟ..... 11
2.10	โหมดแอกทีฟในช่วงที่แรงดัน v_s เป็นบวกและ $I_L > 0$ 11
2.11	โหมดแอกทีฟในช่วงที่แรงดัน v_s เป็นลบและ $I_L < 0$ 12
2.12	รูปคลื่นการทำงานของโหมดฟรีวิลลิ่ง..... 12
2.13	โหมดฟรีวิลลิ่งในช่วงที่ v_s เป็นบวกและ $I_L > 0$ 13
2.14	โหมดฟรีวิลลิ่งในช่วงที่ v_s เป็นลบและ $I_L < 0$ 13
2.15	โหมดฟรีวิลลิ่งในช่วงที่ v_s เป็นบวกและ $I_L < 0$ 14
2.16	โหมดฟรีวิลลิ่งในช่วงที่ v_s เป็นลบและ $I_L > 0$ 14
2.17	รูปคลื่นการทำงานของโหมดเดดไทม์..... 15
2.18	โหมดเดดไทม์ในช่วงที่ เมื่อ v_s เป็นบวกและ $I_L > 0$ 15
2.19	โหมดเดดไทม์ในช่วงที่ เมื่อ v_s เป็นบวกและ $I_L < 0$ 16
2.20	โหมดเดดไทม์ในช่วงที่ เมื่อ v_s เป็นลบและ $I_L < 0$ 16
2.21	โหมดเดดไทม์ในช่วงที่ เมื่อ v_s เป็นลบและ $I_L > 0$ 17
3.1	block diagram ของการควบคุมแรงดันขาออกด้วยค่าเฉลี่ย..... 18
3.2	การสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็มโดยทั่วไป..... 19
3.3	รูปวงจรเรียงกระแส..... 19
3.4	รูปวงจรตรวจจับค่ายอดชั่วขณะ..... 19
3.5	รูปวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงที่ใช้ในการจำลอง..... 20
3.6	รูปคลื่นของวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงที่ได้จากการจำลอง..... 20
3.7	รูปวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงที่ใช้ในการทดลอง..... 20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 รูปคลื่นของวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงที่ได้จากการทดลอง.....	21
3.9 รูปคลื่นของโพลต์ที่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น.....	21
3.10 บล็อกไดอะแกรมของแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	22
3.11 วงจรสร้างสัญญาณแคเรียร์พื่นเลื่อยแบบเดิม.....	23
3.12 วงจรสร้างสัญญาณแคเรียร์พื่นเลื่อยแบบใหม่.....	23
3.13 รูปวงจรอินทิเกรตแบบ ไม่กลับขั้ว.....	23
3.14 รูปคลื่นสัญญาณพีคดับบลิวเอ็มแบบใหม่ที่ได้จากการจำลอง.....	25
3.15 รูปวงจรสร้างสัญญาณพีคดับบลิวเอ็มแบบใหม่ที่ใช้ในการจำลอง.....	25
3.16 รูปคลื่นสัญญาณพีคดับบลิวเอ็มแบบใหม่ที่ได้จากการทดลอง.....	26
3.17 รูปคลื่นสัญญาณแคเรียร์เมื่อค่าแรงดันค่านขาเข้าเปลี่ยนแปลงขึ้นลง.....	27
3.18 รูปคลื่นของสัญญาณพีคดับบลิวเอ็มที่มีค่า Duty ratio ปรับตามการเปลี่ยนแปลงของแอม พลิจูด ของสัญญาณแคเรียร์พื่นเลื่อย.....	27
3.19 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณพีคดับบลิวเอ็มแบบใหม่ เมื่อค่าของแรงดันค่านขาออกเพิ่มขึ้น	27
3.20 รูปวงจรสมมูลย์ในช่วงโหมคแอกทีฟ.....	29
3.21 รูปวงจรสมมูลย์ในช่วงโหมคพรีวิลลิ่ง.....	29
3.22 Block diagram โมเดลของเอชี่ช้อปเปอร์.....	32
3.23 Block diagram ของการควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชี่ช้อปเปอร์.....	32
3.24 Block diagram ของการควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชี่ช้อปเปอร์ เมื่อค่าของกระแสรบกวนถูก หักล้าง.....	33
3.23 รูป signal flow graph ของการควบคุมแรงดันชั่วขณะ.....	33
3.24 การควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชี่ช้อปเปอร์ที่ต่อเป็นวงจรออปแอมป์.....	35
3.25 รูปวงจรการเปรียบเทียบสัญญาณแคเรียร์พื่นเลื่อยกับสัญญาณควบคุมที่ต่อเป็นวงจรออปแอมป์	35
4.1 วงจรเอชี่ช้อปเปอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	36
4.2 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการจำลอง.....	37
4.3 รูปคลื่นสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการจำลอง.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ที่ใช้ในการจำลอง.....	38
4.5 รูปคลื่นสัญญาณตรวจจับจุดผ่านศูนย์ที่ใช้ในการจำลอง.....	38
4.6 วงจรประวิงเวลาที่ใช้ในการจำลอง.....	38
4.7 รูปคลื่นของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการจำลอง.....	39
4.9 รูปคลื่นของวงจรรวมสัญญาณที่ได้จากการจำลอง.....	39
4.10 วงจรกำลังของเอชซีซีอปเปอร์ที่ใช้ในการจำลอง.....	40
4.11 แสดงรูปคลื่นของวงจรเอชซีซีอปเปอร์ที่ duty ratio = 0.1.....	40
4.12 แสดงรูปคลื่นของวงจรเอชซีซีอปเปอร์ที่ duty ratio = 0.5.....	41
4.13 แสดงรูปคลื่นของวงจรเอชซีซีอปเปอร์ที่ duty ratio = 0.9.....	41
4.14 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองเพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	42
4.15 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองเพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด.....	42
4.16 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	43
4.17 ผลการจำลองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด.....	43
4.18 วงจรกำลังของเอชซีซีอปเปอร์ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการ จำลอง.....	44
4.19 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและ ตัวเหนี่ยวนำ.....	44
4.20 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัว เหนี่ยวนำ.....	45
4.21 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของผล โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	45
4.22 ผลการจำลองเมื่อใช้กับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	46
4.23 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบ ไม่มีการป้อนกลับ.....	46
4.24 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	47
4.25 ผลการจำลองเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	47
4.26 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของผลเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	48
4.27 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	49
4.28 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	49
4.29 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	51
4.31 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	51
4.32 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของการควบคุมเอชซีซีโอปเปอร์ด้วยค่าแรงดันเฉลี่ย.....	52
4.33 รูปวงจรตรวจจับแอมพลิฟิไคด์แบบความเร็วสูงและตัวควบคุมแบบ PI.....	53
4.34 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	54
4.35 ผลการจำลองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด.....	54
4.36 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและ ตัวเหนี่ยวนำ.....	55
4.37 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัว เหนี่ยวนำ.....	55
4.38 ผลการจำลองเมื่อใช้กับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	56
4.39 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบใช้ค่าเฉลี่ย.....	56
4.40 ผลการจำลองเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	57
4.41 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	58
4.42 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	58
4.43 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	59
4.44 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	59
4.45 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของการควบคุมเอชซีซีโอปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ.....	60
4.46 รูปวงจรถูกควบคุมแรงดันชั่วขณะที่ใช้ในการจำลอง.....	61
4.47 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	62
4.48 ผลการจำลองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด.....	62
4.49 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและ ตัวเหนี่ยวนำ.....	63
4.50 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัว เหนี่ยวนำ.....	63
4.51 ผลการจำลองเมื่อใช้กับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	64
4.52 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบใช้ค่าชั่วขณะ.....	64
4.53 ผลการจำลองเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.54 ผลการจำลองเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	65
4.55 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	66
4.56 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	66
4.57 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	67
4.58 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	67
5.1 วงจรเอชซีซีโอปเปอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	68
5.2 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการทดลอง.....	69
5.3 รูปคลื่นสัญญาณ PWM ที่ได้จากการทดลอง.....	70
5.4 วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ที่ใช้ในการทดลอง.....	70
5.5 รูปคลื่นสัญญาณตรวจจับจุดผ่านศูนย์ที่ได้จากการทดลอง.....	70
5.6 วงจรประวิงเวลาที่ใช้ในการทดลอง.....	71
5.7 รูปคลื่นของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการทดลอง.....	71
5.8 วงจรรวมสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง.....	71
5.9 รูปคลื่นของวงจรรวมสัญญาณที่ได้จากการทดลอง.....	72
5.10 วงจรขับนำที่ใช้ในการทดลอง.....	72
5.11 รูปคลื่นของวงจรขับนำที่ได้จากการทดลอง.....	72
5.12 วงจรกำลังของเอชซีซีโอปเปอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	73
5.13 แสดงค่าแรงดันด้านขาออกที่ค่า duty ratio=0.1.....	74
5.14 แสดงค่าแรงดันด้านขาออกที่ค่า duty ratio=0.5.....	74
5.15 แสดงค่าแรงดันด้านขาออกที่ค่า duty ratio=0.9.....	75
5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับค่าของ duty ratio.....	75
5.17 แสดงค่า THD ที่ค่า duty ratio=0.1.....	76
5.18 แสดงค่า THD ที่ค่า duty ratio=0.5.....	76
5.19 แสดงค่า THD ที่ค่า duty ratio=0.9.....	77
5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio และค่าของ THD.....	77
5.21 แสดงรูปแรงดันแรงดันด้านขาเข้า กระแสด้านขาเข้า แรงดันด้านขาออกและกระแสด้านขาออก ที่ค่า duty ratio=0.7.....	78

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.22 แสดงรูปแรงดันแรงดันด้านขาเข้า กระแสด้านขาเข้า แรงดันด้านขาออกและกระแสด้านขาออก ที่ค่า duty ratio=0.9.....	79
5.23 แสดงรูปของวงจรสร้างสัญญาณในการทดลองแบบ ไม่มีการป้อนกลับ.....	80
5.24 วงจรปรับค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	80
5.25 วงจรปรับค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด.....	81
5.26 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	81
5.27 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด.....	82
5.28 วงจรกำลังของเอชซีซีโอเปอร์ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการ ทดลอง.....	82
5.29 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัว ต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ.....	83
5.30 แสดงผลการทดลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ.....	83
5.31 วงจรทดลองผลของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	84
5.32 แสดงผลของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	84
5.33 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบ ไม่มีการป้อนกลับ.....	85
5.34 วงจรทดลองผลเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	85
5.35 แสดงผลเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	86
5.36 วงจรทดลองผลเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	86
5.37 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	87
5.38 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	87
5.39 วงจรทดลองผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	88
5.40 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	88
5.41 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	89
5.42 แสดงวงจรทดลองการควบคุมแรงดันเอชซีซีโอเปอร์แบบ ใช้ค่าเฉลี่ย.....	89
5.43 ตัวควบคุมแบบ PI	90
5.44 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	91
5.45 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด.....	91

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.46 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ.....	92
5.47 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ.....	92
5.48 แสดงผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	93
5.49 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบใช้ค่าเฉลี่ย.....	93
5.50 แสดงผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	94
5.51 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	95
5.52 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	95
5.53 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	96
5.54 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	96
5.55 แสดงวงจรทดลองการควบคุมแรงดันเอชซีซีโอปเปอร์แบบใช้ค่าชั่วขณะ.....	97
5.56 ตัวควบคุมแบบ PD	97
5.57 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	98
5.58 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด.....	99
5.59 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ.....	99
5.60 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ.....	100
5.61 แสดงผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	100
5.62 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบใช้ค่าชั่วขณะ.....	101
5.63 แสดงผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด.....	101
5.64 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	102
5.65 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด.....	102
5.66 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	103
5.67 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด.....	103
6.1 Block diagram ของเครื่องรักษาระดับแรงดันแบบใช้วงจรมัลติปลิวเออร์.....	106

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 Block diagram ของเครื่องรักษาระดับแรงดันแบบใช้วงจรเอชทีซีออปเปอร์แบบกลับขั้วได้...	106
6.3 Block diagram ของเครื่องสร้างแรงดันไฟตกชั่วขณะ.....	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วงจรเอชซีช้อปเปอร์ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับแรงดันไฟฟ้าเอชซี เพื่อแทนที่วงจรแบบควบคุมเฟสโดยทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีข้อดีคือ

1. ในด้านของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกของเอชซีช้อปเปอร์จะให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเป็นไซน์

2. เนื่องจากเอชซีช้อปเปอร์ทำการตัดรูปคลื่นไซน์ด้วยความถี่สูง จึงใช้วงจรกรองด้านขาออกที่มีขนาดเล็ก

3. คุณภาพของกระแสด้านขาเข้าของวงจรดีกว่า มีความเพี้ยนทางฮาร์มอนิกที่ต่ำกว่าวงจรแบบเฟสคอนโทรล เนื่องจากในเฟสคอนโทรลฮาร์มอนิกส์ของกระแสจะเปลี่ยนไปตามมุมเฟสของการควบคุม แต่สำหรับเอชซีช้อปเปอร์ ฮาร์มอนิกส์ของกระแสไม่ขึ้นอยู่กับ Duty ratio

ที่ผ่านมาระบบควบคุมแรงดันด้านขาเข้าของเอชซีช้อปเปอร์จะใช้การปรับ Duty ratio โดยใช้หลักการ PWM สัญญาณควบคุมดีซีจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งมีความถี่และแอมพลิจูดคงที่ สัญญาณ PWM ซึ่งมี Duty ratio แปรผันตามสัญญาณควบคุมดีซี จะถูกนำไปใช้ในการ on-off ของสวิตช์ต่อไป ด้วยเหตุนี้การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเอชซีช้อปเปอร์ที่ผ่านมา จึงมักเป็นการควบคุมค่าเฉลี่ย (Average-Value Control) กล่าวคือแรงดันด้านขาออกซึ่งเป็นสัญญาณไซน์จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดีซี โดยใช้วงจรเรียงกระแสหรือวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดแบบความเร็วสูง [1] [2] และ [4] ซึ่งค่าที่ได้ออกมาจะแปรผันตามค่าประสิทธิผลหรือแอมพลิจูดของสัญญาณไซน์ แล้วนำค่าที่ได้นี้มาเข้าตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งการควบคุมโดยวิธีดังกล่าว ถึงแม้จะง่ายในการสร้างวงจรแต่มีข้อเสียก็คือ

1. การตรวจจับแรงดันโดยวิธีดังกล่าวต้องใช้เวลาอย่างน้อย $\frac{1}{2}$ ถึง 1 ไซเคิล เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่ถูกต้องทำให้เกิดการหน่วงเวลาของการตรวจจับแรงดันป้อนกลับ การออกแบบระบบควบคุมจึงไม่สามารถออกแบบให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วได้ เนื่องจากมันจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบควบคุม และโอเวอร์ชูตของแรงดันด้านขาออก

2. ค่าแรงดันป้อนกลับซึ่งเป็นดีซี ไม่ได้สะท้อนคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ได้ ทำให้เมื่อนำมาใช้กับโหลดที่ไม่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น แรงดันด้านขาออกที่ได้จะมีความเพี้ยนเนื่องจากผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกส์ของโหลด

3. สัญญาณฟีนลีย์มีแอมพลิจูดคงที่ ทำให้แรงดันด้านขาออกได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของแรงดันด้านขาเข้า เช่น ในกรณีของการเกิด Voltage Sag หรือ Swell

จึงได้มีการนำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเอชซีซีโอปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ (Instantaneous-value voltage control) ใน [5] ซึ่งได้นำเสนอแนวคิดในการควบคุมแรงดันชั่วขณะไว้ดังนี้คือ

1. การสร้างสัญญาณแคเรียร์ฟีนลีย์ ซึ่งมีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงตามรูปคลื่นไซน์ของแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า เพื่อให้สามารถนำแรงดันด้านขาออกที่เป็นไซน์มาใช้ในการป้อนกลับได้โดยตรง

2. ระบบการควบคุมแรงดันด้านขาออกแบบชั่วขณะ โดยใช้การป้อนกลับแรงดันและกระแสโพล

ซึ่งจากผลการจำลองใน [5] พบว่าการควบคุมแรงดันที่นำเสนอ นั้น มีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ทั้งต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอ้างอิงและการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านขาเข้า นอกจากนี้ยังให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่มีคุณภาพใกล้เคียงไซน์ได้แม้ใช้กับโพลที่ไม่เป็นเชิงเส้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอาแนวความคิดในบทความดังกล่าวมาสร้างเป็นวงจรจริง เพื่อทดสอบผลในทางปฏิบัติ ว่าการควบคุมแรงดันโดยวิธีดังกล่าว นั้นสามารถได้ผลเป็นที่น่าพอใจหรือไม่ โดยได้ทำการปรับปรุงวงจรสร้างแคเรียร์ฟีนลีย์ใหม่ เพื่อความสะดวกในการควบคุม และได้ออกแบบวงจรควบคุมตามที่ได้นำเสนอในบทความดังกล่าวเพื่อยืนยันความถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของวงจรเอชซีซีโอปเปอร์

1.2.2 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบการควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีซีโอปเปอร์ด้วยค่าเฉลี่ย

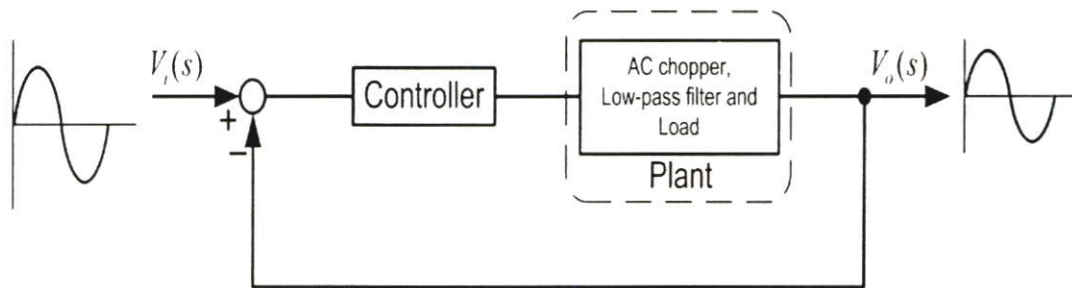
1.2.3 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของระบบการควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีซีโอปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ

1.2.4 เพื่อทำการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีซีโอปเปอร์ ระหว่างการควบคุมด้วยค่าเฉลี่ยและการควบคุมด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ

1.2.5 เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการนำวงจรเอชซีซีโอปเปอร์มาพัฒนา หรือนำประยุกต์ใช้งาน

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้วิจัย

จากแต่เดิมที่การควบคุมค่าแรงดันด้านขาออกของเอชชี้อุปเปอร์ ได้ใช้ค่าแรงดันด้านขาออกของเอชชี้อุปเปอร์ที่เป็นไซน์ มาผ่านวงจรเรียงกระแสหรือวงจรตรวจจับแอมพลิฟายด์แบบความเร็วสูง นำค่าที่ได้มาผ่านตัวควบคุมแบบ PI แล้วทำการป้อนกลับให้กับระบบ แต่การเปลี่ยนจากสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณไฟตรงนั้น จะทำให้ระบบมีการตอบสนองที่ล่าช้า, ค่าแรงดันป้อนกลับซึ่งเป็นดีซี ไม่ได้สะท้อนคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ได้ ทำให้เมื่อนำมาใช้กับโหลดที่ไม่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น อีกทั้งสัญญาณพื้นเลื้อยมีแอมพลิฟายด์คงที่ทำให้แรงดันด้านขาออกได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของแรงดันอินพุต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำแอมพลิฟายด์ของสัญญาณไซน์ช่วงขณะของแหล่งจ่ายมาอดคูลทเป็นสัญญาณแคเรียร์พื้นเลื้อย ทำให้สามารถนำค่ากระแสและแรงดันด้านขาออกของเอชชี้อุปเปอร์ที่เป็นไซน์ (ดังแสดงในรูปที่ 1.1) มาทำการป้อนกลับให้กับระบบ โดยที่สัญญาณ PWM ได้มาจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณแคเรียร์พื้นเลื้อยกับสัญญาณไซน์ควบคุม โดยที่นำค่ากระแสและแรงดันด้านขาออกที่เป็นไซน์ จะทำให้การควบคุมแรงดันด้านขาออกมีความรวดเร็วและแม่นยำ อีกทั้งค่าแอมพลิฟายด์ของสัญญาณแคเรียร์พื้นเลื้อยจะแปรผันตามแอมพลิฟายด์ของแหล่งจ่าย ดังนั้นแรงดันด้านขาออกจะได้รับการปรับค่าโดยอัตโนมัติตามการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่าย ทำให้การแรงดันด้านขาออกของเอชชี้อุปเปอร์ มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่าย



รูปที่ 1.1 Block diagram ของแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตของวิทยานิพนธ์คือ ทำการจำลองและทำการทดลองการควบคุมแรงดันของเอชชี้อุปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันช่วงขณะ อีกทั้งทำการจำลองและทำการทดลองการควบคุมแรงดันของเอชชี้อุปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันเฉลี่ย แล้วนำผลการจำลองและผลการทดลองมาเปรียบเทียบ โดยในหัวข้อที่ใช้การเปรียบเทียบคือผลการตอบสนอง ผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด และผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยที่พิกัดของเอชชี้อุปเปอร์อยู่ที่ 1 kW

1.5 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

การควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชชี้อปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ ในงานวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแบ่งเป็นเรื่องได้ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ทฤษฎี หรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงพื้นฐานของวงจรเอชชี้อปเปอร์เฟสเดียวและหลักการวิเคราะห์การทำงานของเอชชี้อปเปอร์เฟสเดียว

บทที่ 3 กล่าวถึงการควบคุมแรงดันของวงจรเอชชี้อปเปอร์ด้วยค่าแรงดันเฉลี่ย และการควบคุมแรงดันของวงจรเอชชี้อปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ

บทที่ 4 กล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆของวงจรเอชชี้อปเปอร์และของระบบการควบคุม พร้อมทั้งจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC

บทที่ 5 กล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆของวงจรเอชชี้อปเปอร์และของระบบการควบคุม พร้อมทั้งทำการทดลองวงจรเอชชี้อปเปอร์ อีกทั้งทำการทดลองการควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชชี้อปเปอร์ที่ไม่มีกรป้อนกลับ การควบคุมแรงดันของเอชชี้อปเปอร์แบบใช้ค่าเฉลี่ย และการควบคุมแรงดันของเอชชี้อปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ โดยหัวข้อที่ทำการทดลอง คือ ผลการตอบสนอง ผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด และผลเมื่อแหล่งจ่ายลดลงหรือเพิ่มขึ้นทันทีทันใด พร้อมทั้งวิจารณ์ผลการทดลอง

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาการทำงานของวงจรเอชชี้อปเปอร์
- 1.6.2 ศึกษาการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันของเอชชี้อปเปอร์ด้วยค่าเฉลี่ย
- 1.6.3 ศึกษาการทำงานของวงจรควบคุมแรงดันของเอชชี้อปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ
- 1.6.4 ทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.6.5 ทำการทดลองวงจรเอชชี้อปเปอร์
- 1.6.6 ทำการทดลองการควบคุมแรงดันของเอชชี้อปเปอร์ด้วยค่าเฉลี่ย
- 1.6.7 ทำการทดลองการควบคุมแรงดันของเอชชี้อปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ
- 1.6.8 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน
- 1.6.9 นำผลการทดลองมาหาประสิทธิภาพ
- 1.6.10 เขียนและพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำวิธีการควบคุมแรงดันของเอชซีซีอปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องสร้างแรงดันไฟตกชั่วขณะ เครื่องรักษาแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ หรือแหล่งจ่ายไฟแบบปรับค่าได้ เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมรรถนะของตัวอุปกรณ์

บทที่ 2

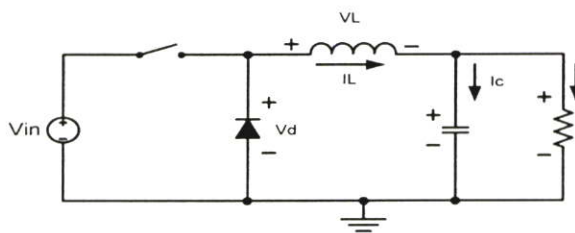
วงจรเอชซีซีออปเปอร์เฟสเดียว

2.1 บทนำ

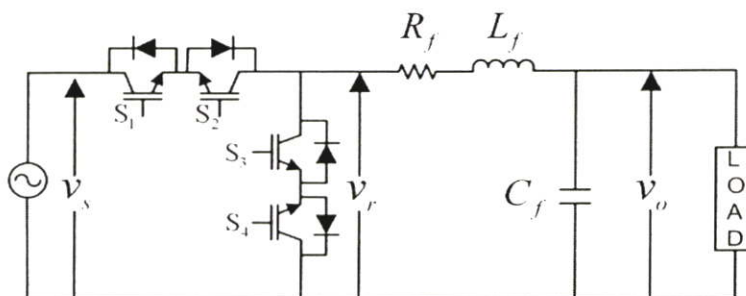
วงจรเอชซีซีออปเปอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรแบบแปลงจากแรงดัน ไฟสลับเป็นแรงดันไฟสลับ ซึ่งวงจรเอชซีซีออปเปอร์นี้นั้นสามารถนำประยุกต์ใช้เป็นเครื่องสร้างแรงดันไฟตก เครื่องรักษาแรงดันอัตโนมัติหรืออาจจะนำไปประยุกต์ใช้แทนอ้อได้อทรานสฟอร์มเมอร์ เป็นต้น วิทยานิพนธ์ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการของวงจรเอชซีซีออปเปอร์ และโหมมการทำงานในช่วงต่างๆ ของวงจรเอชซีซีออปเปอร์

2.2 สมการของวงจรเอชซีซีออปเปอร์

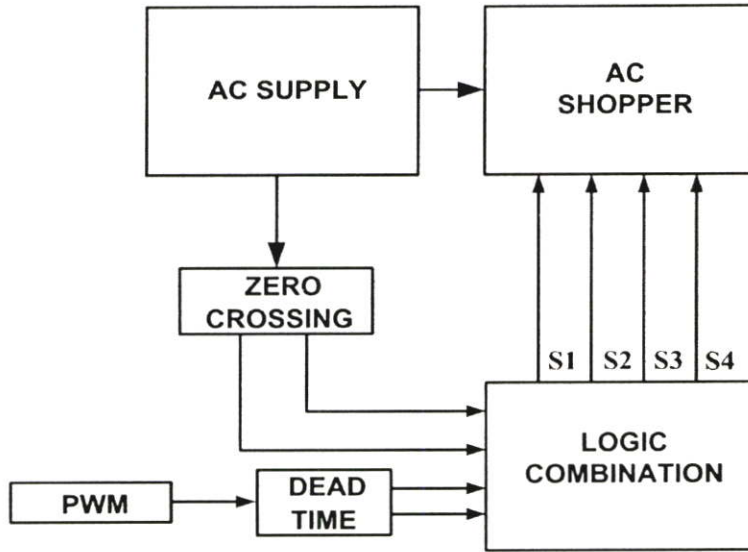
วงจรเอชซีซีออปเปอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ถูกประยุกต์มาจากวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์นั้นเป็นวงจรแปลงไฟจากคิซีเป็นคิซี สวิตซ์ที่ใช้นั้นจึงเป็นสวิตซ์ทางเดียวคือใช้ IGBT กับไดโอดมาเป็นทางผ่านของกระแส ซึ่งวงจรเอชซีซีออปเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 2.2 เป็นวงจรบั๊กเอชซีซีออปเปอร์แบบเฟสเดียวซึ่งแปลงไฟจากเอชซีเป็นเอชซี โดยใช้ IGBT เป็นสวิตซ์ 4 ตัว เพื่อสร้างทางไหลของกระแส 2 ทิศทาง คือ ในช่วงทางด้านบวกกับทางด้านลบและยังมีชุดกรองผ่านความถี่ต่ำ เพื่อกำจัดริปเปิลความถี่สูงของแรงดันเอาต์พุต ซึ่งจะทำได้แรงดันทางด้านขาออกที่เป็นไซน์



รูปที่ 2.1 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์

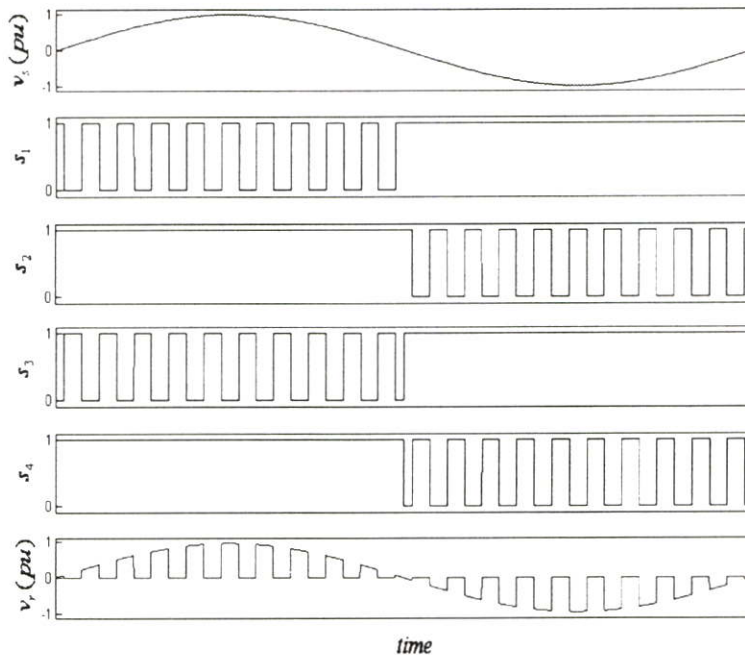


รูปที่ 2.2 วงจรบั๊กเอชซีซีออปเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 2.3 รูปบล็อกไดอะแกรมของการสร้างสัญญาณขับเกท

โดยในรูปที่ 2.3 เป็นรูปบล็อกไดอะแกรมของการสร้างสัญญาณขับเกทของ IGBT ซึ่งรูปคลื่นสัญญาณขับเกทของ IGBT และสัญญาณแรงดันที่ถูกสับได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านขาออกด้านหน้าฟิเตอร์ v_f และแรงดันขาเข้าของเอซี ซี อปเปอร์ได้แสดงไว้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นสัญญาณขับเกทของ IGBT และสัญญาณแรงดันที่ถูกสับ

ให้แรงดันขาเข้ามีสมการเป็น

$$v_s = V_m \cos(\omega_s t), \quad (2.1)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุม

V_m คือ ค่าแมกนิจูดของแหล่งจ่าย

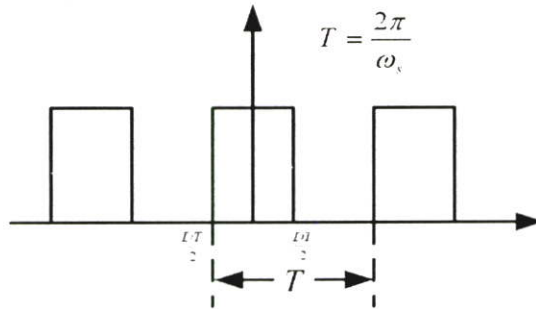
ค่าของ duty ratio หาได้จากสมการ

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ T_{on} คือ ช่วงเวลาการ ON ของสวิตช์ T_s คือคาบเวลาในการสวิตช์

และ D คือ Duty ratio ตามลำดับ

ทำการวิเคราะห์สัญญาณของการสวิตช์ โดยจะให้สัญญาณของการสวิตช์เป็นฟังก์ชันแบบคู่ (even Function) ตามรูปที่ 2.5 และในการวิเคราะห์จะใช้สูตรฟูรีเยร์ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 สัญญาณของการสวิตช์เป็นฟังก์ชันแบบคู่

โดยให้

$$S(\omega_s t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_n \cos k\omega_s t + b_n \sin k\omega_s t] \quad (2.3)$$

$S(\omega_s t)$ คือ สัญญาณของการสวิตช์ และทำการคำนวณเพื่อหาค่า a_0 , a_n และ b_n ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-DT/2}^{DT/2} 1 dt \\ &= \frac{1}{T} (t) \Big|_{-DT/2}^{DT/2} \\ &= D \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos k\omega_s t dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2}{T} \int_{-DT/2}^{DT/2} \cos k\omega_s t d\omega_s t &= \frac{2}{T} \frac{\sin k\omega_s t}{k\omega_s} \Big|_{-DT/2}^{DT/2} \\
&= \frac{2}{Tk\omega_s} \left[\sin k\omega_s \frac{DT}{2} + \sin k\omega_s \frac{DT}{2} \right] \\
&= \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin kD\pi}{k} \right)
\end{aligned}$$

$$b_n = 0$$

นำค่า a_0 , a_n และ b_n ไปแทนในสมการที่(2.3) จะได้เป็น

$$s(\omega_s t) = D + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\sin kD\pi}{k\pi} (\cos k\omega_s t) \quad (2.4)$$

นำสมการที่ (2.1) และ (2.4) มาคูณกันจะได้เป็นสมการ

$$V_r = V_s \cdot s(\omega_s t) \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned}
V_r &= DV_m \cos \omega_1 t + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2V_m \sin kD\pi}{k\pi} \cos(k\omega_s t) \cos(\omega_1 t) \\
&= DV_m \cos \omega_1 t + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2V_m \sin kD\pi \cos(k\omega_s \pm \omega_1)t}{k\pi} \\
&= DV_m \cos \omega_1 t + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_m \sin kD\pi \cos(k\omega_s \pm \omega_1)t}{k\pi}
\end{aligned} \quad (2.6)$$

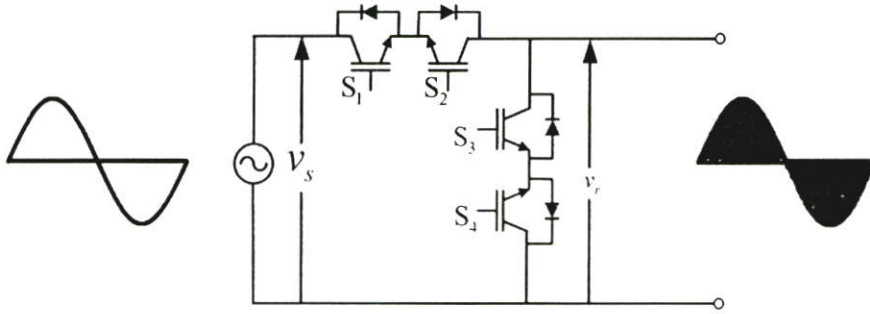
เมื่อออกแบบให้ $\omega_s \gg \omega$ และเลือกใช้ฟิลเตอร์ที่เหมาะสม องค์ประกอบความถี่สูงในสมการที่ (2.6) จะถูกรองออกไป แรงดันขาออกหลังฟิลเตอร์ที่ได้สามารถประมาณได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$v_o = DV_m \cos(\omega t - \varphi_1), \quad (2.7)$$

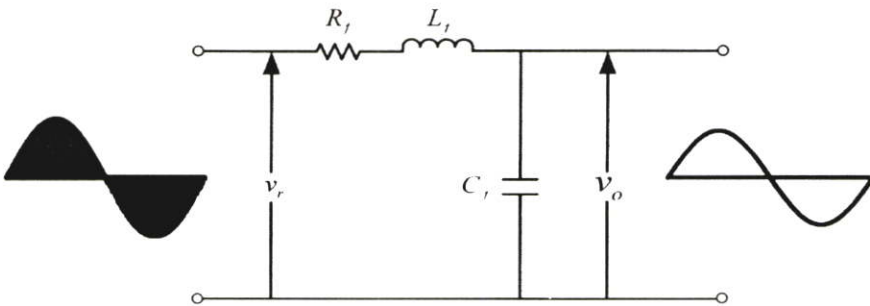
เมื่อ φ_1 คือค่าของมุมเชิง ณ เฟสความถี่มูลฐานของแรงดันขาออกเนื่องจากวงจรกรอง นั่นคือ แรงดันขาออกที่ได้จะมีแอมพลิจูดแปรผันโดยตรงกับ Duty Ratio ของการสวิตช์ โดยทั่วไป φ_1 จะมีค่าน้อยมากสำหรับการสวิตช์ที่ความถี่สูง

2.3 การทำงานของวงจรเอชซีซีโอปเปอร์

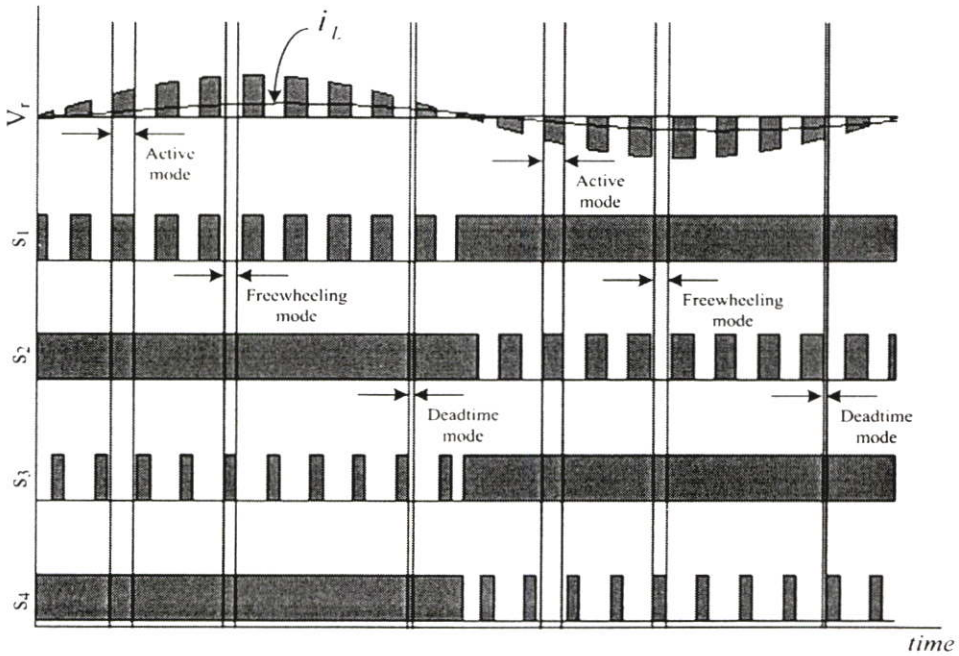
วงจรเอชซีซีโอปเปอร์ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้นั้นเป็นวงจรเอชซีซีโอปเปอร์แบบเฟสเดียว โดยใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์ในการสวิตช์ ดังนั้นเมื่อนำแรงดันไฟสลับไปผ่านชุดของคอนเวอร์เตอร์ จะทำให้ได้เป็นแรงดันไฟสลับที่ถูกสับคั้งรูปที่ 2.6 และเมื่อนำแรงดันไฟสลับที่ถูกสับ ไปผ่านชุดวงจร LC low pass filter ค่าของแรงดันที่เป็นความถี่สูงจะถูกรองออกไป เหลือแต่เพียงค่าของแรงดันไฟสลับที่ความถี่มูลฐานคั้งรูปที่ 2.7 และในรูปที่ 2.8 เป็นรูปคลื่นของเอชซีซีโอปเปอร์ที่โหมคการทำงานต่างๆ โดยที่วงจรเอชซีซีโอปเปอร์ได้แบ่งโหมคการทำงานเป็นโหมคต่างๆดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นของแรงดันไฟสลับก่อนเข้าและหลังเข้าวงจรเอชไอพีเปอร์



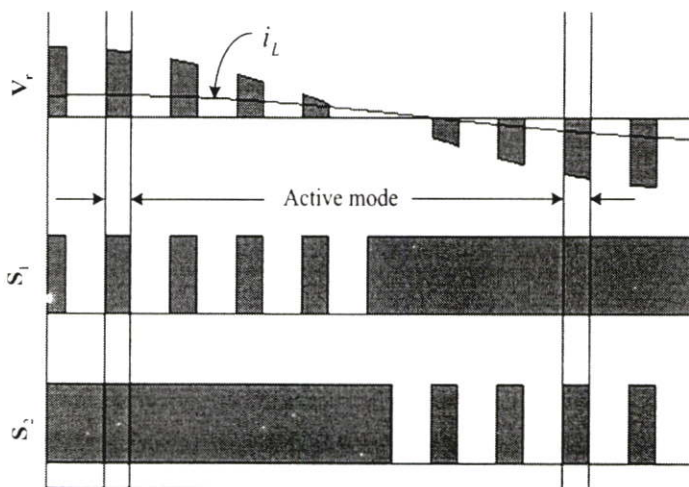
รูปที่ 2.7 รูปคลื่นของแรงดันไฟสลับก่อนเข้าและหลังเข้าวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.8 รูปคลื่นของเอชไอพีเปอร์ที่โหมการทำงานต่างๆ

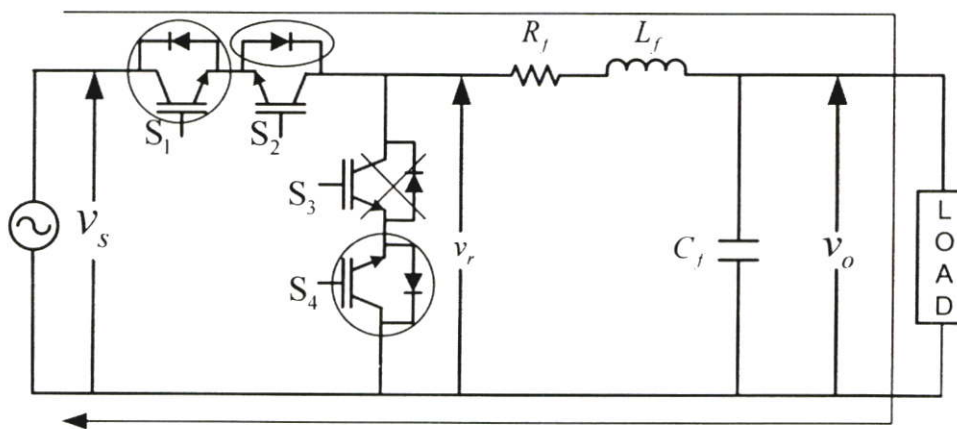
2.3.1 โหมดแอคทีฟ (active mode)

ในโหมดการทำงานโหมดนี้ ซึ่งได้แสดงรูปคลื่นการทำงานในรูปที่ 2.9 เอชซีซีอปเปอร์จะทำงานเพื่อจ่ายกระแสให้กับโหลด โดยจะจ่ายกระแสทั้งในช่วงแรงดันเป็นบวกและแรงดันเป็นลบ ดังนั้นในโหมดนี้จะให้สวิตช์ s_1 และสวิตช์ s_2 มีการทำงานดังนี้



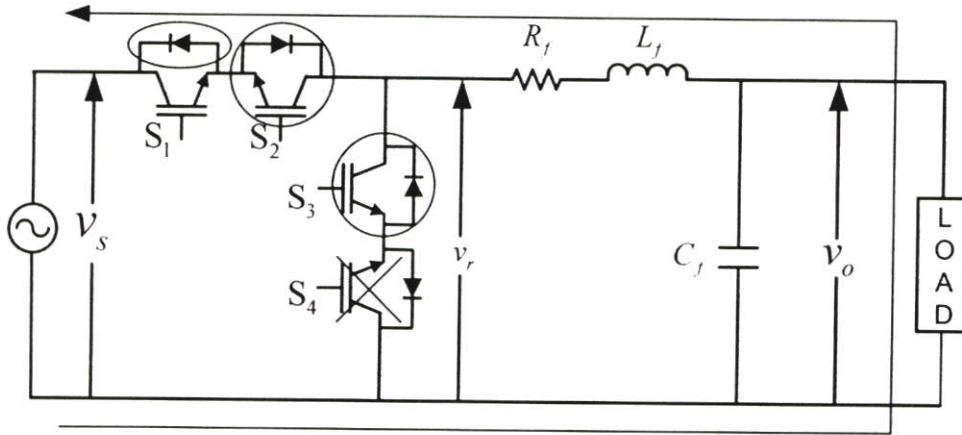
รูปที่ 2.9 รูปคลื่นการทำงานของโหมดแอคทีฟ

- เมื่อ v_o เป็นบวกและ $I_L > 0$ โดยให้สวิตช์ s_1 ทำงานเพื่อจ่ายกระแสให้ทางด้านโหลด โดยกระแสจะไหลผ่าน s_1 และไดโอดที่ล้อม s_2 ดังนั้นแรงดัน $v_o > 0$ และกระแส $I_L > 0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โหมดแอคทีฟในช่วงที่แรงดัน v_o เป็นบวกและ $I_L > 0$

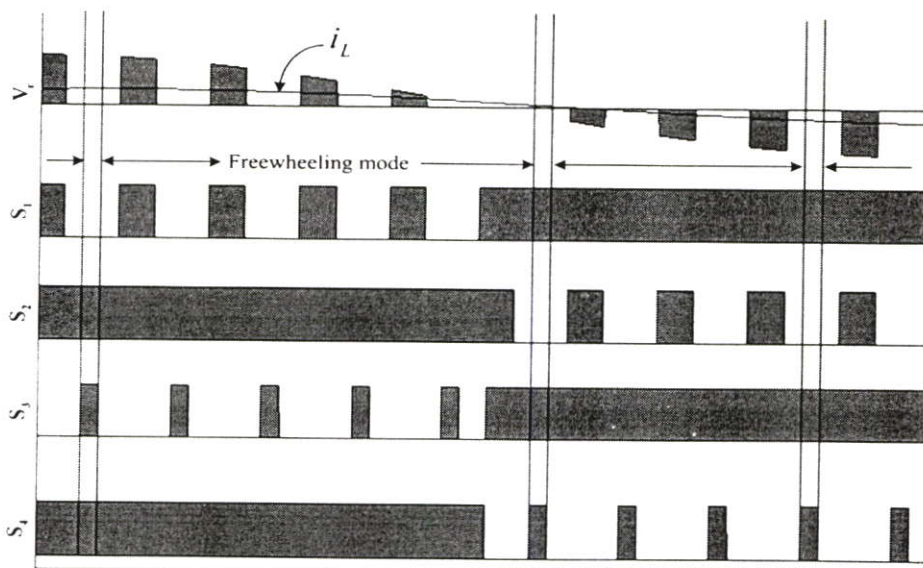
- เมื่อ v_s เป็นลบและ $I_L < 0$ โดยให้สวิตช์ s_1 ทำงานเพื่อจ่ายกระแสให้ทางด้านโหลด โดยกระแสจะไหลผ่าน s_1 และไดโอดที่กร่อม s_2 ดังนั้นแรงดัน $v_r < 0$ และกระแส $I_L < 0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โหมดแอกทีฟในช่วงที่แรงดัน v_s เป็นลบและ $I_L < 0$

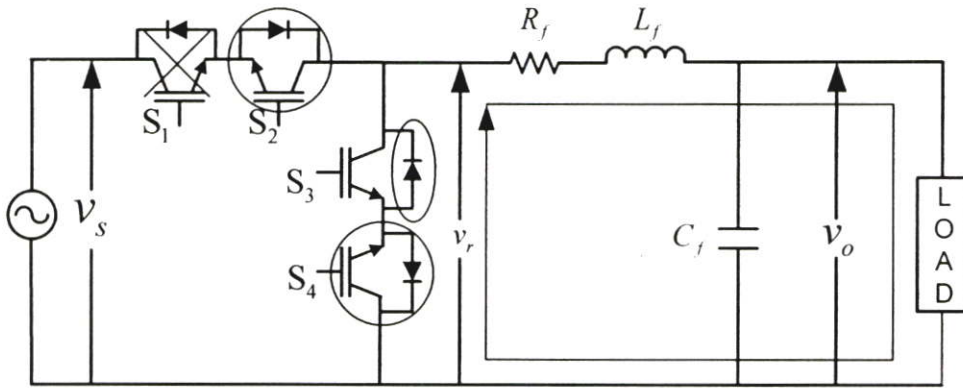
2.3.2 โหมดฟรีวิลลิ่ง (freewheeling mode)

ในโหมดการทำงาน ซึ่งได้แสดงรูปคลื่นการทำงานในรูปที่ 2.12 จะมีการทำงานในช่วงเวลาที่ตรงกันข้ามกับ Active Mode โดยในโหมดนี้จะเป็นโหมดที่สร้างทางผ่านของกระแสในช่วงที่ตัวเหนี่ยวนำเกิดการคายพลังงาน ดังนั้นในโหมดนี้จะให้สวิตช์ s_3 และสวิตช์ s_4 มีการทำงานดังนี้



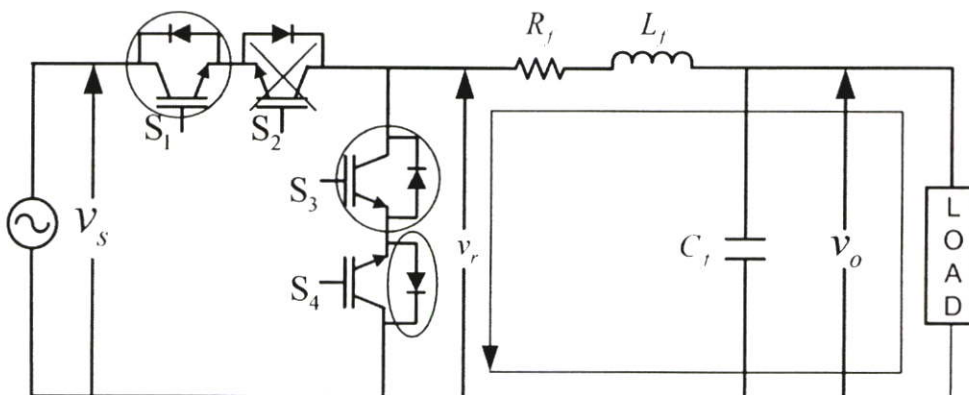
รูปที่ 2.12 รูปคลื่นการทำงานของโหมดฟรีวิลลิ่ง

- เมื่อ v_s เป็นบวกและ $I_L > 0$ โดยให้สวิตช์ s_4 ทำงานเพื่อทำให้เกิดการครบรูปกระแส และกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านโหลดและกลับมาครบรูป โดยผ่านสวิตช์ s_1 และไดโอดที่คร่อมสวิตช์ s_3 ดังนั้นแรงดัน $v_r = 0$ และกระแส $I_L > 0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



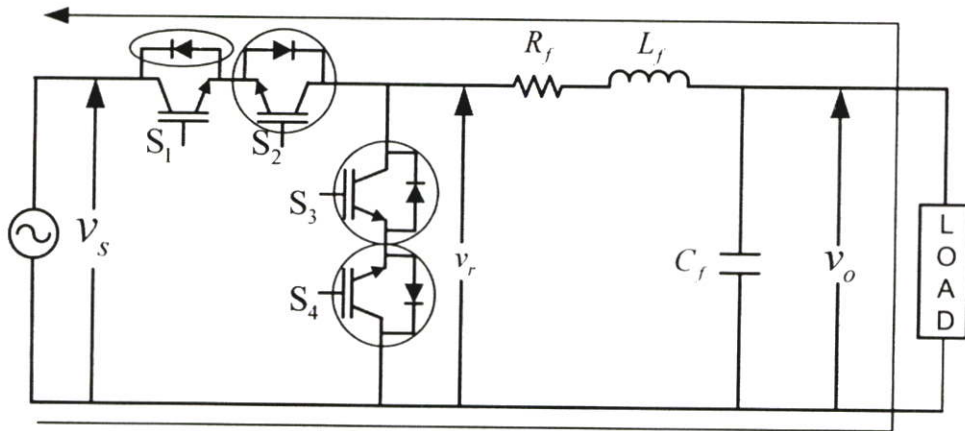
รูปที่ 2.13 โหมดฟรีวิลลิ่งในช่วงที่ v_s เป็นบวกและ $I_L > 0$

- เมื่อ v_s เป็นลบและ $I_L < 0$ โดยให้สวิตช์ s_3 ทำงานเพื่อทำให้เกิดการครบรูปกระแส และกระแสจะยังคงไหลไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่องผ่านทางด้านโหลดและกลับมาครบรูป โดยผ่านสวิตช์ s_3 และไดโอดที่คร่อมสวิตช์ s_4 ดังนั้นแรงดัน $v_r = 0$ และกระแส $I_L > 0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



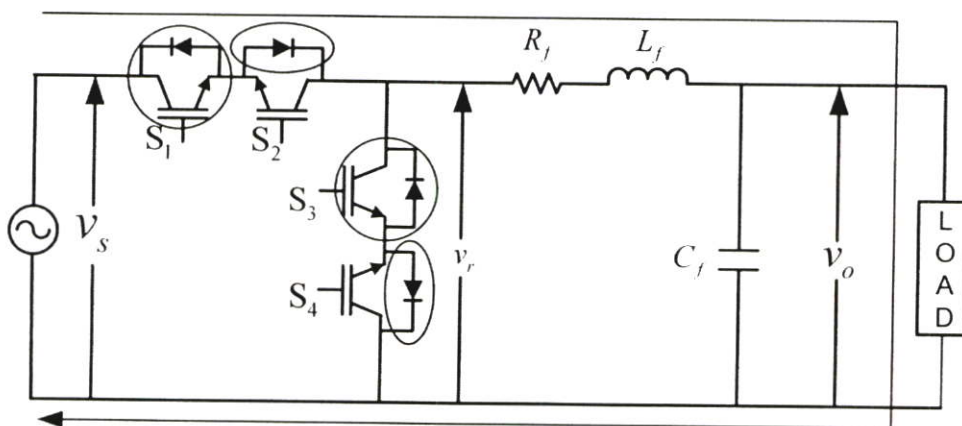
รูปที่ 2.14 โหมดฟรีวิลลิ่งในช่วงที่ v_s เป็นลบและ $I_L < 0$

- เมื่อ v_s เป็นบวก โหลดที่ใช้มีค่าความเป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสอาจจะล้าหลังแรงดันหรือ $I_L < 0$ ดังนั้นจึงให้สวิตช์ s_2 ทำงาน เพื่อทำให้เกิดการครบรูปกระแสและกระแสจะยังคงไหลไปยังแหล่งจ่าย เพื่อเป็นการคืนพลังงาน โดยผ่านสวิตช์ s_2 และไดโอดที่ล้อมสวิตช์ s_1 ดังนั้นแรงดัน $v_r = 0$ และกระแส $I_L < 0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โหมดฟรีวิลลิ่งในช่วงที่ v_s เป็นบวกและ $I_L < 0$

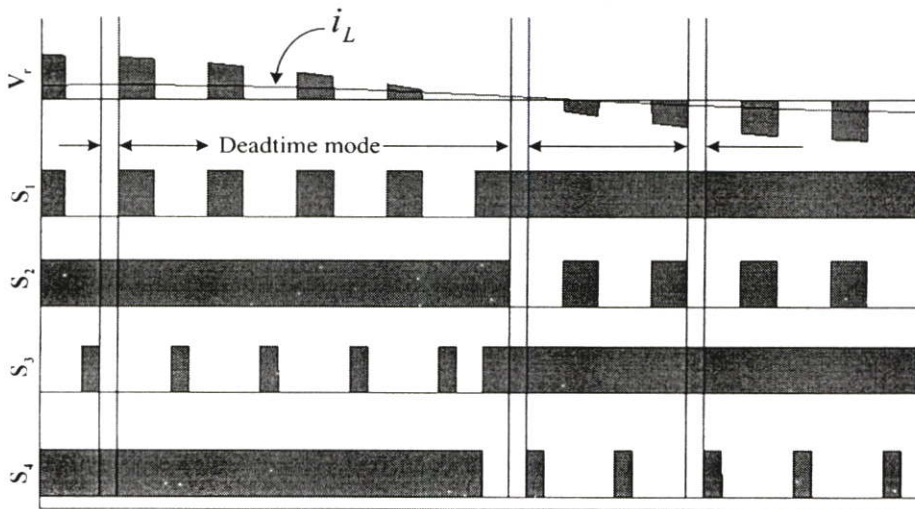
- เมื่อ v_s เป็นลบ โหลดที่ใช้มีค่าความเป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสอาจจะล้าหลังแรงดันหรือ $I_L > 0$ ดังนั้นจึงให้สวิตช์ s_1 ทำงาน เพื่อทำให้เกิดการครบรูปกระแสและกระแสจะยังคงไหลไปยังแหล่งจ่าย เพื่อเป็นการคืนพลังงาน โดยผ่านสวิตช์ s_3 และไดโอดที่ล้อมสวิตช์ s_4 ดังนั้นแรงดัน $v_r = 0$ และกระแส $I_L > 0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 โหมดฟรีวิลลิ่งในช่วงที่ v_s เป็นลบและ $I_L > 0$

2.3.2 โหมดเดดไทม์ (deadtime mode)

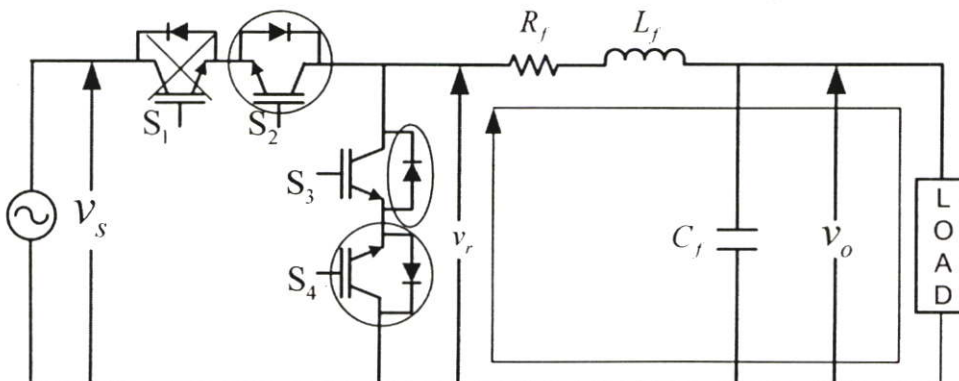
เนื่องจากถ้าโหลดมีค่าความเป็นตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะส่งผลให้กระแสอาจจะล้าหลังแรงดัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างเส้นทางไหลของกระแสไว้ล่วงหน้าเพื่อป้องกันการเกิด Spike และป้องกันการลัดวงจรกันของ IGBT ในวงจรอินเวอร์เตอร์เนื่องมาจากการทำงานพร้อมกันของสวิตช์ ดังนั้นกระแสจะสามารถไหลผ่านไปได้ทั้งทางด้านขาเข้าและทางด้านขาออก โดยขึ้นอยู่กับทิศทางกระแสของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งได้แสดงรูปคลื่นการทำงานในรูปที่ 2.17 โดยในโหมดนี้จะให้สวิตช์ทำงานเพิ่มอีกทีละ 2 ตัวและจะทำงานในช่วงเวลา Dead Time ของสวิตช์ s_1 กับสวิตช์ s_3 และสวิตช์ s_2 กับสวิตช์ s_4 ซึ่งมีการอธิบายดังนี้



รูปที่ 2.17 รูปคลื่นการทำงานของโหมดเดดไทม์

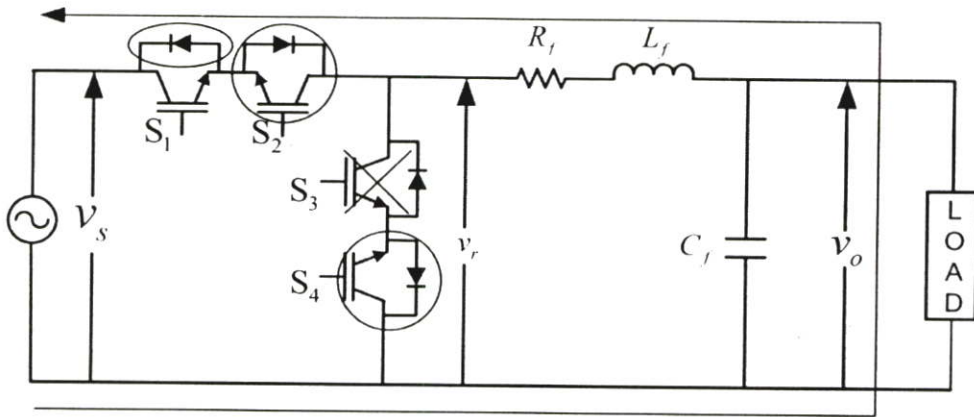
- เมื่อ v_r เป็นบวก ให้สวิตช์ s_2 กับสวิตช์ s_4 ทำงานค้างไว้ตลอดช่วงที่ v_r เป็นบวก เพราะขณะช่วง Dead Time ของสวิตช์ s_1 กับสวิตช์ s_3 จะไม่มีการทำงาน

ดังนั้นถ้ากระแส $I_L > 0$ กระแสไหลผ่านทางด้านเอาต์พุตโดยผ่านสวิตช์ s_4 และไดโอดที่คร่อมสวิตช์ s_3 ดังนั้นแรงดัน $v_r = 0$ และกระแส $I_L > 0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 โหมดเดดไทม์ในช่วงที่ เมื่อ v_r เป็นบวกและ $I_L > 0$

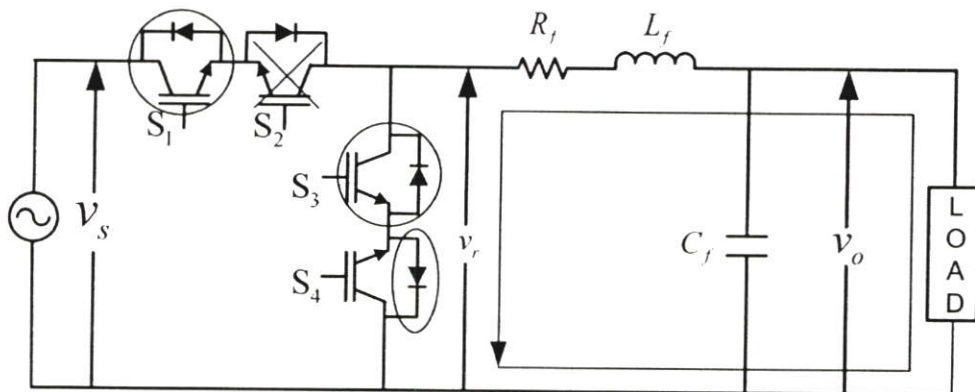
และถ้ากระแส $I_L < 0$ กระแสไหลผ่านทางด้านเอาต์พุตโดยผ่านสวิตช์ s_2 และไดโอดที่
 ครอบสวิตช์ s_1 กลับไปยังแหล่งจ่าย ดังนั้นแรงดัน $v_r = 0$ และกระแส $I_L < 0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โหมดเดดไทม์ในช่วงที่ เมื่อ v_s เป็นบวกและ $I_L < 0$

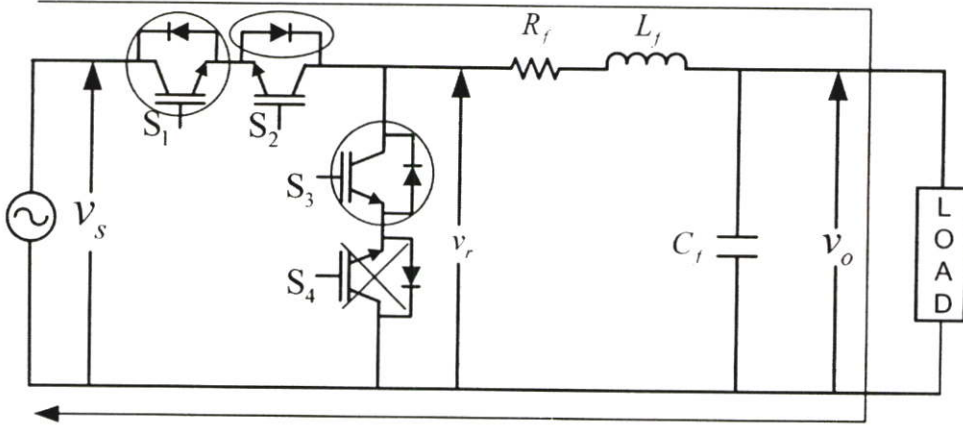
- เมื่อ v_s เป็นลบ ให้สวิตช์ s_1 กับสวิตช์ s_3 ทำงานค้างไว้ตลอดช่วงที่ v_s เป็นบวก เพราะ
 ช่วงช่วง Dead Time ของสวิตช์ s_2 กับสวิตช์ s_4 จะไม่มีการทำงาน

ดังนั้นถ้ากระแส $I_L < 0$ กระแสไหลผ่านทางด้านเอาต์พุตโดยผ่านสวิตช์ s_3 และไดโอดที่
 ครอบสวิตช์ s_4 ดังนั้นแรงดัน $v_r = 0$ และกระแส $I_L < 0$ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โหมดเดดไทม์ในช่วงที่ เมื่อ v_s เป็นลบและ $I_L < 0$

และถ้ากระแส $I_L > 0$ กระแสไหลผ่านทางด้านเอาต์พุตโดยผ่านสวิตช์ s_1 และไดโอดที่
 ครอบสวิตช์ s_2 กลับไปยังแหล่งจ่าย ดังนั้นแรงดัน $v_r = 0$ และกระแส $I_L > 0$ ดังแสดงในรูปที่
 2.21



รูปที่ 2.21 โหมดเบรกใหม่ในช่วงที่ เมื่อ v_s เป็นลบและ $I_L > 0$

บทที่ 3

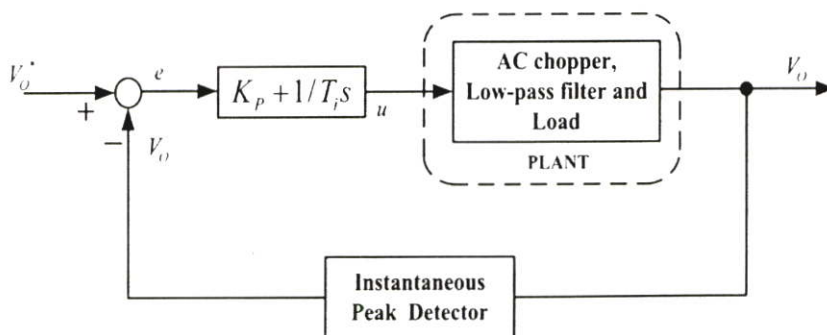
การควบคุมแรงดันของเอชซีชอปเปอร์

3.1 บทนำ

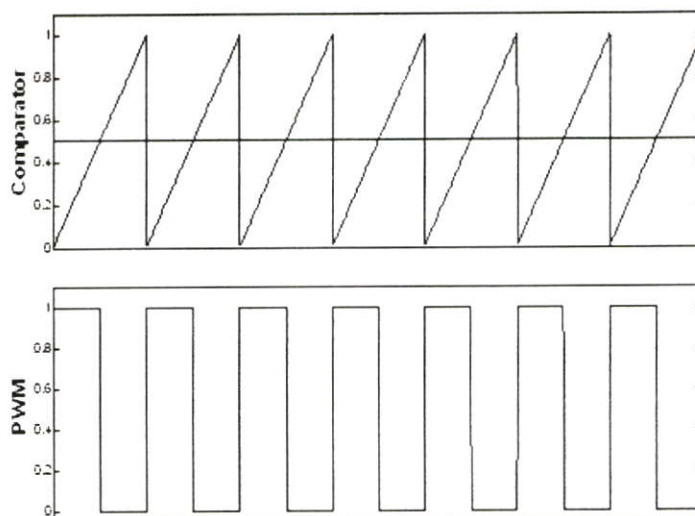
การควบคุมแรงดันของเอชซีชอปเปอร์ คือความต้องการที่จะควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีชอปเปอร์ให้เป็นไปตามความต้องการ เช่น ให้มีค่าของแรงดันขาออกคงที่หรืออาจจะให้แรงดันขาออกตกหรือเพิ่มชั่วขณะ เป็นต้น ซึ่งในการควบคุมแรงดันของเอชซีชอปเปอร์ ให้มีความเสถียรภาพนั้นจำเป็นต้องมีตัวควบคุมที่มีความรวดเร็วและแม่นยำ วิทยานิพนธ์ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรการควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีชอปเปอร์ด้วยค่าแรงดันเฉลี่ยและวงจรการควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีชอปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ อีกทั้งยังกล่าวถึงข้อดีและข้อเสียของการใช้สัญญาณไฟตรงมาใช้ในการป้อนกลับและกล่าวถึงข้อดีของการใช้สัญญาณไซน์มาสร้างเป็นสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยและใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับ

3.2 การควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีชอปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันเฉลี่ย

โดยทั่วไปการควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชซีชอปเปอร์ ทำได้โดยการใช้ค่าแรงดันเฉลี่ย ดังเอกสารอ้างอิงที่ [1] [2] และ [4] ซึ่ง Block diagram ของการควบคุมแรงดันด้านขาออกที่ใช้ค่าแรงดันเฉลี่ยนั้นได้แสดงในรูปที่ 3.1 โดยที่การควบคุมแรงดันขาออกแบบใช้ค่าเฉลี่ยนั้น สัญญาณพีคดับลิวเอ็มจะได้จากการเปรียบเทียบค่าสัญญาณแรงดันควบคุมซึ่งเป็นสัญญาณไฟตรงกับสัญญาณฟันเลื่อยซึ่งมีความถี่และค่าแอมพลิจูดคงที่ กล่าวคือค่าของสัญญาณพีคดับลิวเอ็มที่ได้จะมีความถี่คงที่ ขณะที่ค่าของ Duty ratio จะแปรผันตามอัตราส่วนของแรงดันควบคุมต่อแอมพลิจูดของสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งก็คือถ้าให้ค่าของแรงดันควบคุมมากกว่าค่าของ Duty ratio ก็จะมีค่าของแรงดันควบคุมน้อย ค่าของ Duty ratio ก็จะมีน้อย โดยที่ในรูปที่ 3.2 ได้แสดงรูปของสัญญาณพีคดับลิวเอ็มที่ได้มาจากการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยและสัญญาณควบคุม

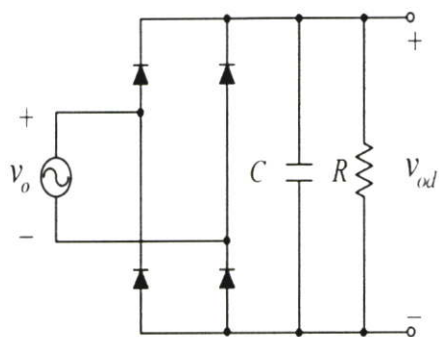


รูปที่ 3.1 block diagram ของการควบคุมแรงดันขาออกด้วยค่าเฉลี่ย

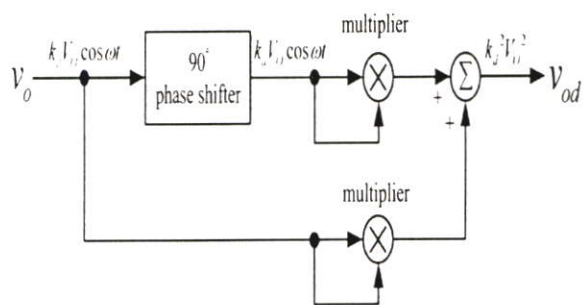


รูปที่ 3.2 การสร้างสัญญาณพีดีบีเอ็มโดยทั่วไป

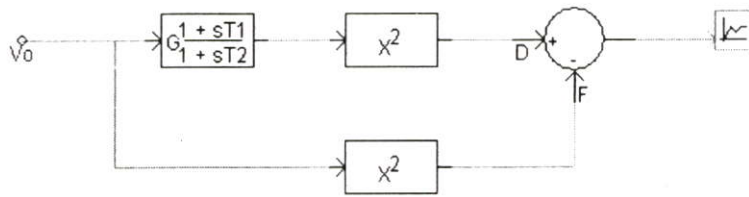
การรักษาแรงดันขาออกของเอชซีซีโอเปอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการ สามารถทำได้โดยการนำค่าแรงดันขาออกซึ่งอยู่ในรูปของค่าแรงดันเฉลี่ยมาทำการป้อนกลับ ซึ่งวงจรที่ทำการเปลี่ยนจากแรงดันขาออกที่เป็นสัญญาณไซน์ ให้เป็นค่าแรงดันเฉลี่ยนั้น สามารถทำได้จากวงจรเรียงกระแสและ RC ฟิลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 หรือ ได้จากวงจรตรวจจับค่ายอดชั่วขณะดังแสดงในรูปที่ 3.4 แล้วนำค่าของสัญญาณไฟตรงที่ได้ป้อนกลับ เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าของแรงดันอ้างอิงที่เป็นไฟตรง แล้วนำค่าความผิดพลาดที่ได้ไปผ่านตัวควบคุมแบบ PI เพื่อที่จะนำค่าสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมไปทำการควบคุมค่าของ Duty ratio โดยที่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้วงจรตรวจจับแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงโดยรูปที่ 3.5 แสดงวงจรที่ใช้ในการจำลอง รูปที่ 3.6 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการจำลอง รูปที่ 3.7 แสดงรูปวงจรที่ใช้ในการทดลองและรูปที่ 3.8 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทดลอง



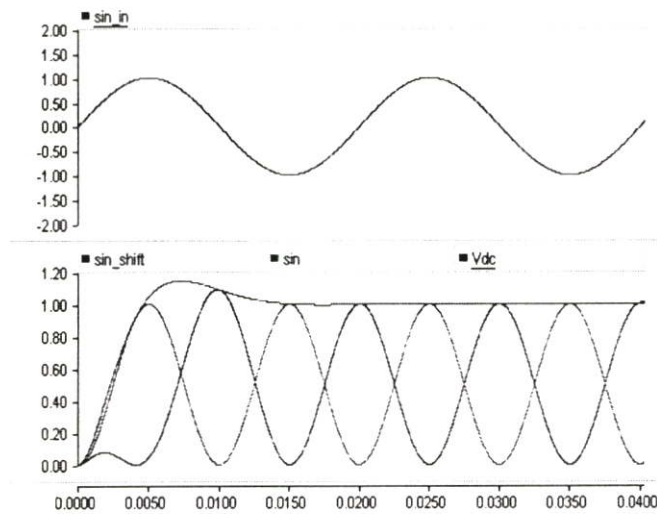
รูปที่ 3.3 รูปวงจรเรียงกระแส



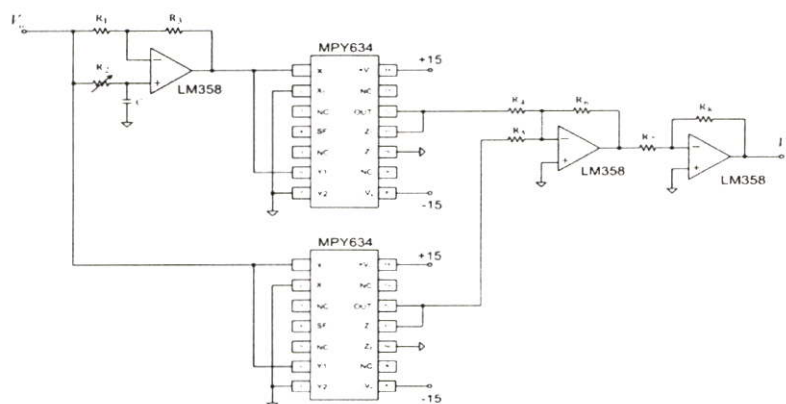
รูปที่ 3.4 รูปวงจรตรวจจับค่ายอดชั่วขณะ



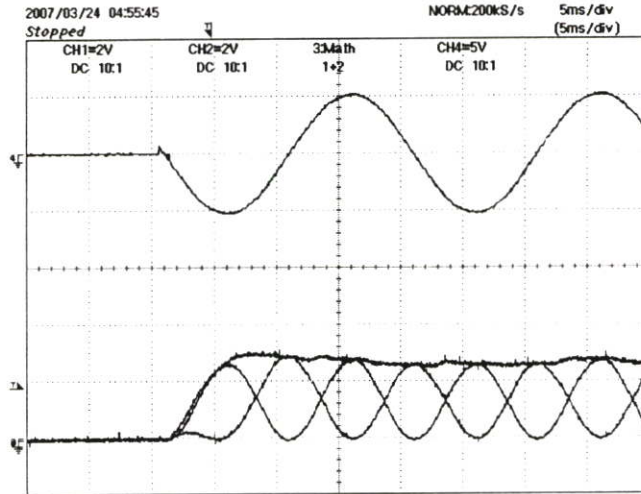
รูปที่ 3.5 รูปวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นของวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 3.7 รูปวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงที่ใช้ในการทดลอง

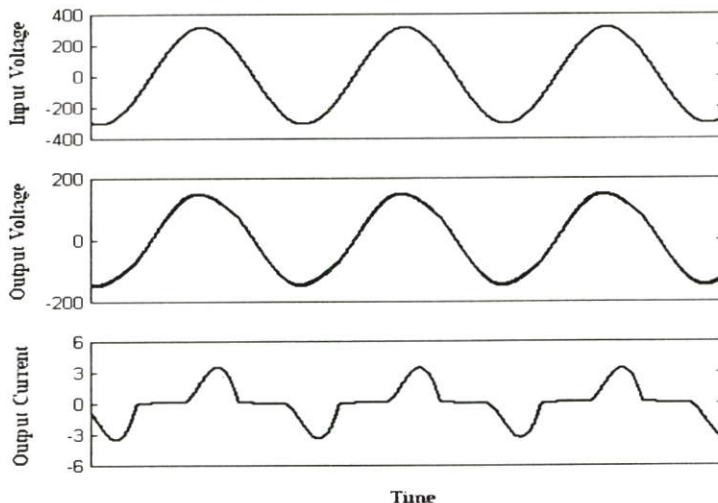


รูปที่ 3.8 รูปคลื่นของวงจรตรวจจับค่าแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงที่ได้จากการทดลอง

การควบคุมแรงดันในลักษณะนี้มีข้อดีคือ สามารถทำได้ง่ายทั้ง และใช้ตัวควบคุมที่ไม่ยุ่งยาก อย่างไรก็ตามการใช้สัญญาณไฟดิซิป้อนกลับให้กับระบบควบคุมมีข้อจำกัดในแง่ของความเร็วในการตอบสนองและคุณภาพของแรงดันด้านขาออกซึ่งอธิบายได้ดังนี้

1. การตรวจจับแรงดันโดยวิธีดังกล่าวต้องใช้เวลอย่างน้อย $\frac{1}{2}$ ถึง 1 ไชเคลต เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่ถูกต้อง ทำให้เกิดการหน่วงเวลาของการตรวจจับแรงดันป้อนกลับ การออกแบบระบบควบคุมจึงไม่สามารถออกแบบให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วได้ เนื่องจากมันจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบควบคุม และโอเวอร์ชูตของแรงดันด้านขาออก

2. ค่าแรงดันป้อนกลับซึ่งเป็นดิซิป้อน ไม่ได้สะท้อนคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ได้ ทำให้เมื่อนำมาใช้กับโหลดที่ไม่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น แรงดันด้านขาออกที่ได้จะมีความเพี้ยนเนื่องจากผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกส์ของโหลด รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างของผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกส์ของโหลดต่อแรงดันเอาต์พุตของเอชซีซีอปเปอร์

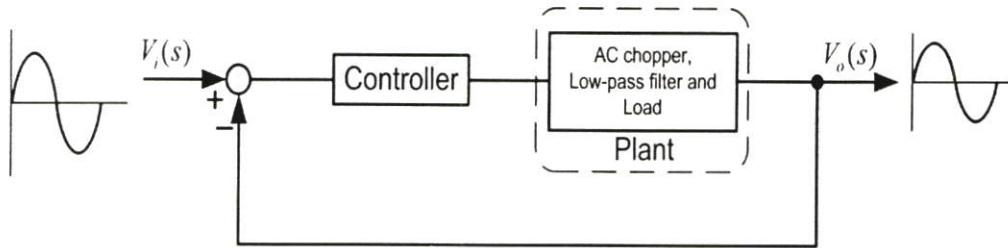


รูปที่ 3.9 รูปคลื่นของโหลดที่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น

3. สัญญาณฟันเลื่อยมีแอมพลิจูดคงที่ ทำให้แรงดันด้านขาออกได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของแรงดันอินพุต เช่น ในกรณีของการเกิด Voltage Sag หรือ Swell

3.3 การควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอชไอโอพีเออร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ

จากข้อเสียของการเปลี่ยนจากสัญญาณไฟสลับเป็นสัญญาณไฟตรง จึงได้มีการนำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเอชไอโอพีเออร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ (Instantaneous-value voltage control) ใน [5] ซึ่งได้เสนอแนวคิดในการแก้ปัญหาเหล่านี้ไว้ก็คือ ใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ (สัญญาณไซน์) มาเป็นสัญญาณควบคุมแทนสัญญาณคิซี ดังแสดงใน Block diagram รูปที่ 3.10

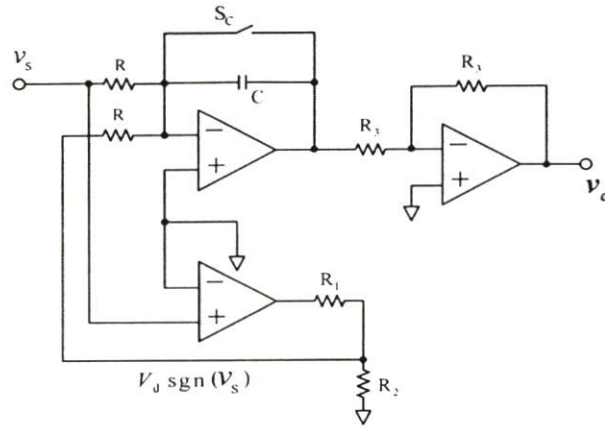


รูปที่ 3.10 Block diagram ของแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

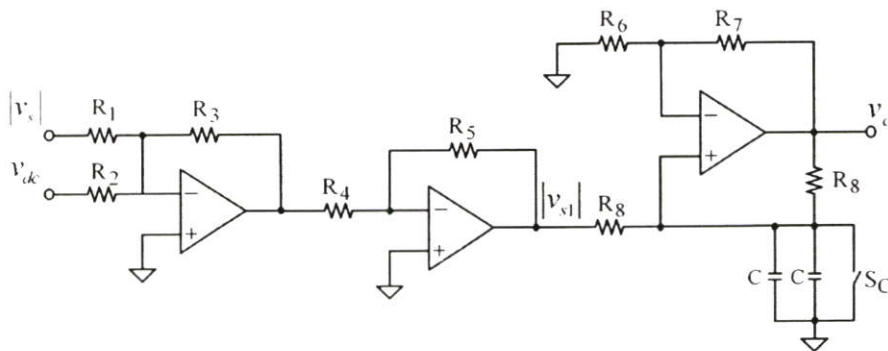
แต่ในการที่จะใช้ค่าของสัญญาณไซน์มาเป็นสัญญาณควบคุมได้นั้น สัญญาณฟันเลื่อยที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM จึงต้องมีแอมพลิจูดที่แปรผันตามสัญญาณไซน์นี้ เพื่อให้ได้เป็นสัญญาณ PWM ที่มีความถี่คงที่ แต่สามารถปรับค่าของ Duty Ratio ได้เช่นเดียวกับวิธีการสร้างสัญญาณพีดีบีทวเอ็มแบบเดิม โดยที่การปรับค่า Duty ratio ทำได้ด้วยการปรับค่าของสัญญาณไซน์ควบคุม และจากผลของการจำลองใน [5] ได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชไอโอพีเออร์ จะให้ผลของการตอบสนองที่รวดเร็ว ทั้งต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอ้างอิงและต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านขาเข้า นอกจากนี้ยังให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า ที่มีคุณภาพใกล้เคียงไซน์ได้แม้ใช้กับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในส่วนนี้จะอธิบายถึงการสร้างสัญญาณฟันเลื่อย และระบบควบคุมแรงดันแบบใช้ค่าชั่วขณะ

3.3.1 การสร้างสัญญาณฟันเลื่อยแบบมีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงตามแรงดันด้านขาเข้า

โดยใน [5] ได้นำเสนอวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่มีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงตามแรงดันด้านขาเข้า โดยใช้วงจรอินทิเกรตแบบกลับขั้วซึ่งมีสวิทช์สำหรับรีเซ็ตแรงดันของตัวเก็บประจุต่อคร่อมด้านขาเข้าและด้านขาออกของออปแอมป์ ดังรูปที่ 3.11 ในทางปฏิบัติพบว่า การควบคุมการ On-Off ของสวิทช์ทำได้ยาก เนื่องจากต้องใช้วงจรขับที่แยกแยะระดับแรงดันต่างหาก ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้เปลี่ยนมาใช้วงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เนื่องจากขาของสวิทช์จะต่อลงกราวด์ทำให้ง่ายต่อการควบคุม

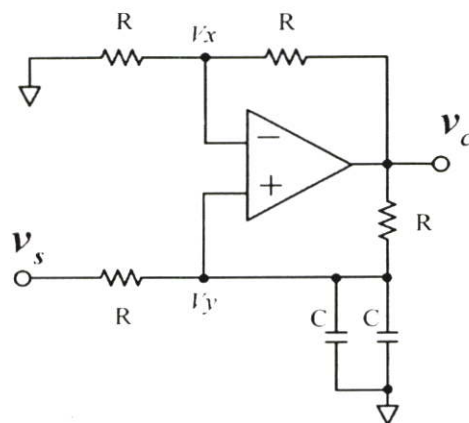


รูปที่ 3.11 วงจรสร้างสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยแบบเดิม



รูปที่ 3.12 วงจรสร้างสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยแบบใหม่

ในรูปที่ 3.13 ได้แสดงวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว ซึ่งวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้วที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งค่าเวลาของการอินทิเกรตขึ้นอยู่กับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ โดยที่สามารถเขียนเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้



รูปที่ 3.13 รูปวงจรอินทิเกรตแบบไม่กลับขั้ว

โดยให้
$$v_c(s) = 2V_x \quad ; V_x = \frac{v_c(s)}{2} \quad (3.1)$$

$$\frac{v_s - V_y}{R} = \frac{V_y}{1/2Cs} + \frac{V_y - v_o}{R} \quad (3.2)$$

เนื่องจากเป็น virtual shorts ดังนั้น
$$V_x = V_y \quad (3.3)$$

นำสมการที่ (3.3) แทนใน (3.2)
$$\frac{\cancel{2}v_s(s) - \cancel{v_c(s)}}{\cancel{2}R} = \frac{\cancel{2}Cv_c(s)}{\cancel{2}} - \frac{\cancel{v_c(s)}}{\cancel{2}R} \quad (3.4)$$

ดังนั้นจะได้
$$\frac{v_c(s)}{v_s(s)} = \frac{1}{RCs} \quad (3.5)$$

จากรูปที่ 3.12 อินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์คือสัญญาณแรงดันอินพุตของเอชซีโอปเปอร์ซึ่งเป็นไซน์ที่ผ่านการเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น $|v_s|$ ส่วนของสวิทช์ S_c ที่ขนานกับอินทิเกรตติ้งคาปาซิเตอร์จะใช้สำหรับรีเซตแรงดันที่คาปาซิเตอร์ ทำให้ได้เอาต์พุตเป็นฟันเลื่อย เมื่ออิมพัลส์ที่ใช้รีเซตมีคาบเวลาเป็น T แรงดันเอาต์พุตของอินทิเกรเตอร์ ที่เวลา $t_1 + T$ สามารถเขียนได้เป็นสมการ

$$\begin{aligned} v_c(t_1 + T) &= \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_1+T} \frac{v_s}{R} dt = \frac{V_m}{RC} \int_{t_1}^{t_1+T} \cos(\omega t) dt \\ &= \frac{V_m}{\omega RC} \sin \omega t \Big|_{t_1}^{t_1+T} \\ &= \frac{V_m}{\omega RC} (\sin \omega(t_1 + T) - \sin \omega t_1) \\ &= \frac{V_m}{\omega RC} 2 \left(\cos \omega \frac{(t_1 + T + t_1)}{2} - \sin \omega \frac{T}{2} \right) \\ v_c(t_1 + T) &= \frac{V_m}{\omega RC} 2 \cos \omega(t_1 + T/2) \sin \frac{\omega T}{2} \quad (3.6) \end{aligned}$$

เมื่อเวลา T ของสัญญาณรีเซตมีค่าน้อยและมีค่าคงที่ เวลาของการอินทิเกรต (RC) เท่ากับคาบเวลาของสัญญาณอิมพัลส์ที่ใช้รีเซต แรงดันเอาต์พุตของสัญญาณที่เวลา $t_1 + T$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ถ้า
$$T \rightarrow 0$$

จากกฎของออยเลอร์
$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} \dots$$

ดังนั้น
$$\sin \frac{\omega T}{2} \approx \frac{\omega T}{2}$$

ถ้า
$$RC = T$$

$$v_c(t_1 + T) = \frac{\cancel{2}V_m}{\cancel{RC}\omega} \cdot \frac{\omega RC}{\cancel{2}} \cdot \cos \omega(t_1 + T/2)$$

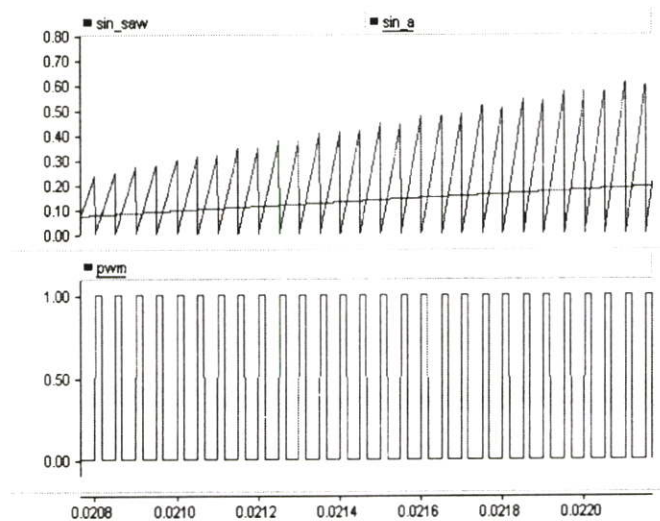
จะได้
$$v_c(t_1 + T) = V_m \cos \omega(t_1 + T/2) \quad (3.7)$$

นั่นคือแอมพลิจูดของรูปคลื่นฟันเลื่อยถูกมีอคติคู่เลทกับแอมพลิจูดของแรงดันแหล่งจ่ายที่
 หนึ่งวงไป $T/2$ วินาที เนื่องจากแกนนิจุดของรูปคลื่นฟันเลื่อยที่บริเวณผ่านศูนย์กลางของแรงดันแหล่งจ่าย
 มีค่าต่ำ อาจทำให้สวิทช์เปิดหรือปิดตลอดเวลา ทำให้ไม่สามารถควบคุมแรงดันขาออก ณ ตำแหน่งนี้
 ได้ [5] เพื่อแก้ไขปัญหานี้ อินพุทของวงจรมติเกรตจะถูกดัดแปลงเป็น

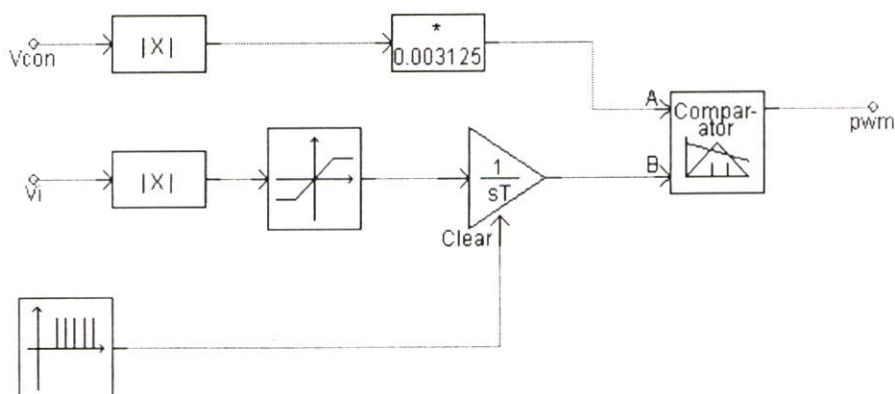
$$v_{s1} = |v_s| + v_{dc}, \quad (3.8)$$

โดยที่ v_{dc} คือค่าคงที่เล็กๆ ที่นำมาบวกกับ $|v_s|$ เพื่อยกระดับตรงจุดผ่านศูนย์กลางให้สูงขึ้นมา

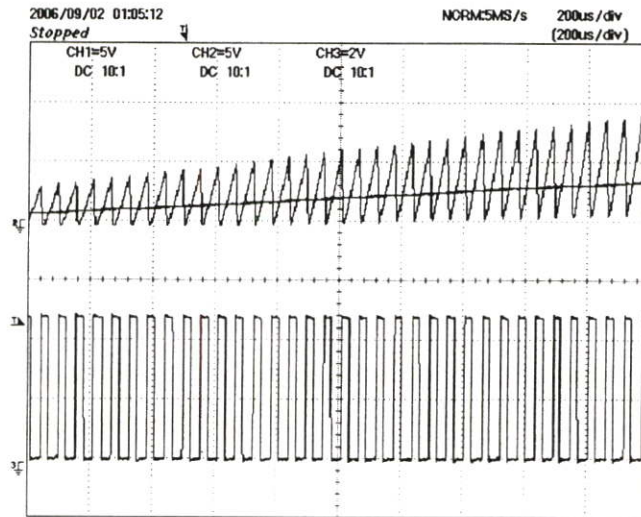
ทำให้ได้รูปสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยและเมื่อนำสัญญาณนี้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์
 อ่างอิงจะเป็นได้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มดังรูปที่ 3.14 โดยรูปที่ 3.15 เป็นรูปวงจรที่ใช้ในการจำลอง
 และรูปที่ 3.16 ที่ได้จากผลการทดลอง



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบใหม่ที่ได้จากการจำลอง



รูปที่ 3.15 รูปวงจรสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบใหม่ที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 3.16 รูปคลื่นสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบใหม่ที่ได้จากการทดลอง

(เส้นบนคือสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อย 5V/div เส้นกลางคือสัญญาณ ไซน์ควมคุม 5V/div และเส้นล่างคือสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม 2V/div)

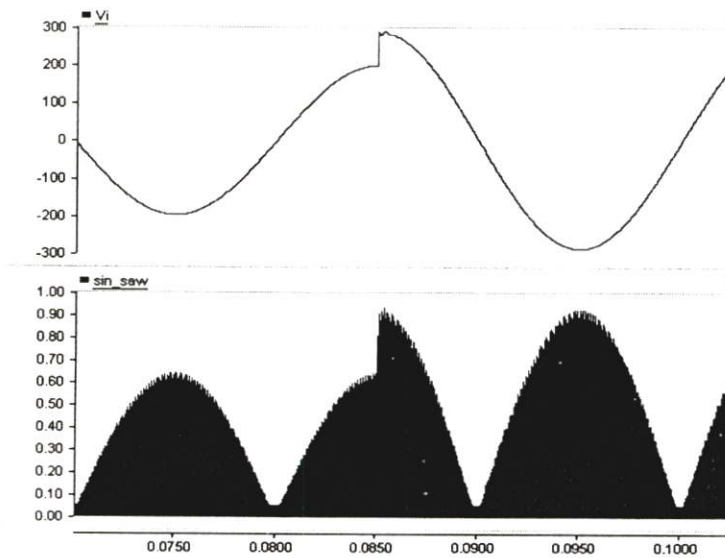
ในการปรับค่าของ Duty ratio สัญญาณพีดับบลิวเอ็มสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าของสัญญาณไซน์อ้างอิง กล่าวคือถ้าให้ค่าของสัญญาณไซน์ควมคุมมีค่ามาก ค่าของ Duty ratio ที่ได้ก็จะมีค่ามาก แต่ถ้าให้ค่าของสัญญาณไซน์ควมคุมมีค่าน้อย ค่าของ Duty ratio ที่ได้ก็จะมีค่าน้อย

โดยที่การใช้สัญญาณของแหล่งจ่ายที่เป็นไซน์ในการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ค่าของแอมพลิจูดของสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยจะแปรผันตามแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า ดังนั้นค่าความชันของสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยจึงมีค่าที่แปรผันตามกับค่าของแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า กล่าวคือถ้าค่าของแรงดันด้านขาเข้าเพิ่มขึ้นค่าความชันของสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าไซน์ควมคุมที่มีค่าคงที่ ค่าของ Duty ratio ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจะมีขนาดที่ลดลง แต่ถ้าค่าของแรงดันด้านขาเข้าลดลงค่าความชันของสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยจะมีค่าลดลง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าไซน์ควมคุมที่มีค่าคงที่ ค่าของ Duty ratio ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจะมีขนาดที่เพิ่มขึ้น

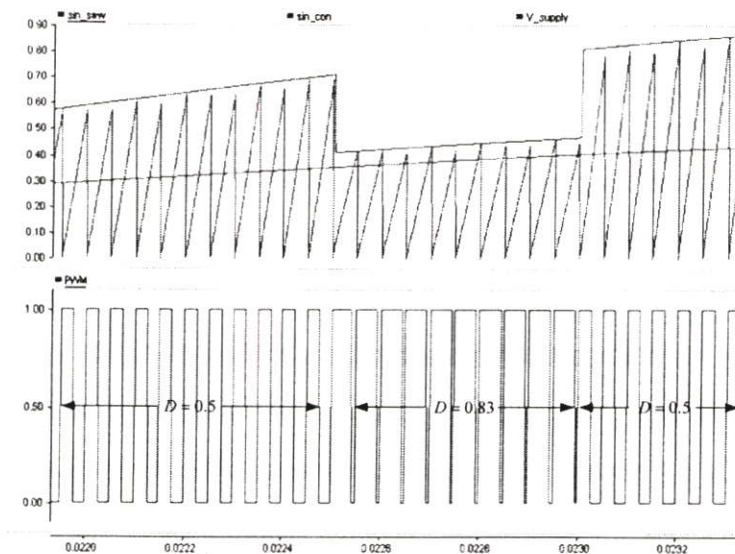
ซึ่งการใช้สัญญาณควมคุมที่เป็นไซน์ในการกำเนิดสัญญาณพีดับบลิวเอ็มในวิธีการนี้มีคุณลักษณะและข้อดีดังนี้

1. แอมพลิจูดของสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยจะแปรผันตามแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าดังแสดงในรูปที่ 3.17 ดังนั้นค่าของ Duty ratio ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจะได้รับการปรับค่าโดยอัตโนมัติตามการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของแรงดันด้านขาเข้า ดังนั้นแรงดันด้านขาออกจะได้รับการปรับค่าโดยอัตโนมัติตามการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของแรงดันด้านขาเข้า ทำให้แรงดันด้านขาออกของเอชซีโอพีเปอร์ มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านขาเข้า และในรูปที่ 3.18 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่มีค่าของ Duty ratio ปรับตามการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด

ของสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อย จากรูปเมื่อแรงดันด้านแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด (ลดลงเหลือ 60%) จะมีผลทำให้สัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยมีแอมพลิจูดลดลงตามไปด้วยเป็นสัดส่วนกัน ขณะที่สัญญาณควบคุมมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้ Duty ratio ของสัญญาณ PWM ในขณะแหล่งจ่ายลดลงมีค่าเพิ่มขึ้น ($D=0.83$) เนื่องจากแรงดันด้านขาออกเป็นผลคูณระหว่าง ค่า Duty ratio กับขนาดของแรงดันด้านขาเข้า ($V_o=DV_s$) ดังนั้นเมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใดแรงดันด้านขาออกที่ได้คือ $110 = 0.83 \cdot 132$ ซึ่งจะเท่ากับกับค่าของแรงดันด้านขาออก ในช่วงแรงดันที่แหล่งจ่ายยังไม่ลดลงทันทีทันใดคือ $110 = 0.5 \cdot 220$

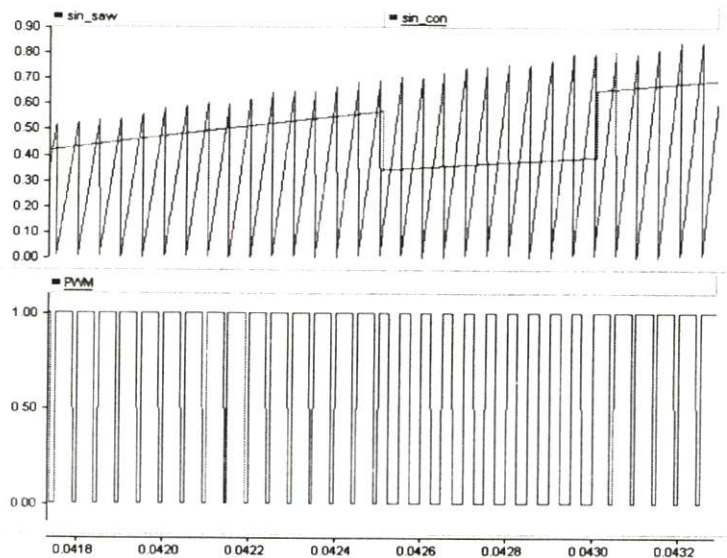


รูปที่ 3.17 รูปคลื่นสัญญาณแคเรียร์เมื่อค่าแรงดันด้านขาเข้าเปลี่ยนแปลงขึ้นลง



รูปที่ 3.18 รูปคลื่นของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่มีค่า Duty ratio ปรับตามการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อย

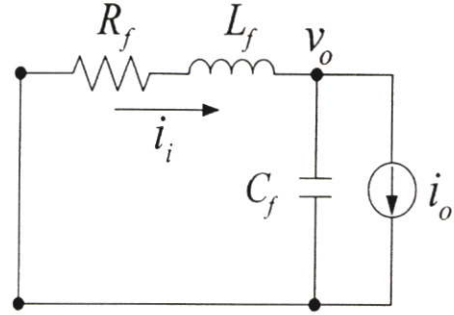
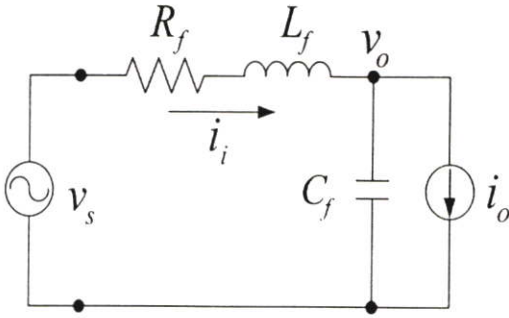
2. ค่ากระแสและแรงดันชั่วขณะของโหลดสามารถนำมาใช้ในระบบควบคุม ซึ่งทำให้การควบคุมแรงดันด้านขาออกมีความรวดเร็วและแม่นยำ กล่าวคือสามารถนำค่าของสัญญาณไซน์ของกระแสและแรงดันด้านขาออกมาทำการป้อนกลับได้เลย โดยที่ไม่ต้องทำการเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟตรง ซึ่งในรูปที่ 3.19 เห็นได้ว่าค่าของสัญญาณไซน์ควบคุมมีค่าที่ลดลง จะทำให้ค่าของ Duty ratio ของสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มมีขนาดที่ลดลงเป็นสัดส่วนกัน แรงดันด้านขาออกจะได้รับการปรับค่าตามค่า Duty ratio ที่เปลี่ยนไปในแต่ละคาบเวลาของสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อย จึงทำให้การควบคุมแรงดันด้านขาออกมีความรวดเร็วและแม่นยำ



รูปที่ 3.19 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณพีดับลิวิตีเอ็มแบบใหม่ เมื่อค่าของแรงดันด้านขาออกเพิ่มขึ้น

3.3.2 การควบคุมแรงดันชั่วขณะ

โดยในการควบคุมชั่วขณะนี้ได้โมเดลโหลดให้เป็นแบบแหล่งจ่ายกระแสรบกวน (disturbance) และได้มองข้ามผลกระทบที่เกิดจากช่วงประจุเวลา ในรูปที่ 3.18 ได้แสดงวงจรสมมูลย์ของเอชซีช็อปเปอร์ในช่วงโหมดแอกทีฟ ในช่วงโหมดนี้ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่แล้วคือ ในช่วงบวกนี้สวิตช์ S_1 จะทำงานแต่สวิตช์ S_3 จะไม่ทำงาน แต่ในช่วงลบนี้สวิตช์ S_3 จะทำงานแต่สวิตช์ S_1 จะไม่ทำงาน และรูปที่ 3.19 ได้แสดงวงจรสมมูลย์ของเอชซีช็อปเปอร์ในช่วงโหมดฟรีวิลลิ่ง ในช่วงบวกของโหมดนี้สวิตช์ S_2 จะทำงานแต่สวิตช์ S_4 จะไม่ทำงาน แต่ในช่วงลบสวิตช์ S_4 จะทำงานแต่สวิตช์ S_2 จะไม่ทำงาน และได้ใช้วิธีการ State-Variable Averaging Method ใน [8] มาใช้ในการหาค่าสมการแรงดันด้านขาออกได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.20 รูปวงจรสมมูลย์ในช่วงโหมดแอกทีฟ รูปที่ 3.21 รูปวงจรสมมูลย์ในช่วงโหมดพรีวิลลิ่ง

สมการเริ่มต้นคือ $\dot{X} = Ax + Bu$ (3.9)

โดยในช่วงโหมดแอกทีฟจะได้เป็นสมการ

$$v_s = L_f \frac{d}{dt} i_i + R_f i_i + v_o \rightarrow \frac{d}{dt} i_i = -\frac{R_f i_i}{L_f} - \frac{v_o}{L_f} + \frac{v_s}{L_f} \quad (3.10)$$

และ

$$C_f \frac{d}{dt} v_o = i_i - i_o \rightarrow \frac{d}{dt} v_o = \frac{i_i}{C_f} - \frac{i_o}{C_f} \quad (3.11)$$

โดยที่ในช่วงโหมดพรีวิลลิ่งจะได้เป็นสมการ

$$0 = L_f \frac{d}{dt} i_i + R_f i_i + v_o \rightarrow \frac{d}{dt} i_i = -\frac{R_f i_i}{L_f} - \frac{v_o}{L_f} \quad (3.12)$$

และ

$$C_f \frac{d}{dt} v_o = i_i - i_o \rightarrow \frac{d}{dt} v_o = \frac{i_i}{C_f} - \frac{i_o}{C_f} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.10) กับสมการที่(3.11) สามารถจัดเป็นเมตริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_i \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_i \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ i_o \end{bmatrix}$$

และจากสมการที่ (3.12) กับสมการที่(3.13) สามารถจัดเป็นเมตริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_i \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_i \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ i_o \end{bmatrix}$$

จากสมการที่อยู่ใน [8] $\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_1 D + \mathbf{A}_2 (1 - D)$ (3.14)

และ $\mathbf{B} = \mathbf{b}_1 D + \mathbf{b}_2 (1 - D)$ (3.15)

ดังนั้นจะได้

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

และ

$$\mathbf{A}_1 D = \begin{bmatrix} -\frac{R_f D}{L_f} & -\frac{D}{L_f} \\ \frac{D}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}_1 D = \begin{bmatrix} \frac{D}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{D}{C_f} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2 (1 - D) = \begin{bmatrix} -\frac{R_f (1 - D)}{L_f} & -\frac{(1 - D)}{L_f} \\ \frac{(1 - D)}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b}_2 (1 - D) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{(1 - D)}{C_f} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

แทนค่า (3.16) และ (3.17) ลงในสมการ (3.14)

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_1 D + \mathbf{A}_2 (1 - D) = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

แทนค่า (3.16) และ (3.17) ลงในสมการ (3.15)

$$\mathbf{B} = \mathbf{b}_1 D + \mathbf{b}_2 (1 - D) = \begin{bmatrix} \frac{D}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

จากสมการที่อยู่ใน [8] $\tilde{\mathbf{x}}(s) = (s\mathbf{I}_1 - \mathbf{A}_0)^{-1} \mathbf{B} \tilde{e}(s)$ (3.20)

หาค่า $(s\mathbf{I}_1 - \mathbf{A}_0) = \begin{bmatrix} s + \frac{R_f}{L_f} & \frac{1}{L_f} \\ -\frac{1}{C_f} & s \end{bmatrix}$ (3.21)

$$(s\mathbf{I}_1 - \mathbf{A}_0)^{-1} = s^2 + \frac{R_f s}{L_f} + \frac{1}{C_f L_f} \begin{bmatrix} s & \frac{-1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & s + \frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

แทนค่า (3.19) และ (3.22) ลงในสมการ (3.20)

$$\tilde{\mathbf{x}}(s) = (s\mathbf{I}_1 - \mathbf{A}_0)^{-1} \mathbf{B}\tilde{e}(s) = \frac{C_f L_f}{s^2 C_f L_f + R_f C_f s + 1} \begin{bmatrix} s & \frac{-1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & s + \frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{D}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_i(s) \\ V_o(s) \end{bmatrix} = \frac{C_f L_f}{s^2 C_f L_f + R_f C_f s + 1} \begin{bmatrix} \frac{sD}{L_f} & \frac{1}{C_f L_f} \\ \frac{D}{C_f L_f} & -\frac{s}{C_f} - \frac{R_f}{C_f L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i(s) \\ I_o(s) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} I_i(s) \\ V_o(s) \end{bmatrix} = \frac{C_f L_f}{s^2 C_f L_f + R_f C_f s + 1} \begin{bmatrix} \frac{sDV_i(s)}{L_f} + \frac{I_o(s)}{C_f L_f} \\ \frac{DV_i(s)}{C_f L_f} + \left(-\frac{s}{C_f} - \frac{R_f}{C_f L_f} \right) I_o(s) \end{bmatrix}$$

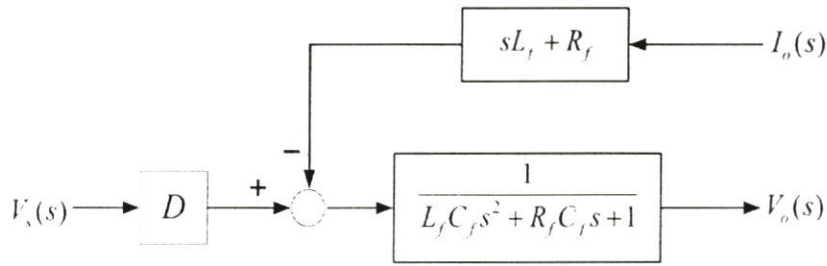
$$I_i(s) = \frac{\cancel{C_f L_f}}{s^2 C_f L_f + R_f C_f s + 1} \left(\frac{DC_f V_i(s)}{\cancel{C_f L_f}} + \frac{I_o(s)}{\cancel{C_f L_f}} \right)$$

$$I_i(s) = \frac{DC_f V_i(s) + I_o(s)}{s^2 C_f L_f + R_f C_f s + 1} \quad (3.24)$$

$$V_o(s) = \frac{\cancel{C_f L_f}}{s^2 C_f L_f + R_f C_f s + 1} \left(\frac{DV_i(s)}{\cancel{C_f L_f}} + \left(\left(-\frac{sL_f}{\cancel{C_f L_f}} - \frac{R_f}{\cancel{C_f L_f}} \right) I_o(s) \right) \right)$$

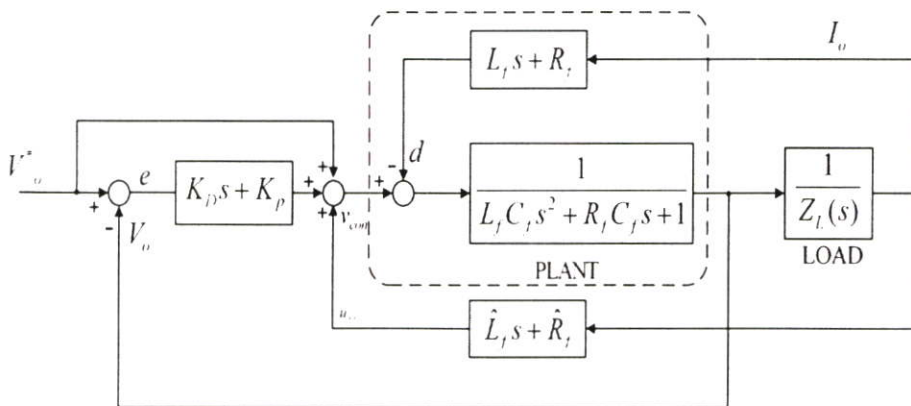
สมการแรงดันด้านขาออกจะได้
$$V_o(s) = \frac{DV_i(s) - (sL_f + R_f)I_o(s)}{s^2 C_f L_f + R_f C_f s + 1} \quad (3.25)$$

จากสมการที่ (3.25) สามารถเขียนเป็น block diagram ได้ดังรูปที่ 3.22 โดยที่ R_f , L_f และ C_f คือค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำและค่าของตัวเก็บประจุของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำตามลำดับ



รูปที่ 3.22 Block diagram โมเดลของเอชชี้อปเปอร์

เนื่องจากวิธีการมอดดูเลชั่นแบบที่นำเสนอนี้ใช้สัญญาณไซน์สำหรับการสร้างพีคบัลิวเอ็ม ทำให้สามารถนำค่าของกระแสและแรงดันที่เป็นไซน์มาเข้าในระบบการควบคุมแรงดันชั่วขณะได้โดยตรง และจากรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบ $(L_f s + R_f)I_o(s)$ จะเป็นสิ่งรบกวน (disturbance) ของแรงดันด้านขาออก ซึ่งในกรณีที่กระแส i_o ไม่เป็นไซน์ องค์ประกอบ $(L_f s + R_f)I_o(s)$ ก็จะไม่เป็นไซน์ ทำให้แรงดันด้านขาออก v_o มีความเพี้ยนไม่เป็นไซน์ตามไปด้วย การลดผลกระทบจากองค์ประกอบ $(L_f s + R_f)I_o(s)$ นี้ สามารถทำได้โดยใช้การสร้างองค์ประกอบ ซึ่งตรงข้ามกันมาหักล้าง โดยการป้อนกระแส i_o และคำนวณองค์ประกอบนี้ด้วยค่าพารามิเตอร์ของโมเดลระบบ ส่วนการควบคุมแรงดันด้านขาออก สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคเช่นเดียวกับที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์ ดังเช่นใน [6]



รูปที่ 3.23 Block diagram ของการควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชชี้อปเปอร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชชี้อปเปอร์แสดงดังในรูปที่ 3.23 ซึ่งอาศัยเทคนิคการป้อนกลับแรงดันด้านขาออกและการป้อนไปข้างหน้าของแรงดันอ้างอิง โดยในส่วนการป้อนกลับ ได้ใช้ตัวควบคุมแบบ PD เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมการคุณลักษณะของระบบป้อนกลับ โดยตัวควบคุมแบบ P จะส่งผลในการปรับปรุงความเร็วในการตอบสนอง และตัวควบคุมแบบ D จะส่งผลในการเพิ่มองค์ประกอบการหน่วง

หน้านี้ไม่มีในต้นฉบับ

ค่าของ $\Delta_1 = \Delta_2 = 1$ (3.31)

จากสูตร $\frac{V_o}{V_o^*} = \frac{T_1\Delta_1 + T_2\Delta_2}{\Delta}$ (3.32)

แทน (3.25) (3.26) (3.29) (3.30) ลงใน (3.31) จะได้

$$\frac{V_o}{V_o^*} = \frac{\frac{K_D s + K_p}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1} + \frac{1}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1}}{1 + \frac{K_D s + K_p}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1}} \quad (3.33)$$

จัดสมการใหม่จะได้ $\frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{K_D s + K_p + 1}{L_f C_f s^2 + (K_D + R_f C_f)s + K_p + 1}$, (3.34)

เมื่อ K_D คือ derivative gain และ K_p คือ proportional gain ของตัวควบคุม PD ตามลำดับ

จากสมการที่ (3.33) จัดใหม่ได้เป็น $\frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{(K_D s + K_p + 1) / L_f C_f}{s^2 + \frac{(K_D + R_f C_f)}{L_f C_f} s + \frac{K_p + 1}{L_f C_f}}$, (3.35)

เมื่อ $\omega_n^2 = \frac{K_p + 1}{L_f C_f}$, (3.36)

จะได้ $\omega_n = \sqrt{\frac{K_p + 1}{L_f C_f}}$, (3.37)

เมื่อ $2\zeta\omega_n = \frac{K_D + R_f C_f}{L_f C_f}$, (3.38)

แทน(12) ลงใน (13) $2\zeta \sqrt{\frac{K_p + 1}{L_f C_f}} = \frac{K_D + R_f C_f}{L_f C_f}$, (3.39)

จะได้ $\zeta = \frac{1}{2} \left(\frac{K_D + R_f C_f}{L_f C_f} \right) \frac{\sqrt{(L_f C_f)}}{\sqrt{(K_p + 1)}}$,
 $= \frac{1}{2} (K_D + R_f C_f) \frac{1}{\sqrt{(K_p + 1) L_f C_f}}$, (3.40)

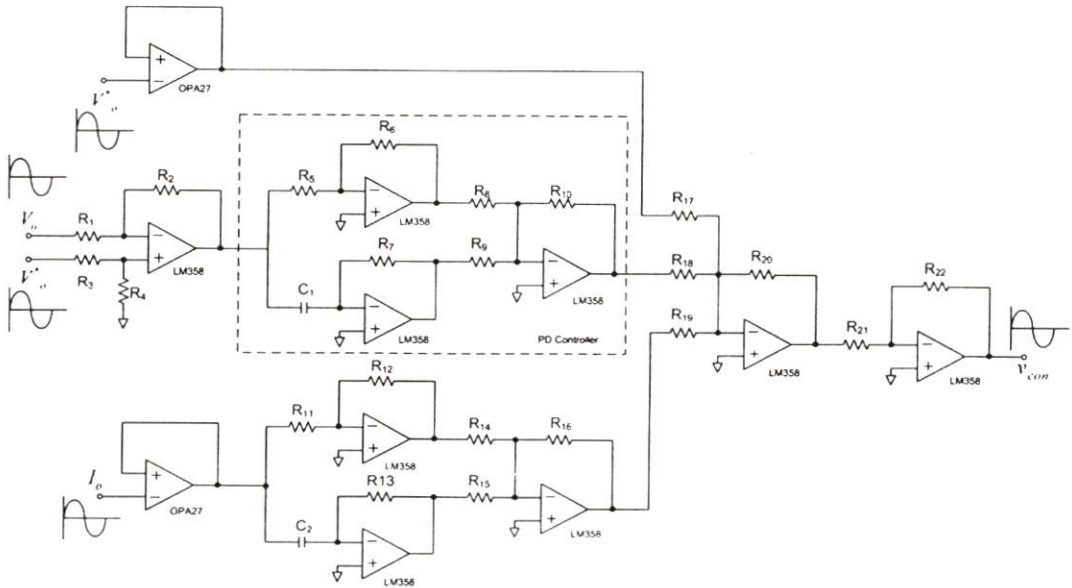
เมื่อ ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และ ζ คือ อัตราหน่วง (Damping factor) ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ตามลำดับ

เนื่องจากสถานะเป็น under damping เพราะฉะนั้น Pole ของระบบควบคุมลูปปิด คือ

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}, \quad (3.41)$$

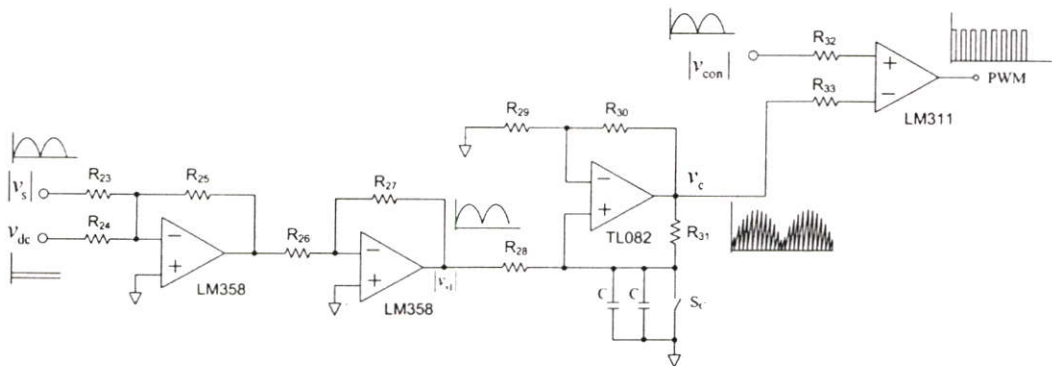
จากสมการที่ 3.37 และ 3.40 จะเห็นได้ว่า K_p จะส่งผลในการปรับปรุงความเร็วในการตอบสนอง กล่าวคือมี ω_n ที่สูงขึ้น และ K_D จะส่งผลในการเพิ่มขึ้นของการหน่วงของระบบ (Damping factor) ของระบบ ซึ่งจะช่วยลดการเกิดโอเวอร์ชูตและการรีโซแนนท์กับโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ

จากรูปที่ 3.23 ซึ่งเป็น Block diagram ของการควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชซีซีอปเปอร์ สามารถนำมาต่อเป็นวงจรออปแอมป์ได้ตามรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชซีซีอปเปอร์ที่ต่อเป็นวงจรออปแอมป์

จากวงจรในรูปที่ 3.26 ค่าของสัญญาณขาออก (v_{con}) ของวงจร ซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ ควบคุมนั้น จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อย เพื่อสร้างเป็นสัญญาณพีดับทิวเอ็มออกมา ซึ่งรูปที่ 3.27 เป็นรูปของวงจรที่ใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยกับสัญญาณควบคุมที่ต่อเป็นวงจรออปแอมป์



รูปที่ 3.27 รูปวงจรการเปรียบเทียบสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยกับสัญญาณควบคุมที่ต่อเป็นวงจรออปแอมป์

บทที่ 4

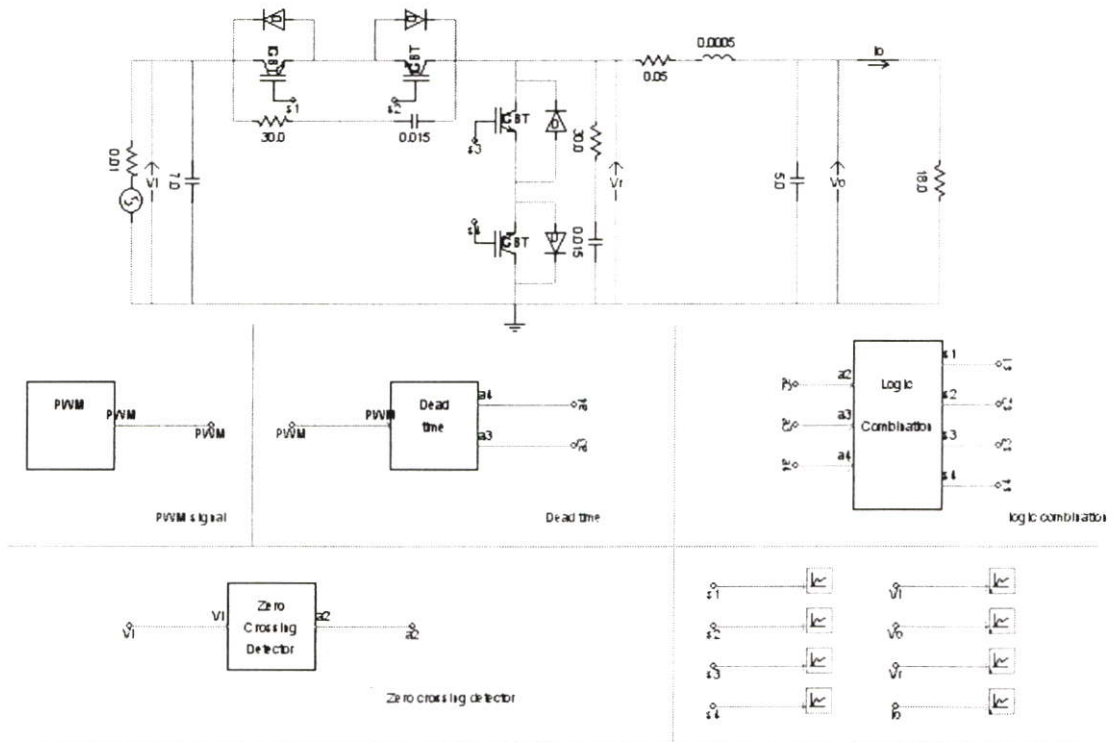
การจำลองการควบคุมแรงดันของเอชซีซีอปเปอร์เฟสเดียว

4.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองของการควบคุมแรงดันของเอชซีซีอปเปอร์เฟสเดียว โดยได้ทำการจำลองในส่วนของวงจรควบคุมแรงดันแบบที่ไม่มีการป้อนกลับ การควบคุมแรงดันโดยใช้ค่าใช้ค่าแรงดันเฉลี่ยและการควบคุมแรงดันโดยใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน โดยหัวข้อที่ทำการจำลอง คือ ผลการตอบสนอง ผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผลเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

4.2 การจำลองการทำงานของวงจรเอชซีซีอปเปอร์เฟสเดียว

จากการทำงานของวงจรเอชซีซีอปเปอร์เฟสเดียว สามารถนำมาทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSCAD/EMTDC โดยวงจรที่ใช้ในการจำลองเป็นวงจรเอชซีซีอปเปอร์แบบบัสซีเอชซีซีอปเปอร์ ซึ่งรูปวงจรที่ใช้ในการจำลองได้แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งในการจำลองได้นำค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 มาใช้ในการจำลองและวงจรส่วนประกอบที่ใช้ในการจำลอง แบ่งได้เป็นวงจรต่างๆ ดังนี้

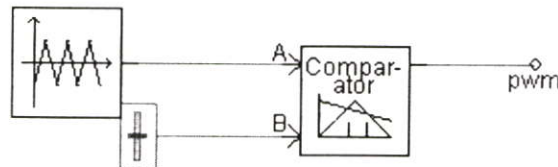


รูปที่ 4.1 วงจรเอชซีซีอปเปอร์ที่ใช้ในการจำลอง

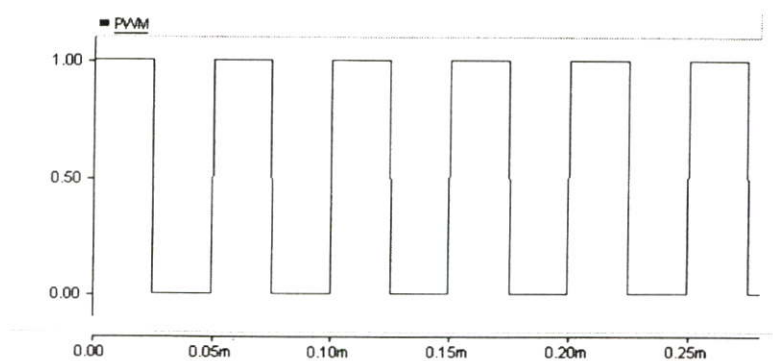
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

AC Chopper	
Supply voltage	220 V
Switching frequency	20 kHz
Supply-side filter	
C_s	7 μ F
Load-side low pass filter	
L_f	500 μ H
C_f	5 μ F

4.2.1 วงจรสร้างสัญญาณ PWM เป็นวงจรที่ใช้สร้างสัญญาณ PWM ที่มีความถี่คงที่ แต่สามารถปรับค่า duty ratio ได้ ความถี่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 20kHz โดยรูปที่ 4.2 แสดงวงจรที่ใช้ในการจำลอง และรูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการจำลอง

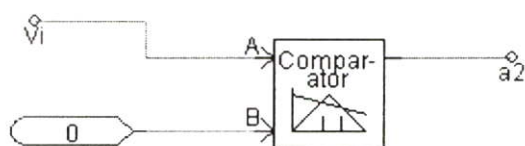


รูปที่ 4.2 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการจำลอง

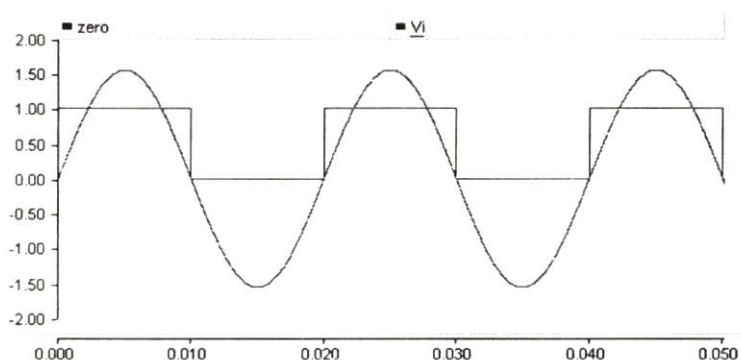


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นสัญญาณ PWM ที่ได้จากการจำลอง

4.2.2 วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ เป็นวงจรที่ใช้ตรวจจับจุดผ่านศูนย์ของรูปคลื่นไซน์ ซึ่งรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งตรงจุดศูนย์ของรูปคลื่นจะเป็นตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์ของรูปคลื่นไซน์ ในการทดลองได้ใช้ IC เบอร์ LM339 โดยรูปที่ 4.4 แสดงวงจรที่ใช้ในการจำลอง และรูปที่ 4.5 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการจำลอง

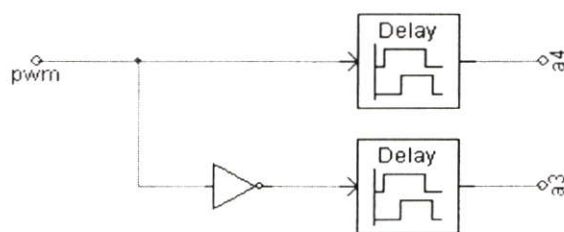


รูปที่ 4.4 วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ที่ใช้ในการจำลอง

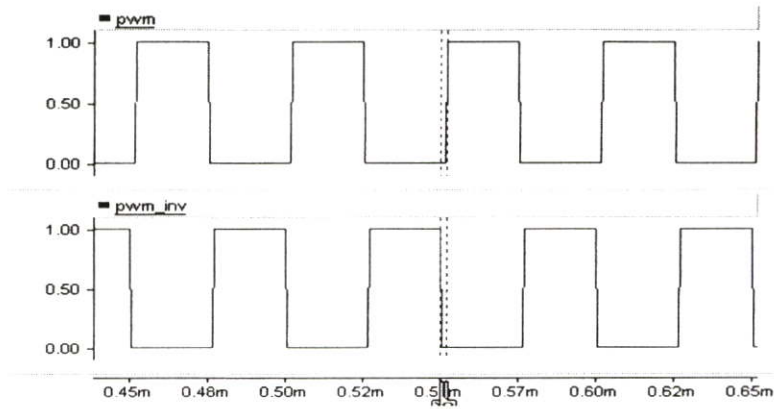


รูปที่ 4.5 รูปคลื่นสัญญาณตรวจจับจุดผ่านศูนย์ที่ใช้ในการจำลอง

4.2.3 วงจรประวิงเวลา เป็นวงจรป้องกันการ ทำงานพร้อมกันระหว่างสวิตช์ S1 กับ S3 และ S2 กับ S4 เพราะถ้าสวิตช์เหล่านี้ทำงานพร้อมกันจะทำให้เกิดการลัดวงจรของ IGBT ขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ตั้งค่าของ deadtime ไว้ 2 us โดยในรูปที่ 4.6 โดยแสดงวงจรที่ใช้ในการจำลอง และรูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการจำลอง

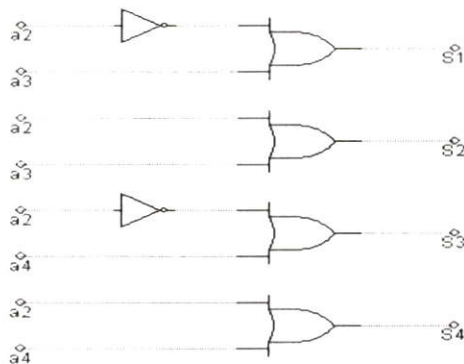


รูปที่ 4.6 วงจรประวิงเวลาที่ใช้ในการจำลอง

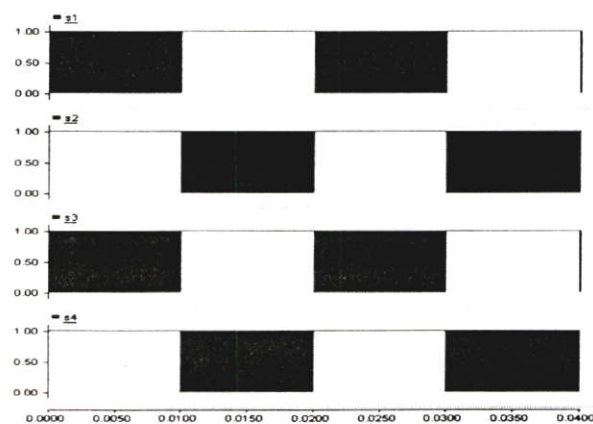


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการจำลอง

4.2.4 วงจรรวมสัญญาณ เป็นวงจรที่ใช้รวมสัญญาณ PWM ที่ผ่านชุดวงจรประวิงเวลากับสัญญาณจากวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์กลาง ก่อนที่จะนำไปเข้าสู่ชุดขับนำ โดยในรูปที่ 4.8 แสดงวงจรที่ใช้ในการจำลอง รูปที่ 4.9 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการจำลอง

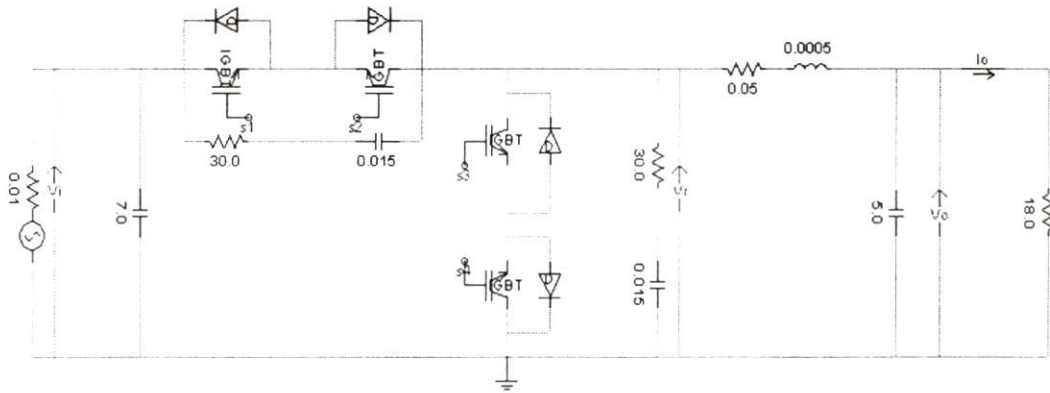


รูปที่ 4.9 วงจรรวมสัญญาณที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นของวงจรรวมสัญญาณที่ได้จากการจำลอง

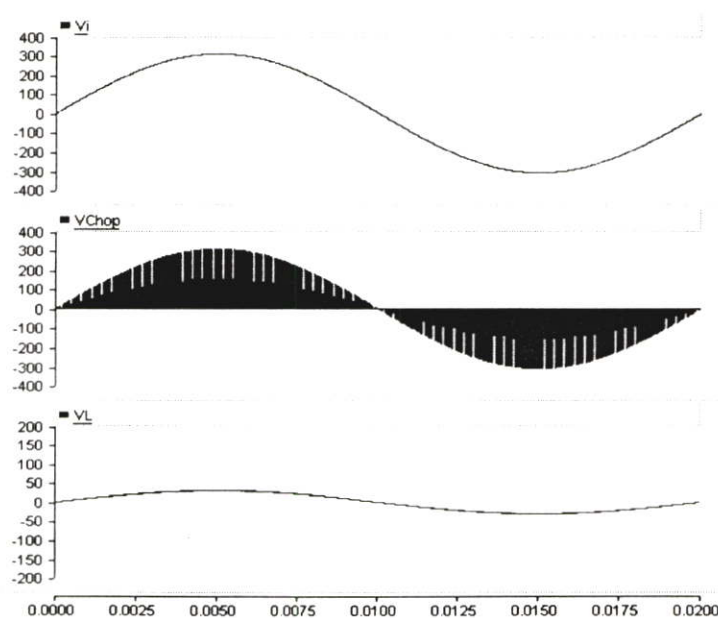
4.2.6 วงจรกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะประกอบไปด้วย IGBT ที่ใช้เป็นสวิตช์ 4 ตัว ซึ่งได้ต่อเป็นวงจรบัสก์เอชซีช็อปเปอร์ โดยที่ทางด้านขาออกของวงจรเอชซีช็อปเปอร์จะมีวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำแบบใช้ LC ต่อคร่อมอยู่ เพื่อกรองเอาค่าความถี่ฮาร์มอนิกส์ออก ให้เหลือแต่เพียงความถี่มูลฐาน และโหลดที่ใช้เป็นโหลดความต้านทาน



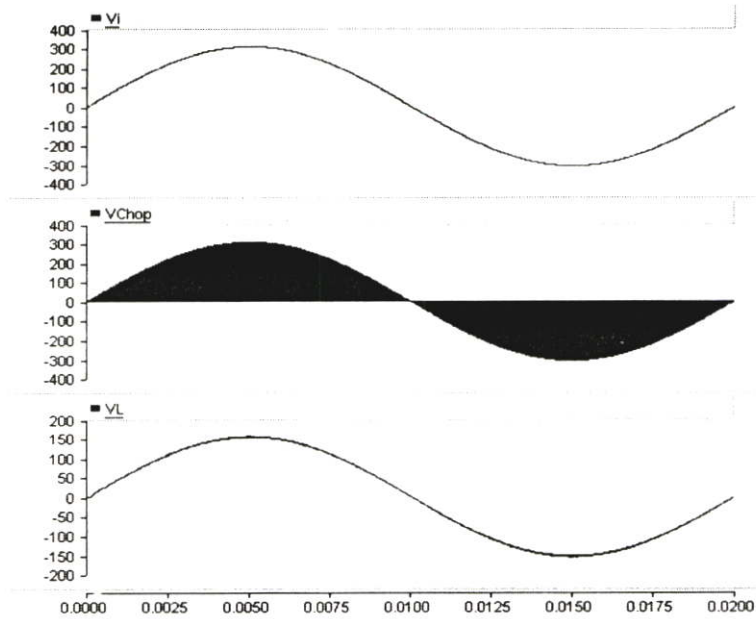
รูปที่ 4.10 วงจรกำลังของเอชซีช็อปเปอร์ที่ใช้ในการจำลอง

โดยในการจำลองการทำงานของวงจรเอชซีช็อปเปอร์ ให้ค่าของแรงดันด้านขาเข้าเป็น 220 V ค่าความถี่ของการสวิตช์เท่ากับ 20kHz และจะทำการปรับค่า duty ratio เป็น 0.1 , 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ ซึ่งรูปคลื่นที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.11 , 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของแรงดันด้านขาออกต่อการปรับเปลี่ยนค่าของ Duty ratio ตามสมการ

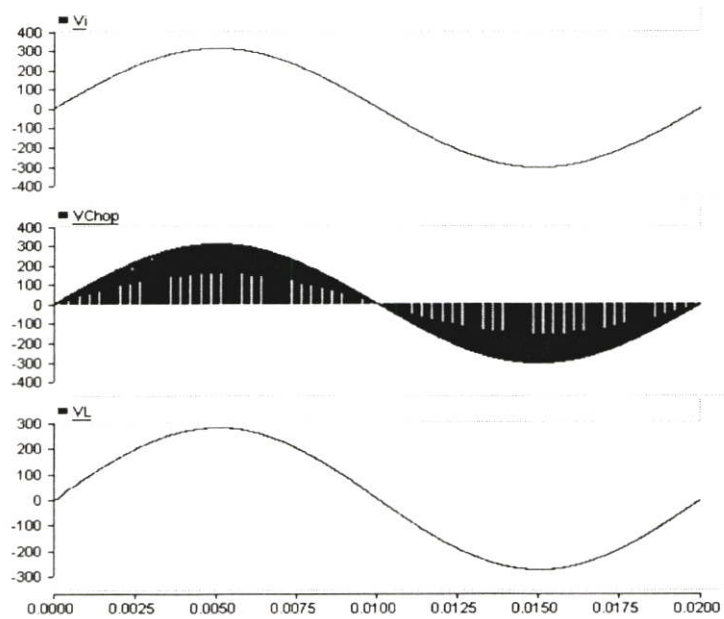
$$v_o = DVm \cos(\omega t - \phi_1) \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.11 แสดงรูปคลื่นของวงจรเอชซีช็อปเปอร์ที่ duty ratio = 0.1



รูปที่ 4.12 แสดงรูปคลื่นของวงจรเอชซีช็อปเปอร์ที่ duty ratio = 0.5

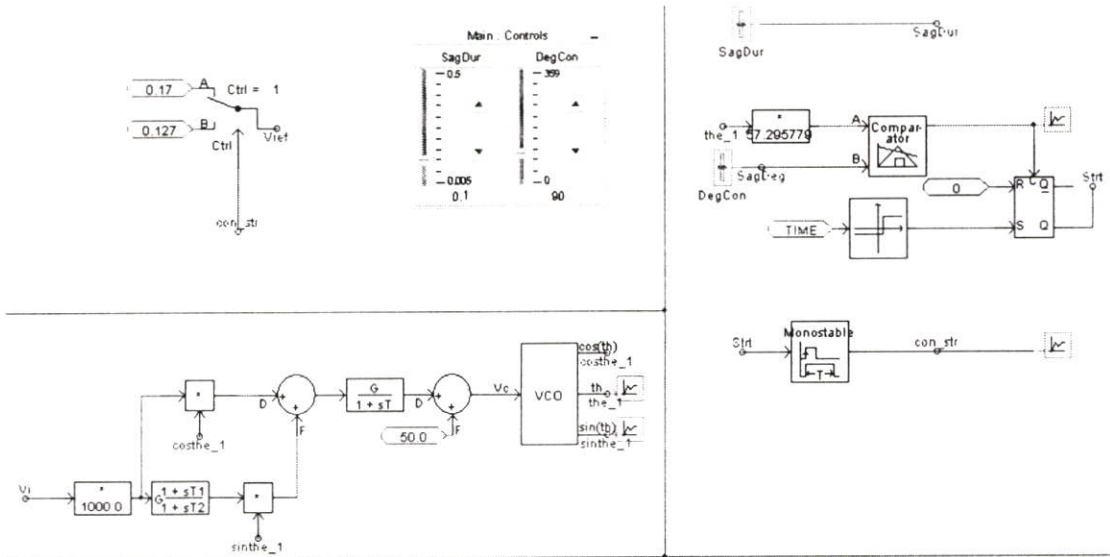


รูปที่ 4.13 แสดงรูปคลื่นของวงจรเอชซีช็อปเปอร์ที่ duty ratio = 0.9

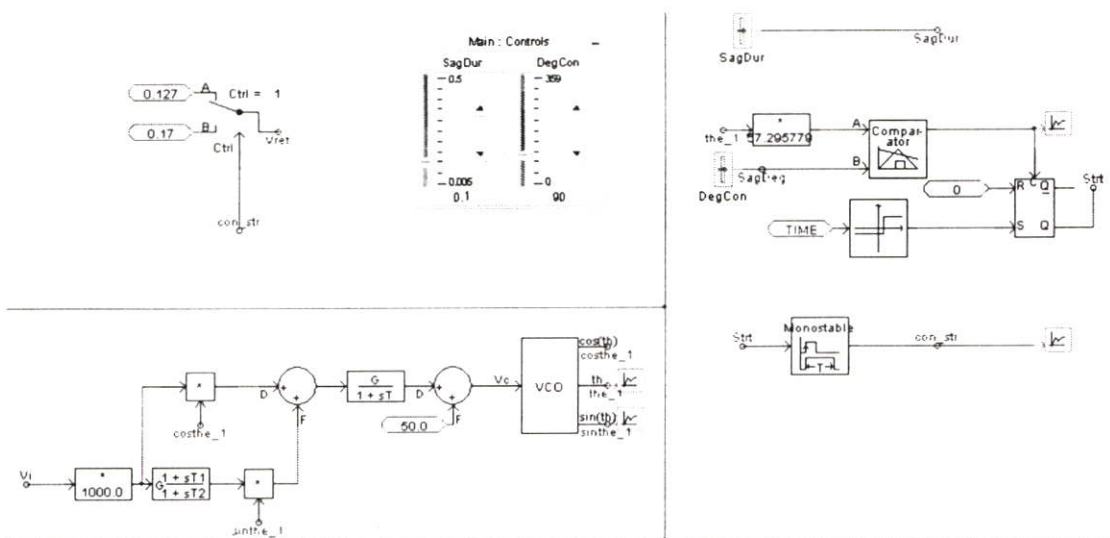
4.3 การจำลองการทำงานของวงจรเอชซีช็อปเปอร์เฟสเดียวแบบไม่มีการป้อนกลับ

การจำลองการควบคุมแรงดันเอชซีช็อปเปอร์แบบไม่มีการป้อนกลับ ในการจำลองนี้ได้ทำการจำลองโดยที่ไม่มี การควบคุมค่าของแรงดันด้านขาออกของเอชซีช็อปเปอร์ ซึ่งรูปวงจรที่ใช้ในการจำลองได้ใช้วงจรในรูปที่ 4.1 ในการจำลองและได้นำค่าพารามิเตอร์ที่ตารางที่ 4.1 มาใช้ โดยได้ทำการจำลองเพื่อหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการตอบสนอง โดยทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง ให้เพิ่มขึ้นทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกเพิ่มจาก 90V เป็น 120 V อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้ใช้รูปวงจรถามรูปที่ 4.14 มาใช้เพื่อให้แรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และได้ทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงให้ลดลงทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกลดลงจาก 120V เป็น 90V อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้ใช้รูปวงจรถามรูปที่ 4.15 มาใช้เพื่อให้แรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด โดยที่ในส่วนของการตอบสนองได้การจำลองทั้งในกรณีทีโหลดเป็นตัวต้านทานและ โหลดที่เป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ

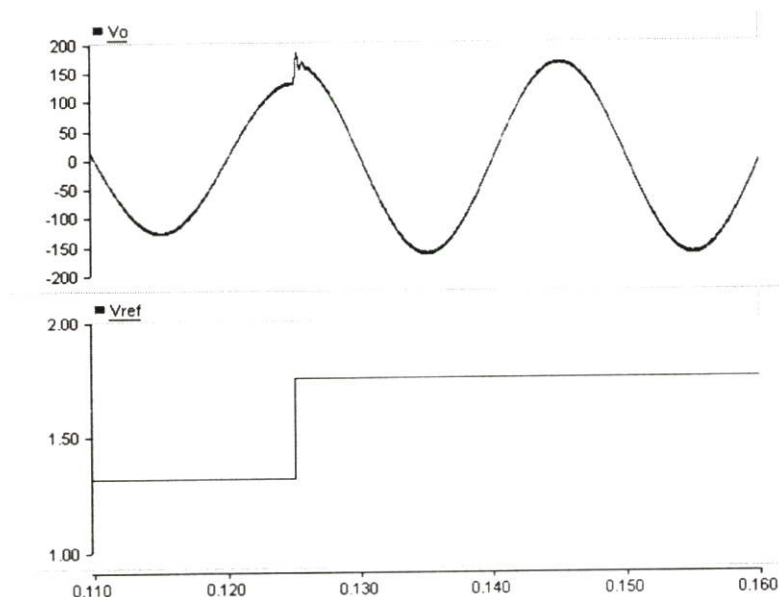


รูปที่ 4.15 รูปวงจรถามที่ใช้ในการจำลองเพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

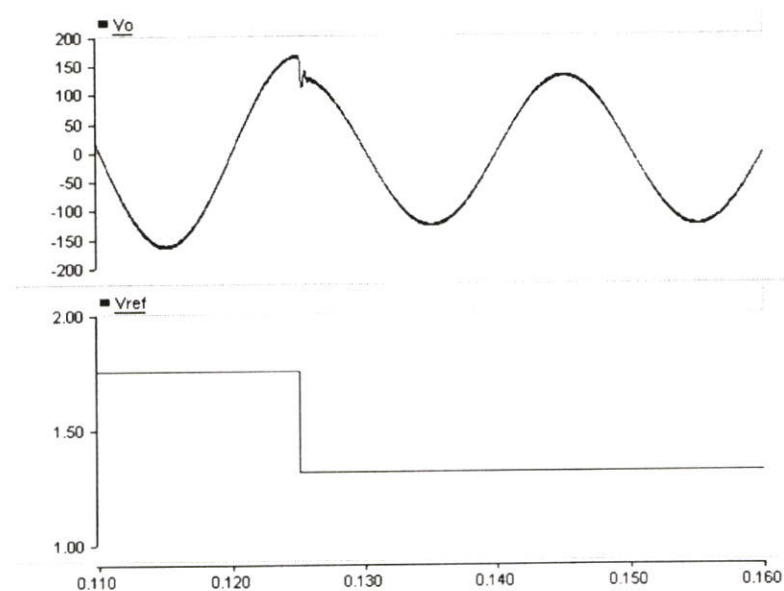


รูปที่ 4.14 รูปวงจรถามที่ใช้ในการจำลองเพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด

4.3.1.1 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน โดยที่ในการจำลองโหลดที่ใช้เป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งค่าความต้านทานที่ใช้มีค่าเท่ากับ $240\ \Omega$ โดยในรูปที่ 4.16 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 4.17 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกจะมีผลการตอบสนองที่ล่าช้าต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงทันทีทันใด

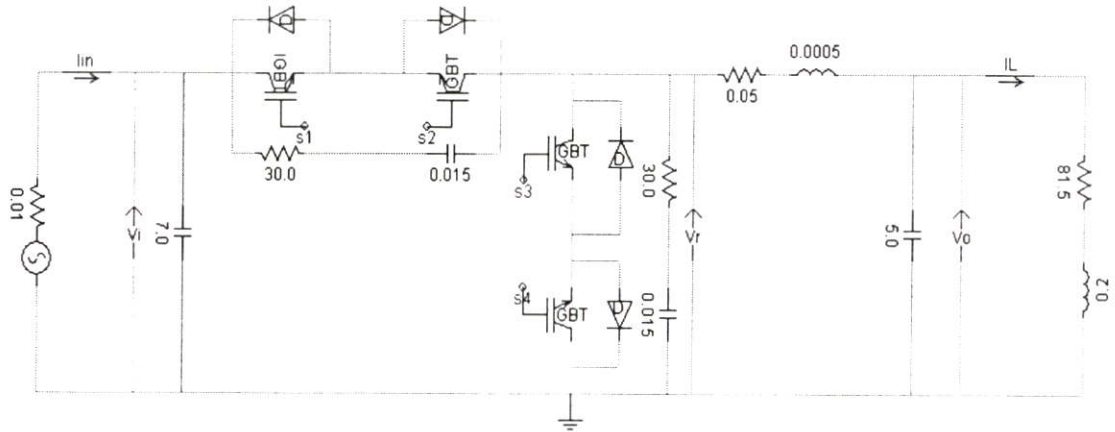


รูปที่ 4.16 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

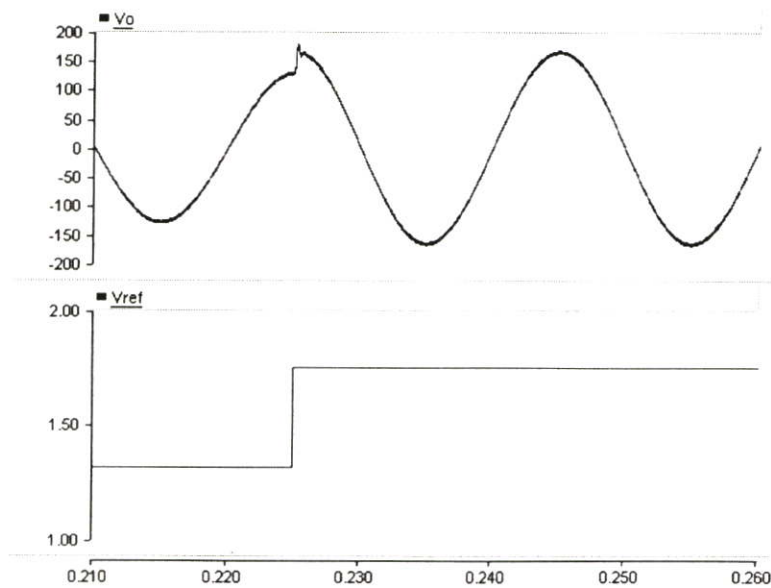


รูปที่ 4.17 ผลการจำลองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด

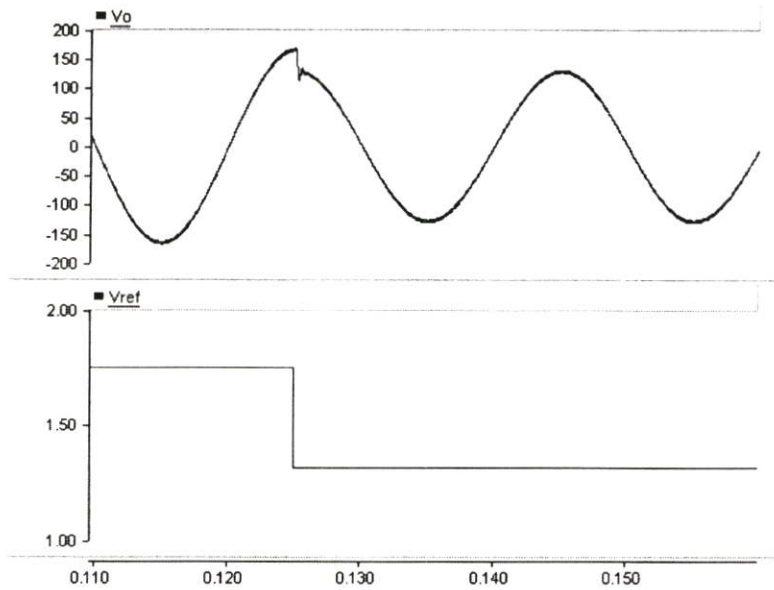
4.3.1.2 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ในการจำลองโหลดที่ใช้เป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่ใช้มีค่าเท่ากับ 81.5Ω และค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.2 H ทำให้ได้ค่า PF เท่ากับ 0.8 ซึ่งวงจรที่ใช้ในการจำลองได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.18 โดยในรูปที่ 4.19 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 4.20 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกจะมีผลการตอบสนองที่ล่าช้าต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงทันทีทันใด



รูปที่ 4.18 วงจรกำลังของเอชซีซ็อบเปอร์ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลอง

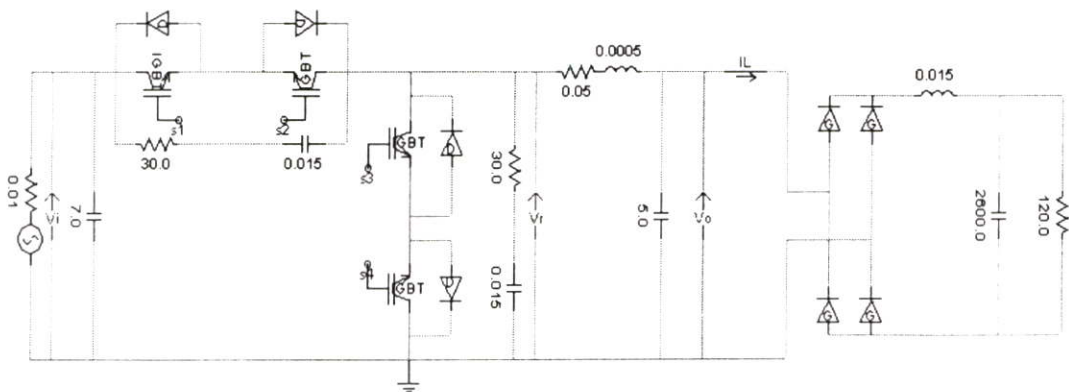


รูปที่ 4.19 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

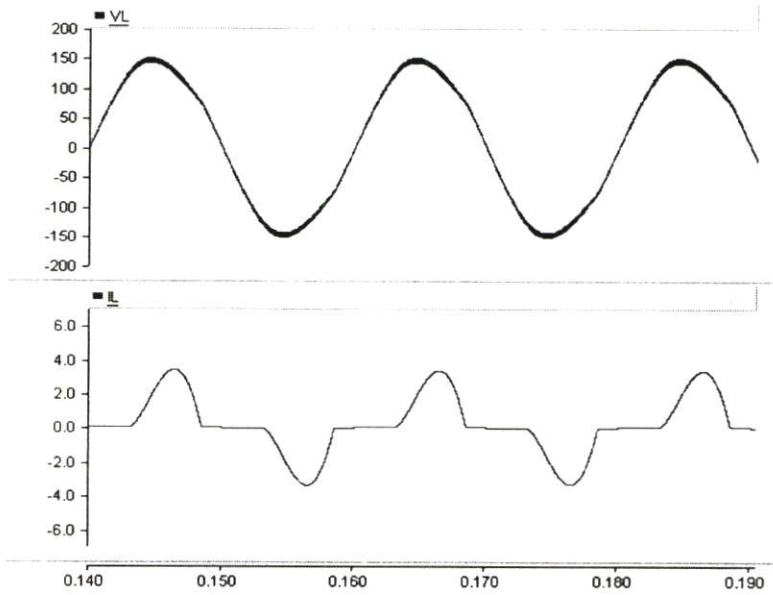
4.3.2 ผลของของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำการจำลองโดยใช้โหลดที่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น โดยได้ต่อเป็นวงจรในการจำลองตามรูปที่ 4.21 และค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 โดยในรูปที่ 4.22 แสดงผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากรูปการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกที่ได้จะมีความผิดเพี้ยน เนื่องจากได้รับผลกระทบจากผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นและในรูปที่ 4.23 ได้แสดงรูปของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นที่แรงดันด้านขาออก (เฉพาะฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำจนถึงลำดับที่ 50) ค่า THD เมื่อคำนวณถึงฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 50 มีค่าเท่ากับ 4.22 %



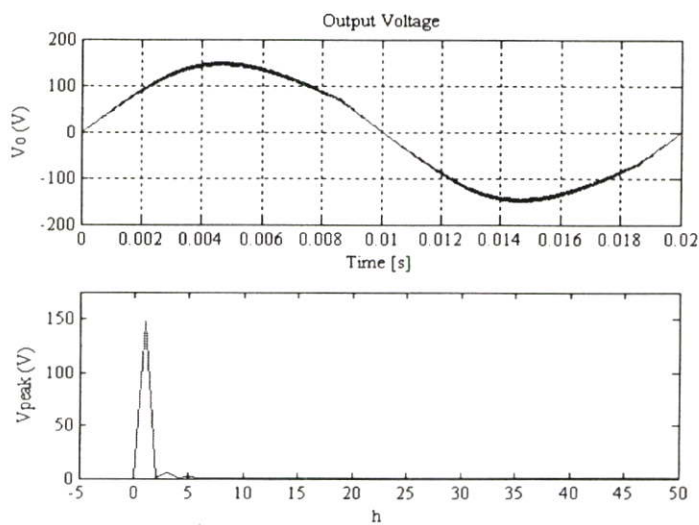
รูปที่ 4.21 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของผลโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในการจำลอง

Non-linear load (Diode rectifier with RC and Dc reactor)	
Filter capacitor	2600 μ F
Load resistance	120 Ω
DC reactor	15 mH

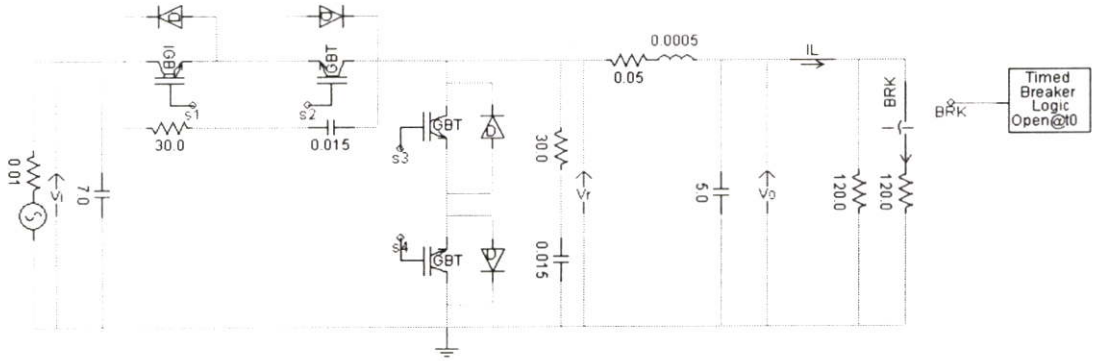


รูปที่ 4.22 ผลการจำลองเมื่อใช้กับ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

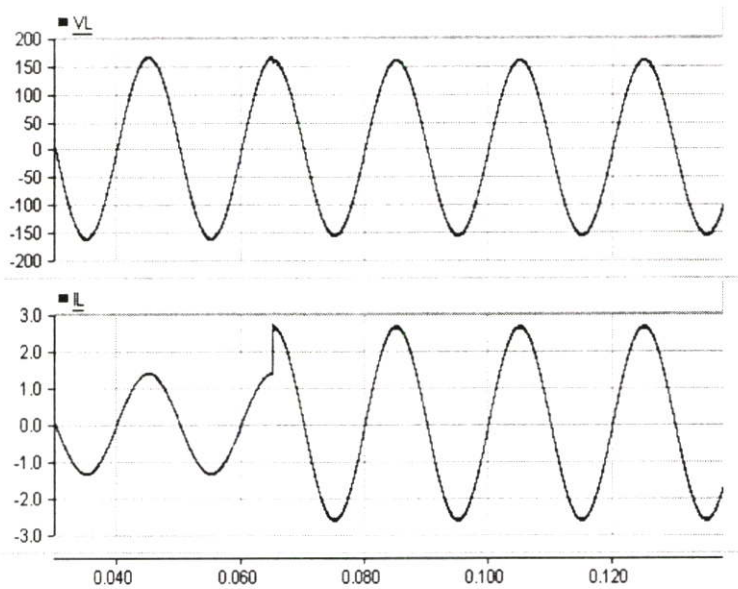


รูปที่ 4.23 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับ

4.3.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ทำการจำลองโดยให้แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V โหลดเป็นตัวต้านทาน 120 Ω และทำการเพิ่มโหลด ด้วยวิธีการขนานตัวต้านทาน 120 Ω เข้าไปอย่างทันทีทันใดดังรูปที่ 4.24 และในรูปที่ 4.25 แสดงผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จากผลการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกจะตกลงตามการเพิ่มของกระแสโหลด

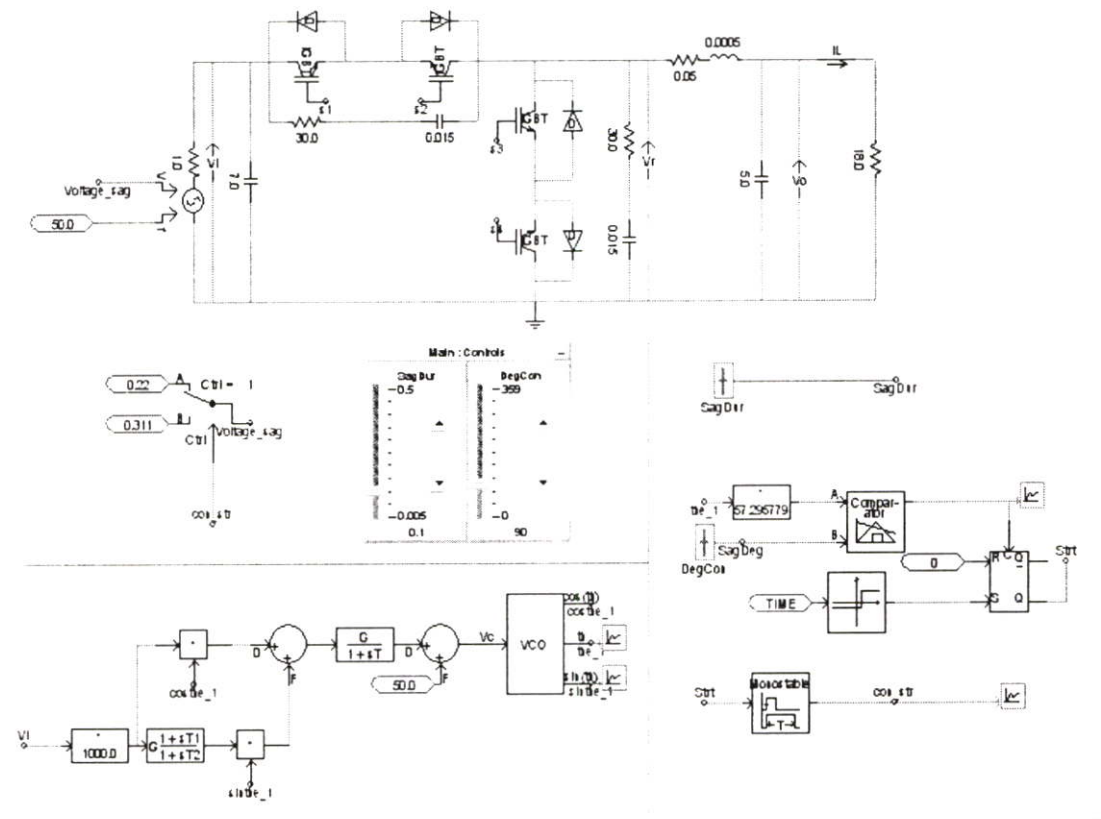


รูปที่ 4.24 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของผลเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

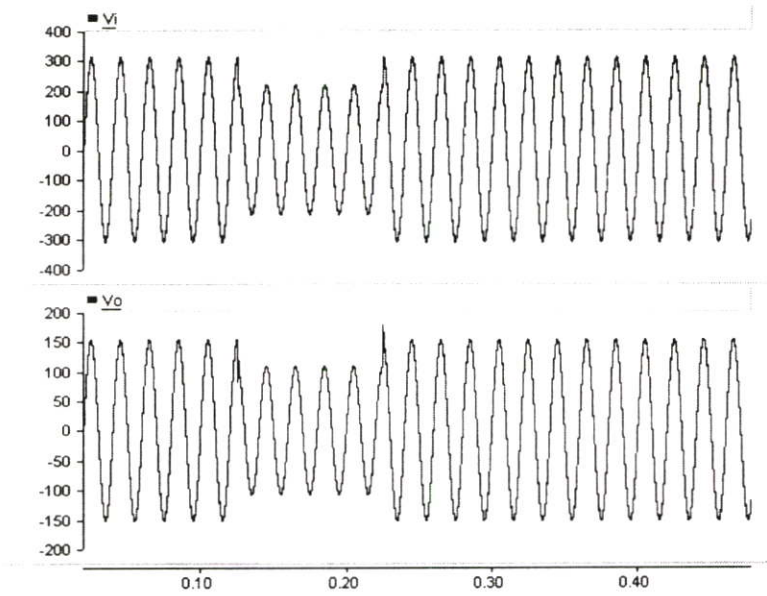


รูปที่ 4.25 ผลการจำลองเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

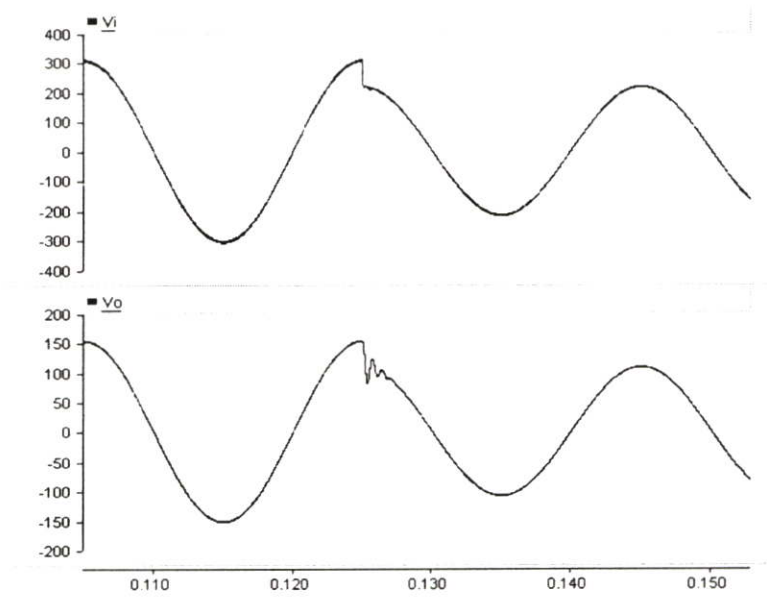
4.3.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด โดยทำการจำลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายตกลง 70% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้ต่อวงจรตามรูปที่ 4.26 โดยในรูปที่ 4.27 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด และรูปที่ 4.28 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด จากรูปผลการจำลองเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการควบคุมแรงดัน ค่าของแรงดันด้านขาออกจะตกลงตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แหล่งจ่าย



รูปที่ 4.26 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

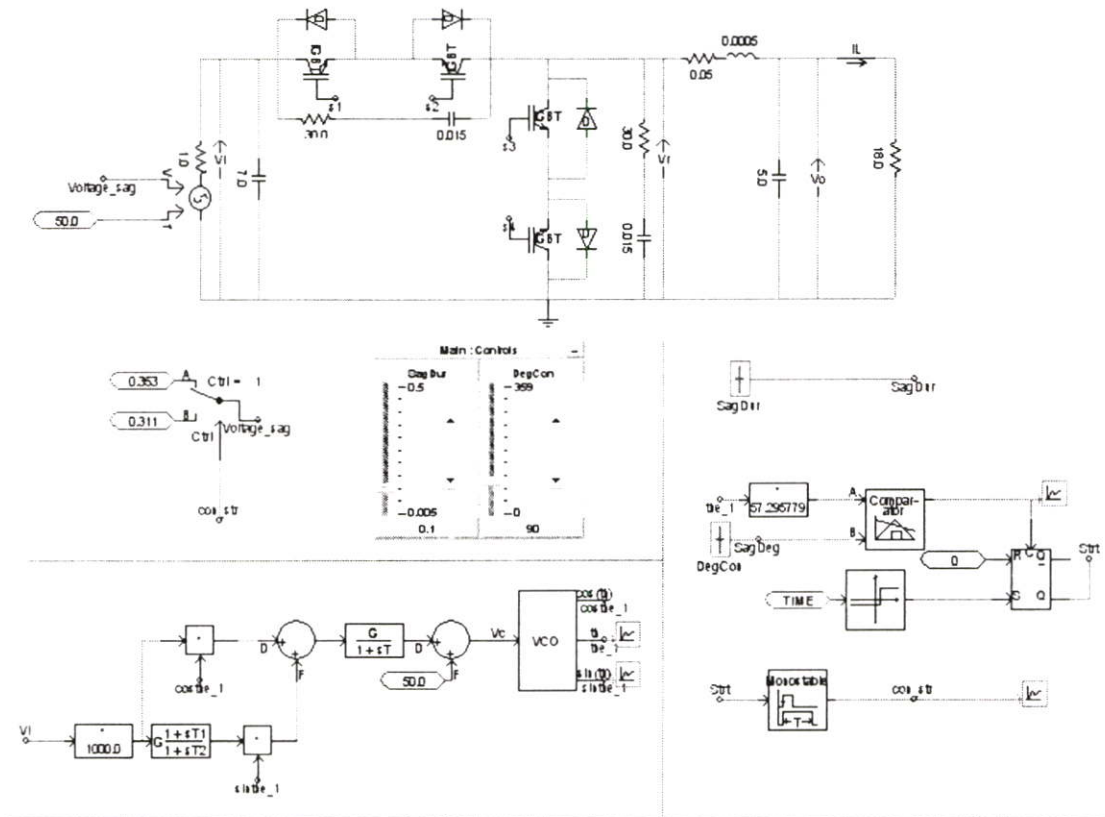


รูปที่ 4.27 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

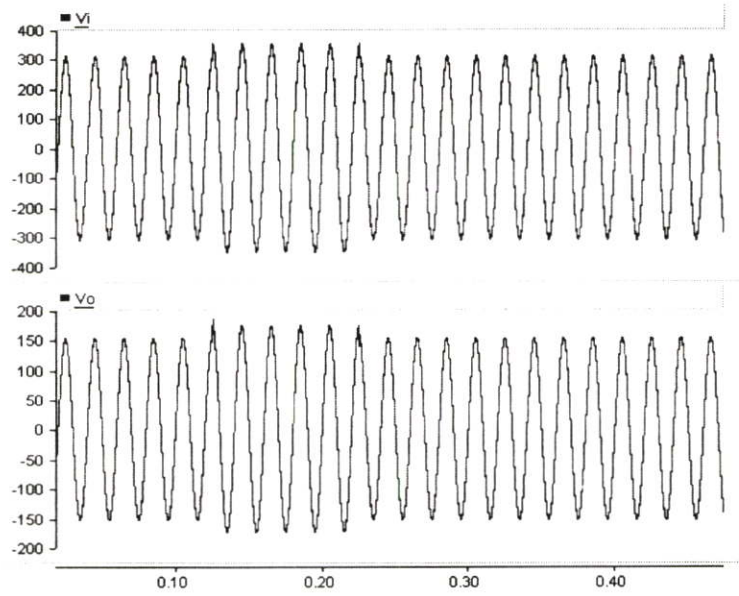


รูปที่ 4.28 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

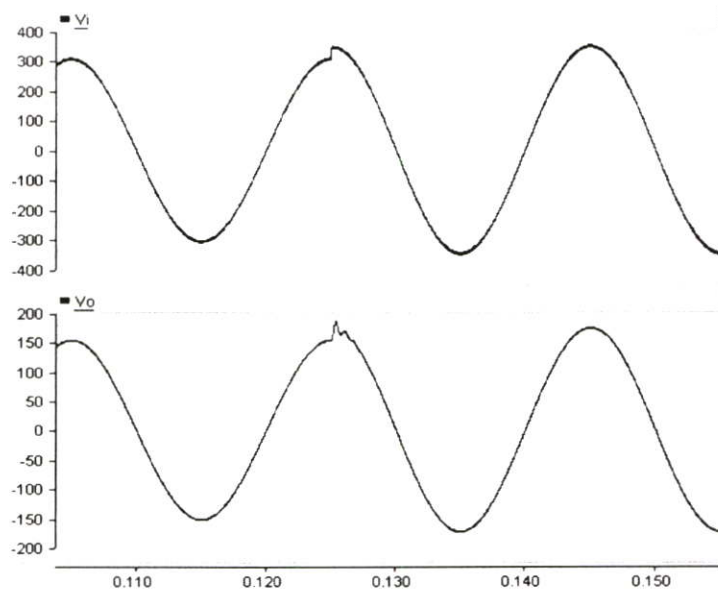
4.3.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด โดยทำการจำลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น 15% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้ต่อวงจรตามรูปที่ 4.29 โดยในรูปที่ 4.30 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และรูปที่ 4.31 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด จากรูปผลการจำลองเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการควบคุมแรงดัน ค่าของแรงดันด้านขาออกจะเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แหล่งจ่ายแหล่งจ่าย



รูปที่ 4.29 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด



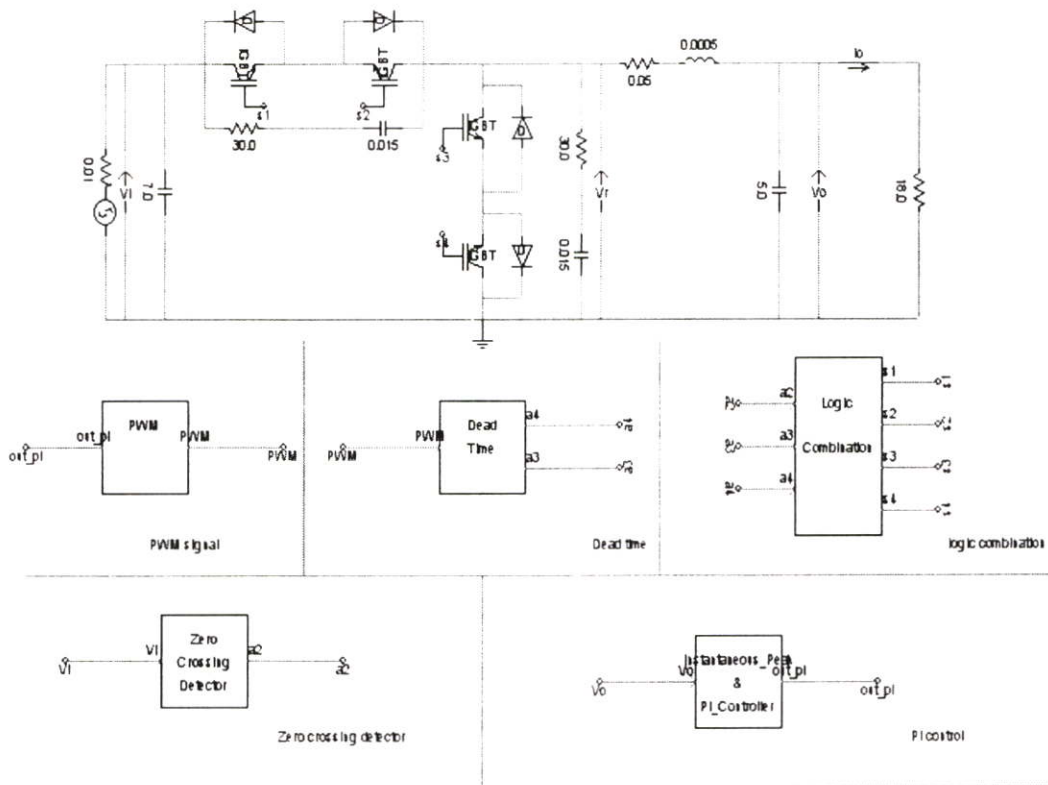
รูปที่ 4.30 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด



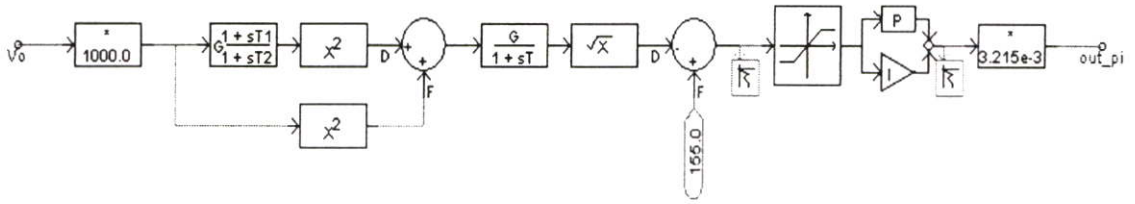
รูปที่ 4.31 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

4.4 การทดลองการควบคุมแรงดันเอชซีซีโอปเปอร์แบบใช้ค่าเฉลี่ย

การทดลองการควบคุมแรงดันเอชซีซีโอปเปอร์แบบใช้ค่าเฉลี่ย ซึ่งในการทดลองได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 มาทำการทดลอง โดยที่ในการทดลองได้ใช้ค่าแรงดันด้านขาออกที่เป็นค่าของสัญญาณไซน์ มาทำการป้อนกลับให้กับระบบ โดยผ่านเข้าวงจรตรวจจับแอมพลิจูดแบบความเร็วสูง เพื่อที่จะทำให้ได้เป็นสัญญาณไฟตรงออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง จากนั้นนำค่าความผิดพลาดที่ได้เข้าตัวควบคุมแบบ PI โดยที่ถ้ามีค่าความผิดพลาดเป็นบวก (+) หรือค่าแรงดันที่นำมาป้อนกลับมากกว่าค่าแรงดันอ้างอิง ตัวควบคุมแบบ PI จะทำการลดค่า duty ratio ลง แต่ถ้าค่าความผิดพลาดเป็นลบ (-) หรือค่าแรงดันที่นำมาป้อนกลับน้อยกว่าค่าแรงดันอ้างอิง ตัวควบคุมแบบ PI จะทำการเพิ่มค่า duty ratio ให้มีค่ามากขึ้น แล้วนำค่า duty ratio ที่ได้ไปขับเกทของ IGBT โดยรูปที่ 4.32 ได้แสดงรูปวงจรที่ใช้ในการจำลองและในรูปที่ 4.33 แสดงรูปวงจรตรวจจับแอมพลิจูดแบบความเร็วสูงและตัวควบคุมแบบ PI โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และได้ทำการจำลองต่างๆดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.32 รูปวงจรที่ใช้ในการจำลองของการควบคุมเอชซีซีโอปเปอร์ด้วยค่าแรงดันเฉลี่ย



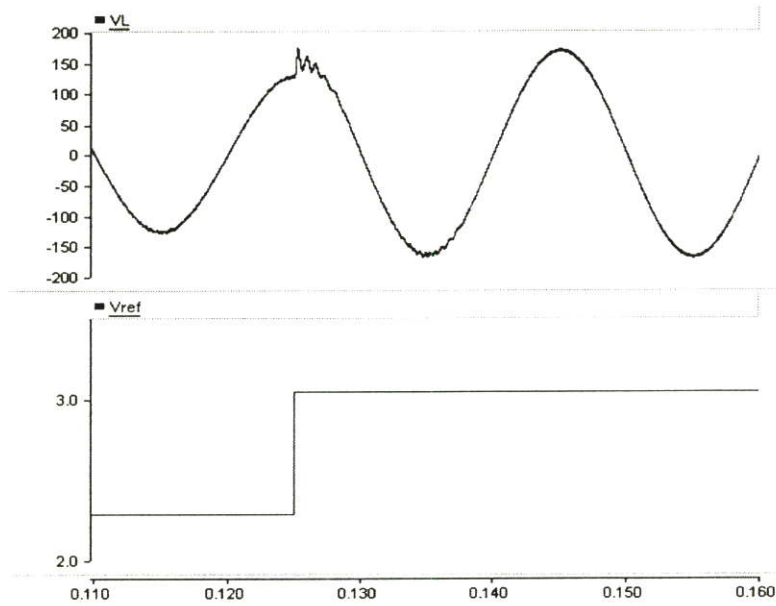
รูปที่ 4.33 รูปวงจรตรวจจับแอมพลิฟายด์แบบความเร็วสูงและตัวควบคุมแบบ PI

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้ในการจำลอง

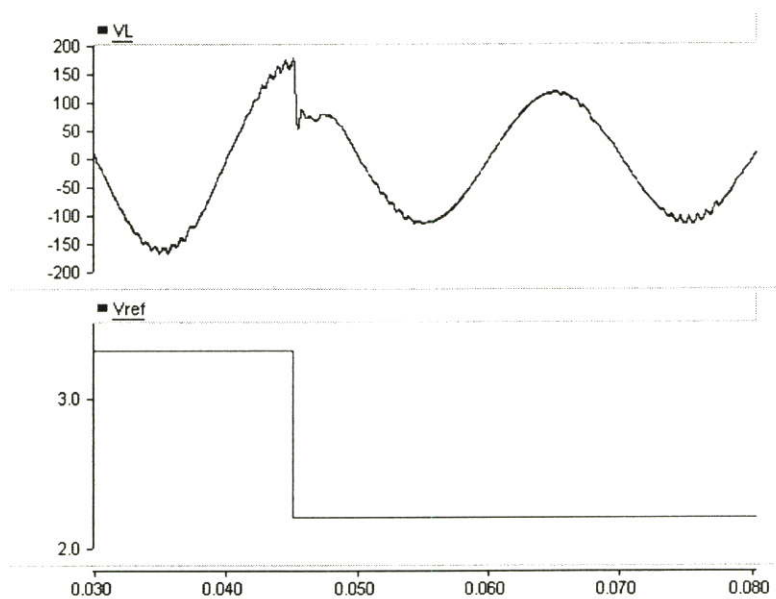
Pi controller parameter	
K_i	0.005
K_p	0.3

4.4.1 ผลการตอบสนอง โดยทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง ให้เพิ่มขึ้นทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกเพิ่มจาก 90V เป็น 120 V อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้นา่วงจรตามรูปที่ 4.14 มาใช้เพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและได้ทำการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง ให้ลดลงทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกลดลงจาก 120V เป็น 90V อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้นา่วงจรตามรูปที่ 4.15 มาใช้เพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด โดยที่ในส่วนของผลการตอบสนองได้การจำลองทั้งในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและโหลดที่เป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ

4.4.1.1 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน โดยที่ในการจำลองโหลดที่ใช้เป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งค่าความต้านทานที่ใช้มีค่าเท่ากับ $240\ \Omega$ โดยในรูปที่ 4.34 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 4.35 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกจะมีผลการตอบสนองที่ล่าช้าต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงทันทีทันใด อีกทั้งยังมีผลของโอเวอร์ชูตและอันเดอร์ชูตเกิดขึ้น

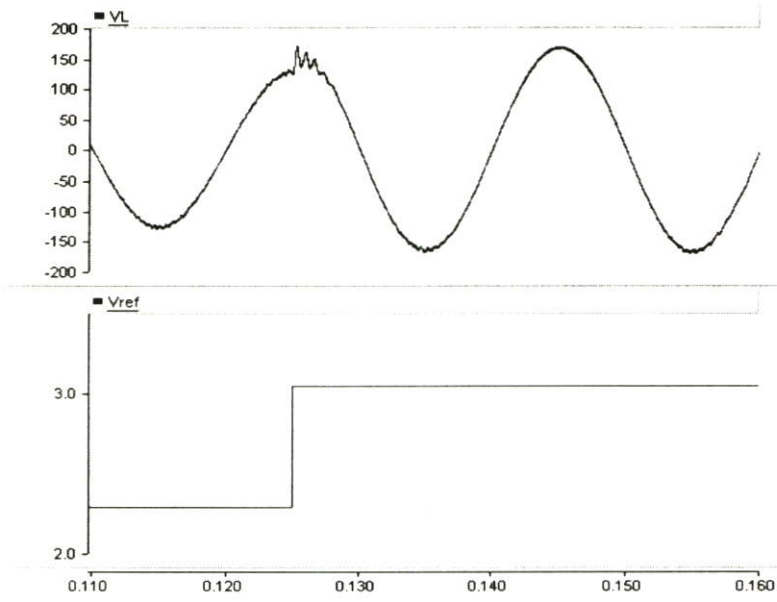


รูปที่ 4.34 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

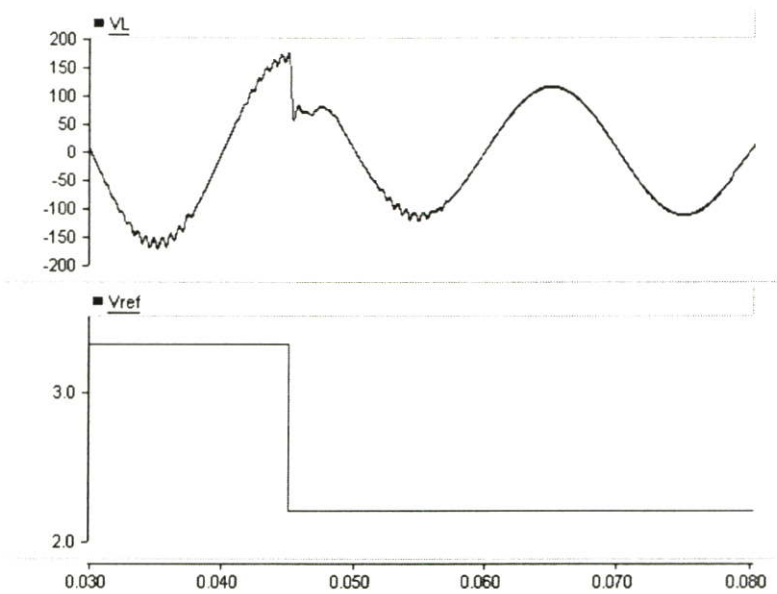


รูปที่ 4.35 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด

4.4.1.2 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ในการจำลองโหลดที่ใช้เป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่ใช้มีค่าเท่ากับ 81.5Ω และค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.2 H จะทำให้ได้ค่า Pf เท่ากับ 0.8 ซึ่งวงจรที่ใช้ในการจำลองได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.28 โดยในรูปที่ 4.36 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 4.37 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกจะมีผลการตอบสนองที่ล่าช้าต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงทันทีทันใด อีกทั้งยังมีผลของโอเวอร์ชูตและอันเดอร์ชูตเกิดขึ้น



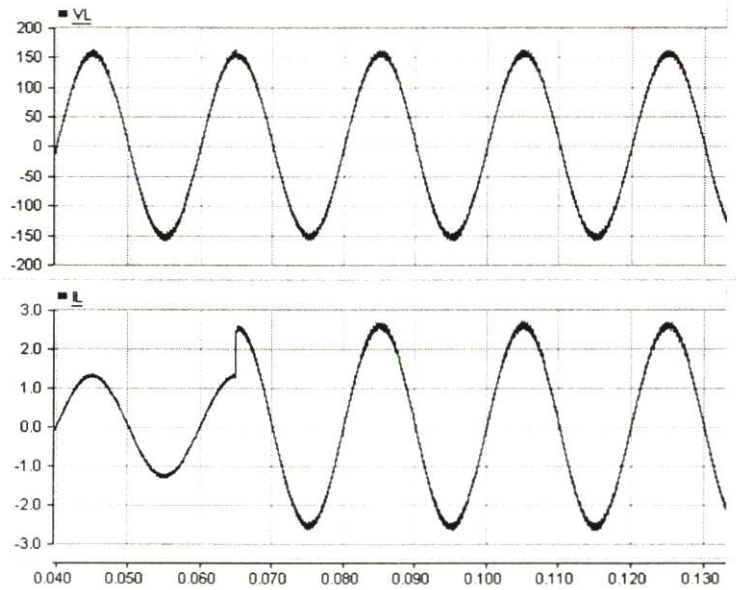
รูปที่ 4.36 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.37 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

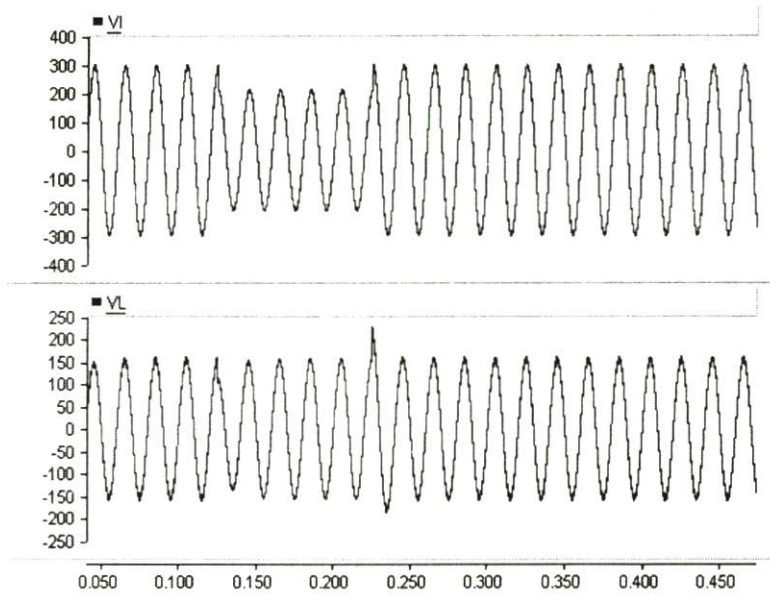
หน้านี้ไม่มีในต้นฉบับ

4.4.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ทำการจำลองโดยให้แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V โหลดเป็นตัวต้านทาน 120Ω และทำการเพิ่มโหลด ด้วยวิธีการขนานตัวต้านทาน 120Ω เข้าไป อย่างทันทีทันใดดังรูปที่ 4.29 และในรูปที่ 4.40 แสดงผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จากการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกจะไม่ตกลงตามการเพิ่มของกระแสโหลด แต่ค่าของแรงดันด้านขาออกจะได้รับผลกระทบตรงจุดเริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของกระแสโหลด

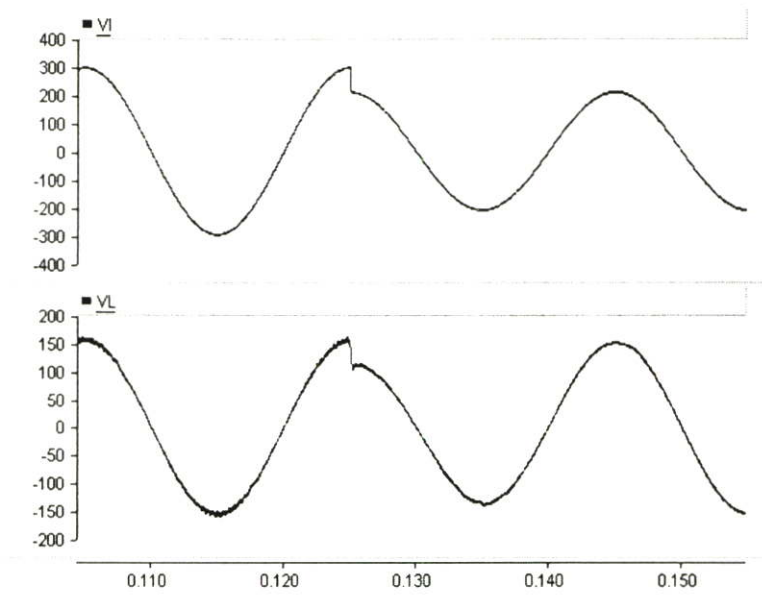


รูปที่ 4.40 ผลการจำลองเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

4.4.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด โดยทำการจำลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายตกลง 70% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้ใช้วงจรตามรูปที่ 4.26 มาใช้ในการจำลอง โดยในรูปที่ 4.41 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด และรูปที่ 4.42 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด จากรูปผลการจำลองเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายตกลง แรงดันด้านขาออกของเอชซีซีอปเปอร์ที่ควบคุมด้วยค่าเฉลี่ยจะได้รับผลกระทบคือแรงดันจะตกตรงช่วงแรกการตกของแรงดันที่แหล่งจ่าย แต่แรงดันจะสูงขึ้นจนถึงจุดที่ได้อ้างอิงไว้เมื่อเวลาผ่านไป และในช่วงสุดท้ายที่มีการตกของแรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีผลของโอเวอร์ชูตที่มีค่าสูงมากเกิดขึ้นที่แรงดันด้านขาออก

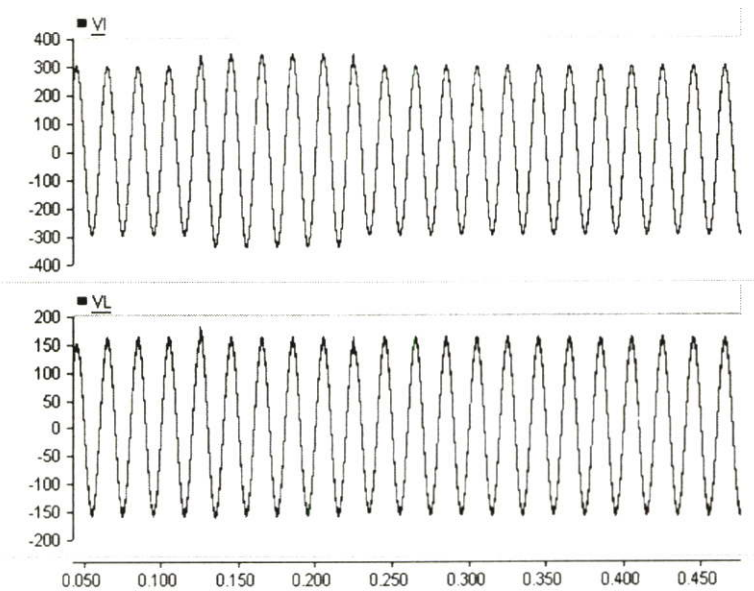


รูปที่ 4.41 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

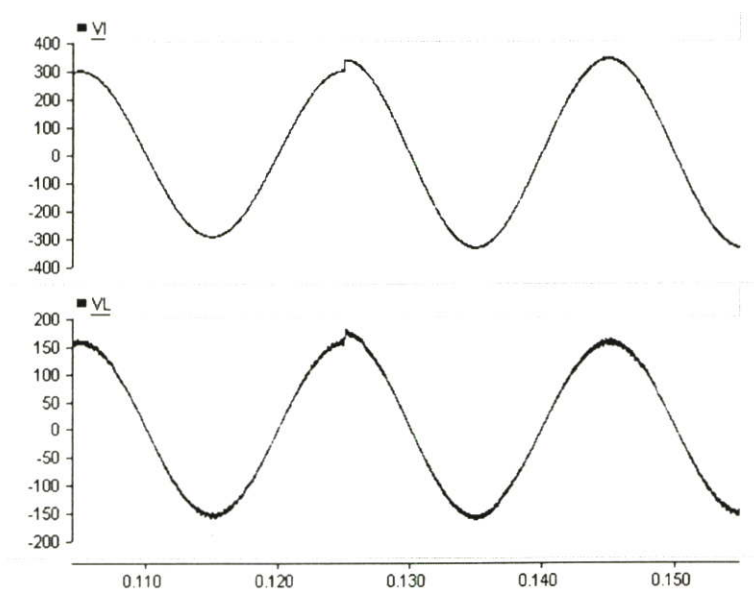


รูปที่ 4.42 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

4.4.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด โดยทำการจำลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น 15% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้ต่อวงจรตามรูปที่ 4.29 โดยในรูปที่ 4.42 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และรูปที่ 4.43 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด จากรูปผลการจำลองเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการควบคุมแรงดัน ค่าของแรงดันด้านขาออกจะเพิ่มขึ้นในตรงจุดเริ่มของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แหล่งจ่าย และจะกลับมายังตรงค่าแรงดันที่อ้างอิงไว้เมื่อเวลาผ่านไป



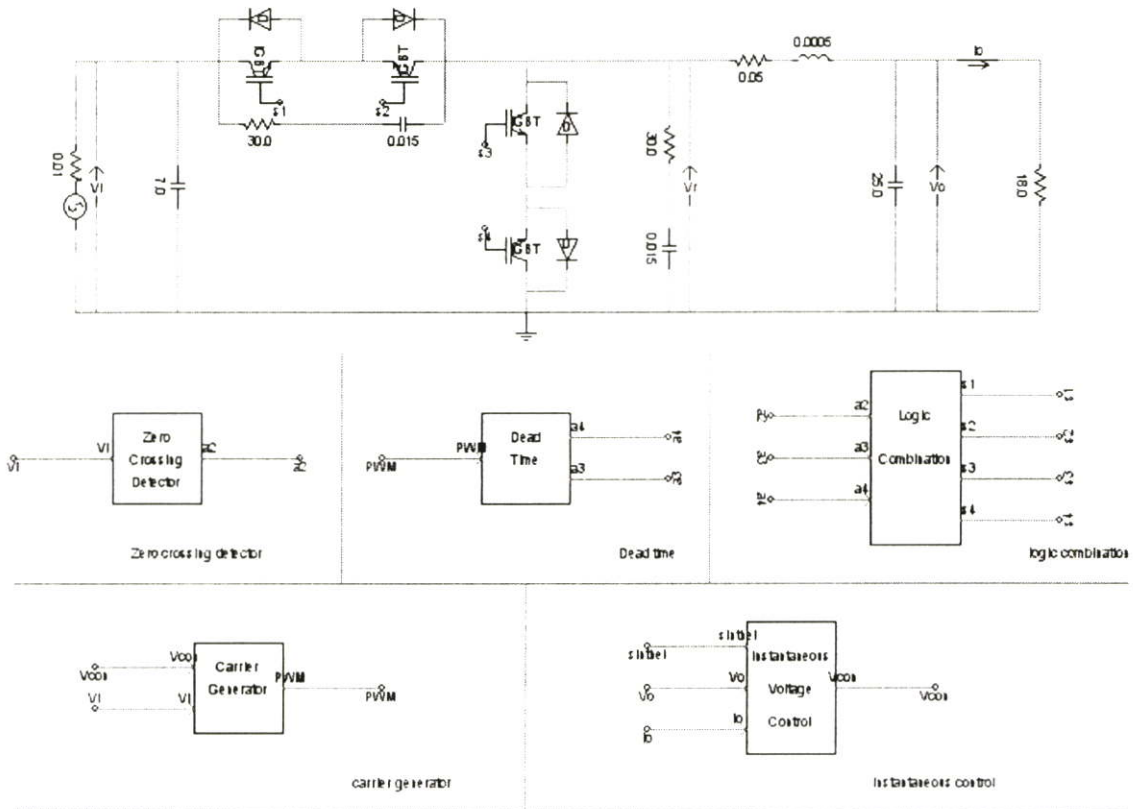
รูปที่ 4.43 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด



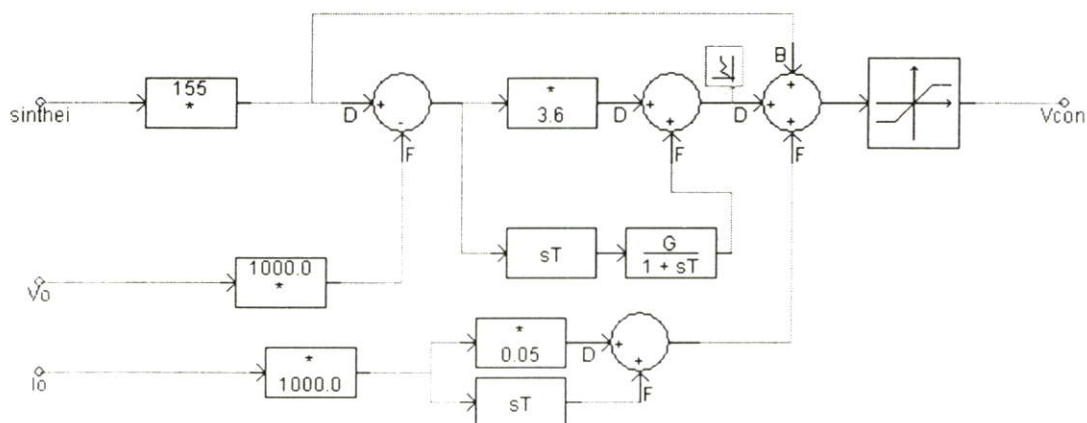
รูปที่ 4.44 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

4.5 การจำลองการควบคุมแรงดันเอชี่ช้อปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ

การจำลองการควบคุมแรงดันเอชี่ช้อปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ ซึ่งได้นำค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 1 มาใช้ในการจำลอง โดยในการจำลองได้นำค่าของกระแสและแรงดันของโหลดที่เป็นสัญญาณไซน์ มาทำการป้อนกลับให้กับระบบ โดยที่จะนำค่าของแรงดันที่โหลดมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิงที่เป็นไซน์ ก่อนที่จะมาเข้าตัวควบคุมแบบ PD เพื่อที่จะนำค่าสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุม มาเปรียบเทียบกับสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อย เพื่อสร้างเป็นสัญญาณ PWM ที่จะนำไปขับเกทของ IGBT โดยรูปที่ 4.45 เป็นรูปวงจรถ่ายใช้ในการจำลอง และรูปที่ 4.46 แสดงรูปวงจรถ่ายการควบคุมแรงดันชั่วขณะที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PD ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และได้ทำการทดลองต่างๆดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.45 รูปวงจรถ่ายใช้ในการจำลองของการควบคุมเอชี่ช้อปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ



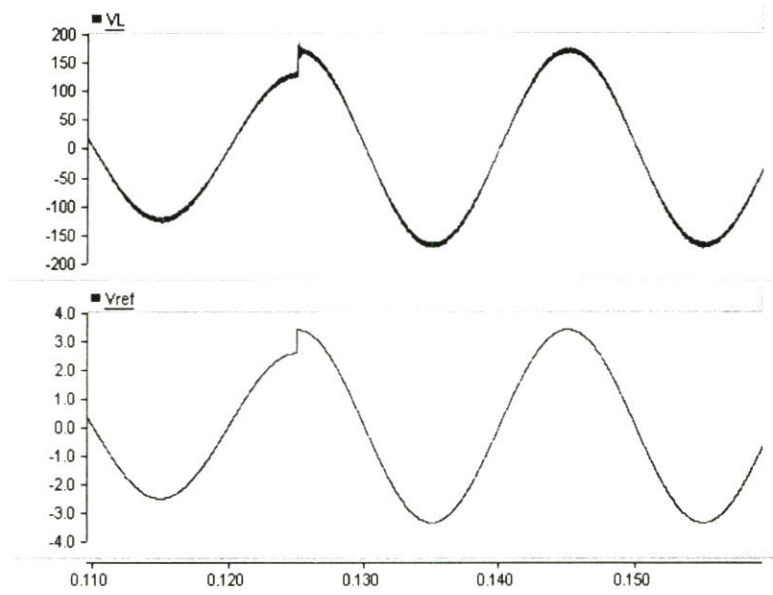
รูปที่ 4.46 รูปวงจรการควบคุมแรงดันชั่วขณะที่ใช้ในการจำลอง

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ในการจำลอง

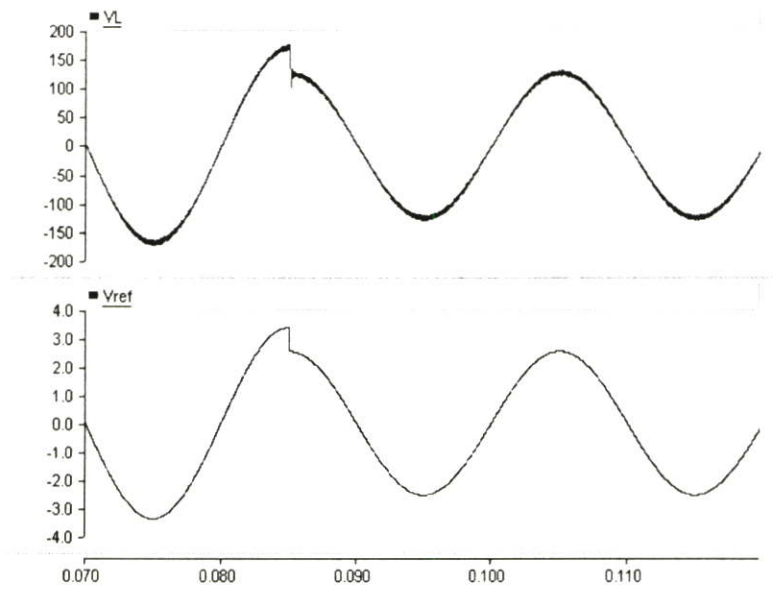
PD controller parameter	
K_D	0.00025
K_P	3.6

4.5.1 ผลการตอบสนอง โดยทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง ให้เพิ่มขึ้นทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกเพิ่มจาก 90V เป็น 120 V อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้น่าวงจรตามรูปที่ 4.14 มาใช้เพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและได้ทำการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง ให้ลดลงทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกลดลงจาก 120V เป็น 90V อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้น่าวงจรตามรูปที่ 4.15 มาใช้เพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด โดยที่ในส่วนของการตอบสนองได้การจำลองทั้งในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและโหลดที่เป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ

4.5.1.1 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน โดยที่ในการจำลองโหลดที่ใช้เป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งค่าความต้านทานที่ใช้มีค่าเท่ากับ 240Ω โดยในรูปที่ 4.47 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 4.48 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากรูปผลการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกจะมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันอ้างอิง อีกทั้งยังมีผลของโอเวอร์ชูตและอันเดอร์ชูตที่มีค่าต่ำ

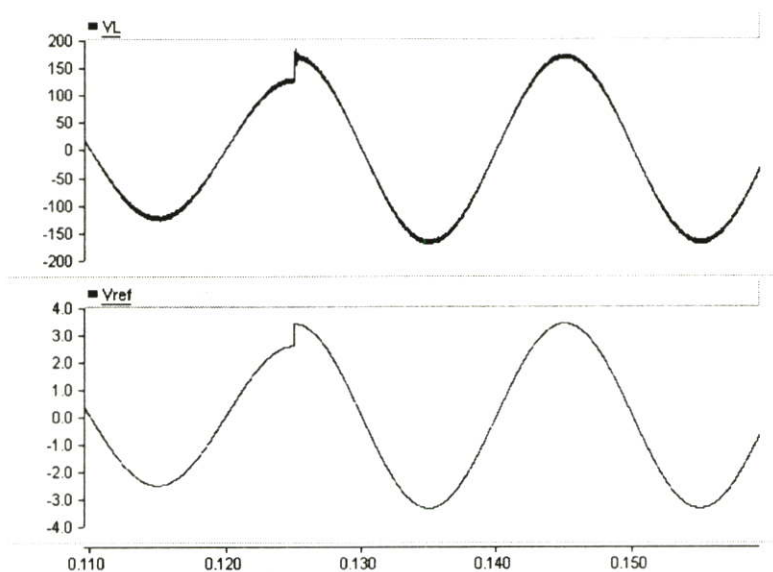


รูปที่ 4.47 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

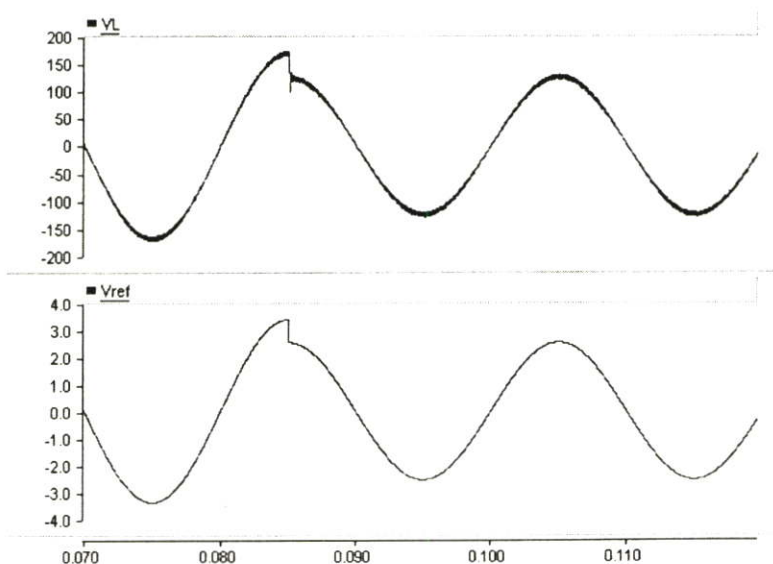


รูปที่ 4.48 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด

4.5.1.2 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ในการจำลองโหลดที่ใช้เป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ซึ่งค่าความต้านทานที่ใช้มีค่าเท่ากับ 81.5Ω และค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.2 H ทำให้ได้ค่า Pf เท่ากับ 0.8 ซึ่งวงจรที่ใช้ในการจำลองได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.18 โดยในรูปที่ 4.49 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 4.50 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากรูปผลการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกจะมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันอ้างอิง อีกทั้งยังมีผลของโอเวอร์ชูตและอันเดอร์ชูตที่มีค่าต่ำ

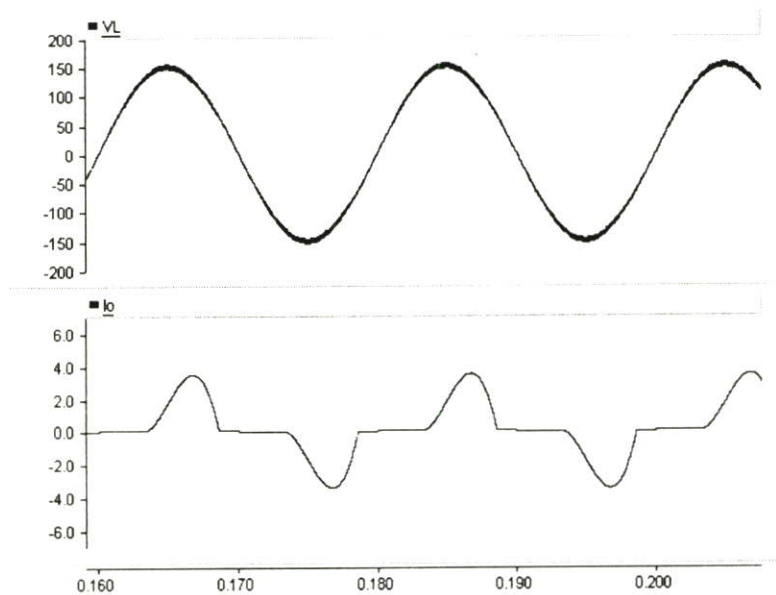


รูปที่ 4.49 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

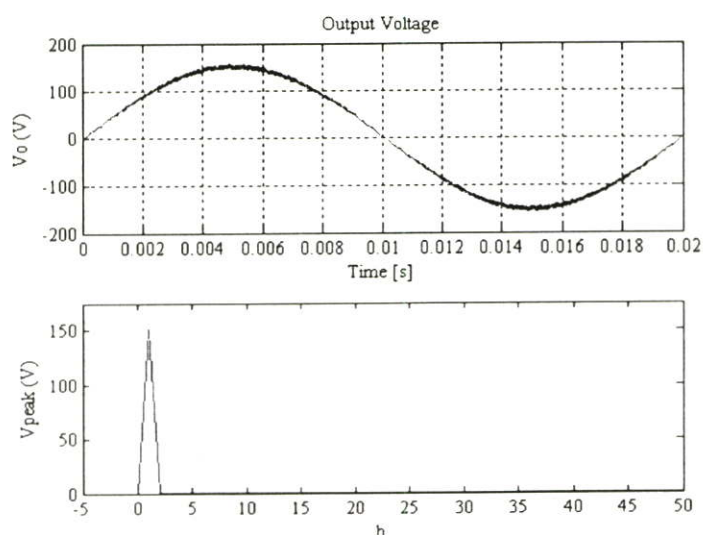


รูปที่ 4.50 ผลการจำลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

4.5.2 ผลของของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำการจำลองโดยใช้โหลดที่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้ต่อเป็นวงจรในการจำลองตามรูปที่ 4.21 โดยได้นำค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากตารางที่ 4.2 ในรูปที่ 4.51 แสดงผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากผลการจำลองรูปคลื่นของ แรงดันด้านขาออกยังมีคุณภาพใกล้เคียงไซน์ เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีก โดยในรูปที่ 4.52 ได้แสดงรูปของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นที่แรงดันด้านขาออก (เฉพาะ ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำจนถึงลำดับที่ 50) ค่า THD เมื่อคำนวณถึงฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 500 มีค่าเท่ากับ 2.11 % ซึ่งน้อยกว่า ค่าของ THD ที่ได้จากการควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับ และการควบคุมด้วยค่าเฉลี่ย

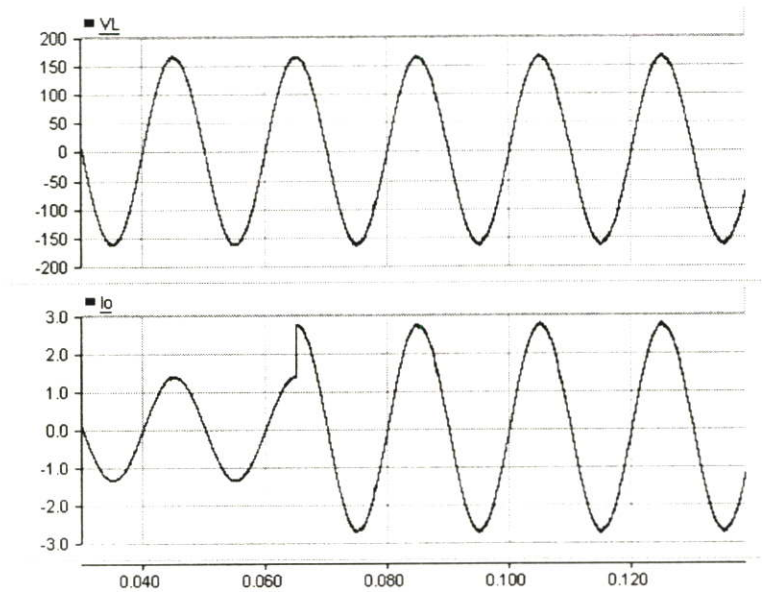


รูปที่ 4.51 ผลการจำลองเมื่อใช้กับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น



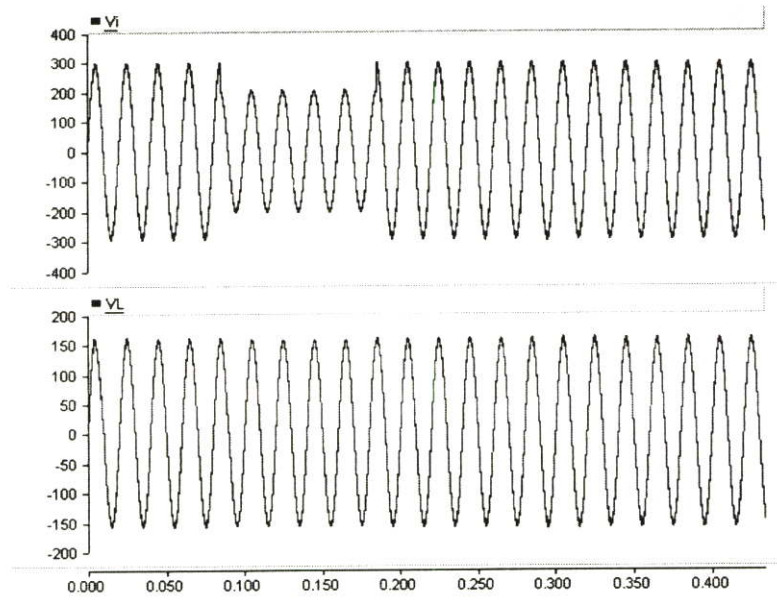
รูปที่ 4.52 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบใช้ค่าชั่วขณะ

4.5.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ทำการจำลอง โดยให้แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V โหลดเป็นตัวต้านทาน 120 Ω และทำการเพิ่มโหลด ด้วยวิธีการขนานตัวต้านทาน 120 Ω เข้าไปอย่างทันทีทันใดดังรูปที่ 4.24 และในรูปที่ 4.53 แสดงผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จากการจำลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกจะไม่ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มของกระแสโหลด กล่าวคือจะไม่ตกตามการเพิ่มของกระแสโหลด

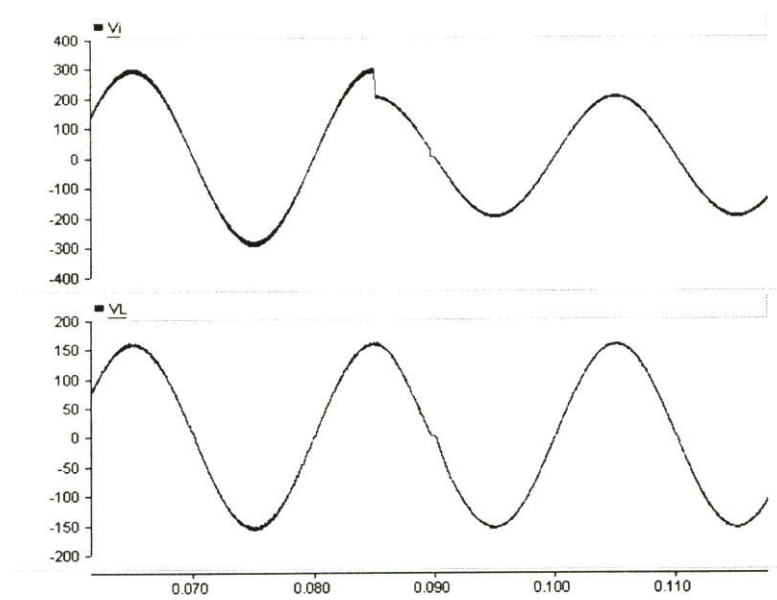


รูปที่ 4.53 ผลการจำลองเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

4.5.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด โดยทำการจำลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายตกลง 70% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้ต่อวงจรตามรูปที่ 4.26 โดยในรูปที่ 4.54 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด และรูปที่ 4.55 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายลดลงทันทีทันใด จากรูปผลการจำลองเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายตกลง แรงดันด้านขาออกของเอซีซีโอพีเปอร์ที่ควบคุมด้วยค่าแรงดันชั่วขณะจะไม่ได้รับผลกระทบจากการตกของแรงดันที่แหล่งจ่าย กล่าวคือค่าของแรงดันด้านขาออกไม่ตกลงตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แหล่งจ่าย

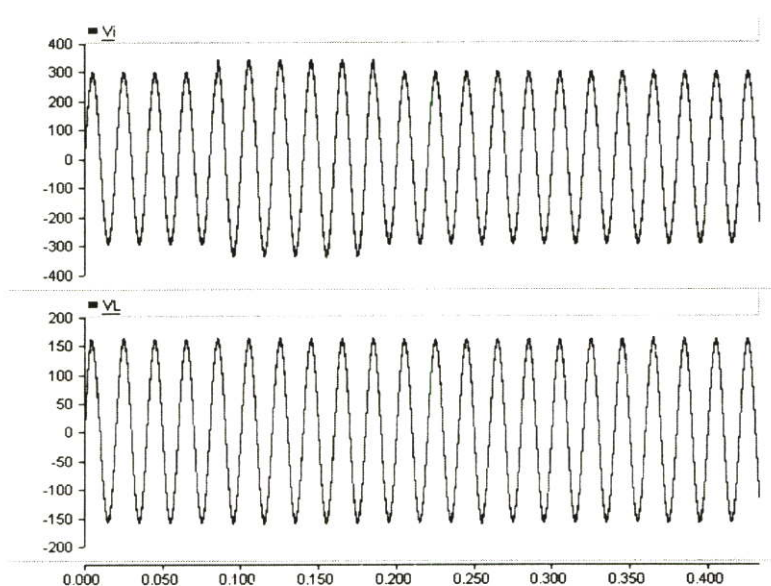


รูปที่ 4.54 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

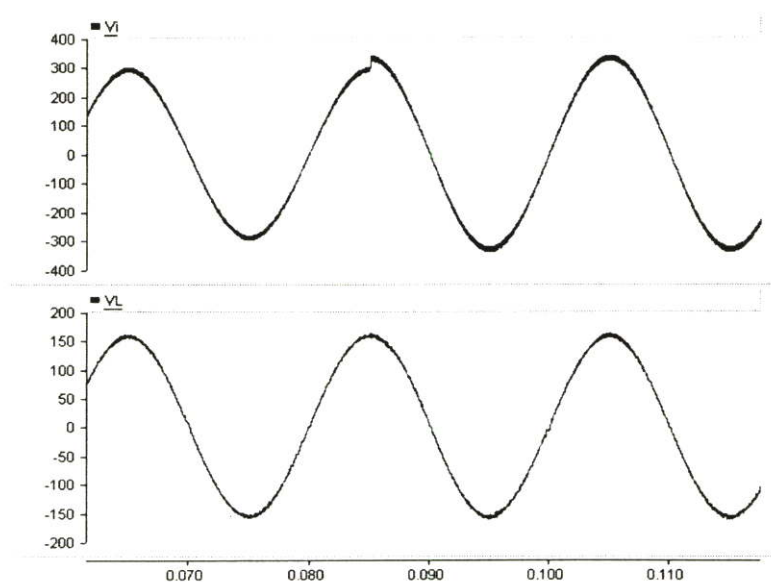


รูปที่ 4.55 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

4.5.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด โดยทำการจำลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V แรงดันด้านขาเข้า 220 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น 15% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ซึ่งได้ต่อวงจรตามรูปที่ 4.29 โดยในรูปที่ 4.56 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และรูปที่ 4.57 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด จากผลของการจำลองเห็นได้ว่าเมื่อมีการควบคุมแรงดันด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ จะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันเพิ่มขึ้นของแหล่งจ่าย กล่าวคือค่าของแรงดันด้านขาออกไม่เพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แหล่งจ่าย



รูปที่ 4.56 ผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด



รูปที่ 4.57 รูปขยายผลการจำลองเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

บทที่ 5

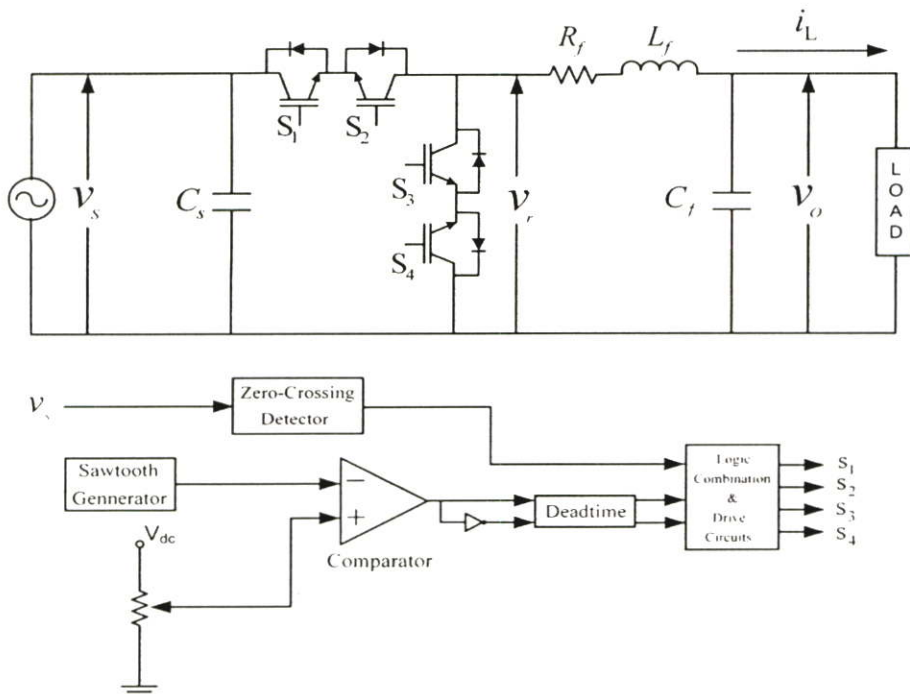
การทดลองและผลการทดลอง

5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ในบทนี้แสดงให้เห็นผลการทดลองของวงจรเอชซีซีโอปเปอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ ของวงจรเอชซีซีโอปเปอร์ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับ ค่าของแรงดันด้านขาออก ค่าประสิทธิภาพ เป็นต้น อีกทั้งยังได้ทำการทดลองการควบคุมแรงดันของเอชซีซีโอปเปอร์ในแบบต่างๆ ซึ่งได้ทำการทดลองในส่วนของ การควบคุมแรงดันแบบที่ไม่มีการป้อนกลับ การควบคุมแรงดัน โดยใช้ค่าใช้ค่าแรงดันเฉลี่ยและการควบคุมแรงดัน โดยใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ เพื่อที่จะผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยหัวข้อที่ทำการทดลองและเปรียบเทียบ คือ ผลการตอบสนอง ผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผลเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและผลเมื่อแหล่งจ่ายเปลี่ยนแปลง

5.2 การทดลองวงจรเอชซีซีโอปเปอร์

โดยในการทดลองวงจรเอชซีซีโอปเปอร์นี้ วงจรเอชซีซีโอปเปอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรเอชซีซีโอปเปอร์เฟสเดียวแบบบักซ์เอชซีซีโอปเปอร์ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 โดยได้ใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.1 มาทำการทดลอง และวงจรส่วนประกอบที่ใช้ในการทดลอง แบ่งได้เป็นวงจรต่างๆ ดังนี้

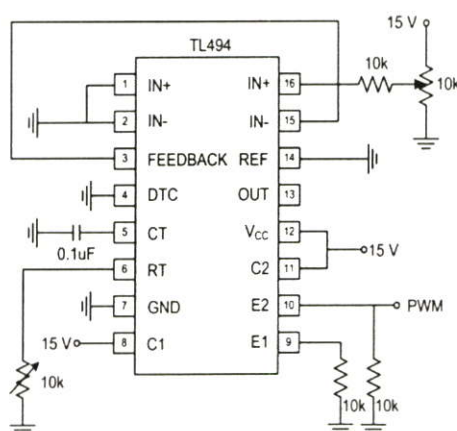


รูปที่ 5.1 วงจรเอชซีซีโอปเปอร์ที่ใช้ในการทดลอง

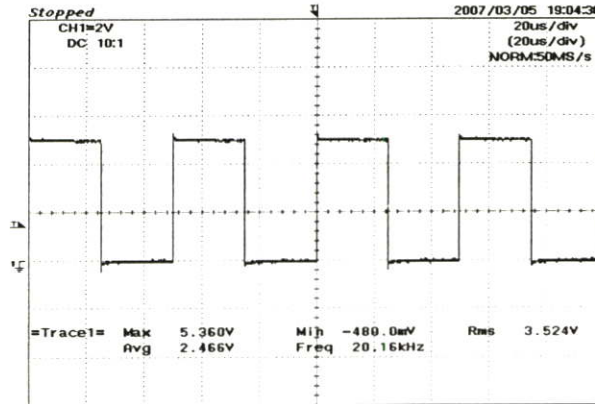
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

AC Chopper	
Supply voltage	220 V
Switching frequency	20 kHz
Supply-side filter	
C_s	7 μ F
Load-side low pass filter	
L_f	500 μ H
C_f	5 μ F

5.2.1 วงจรสร้างสัญญาณ PWM เป็นวงจรที่ใช้สร้างสัญญาณ PWM ที่มีความถี่คงที่ แต่สามารถปรับค่า duty ratio ได้ ความถี่ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 20kHz และ IC ที่ใช้ในการทดลองคือ IC เบอร์ TL494 โดยที่ IC TL494 สามารถปรับความถี่ได้ด้วย การปรับค่า RC Oscillator (ขาที่ 5,6) และปรับค่าของ duty ratio (ขาที่ 3,15 และ 16) โดย รูปที่ 5.2 แสดงรูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง และรูปที่ 5.3 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทดลอง

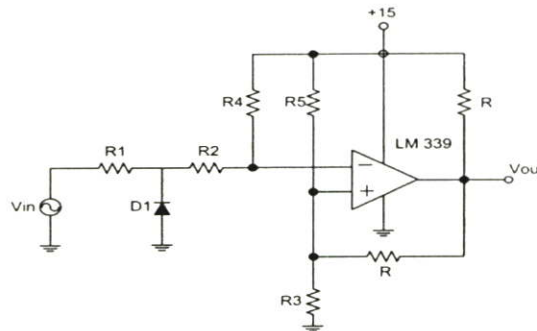


รูปที่ 5.2 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการทดลอง

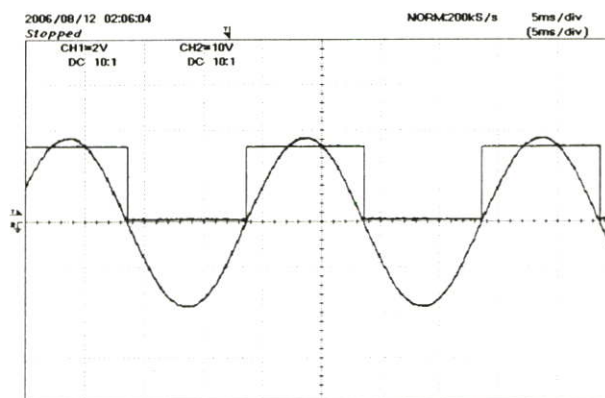


รูปที่ 5.3 รูปคลื่นสัญญาณ PWM ที่ได้จากการทดลอง

5.2.2 วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์กลาง เป็นวงจรที่ใช้ตรวจจับจุดผ่านศูนย์กลางของรูปคลื่นไซน์ ซึ่งรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จะเป็นรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม ซึ่งตรงจุดศูนย์กลางของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะเป็นตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางของรูปคลื่นไซน์ ในการทดลองได้ใช้ IC เบอร์ LM339 โดยรูปที่ 5.4 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลอง รูปที่ 5.5 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทดลอง

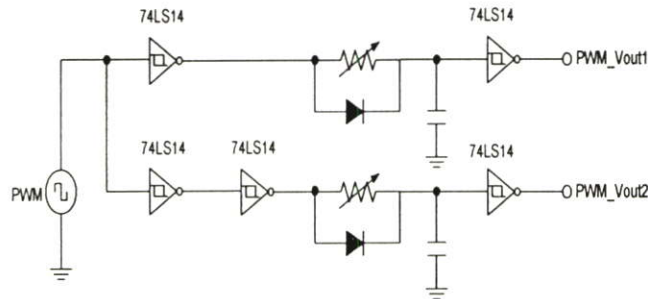


รูปที่ 5.4 วงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการทดลอง

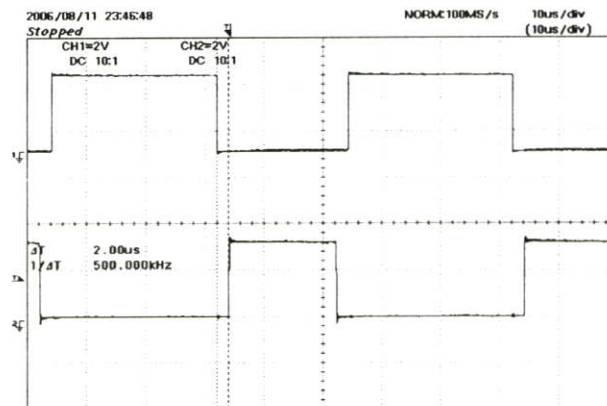


รูปที่ 5.5 รูปคลื่นสัญญาณตรวจจับจุดผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการทดลอง

5.2.3 วงจรประวิงเวลา เป็นวงจรป้องกันการทำงานพร้อมกันระหว่างสวิตช์ S1 กับ S3 และ S2 กับ S4 เพราะถ้าสวิตช์เหล่านี้ทำงานพร้อมกันจะทำให้เกิดการลัดวงจรของ IGBT ขึ้น โดยสามารถปรับค่าของการประวิงเวลา ได้จากการปรับเปลี่ยนค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ในงานวิจัยนี้ได้ตั้งค่าของ deadtime ไว้ 2 us โดยในรูปที่ 5.6 โดยแสดงวงจรที่ใช้ในการทดลอง และรูปที่ 5.7 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทดลอง

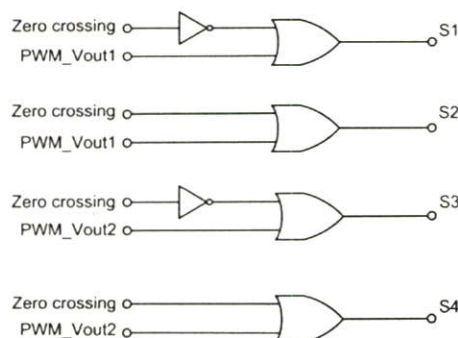


รูปที่ 5.6 วงจรประวิงเวลาที่ใช้ในการทดลอง

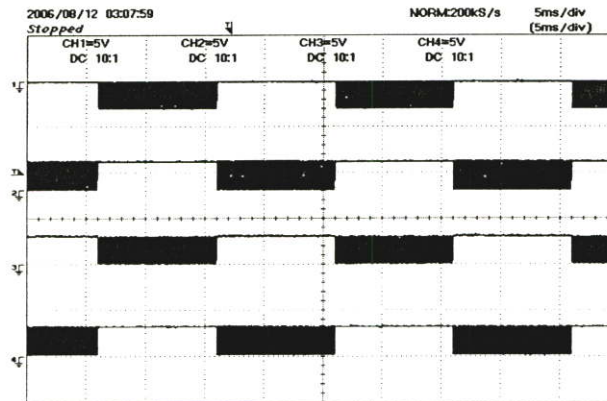


รูปที่ 5.7 รูปคลื่นของวงจรประวิงเวลาที่ได้จากการทดลอง

5.2.4 วงจรรวมสัญญาณ เป็นวงจรที่ใช้รวมสัญญาณ PWM ที่ผ่านชุดวงจรประวิงเวลากับสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับจุดผ่านศูนย์ ก่อนที่จะนำไปเข้าสู่ชุดขับนำ โดยในรูปที่ 5.8 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดลอง และรูปที่ 5.9 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทดลอง

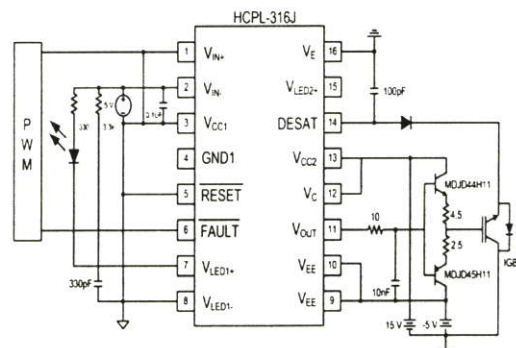


รูปที่ 5.8 วงจรรวมสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง

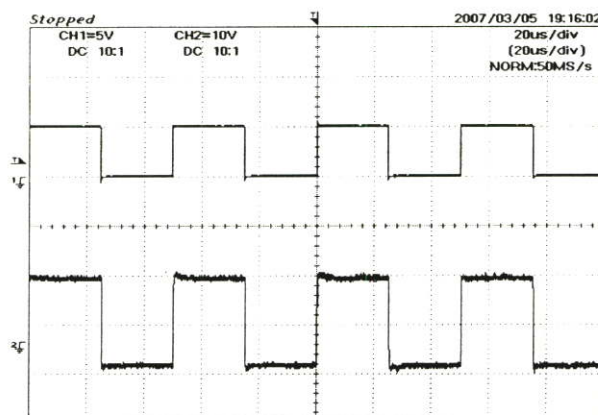


รูปที่ 5.9 รูปคลื่นของวงจรรวมสัญญาณที่ได้จากการทดลอง

5.2.5 วงจรขับนำ เป็นวงจรที่ใช้แยกกราวด์ของวงจรควบคุมกับกราวด์ของวงจรถูกขับและใช้ในการรักษาระดับแรงดันของสัญญาณขับเกท เพื่อให้เพียงพอต่อการทำให้ IGBT สามารถทำงานได้ตลอดช่วงเวลาของการ ON ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ IC เบอร์ HCPL316J ซึ่งภายในอุปกรณ์ตัวนี้เป็นทั้งอุปกรณ์แยกกราวด์ทางแสงและเป็นทั้งอุปกรณ์ขับนำภายในตัวเดียว อีกทั้งภายใน IC เบอร์ HCPL316J ของยังมีวงจรป้องกันกระแสที่ผ่านตัว IGBT เกิน เพื่อป้องกันการพังของ IGBT โดยในรูปที่ 5.10 แสดงรูปวงจรถูกขับนำที่ใช้ในการทดลอง รูปที่ 5.11 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทดลอง

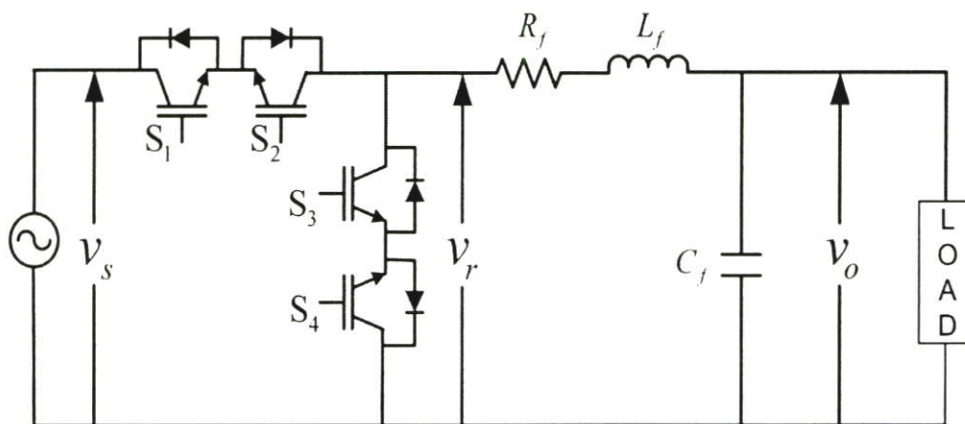


รูปที่ 5.10 วงจรขับนำที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.11 รูปคลื่นของวงจรขับนำที่ได้จากการทดลอง

5.2.6 วงจรกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งในวงจรกำลังจะประกอบไปด้วย IGBT ที่ใช้เป็น สวิตช์ 4 ตัว และได้ต่อกันเป็นวงจรบักซ์เอชชี้อุปเปอร์ โดยที่ทางด้านขาออกของวงจรเอชชี้อุปเปอร์มี วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำแบบใช้ LC ต่อคร่อมอยู่ เพื่อกรองเอาค่าความถี่ฮาร์มอนิกส์ออก ให้เหลือ เพียงความถี่มูลฐาน

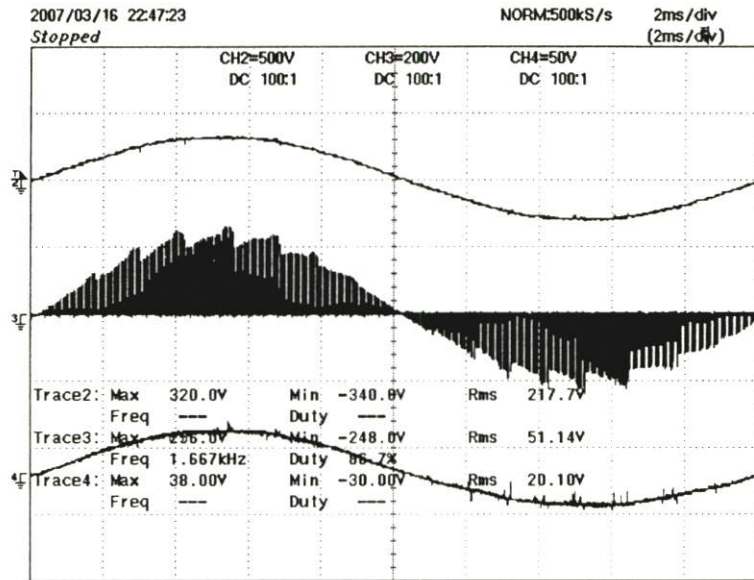


รูปที่ 5.12 วงจรกำลังของเอชชี้อุปเปอร์ที่ใช้ในการทดลอง

โดยในการทดลองการทำงานของวงจรเอชชี้อุปเปอร์ ให้ค่าของแรงดันด้านขาเข้าเป็น 220 V ค่าความถี่ของการสวิตช์เท่ากับ 20kHz โดยหัวข้อที่ได้ทำการทดลอง คือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า duty ratio กับ ค่าของแรงดันด้านขาออก ความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับ THD และค่า ประสิทธิภาพ

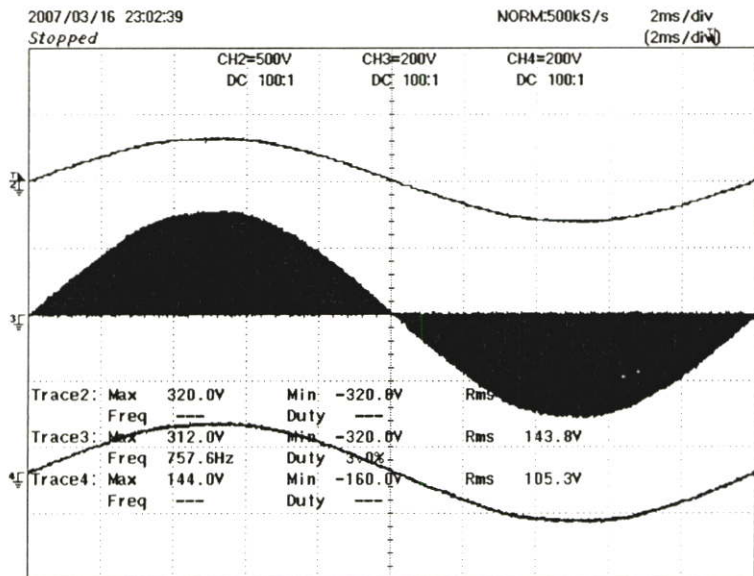
5.2.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับ ค่าของแรงดันด้านขาออก

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับค่าแรงดันด้านขาออกของวงจรเอชชี้อุปเปอร์นี้ โดยในการทดลองให้ค่าแรงดันทางด้านขาเข้า 220 V โหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟ 200 W แล้วทำการปรับค่าของ duty ratio ของสัญญาณ PWM ตั้งแต่ 0.1-0.9 ซึ่งในการปรับค่าของ duty ratio คือ การปรับเปลี่ยนค่าของสัญญาณไฟตรงที่นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งรูปคลื่นที่ได้จากการปรับค่าของ duty ratio ที่ค่า 0.1, 0.5 และ 0.9 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.13 , 5.14 และ 5.15 ตามลำดับและในรูปที่ 5.16 เป็นรูปภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับ ค่าของแรงดันด้านขาออกของเอชชี้อุปเปอร์ ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าค่าของแรงดันขาออกของเอชชี้อุปเปอร์จะมีค่าแปรผันตรงกับค่า duty ratio กล่าวคือถ้าค่า duty ratio มาก ค่าแรงดันขาออกที่ได้ก็จะมีค่ามาก แต่ถ้าค่าของ duty ratio มีค่าน้อยค่าแรงดันขาออกที่ได้ก็จะมีค่าน้อย



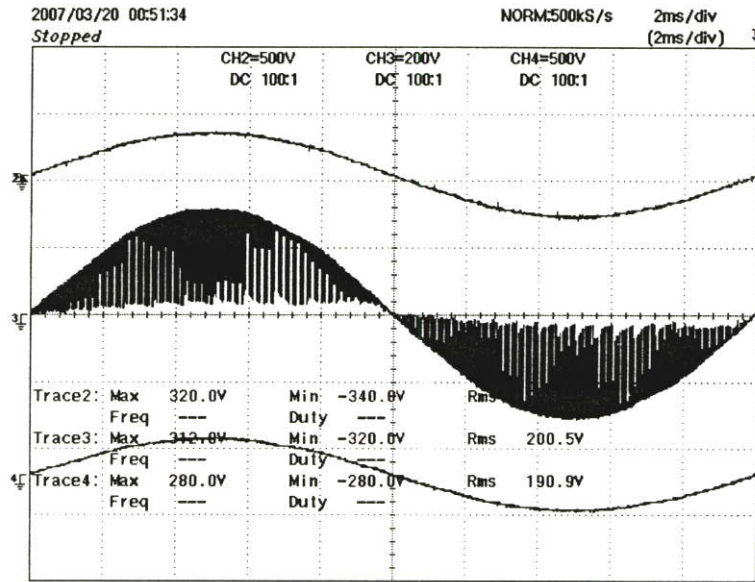
รูปที่ 5.13 แสดงค่าแรงดันด้านขาออกที่ค่า duty ratio=0.1

(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 500V/div เส้นกลางคือแรงดันด้านขาออก 50V/div และเส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 50V/div)



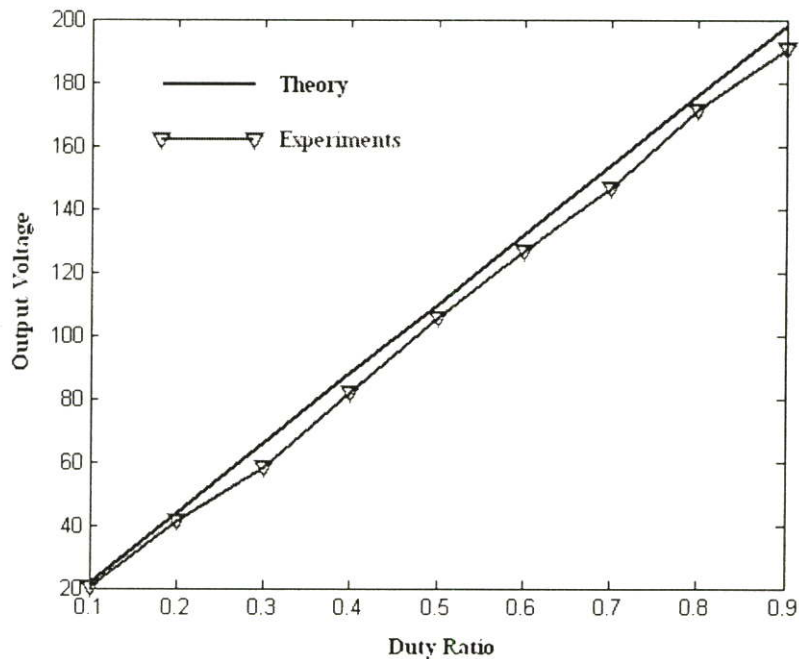
รูปที่ 5.14 แสดงค่าแรงดันด้านขาออกที่ค่า duty ratio=0.5

(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 500V/div เส้นกลางคือแรงดันด้านขาออก 50V/div และเส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 50V/div)



รูปที่ 5.15 แสดงค่าแรงดันด้านขาออกที่ค่า duty ratio=0.9

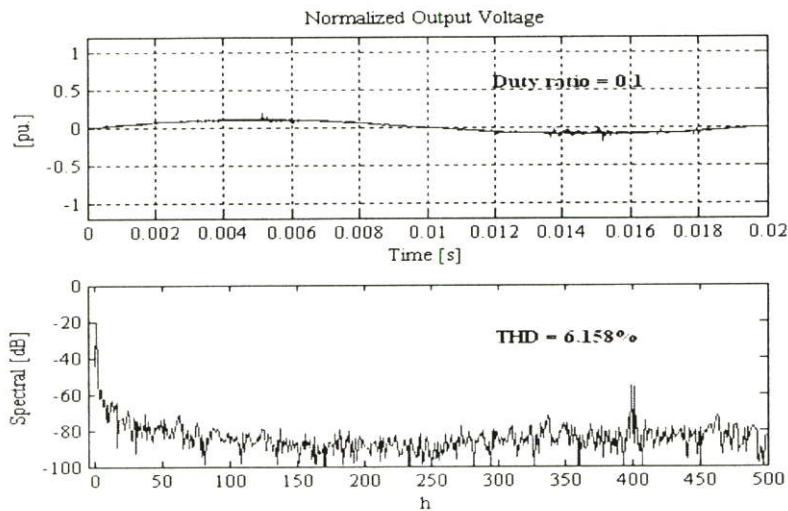
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 500V/div เส้นกลางคือแรงดันด้านขาออก 50V/div และเส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 50V/div)



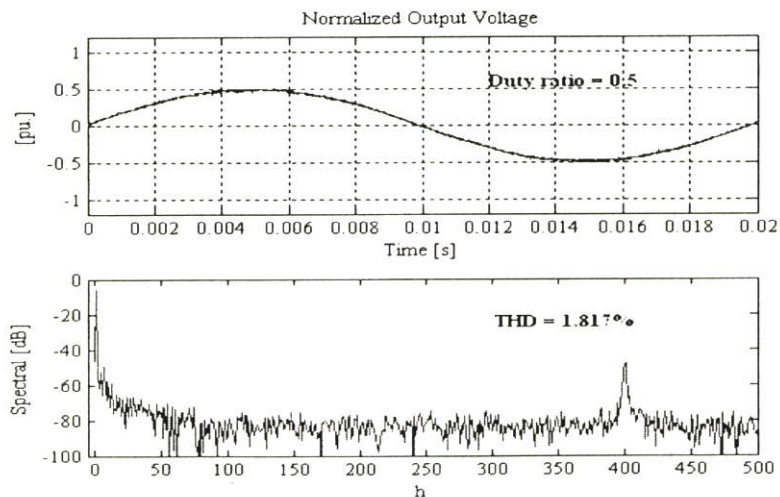
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับค่าของ duty ratio

5.2.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับ ค่าของ THD

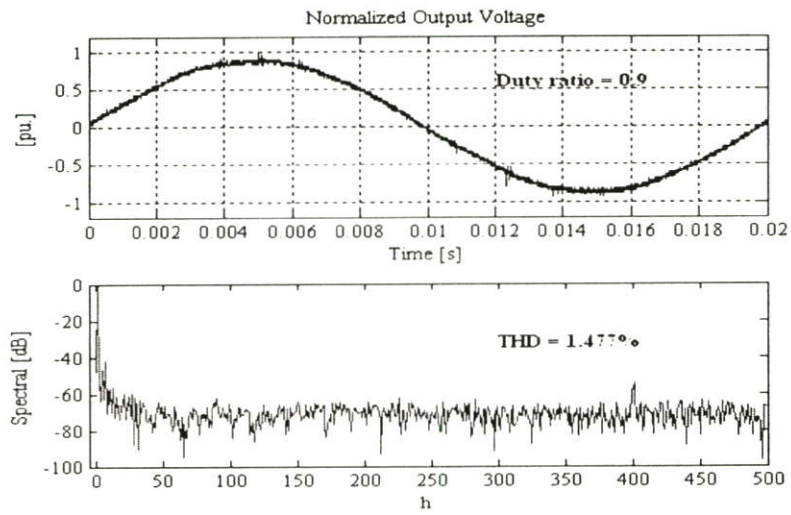
ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับค่าของ THD โดยในการทดลองให้ค่าแรงดันทางด้านขาเข้า 220 V โหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟ 200 W แล้วทำการปรับค่าของ duty ratio ของสัญญาณ PWM ตั้งแต่ 0.1- 0.9 ซึ่งรูปที่ 5.17 , 5.18 และ 5.19 แสดงรูปคลื่นของค่า THD ที่ค่า Duty ratio 0.1 , 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ โดยที่ในรูปที่ 5.20 เป็นรูปภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio กับค่าของ THD ซึ่งจากรูปภาพแสดงความสัมพันธ์จะเห็นว่าค่า THD จะลดลงเมื่อค่าของ Duty ratio เพิ่มขึ้น



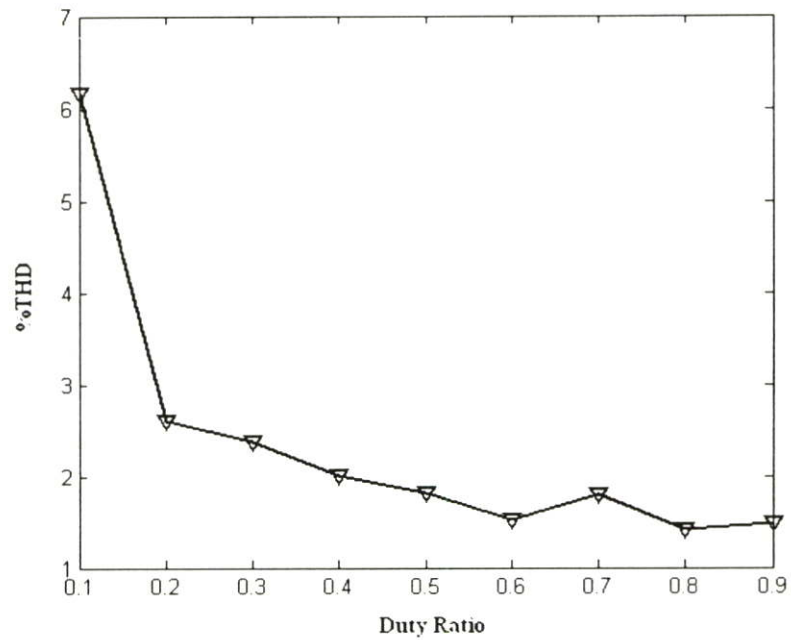
รูปที่ 5.17 แสดงค่า THD ที่ค่า duty ratio=0.1



รูปที่ 5.18 แสดงค่า THD ที่ค่า duty ratio=0.5



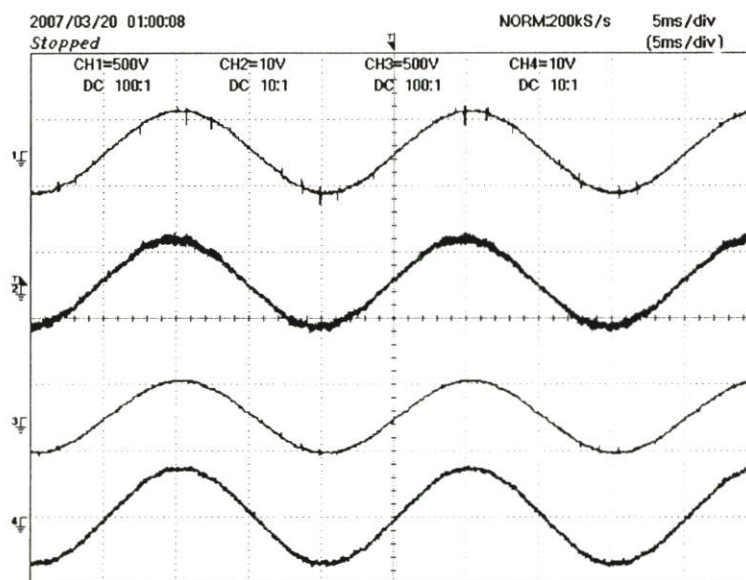
รูปที่ 5.19 แสดงค่า THD ที่ค่า duty ratio=0.9



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า duty ratio และค่าของ THD

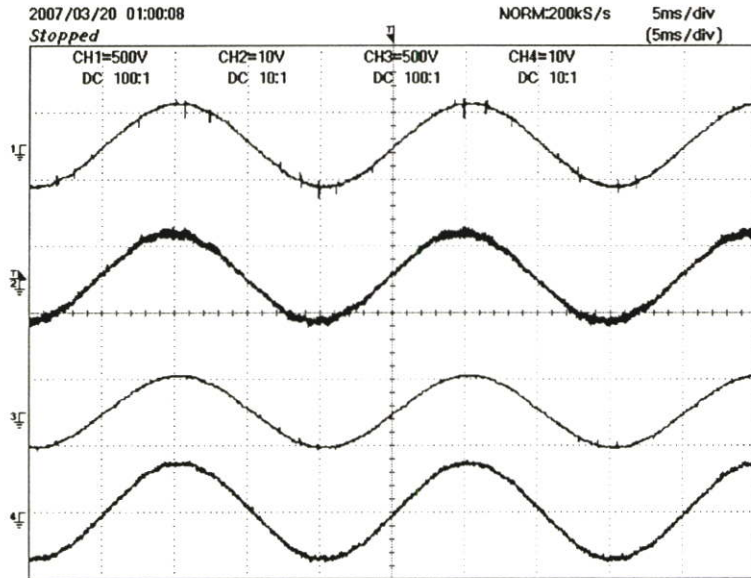
5.2.6.3 ประสิทธิภาพของวงจรเอชซีซีโอปเปอร์ที่ใช้ทดลอง

โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลอง เพื่อหาค่าประสิทธิภาพของวงจรเอชซีซีโอปเปอร์ที่ใช้ทดลอง รวมทั้งค่าของกำลังด้านขาเข้าและกำลังด้านขาออก ซึ่งในการทดลองให้ค่าแรงดันทางด้านขาเข้า 220 V แล้วทำการปรับค่าของ duty ratio ของสัญญาณ PWM ไปตั้งแต่ 0.1-0.9 โหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟ โดยที่ในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนโหลด เพื่อรักษาให้ค่าของกระแสโหลดให้คงที่อยู่ที่ 5 A ซึ่งรูปที่ 5.21 กับ 5.22 แสดงรูปคลื่นที่ได้จากการทดลองที่ค่า Duty ratio 0.7 กับ 0.9 ซึ่งรูปคลื่นในแต่ละรูปจะมีรูปคลื่นของแรงดันขาเข้า กระแสขาเข้า แรงดันขาออกและกระแสด้านขาออก โดยที่ในตารางที่ 5.2 เป็นตารางแสดงค่าประสิทธิภาพของเอชซีซีโอปเปอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 5.21 แสดงรูปแรงดันแรงดันด้านขาเข้า กระแสด้านขาเข้า แรงดันด้านขาออกและกระแสด้านขาออกที่ค่า duty ratio=0.7

(เส้นที่ 1 คือแรงดันด้านขาเข้า 500V/div เส้นที่ 2 คือกระแสด้านขาเข้า 10A/div เส้นที่ 3 คือแรงดันด้านขาเข้า 500V/div และเส้นที่ 4 คือแรงดันด้านขาออก 50V/div)



รูปที่ 5.22 แสดงรูปแรงดันแรงดันด้านขาเข้า กระแสด้านขาเข้า แรงดันด้านขาออกและกระแสด้านขาออกที่ค่า duty ratio=0.9

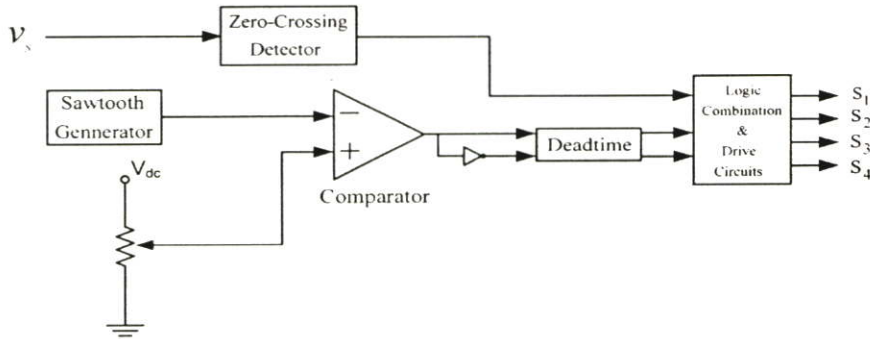
(เส้นที่ 1 คือแรงดันด้านขาเข้า 500V/div เส้นที่ 2 คือกระแสด้านขาเข้า 10A/div เส้นที่ 3 คือแรงดันด้านขาเข้า 500V/div และเส้นที่ 4 คือแรงดันด้านขาออก 50V/div)

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าประสิทธิภาพของเอชซีซีอปเปอร์

Duty ratio	V_i (V)	I_m (A)	V_o (V)	I_L (A)	P_m (W)	P_o (W)	η (%)
0.1	220	0.72	15.2	5.12	98.9	77.36	78.22
0.2	220	1.16	36.25	5.15	213.11	185.94	87.25
0.3	218.9	1.7	60	5.17	336.84	298.26	88.54
0.4	221	2.21	82.75	5.1	451.97	413.53	91.4
0.5	219.4	2.73	102.9	5.1	565	517.92	91.66
0.6	221.4	3.15	125.2	5.01	666.55	623.17	93.5
0.7	221	3.74	149.5	5.13	802.18	763.95	95.23
0.8	219	4.26	170	5.2	909.67	879.26	96.6
0.9	221.2	4.72	194	5.15	1022.7	996.9	97.4

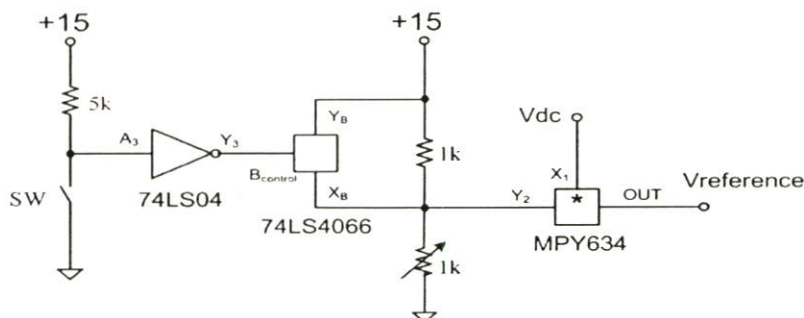
5.3 การทดลองการควบคุมแรงดันเอชชี้อุปเปอร์แบบไม่มีการป้อนกลับ

การทดลองการควบคุมแรงดันเอชชี้อุปเปอร์แบบไม่มีการป้อนกลับ ในการทดลองนี้ได้นำวงจรการสร้างสัญญาณตามรูปที่ 5.23 โดยได้ใช้วงจรเอชชี้อุปเปอร์ตามรูปที่ 3.12 และค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.1 มาทำการทดลอง โดยที่ในการทดลองนี้ไม่มีการควบคุมค่าของแรงดันด้านขาออกของเอชชี้อุปเปอร์ โดยได้ทำการทดลองต่างๆ ดังต่อไปนี้

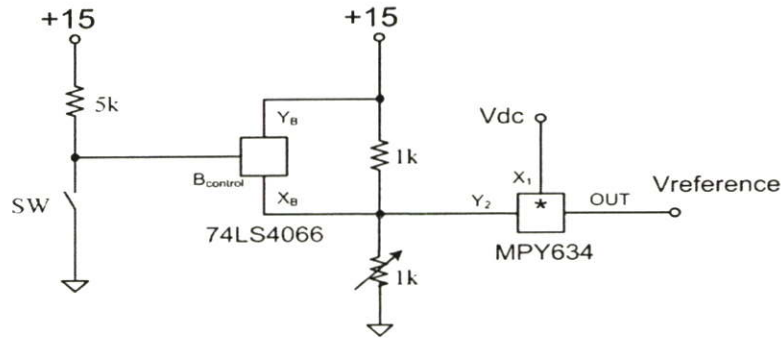


รูปที่ 5.23 แสดงรูปของวงจรสร้างสัญญาณในการทดลองแบบไม่มีการป้อนกลับ

5.3.1 ผลการตอบสนอง ในการทดลองนี้โหลดใช้เป็นหลอดไฟ 200 W โดยในการทดลองการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงให้เพิ่มขึ้นทันทีทันใด ได้ใช้วงจรในรูปที่ 5.24 โดยในวงจรนี้ได้ใช้ IC 3 เบอร์ คือ 74LS04 74LS4066 และ MPY634 มาต่อกันตามรูป แล้วนำสัญญาณไฟตรงที่เป็นสัญญาณอ้างอิง มาเข้าตรงขา 1 ของ IC เบอร์ MPY634 ดังนั้นเมื่อกดสวิตช์ค่าของแรงดันอ้างอิงจะเพิ่มขึ้นทันทีทันใด โดยนำค่าสัญญาณที่ออกจากขา 12 ของ IC เบอร์ MPY634 ไปใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณฟีนลีย์ เพื่อให้แรงดันด้านขาออกเพิ่มจาก 90V เป็น 120 V อย่างทันทีทันใดและได้ทำการทดลองการเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงให้ลดลงทันทีทันใด ซึ่งได้ใช้วงจรในรูปที่ 5.25 ซึ่งในการทำงานของวงจรนี้ จะมีรูปวงจรคล้ายกับวงจรตามรูปที่ 5.24 เพียงแต่ไม่มี IC เบอร์ 74LS04 ดังนั้นเมื่อกดสวิตช์ค่าของแรงดันอ้างอิงจะลดลงทันทีทันใด โดยนำค่าสัญญาณที่ออกจากขา 12 ของ IC เบอร์ MPY634 ไปใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณฟีนลีย์เพื่อให้แรงดันด้านขาออกลดลงจาก 120V เป็น 90V อย่างทันทีทันใด โดยที่ในส่วนของการตอบสนองได้ทำการทดลองทั้งในกรณีทีโหลดเป็นตัวต้านทานและโหลดที่เป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ

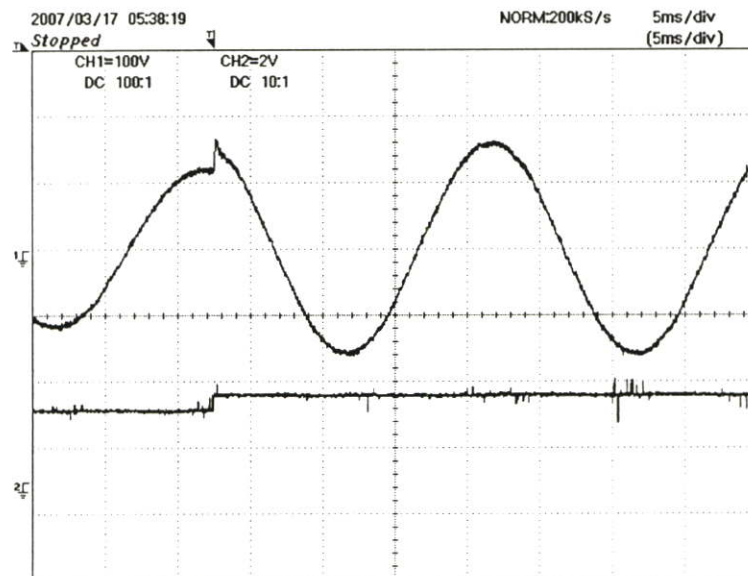


รูปที่ 5.24 วงจรปรับค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

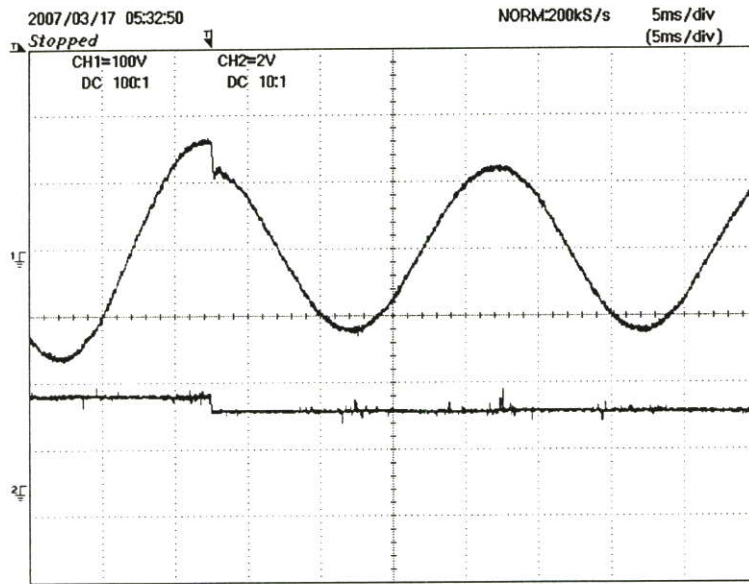


รูปที่ 5.25 วงจรปรับค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด

5.3.1.1 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน โดยที่ในการทดลองโหลดที่ใช้เป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งโหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟ 200 W โดยที่รูปที่ 5.26 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 5.27 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกที่ไม่มีการควบคุมแรงดันด้านขาออกจะมีผลตอบสนองที่ล่าช้า เมื่อทำการปรับค่าแรงดันอ้างอิงทันทีทันใด

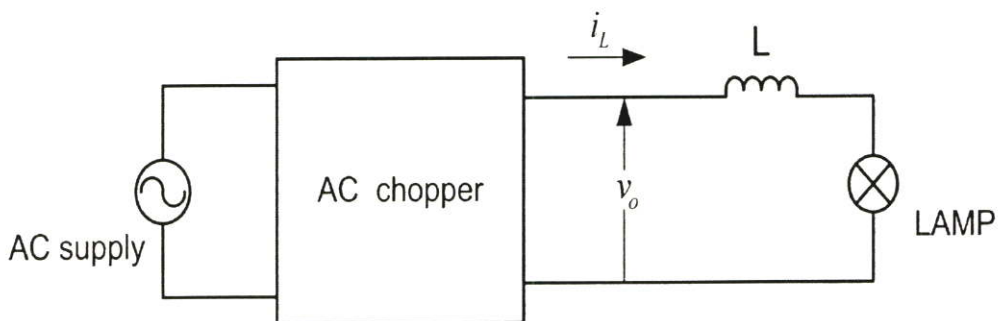


รูปที่ 5.26 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด (เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 2 V/div)

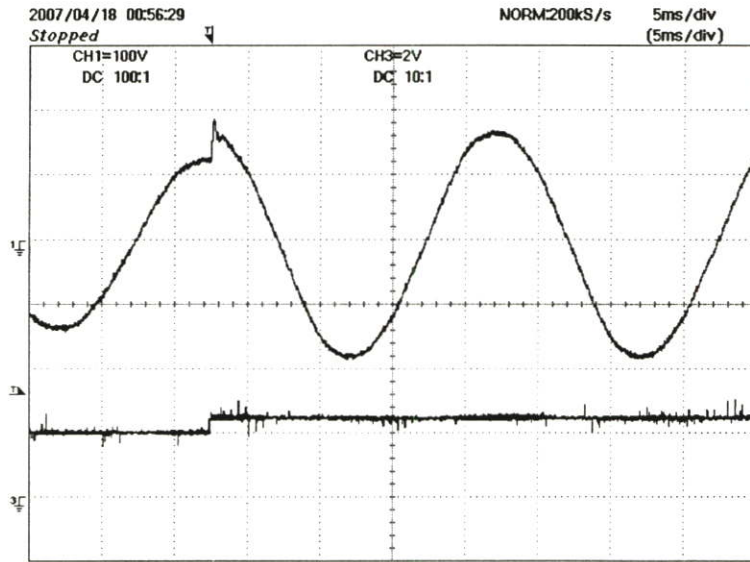


รูปที่ 5.27 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 2 V/div)

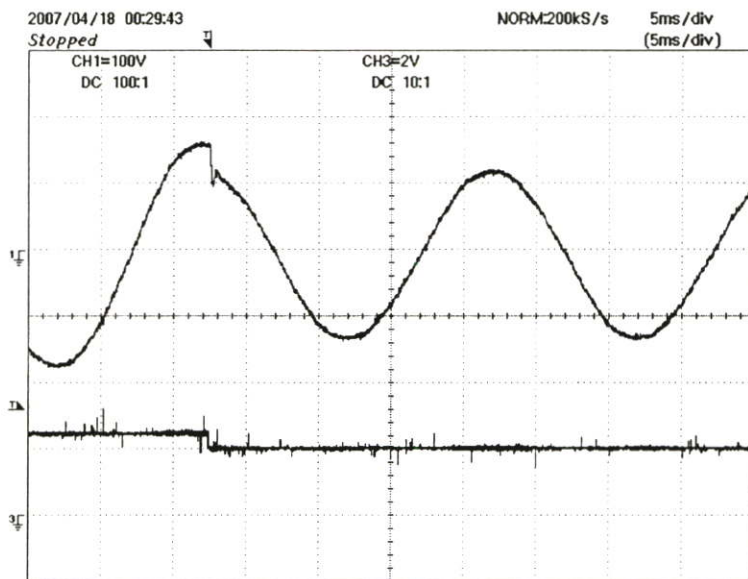
5.3.1.2 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ในการทดลอง โหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟกับตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ซึ่งโหลดหลอดไฟที่ใช้คือ 60 W และตัวเหนี่ยวนำที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.2 H ทำให้ได้ค่า Pf เท่ากับ 0.8 ซึ่งวงจรที่ใช้ในการทดลองได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.28 โดยในรูปที่ 4.29 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 4.30 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการทดลอง เห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกมีผลการตอบสนองที่ล่าช้าต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงทันทีทันใด



รูปที่ 5.28 วงจรกำลังของเอซีช็อปเปอร์ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง

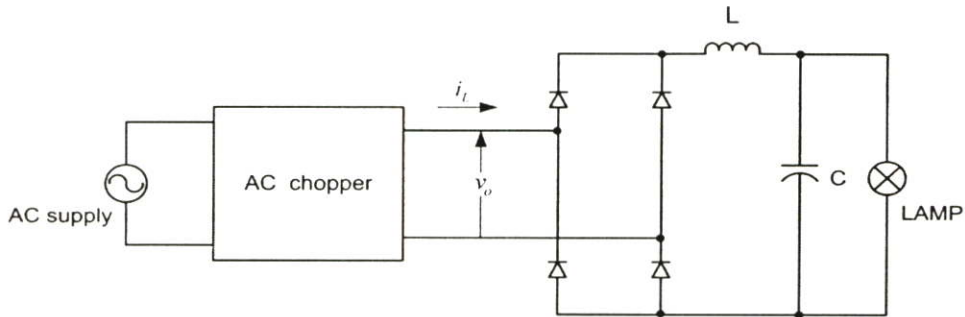


รูปที่ 5.29 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 2 V/div)



รูปที่ 5.30 แสดงผลการทดลองเมื่อค่าของแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 2 V/div)

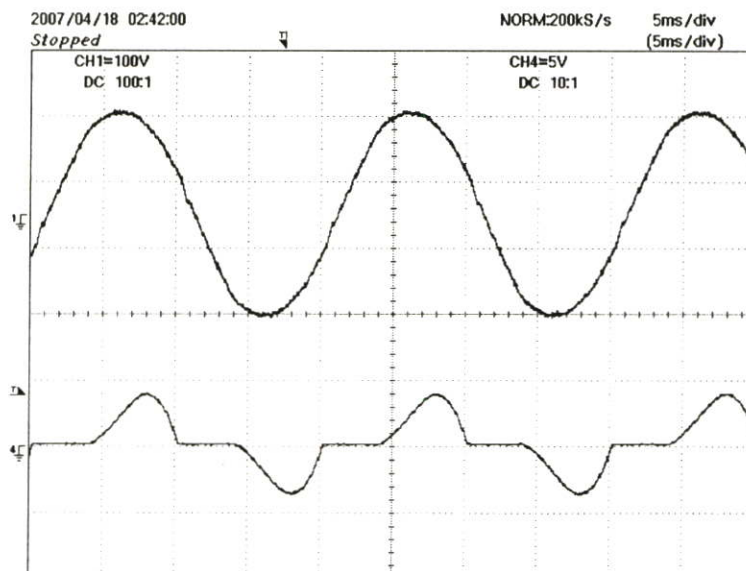
5.3.2 ผลของของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยในการทดลองใช้โหลดที่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น ต่อกันเป็นวงจรตามรูปที่ 5.31 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 และในรูปที่ 5.32 แสดงผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากรูปผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีการควบคุมแรงดัน ค่าแรงดันด้านขาออกมีความผิดเพี้ยน เนื่องจากได้รับผลกระทบจากผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และในรูปที่ 5.33 ได้แสดงรูปของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นที่แรงดันด้านขาออก (เฉพาะฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำจนถึงลำดับที่ 50) ค่า THD เมื่อคำนวณถึงฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 50 มีค่าเท่ากับ 3.97 %



รูปที่ 5.31 วงจรทดลองผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

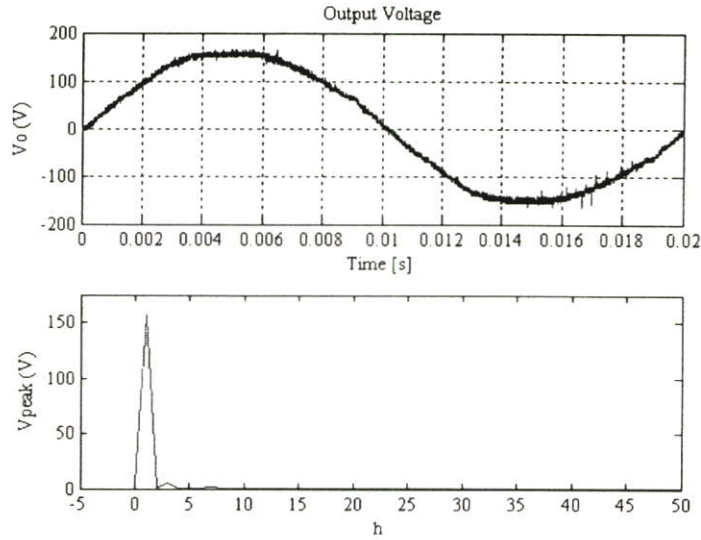
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในการทดลอง

Non-linear load (Diode rectifier with Lamp and Dc reactor)	
Filter capacitor	2600 μ F
Lamp	400 W
DC reactor	15 mH



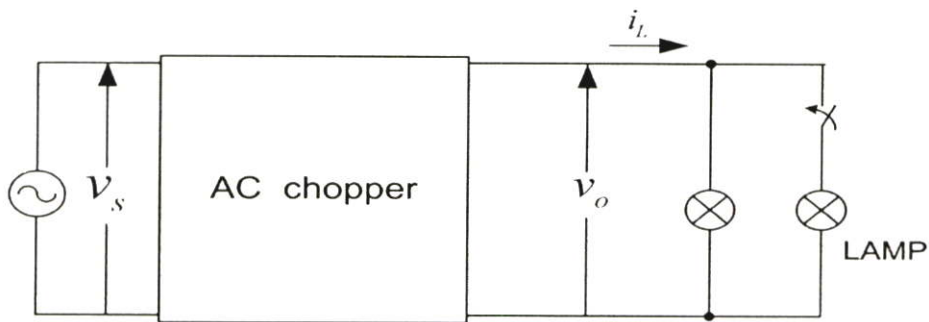
รูปที่ 5.32 แสดงผลของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือกระแสโหลด 5A/div)

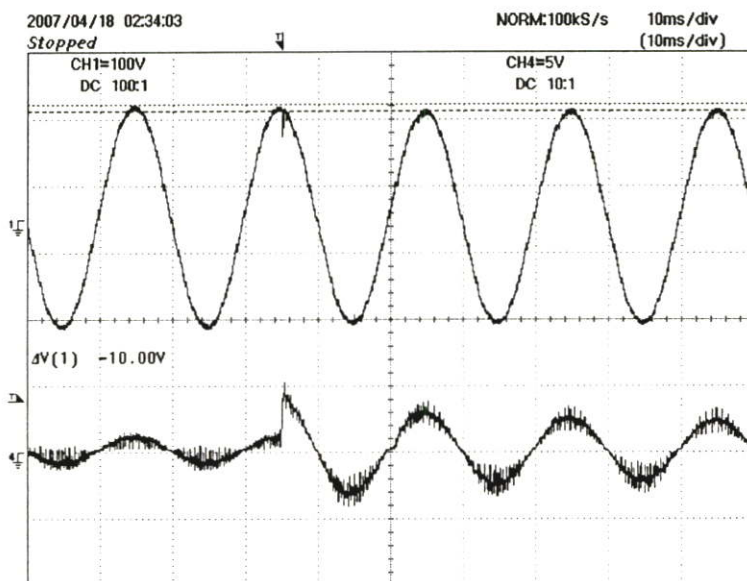


รูปที่ 5.33 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับ

5.3.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยในการทดลองใช้วงจรตามรูปที่ 5.34 โดยในการทดลองให้แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการเพิ่มโหลดหลอดไฟ จาก 200 W เป็น 400 W อย่างทันทีทันใด ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดแสดงไว้ในรูปที่ 5.35 จากรูปผลการทดลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันขาออกได้รับผลกระทบจากการเพิ่มของกระแสโหลด กล่าวคือแรงดันด้านขาออกที่ได้จะตกลงตามการเพิ่มของกระแสโหลด

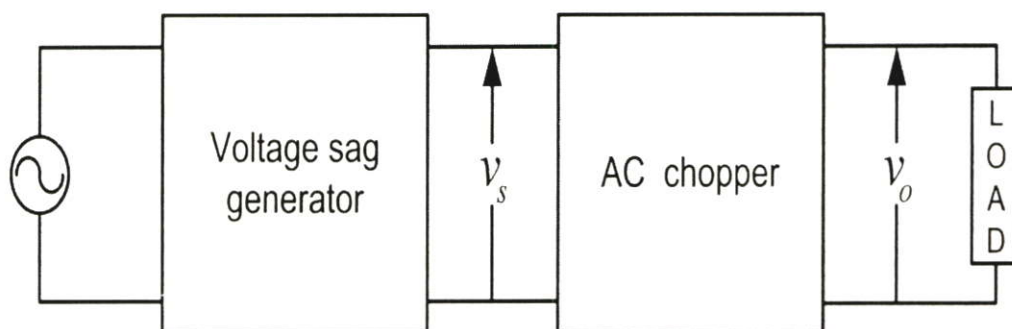


รูปที่ 5.34 วงจรทดลองผลเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

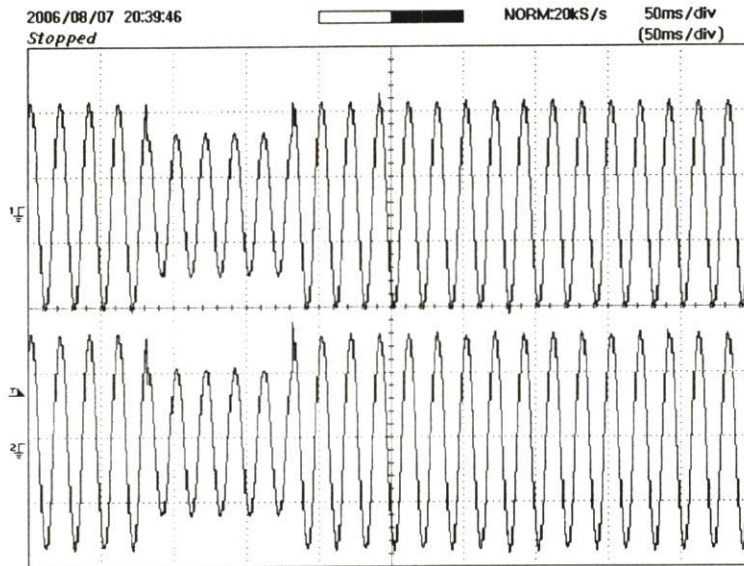


รูปที่ 5.35 แสดงผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือกระแสโหลด 5A/div)

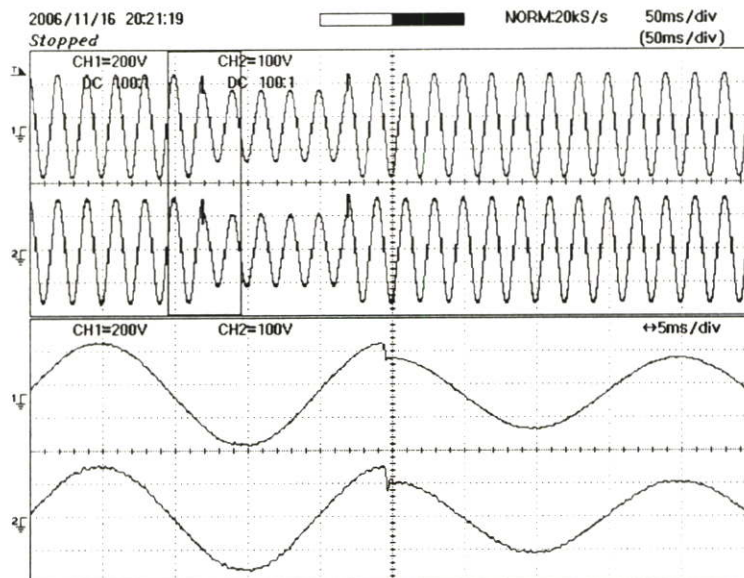
5.3.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด โดยในการทดลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V โหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟ 200 W และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายตกลง 70% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ด้วยเครื่องสร้างแรงดันไฟตกชั่วขณะ ซึ่งต่อกับวงจรเอชซีซีอปเปอร์ตามรูปที่ 5.36 โดยในรูปที่ 5.37 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด และในรูปที่ 5.38 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด จากรูปการทดลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกที่ไม่ได้รับการควบคุมจะตกลงตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แหล่งจ่าย



รูปที่ 5.36 วงจรทดลองผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

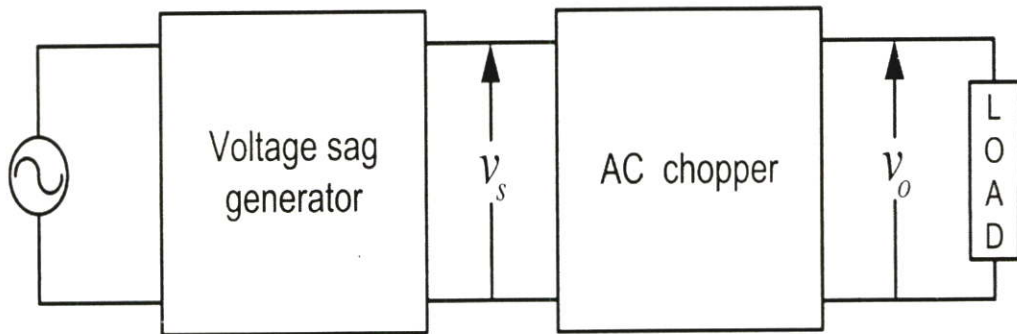


รูปที่ 5.37 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)

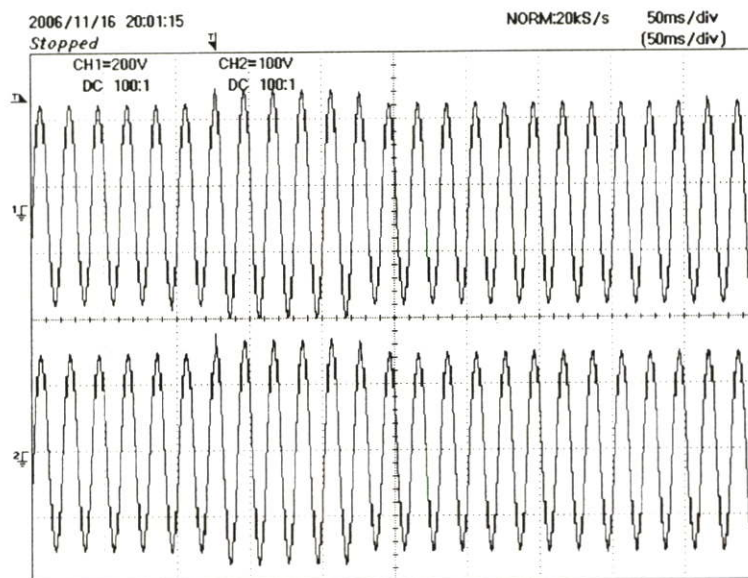


รูปที่ 5.38 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)

5.3.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด โดยในการทดลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V โหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟ 200 W และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายให้เพิ่มขึ้น 15% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ด้วยเครื่องสร้างแรงดันไฟตกชั่วขณะ ซึ่งต่อกับวงจรเอชซีซีอปเปอร์ตามรูปที่ 5.39 โดยในรูปที่ 5.40 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และในรูปที่ 5.41 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด จากรูปการทดลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกที่ไม่ได้รับการควบคุมจะได้รับผลกระทบ กล่าวคือจะเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ของแหล่งจ่าย

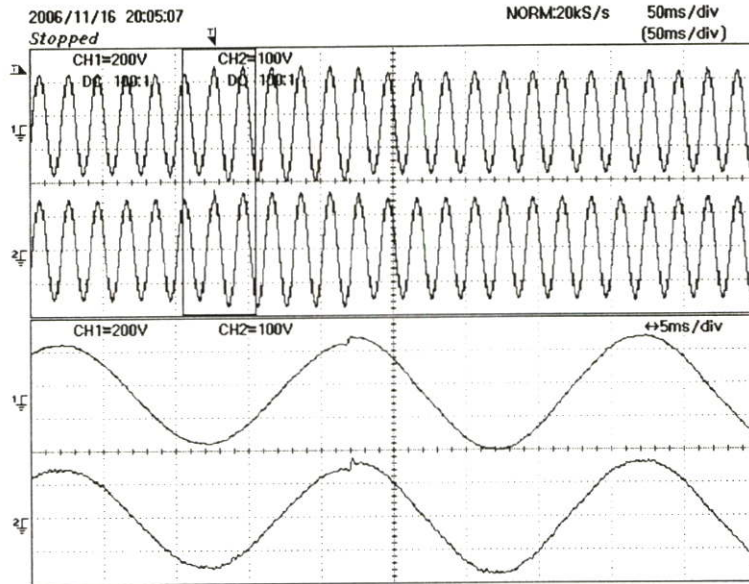


รูปที่ 5.39 วงจรทดลองผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด



รูปที่ 5.40 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

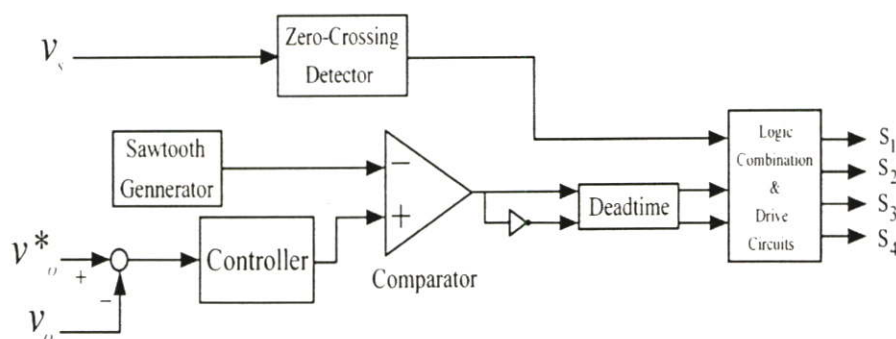
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)



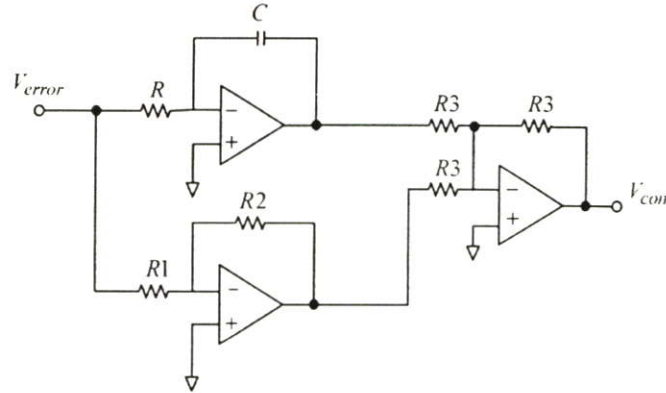
รูปที่ 5.41 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)

5.4 การทดลองการควบคุมแรงดันเอชอีซี้อุปเปอร์แบบใช้ค่าเฉลี่ย

การทดลองการควบคุมแรงดันเอชอีซี้อุปเปอร์แบบใช้ค่าเฉลี่ย ซึ่งในการทดลองได้ใช้วงจรในรูปที่ 5.12 และนำค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.1 มาทำการทดลองและในการทดลองเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมนั้น ได้ใช้ค่าแรงดันด้านขาออกที่เป็นค่าของสัญญาณไซน์ มาทำการป้อนกลับให้กับระบบ โดยผ่านเข้าวงจรตรวจจับแอมพลิจูดแบบความเร็วสูง ทำให้ได้เป็นสัญญาณไฟตรงออกมา เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิงที่เป็นไฟตรง จากนั้นนำค่าความผิดพลาดที่ได้เข้าตัวควบคุมแบบ PI แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย ที่อยู่ใน IC เบอร์ TL494 เพื่อสร้างเป็นสัญญาณ PWM ที่จะนำไปขับเกทของ IGBT โดยรูปที่ 5.42 ได้แสดงรูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งของตัวควบคุมแบบ PI ที่อยู่ในบล็อกของตัวควบคุมได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.43 และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 โดยได้ทำการทดลองต่างๆดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.42 แสดงวงจรทดลองการควบคุมแรงดันเอชอีซี้อุปเปอร์แบบใช้ค่าเฉลี่ย



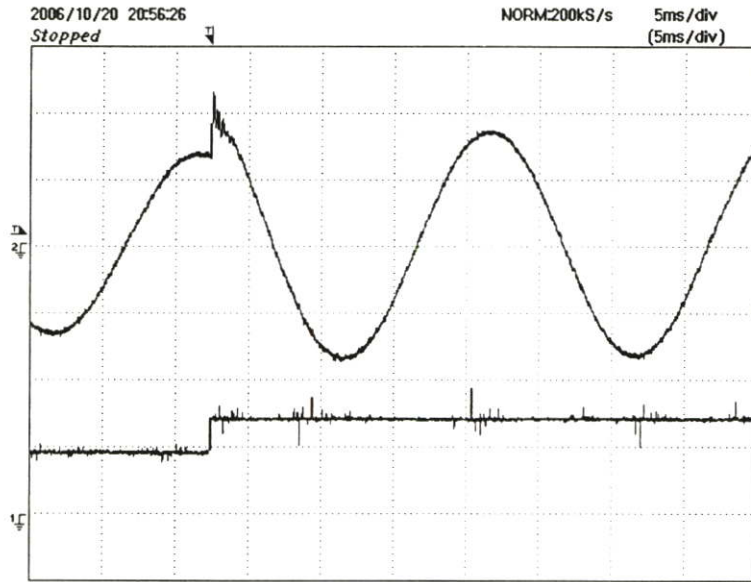
รูปที่ 5.43 ตัวควบคุมแบบ PI

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ที่ใช้ในการทดลอง

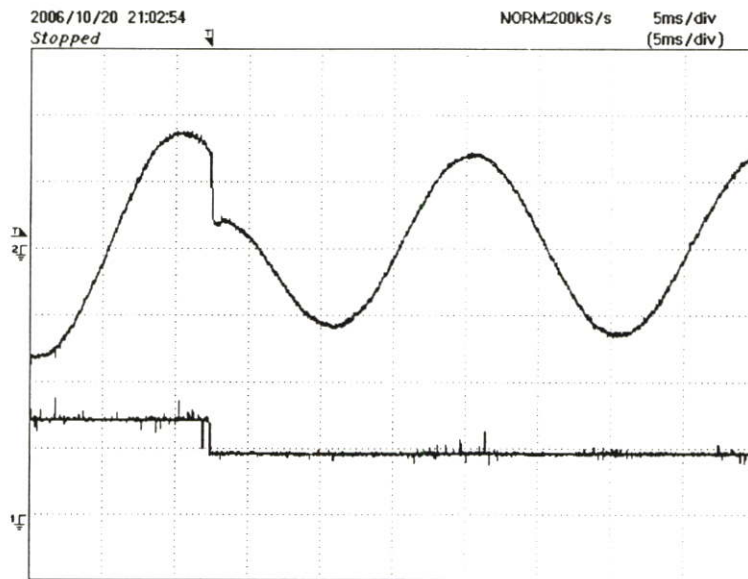
PI controller parameter	
K_i	0.005
K_p	0.3

5.4.1 ผลการตอบสนอง ในการทดลองนี้ โหลดใช้เป็นหลอดไฟ 200 W ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง ให้เพิ่มขึ้นทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกเพิ่มจาก 90V เป็น 120 V อย่างทันทีทันใด ซึ่งในการทดลองได้ใช้วงจรตามรูปที่ 5.24 มาทำการทดลองเพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง ให้ลดลงทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกลดลงจาก 120V เป็น 90V อย่างทันทีทันใด ซึ่งในการทดลองให้ค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใดนี้ได้ใช้วงจรตามรูปที่ 5.25 โดยที่ในส่วนของการตอบสนองได้ทำการทดลองทั้งในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและโหลดที่เป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ

5.4.1.1 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน โดยที่ในการทดลองโหลดที่ใช้เป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งโหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟ 200 W มาทำการทดลองเพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด โดยที่รูปที่ 5.44 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 5.45 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการทดลองเห็นได้ว่าการควบคุมแรงดันแบบใช้ค่าเฉลี่ยนั้น ค่าแรงดันขาออกจะมีผลตอบสนองที่ช้าและมีค่าของโอเวอร์ชูตกับอันเดอร์ชูตที่สูงมาก

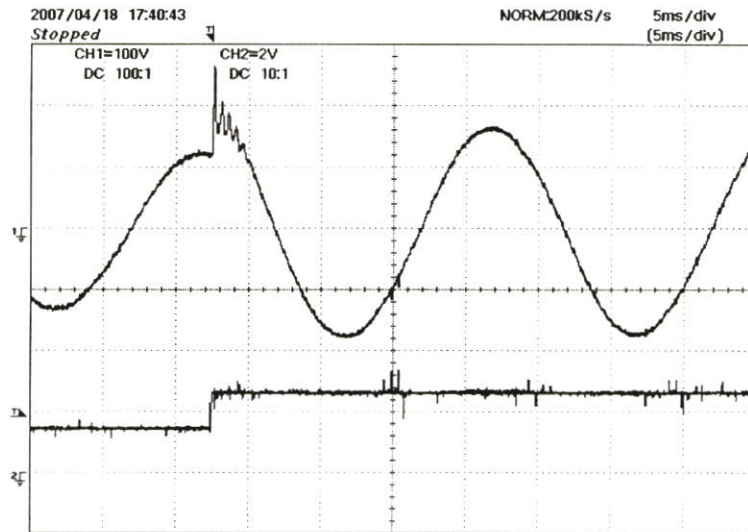


รูปที่ 5.44 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 5 V/div)



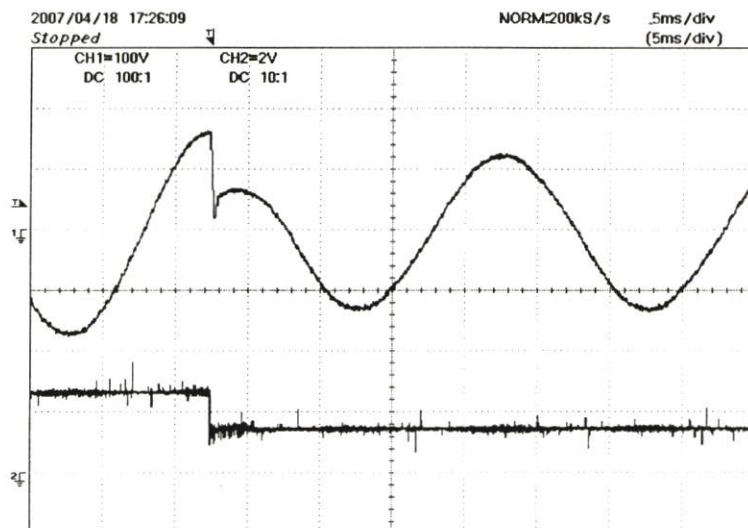
รูปที่ 5.45 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 5 V/div)

5.4.1.2 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ในการทดลอง โหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟกับตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ซึ่งโหลดหลอดไฟที่ใช้คือ 600 W และตัวเหนี่ยวนำที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.2 H ทำให้ได้ค่า Pf เท่ากับ 0.8 ซึ่งวงจรที่ใช้ในการทดลองได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.28 โดยในรูปที่ 5.46 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 5.47 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการทดลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันด้านขาออกมีผลการตอบสนองที่ล่าช้าต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงทันทีทันใด อีกทั้งยังมีค่าของโอเวอร์ชูตกับอันเดอร์ชูตที่สูงมาก



รูปที่ 5.46 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

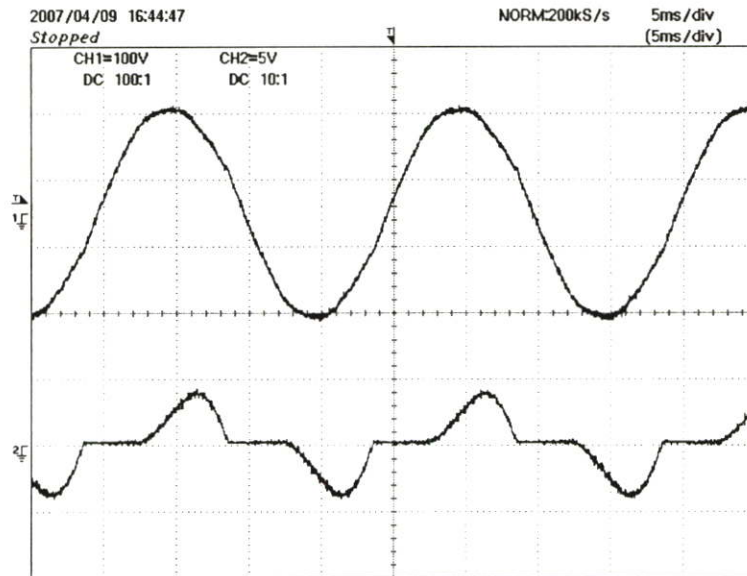
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 5 V/div)



รูปที่ 5.47 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

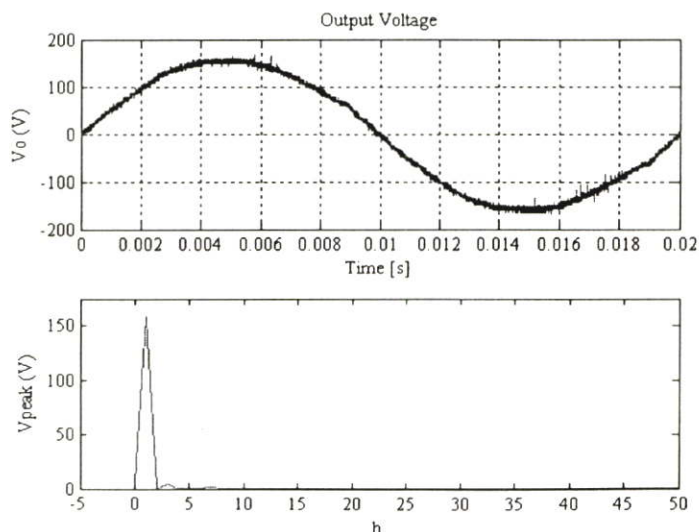
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 5 V/div)

5.4.2 ผลของของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยในการทดลองใช้โหลดที่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น ต่อกันเป็นวงจรตามรูปที่ 5.31 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.48 แสดงผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากผลการทดลองเห็นได้ว่าค่าของแรงดันขาออกมีความผิดเพี้ยน เนื่องจากได้รับผลกระทบจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และในรูปที่ 5.49 ได้แสดงรูปของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นที่แรงดันด้านขาออก (เฉพาะฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำจนถึงลำดับที่ 50) ค่า THD เมื่อคำนวณถึงฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 500 มีค่าเท่ากับ 3.32 % ซึ่งค่า THD ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่า THD ของแรงดันด้านขาออก เมื่อไม่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน



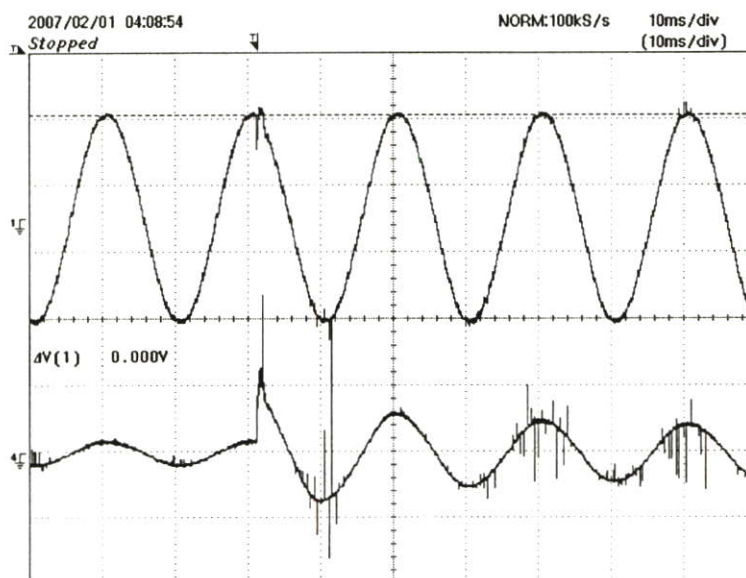
รูปที่ 5.48 แสดงผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือกระแสโหลด 5A/div)



รูปที่ 5.49 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบใช้ค่าแรงดันเฉลี่ย

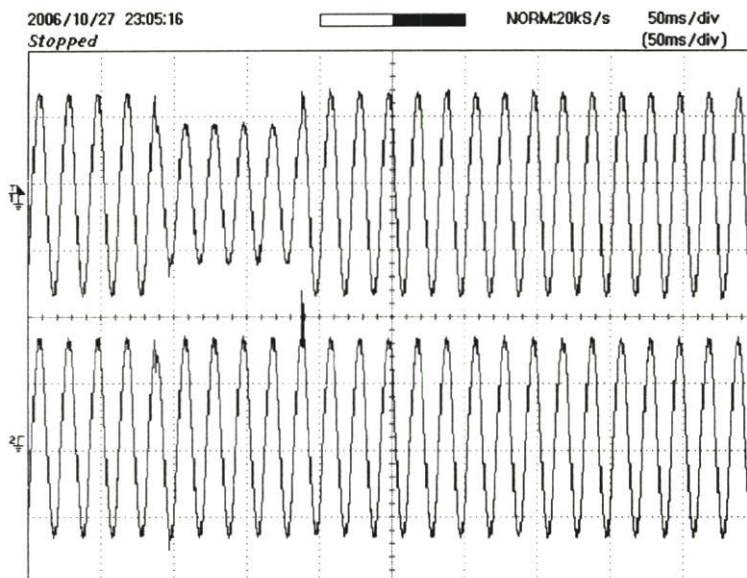
5.4.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยในการทดลองให้แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการเพิ่มโหลดหลอดไฟจาก 200 W เป็น 400 W อย่างทันทีทันใด โดยได้ต่อเป็นวงจรทดลองตามรูปที่ 5.34 และรูปที่ 5.50 แสดงผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการควบคุมแรงดันด้วยค่าเฉลี่ย ค่าของแรงดันด้านขาออกจะไม่ตกตามการเพิ่มของกระแสโหลด แต่ค่าของแรงดันด้านขาออกจะได้รับผลกระทบตรงจุดเริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของกระแสโหลด



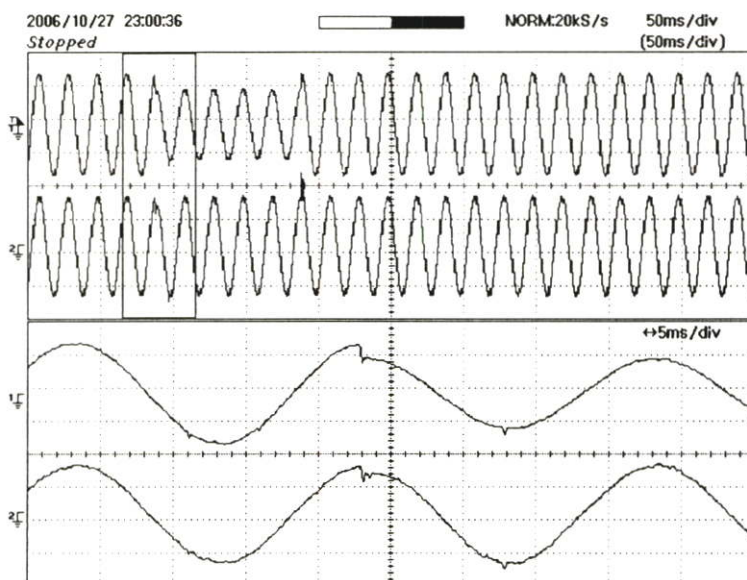
รูปที่ 5.50 แสดงผลเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือกระแสโหลด 5A/div)

5.4.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด โดยในการทดลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายตกลง 70% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ด้วยเครื่องสร้างแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งได้ต่อเป็นวงจรตามรูปที่ 5.36 โดยรูปที่ 5.51 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด และรูปที่ 5.52 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด จากรูปผลการทดลองเห็นได้ว่าการที่แหล่งจ่ายตกลง แรงดันด้านขาออกจะได้รับผลกระทบคือแรงดันจะตกตรงช่วงแรกการตกของแรงดันที่แหล่งจ่าย แต่แรงดันจะสูงขึ้นจนถึงจุดที่ได้อ้างอิงไว้เมื่อเวลาผ่านไป และในช่วงสุดท้ายที่มีการตกของแรงดันที่แหล่งจ่าย จะมีผลของโอเวอร์ชูตที่สูงมากเกิดขึ้นที่แรงดันด้านขาออก

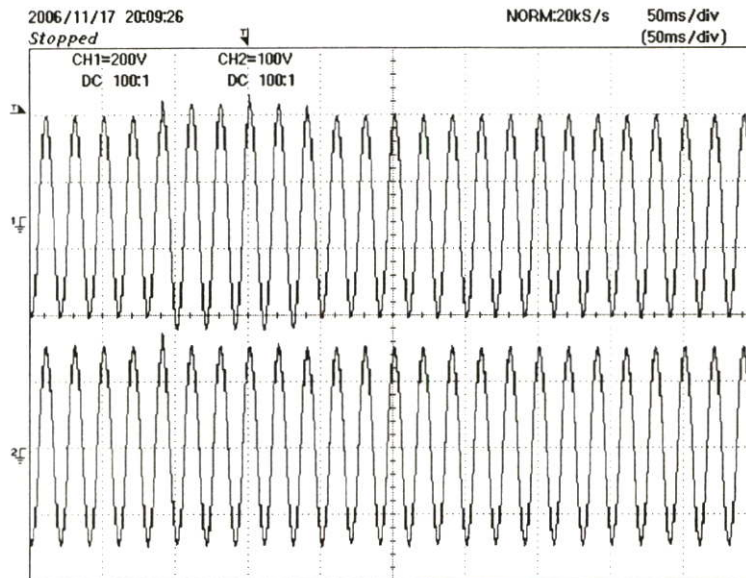


รูปที่ 5.51 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)



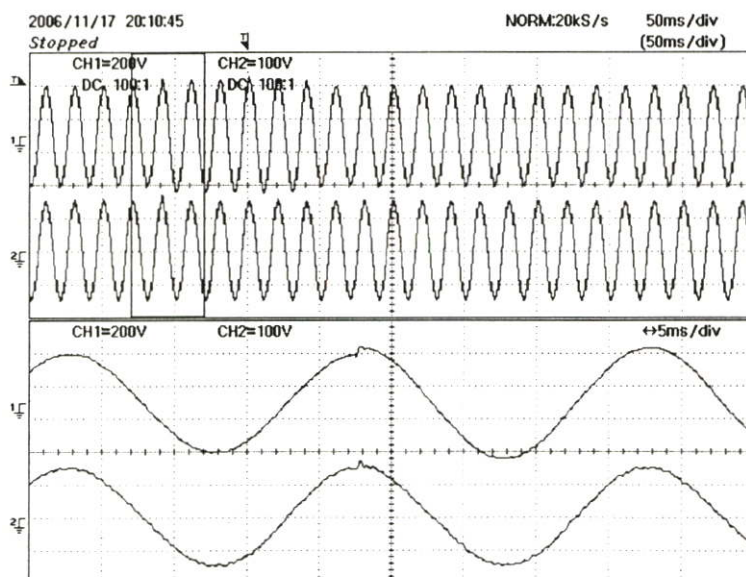
รูปที่ 5.52 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)

5.4.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด โดยในการทดลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น 15% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ด้วยเครื่องสร้างแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งได้ต่อเป็นวงจรตามรูปที่ 5.39 โดยรูปที่ 5.53 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และรูปที่ 5.54 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด จากรูปผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น แรงดันด้านขาออกจะได้รับผลกระทบคือแรงดันจะเพิ่มขึ้นตรงช่วงแรกการเพิ่มของแรงดันที่แหล่งจ่าย แต่แรงดันจะปรับลดลงจนถึงจุดที่ได้อ้างอิงไว้เมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 5.53 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)

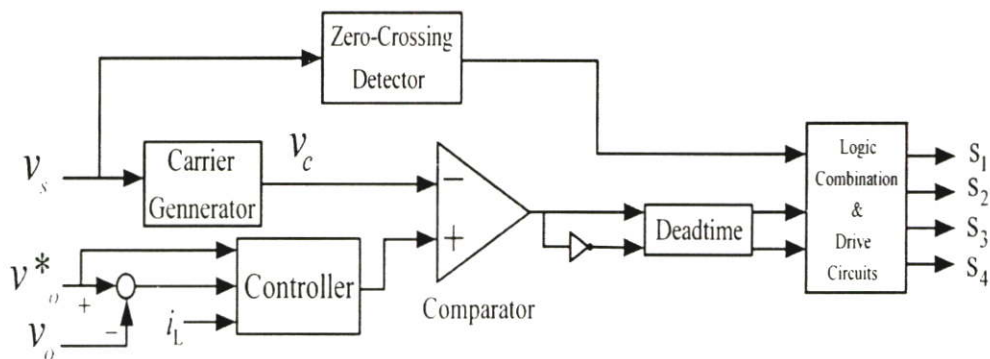


รูปที่ 5.54 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

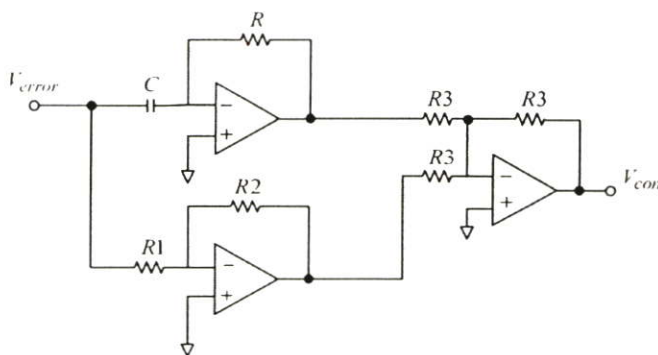
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)

5.5 การทดลองการควบคุมแรงดันเอชซีซีโอเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ

การทดลองการควบคุมแรงดันเอชซีซีโอเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ โดยได้ใช้วงจรในรูปที่ 5.12 และค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.1 มาใช้ในการทดลองและในการทดลองได้นำค่ากระแสและแรงดันของโหลดที่เป็นสัญญาณไซน์ ทำการป้อนกลับให้กับระบบ โดยที่จะนำค่าของแรงดันที่โหลดมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิงที่เป็นไซน์ แล้วนำค่าความแตกต่างของแรงดันมาเข้าตัวควบคุมแบบ PD จากนั้นนำค่าสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุม มาเปรียบเทียบกับสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อย เพื่อสร้างเป็นสัญญาณ PWM ที่จะนำไปขับเกทของ IGBT โดยรูปที่ 5.55 เป็นรูปวงจรสร้างสัญญาณที่ใช้ทดลองและในรูปที่ 5.56 เป็นรูปของตัวควบคุมแบบ PD ที่อยู่ในบล็อกการควบคุม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PD ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 ได้ทำการทดลองต่างๆดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.55 แสดงวงจรทดลองการควบคุมแรงดันเอชซีซีโอเปอร์แบบใช้ค่าชั่วขณะ



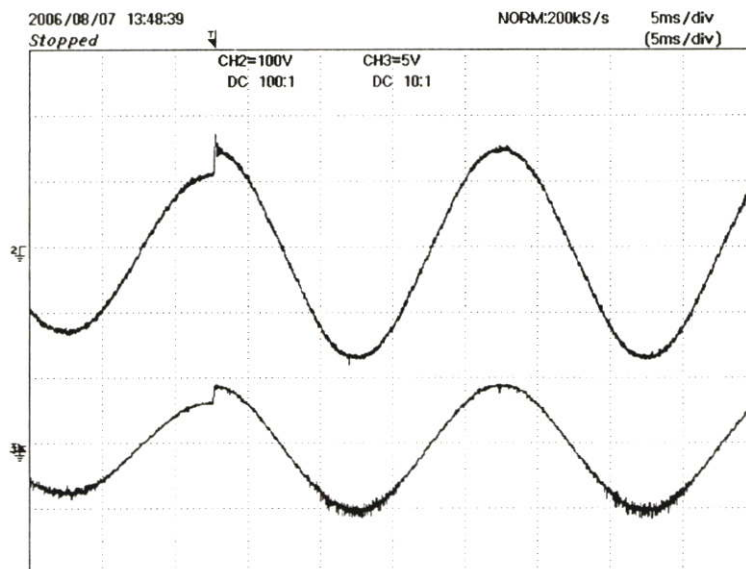
รูปที่ 5.56 ตัวควบคุมแบบ PD

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ในการทดลอง

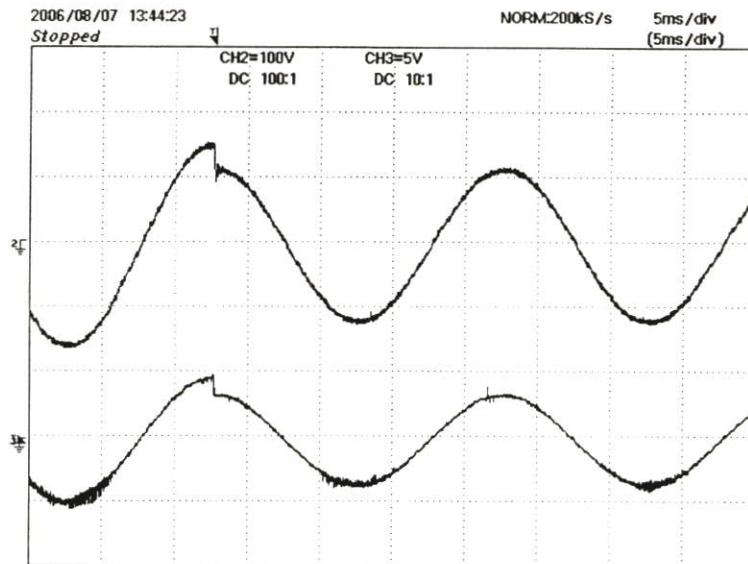
PD controller parameter	
K_D	0.00025
K_p	3.6

การเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง ให้เพิ่มขึ้นทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกเพิ่มจาก 90V เป็น 120 V อย่างทันทีทันใด ซึ่งในการทดลองได้ใช้วงจรตามรูปที่ 5.24 มาทำการทดลองเพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง ให้ลดลงทันทีทันใด เพื่อให้แรงดันด้านขาออกลดลงจาก 120V เป็น 90V อย่างทันทีทันใด ซึ่งในการทดลองให้ลดลงทันทีทันใดนี้ ได้ใช้วงจรตามรูปที่ 5.25 มาทำการทดลองเพื่อให้ค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด แต่ในการทดลองการควบคุมแรงดันชั่วขณะนี้ค่าของแรงดันที่เข้าขา 1 ของ IC เบอร์ MPY634 จะเป็นแรงดันไฟสลับ โดยที่ในส่วนของผลการตอบสนองได้ทำการทดลองทั้งในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและโหลดที่เป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ

5.5.1.1 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทาน โดยที่ในการทดลองโหลดที่ใช้เป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งโหลดที่ใช้เป็นหลอดไฟ 200 W โดยที่รูปที่ 5.57 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 5.58 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการทดลองเห็นได้ว่า เมื่อใช้การควบคุมด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ ค่าของแรงดันด้านขาออกจะมีผลตอบสนองที่รวดเร็วตามการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันอ้างอิง อีกทั้งยังมีค่าของโอเวอร์ชูตและอันเดอร์ชูตที่ต่ำ

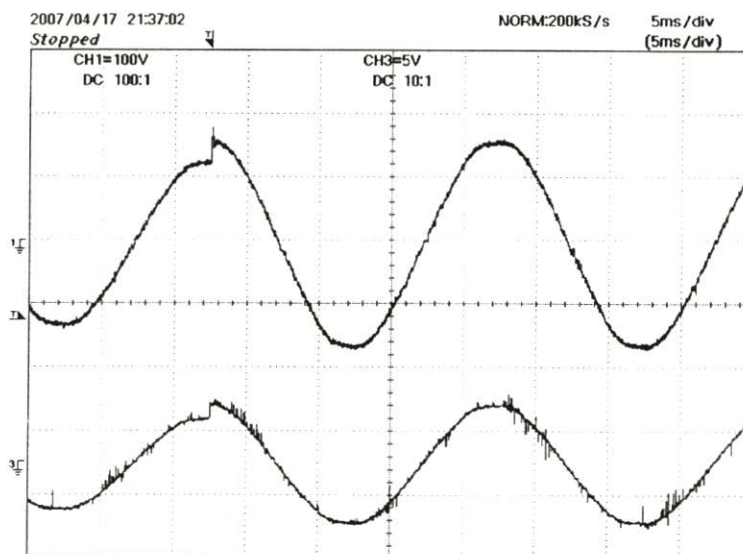


รูปที่ 5.57 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด (เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 5 V/div)

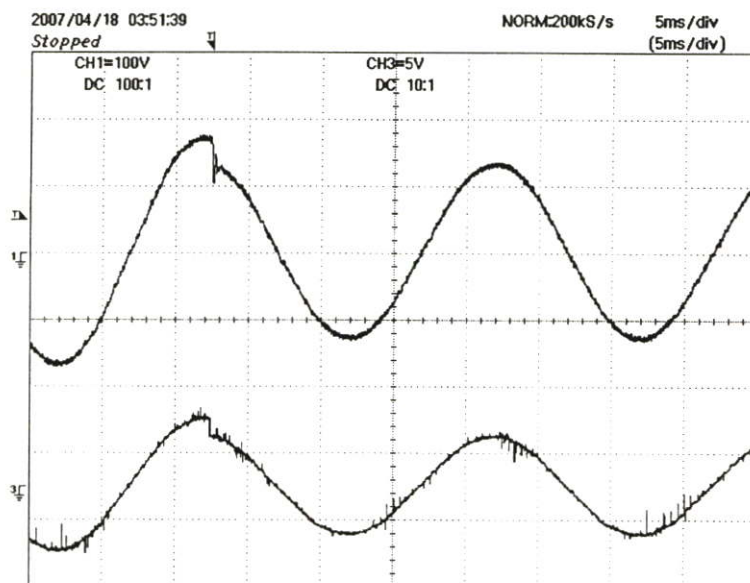


รูปที่ 5.58 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 5 V/div)

5.5.1.2 ผลการตอบสนองในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ในการทดลอง โหลดที่ใช้เป็นโหลดไฟกับตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ซึ่งโหลดหลอดไฟที่ใช้คือ 600 W และตัวเหนี่ยวนำที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.2 H จะทำให้ได้ค่า Pf เท่ากับ 0.8 ซึ่งวงจรที่ใช้ในการทดลองได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.17 โดยในรูปที่ 5.59 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใดและรูปที่ 5.60 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด จากผลการทดลองเห็นได้ว่า เมื่อใช้การควบคุมด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ แรงดันด้านขาออกจะมีผลตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันอ้างอิง อีกทั้งค่าของโอเวอร์ชูตที่ต่ำ



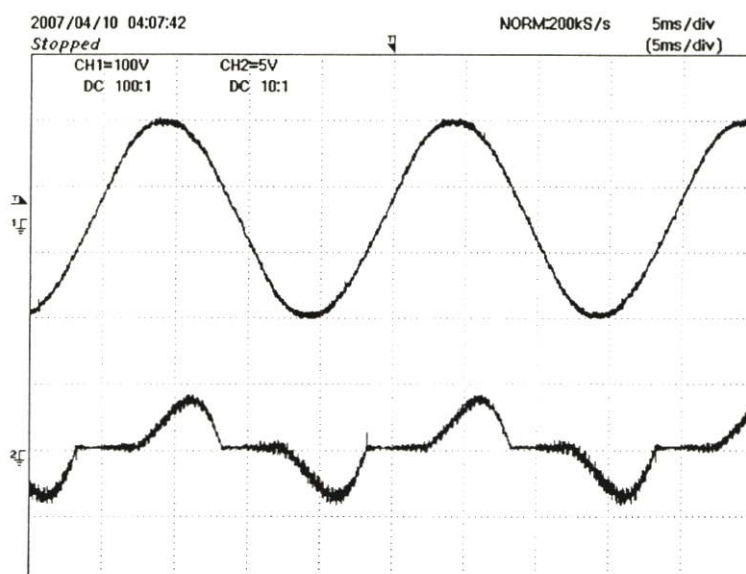
รูปที่ 5.59 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 5 V/div)



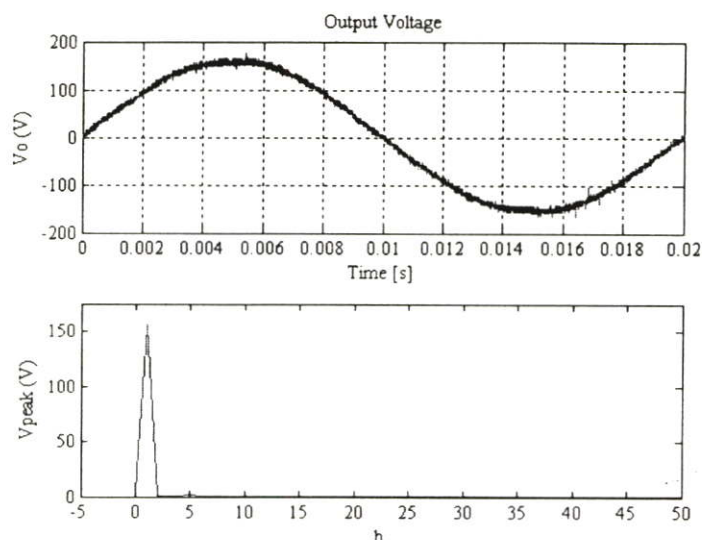
รูปที่ 5.60 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่าแรงดันอ้างอิงลดลงทันทีทันใด ในกรณีที่โหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือแรงดันอ้างอิง 5 V/div)

5.5.2 ผลของของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยในการทดลองใช้โหลดที่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น ต่อกันเป็นวงจรรูปที่ 5.31 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.61 แสดงผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากผลการทดลองรูปคลื่นของแรงดันด้านขาออกยังมีคุณภาพใกล้เคียงไซน์ เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในรูปที่ 5.62 ได้แสดงรูปของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นที่แรงดันด้านขาออก (เฉพาะฮาร์โมนิกส์ลำดับต่ำ จนถึงลำดับที่ 50) ค่า THD เมื่อคำนวณถึงฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 500 มีค่าเท่ากับ 2.25 % ซึ่งน้อยกว่าค่าของ THD ที่ได้จากการควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับ และการควบคุมด้วยค่าเฉลี่ย

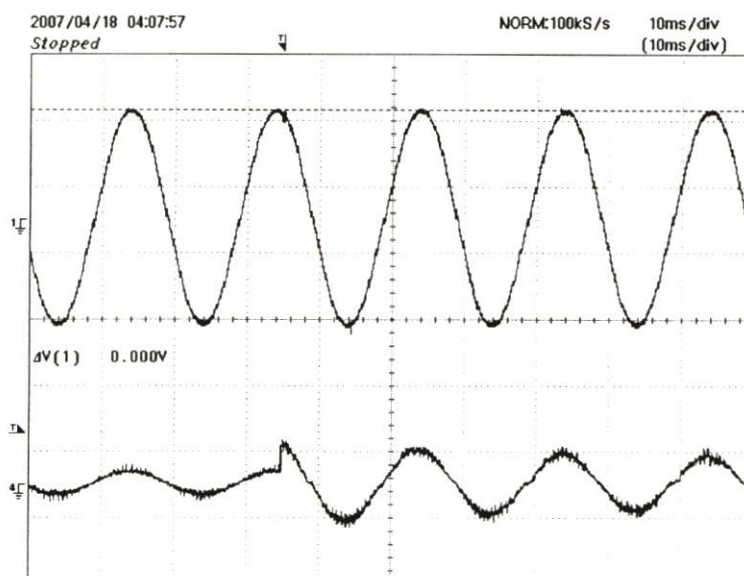


รูปที่ 5.61 แสดงผลของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 5.62 แสดงสเปกตรัมของแรงดันด้านขาออก เมื่อใช้การควบคุมแบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ

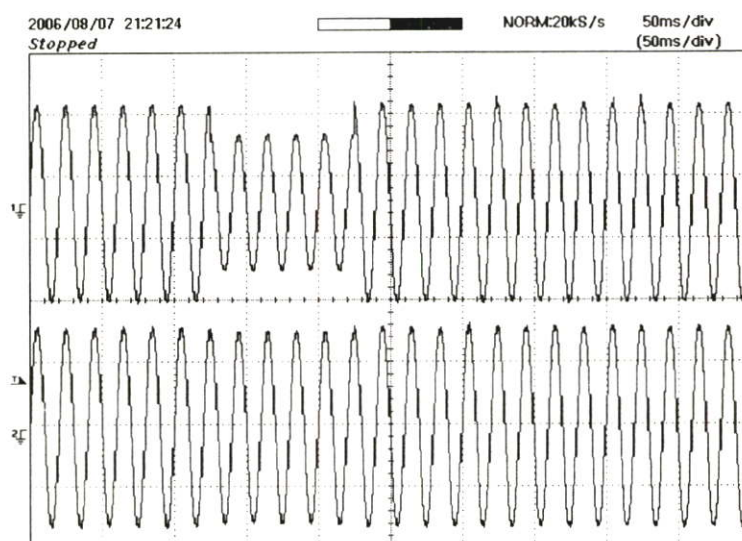
5.5.3 ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยในการทดลองให้แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการเพิ่มโหลดหลอดไฟจาก 200 W เป็น 400 W อย่างทันทีทันใด โดยได้ต่อเป็นวงจรทดลองตามรูปที่ 5.34 และรูปที่ 5.63 แสดงผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการควบคุมแรงดันด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ ค่าของแรงดันด้านขาออกจะไม่ตกตามการเพิ่มของกระแสโหลด อีกทั้งค่าของแรงดันขาออกจะไม่ได้รับผลกระทบตรงจุดเริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของกระแสโหลด



รูปที่ 5.63 แสดงผลเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

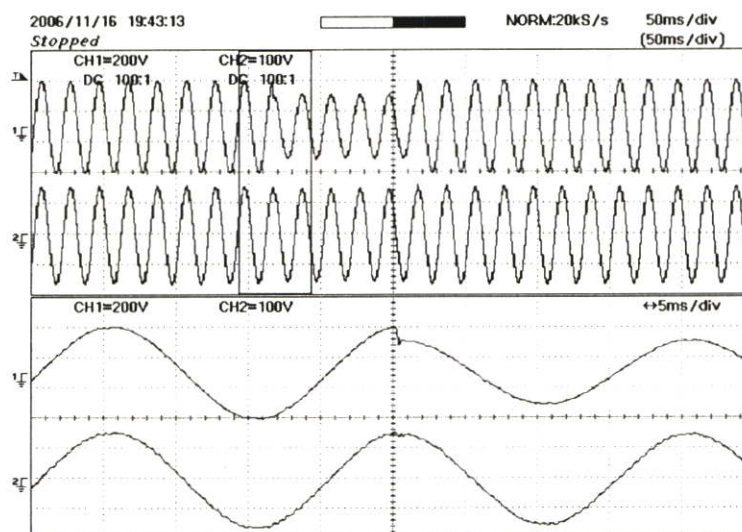
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาออก 100V/div เส้นล่างคือกระแสโหลด 5A/div)

5.5.4 ผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด โดยในการทดลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายตกลง 70% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ด้วยเครื่องสร้างแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งได้ต่อเป็นวงจรตามรูปที่ 5.36 โดยรูปที่ 5.64 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด และรูปที่ 5.65 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด จากรูปผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายตกลง แรงดันด้านขาออกจะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่แหล่งจ่าย กล่าวคือไม่ตกลงตามแรงดันที่แหล่งจ่าย อีกทั้งตรงจุดสุดท้ายที่มีการตก แรงดันด้านขาออกที่ได้ยังไม่มีผลของโอเวอร์ชูตเกิดขึ้น



รูปที่ 5.64 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

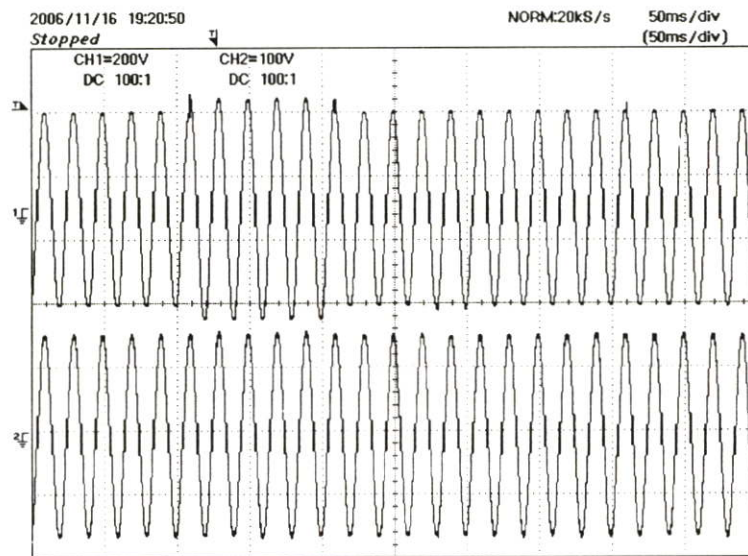
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)



รูปที่ 5.65 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันลดลงทันทีทันใด

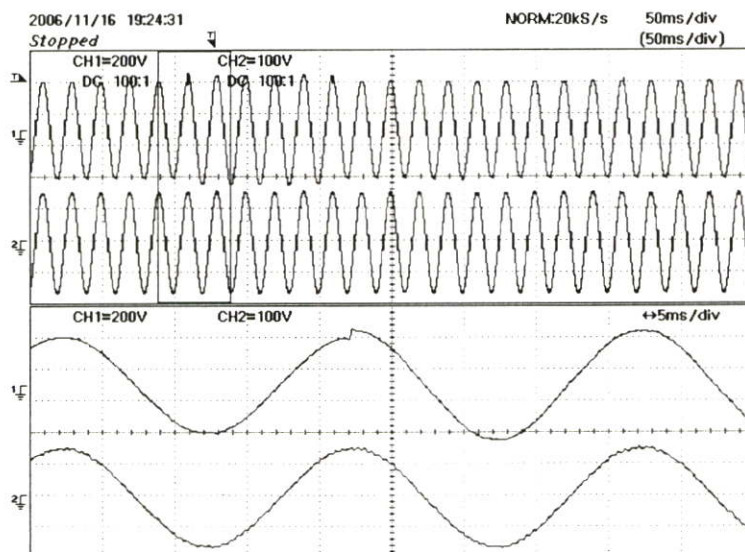
(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)

5.5.5 ผลเมื่อแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทันทีทันใด โดยในการทดลองให้แรงดันด้านขาเข้า 220 V แรงดันด้านขาออกเป็น 110 V และทำการทดลองให้แรงดันที่แหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น 15% เป็นเวลา 5 cycle อย่างทันทีทันใด ด้วยเครื่องสร้างแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งได้ต่อเป็นวงจรตามรูปที่ 5.39 โดยรูปที่ 5.66 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด และรูปที่ 5.67 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด จากรูปผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันที่แหล่งจ่ายเพิ่มขึ้น แรงดันด้านขาออกจะไม่ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มของแรงดันที่แหล่งจ่าย กล่าวคือแรงดันด้านขาออกจะไม่เพิ่มตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แหล่งจ่าย



รูปที่ 5.66 แสดงผลเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)



รูปที่ 5.67 แสดงรูปขยายเมื่อแหล่งจ่ายมีแรงดันเพิ่มขึ้นทันทีทันใด

(เส้นบนคือแรงดันด้านขาเข้า 200V/div เส้นล่างคือแรงดันด้านขาออก 100V/div)

5.6 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองการควบคุมแรงดันของเอซีซีอ็อปเปอร์ทั้ง 3 แบบ จะเห็นได้ว่าในส่วนของผลการตอบสนอง การควบคุมแบบชั่วขณะจะให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าและแม่นยำ ซึ่งจะต่างกับในส่วนของการควบคุมที่ไม่มีการป้อนกลับและการควบคุมแบบใช้ค่าเฉลี่ย โดยที่การควบคุมทั้ง 2 แบบนี้ จะมีผลของตอบสนองที่ล่าช้า อีกทั้งยังมีผลของโอเวอร์ชูตและอันเดอร์ชูตเกิดขึ้น เช่นเดียวกับผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น การควบคุมที่ไม่มีการป้อนกลับและการควบคุมแบบใช้ค่าเฉลี่ย จะให้แรงดันด้านขาออกที่ผิดเพี้ยนไม่เป็นไซน์ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นแต่การควบคุมแบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะแรงดันด้านขาออกที่ได้จะไม่ได้รับผลกระทบจากผลของโหลดที่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น ในส่วนของผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดทันทีทันใด ค่าของแรงดันด้านขาออกของการควบคุมแบบที่ไม่มีการป้อนกลับ จะตกลงตามการเพิ่มของกระแสโหลด แต่ค่าของแรงดันด้านขาออกของการควบคุมแบบใช้ค่าเฉลี่ยและการควบคุมแบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ จะไม่ตกลงตามการเพิ่มของกระแสโหลด และในส่วนของผลการทดลองที่ค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายลดลงหรือเพิ่มขึ้นทันทีทันใด แรงดันด้านขาออกของการควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับและการควบคุมแบบที่ใช้ค่าแรงดันเฉลี่ย จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แหล่งจ่าย แต่แรงดันด้านขาออกที่ได้รับการควบคุมแบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ จะมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่แหล่งจ่าย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

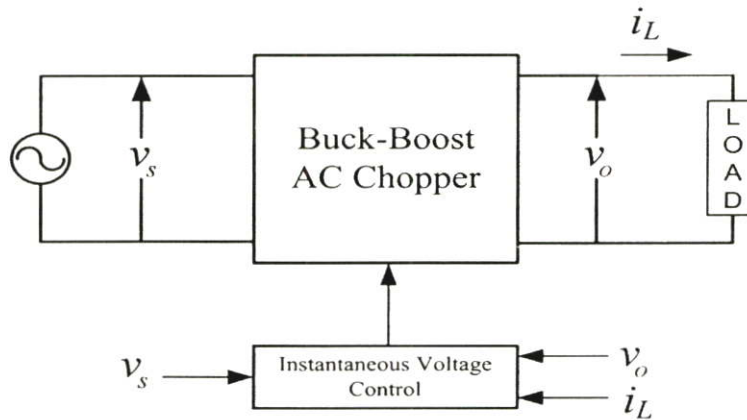
6.1 สรุปผลการวิจัย

วงจรเอซีซี้อปเปอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นวงจรเอซีซี้อปเปอร์แบบเฟสเดียวที่ทำการแปลงจากไฟสลับเป็นไฟสลับ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากมาย เช่น นำไปใช้เป็นเครื่องสร้างแรงดันไฟตกชั่วขณะ นำไปควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ นำไปใช้เป็นเครื่องรักษาระดับแรงดันหรืออาจจะนำไปใช้แทนอโต้ทรานส์ฟอร์มเมอร์ เป็นต้น วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเอซีซี้อปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะ (Instantaneous-value voltage control) กล่าวคือ โดยทั่วไปการควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอซีซี้อปเปอร์นั้น จะนำค่าของสัญญาณไซน์ด้านขาออกมาทำการแปลงเป็นสัญญาณไฟตรง ซึ่งในการใช้สัญญาณไฟตรงมาทำการป้อนกลับระบบแบบที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้น จะทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่ช้า ค่าแรงดันป้อนกลับซึ่งเป็นคิซี ไม่ได้สะท้อนคุณภาพของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกที่ได้ ทำให้เมื่อนำมาใช้กับโหลดที่กระแสไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวคือแรงดันด้านขาออกที่ได้จะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ และในการที่สัญญาณฟันเลื่อยมีแอมพลิจูดคงที่ จะทำให้แรงดันด้านขาออกได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของแรงดันด้านขาเข้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการแก้ไขปัญหานี้โดยนำค่าของสัญญาณไซน์มาทำการป้อนกลับให้กับระบบ โดยที่ไม่ต้องทำการแปลงให้เป็นสัญญาณไฟตรง แต่การที่จะนำสัญญาณไซน์มาทำการป้อนกลับนั้น จำเป็นจะต้องสร้างสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยที่มีค่าของแอมพลิจูดแปรผันตามสัญญาณไซน์ของแหล่งจ่าย และการที่นำค่าของสัญญาณไซน์มาสร้างเป็นสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยนั้น มีข้อดีก็คือค่าแอมพลิจูดของสัญญาณแคเรียร์ฟันเลื่อยจะแปรผันตามแอมพลิจูดของแหล่งจ่ายไฟเอซี ดังนั้นแรงดันด้านขาออกจะได้รับการปรับค่าโดยอัตโนมัติตามการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่าย อีกทั้งค่ากระแสและแรงดันชั่วขณะของโหลดสามารถนำมาใช้ในระบบควบคุม ซึ่งทำให้การควบคุมแรงดันด้านขาออกมีความรวดเร็วและแม่นยำ โดยที่การควบคุมแรงดันชั่วขณะขณะนี้ได้มีการใช้เทคนิคของการป้อนกลับและป้อนไปข้างหน้า อีกทั้งยังได้ทำการโมเดลโหลดเป็นแบบแหล่งจ่ายกระแสรบกวน ดังนั้นเมื่อนำค่าของกระแสโหลดที่เป็นกระแสรบกวนของระบบมาป้อนกลับให้กับระบบ ค่าของกระแสรบกวนจะถูกหักล้างไป

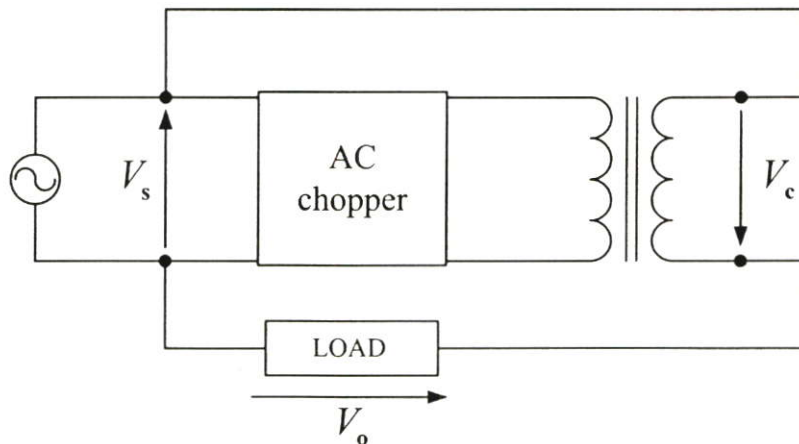
ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอซีซี้อปเปอร์ในรูปแบบต่างๆ กล่าวคือ มีการควบคุมแรงดันของเอซีซี้อปเปอร์แบบไม่มีการป้อนกลับ การควบคุมแรงดันของเอซีซี้อปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันเฉลี่ย และการควบคุมแรงดันของเอซีซี้อปเปอร์แบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะที่น่าเสนอ มาทำการเปรียบเทียบกัน โดยในการเปรียบเทียบนี้ได้ทำการเปรียบเทียบในผลของการตอบสนอง ผลของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ผลเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด และผลเมื่อ

แหล่งจ่ายมีแรงดันเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ซึ่งจากผลการจำลองและการทดลองจะเห็นได้ว่าการควบคุมแรงดันแบบใช้ค่าแรงดันชั่วขณะนั้น จะให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วกว่าแรงดันด้านขาออกของเอชซีซีโอปเปอร์ไม่ได้รับผลกระทบทั้งจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของกระแสโหลด อีกทั้งค่าของแรงดันขาออกไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของแรงดันด้านขาเข้า ทั้งจากแรงดันที่ขาเข้าที่ตกและเพิ่มขึ้นทันทีทันใด จึงเป็นข้อยืนยันได้ว่าการควบคุมค่าแรงดันชั่วขณะที่น่าเสนอไปในวิทยานิพนธ์ สามารถนำมาใช้งานได้จริง สามารถนำไปเพิ่มสมรรถนะให้ตัวอุปกรณ์ได้

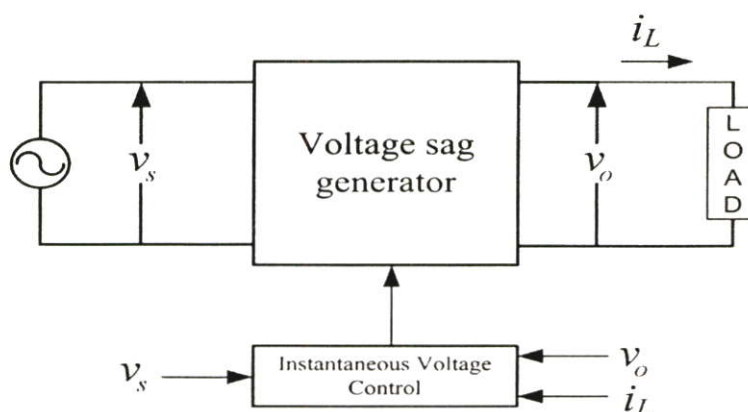
ซึ่งการควบคุมแรงดันชั่วขณะนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรบัสกึ่งเอชซีซีโอปเปอร์ได้ตาม ในรูปที่ 6.1 หรืออาจนำไปควบคุมวงจรเอชซีซีโอปเปอร์แบบกลับขั้วได้ ซึ่งต่ออยู่กับหม้อแปลง โดยที่หม้อแปลงต่ออนุกรมกับโหลดและแหล่งจ่ายดังแสดงในรูปที่ 6.2 ซึ่งทั้งวงจรบัสกึ่งเอชซีซีโอปเปอร์และวงจรเอชซีซีโอปเปอร์แบบกลับขั้วได้ สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแบบอัตโนมัติได้ หรืออาจนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องสร้างแรงดัน ไฟตกชั่วขณะ ดังแสดงรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.1 Block diagram ของเครื่องรักษาระดับแรงดันแบบใช้วงจรบัสกึ่งเอชซีซีโอปเปอร์



รูปที่ 6.2 Block diagram ของเครื่องรักษาระดับแรงดันแบบใช้วงจรเอชซีซีโอปเปอร์แบบกลับขั้วได้



รูปที่ 6.3 Block diagram ของเครื่องสร้างแรงดันไฟตกชั่วขณะ

6.2 ข้อเสนอแนะ

ควรจะใช้อุปกรณ์ประมวลผลอย่างเช่น DSP (Digital signal processing) หรือ DSC (Digital signal Control) ซึ่งเป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ที่มีความเร็วในการที่จะใช้ประมวลผลทางคณิตศาสตร์สูง มาทำการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อนำสัญญาณที่มาสสร้างเป็นตัวควบคุมแทนวงจรออปแอมป์ อีกทั้งภายในของ DSP และ DSC ยังมีโมดูลของชุดสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม ชุดสร้างสัญญาณประวิงเวลา ทำให้ช่วยเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบ อีกทั้งยังลดขนาดของวงจรควบคุมแรงดันเอชซีซีอปเปอร์ และควรจะมีอุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็กที่รบกวนที่ออกจากตัวเอชซีซีอปเปอร์ เนื่องจากเอชซีซีอปเปอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสวิตซ์ที่ความถี่สูง ซึ่งอาจไปรบกวนการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงได้


บรรณานุกรม

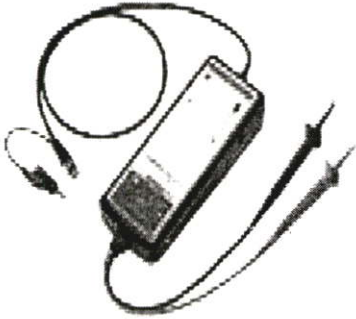
- [1] B.D. Min and B.H. Kwon, "Novel PWM line conditioner with fast output voltage control", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 145, No. 2, March (1998)
- [2] B H Kwon, G Y Jeong, S H Han, and D H Lee, "Novel line conditioner with voltage up/down capability", IEEE Trans. Ind .Electron, vol. 49, pp 1100-1119, October 2002
- [3] B. W. Williams, "Asymmetrically modulated AC choppers," IEEE Trans. Ind.Electron.,Vol. IE-29, pp. 181-185, Aug. (1982)
- [4] B.H. Wong, J. H. Youm, and J. H. Choi. "Automatic voltage regulator with fast dynamic speed", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 6, No. 2, March (1999)
- [5] S. Polmai, "Instantaneous-value voltage control of a single-phase AC chopper", Proc. International Power Electronics Conference, IPEC-Niigata 2005, vol. 49, No. 4, (CD-ROM) April 4 – 8, 2005
- [6] M.J. Ryan; W.E. Brumsickle, and R.D. Lorenz. "Control topology options for single-phase UPS inverters", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 33, No. 2, March-April (1997)
- [7] Josep M. Guerrero, Luis Garcia de Vicuna, Jaume Miret, and Jose Matas. "A nonlinear feed-forward control technique for single-phase UPS inverters", Proc. the IEEE Conference IECON 02, Vol. 1, pp. 257-261 (2002)
- [8] Andre S. Kislovski, Richard Redl, Nathan O. Sokal, "Dynamic Analysis of Switching-Mode DC/DC Converters", Van Nostarnd Reinhold, NY, 1991
- [9] "Op Amp Circuit Collection", National Semiconductor Application Note 31, (February 1978)
- [10] Mihai Lucanu, Ovidiu Ursaru, and Cristian Aghion "SINGLE PHASE AC CHOPPER WITH IGBT'S" Signals, Circuits and Systems, 2003. SCS 2003. International Symposium on Volume 1, 10- Vol.1,11 July 2003 Page(s):213 – 216
- [11] Sergio Franco " DESIGN WITH OPERATIONAL AMPLIFIERS AND ANALOG INTEGRATED CIRCUITS ". McGraw-Hill, Third Edition:2002.

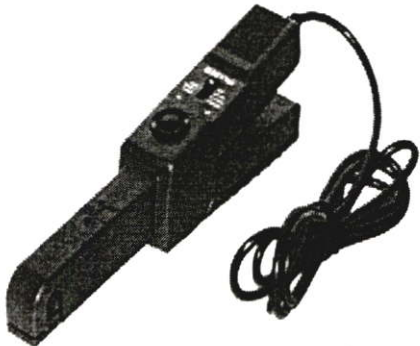
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

เครื่องมือที่วัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

	<p>ผลิตภัณฑ์ Digital Oscilloscope (YOKOGAWA) รุ่น DL1540 /DL (4 Channel) รายละเอียด 150 MHz Analog Bandwidth 120 MS/s on two channel 8 bit vertical resolution DC to 30 MHz, 850V(DC+AC peak) 2% DC accuracy Internal low pass filter</p>
---	--

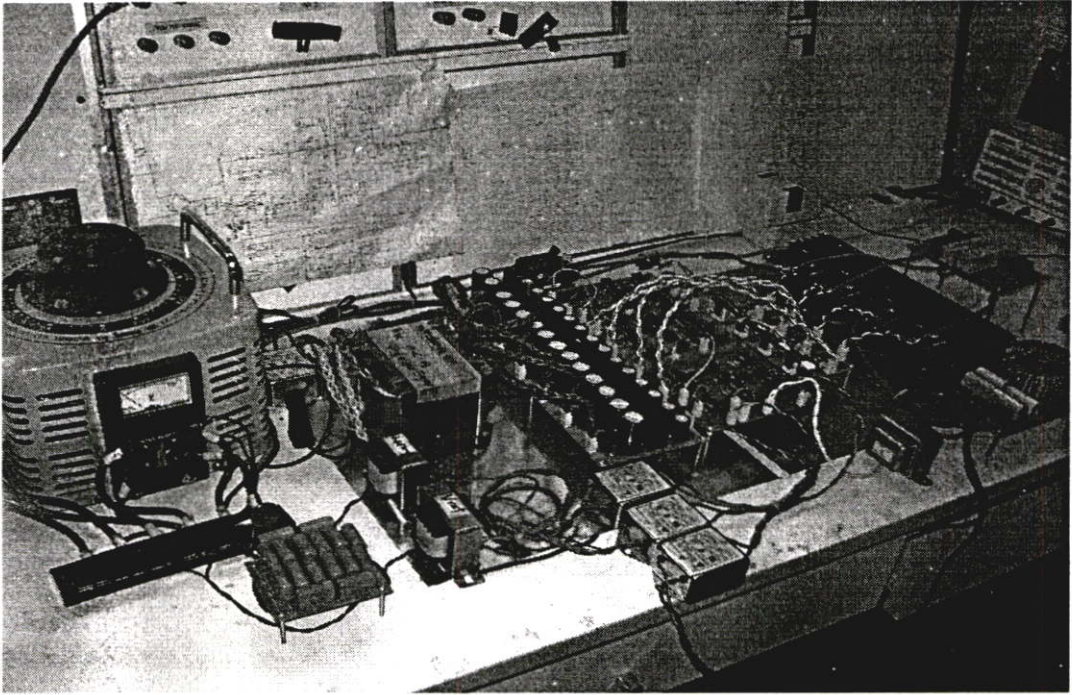
	<p>ผลิตภัณฑ์ Band Differential Probe รุ่น 700924 รายละเอียด 100 MHz A probe lets you make wide-band Differential input measurements</p>
--	---

	<p>ผลิตภัณฑ์ Current Probe(FLUKE) รุ่น 80i-110s รายละเอียด Current ranges: 0 to 10 A dc or ac peak 0 to 100 A dc or ac peak Frequency: DC to 100kHz .(@3 db) Output signals: 10 A range: 100 mV/A 100 A range: 10 mV/A</p>
---	--

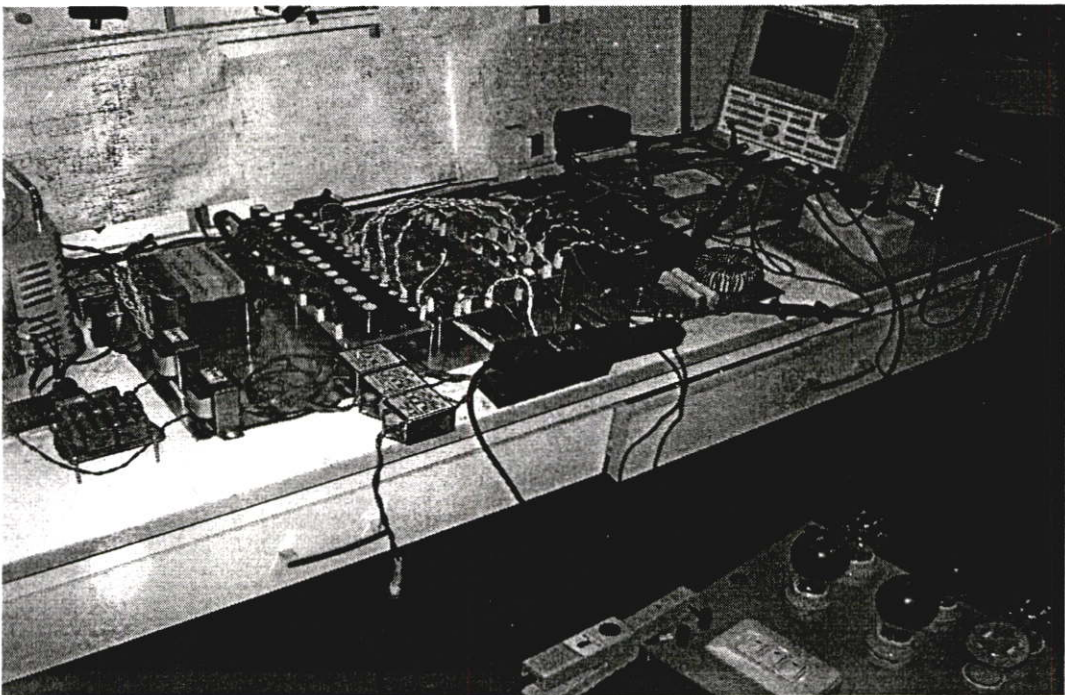


ผลิตภัณฑ์	Multi Meter(FLUKE)
รุ่น	179
รายละเอียด	True RMS 1kHz Accuracy = 0.09% Vac or Vdc : 0.1mV to 1000V Iac to Idc : 0 to 10A

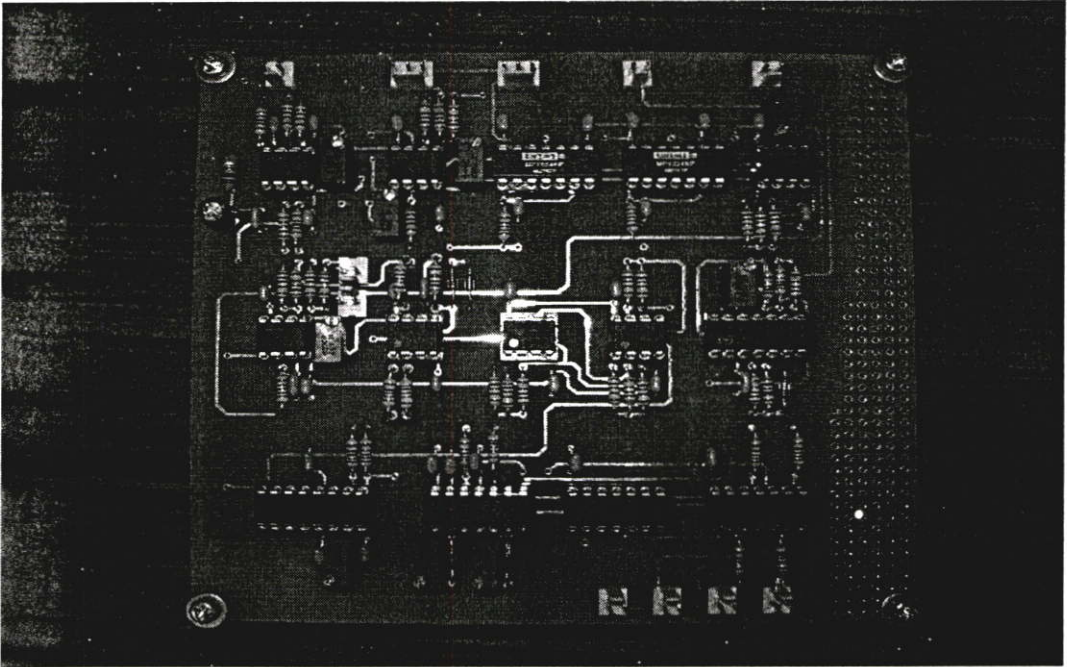
ภาคผนวก ข.
เครื่องต้นแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์



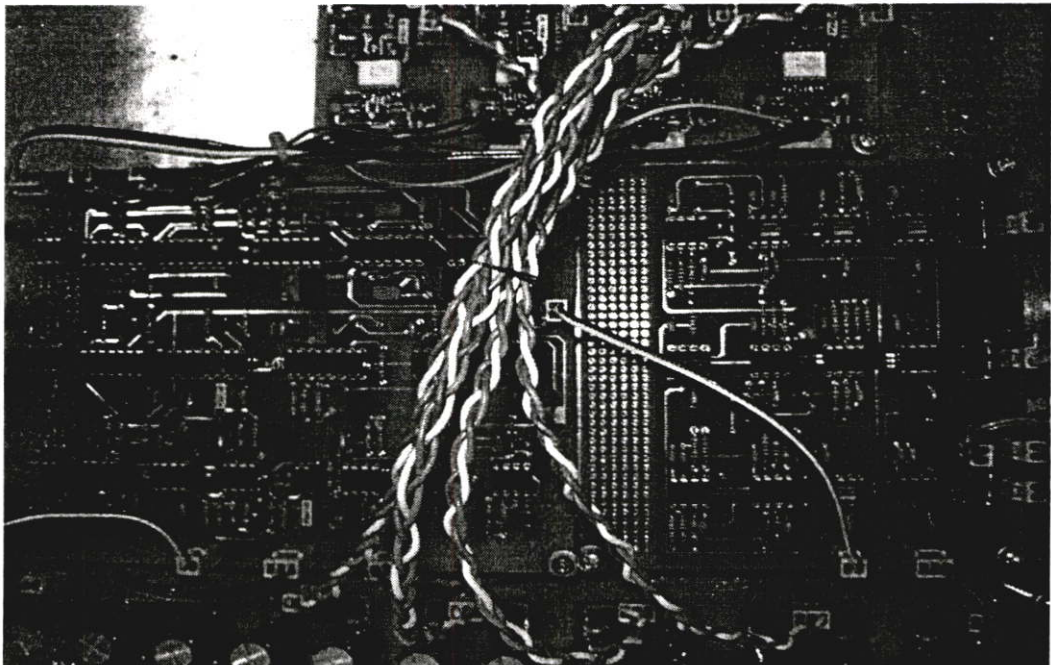
ภาพที่ 1 แสดงระบบ โดยรวมของการควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชซีซีอปเปอร์เฟสเดียว



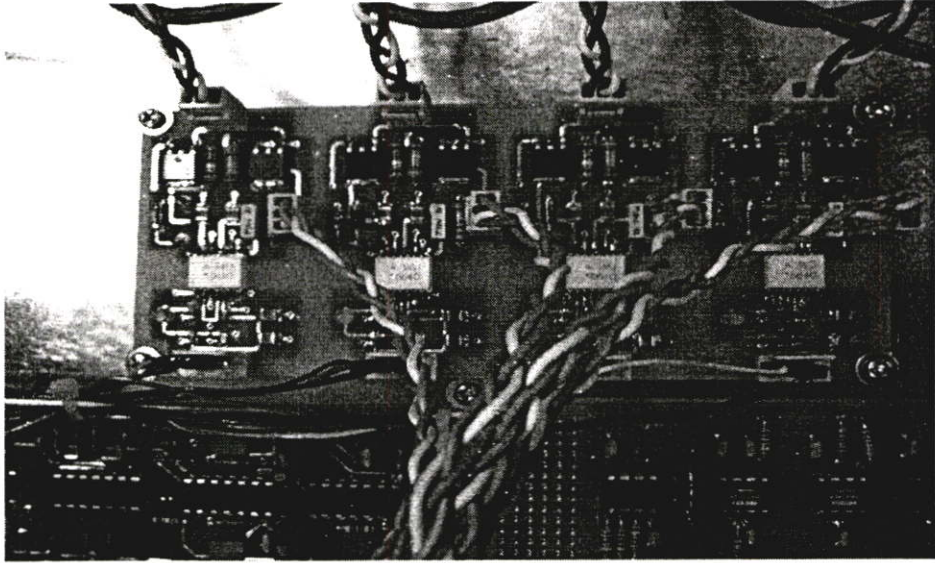
ภาพที่ 2 แสดงระบบ โดยรวมของการควบคุมแรงดันชั่วขณะของเอชซีซีอปเปอร์เฟสเดียวและ
เครื่องมือวัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์



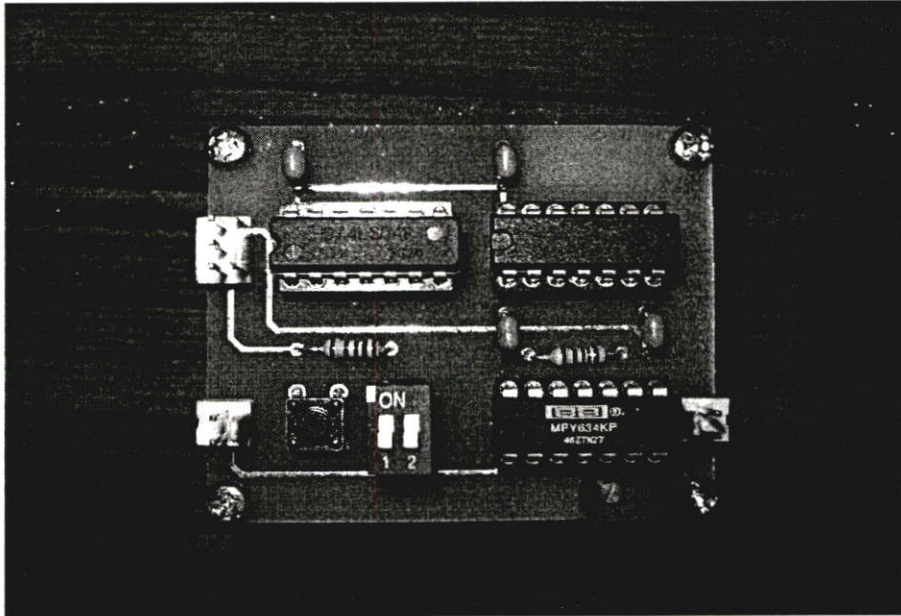
ภาพที่ 3 แสดงวงจรควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอซีซีอ็อปเปอร์ด้วยค่าแรงดันเฉลี่ย



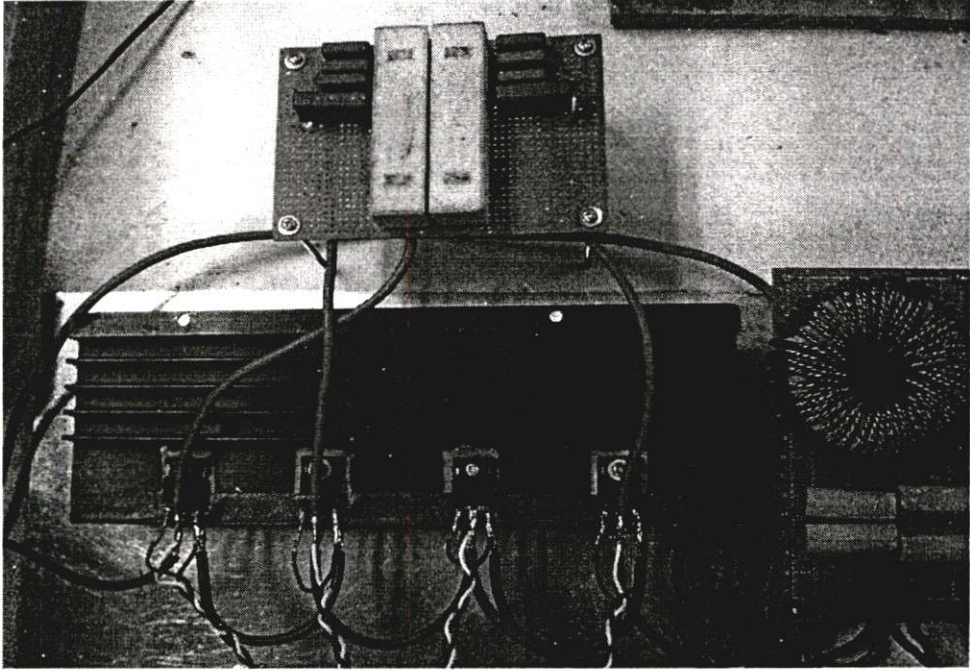
ภาพที่ 4 แสดงวงจรควบคุมแรงดันด้านขาออกของเอซีซีอ็อปเปอร์ด้วยค่าแรงดันชั่วขณะ



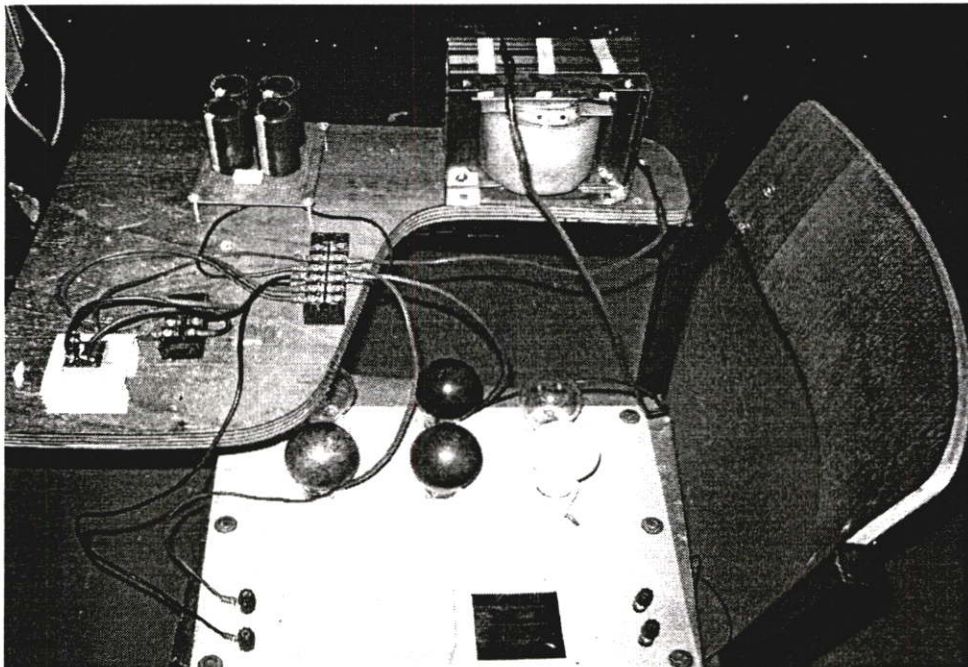
ภาพที่ 5 แสดงวงจรขับน้ำ



ภาพที่ 6 แสดงวงจรปรับเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงให้เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด



ภาพที่ 7 แสดงวงจรเอชซีซีออปเปอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์



ภาพที่ 8 แสดงวงจรของหลอดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ภาคผนวก ค.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

1. S. Polmai , E. Sugprajun, “ **Experiment on Instantaneous Value Voltage Control of a Single AC Chopper** ” The Fourth Power Conversion Conference (PCC-Nagoya 2007), Nagoya congress center, Nagoya, Japan, April 2-5, 2007.
2. E. Sugprajun, S. Polmai, “ **Performance Comparison between Average-Value and Instantaneous-Value Voltage Controls of a Single-Phase AC Chopper** ” The 2007 ECTI International Conference (ECTI-CON 2007), Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand, May 9-12, 2007.

PC Nagoya 2007
The Fourth Power Conversion Conference

Conference Proceedings

Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan
April 2-5, 2007

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS OF JAPAN



Experiment on Instantaneous Value Voltage Control of a Single-Phase AC Chopper

S. Polmai*, and E. Sugprajun*

* Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Abstract—This paper reports experiment on the previously proposed instantaneous value voltage control of a single-phase ac chopper. The proposed control method is based on a modified carrier SPWM and instantaneous value voltage and current feedback control system. The validation of the proposed method is confirmed by experimental results.

Index Terms—AC chopper, automatic voltage regulation, instantaneous value voltage control, pulse-width modulation.

I. INTRODUCTION

Recently, the studies of AC chopper for ac voltage control has been increased because it has many advantages such as high input power factor, sinusoidal output voltage with small low-pass filter requirement and fast response.

The applications of ac chopper for automatic voltage regulator (AVR) or line conditioning have been proposed based on series voltage compensating technique using auxiliary series transformer connected between supply and load [1]-[3]. The ac chopper-based AVR system can be depicted as shown by Fig. 1. If a single-polarity ac chopper is used the output voltage can only be regulated against one direction supply voltage change i.e. under- or overvoltage while a reversible polarity ac chopper can provide voltage regulation for both supply over- and undervoltage. AC chopper based AVR without series transformer that is capable of compensating for both under- and overvoltage has also been proposed using the buck-boost type ac chopper [4].

Recently, concern about power quality, especially the voltage sags and swells, has been largely increased, due to the proliferation of sensitive equipment such as adjustable speed drives, programmable logic controller and process control equipment. The ac chopper based AVRs are considered as alternative solutions to these problems. However, the sudden change in supply voltage magnitude as in cases of voltage sags and swells requires that the AVR should have dynamic response as fast as the inverter-based voltage sag correcting devices currently available. To address this requirement a fast peak voltage detecting technique has been used in the feedback control of the output voltage of the ac choppers [1], [2] and [4]. This technique has limitations of dynamic response and waveform quality under low power factor and non-linear load condition.

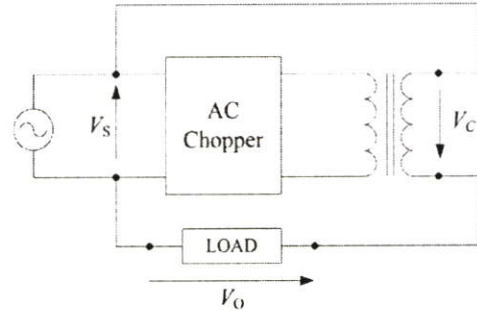


Fig. 1. AC chopper-based automatic voltage regulator

The author has proposed a novel instantaneous value voltage control for a single-phase ac chopper in [5]. The proposed control method was based on the modified carrier SPWM and instantaneous value feedback of the output voltage and current signals. The simulation results confirmed that the proposed method provided very fast dynamic response against both sudden supply voltage and load change. The proposed control method also demonstrated nearly sinusoidal output waveform even under nonlinear load.

In this paper, the details and results of the experiment of the proposed instantaneous value control method of the ac chopper are reported.

II. PROPOSED INSTANTANEOUS-VALUE VOLTAGE CONTROL OF AC CHOPPER

A. Configuration of a single-phase ac chopper

For a single-phase ac chopper, four switches are used in the main circuit as shown in Fig. 2 [1]. The output voltage can be controlled by the duty ratio of the chopping pulse. Typical gate signals of the four switches and the chopped output voltage before filtering are shown in Fig. 3. Let the input supply voltage is defined as follows:

$$v_s = V_m \cos(\omega t), \quad (1)$$

where ω and V_m are the angular frequency and magnitude of the supply voltage, respectively.

The chopped output voltage can be expressed by (2).

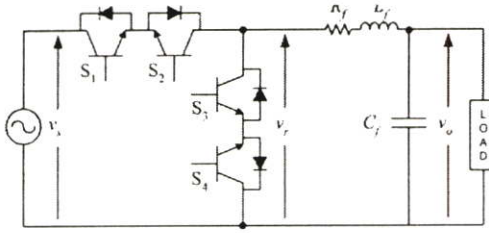
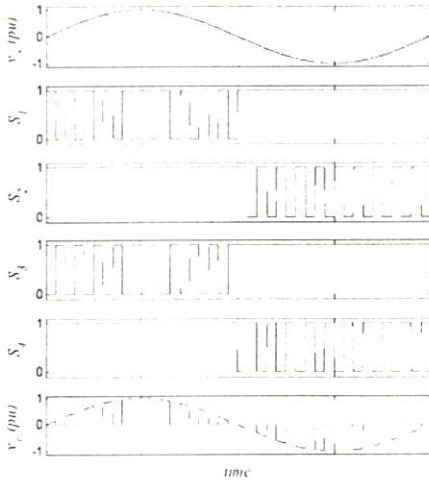


Fig. 2. Configuration of single-phase ac chopper

Fig. 3. Input voltage (v_s), chopped voltage (v_r) and corresponding gate signal of the four switches.

$$v_r = DV_m \cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_m \sin kD\pi}{k\pi} \cos(k\omega_c \pm \omega)t \quad (2)$$

where D and ω_c are the duty ratio and angular switching frequency, respectively. The first term in the right-hand side of (2) is the fundamental component and the second term is the harmonic content distributing around the switching frequency.

For a high switching frequency, the harmonic content can be filtered out using appropriated small-size low-pass filter. In steady-state, the filtered output voltage of the ac chopper can be approximately expressed as follows:

$$v_o = DV_m \cos(\omega t - \varphi_f) \quad (3)$$

where φ_f denotes the fundamental phase delay due to the low-pass filter.

As a result of (3), the amplitude of the output voltage is linearly controlled by the duty ratio of the PWM signal.

In the recent works, the amplitude of the output voltage is regulated by feedback control of the instantaneous peak value of the output voltage using PI controller [1], [2] and [4]. The controller output which is

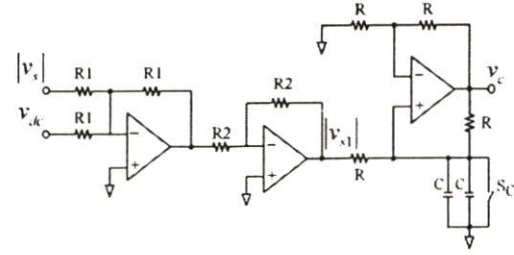


Fig. 4. Sawtooth pulse generator

a dc signal is then compared to the sawtooth carrier pulse to make PWM signals for the four switches. Owing to the delay in the detection of the peak value of the output voltage, the control of the ac chopper output voltage cannot be achieved with fast response. Furthermore, the feedback system is based on dc signals, which do not reflect the wave-shape quality of the output voltage and the variation of the supply voltage. The control system is thus susceptible to non-linearity of the load current and magnitude change of the power supply.

B. Sine-amplitude modulated sawtooth signal generator

Fig. 4 illustrates a simplified schematic diagram of the sawtooth carrier pulse generator. This circuit uses a non-inverting integrator in stead of an inverting integrator as in the previously proposed circuit [5], however the principle of operation is the same.

The absolute-value of the supply voltage signal is used as the input of the integrator circuit. If the supply voltage is defined by (1), it can be shown as in (4) that the output voltage at t_1+T instant is equal to the amplitude of the supply voltage at $t_1+T/2$ instant [5].

$$v_c(t_1 + T) = V_m \cos \omega(t_1 + T/2), \quad (4)$$

where, T is the period of the sawtooth signal. From (4), the amplitude of the sawtooth pulse varies with the amplitude of the $T/2$ -second delayed supply voltage. Because the magnitude of the sawtooth pulse is very low around the zero-crossing of the supply voltage, this could lead to fully-on of the switches and makes it unable to control the output voltage around the zero crossing of the supply voltage. To correct this, small dc voltage is added to the integrator input to increase the slope of the triangle pulse around zero-crossing.

Fig.5 illustrates the experimental results of the modified sawtooth signal comparing to the sinusoidal control signal and the resultant PWM signal. As can be seen from the figure, a constant duty ratio PWM waveform is obtained in the same manner as the conventional dc-sawtooth comparison method. The advantage of this method is that the output voltage is independent of the supply voltage as long as the duty ratio is less than a unit

C. Instantaneous-value voltage control

The equivalent circuits of AC chopper during active

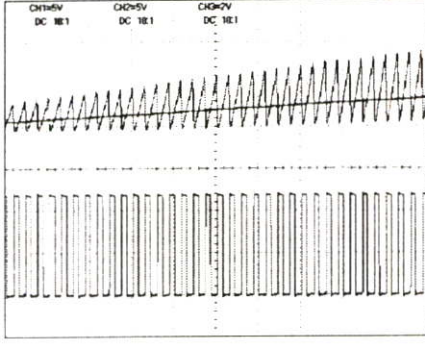


Fig. 5. Measured sawtooth pulse and control signal (upper plot) and resultant PWM signal (lower plot)

mode of operation, i.e. the switch S1 is "ON" and the switch S3 is "OFF", and during freewheeling, i.e. the switch S1 is "OFF" and the switch S3 is "ON" are illustrated by Fig. 6 (a) and (b), respectively. For simplicity, the effect of deadtime is ignored. In Fig. 6, the load is modeled as a current source disturbance I_o . Using the state-variable averaging method described in [8], the output voltage can be expressed by

$$V_o(s) = \frac{DV_s(s) - (sL_f + R_f)I_o(s)}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1} \quad (5)$$

where R_f , C_f and L_f are the resistance, capacitance and inductance of the low-pass filter, respectively.

The block diagram of the AC chopper is illustrated in Fig. 7. The effect of the output current disturbance can be cancelled out by disturbance observer. The closed loop control system of the output voltage is now proposed as shown in Fig. 8. If the parameters of the model match with those of the actual system, the effect of output current disturbance will be rejected and the closed loop transfer function can be found as

$$\frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{K_D s + K_P + 1}{L_f C_f s^2 + (K_D + R_f C_f) s + K_P + 1} \quad (6)$$

where K_D and K_P are the derivative and proportional gain of the PD controller, respectively.

The poles of the closed-loop control system are

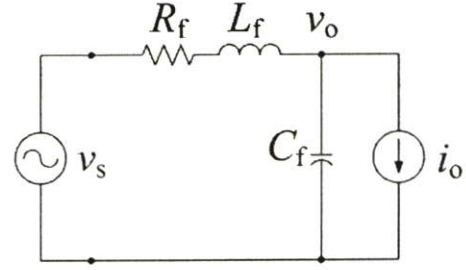
$$s_{1,2} = -\zeta \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (7)$$

where

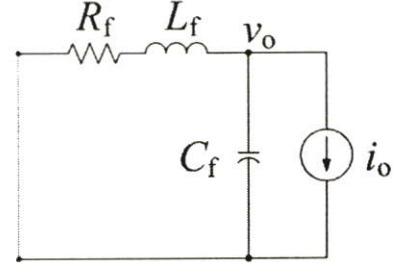
$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_P + 1}{L_f C_f}} \quad (8)$$

and

$$\zeta = \frac{1}{2} (K_D + R_f C_f) \frac{1}{\sqrt{(K_P + 1) L_f C_f}} \quad (9)$$



(a) Conducting duration DT



(b) Conducting duration (1-D)T

Fig. 6. Equivalent of AC chopper during active mode of operation (a) and freewheeling mode of operation (b).

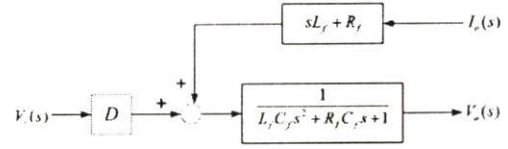


Fig. 7. Block diagram of AC chopper model

are the natural frequency and damping factor of the closed-loop system, respectively.

The desired closed-loop control characteristics can be specified by properly selecting the gains K_D and K_P .

III. EXPERIMENTAL RESULTS

Fig. 7 illustrates the configuration of the ac chopper for experiment. The important parameters of the system are summarized in the Table I. The experiments have been carried out to evaluate the performance of the proposed method. Additionally, the experiment results using conventional average-value control method will be used for comparison.

A. Step response

The experimental result with the proposed instantaneous-value control system is illustrated in Fig. 10. The output voltage follows the reference control signal precisely and has very fast dynamic response.

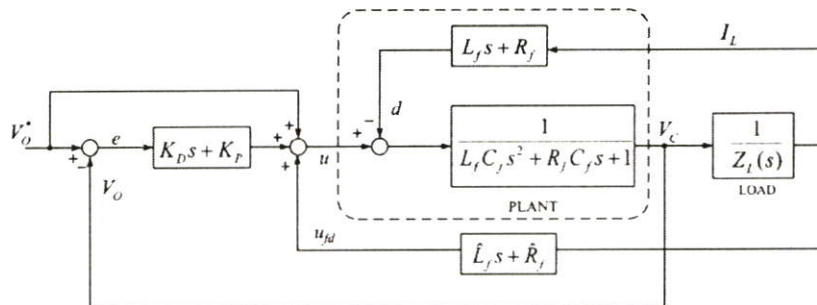


Fig. 8. Block diagram for the control system of the output voltage.

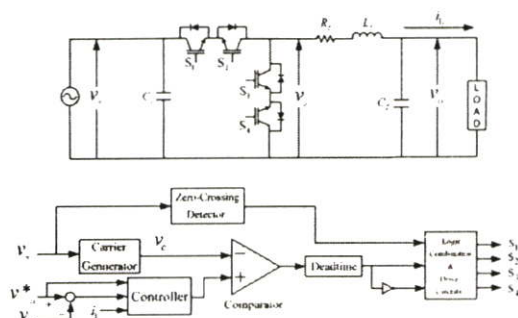


Fig. 9 Configuration of the ac chopper system for experiment

B. Effect of non-linear load

The non-linear load is made of a full-wave rectifier with LC filter and resistive load. To illustrate the effect of non-linear load, the output voltage without the proposed control method is shown in Fig. 11. The steady-state experimental result with the proposed instantaneous-value control system is illustrated in Fig. 12. Nearly sinusoidal output voltage is obtained.

C. Effect of load change

The experimental result on step load change is shown in Fig. 13. The output voltage is not affected by the change of the load.

D. Effect of supply voltage change

Fig. 13 illustrates the experimental results when the ac supply has voltage dip to 70% of its nominal voltage for 5 cycles. Fig. 14 illustrates the experimental results when the ac supply has voltage swell to 110% of its nominal voltage for 5 cycles. With the proposed control method the output voltage is nearly unaffected with the suddenly supply voltage change. These results demonstrate the robustness of the proposed modulation method.

IV. CONCLUSIONS

In this paper, the validity of the proposed instantaneous

TABLE I.
IMPORTANT PARAMETERS FOR EXPERIMENTS.

AC chopper	
Supply voltage	220 V, 50 Hz
Switching frequency	20 kHz
Load-side low-pass filter	
L_f	500 μ H
R_f	0.05 Ω
C_f	5 μ F
Supply-side filter	
C_s	16 μ F
Controller parameters	
K_D	0.00005
K_P	3.6
Nonlinear load (Diode rectifier with dc reactor)	
Filter capacitor	2600 μ F
Load resistance	18 Ω
DC reactor	15 mH
IGBT	
S1-S4	G20N60B3D, 600V 40A

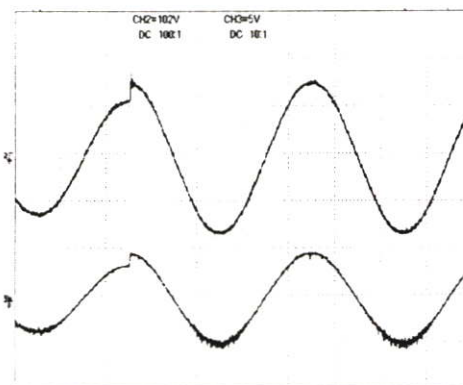


Fig. 10 Measured output voltage (upper trace, 100V/div) and reference controlled voltage (lower trace, 5V/div) for step response experiment. (Time scale: 5ms/div)

value voltage control for a single-phase ac chopper has been confirmed experimentally. The proposed control method provides fast step response, nearly sinusoidal voltage waveform

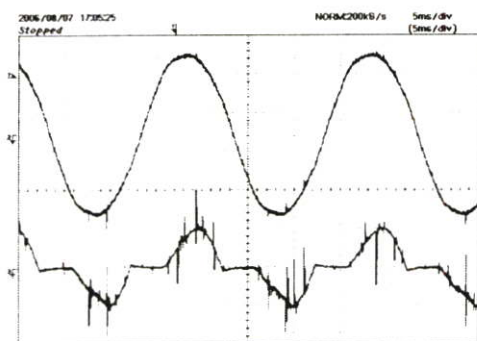


Fig. 11. Measured output voltage (upper trace, 100V/div) and load current (lower trace, 1A/div) under nonlinear load condition without the proposed control method. (Time scale: 5ms/div)

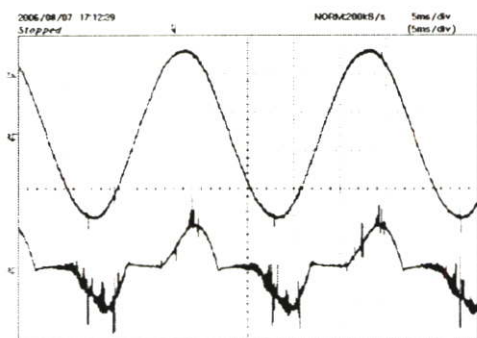


Fig. 12. Measured output voltage (upper trace, 100V/div) and load current (lower trace, 1A/div) under nonlinear load condition with the proposed control method. (Time scale: 5ms/div)

under non-linear load condition and robustness against the supply voltage dips.

The proposed modulation and control system can enhance the function and performance of ac chopper-based AVR system to be able to compete with high performance inverter-based voltage sag mitigating devices. Though the experiment was carried out only with a buck-type ac chopper, this control scheme can also be used for other type of ac chopper as well.

REFERENCES

[1] B.D. Min and B.H. Kwon, "Novel PWM line conditioner with fast output voltage control", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 145, No. 2, March (1998)

[2] B.H. Kwon, G.Y. Jeong, S.H. Han, and D.H. Lee, "Novel line conditioner with voltage up/down capability", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, pp 1100-1119, October 2002

[3] H. J. Ryoo, J.S. Kim, G.H. Rim, J.W. Jeon and D.S. Kim, "Series compensated step-down AC voltage regulator using AC chopper with transformer", *Proc. Sixth International Conference on Electrical Machines and*

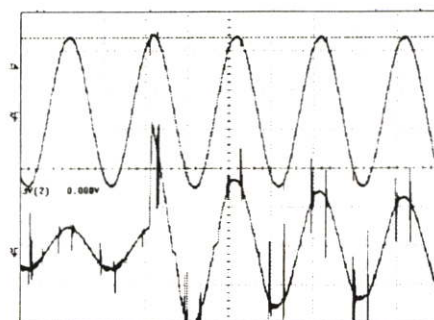


Fig. 13. Measured output voltage (upper trace, 100V/div) and load current (lower trace, 1A/div) with step load change. (Time scale: 10ms/div)

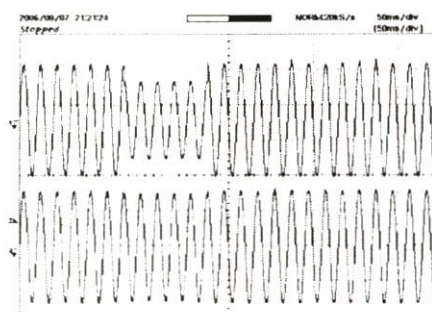


Fig. 14. Measured supply voltage (upper trace, 100V/div) and output voltage (lower trace, 100V/div) under supply voltage dip condition. (Time scale: 50ms/div)

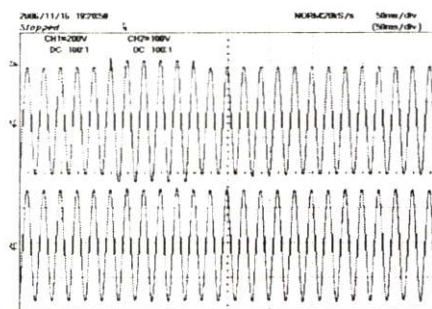


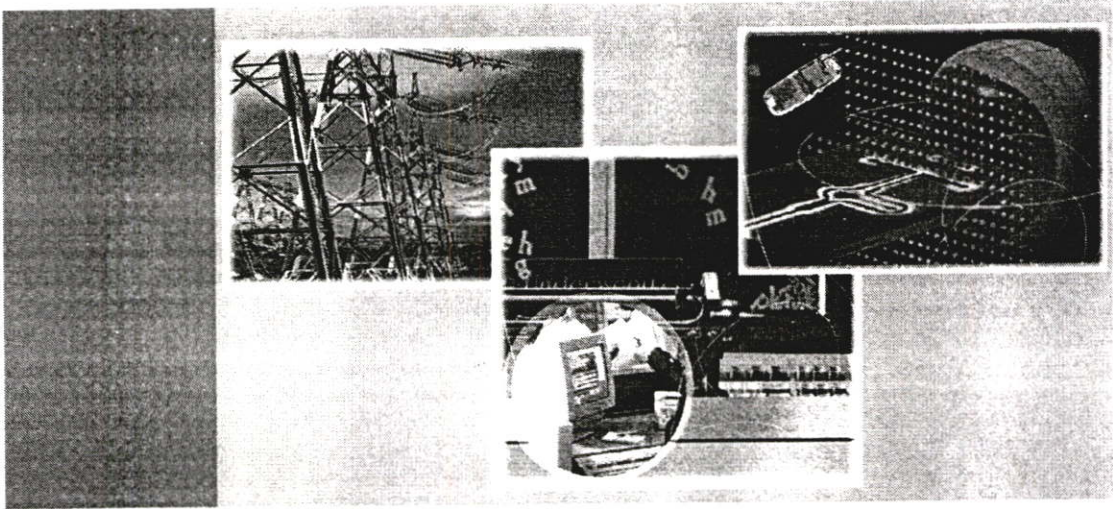
Fig. 15. Measured supply voltage (upper trace, 100V/div) and output voltage (lower trace, 100V/div) under supply voltage swell condition. (Time scale: 50ms/div)

Systems. ICEMS 2003, vol. 1, pp. 427-430, November, 2003

[4] B.H. Wong, J. H. Youm, and J. H. Choi, "Automatic voltage regulator with fast dynamic speed". *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 6, No. 2, March (1999)

[5] S. Polmai, "Instantaneous-value voltage control of a single-phase AC chopper". *Proc. International Power Electronics Conference, IPEC-Niigata 2005*, vol. 49, No. 4, (CD-ROM) April 4 - 8, 2005

- [6] M.J. Ryan, W.E. Brumsickle, and R.D. Lorenz. "Control topology options for single-phase UPS inverters". *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 33, No. 2, March-April (1997)
- [7] Josep M. Guerrero, Luis Garcia de Vicuna, Jaume Miret, and Jose Matas. "A nonlinear feed-forward control technique for single-phase UPS inverters". *Proc. the IEEE Conference IECON 02*, Vol. 1, pp. 257-261 (2002)
- [8] Andre S. Kislovski, Richard Redl, Nathan O. Sokal. "Dynamic Analysis of Switching-Mode DC/DC Converters". Van Nostrand Reinhold, NY, 1991



ECTI-CON 2007

*Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand
May 9-12, 2007*

VOLUME 1

- *Circuits and Systems*
- *Control Engineering*
- *Electrical Power Engineering*
- *Other Related Fields*

VOLUME 2

- *Communication Systems*
- *Signal Processing*
- *Computer and Information*



ECTI
Association

IEEE
THAILAND SECTION

NECTEC
a member of NSTDA

WD Western
Digital



Performance Comparison between Average-Value and Instantaneous-Value Voltage Controls of a Single-Phase AC Chopper

E. Sugprajun and S. Polmai

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
E-mail: s8060202@kmitl.ac.th, kpsompob@kmitl.ac.th

Abstract-This paper presents experiments and results of two methods for voltage control for a single-phase ac chopper. These methods are average-value voltage control and instantaneous-value voltage control. In average-value control scheme, an instantaneous peak-value of the output voltage is used as the feedback signal and the controller is of the PI type. The instantaneous-value control scheme, previously proposed by the authors, is based on a modified carrier SPWM and instantaneous value voltage and current feedback control system. The purposes of the experiments are to compare the performance of the two methods and to demonstrate the validity of the proposed instantaneous-value voltage control.

I. INTRODUCTION

Phase controls controlled with thyristors are used for AC power regulation circuits. The output voltage of the circuit is changed by shifting firing angle of the thyristors. As a result, the distortion of the output voltage enlarges, and the circuit requires filters with large capacitance for eliminating the distortion. It also has a disadvantage that the input power factor is low. To overcome these problems, an AC chopper circuit with the pulse-width control is developed. AC chopper has many advantages such as high-quality output voltage with small low-pass filter requirement, fast dynamic response and high input power factor.

In recent works [1], [2], [3], the amplitude of the output voltage is regulated by feedback control of the effective value or instantaneous peak value of the output voltage using PI controller. The controller output, which is a DC signal, is then compared to the sawtooth carrier pulse to make a PWM signal. This method is called here as the average-value voltage control. The advantage of this method is that the control signal is DC so a simple PI controller can be used. Disadvantages of this method are as follows. Owing to the delay in the detection of the effective value or peak value of the output voltage, the feedback controller cannot be designed for fast dynamic response. Otherwise it risks de-stabilizing the closed loop control. Moreover, because the feedback dc signal does not carry the wave-shape quality information of the output voltage, the quality of the output voltage is out of control. When a nonlinear load is connected to the output of the ac chopper, the output voltage becomes distorted.

The author has proposed a novel voltage control for a single-phase ac chopper in [5]. The proposed control method was based on the modified carrier sinusoidal pulse-width modulation and instantaneous value feedback of the output voltage and current signals. This method is called here as the instantaneous-value voltage control. The simulation results confirmed that the proposed method provided very fast dynamic response against both sudden supply voltage and load change. The proposed control method also demonstrated nearly sinusoidal output waveform even under nonlinear load.

In this paper, experiments are carried out on a single-phase ac chopper using both average-value and instantaneous-value voltage controls. The experimental results will be compared to demonstrate the advantages of the proposed instantaneous-value voltage control of the ac chopper. In the following sections the configuration of single-phase ac chopper and methods for voltage control are firstly reviewed. Secondly, the details of the experiment setup are explained. Finally, the experimental results using both control methods are reported and compared.

II. CONFIGURATION OF A SINGLE-PHASE AC CHOPPER

Fig 1 shows configuration of a single-phase ac chopper for experiments. Typical gate signals of the four switches and the chopped output voltage before filtering are shown in Fig. 2. Let the input supply voltage is defined as follows:

$$v_s = V_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

where ω and V_m are the angular frequency and magnitude of the supply voltage, respectively.

The chopped output voltage can be expressed by (2).

$$v_o = DV_m \cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_m \sin kD\pi}{k\pi} \cos(k\omega_s \pm \omega)t \quad (2)$$

where D and ω_s are the duty ratio and angular switching frequency, respectively. The first term in the right-hand side of (2) is the fundamental component and the second term is the harmonic content distributing around the switching frequency.

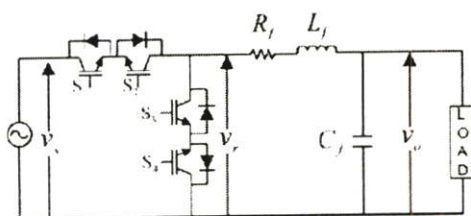


Figure 1 Configuration of a single-phase ac chopper

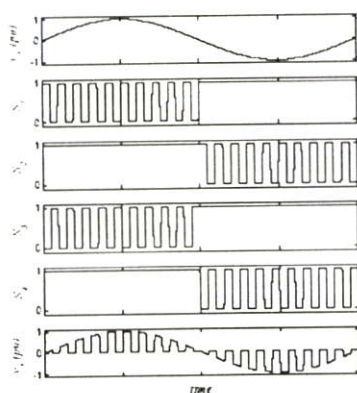


Figure 2 AC chopper waveforms

For a high switching frequency, the harmonic content can be filtered out using appropriated small-size low-pass filter. In steady-state, the filtered output voltage of the ac chopper can be approximately expressed as follows:

$$v_o = DV_m \cos(\omega t - \phi_1) \quad (3)$$

where ϕ_1 denotes the fundamental phase delay due to the low-pass filter.

As a result of (3), the amplitude of the output voltage is linearly controlled by the duty ratio of the PWM signal.

III. CONTROLLING OF THE OUTPUT VOLTAGE

A. Average Value Control Method

Fig.3 illustrates block diagram for average-value control of the ac chopper. The instantaneous peak value of the output voltage is used as the feedback signal. Calculation of the instantaneous peak value is performed by phase-shifter and multiplier as shown in Fig. 4. The source of the delay of the feedback signal comes from the phase-shifter circuit. The output of the PI controller is used as the modulated signal for the comparator to generate PWM signal.

B. Instantaneous Value Control Method

The instantaneous-value voltage control is based on the modified carrier sinusoidal pulse width modulation and

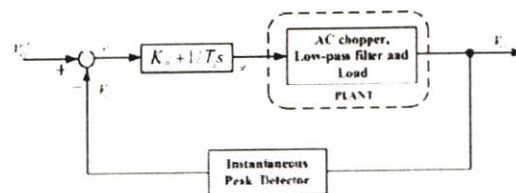


Figure 3. Block diagram for average-value control

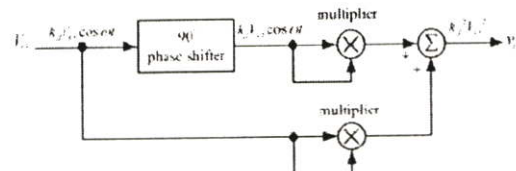


Figure 4 Instantaneous peak detector

instantaneous value feedback of the output voltage and current signals. The modification of the sinusoidal pulsewidth modulator is made at the sawtooth carrier signal generation. The carrier signal will have its amplitude varying with the instantaneous value of the supply voltage. Fig. 5 illustrates a simplified schematic diagram of the sawtooth carrier pulse generator. This circuit uses a non-inverting integrator in stead of an inverting integrator as in the previously proposed circuit [4], however the principle of operation is the same. The absolute-value of the supply voltage signal is used as the input of the integrator circuit. If the supply voltage is defined by (1), it can be shown as in (4) that the output voltage at $t_1 - T$ instant is equal to the amplitude of the supply voltage at $t_1 + T/2$ instant.

$$v_c(t_1 + T) = V_m \cos \omega(t_1 + T/2) \quad (4)$$

where, T is the period of the sawtooth signal. From (4), the amplitude of the sawtooth pulse varies with the amplitude of the $T/2$ -second delayed supply voltage. Because the magnitude of the sawtooth pulse is very low around the zero-crossing of the supply voltage, this could lead to fully-on of the switches and makes it unable to control the output voltage around the zero crossing of the supply voltage. To correct this, small dc voltage is added to the integrator input to increase the slope of the triangle pulse around zero-crossing. The advantage of this circuit is that the output voltage is independent of the supply voltage as long as the duty ratio is less than a unit.

The block diagram of the feedback control of the output voltage is shown in Fig. 6. The plant model of the ac chopper is derived using the state-variable average model method described in [5], where the output current is model as external disturbance. In Fig. 6 the effect of output current is rejected by the feedback of the signal U_{fd} derived from output current. If the parameters of the model match with those of the actual plant the closed loop transfer function of the system becomes

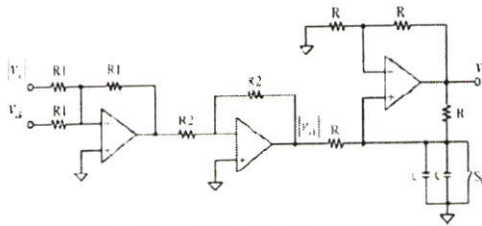


Figure 5 Sawtooth carrier pulse generator

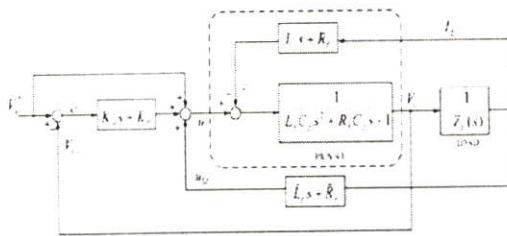


Figure 6 Block diagram for the control system of the output voltage

$$\frac{V_o(s)}{V_d(s)} = \frac{K_D s + K_P + 1}{L_f C_f s^2 + (K_D + R_f C_f) s + K_P + 1} \quad (5)$$

where K_D and K_P are the derivative and proportional gain of the PD controller, respectively.

The poles of the closed-loop control system are

$$s_{1,2} = -\zeta \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (6)$$

where

$$\omega_n = \sqrt{(K_P + 1) / (L_f C_f)} \quad (7)$$

and

$$\zeta = \frac{1}{2} (K_D + R_f C_f) / \sqrt{(K_P + 1) L_f C_f} \quad (8)$$

are the natural frequency and damping factor of the closed-loop system, respectively.

The desired closed-loop control characteristics can be specified by properly selecting the gains K_D and K_P . The absolute value of the controller u and the modified carrier signal v_c is used as the inputs for the comparator to generate PWM signal.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

The experiments have been carried out on the following topics: the step response of the reference signal, the effect of nonlinear load and the effect of sudden supply voltage changes. Both average-value and instantaneous-value voltage control are applied for comparison. The details of the experiment parameters are summarized in Table I.

TABLE I
IMPORTANT PARAMETERS FOR EXPERIMENTS

AC chopper	
Supply voltage	220 V, 50 Hz
Switching frequency	20 kHz
Load-side low-pass filter	
L_f	500 μ H
R_f	0.05 Ω
C_f	5 μ F
Supply-side filter	
C_s	16 μ F
Controller parameters	
K_P	0.00005
K_D	3.6
Conventional PI controller	
K_I	0.005
K_D	0.2
Nonlinear load (Diode rectifier with dc reactor)	
Filter capacitor	2600 μ F
Load resistance	18 Ω
DC reactor	15 mH
IGBT	
S1-S4	G20N60B3D, 600V 40A

A. Step response

Fig. 7 illustrates the step responses of the ac chopper using the average-value voltage control, Fig. 7(a), and the proposed instantaneous value voltage control, Fig. 7(b), respectively. In the case of instantaneous voltage control the output voltage track in reference voltage precisely and exhibit only small overshoot while in the case of average value control large overshoot appears at the output voltage.

B. Effect of nonlinear load

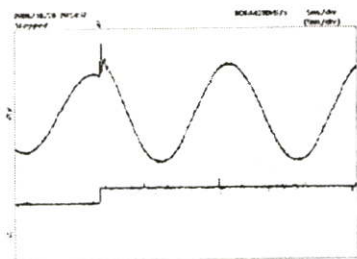
Fig. 8 illustrates the effect of nonlinear load using both control methods. The output voltage is nearly a sinusoidal wave in the case of the instantaneous value control and it is distorted by the nonlinearity of the output current under average value control.

C. Effect of supply voltage variation

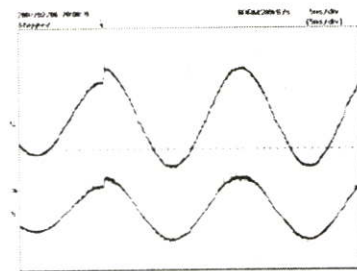
Fig. 9 shows the results when the supply voltage dipped from 100% to 70%. With the instantaneous value control, the output voltage remained unaltered while with the average value control the output voltage dipped at first and then climbed to the reference value as time passed. Also a large overshoot of the output voltage is observed at the end of voltage dip in the case of average value control.

V. CONCLUSION

The experiments on average-value and instantaneous-value voltage control of a single-phase ac chopper have been carried out. The purpose of the experiments is to compare the performance of both control schemes. The comparison focus on the four topics including step response, effect of nonlinear load and effect of supply voltage variations. From the experimental results, the proposed instantaneous value voltage control provides improved dynamic response, robustness to the supply variation and less sensitivity to the nonlinear load.

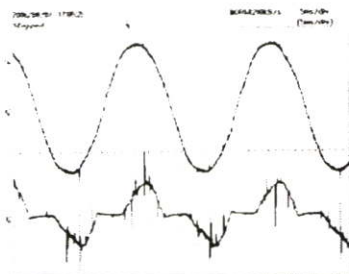


(a) In case of average value control (output voltage, upper trace, 100V/div; reference voltage, lower trace, 5V/div)

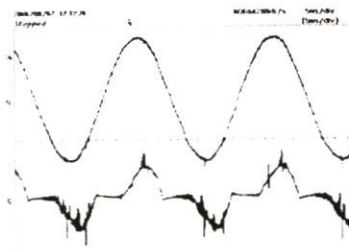


(b) In case of Instantaneous value control (output voltage, upper trace, 100V/div; reference voltage, lower trace, 5V/div)

Figure 7. Step response of the ac chopper

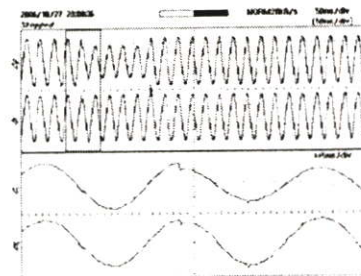


(a) In case of average value control (output voltage: upper trace, 100V/div; load current: lower trace, 1A/div)

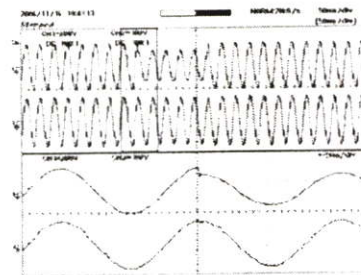


(b) In case of Instantaneous value control (output voltage: upper trace, 100V/div; load current: lower trace, 1A/div)

Figure 8. Effect of nonlinear load



(a) In case of average value control (supply voltage: upper trace, 200V/div; output voltage: lower trace, 100V/div)



(b) In case of Instantaneous value control (supply voltage: upper trace, 200V/div; output voltage: lower trace, 100V/div)

Figure 9. Effect of supply voltage variation

REFERENCES

- [1] B.D. Min and B.H. Kwon, "Novel PWM line conditioner with fast output voltage control", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 145, No. 2, March (1998)
- [2] H. Kwon, G. Y. Jeong, S. H. Han, and D. H. Lee, "Novel line conditioner with voltage up/down capability", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, pp. 1100-1119, October, 2002
- [3] B.H. Wong, J. H. Youm, and J. H. Choi, "Automatic voltage regulator with fast dynamic speed", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 6, No. 2, March (1999)
- [4] S. Polma, "Instantaneous-value voltage control of a single-phase AC chopper", *Proc. International Power Electronics Conference, IPEC-Niigata 2005*, vol. 49, No. 4, (CD-ROM) April 4-8, 2005
- [5] Andre S. Kislovski, Richard Redl, Nathan O. Sokal, "Dynamic Analysis of Switching-Mode DC/DC Converters", Van Nostrand Reinhold, NY, 1991
- [6] Josep M. Guerrero, Luis Garcia de Vicuna, Jaume Miret, and Jose Matas, "A nonlinear feed-forward control technique for single-phase UPS inverters", *Proc. the IEEE Conference IECON 02*, Vol. 1, pp. 257-261 (2002)
- [7] M.J. Ryan, W.E. Brunnsickle, and R.D. Lorenz, "Control topology options for single-phase UPS inverters", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 33, No. 2, March-April (1997)

ประวัติผู้เขียน

นายเอกวัฒน์ สุขประจันทร์ เกิดวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2525 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2548