

## รายงานการวิจัย

# การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า (Performance Comparisons in Electrical Motor Drive Systems)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กงพล อารีรักษ์

หน่วยวิจัยคุณภาพกำลังไฟฟ้า

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2553

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงสนับสนุนในด้านสถานที่ในการทำวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คุณศศิญา อุดมสุข คุณสาธิต ชลสถิตจำเริญ คุณภูริชญ์ งามคง คุณสุนทร จูมคอก คุณฐิตาภรณ์ ปาละสุข และคุณอมร ชันสาลี นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยสร้างและทดสอบ ชุดขับเคลื่อนดังกล่าวในงานวิจัย รวมถึงช่วยวัดปริมาณฮาร์มอนิกต่าง ๆ ด้วยความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่ง สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณพนักงานศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3 ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

กองพล อารีรักษ์

เมษายน 2553

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัย เรื่อง การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ที่นำเสนอในรายงานวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบกรงกระรอก วงจรที่สร้างขึ้นสำหรับทดสอบสมรรถนะของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวมีทั้งหมด 3 วงจรด้วยกัน คือ วงจรขับเคลื่อนที่ใช้ไตรแอก วงจรชอปเปอร์พื้นฐาน และวงจรเรกูลเลเตอร์แบบบัค ส่วนวงจรที่ใช้สำหรับทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีทั้งหมด 3 วงจรเช่นเดียวกัน คือ วงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมแบบครึ่งบริดจ์และเต็มบริดจ์ และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม การทดสอบวงจรถูกกล่าวว่าจะตรวจวัดปริมาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกเป็นสำคัญ ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ใช้งานวงจรเหล่านี้ตระหนักถึงปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น และจากการทดสอบ พบว่า วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าดังกล่าวที่ได้ทำการทดสอบทั้ง 6 วงจร มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอยู่ในปริมาณที่เกินกว่ามาตรฐาน IEEE Std.519-1992 ดังนั้นถ้าจะใช้วงจรถูกกล่าวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในอุตสาหกรรม อาจมีความจำเป็นต้องมีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าวด้วยเช่นกัน

## **Abstract**

The research project is the performance comparisons in electrical motor drive systems. This report presents the detail of electric motor drive circuits. The separately excited DC motor and the single phase squirrel-cage induction motor (AC motor) are used for testing in this research. There are three types of the testing DC motor drive circuits such as the drive circuit using triac, basic chopper circuit and buck regulator circuit. The AC motor drive circuits also have three types such as the half-bridge and full-bridge square wave inverters and PWM inverter. The testing for the research is to measure the harmonic currents and voltages at the point of common coupling (PCC). The experimental results confirm that the use of DC and AC motor drive circuits generate the harmonic currents at the PCC. These harmonic currents excessively exceed the IEEE Std.519-1992. Therefore, the use of these motor drive circuits for the industry should add the harmonic compensator into the system.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาในการทำวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ทฤษฎีและกรอบแนวความคิด	2
1.6 แผนการดำเนินงาน	5
บทที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม	
2.1 กล่าวนำ	6
2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์	6
2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์	11
2.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์	16
2.5 บอร์ด dsPIC30F2010	18
2.5.1 โครงสร้างของบอร์ด dsPIC30F2010	18
2.5.2 โปรแกรมการสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับมอสเฟต	21
2.6 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม	32
2.6.1 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 วงจรแยก โดคสัญญาณ	35
2.6.3 วงจร IR2110	36
2.7 ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม	37
2.7.1 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์	37
2.7.2 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์	41
2.7.3 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิก	43
2.8 สรุป	44
บทที่ 3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม	
3.1 กล่าวนำ	46
3.2 การควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์โดยการสวิตช์แบบยูนิโพลลา	46
3.3 การออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวงจรอินเวอร์เตอร์	58
3.4 วงจรจุดชนวนด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม	58
3.4.1 วงจรสร้างสัญญาณไซน์	58
3.4.2 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม	61
3.4.3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	63
3.4.4 วงจรขยายแบบกลับเฟส	64
3.4.5 วงจรกำหนดช่วงเวลาตาย	65
3.4.6 วงจรยกระดับสัญญาณ	67
3.4.7 วงจรแยก โดคสัญญาณ	70
3.5 ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม	71
3.6 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิก	73
3.7 สรุป	74

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไทรแอก	
4.1 กล่าวนำ	75
4.2 วงจรจุดชนวนเกท	75
4.2.1 ไอซี TCA785	75
4.2.2 วงจรแยกโคตสัญญาณ	78
4.3 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	79
4.3.1 วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยไทรแอก	79
4.3.2 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์	90
4.3.3 วงจรรวมสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	96
4.4 ผลการทดสอบวงจรกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	102
4.5 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิก	106
4.6 สรุป	107
บทที่ 5 วงจรชอปเปอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	
5.1 กล่าวนำ	108
5.2 วงจรชอปเปอร์พื้นฐาน	108
5.2.1 หลักการทำงานของวงจรและการออกแบบ	108
5.2.2 ผลการทดสอบวงจรกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	112
5.3 วงจรเรกูเลเตอร์แบบบัคค์	113
5.3.1 หลักการทำงานของวงจรและการออกแบบ	113
5.3.2 ผลการทดสอบวงจรกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	120
5.4 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิก	121
5.5 สรุป	122

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 ชุดแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์	
6.1 กล่าวนำ	123
6.2 การใช้งานโปรแกรม LabVIEW ร่วมกับอุปกรณ์ DAQ	123
6.2.1 การ์ด NI USB-6009	123
6.2.2 การใช้งาน NI USB-6009 ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW	125
6.3 ตัวตรวจรู้ความเร็วรอบมอเตอร์	133
6.4 การสร้างโปรแกรมแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์	133
6.5 สรุป	136
บทที่ 7 บทสรุป	
7.1 สรุป	137
เอกสารอ้างอิง	140
ประวัติผู้วิจัย	141



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาในการทำวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย ดังเช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น การใช้มอเตอร์ไฟฟ้าดังกล่าว มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งเทคนิคการควบคุมความเร็วนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ ตามชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้า คือ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ จากการสำรวจวงจรสำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นิยมใช้ พบว่า มีหลากหลายวงจรด้วยกัน ดังเช่น วงจรเรียงกระแสที่มีการควบคุมเฟส วงจรเรกูเลเตอร์แบบบัคค์ วงจรเรกูเลเตอร์แบบบูสต์ และวงจรเรกูเลเตอร์แบบบัคค์-บูสต์ ในขณะที่วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ มีอยู่หลายวงจรเช่นเดียวกัน เช่น วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยเทคนิคพีดีบีลียูเอ็ม และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม วงจรต่าง ๆ เหล่านี้ มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมทุกระดับของประเทศไทย และจากการศึกษา พบว่า การใช้วงจรดังกล่าวส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็น “มลพิษ” ด้านหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นความจำเป็นในการตรวจวัดปริมาณฮาร์มอนิกของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้นอกจากนี้ในงานวิจัยจะดำเนินการสร้างชุดตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบออนไลน์ เพื่อแสดงผลดังกล่าวบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งการแสดงผลความเร็วรอบในลักษณะเช่นนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับวิศวกรหรือพนักงานประจำโรงงานอุตสาหกรรม

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
- เพื่อวัดปริมาณฮาร์มอนิกของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบต่าง ๆ
- เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบออนไลน์
- เพื่อได้ต้นแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับใช้ในการสอนนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

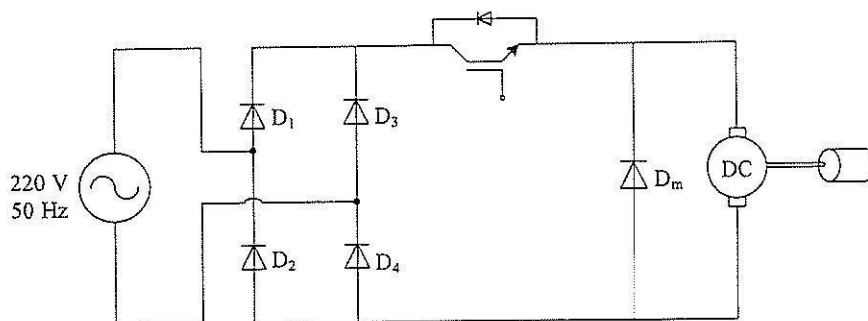
- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น
- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดกรงกระรอก
- การตรวจวัดปริมาณฮาร์มอนิก จะดำเนินการเฉพาะที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักเท่านั้น
- การตรวจวัดฮาร์มอนิกจะตรวจวัดฮาร์มอนิกในกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้องค์ความรู้ เกี่ยวกับการเลือกใช้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการพิจารณาฮาร์มอนิก ของวงจรต่าง ๆ
- ได้ต้นแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสอนนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าในระดับปริญญาตรี
- ได้ต้นแบบชุดแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบออนไลน์
- บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

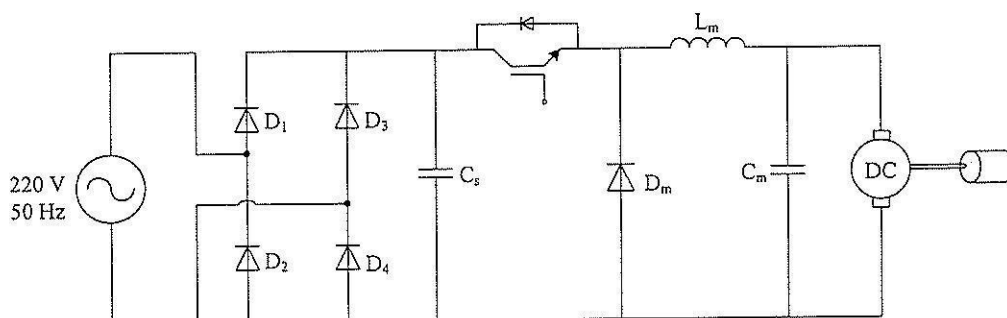
### 1.5 ทฤษฎี และกรอบแนวความคิด

จากการศึกษาค้นคว้าของผู้วิจัย พบว่า วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายวงจรด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกศึกษา และสร้างวงจรดังกล่าวทั้งหมด 3 วงจร โดยในวงจรแรกมีลักษณะ โครงสร้างดังรูปที่ 1.1 ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วงจรประเภท A จากวงจรในรูปที่

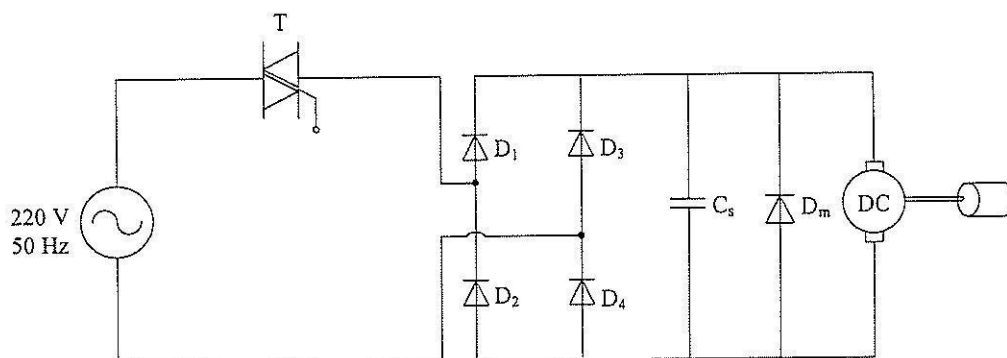


รูปที่ 1.1 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประเภท A

1.1 สังเกตได้ว่าในส่วนแรกเป็นวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หลังจากนั้นจะผ่านอุปกรณ์สวิตซิงกำลังเพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนวงจรที่สองมีลักษณะโครงสร้าง



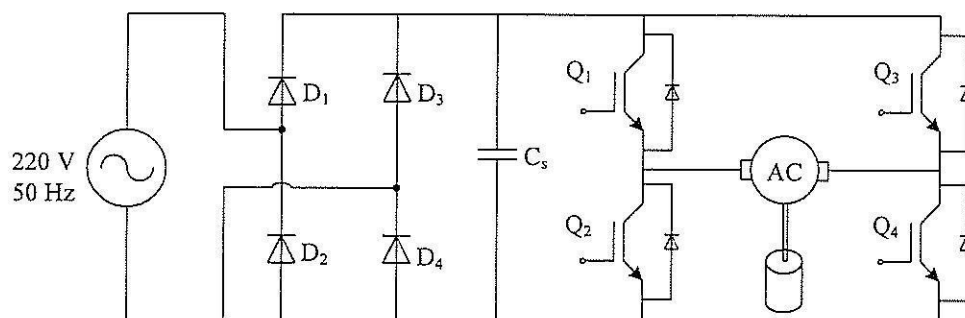
รูปที่ 1.2 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประเภท B



รูปที่ 1.3 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประเภท C

ของวงจрдังรูปที่ 1.2 ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วงจรประเภท B ที่ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์โดยการปรับค่ารอบทำงาน (duty cycle) ของอุปกรณ์ สวิตซิงกำลัง วงจรที่สาม มีโครงสร้างของวงจรแสดงไว้ดังรูปที่ 1.3 ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วงจรประเภท C การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์สำหรับวงจรนี้ จะปรับที่ค่ามุมจุดชนวนเกทของไทรแอก T เท่านั้น

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส พบว่า ในปัจจุบันเทคนิคการควบคุมอุปกรณ์สวิตซิ่งที่นิยมใช้มี 2 ประเภทด้วยกัน โดยประเภทแรก คือ



รูปที่ 1.4 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

เทคนิคการควบคุมสวิตช์แบบพีคดับเบิ้ลยูเอ็ม ประเภทที่สอง คือ เทคนิคการควบคุมสวิตช์แบบรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม ซึ่งเทคนิคดังกล่าวทั้งสองมีลักษณะ โครงสร้างของวงจรที่เหมือนกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.4 แต่วงจรทั้งสองจะแตกต่างกันที่เทคนิคการสวิตช์ไอจีบีที  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  และ  $Q_4$  จากวงจรดังรูปที่ 1.4 สังเกตได้ว่าในส่วนแรกเป็นการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น หลังจากนั้นเป็นการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

## 1.6 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงประเภท A ประเภท B และ ประเภท C	■												
2. ศึกษาวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับหนึ่งเฟสด้วยวงจร อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยเทคนิค พีดับเบิลยูเอ็ม			■										
3. ศึกษาวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับหนึ่งเฟสด้วยวงจร อินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม				■									
4. สร้างและทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงประเภท A ประเภท B และประเภท C					■								
5. สร้างและทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่ควบคุมด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม							■						
6. สร้างและทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ แบบรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม								■					
7. ตรวจสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกของวงจร ขับเคลื่อนดังกล่าว									■				
8. สร้างชุดแสดงผลความเร็วรอบของ มอเตอร์ไฟฟ้าแบบออนไลน์										■			
9. จัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์										■			

## บทที่ 2

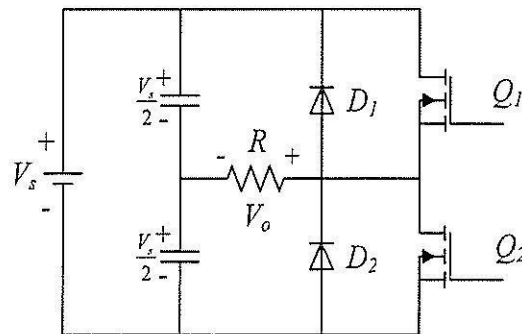
### วงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม

#### 2.1 กล่าวนำ

วงจรอินเวอร์เตอร์ เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยในบทนี้จะนำเสนอ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ (half-bridge inverter) และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ (full-bridge inverter) รายละเอียดที่จะนำเสนอประกอบด้วย การอธิบายในโหมดการทำงานต่าง ๆ รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับสร้างวงจรเพื่อการใช้งานจริง การอธิบายในรายละเอียดต่าง ๆ นี้ จะนำเสนออย่างเป็นขั้นตอนเพื่ออำนวยความสะดวกทำความเข้าใจ

#### 2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ (half-bridge inverter) เป็นวงจรหนึ่งในการแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ โครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วยมอสเฟตจำนวน 2 ตัว ดังรูปที่ 2.1



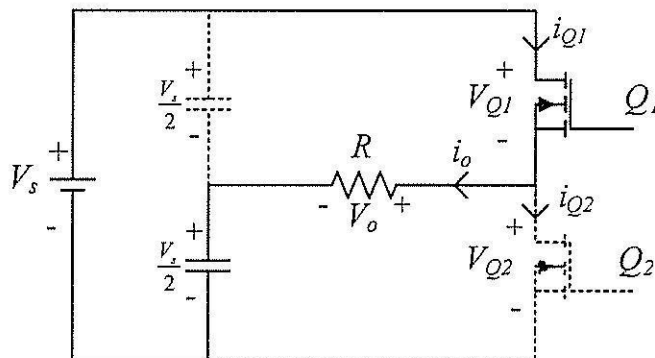
รูปที่ 2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์

จากวงจรดังรูปที่ 2.1 สามารถพิจารณาโหมดการทำงานได้เป็น 2 โหมดดังนี้

โหมดที่ 1 พิจารณาช่วง  $Q_1$  นำกระแส และ  $Q_2$  หักนำกระแส

-  $Q_1$  นำกระแส

จากรูปวงจรที่ 2.1 เมื่อมอสเฟต  $Q_1$  นำกระแส วงจรสมมูลจะเป็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลในโหมดที่ 1

จากรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (2-1)

$$V_{Q1} + V_o + \frac{V_s}{2} - V_s = 0 \quad (2-1)$$

การวิเคราะห์ในเบื้องต้นได้กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟตในสภาวะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 0 V ( $V_{Q1} = 0$ ) เมื่อแทนค่าแรงดันดังกล่าวเท่ากับ 0 V สมการที่ (2-1) จะเป็นดังสมการที่ (2-2)

$$V_o = \frac{V_s}{2} \quad (2-2)$$

ดังนั้นจะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตตัวที่ 1 ตามสมการที่ (2-3)

$$i_{Q1} = i_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_s}{2R} \quad (2-3)$$

-  $Q_2$  หุดย่นำกระแส

จากรูปวงจรที่ 2.2 เมื่อมอสเฟต  $Q_2$  หุดย่นำกระแส และจากรูปดังกล่าวเมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (2-4)

$$\frac{V_s}{2} - V_o + V_{Q2} - V_s = 0 \quad (2-4)$$

การวิเคราะห์ในเบื้องต้นเมื่อนำค่า  $V_o$  ในสมการที่ (2-2) แทนลงในสมการที่ (2-4) จะเป็นดังสมการที่ (2-5)

$$V_{Q2} = V_s \quad (2-5)$$

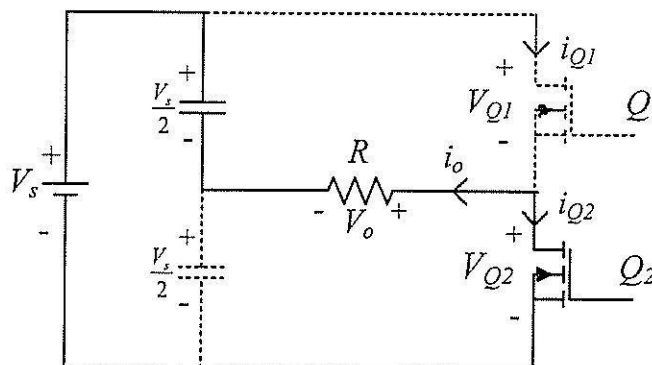
ดังนั้นจะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตตัวที่ 2 ตามสมการที่ (2-6)

$$i_{Q2} = 0 \quad (2-6)$$

โหมดที่ 2 พิจารณาช่วง  $Q_2$  นำกระแส และ  $Q_1$  หยุดนำกระแส

-  $Q_2$  นำกระแส

จากรูปวงจรที่ 2.1 เมื่อมอสเฟต  $Q_2$  นำกระแส วงจรสมมูลจะเป็นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลในโหมดที่ 2

จากรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (2-7)

$$\frac{V_s}{2} - V_o + V_{Q2} - V_s = 0 \quad (2-7)$$

การวิเคราะห์ในเบื้องต้นได้กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟตในสถานะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 0 V ( $V_{Q2} = 0$ ) เมื่อแทนค่าแรงดันดังกล่าวเท่ากับ 0 V สมการที่ (2-7) จะเป็นดังสมการที่ (2-8)

$$V_o = -\frac{V_s}{2} \quad (2-8)$$



ดังนั้นจะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตตัวที่ 2 ตามสมการที่ (2-9)

$$i_{Q2} = -i_o = -\frac{V_o}{R} = \frac{V_s}{2R} \quad (2-9)$$

-  $Q_1$  หยุดนำกระแส

จากรูปวงจรที่ 2.3 เมื่อมอสเฟต  $Q_1$  หยุดนำกระแส และจากรูปดังกล่าวเมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (2-10)

$$V_{Q1} + V_o + \frac{V_s}{2} - V_s = 0 \quad (2-10)$$

การวิเคราะห์ในเบื้องต้นเมื่อนำค่า  $V_o$  ในสมการที่ (2-8) แทนลงในสมการที่ (2-10) จะเป็นดังสมการที่ (2-11)

$$V_{Q1} = V_s \quad (2-11)$$

ดังนั้นจะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตตัวที่ 1 ตามสมการที่ (2-12)

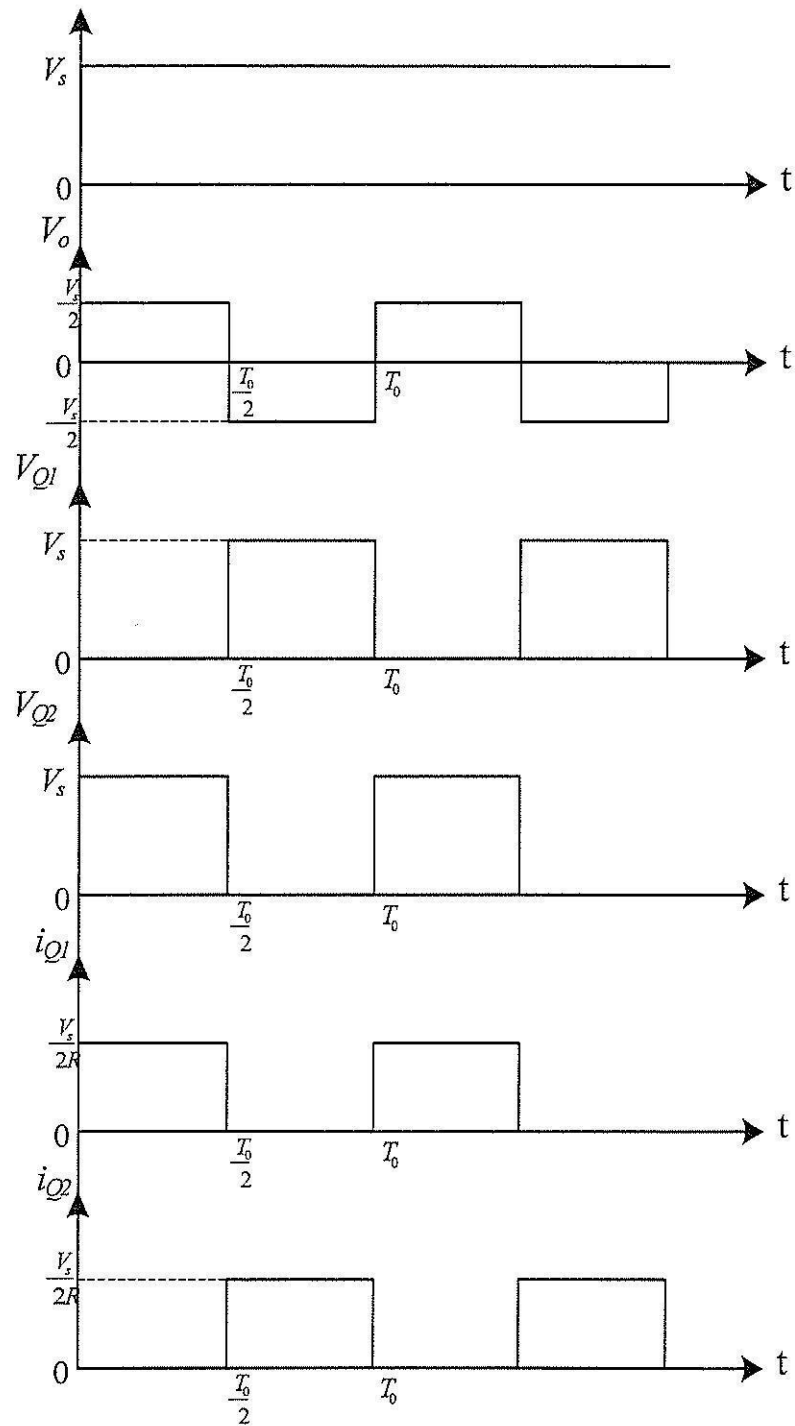
$$i_{Q1} = 0 \quad (2-12)$$

จากการวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์ในแต่ละโหมคข้างต้น ได้รูปสัญญาณของค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.4 จากรูปดังกล่าว เมื่อพิจารณาสมการคำนวณแรงดันไฟฟ้าด้านกลับ ( $V_{BR}$  : Peak Reverse Blocking Voltage) จะได้ดังสมการที่ (2-13) ในขณะที่สมการคำนวณกระแสมอสเฟตสูงสุด ( $I_{Q,peak}$ ) จะได้ดังสมการที่ (2-14)

$$V_{BR} = V_s \quad (2-13)$$

$$I_{Q,peak} = \frac{V_s}{2R} \quad (2-14)$$

และสมการกระแสมอสเฟตเฉลี่ย ( $I_{Q,av}$ ) เป็นดังสมการที่ (2-15)



รูปที่ 2.4 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์

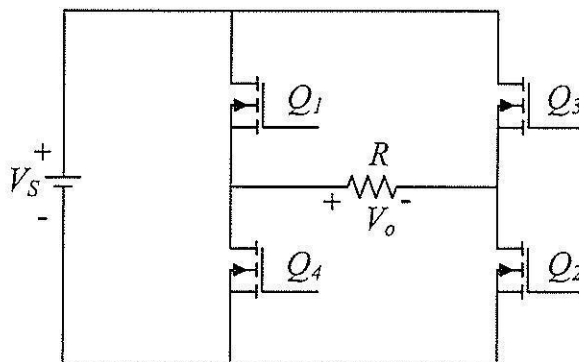
$$\begin{aligned}
 I_{Q,av} &= \frac{1}{T} \int_0^T i_Q(t) dt \\
 &= \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \frac{V_s}{2R} dt \\
 &= \frac{V_s}{2RT_0} \times \frac{T_0}{2}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น  $I_{Q,av} = \frac{V_s}{4R}$  (2-15)

หมายเหตุ คัด  $i_{Q1}$  หรือ  $i_{Q2}$  ก็ได้เนื่องจาก  $i_{Q1}$  และ  $i_{Q2}$  มีกระแสเฉลี่ยเท่ากัน

### 2.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ เป็นอีกวงจรหนึ่งในการแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ โครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วยมอสเฟตจำนวน 4 ตัว ดังรูปที่ 2.5



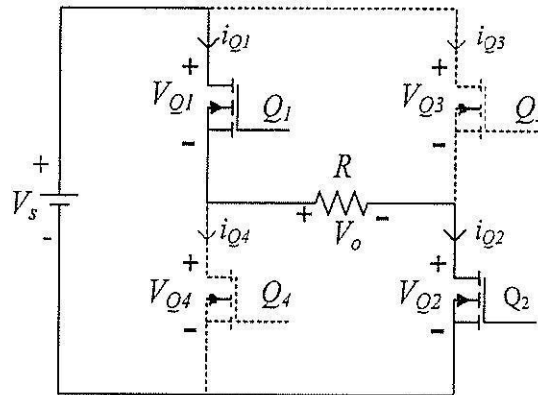
รูปที่ 2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์

จากวงจรดังรูปที่ 2.5 สามารถพิจารณาโหมดการทำงานได้เป็น 2 โหมดดังนี้

โหมดที่ 1 พิจารณาช่วง  $Q_1, Q_2$  นำกระแส และ  $Q_3, Q_4$  หยุดนำกระแส

-  $Q_1, Q_2$  นำกระแส

จากรูปวงจรที่ 2.5 เมื่อมอสเฟต  $Q_1, Q_2$  นำกระแส วงจรสมมูลจะเป็นดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลในโหมดที่ 1

จากรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (2-16)

$$V_{Q1} + V_o + V_{Q2} - V_s = 0 \quad (2-16)$$

การวิเคราะห์ในเบื้องต้นได้กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟตในสภาวะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 0 V ( $V_{Q1} = V_{Q2} = 0$ ) เมื่อแทนค่าแรงดันดังกล่าวเท่ากับ 0 V แล้ว สมการที่ (2-16) จะเป็นดังสมการที่ (2-17)

$$V_o = V_s \quad (2-17)$$

ดังนั้นจะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตตัวที่ 1 และ 2 ตามสมการที่ (2-18)

$$i_{Q1,2} = i_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_s}{R} \quad (2-18)$$

-  $Q_3, Q_4$  หยุดนำกระแส

จากรูปวงจรที่ 2.6 เมื่อมอสเฟต  $Q_3, Q_4$  หยุดนำกระแส และจากรูปดังกล่าวเมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (2-19)

$$V_{Q3} - V_o + V_{Q4} - V_s = 0 \quad (2-19)$$



$$V_o = -V_s \quad (2-23)$$

ดังนั้นจะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตตัวที่ 3 และ 4 ตามสมการที่ (2-24)

$$i_{Q3,4} = -i_o = -\frac{V_o}{R} = \frac{V_s}{R} \quad (2-24)$$

-  $Q_1, Q_2$  หุคนำกระแส

จากรูปวงจรที่ 2.7 เมื่อมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_2$  หุคนำกระแส และจากรูปดังกล่าวเมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (2-25)

$$V_{Q1} + V_o + V_{Q2} - V_s = 0 \quad (2-25)$$

การวิเคราะห์ในเบื้องต้นได้กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟตมีค่าเท่ากัน ( $V_{Q1} = V_{Q2} = V_Q$ ) และจากสมการที่ (2-23) เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2-25) จะเป็นดังสมการที่ (2-26)

$$V_Q = V_s \quad (2-26)$$

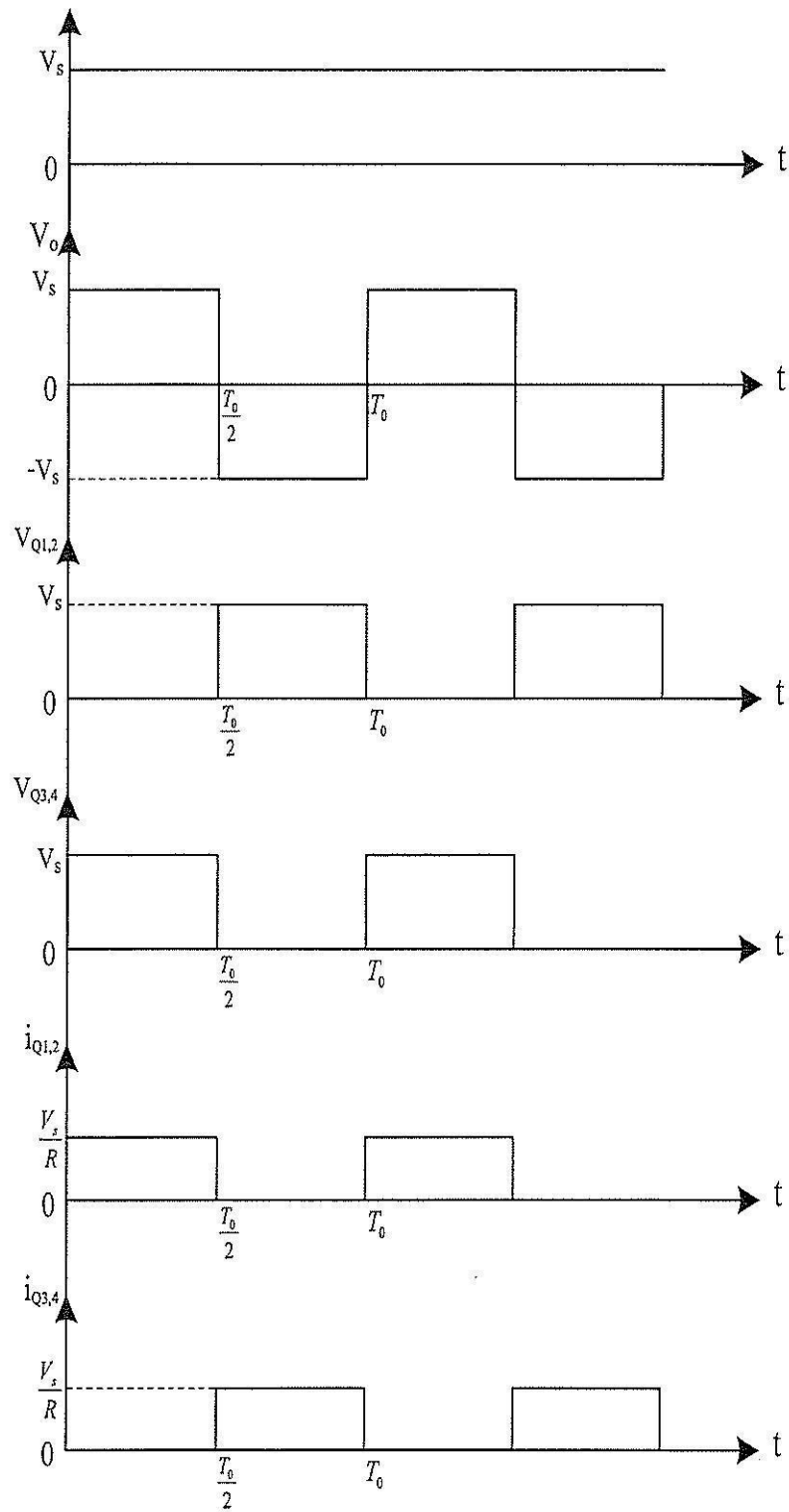
ดังนั้นจึงได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตตัวที่ 1 และ 2 ตามสมการที่ (2-27)

$$i_{Q1,2} = 0 \quad (2-27)$$

จากการวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ในแต่ละโหมคข้างต้น จะได้รูปสัญญาณของค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.8 และจากรูปสัญญาณดังกล่าว การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ ( $V_{BR}$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (2-28) ในขณะที่การคำนวณค่ากระแสมอสเฟตสูงสุด ( $I_{Q,peak}$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (2-29)

$$V_{BR} = V_s \quad (2-28)$$

$$I_{Q,peak} = \frac{V_s}{R} \quad (2-29)$$



รูปที่ 2.8 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์

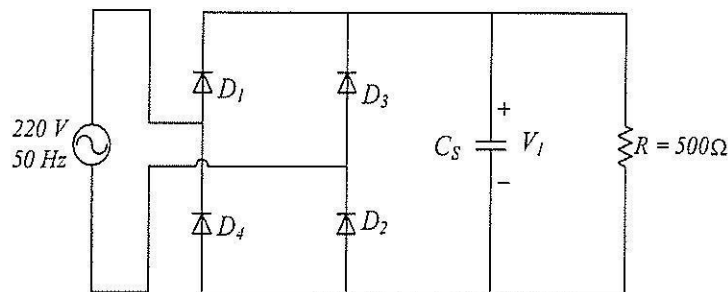
และการคำนวณกระแสเฉลี่ย ( $I_{Q,av}$ ) ได้จากสมการที่ (2-30)

$$\begin{aligned} I_{Q,av} &= \frac{1}{T} \int_0^T i_Q(t) dt \\ &= \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \frac{V_s}{R} dt \\ &= \frac{V_s}{RT_0} \times \frac{T_0}{2} \end{aligned}$$

ดังนั้น 
$$I_{Q,av} = \frac{V_s}{2R} \quad (2-30)$$

#### 2.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 2.5 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะได้อมาจากวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ดังรูปที่ 2.10 โดยจากรูปดังกล่าวสมมติให้ความต้านทานสูงสุดทางฝั่งเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสเท่ากับ  $500 \Omega$  และตัวเก็บประจุ  $C_s$  จะทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันปลิว (ripple voltage) ของแรงดันเอาต์พุต โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าแรงดันปลิว ( $V_{r(pp)}$ ) ให้มีค่าเท่ากับ 1% ของแรงดันสูงสุดที่แหล่งจ่าย



รูปที่ 2.10 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้นสามารถออกแบบค่าตัวเก็บประจุ  $C_s$  ได้ตามขั้นตอนดังนี้  
ขั้นที่ 1 คำนวณค่าตัวเก็บประจุ

จากสมการ 
$$V_{r(pp)} = \frac{V_m}{2fRC_s}$$

$$0.01V_m = \frac{V_m}{2 \times 50 \times 500 \times C_s}$$



ดังนั้นขนาดของตัวเก็บประจุ  $C_s$  จะมีค่าเท่ากับ  $2000 \mu F$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย ( $V_{o,av}$ )

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } V_{o,av} &= V_m - \frac{V_m}{4fRC_s} \\ &= \sqrt{2} \times 220 - \frac{\sqrt{2} \times 220}{4 \times 50 \times 500 \times 2000 \times 10^{-6}} \\ &= 309.57 \text{ V} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย เท่ากับ  $309.57 \text{ V}$

ขั้นที่ 3 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับด้านลบของไดโอด ( $V_{RRM}$ )

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (2-14) } V_{RRM} &= V_m \\ &= \sqrt{2} \times 220 \\ &= 311.13 \times 1.25 \text{ (safety factor 25\%)} \\ &= 388.91 \text{ V} \approx 400 \text{ V} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าแรงดันแรงดันไฟฟ้าด้านกลับด้านลบของไดโอด เท่ากับ  $400 \text{ V}$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่ากระแสไดโอดเฉลี่ย ( $I_{D,av}$ )

$I_{D,av} = 10 \text{ A}$  (เป็นค่าที่กำหนดเอาไว้เพราะกระแสโหลดที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับจะมีค่าไม่เกิน  $10 \text{ A}$ )

จากการออกแบบวงจรข้างต้น สามารถนำค่าที่ได้ไปเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้ศึกษาจากเอกสารข้อมูลแล้วพบว่าไดโอดเบอร์ GPBC1504 มีค่าตรงกับความต้องการที่ออกแบบไว้แล้ว คือ  $V_{RRM} = 400 \text{ V}$  และ  $I_{D,av} = 12 \text{ A}$  (ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้) และจากรูปที่ 2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ ได้กำหนดให้นำค่าที่ได้จากการออกแบบที่ได้กล่าวแล้วในข้างต้น คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยจากวงจรเรียงกระแส เท่ากับ  $309.57 \text{ V}$  จากค่าดังกล่าวนี้ สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการเลือกอุปกรณ์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ในงานวิจัยนี้ได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับ

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (2-28) } V_{BR} &= V_s \\ &= 309.57 \times 1.25 \text{ (safety factor 25\%)} \\ &= 386.96 \text{ V} \approx 400 \text{ V} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าด้านกลับ เท่ากับ 400 V

ขั้นที่ 2 คำนวณค่ากระแส MOSFET เฉลี่ย

$$I_{Q,av} = 10 \text{ A} \quad (\text{เงื่อนไขเกี่ยวกับการออกแบบวงจรเรียงกระแส})$$

จากการออกแบบวงจรข้างต้น สามารถนำค่าที่ได้ไปเลือกอุปกรณ์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบเต็มบริดจ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้ศึกษาจากเอกสารข้อมูลแล้วพบว่า มอสเฟตเบอร์ STW12NK80Z มีค่าตรงกับความต้องการที่ออกแบบไว้

## 2.5 บอร์ด dsPIC30F2010

### 2.5.1 โครงสร้างบอร์ด dsPIC30F2010

การควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในงานวิจัยนี้ใช้บอร์ด dsPIC30F2010 ของบริษัท ETT ทั้งนี้เนื่องจากบอร์ดดังกล่าวมีราคาไม่สูงมากนัก อีกทั้งสามารถหาซื้อได้ในประเทศไทย การนำเสนอรายละเอียดต่าง ๆ ของบอร์ด dsPIC30F2010 ในหัวข้อนี้มีการอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างบอร์ด และโปรแกรมสำหรับสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับมอสเฟต ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ บอร์ด ET-dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0 EXP ประกอบไปด้วยวงจรพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการศึกษาเรียนรู้และทดลองใช้งานทรัพยากรต่าง ๆ ของ MCU ตระกูล dsPIC โดยภายในบอร์ดได้จัดเตรียมวงจรใช้งานที่จำเป็นไว้อย่างครบถ้วน (สามารถดูรูปโครงสร้างของบอร์ดได้ดังรูปที่ 2.11) ได้แก่

- ใช้ dsPIC30F2010 เป็น MCU ประจำบอร์ด
- วงจร LED แสดงผลแบบ Sink Current ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า +5V โดยใช้ LED สีแดงขนาด 3 mm. จำนวน 4 ชุด สำหรับใช้ในการทดสอบการทำงานของเอาต์พุตต่าง ๆ
- วงจรปรับแรงดัน 0-5V โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเก็อกม้าชนิดมีแกนปรับ จำนวน 4 ชุด สำหรับใช้ในการทดสอบการทำงานของ A/D
- วงจร Push-Button Switch จำนวน 4 ชุดสำหรับใช้ทดสอบการทำงานของอินพุตต่าง ๆ
- วงจร Mini Speaker สำหรับใช้ทดสอบการกำเนิดเสียง Beep หรือเสียงอื่น ๆ
- พื้นที่สำหรับต่อวงจรเพิ่มเติมขนาด 8 cm. x 4.5 cm. หรือใช้เป็นพื้นที่ติดตั้งบอร์ดอเนกประสงค์รุ่น AD100 ขนาด 360 จุด สำหรับต่อทดลองวงจรต่าง ๆ

### คุณสมบัติของ dsPIC30F2010

dsPIC30F2010 เป็น MCU ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลแบบ 16 บิต มีจุดเด่นในด้านของความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัล สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่าง ๆ โครงสร้างภายในเป็นการผสมผสานระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจร DSP (digital signal processing) รวมเข้าไว้ด้วยกัน หรืออาจเรียก MCU ตระกูล dsPIC ว่าเป็น DSC หรือ Digital Signal Controller ก็ได้

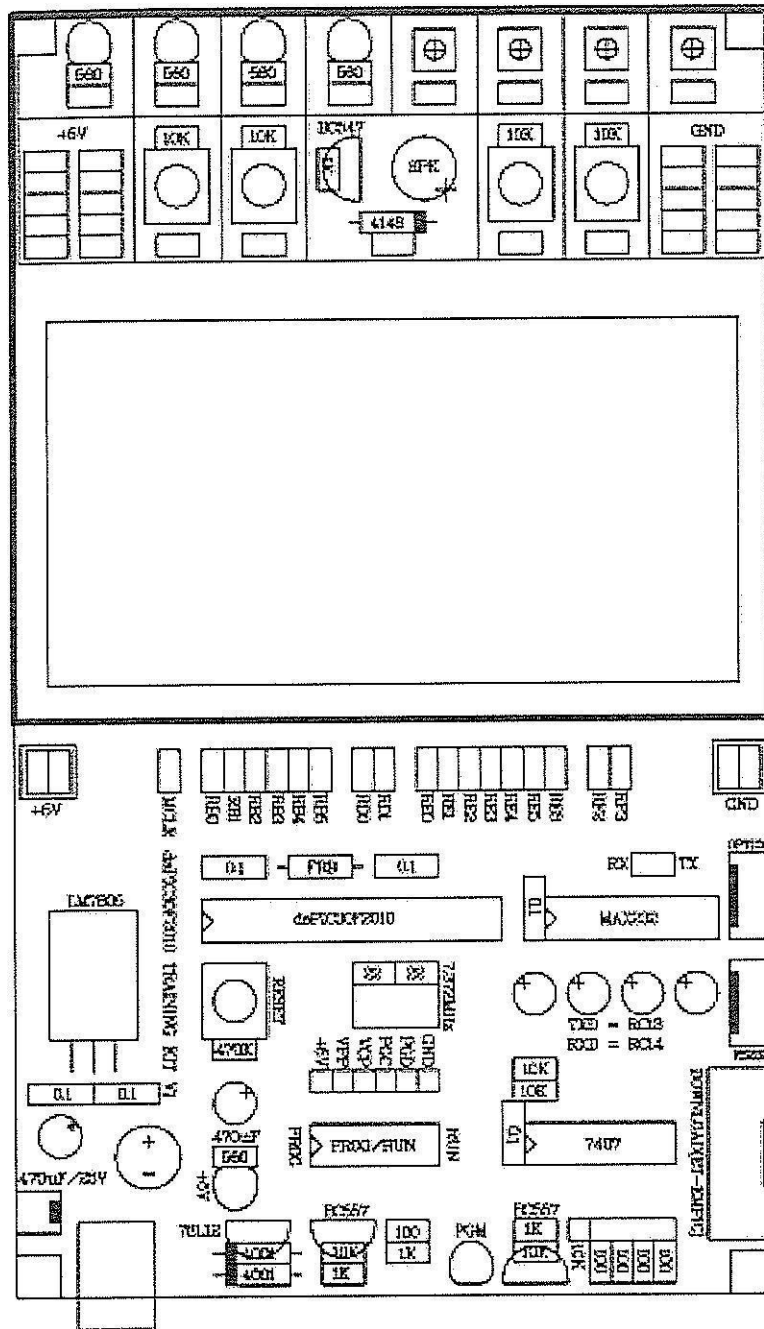
### คุณสมบัติด้านการประมวลผล

- มีหน่วยความจำ RAM ขนาด 512 Byte
- มีหน่วยความจำข้อมูลถาวรแบบ EEPROM ขนาด 1 Kbyte
- สามารถประมวลผลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 30 MIPS (30 ล้านคำสั่งต่อวินาที)
- รองรับสัญญาณนาฬิกาจากแหล่งกำเนิดภายนอก 0-40 MHz
- รองรับการใช้งานกับแหล่งกำเนิดความถี่แบบ XTAL ในย่าน 4-10 MHz
- มีวงจรควบคุมความถี่ภายในแบบ Phase-Lock-Loop โดยสามารถกำหนดค่าอัตราการคูณความถี่ได้ 3 ระดับ คือ 4 เท่า 8 เท่า และ 16 เท่า
- รองรับการขัดจังหวะ (interrupt) ได้ถึง 27 แหล่ง พร้อมสัญญาณขัดจังหวะจากภายนอก 3 แหล่ง และสามารถจัดระดับความสำคัญของการขัดจังหวะได้ 8 ระดับ

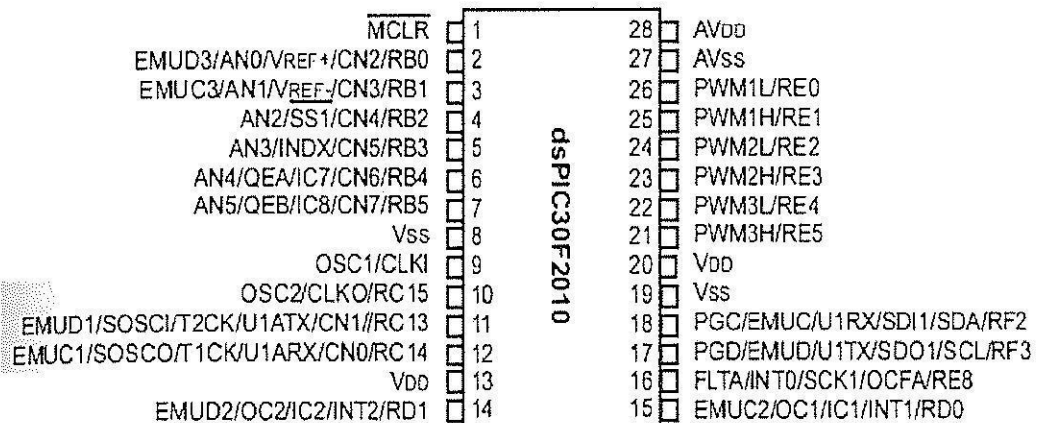
### คุณสมบัติของ Peripheral I/O

- ขาสัญญาณ I/O สามารถจ่ายกระแส และ รับกระแส ได้มากถึง 25 mA
- มี Timer ขนาด 16 บิต จำนวน 3 ชุด และสามารถโปรแกรมใช้งานเป็น Timer แบบ 32 บิตได้โดยใช้ Timer 16 บิต 2 ช่องรวมกัน มี Input Capture ขนาด 16 บิต จำนวน 4 ช่อง
- มี Output Compare/PWM ขนาด 16 บิต จำนวน 2 ช่อง
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ I2C จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ UART จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจร DCPWM สำหรับใช้ควบคุมมอเตอร์ 3 ช่อง
- มีวงจรถอดรหัสแบบ QEIM ขนาด 16 บิต จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจร A/D ขนาด 10 บิต จำนวน 6 ช่อง

หมายเหตุ สามารถดูรายละเอียดต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 โครงสร้างบอร์ด ET - dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0/EXP



รูปที่ 2.12 การจัดเรียงขาสัญญาณของ dsPIC30F2010

### 2.5.2 โปรแกรมสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับมอเตอร์

โปรแกรมที่เขียนบนบอร์ด dsPIC30F2010 สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้สำหรับการจุดชนวนให้กับมอเตอร์ โปรแกรมดังกล่าวใช้ภาษาซีในการสร้างโปรแกรม ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 โปรแกรม โดยโปรแกรมแรก คือ โปรแกรมสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับมอเตอร์โดยใช้คำสั่ง if เป็นตัวหยุดการทำงาน โปรแกรมที่ 2 เป็นโปรแกรมสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับมอเตอร์โดยใช้ interrupt เป็นตัวหยุดการทำงาน และโปรแกรมสุดท้ายเป็นโปรแกรมสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับมอเตอร์ โดยสามารถเลือกความถี่ได้หลายความถี่

โปรแกรมสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับมอเตอร์ โดยใช้ if เป็นตัวสั่งหยุดการทำงาน

```
#include "p30f2010a2.h"

/* Setup Configuration For ET-dsPIC30F2010 */
_FOSC(CSW_FSCM_ON & XT_PLL16);
_FWDT(WDT_OFF);
_FBORPOR(PBOR_ON & BORV_45 & PWRT_64 & MCLR_EN);
_FGS(CODE_PROT_OFF);

/* End Configuration For ET-dsPIC30F2010 */

void delay_D(unsigned long int);           //ประกาศ ฟังก์ชัน delay_D
void delay_TD(unsigned long int);         //ประกาศ ฟังก์ชัน delay_TD
int main(void)                             //ฟังก์ชันหลัก
{
```

```

unsigned long int D;           //ประกาศตัวแปร
unsigned long int TD;         //ประกาศตัวแปร
D=26667;                      //กำหนดค่า ในการหน่วงเวลา
TD=266;                       //กำหนดค่า ในการหน่วงเวลา
TRISBbits.TRISB0 = 0;        //กำหนด pin RB0 เป็น output
TRISBbits.TRISB1 = 0;        //กำหนด pin RB1 เป็น output
LATBbits.LATB0 = 0;          //set bit RB0 = 0
LATBbits.LATB1 = 0;          //set bit RB1 = 0
while(1)
{
    if(PORTEbits.RE8==1)     //ถ้า RE8=1 จะทำในลูป if ถ้า = 0 ไม่ทำใน if
    {
        LATBbits.LATB0 = 1;  //ให้ RB0 = 1
        delay_D(D);          //หน่วงเวลาในการ on 10 ms
        LATBbits.LATB0=0;    //ให้ RB0 = 0
        delay_TD(TD);        //หน่วงเวลา dead-time 100µs
        LATBbits.LATB1 = 1;  //ให้ RB1 = 1
        delay_D(D);          //หน่วงเวลาในการ on 10 ms
        LATBbits.LATB1=0;    //ให้ RB1 = 0
        delay_TD(TD);        //หน่วงเวลา dead-time 100µs
    }
}

}

void delay_D(unsigned long int count1) //ฟังก์ชันของการหน่วงเวลาในการ on
{
    while(count1 > 0) {count1--;}
}

void delay_TD(unsigned long int count2) //ฟังก์ชันของการหน่วงเวลา dead-time
{
    while(count2 > 0) {count2--;}
}

```

}

ก่อนการทดลองให้ผู้ทำการทดลองดำเนินการต่อบอร์ดตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ต่อ RE8 ของบอร์ด ET - dsPIC30F2010 เข้ากับ SW1

ขั้นที่ 2 ต่อ RB0 ของบอร์ด ET - dsPIC30F2010 เข้ากับ Scope ch1

ขั้นที่ 3 ต่อ RB1 ของบอร์ด ET - dsPIC30F2010 เข้ากับ Scope ch2

หมายเหตุ ผู้อ่านสามารถดูรายละเอียดของแต่ละขาได้จากรูปที่ 2.11

การทำงานของโปรแกรมจะเป็นการกำหนดให้ RB0 และ RB1 ทำหน้าที่เป็น output โดยทำงาน on และ off สลับกันโดยช่วง on จะทำการหน่วงเวลาที่ค่าหนึ่ง จากนั้นกำหนดการทำงานของ RE8 ให้เป็น input ถ้าสัญญาณที่เข้ามาเป็น 1 โปรแกรมจะทำงานตามปกติ แต่ถ้าเป็น 0 โปรแกรมจะตัดสัญญาณ output โดยมีค่าเป็น 0 รองนกว่า RE8 จะมีค่าเป็น 1 จึงจะทำงานตามปกติ

โปรแกรมสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับมอเตอร์ โดยใช้ *INTERRUPT* เป็นตัวสั่งหยุดการทำงาน

```
#include "p30f2010a2.h"
#include "ports.h"

/* Setup Configuration For ET-dsPIC30F2010 */
_FOSC(CSW_FSCM_ON & XT_PLL16);
_FWDT(WDT_OFF);
_FBORPOR(PBOR_ON & BORV_45 & PWRT_64 & MCLR_EN);
_FGS(CODE_PROT_OFF);

/* End Configuration For ET-dsPIC30F2010 */

void delay_D(unsigned long int); //ประกาศฟังก์ชัน delay_D
void delay_TD(unsigned long int); //ประกาศฟังก์ชัน delay_TD
void _ISR_INT0Interrupt(void) //ฟังก์ชันของการ อินเทอร์รัพ
{
    while(1)
    {
        LATBbits.LATB0 = 0; //กำหนดให้ RB0 = 0
        LATBbits.LATB1 = 0; //กำหนดให้ RB1 = 0
    }
}
```

```

while(PORTEbits.RE8 =0); //รอสัญญาณ จาก RE8 ถ้า = 0 อินเตอรัพท์จะทำงาน
IFS0bits.INT0IF = 0; // Reset INT0 Interrupt Flag

int main(void) //ฟังก์ชันหลัก
{
    unsigned long int D; //ประกาศตัวแปร
    unsigned long int TD; //ประกาศตัวแปร
    D=26667;
    TD=266;
    TRISBbits.TRISB0 = 0; //กำหนด RB0 เป็น output
    TRISBbits.TRISB1 = 0; //กำหนด RB1 เป็น output
    ConfigINT0(FALLING_EDGE_INT & // Falling Edge Trigger Interrupt
    EXT_INT_ENABLE & // Enable INT0 Interrupt
    EXT_INT_PRI_6); //กำหนด Priority = 6
    LATBbits.LATB0 = 0; //set bit RB0 = 0
    LATBbits.LATB1 = 0; //set bit RB0 = 0
    while(1)
    {
        LATBbits.LATB0 = 1; //ให้ RB0 = 1
        delay_D(D); //หน่วงเวลาในการ on 10 ms
        LATBbits.LATB0=0; //ให้ RB0 = 0
        delay_TD(TD); //หน่วงเวลา dead-time 100µs
        LATBbits.LATB1 = 1; //ให้ RB1= 1
        delay_D(D); //หน่วงเวลาในการ on 10 ms
        LATBbits.LATB1=0; //ให้ RB1= 0
        delay_TD(TD); //หน่วงเวลา dead-time 100µs
    }
}

void delay_D(unsigned long int count1) //ฟังก์ชันของการหน่วงเวลาในการ on
{

```



```

        while(count1 > 0) {count1--;}
    }
    void delay_TD(unsigned long int count2)    //ฟังก์ชันของการหน่วงเวลาในการ dead-time
    {
        while(count2 > 0) {count2--;}
    }

```

การต่อวงจรและการทำงานของโปรแกรมหดงกล่าวข้างต้นจะเหมือนกันกับโปรแกรมก่อนหน้า แต่จะต่างที่โปรแกรมนี้ใช้การ INTERRUPT เป็นตัวหยุดการทำงาน โดยถ้า RE8 = 1 โปรแกรมจะทำงานตามปกติ แต่ถ้า RE8 = 0 โปรแกรม INTERRUPT จะทำงานโดย SET ให้ output เป็น 0 และวงจรจะค้างอยู่สถานะนี้ตลอด จนกว่าจะมีการโหลดโปรแกรมใหม่

โปรแกรมสร้างสัญญาณจุดชนวนให้กับมอเตอร์ โดยผู้ใช้สามารถเลือกความถี่ได้หลายความถี่

```

#include "p30f2010a2.h"
#include "ports.h"
/* Setup Configuration For ET-dsPIC30F2010 */
_FOSC(CSW_FSCM_ON & XT_PLL16);
_FWDT(WDT_OFF);
_FBORPOR(PBOR_ON & BORV_45 & PWRT_64 & MCLR_EN);
_FGS(CODE_PROT_OFF);
/* End Configuration For ET-dsPIC30F2010 */
void delay_D(unsigned long int);           //ประกาศฟังก์ชัน delay_D
void delay_TD(unsigned long int);         //ประกาศฟังก์ชัน delay_TD
int main(void)                             //ฟังก์ชันหลัก
{
    unsigned long int D;                   //ประกาศตัวแปร D
    unsigned long int TD;                  //ประกาศตัวแปร TD
    TRISB = 0b00000000;                   //กำหนดพอร์ต RB เป็น output
    TRISE = 0b11111111;                   //กำหนดพอร์ต RE เป็น input
    if((PORTEbits.RE0==0 &(PORTEbits.RE1==0) &(PORTEbits.RE2==0)) // 10 Hz
    {

```

```

D=133494;
TD=450;
while(1)
{
    LATBbits.LATB0 = 1;           //ให้ RB0 = 1
        delay_D(D);             //หน่วงเวลาในการ on 50 ms
    LATBbits.LATB0 = 0;           //ให้ RB0 = 0
        delay_TD(TD);           //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
    LATBbits.LATB1 = 1;           //ให้ RB1 = 1
        delay_D(D);             //หน่วงเวลาในการ on 50 ms
    LATBbits.LATB1 = 0;           //ให้ RB1 = 0
        delay_TD(TD);           //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
}
}
else if((PORTEbits.RE0== 0) &(PORTEbits.RE1==0) &(PORTEbits.RE2==1)) // 30 Hz
{
    D=44219;
    TD=450;
while(1)
{
    LATBbits.LATB0 = 1;           //ให้ RB0 = 1
        delay_D(D);             //หน่วงเวลาในการ on 1.667ms
    LATBbits.LATB0 = 0;           //ให้ RB0 = 0
        delay_TD(TD);           //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
    LATBbits.LATB1 = 1;           //ให้ RB1 = 1
        delay_D(D);             //หน่วงเวลาในการ on 1.667ms
    LATBbits.LATB1 = 0;           //ให้ RB1 = 0
        delay_TD(TD);           //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
}
}
}

```

```

else if((PORTEbits.RE0==0) &(PORTEbits.RE1==1) &(PORTEbits.RE2==0)) // 50 Hz
{
    D = 26351;
    TD = 450;
    while(1)
    {
        LATBbits.LATB0 = 1; //ให้ RB0 = 1
        delay_D(D); //หน่วงเวลาในการ on 1 ms
        LATBbits.LATB0 = 0; //ให้ RB0 = 0
        delay_TD(TD); //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
        LATBbits.LATB1 = 1; //ให้ RB1 = 1
        delay_D(D); //หน่วงเวลาในการ on 1 ms
        LATBbits.LATB1 = 0; //ให้ RB1 = 0
        delay_TD(TD); //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
    }
}
else if((PORTEbits.RE0==0) &(PORTEbits.RE1==1) &(PORTEbits.RE2==1)) // 70 Hz
{
    D=18690;
    TD=450;
    while(1)
    {
        LATBbits.LATB0 = 1; //ให้ RB0 = 1
        delay_D(D); //หน่วงเวลาในการ on 714µs
        LATBbits.LATB0 = 0; //ให้ RB0 = 0
        delay_TD(TD); //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
        LATBbits.LATB1 = 1; //ให้ RB1 = 1
        delay_D(D); //หน่วงเวลาในการ on 714µs
        LATBbits.LATB1 = 0; //ให้ RB1 = 0
        delay_TD(TD); //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
    }
}

```



```

        LATBbits.LATB1= 0;           //ให้ RB1= 0
        delay_TD(TD);               //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
    }
}
else if((PORTEbits.RE0==1) &(PORTEbits.RE1==1) &(PORTEbits.RE2==0)) // 130 Hz
{
    D=9848;
    TD=450;
    while(1)
    {
        LATBbits.LATB0 = 1;         //ให้ RB0 = 1
        delay_D(D);                 //หน่วงเวลาในการ on 384.615µs
        LATBbits.LATB0 = 0;         //ให้ RB0 = 0
        delay_TD(TD);               //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
        LATBbits.LATB1 = 1;         //ให้ RB1 = 1
        delay_D(D);                 //หน่วงเวลาในการ on 384.615µs
        LATBbits.LATB1 = 0;         //ให้ RB1 = 0
        delay_TD(TD);               //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
    }
}
else if((PORTEbits.RE0==1) &(PORTEbits.RE1==1) &(PORTEbits.RE2==1)) // 150 Hz
{
    D=8475;
    TD=450;
    while(1)
    {
        LATBbits.LATB0 = 1;         //ให้ RB0 = 1
        delay_D(D);                 //หน่วงเวลาในการ on 333.33µs
        LATBbits.LATB0 = 0;         //ให้ RB0 = 0
        delay_TD(TD);               //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
    }
}

```

```

LATBbits.LATB1 = 1;           //ให้ RB1= 1
    delay_D(D);               //หน่วงเวลาในการ on 333.33µs
LATBbits.LATB1=0;           //ให้ RB1= 0
    delay_TD(TD);            //หน่วงเวลา dead-time 166.5µs
}
}
}
void delay_D(unsigned long int count1) //ฟังก์ชันของการหน่วงเวลาในการ on
{
    while(count1 > 0) {count1--;}
}
void delay_TD(unsigned long int count2) //ฟังก์ชันของการหน่วงเวลา dead-time
{
    while(count2 > 0) {count2--;}
}
}

```

ก่อนการทดลองให้ผู้ทำการทดลองดำเนินการต่อบอร์ดตามขั้นตอนต่อไปนี้

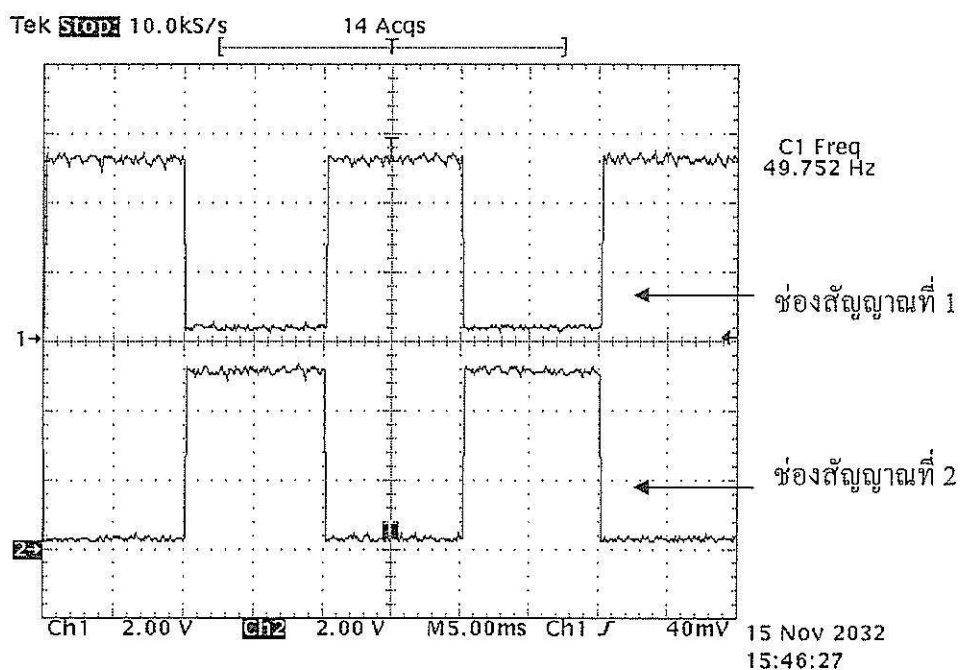
- ขั้นที่ 1 ต่อ RE8 ของบอร์ด ET - dsPIC30F2010 เข้ากับ SW1
  - ขั้นที่ 2 ต่อ RB0 ของบอร์ด ET - dsPIC30F2010 เข้ากับ Scope ch1
  - ขั้นที่ 3 ต่อ RB1 ของบอร์ด ET - dsPIC30F2010 เข้ากับ Scope ch2
  - ขั้นที่ 4 ต่อ RE0 ของบอร์ด ET - dsPIC30F2010 เข้ากับ Gnd/Vcc
  - ขั้นที่ 5 ต่อ RE1 ของบอร์ด ET - dsPIC30F2010 เข้ากับ Gnd/Vcc
  - ขั้นที่ 6 ต่อ RE2 ของบอร์ด ET - dsPIC30F2010 เข้ากับ Gnd/Vcc
- หมายเหตุ ผู้อ่านสามารถดูรายละเอียดของแต่ละขาได้จากรูปที่ 2.11

โปรแกรมที่นำเสนอข้างต้น จะทำงานเหมือนกันกับโปรแกรมก่อนหน้านี้แต่จะต่างกันตรงที่โปรแกรมนี้สามารถเลือกความถี่ได้หลายความถี่ โดยการต่อ RE0 RE1 RE2 ตามตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการเลือกค่าความถี่ในการใช้งานของโครงการ

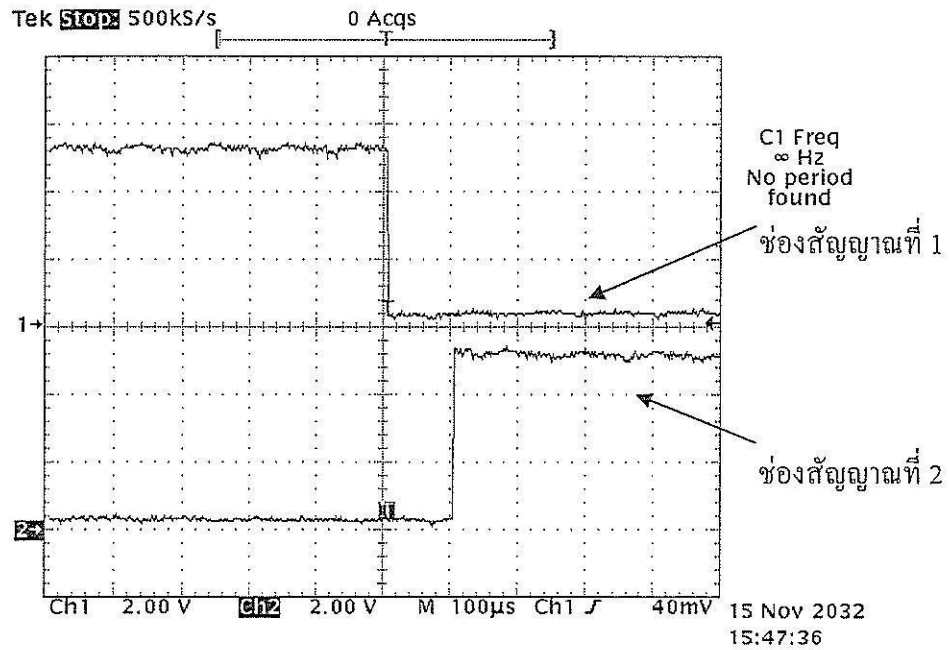
RE0	RE1	RE2	ความถี่ (Hz)
0	0	0	10
0	0	1	30
0	1	0	50
0	1	1	70
1	0	0	90
1	0	1	110
1	1	0	130
1	1	1	150

การประมวลผลของทั้ง 3 โปรแกรม จะได้รูปภาพเหมือนกันดังรูปที่ 2.13 โดยช่องสัญญาณที่ 1 จะเป็นเอาต์พุตของ RB0 ส่วนช่องสัญญาณที่ 2 จะเป็นเอาต์พุตของ RB1 โดย RB0 กับ RB1 จะ on และ off สลับกัน



รูปที่ 2.13 รูปสัญญาณเอาต์พุตเมื่อเวลาประวิงเท่ากับ 10 ms

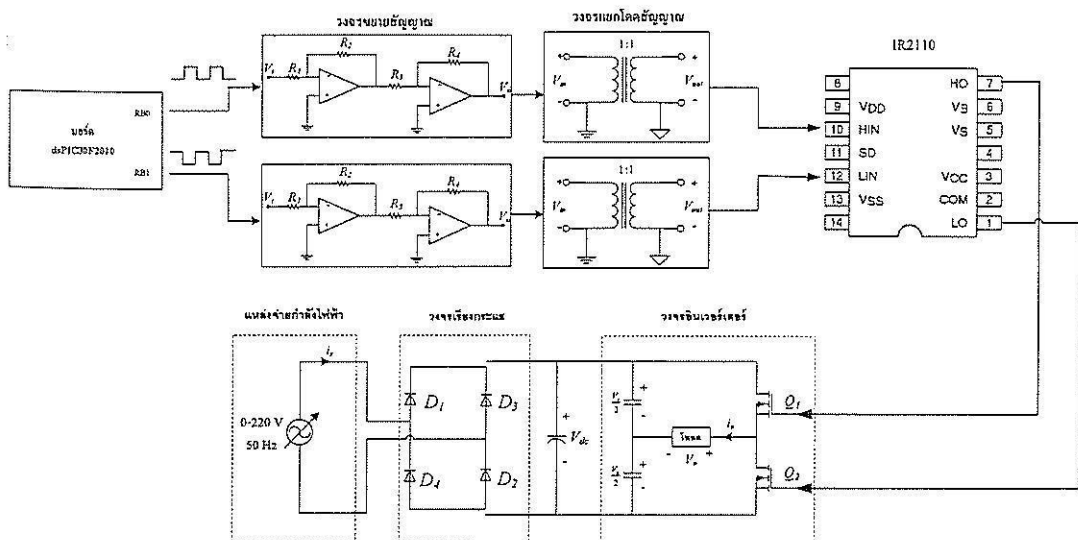
เมื่อนำกราฟรูปที่ 2.13 มาขยายจะเห็นช่วง dead – time ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวแปร TD โดยสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 2.14 ซึ่งได้ผลดังนี้



รูปที่ 2.14 รูปสัญญาณเอาต์พุตที่มี dead-time ประมาณ 100 µs

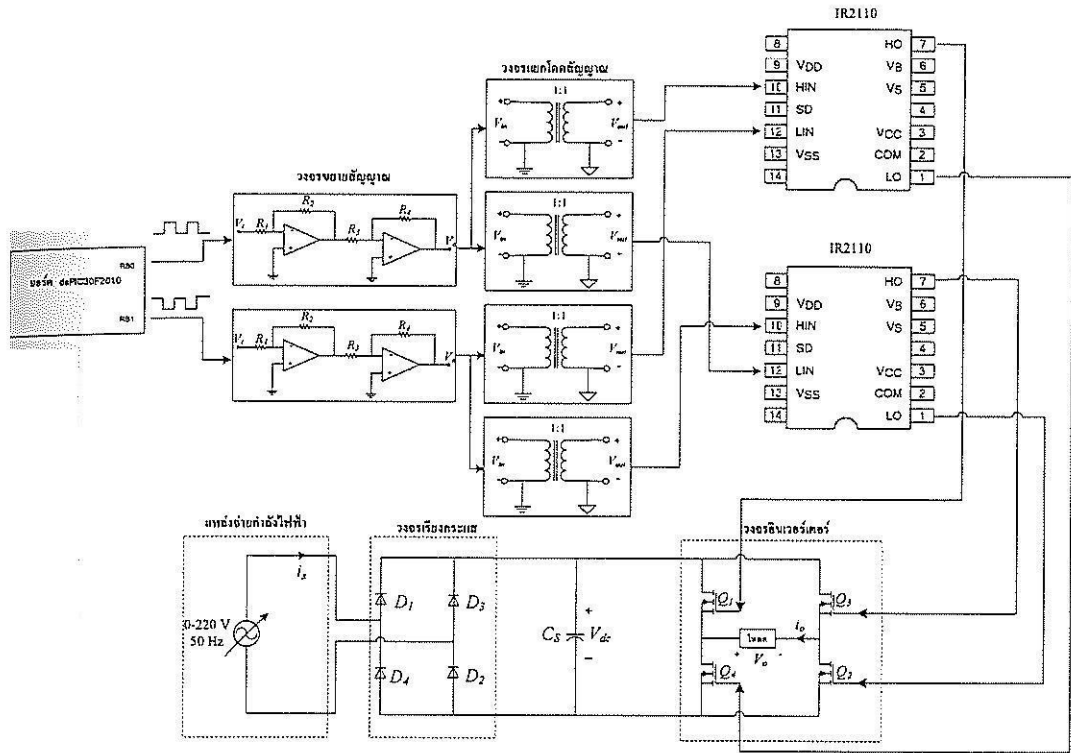
### 2.6 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม

โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม แบบครึ่งบริดจ์และเต็มบริดจ์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์



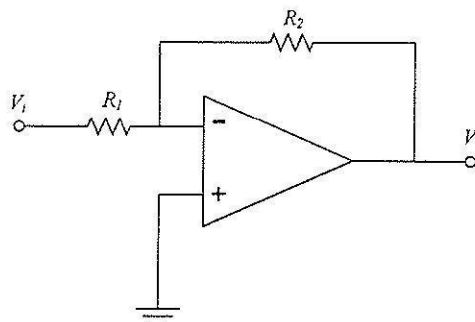


รูปที่ 2.16 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์

จากรูปที่ 2.15 และ 2.16 สังเกตได้ว่า องค์ประกอบหลักที่ใช้สร้างสัญญาณจุดชนวนเกทให้กับมอสเฟตซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ประกอบไปด้วย บอร์ด dsPIC30F2010 วงจรขยายสัญญาณ วงจรแยกโคคสัญญาณ และวงจร IR2110 โดยใน ส่วนรายละเอียดของบอร์ด dsPIC30F2010 ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.5 แต่ในหัวข้อนี้จะ นำเสนอรายละเอียดของวงจรในส่วนที่เหลือ ดังนี้

2.6.1 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

วงจรขยายสัญญาณนี้เป็นวงจรสำหรับขยายสัญญาณไฟฟ้าให้มีขนาดเพิ่มขึ้น โครงสร้าง ของวงจรเป็นดังรูปที่ 2.17

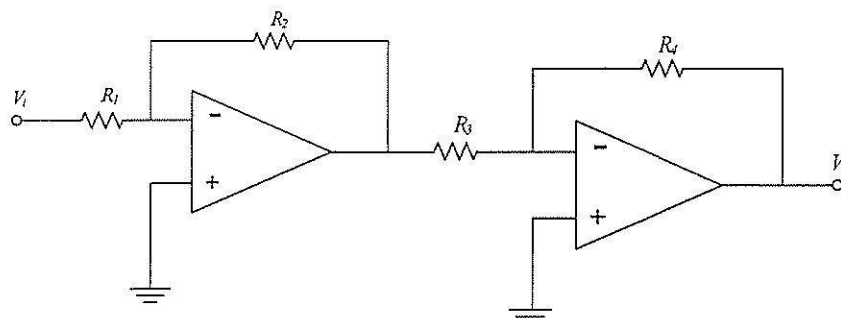


รูปที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

จากรูปที่ 2.17 สัญญาณอินพุต  $V_i$  ถูกป้อนเข้าที่ขาอินเวอร์ต (-) มี  $R_1$  เป็นตัวต้านทาน กำหนดขนาดของสัญญาณอินพุต มี  $R_2$  เป็นตัวต้านทานกำหนดอัตราการป้อนกลับ ถ้าสัญญาณอินพุตซึ่งบวกเข้ามาผ่านออปแอมป์ขยายออกเอาต์พุตเป็นซีกลบ และสัญญาณอินพุตซึ่งลบเข้ามาผ่านออปแอมป์ขยายออกเอาต์พุตเป็นซีกบวก ซึ่งอัตราขยายของวงจรคำนวณได้ดังสมการที่ (2-31) ดังนี้

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (2-31)$$

อัตราขยายสัญญาณของออปแอมป์ตามสมการที่ (2-31) พบว่า สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  การกำหนดอัตราส่วนของ  $R_1$  และ  $R_2$  แตกต่างกัน ทำให้อัตราขยายสัญญาณของวงจรแตกต่างกันด้วย วงจรขยายสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น เมื่อป้อนอินพุตเป็นบวกเอาต์พุตจะเป็นลบหรือเมื่อป้อนอินพุตเป็นลบเอาต์พุตจะเป็นบวก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส 2 วงจรต่อกัน ดังรูปที่ 2.18 และมีการออกแบบวงจรขยายสัญญาณ ดังนี้



รูปที่ 2.18 วงจรขยายสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัย

จากรูปที่ 2.18 ได้นำวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส 2 วงจรมาต่อกันเพื่อให้เอาต์พุตสุดท้ายที่ออกมาจากวงจรขยายสัญญาณมีเฟสตรงกับอินพุตตอนเริ่มต้น แต่มีขนาดแรงดันมากกว่าอินพุตเดิม ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าอินพุตเริ่มต้นที่ได้จากบอร์ด dsPIC30F2010 มีค่าเท่ากับ 5 V และต้องการค่าเอาต์พุตเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้ว เท่ากับ 15 V เพราะว่ามีค่าพิกัดต่าง ๆ ของมอสเฟตแล้วพบว่า แรงดัน 15 V ถือเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้มอสเฟตนำกระแสได้ จากเหตุผลข้างต้นเพื่อดำเนินการคำนวณและเลือกอัตราส่วนความต้านทาน โดยพิจารณาจากค่าเริ่มต้นดังกล่าวสามารถคำนวณเพื่อใช้ในการเลือกอุปกรณ์ในวงจรได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าต้านทานของวงจรขยายวงจรที่ 1

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (2-31)} \quad V_o &= -\frac{R_2}{R_1} V_i \\ 15 &= -\frac{R_2}{R_1} \times 5 \\ \frac{R_2}{R_1} &= 3 \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของค่าความต้านทาน เท่ากับ 3

จากขั้นที่ 1 นี้สามารถเลือกค่าความต้านทานที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าขยายขึ้น 3 เท่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_1 &= 1 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 3 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าต้านทานของวงจรขยายวงจรที่ 2

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (2-31)} \quad V_o &= -\frac{R_4}{R_3} V_i \\ 15 &= -\frac{R_4}{R_3} \times 15 \\ \frac{R_4}{R_3} &= 1 \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของค่าความต้านทาน เท่ากับ 1

จากขั้นที่ 2 นี้วงจรขยายสัญญาณวงจรที่ 2 จะไม่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มากขึ้น แต่จะทำหน้าที่ในการกลับเฟสสัญญาณเอาต์พุต เพื่อให้ได้สัญญาณที่ถูกต้อง ซึ่งเลือกค่าความต้านทานได้ดังนี้

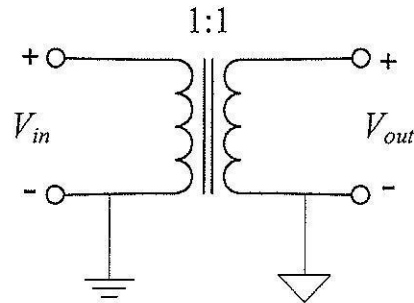
$$\begin{aligned} R_3 &= 1 \text{ k}\Omega \\ R_4 &= 1 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

การสร้างวงจรขยายสัญญาณดังกล่าวจะเลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ 741 เพื่อนำมาสร้างวงจรขยายสัญญาณ จากการออกแบบข้างต้นที่นำเสนอทำให้สัญญาณที่ได้จากบอร์ด dsPIC30F2010 จาก 5 V จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 15 V ตามที่ต้องการ

### 2.6.2 วงจรแยกโคตสัญญาณ

วงจรแยกโคตสัญญาณเป็นวงจรสำหรับแยกกราวด์ของสัญญาณแต่ละสัญญาณให้ออกจากกัน ซึ่งปัญหาของกราวด์นั้นถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญมาก เพราะปัญหากราวด์อาจทำให้เกิดความ

เสียหายแก่วงจรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้หม้อแปลงแบบพัลส์เป็นตัวแยกโคตสัญญาณ โครงสร้างของวงจรเป็นดังรูปที่ 2.19

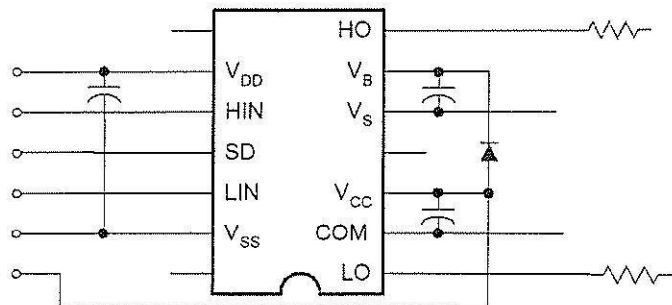


รูปที่ 2.19 วงจรแยกโคตสัญญาณ

จากรูปที่ 2.19 สัญญาณอินพุต  $V_{in}$  ของวงจรแยกโคตสัญญาณ คือ สัญญาณเอาต์พุต  $V_o$  จากวงจรขยายสัญญาณในรูปที่ 2.18 ซึ่งเมื่ออินพุตผ่านวงจรแยกโคตสัญญาณแล้วกราวด์ของฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิ จะแยกออกจากกันอย่างสิ้นเชิง โดยหม้อแปลงแบบพัลส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้หม้อแปลงแบบพัลส์เบอร์ PT4 สามารถหาซื้อได้จากบริษัท อาร์เอส คอมโพเนนท์ จำกัด ซึ่งหม้อแปลงแบบพัลส์เบอร์นี้มีอัตราส่วนของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ เป็น 1:1

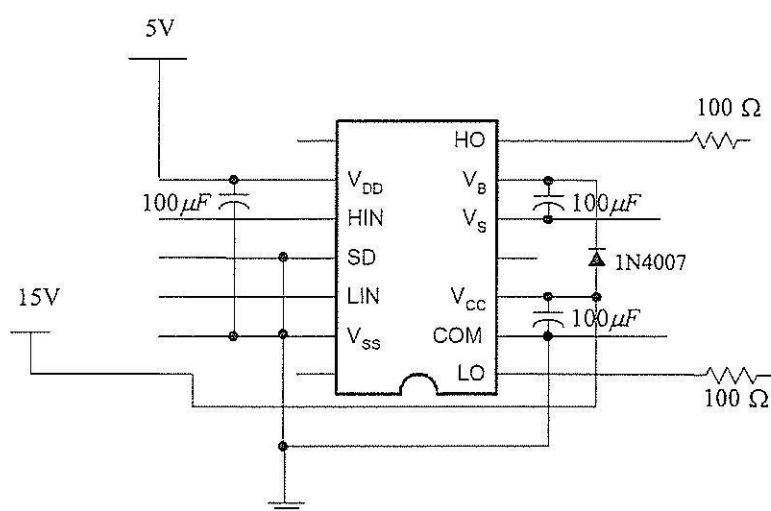
### 2.6.3 วงจร IR2110

วงจร IR2110 เป็นวงจรช่วยสำหรับจุดชนวนให้กับมอเตอร์ โดยจะช่วยปรับปรุงสัญญาณจุดชนวนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หากไม่มีวงจร IR2110 นี้ จะทำให้มอเตอร์ทำงานได้ไม่เต็มที่ และส่งผลให้มอเตอร์เกิดความร้อน อาจชำรุดเสียหายได้ ซึ่งวงจร IR2110 มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.20 ดังนี้



รูปที่ 2.20 วงจร IR2110

จากรูปที่ 2.20 สัญญาณอินพุตที่เข้าขา HIN และ LIN ของวงจร IR2110 คือ สัญญาณเอาต์พุต  $V_{out}$  ซึ่งมาจากวงจรแยกโคคสัญญาณในรูปที่ 2.19 สัญญาณเอาต์พุตของวงจร IR2110 จะถูกส่งออกที่ขา HO และ LO และสัญญาณเอาต์พุตนี้จะนำไปจุดชนวนมอเตอร์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ต่อไป วงจร IR2110 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถซื้อได้จากบริษัท อิเล็กทรอนิกส์ ซอร์ซ จำกัด และจากรูปที่ 2.20 นี้ ได้เลือกใช้อุปกรณ์ โดยสามารถต่อวงจรในการใช้งานได้ดังรูปที่ 2.21 คือ ใช้ความต้านทาน  $100\ \Omega$  ตัวเก็บประจุ  $100\ \mu F$  ไดโอด เบอร์ 1N4007 และจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ขา  $V_{CC} = 15\ V$  และ  $V_{DD} = 5\ V$  ในขณะที่ขา SD  $V_{SS}$  และ COM ต่อลงกราวด์



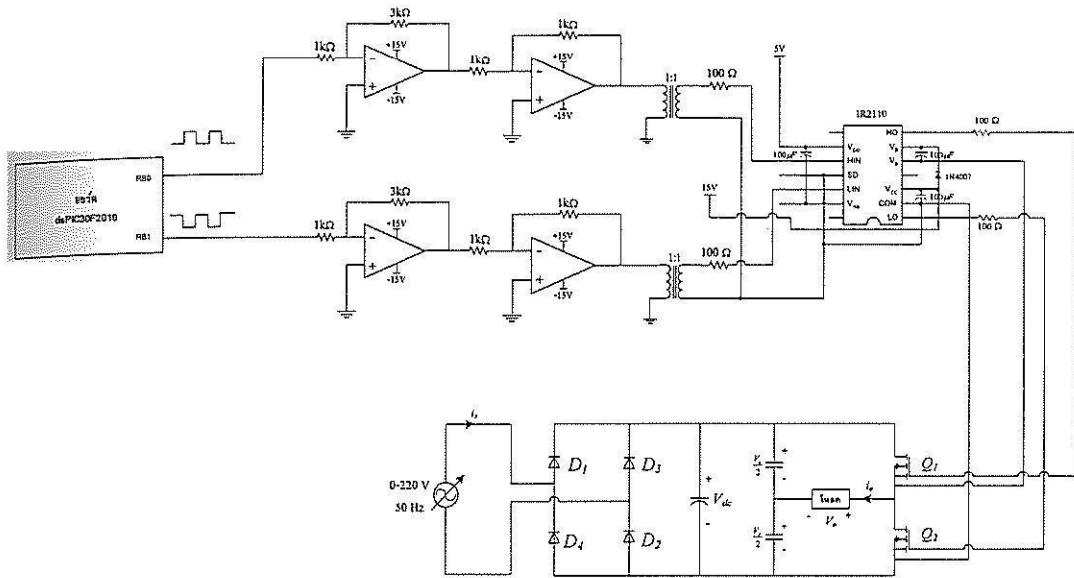
รูปที่ 2.21 วงจร IR2110 ที่ใช้ในงานวิจัย

หมายเหตุ ค่าตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานต่าง ๆ ที่ใช้ ในวงจรรูปที่ 5.7 ได้อ้างอิงมาจากเอกสารข้อมูลการใช้งานของ IR2110 ซึ่งสามารถค้นเพิ่มเติมได้จาก [www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/ir2110.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/ir2110.pdf)

## 2.7 ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม

### 2.7.1 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์

การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์นี้ มีวงจรสมมูลของวงจрдังรูปที่ 2.22 และการทดสอบได้ใช้โหลดเป็นมอเตอร์กระแสสลับหนึ่งเฟส ซึ่งผลของการทดสอบดังกล่าว จะมีการนำเสนอดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.22 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบวงจรในรูปที่ 2.22 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

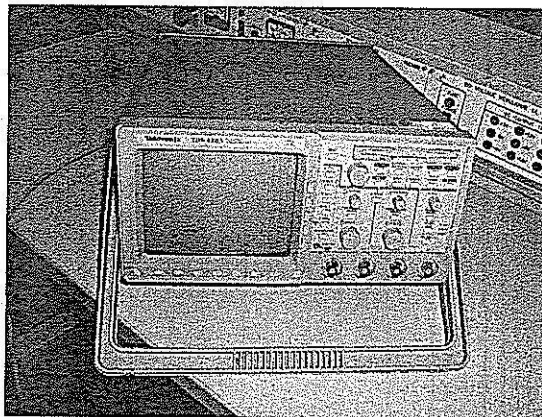
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ออสซิลโลสโคป

ออสซิลโลสโคปที่ใช้ในการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ออสซิลอสโคปที่ใช้ในการวัดรูปสัญญาณ

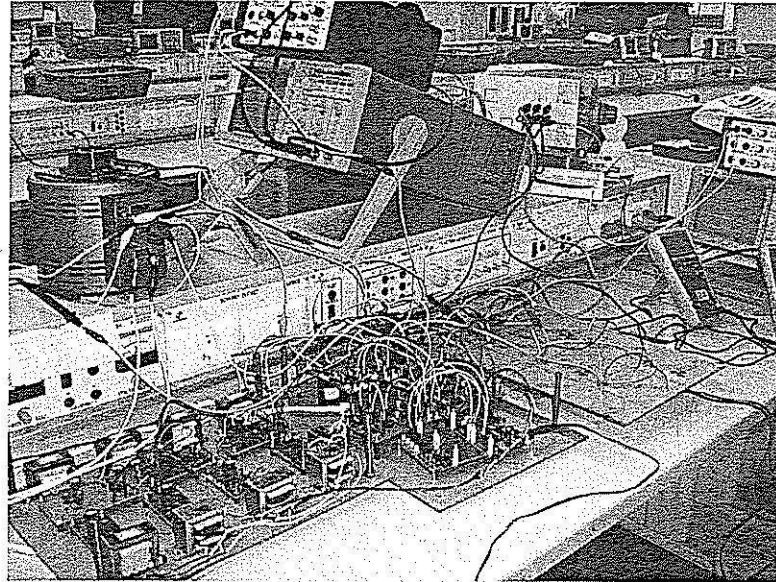
#### มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส (single-phase induction motor) โดยมีขดลวดช่วยเริ่มเดินเครื่อง (auxiliary starting winding) และ centrifugal switch ซึ่งสวิตช์ชนิดนี้จะติดตั้งอยู่ภายในมอเตอร์ มีหน้าที่ตัดขดลวดเริ่มเดินเครื่องออกจากวงจรเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 75 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วพิกัด มอเตอร์นี้มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.25 โดยเป็นมอเตอร์หนึ่งเฟส 50 Hz 4 pole แรงดันไฟฟ้าพิกัด 230 V กระแสไฟฟ้าพิกัด 3.47 A พิกัดกำลังไฟฟ้า 0.26 kW ค่า power factor = 0.6 และความเร็วรอบพิกัด 1410 rpm



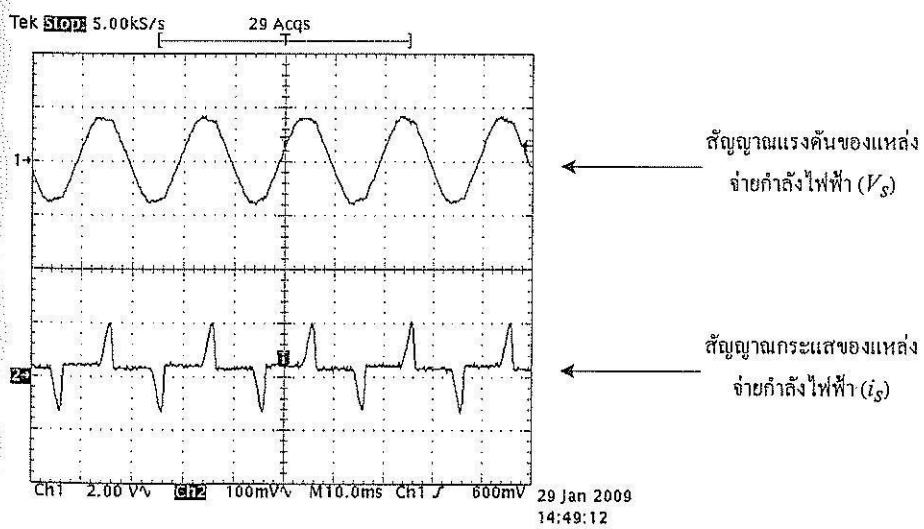
รูปที่ 2.25 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบในกรณีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ  
 หนึ่งเฟสนี้ มีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 2.26 ดังนี้



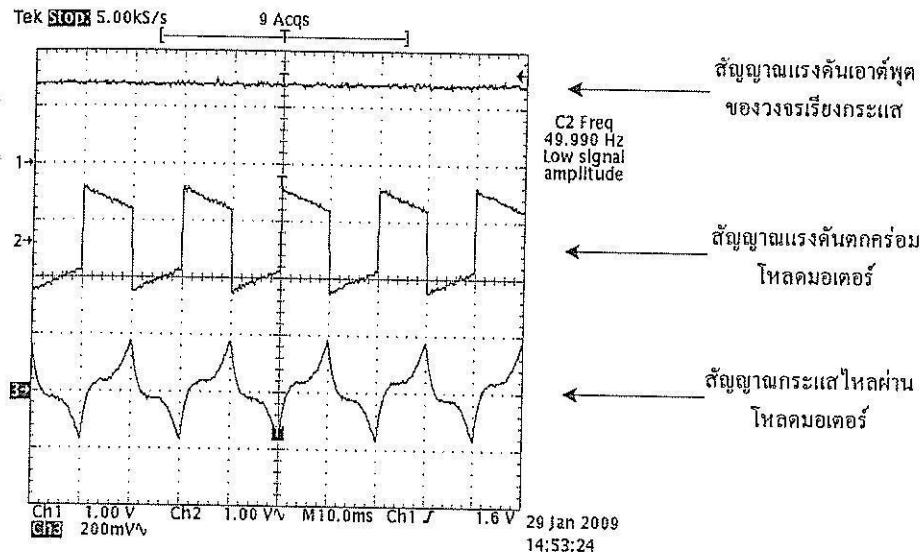
รูปที่ 2.26 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กรณีวงจรถอนเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์

จากรูปที่ 2.26 จะทดสอบที่ความถี่ 50 Hz เท่านั้น ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.27 และ  
 2.28 ดังนี้



รูปที่ 2.27 รูปสัญญาณที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

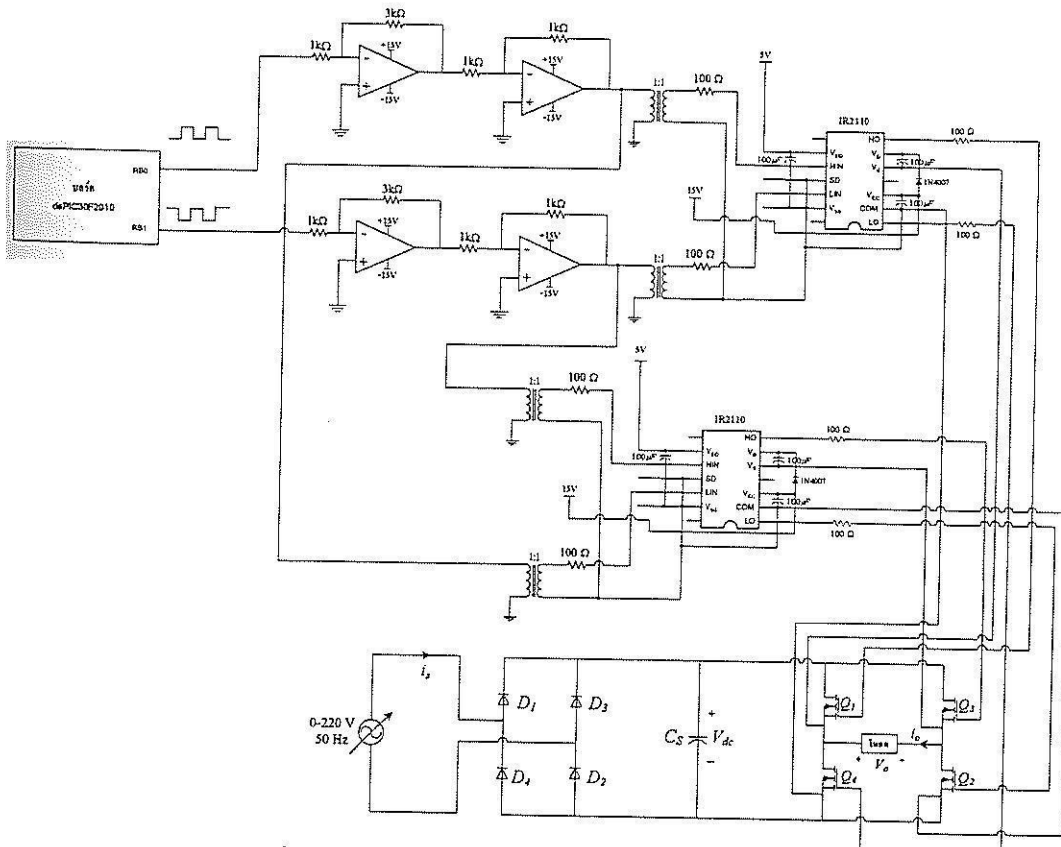




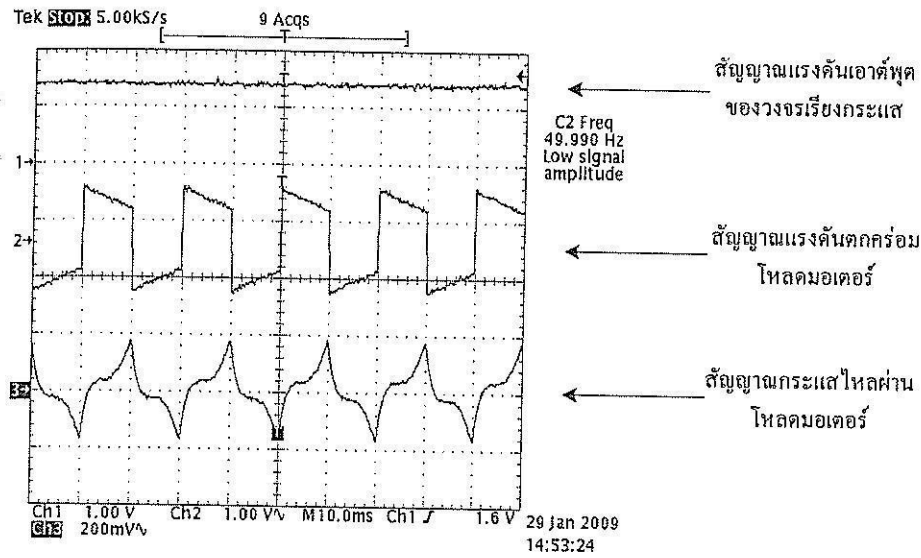
รูปที่ 2.28 รูปสัญญาณตกคร่อมโพลมอเตอร์ที่มีความถี่ 50 Hz (อัตราส่วน 1:100)

จากรูปที่ 2.28 แรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสเท่ากับ 150 V แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโพลมีค่าเท่ากับ 75.8 V และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพลมีค่าประมาณ 0.758 A

2.7.2 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์



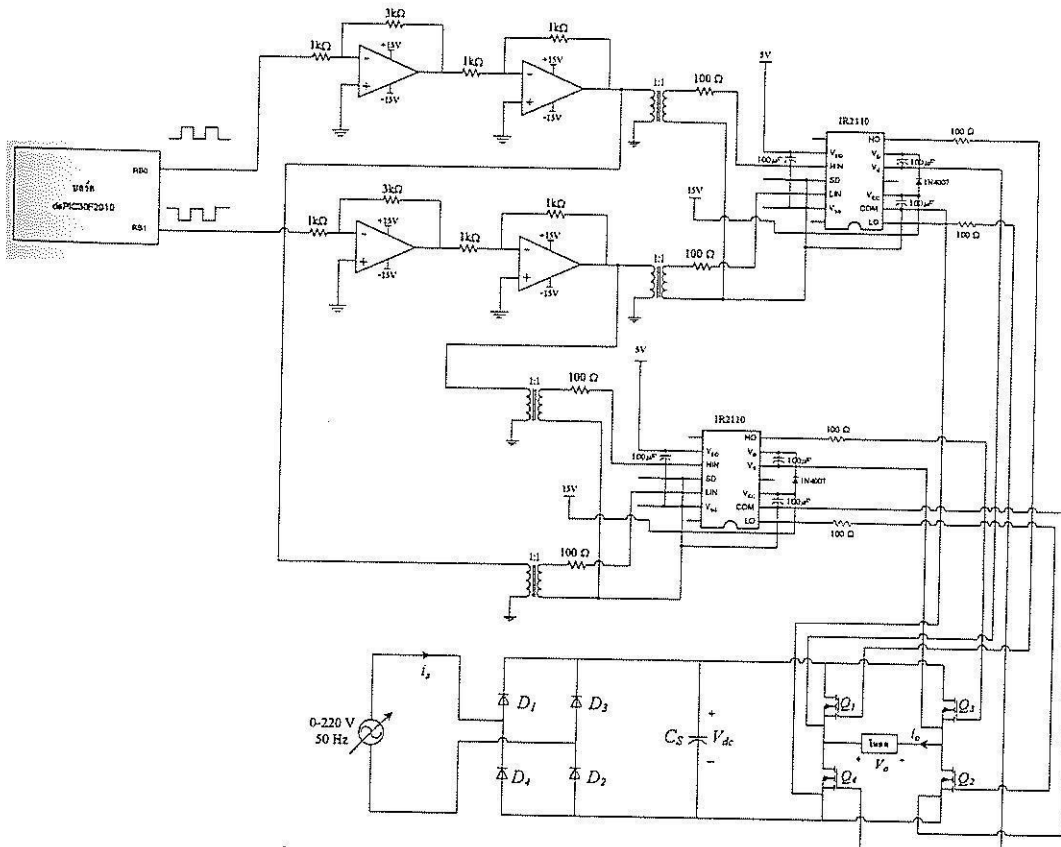
รูปที่ 2.29 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์



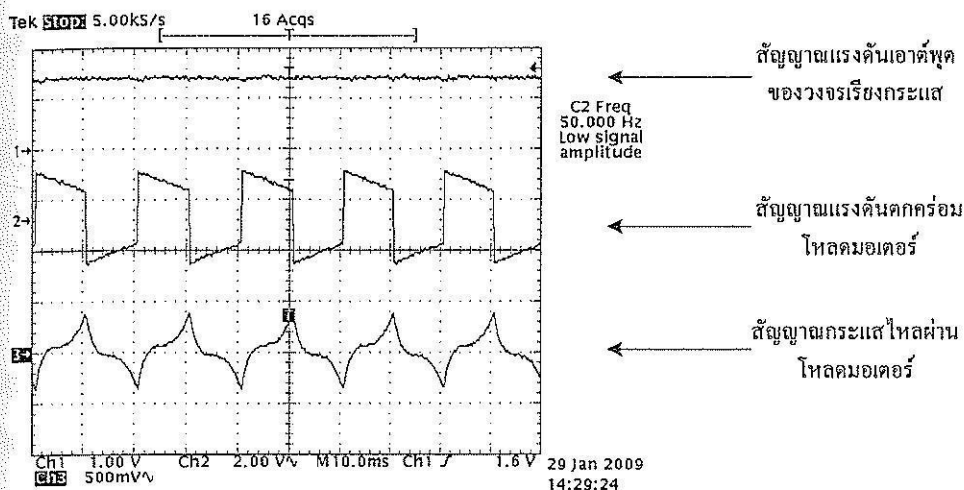
รูปที่ 2.28 รูปสัญญาณตกคร่อมโพลมอเตอร์ที่มีความถี่ 50 Hz (อัตราส่วน 1:100)

จากรูปที่ 2.28 แรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสเท่ากับ 150 V แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโพลมีค่าเท่ากับ 75.8 V และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพลมีค่าประมาณ 0.758 A

2.7.2 ผลการทดสอบอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์



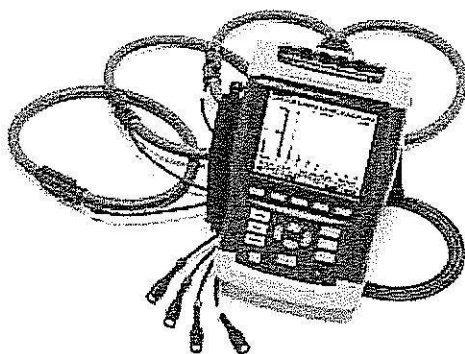
รูปที่ 2.29 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์



รูปที่ 2.32 รูปสัญญาณคั่นคร่อมมอเตอร์ที่ความถี่ 50 Hz (อัตราส่วน 1:100)

### 2.7.3 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิก

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบด้านฮาร์มอนิกคือ Fluke 434 จาก บริษัท เมเซอร์โทรนิคส์ จำกัด Fluke 434 เป็นเครื่องมือวัดคุณภาพกำลังทางไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งช่วยตรวจ วิเคราะห์ คาดการณ์ และระบุตำแหน่งของปัญหาในระบบจ่ายไฟฟ้า ทั้งชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส การวัด ทำได้อย่างรวดเร็วด้วยการแสดงผลบนจอภาพ พร้อมกับการบันทึกค่ายังคงเป็นไปอย่างต่อเนื่อง Fluke 434 มีลักษณะดังรูปที่ 2.33 ดังนี้



รูปที่ 2.33 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบด้านฮาร์มอนิก Fluke 434

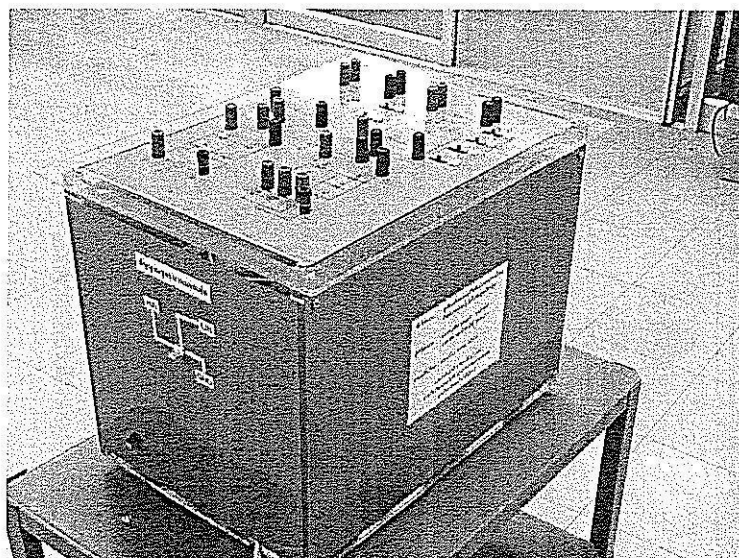
การทดสอบด้านฮาร์มอนิกของวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมแบบครึ่งบริดจ์ และเต็มบริดจ์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิกของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

วงจร	%THD( $v_s$ )	%THD( $i_s$ )	%THD( $v_o$ )	%THD( $i_o$ )
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์	3.0	140.0	46.7	52.0
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์	5.0	104.8	45.1	51.2

จากตารางที่ 2.2 สังเกตได้ว่าค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายจะมีค่ามากกว่าที่แรงดันของแหล่งจ่าย ทั้งนี้เนื่องจากโหลดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้จะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกเนื่องจากโหลดดังกล่าวเปรียบเสมือนเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นนั่นเอง

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมแบบครึ่งบริดจ์และเต็มบริดจ์ เมื่อทำการทดสอบวงจรเรียบร้อยแล้ว ได้นำวงจรดังกล่าวไปลงกล่อง ทั้งนี้เพื่อการง่ายต่อการใช้งาน โดยกล่องวงจรนี้สามารถเลือกได้ว่าจะใช้เป็นแบบครึ่งบริดจ์หรือเต็มบริดจ์ก็ได้ โดยกล่องดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสแบบรูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม

## 2.8 สรุป

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ที่นำเสนอในบทนี้เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมแบบครึ่งบริดจ์และเต็มบริดจ์ ที่ใช้บอร์ด dsPIC30F2010 เป็นตัวควบคุมสัญญาณจุดชนวนให้กับมอสเฟต ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางอิเล็กทรอนิกส์ และจากการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิกสังเกตได้ว่า วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกน้อย

กว่าแบบครึ่งบริดจ์ แต่มีปริมาณแรงดันฮาร์โมนิกมากกว่าแบบครึ่งบริดจ์ แต่อย่างไรก็ตามกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นนี้มีปริมาณมาก ซึ่งถ้าจะใช้งานชุดขับเคลื่อนนี้ โดยคำนึงถึงเรื่องคุณภาพกำลังไฟฟ้า จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องลดปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน

## บทที่ 3

### วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีคดับเบิลยูเอ็ม

#### 3.1 กล่าวนำ

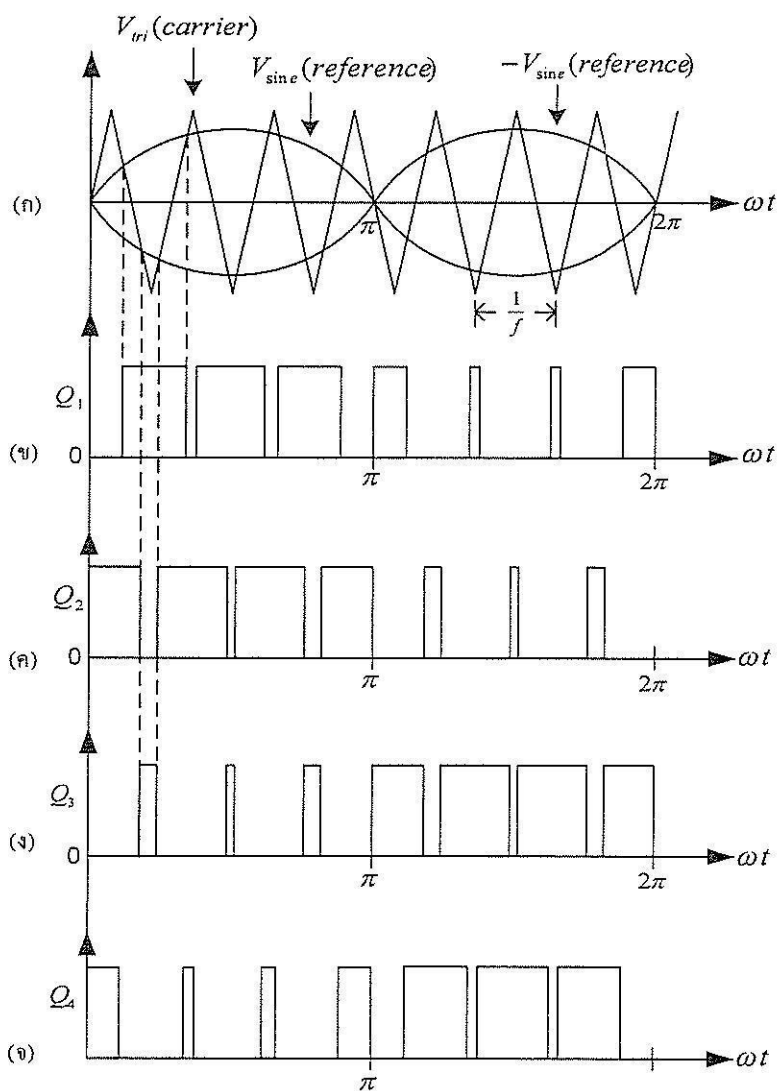
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีคดับเบิลยูเอ็ม เป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกำลังกระแสสลับเช่นเดียวกับวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม ที่นำเสนอในบทก่อนหน้านี้ แต่วงจรอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในบทนี้เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่มีการควบคุมแรงดันด้วยวิธีการมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์แบบไซน์ หรืออาจเรียกว่า เอสพีคดับเบิลยูเอ็ม (Sinusoidal Pulse Width Modulation: SPWM) โดยการมอดูเลตดังกล่าว จะใช้การควบคุมการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ (unipolar switching) ที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดแรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าได้ตามต้องการ ซึ่งการอธิบายรายละเอียดต่าง ๆ จะมีการนำเสนออย่างเป็นขั้นตอนในบทนี้

#### 3.2 การควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์โดยการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์

การควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์โดยการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ จะทำให้ความกว้างพัลส์เปลี่ยนแปลงตามขนาดของรูปคลื่นไซน์ โดยในส่วนของสัญญาณจุดชนวนเกิดจากการเปรียบเทียบกันของสัญญาณ 3 ชุด คือ สัญญาณไซน์ ( $V_{\sin e}$ ) สัญญาณไซน์แบบกลับเฟส ( $-V_{\sin e}$ ) และสัญญาณสามเหลี่ยม ( $V_{tri}$ ) ดังรูปที่ 3.1 (ก) ซึ่งสัญญาณ  $V_{\sin e}$  และ  $-V_{\sin e}$  จะเป็นสัญญาณที่ใช้ในการอ้างอิง (reference signal) ในขณะที่สัญญาณ  $V_{tri}$  จะเป็นสัญญาณพาหะ (carrier signal) การควบคุมการทำงานของมอสเฟตโดยการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์นี้ สามารถแบ่งเงื่อนไขการทำงานออกได้เป็น 4 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1  $V_{\sin e} > V_{tri}$  ควบคุมให้  $Q_1$  นำกระแส  
มีลักษณะของสัญญาณจุดชนวนดังรูปที่ 3.1 (ข)
- กรณีที่ 2  $-V_{\sin e} < V_{tri}$  ควบคุมให้  $Q_2$  นำกระแส  
มีลักษณะของสัญญาณจุดชนวนดังรูปที่ 3.1 (ค)
- กรณีที่ 3  $-V_{\sin e} > V_{tri}$  ควบคุมให้  $Q_3$  นำกระแส  
มีลักษณะของสัญญาณจุดชนวนดังรูปที่ 3.1 (ง)
- กรณีที่ 4  $V_{\sin e} < V_{tri}$  ควบคุมให้  $Q_4$  นำกระแส  
มีลักษณะของสัญญาณจุดชนวนดังรูปที่ 3.1 (จ)

หมายเหตุ รูปวงจรรีโวลต์เตอร์จะเหมือนกับรูปที่ 2.5 ที่นำเสนอไว้ในบทที่ 2 ทุกประการ แต่จะแตกต่างกันตรงที่สัญญาณในการจุดชนวนมอสเฟต ซึ่งในบทนี้จะใช้เทคนิคการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์แอมเบสพีคดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 3.1 การควบคุมแรงดันอินเวอร์เตอร์โดยการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์

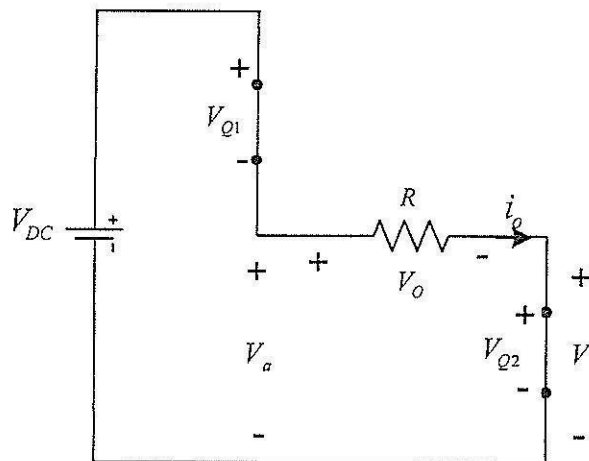
จากเงื่อนไขการทำงานดังกล่าวที่ใช้ควบคุมการทำงานของวงจรรีโวลต์เตอร์ สามารถแบ่งออกเป็นโหมดการทำงานออกเป็น 4 โหมด ดังนี้

โหมดที่ 1 เงื่อนไขที่ใช้ในการควบคุมให้มอสเฟตทำงาน คือ  $V_{\text{sin}e} > V_{\text{tri}}$  และ  $-V_{\text{sin}e} < V_{\text{tri}}$  จะส่งผลให้มอสเฟต  $Q_1, Q_2$  นำกระแส และมอสเฟต  $Q_3, Q_4$  ไม่นำกระแส ซึ่งการวิเคราะห์ห้วงจรสำหรับการทำงานในโหมดที่ 1 เป็นดังนี้

- มอสเฟต  $Q_1, Q_2$  นำกระแส

จากรูปที่ 2.5 พิจารณาวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_2$  นำกระแส จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.2 และเนื่องจากวงจรสมมูลดังกล่าวได้มีการกำหนดตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_a$  และ  $V_b$  ซึ่งจากแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงนี้สามารถหาแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (3-1)

$$V_O = V_{ab} = V_a - V_b \quad (3-1)$$



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลเมื่อมอสเฟต  $Q_1, Q_2$  นำกระแส

จากรูปที่ 3.2 พบว่าแรงดันตกคร่อมมอสเฟต  $Q_1$  และมอสเฟต  $Q_2$  ในสถานะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 0 V ดังนั้นจะได้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_a$  และ  $V_b$  ตามสมการที่ (3-2) และสมการที่ (3-3) ตามลำดับ ส่วนแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (3-4) โดย  $V_{dc}$  ก็คือ  $V_s$  ในรูปที่ 2.5 นั่นเอง

$$V_a = V_{dc} \quad (3-2)$$

$$V_b = 0 \quad (3-3)$$

$$V_O = V_{ab} = V_{dc} \quad (3-4)$$



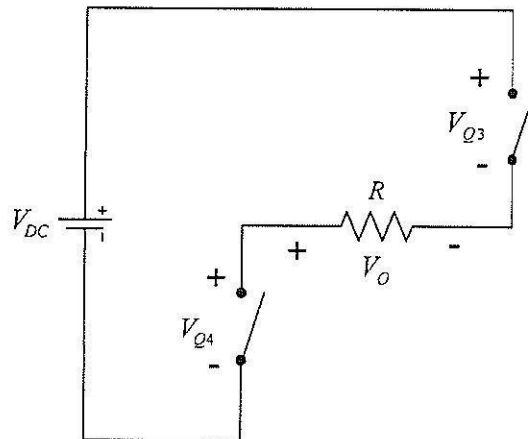
เมื่อพิจารณาจากวงจรสมมูลและสมการที่ (3-4) จะได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตตามสมการที่ (3-5) และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_2$  ตามสมการที่ (3-6)

$$i_o = \frac{V_o}{R} \quad (3-5)$$

$$i_{Q1} = i_{Q2} = i_o \quad (3-6)$$

- มอสเฟต  $Q_3, Q_4$  ไม่นำกระแส

เมื่อพิจารณาวงจรอินเวอร์เตอร์ ในกรณีที่มอสเฟต  $Q_3$  และ  $Q_4$  ไม่นำกระแส จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลเมื่อมอสเฟต  $Q_3, Q_4$  ไม่นำกระแส

จากวงจรสมมูลรูปที่ 3.3 โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (3-7)

$$-V_{dc} + V_{Q3} - V_o + V_{Q4} = 0 \quad (3-7)$$

พิจารณาสมการที่ (3-7) โดยแทนค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากสมการที่ (3-4)  $V_o = V_{dc}$  และกำหนดให้  $V_{Q3} = V_{Q4} = V_o$  เมื่อแทนค่าในสมการที่ (3-7) จะได้แรงดันตกคร่อมมอสเฟตตามสมการที่ (3-8)

$$V_Q = V_{dc} \quad (3-8)$$

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลรูปที่ 3.3 จะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $Q_3$  และมอสเฟต  $Q_4$  ตามสมการที่ (3-9)

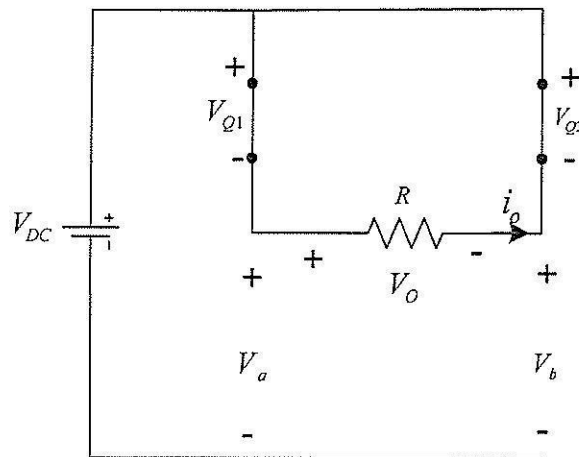
$$i_{Q3} = i_{Q4} = 0 \quad (3-9)$$

โหมดที่ 2 เงื่อนไขที่ใช้ในการควบคุมให้มอสเฟตทำงาน คือ  $V_{\text{sin } e} > V_{\text{tri}}$  และ  $-V_{\text{sin } e} > V_{\text{tri}}$  จะส่งผลให้มอสเฟต  $Q_1, Q_3$  นำกระแส และมอสเฟต  $Q_2, Q_4$  ไม่นำกระแส ซึ่งการวิเคราะห์วงจรสำหรับการทำงานในโหมดที่ 2 เป็นดังนี้

- มอสเฟต  $Q_1, Q_3$  นำกระแส

จากวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_3$  นำกระแส จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.4 โดยแรงดันเอาต์พุตของวงจรดังกล่าวจะเป็นไปตามสมการที่ (3-10)

$$V_O = V_{ab} = V_a - V_b \quad (3-10)$$



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลเมื่อมอสเฟต  $Q_1, Q_3$  นำกระแส

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.4 พบว่าแรงดันตกคร่อมมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_3$  ในสถานะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 0 V ดังนั้นจะได้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_a$  และ  $V_b$  ตามสมการที่ (3-11) และสมการที่ (3-12) ตามลำดับ ส่วนแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (3-13)

$$V_a = V_{dc} \quad (3-11)$$

$$V_b = V_{dc} \quad (3-12)$$

$$V_o = V_{ab} = V_a - V_b = 0 \quad (3-13)$$

จากสมการที่ (3-13) จะได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตตามสมการที่ (3-14) และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_3$  ตามสมการที่ (3-15)

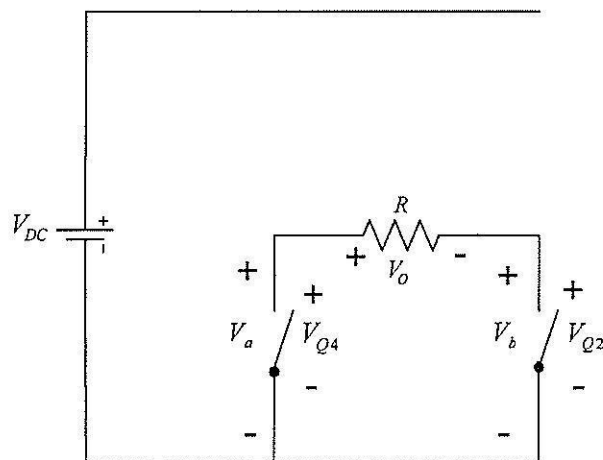
$$i_o = \frac{V_o}{R} \quad (3-14)$$

$$i_{Q1} = i_{Q3} = i_o = 0 \quad (3-15)$$

- มอสเฟต  $Q_2, Q_4$  ไม่นำกระแส

จากวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อมอสเฟต  $Q_2$  และ  $Q_4$  ไม่นำกระแส จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่

3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลเมื่อมอสเฟต  $Q_2, Q_4$  ไม่นำกระแส

การทำงานในช่วงนี้มอสเฟต  $Q_2$  และ  $Q_4$  จะไม่นำกระแส เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลรูปที่ 3.5 พบว่าในช่วงนี้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0 V และแรงดันตกคร่อมมอสเฟต  $Q_2$  และ  $Q_4$  มีค่าตามสมการที่ (3-16) และ (3-17) ตามลำดับ

$$V_{Q2} = V_b = V_{dc} \quad (3-16)$$

$$V_{Q4} = V_a = V_{dc} \quad (3-17)$$

และจากวงจรดังกล่าวจะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $Q_2$  และ  $Q_4$  ตามสมการที่ (3-18)

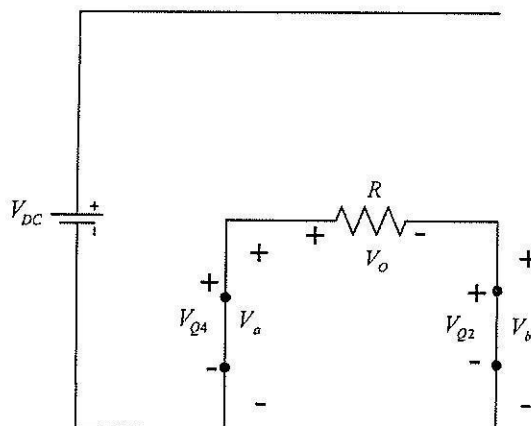
$$i_{Q2} = i_{Q4} = 0 \quad (3-18)$$

โหมดที่ 3 เงื่อนไขที่ใช้ในการควบคุมให้มอสเฟตทำงาน คือ  $V_{\text{sin } e} < V_{\text{tri}}$  และ  $-V_{\text{sin } e} < V_{\text{tri}}$  จะส่งผลให้มอสเฟต  $Q_2, Q_4$  นำกระแส และมอสเฟต  $Q_1, Q_3$  ไม่นำกระแส ซึ่งการวิเคราะห์ห้วงจรสำหรับการทำงานในโหมดที่ 3 เป็นดังนี้

- มอสเฟต  $Q_2, Q_4$  นำกระแส

จากวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อมอสเฟต  $Q_2$  และ  $Q_4$  นำกระแส จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.6 ซึ่งจะได้แรงดันเอาต์พุตตามสมการที่ (3-19)

$$V_o = V_{ab} = V_a - V_b \quad (3-19)$$



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลเมื่อมอสเฟต  $Q_2, Q_4$  นำกระแส

จากวงจรในรูปที่ 3.6 พบว่าแรงดันตกคร่อมมอสเฟต  $Q_2$  และ  $Q_4$  ในสภาวะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 0 V ดังนั้นจะได้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_a$  และ  $V_b$  ตามสมการที่ (3-20) และ (3-21) ตามลำดับ ส่วนแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (3-22)

$$V_a = 0 \quad (3-20)$$

$$V_b = 0 \quad (3-21)$$

$$V_o = V_{ab} = 0 \quad (3-22)$$

และจากสมการที่ (3-22) จะได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตตามสมการที่ (3-23) และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $Q_2$  และ  $Q_4$  ตามสมการที่ (3-24)

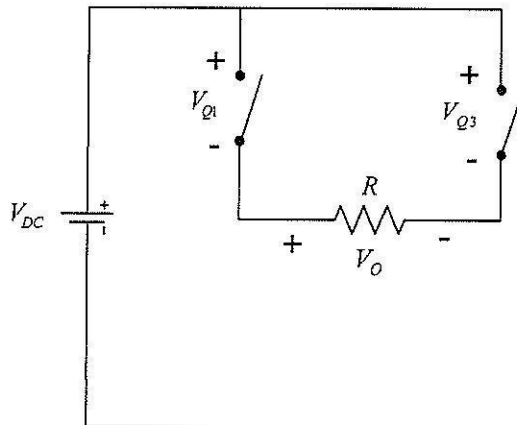
$$i_o = \frac{V_o}{R} = 0 \quad (3-23)$$

$$i_{Q2} = i_{Q4} = i_o = 0 \quad (3-24)$$

- มอสเฟต  $Q_1, Q_3$  ไม่นำกระแส

จากวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_3$  ไม่นำกระแส จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่

3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลเมื่อมอสเฟต  $Q_1, Q_3$  ไม่นำกระแส

จากรูปที่ 3.7 พบว่าในช่วงนี้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0 V และแรงดันตกคร่อมมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_3$  มีค่าตามสมการที่ (3-25) และ (3-26) ตามลำดับ

$$V_{Q1} = V_{dc} \quad (3-25)$$

$$V_{Q3} = V_{dc} \quad (3-26)$$

และ จะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_3$  ตามสมการที่ (3-27)

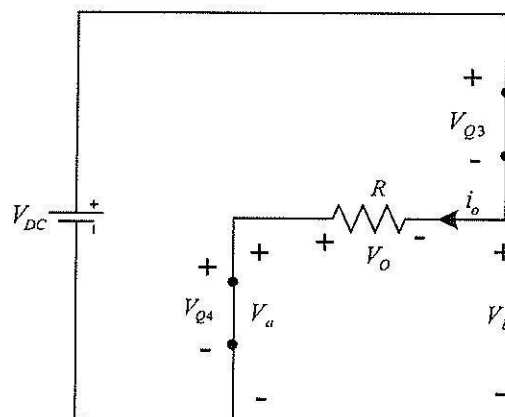
$$i_{Q1} = i_{Q3} = 0 \quad (3-27)$$

โหมดที่ 4 เงื่อนไขที่ใช้ในการควบคุมให้มอสเฟตทำงาน คือ  $V_{\text{sin}e} < V_{\text{tri}}$  และ  $-V_{\text{sin}e} > V_{\text{tri}}$  จะส่งผลให้ มอสเฟต  $Q_3, Q_4$  นำกระแส และมอสเฟต  $Q_1, Q_2$  ไม่นำกระแส ซึ่งการวิเคราะห์ห้วงจรสำหรับการทำงานในโหมดที่ 4 เป็นดังนี้

- มอสเฟต  $Q_3, Q_4$  นำกระแส

จากวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อมอสเฟต  $Q_3$  และ  $Q_4$  นำกระแส จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจะได้แรงดันเอาต์พุตตามสมการที่ (3-28)

$$V_o = V_{ab} = V_a - V_b \quad (3-28)$$



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลเมื่อมอสเฟต  $Q_3, Q_4$  นำกระแส

จากวงจรรูปที่ 3.8 พบว่าแรงดันตกคร่อมมอสเฟต  $Q_3$  และ  $Q_4$  ในสถานะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 0 V ดังนั้นจะได้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_a$  และ  $V_b$  ตามสมการที่ (3-29) และ (3-30) ตามลำดับ ส่วนแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (3-31)

$$V_a = 0 \quad (3-29)$$

$$V_b = V_{dc} \quad (3-30)$$

$$V_o = V_{ab} = -V_{dc} \quad (3-31)$$

จากสมการที่ (3-31) จะได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตตามสมการที่ (3-32) และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $Q_3$  และ  $Q_4$  ตามสมการที่ (3-33)

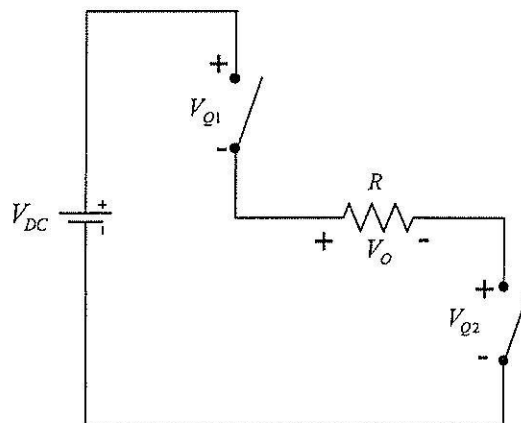
$$i_o = \frac{V_o}{R} \quad (3-32)$$

$$i_{Q3} = i_{Q4} = i_o \quad (3-33)$$

- มอสเฟต  $Q_1, Q_2$  ไม่นำกระแส

จากวงจรอินเวอร์เตอร์ เมื่อมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_2$  ไม่นำกระแส จะได้วงจรสมมูลดังรูปที่

3.9



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลเมื่อมอสเฟต  $Q_1, Q_2$  ไม่นำกระแส

การทำงานในโหมดนี้มอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_2$  จะไม่นำกระแส เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลรูปที่ 3.9 โดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (3-34)

$$V_{Q1} + V_{Q2} + V_O - V_{dc} = 0 \quad (3-34)$$

จากสมการที่ (3-34) แทนค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากสมการที่ (3-31)  $V_O = -V_{dc}$  และกำหนดให้  $V_{Q1} = V_{Q2} = V_Q$  จะได้แรงดันตกคร่อมมอสเฟตตามสมการที่ (3-35)

$$V_Q = V_{dc} \quad (3-35)$$

และจากวงจรสมมูลรูปที่ 3.9 จะได้กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต  $Q_1$  และ  $Q_2$  ตามสมการที่ (3-36)

$$i_{Q1} = i_{Q2} = 0 \quad (3-36)$$

จากการวิเคราะห์วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ที่มีการควบคุมการสวิตช์แบบยูนิโพลลา สามารถหาค่า rms ของแรงดันเอาต์พุตได้ตามสมการที่ (3-37)

$$V_O = V_{DC} \left( \sum_{m=1}^{2p} \frac{\delta_m}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3-37)$$

โดยที่  $V_{DC}$  = แรงดันอินพุต

$\delta_m$  = ความกว้างของพัลส์ลำดับที่ m

p = จำนวนพัลส์ต่อครึ่ง ไซเคิลหาได้จากสมการที่ (3-38)

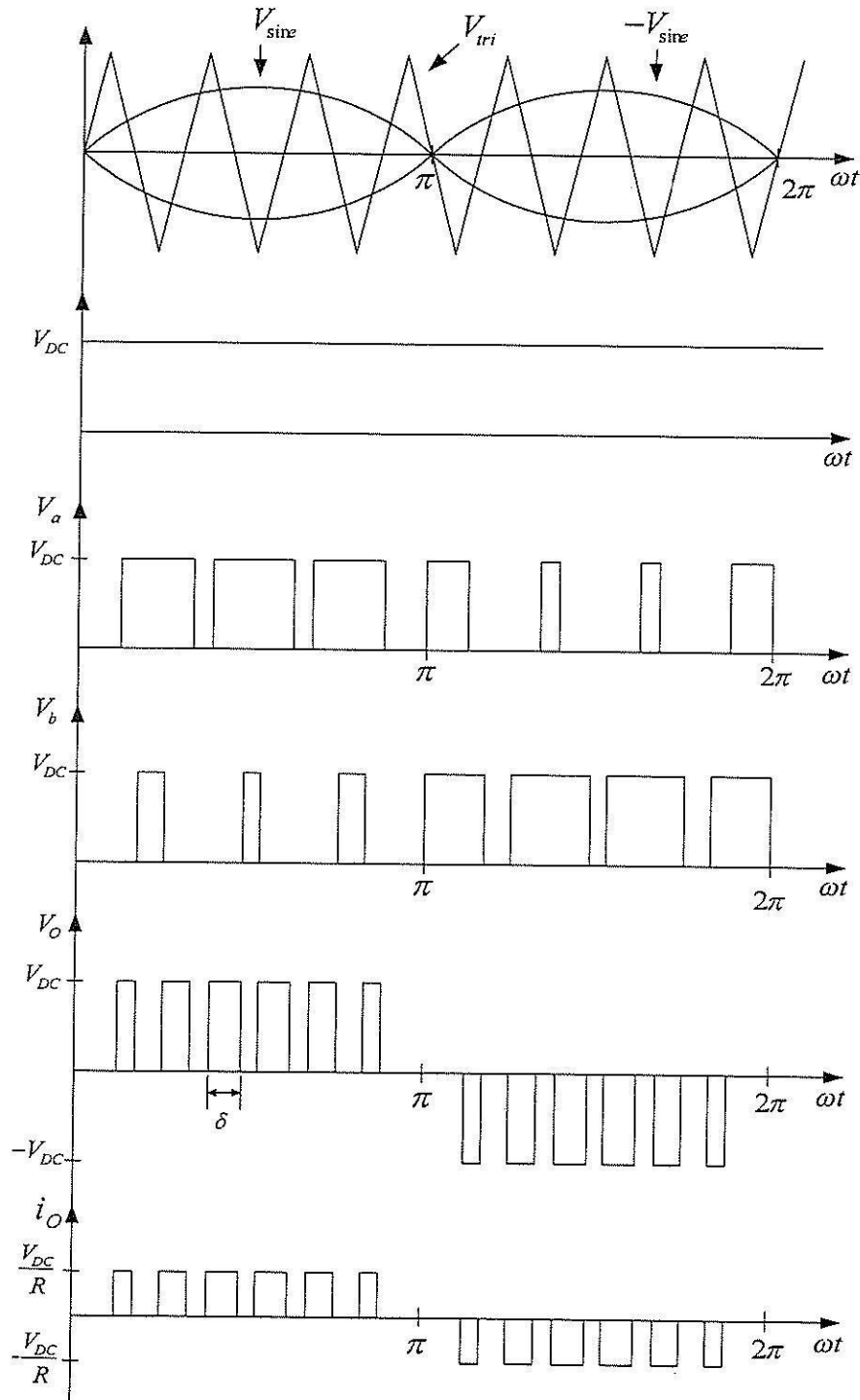
$$p = \frac{f_c}{2f_o} \quad (3-38)$$

เมื่อ  $f_c$  = ความถี่ของสัญญาณพาหะ

$f_o$  = ความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต



และจากการวิเคราะห์ห้วงจรในแต่ละโหมดข้างต้น ที่ใช้เทคนิคการควบคุมการสวิตช์แบบ  
 ยูนิโพล่า จะได้รูปสัญญาณแรงดัน ไฟฟ้าอินพุต แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ดัง  
 รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์  
 ที่มีการสวิตช์ด้วยเทคนิคเอสพีดับเบิลยูเอ็มแบบยูนิโพล่า

### 3.3 การออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวงจรอินเวอร์เตอร์

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีการนำมาใช้งานเป็นสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการสวิตช์ด้วยเทคนิคเอสพีดับเบิลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์ ในบทนี้ใช้มอสเฟตจำนวน 4 ตัว การเลือกขนาดของมอสเฟตที่นำมาใช้งาน สามารถเลือกได้จากโหลดของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานในชุดขับเคลื่อน นั่นก็คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟส ส่วนของรายละเอียดของมอเตอร์ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา โดยพิกัดของมอเตอร์ที่นำมาพิจารณาเลือกขนาดของมอสเฟต คือ แรงดันพิกัด และกระแสพิกัด ซึ่งมีค่าแรงดันพิกัดเท่ากับ  $230 V_{rms}$  กระแสพิกัดเท่ากับ 3.47 A โดยในการเลือกมอสเฟตกำลังต้องเผื่อค่าพิกัดการใช้งานของมอสเฟตให้สูงกว่าพิกัดของมอเตอร์ จากการศึกษาเอกสารข้อมูลของมอสเฟตพบว่า สามารถใช้มอสเฟตเบอร์ STW12NK80Z ได้ เนื่องจากตามเอกสารข้อมูลของมอสเฟตเบอร์นี้มีพิกัดการทนแรงดัน  $V_{DSS} = 800 V$  และกระแส  $I_D = 10.5 A$  ซึ่งมากกว่าพิกัดของมอเตอร์ที่นำมาใช้งาน

### 3.4 วงจรจุดชนวนด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม

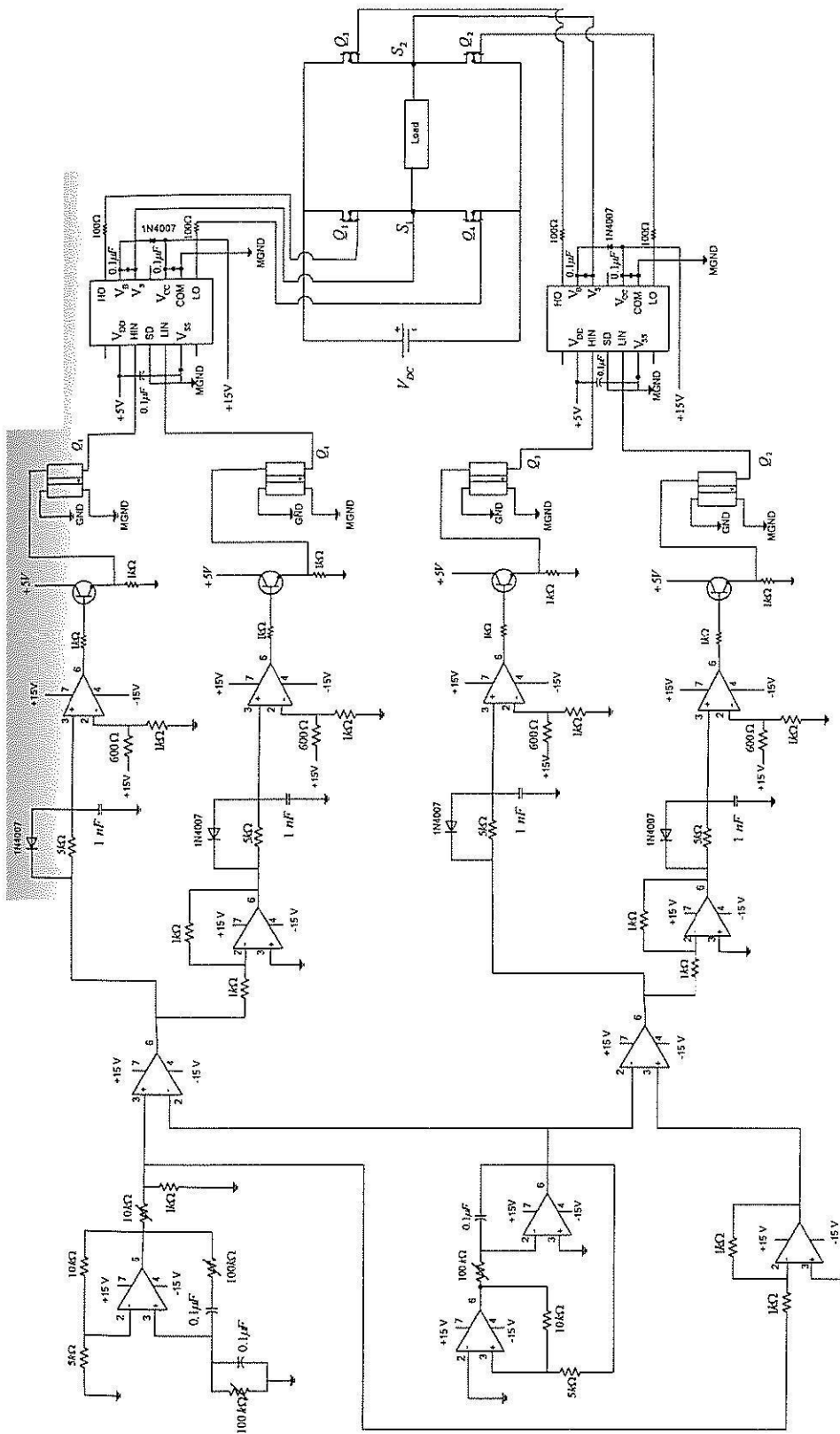
วงจรจุดชนวนด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม โดยการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ มีโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 3.11 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่ามีองค์ประกอบที่สำคัญทั้งหมด 8 ส่วน ได้แก่ วงจรสร้างสัญญาณไซน์ วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม วงจรขยายแบบกลับเฟส วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรกำหนดช่วงเวลาตาย วงจรยกระดับสัญญาณ วงจรแยกโคคสัญญาณ และวงจร IR2110 โดยในหัวข้อนี้จะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับวงจรดังกล่าวทั้งหมด ยกเว้นวงจร IR2110 ซึ่งสามารถศึกษาได้จากบทที่ 2 ที่อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้

#### 3.4.1 วงจรสร้างสัญญาณไซน์

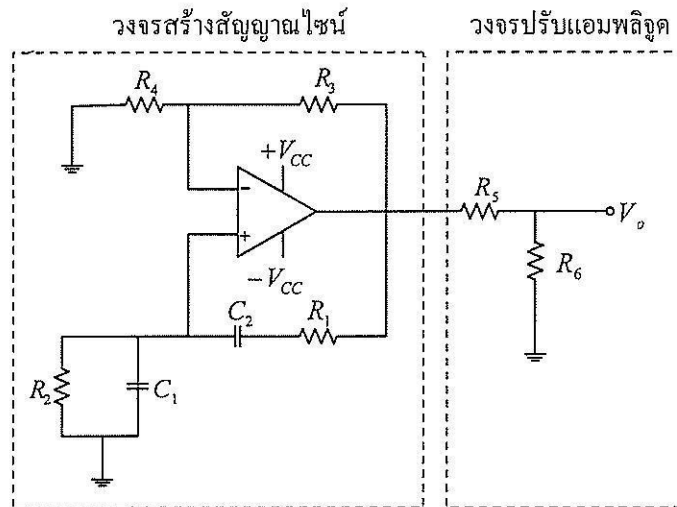
วงจรที่ใช้สำหรับสร้างสัญญาณไซน์ที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้ เป็นวงจรสร้างสัญญาณไซน์แบบวินบริดจ์ ซึ่งเป็นวงจรสร้างสัญญาณชนิดหนึ่งในวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยวงจรมีการสร้างสัญญาณไซน์ได้โดยไม่ต้องใช้สัญญาณอินพุตจากภายนอก แต่จะใช้สัญญาณเริ่มต้นการสร้างสัญญาณจากแหล่งไฟเลี้ยงของวงจร และมีวงจรปรับแอมพลิจูดทางเอาต์พุตของวงจร เพื่อให้ง่ายในการกำหนดขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณไซน์ที่ใช้ในการมีอดดูเลต วงจรดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 3.12 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณไซน์ในงานวิจัยนี้เพื่อให้ได้ความถี่ 50 Hz โดยจ่ายไฟเลี้ยงให้วงจรสร้างสัญญาณไซน์  $\pm 15 V$  และกำหนดให้ค่าความต้านทาน  $R_4 = 5 k\Omega$  ตัวเก็บประจุเท่ากับ  $0.1 \mu F$  ในการหาค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  สามารถหาได้จากสมการที่ (3-39)

$$R = \frac{1}{2\pi f_r C} \quad (3-39)$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 50 \times (0.1 \times 10^{-6})} = 31830.9 \Omega \approx 32 k\Omega$$



รูปที่ 3.11 วงจรชุดชนวนด้วยเทคนิคฟีดแบ็คเบสเอม



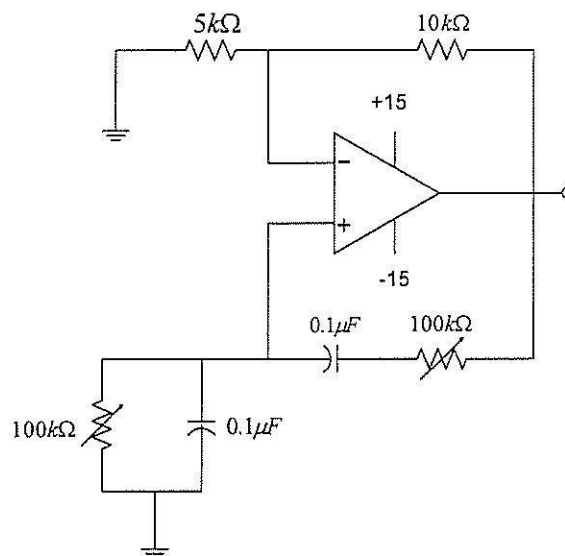
รูปที่ 3.12 วงจรสร้างสัญญาณไซน์แบบวินบริดจ์

ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทาน  $R = R_1 = R_2 = 32 \text{ k}\Omega$

จากนั้นแทนค่า  $R_4 = 5 \text{ k}\Omega$  ลงในสมการที่ (3-40) เพื่อหาค่าความต้านทาน  $R_3$

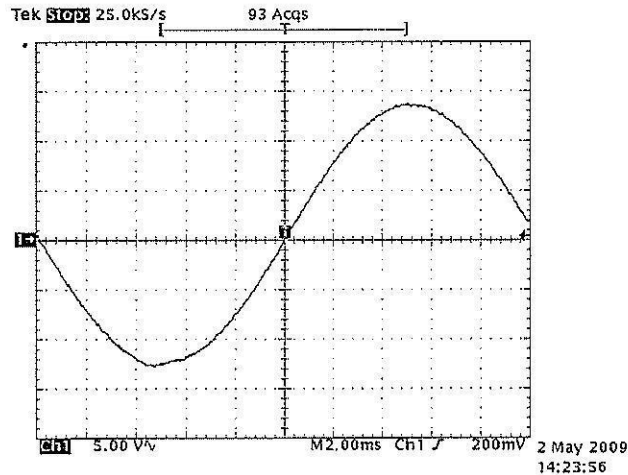
$$\begin{aligned} R_3 &= 2R_4 \\ &= 2 \times 5 = 10 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3-40)$$

จากการออกแบบ จะได้วงจรที่นำไปใช้งานดังรูปที่ 3.13 แต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ใช้เป็นความต้านทานปรับค่าได้แทน ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าความต้านทาน  $R_1$



รูปที่ 3.13 วงจรสร้างสัญญาณไซน์ที่นำไปใช้งาน

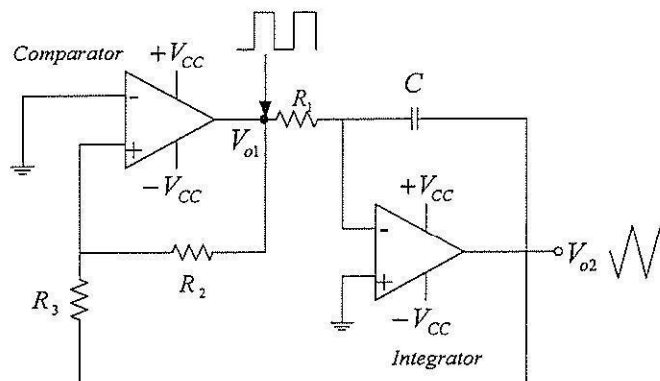
และ  $R_2$  เท่ากับ  $100\text{ k}\Omega$  เนื่องจากเพื่อให้สามารถปรับเป็นความถี่ที่ค่าอื่นได้ และถ้าต้องการให้ค่าความถี่เท่ากับ  $50\text{ Hz}$  สามารถทำได้โดยการปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ให้มีค่าความต้านทานเท่ากับค่าที่ออกแบบไว้ และผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 3.13 จะได้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรดังรูปที่ 3.14 ดังนี้



รูปที่ 3.14 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณไซน์ที่ความถี่  $50\text{ Hz}$

### 3.4.2 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

จากวงจรรวมในรูปที่ 3.11 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม ประกอบไปด้วย วงจรอินทิเกรเตอร์ และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งวงจรนี้มีสัญญาณเอาต์พุต 2 สัญญาณ คือ เอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ( $V_{o1}$ ) เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม (square wave) และเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ ( $V_{o2}$ ) เป็นสัญญาณสามเหลี่ยม (triangle wave) มีโครงสร้างของวงจรดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

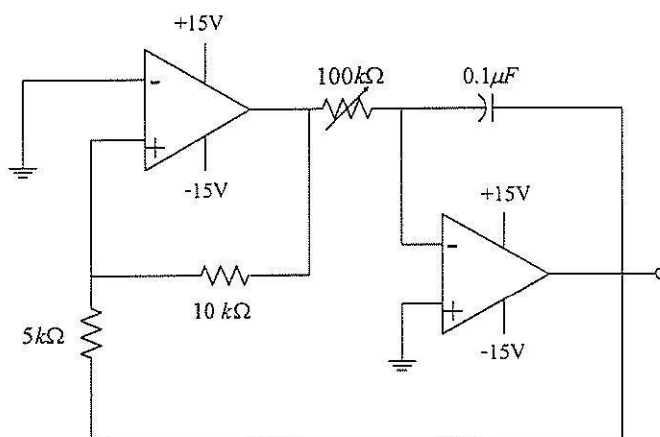
การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมดังกล่าวเพื่อให้ได้ความถี่เท่ากับ 1 kHz โดยจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรเท่ากับ  $\pm 15$  V และกำหนดให้ค่าความต้านทาน  $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$  ตัวเก็บประจุ  $C_1 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$  จากสมการที่ (3-41) สามารถหาค่าความต้านทาน  $R_2$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} R_2 &= 2 \times R_3 \frac{V_{SAT}}{V_{O2(p-p)}} \\ &= 2 \times 5 \times \frac{15}{15} = 10 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3-41)$$

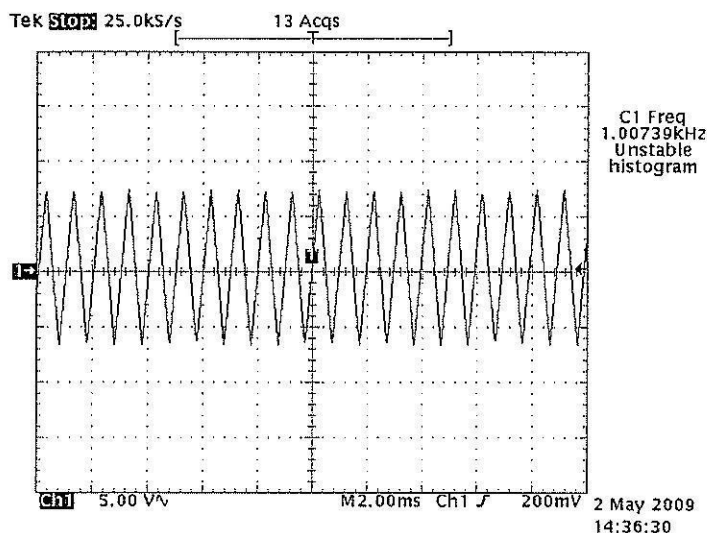
และสามารถคำนวณหาค่า  $R_1$  ได้จากสมการ (3-42)

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_2}{4R_3 f_o C_1} \\ &= \frac{10 \times 10^3}{4 \times 5 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6} \times 1000} = 5 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3-42)$$

จากการออกแบบ จะได้วงจรที่นำไปใช้งานดังรูปที่ 3.16 แต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_1$  ใช้เป็นความต้านทานปรับค่าได้แทน ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าความต้านทาน  $R_1$  เท่ากับ  $100 \text{ k}\Omega$  เนื่องจากเพื่อให้สามารถปรับความถี่ที่ค่าอื่นได้ และถ้าต้องการค่าความถี่เท่ากับ 1 kHz สามารถทำได้โดยการปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ให้มีค่าความต้านทานเท่ากับค่าที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ผลการทดสอบวงจรรูปที่ 3.16 จะได้ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นสัญญาณสามเหลี่ยมความถี่ 1 kHz



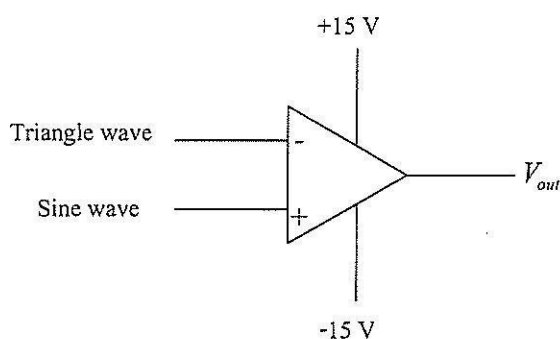
รูปที่ 3.16 วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมที่นำไปใช้งาน



รูปที่ 3.17 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีความถี่ 1 kHz

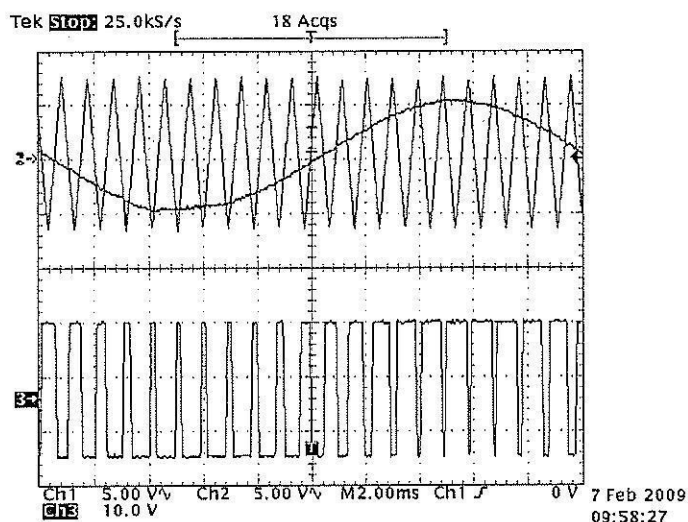
### 3.4.3 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ เป็นวงจรที่ใช้ในการตรวจสอบสัญญาณแรงดันของอินพุตหนึ่ง กับสัญญาณแรงดันของอีกอินพุตหนึ่ง สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะตามความแตกต่างของสัญญาณอินพุต โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์ในการเปรียบเทียบสัญญาณ โครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.18 ดังนี้



รูปที่ 3.18 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

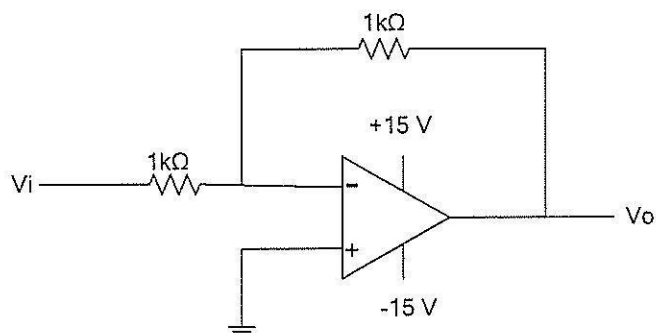
การทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยต่อวงจรตามรูปที่ 3.18 อินพุตที่ป้อนให้วงจรมี 2 สัญญาณคือ สัญญาณไซน์ และสัญญาณสามเหลี่ยม จะได้สัญญาณเอาต์พุตดังรูปที่ 3.19 ดังนี้



รูปที่ 3.19 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

#### 3.4.4 วงจรขยายแบบกลับเฟส

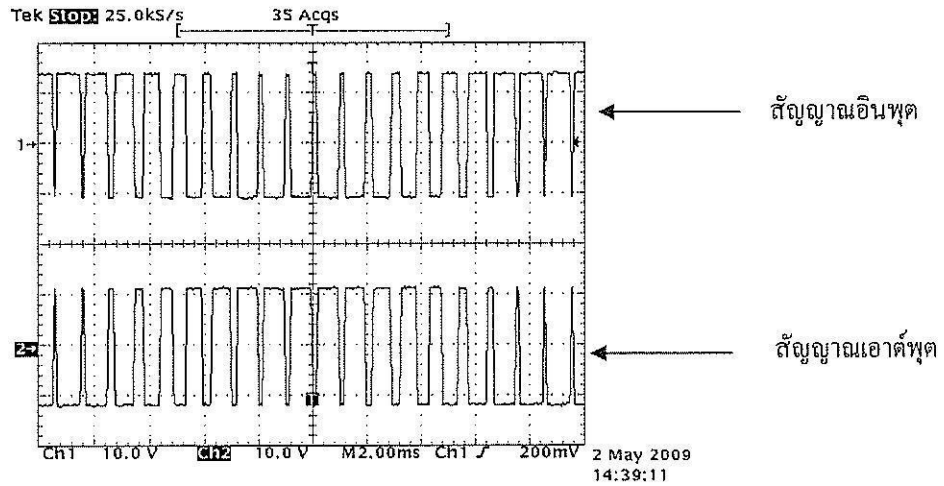
วงจรขยายแบบกลับเฟส เป็นวงจรสำหรับขยายขนาดของสัญญาณไฟฟ้าให้มีขนาดเพิ่มขึ้น และสัญญาณเอาต์พุตมีความต่างเฟสกับสัญญาณอินพุต 180 องศา แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการใช้วงจรขยายแบบกลับเฟสเพื่อต้องการให้เอาต์พุตของวงจรมีการกลับเฟสสัญญาณอินพุตเท่านั้น ดังนั้นอัตราขยายของวงจรจึงให้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจะได้วงจรดังรูปที่ 3.20 ดังนี้



รูปที่ 3.20 วงจรขยายแบบกลับเฟสที่นำไปใช้งาน

ผลการทดสอบวงจรในรูปที่ 3.20 จะเป็นดังรูปที่ 3.21 ดังนี้

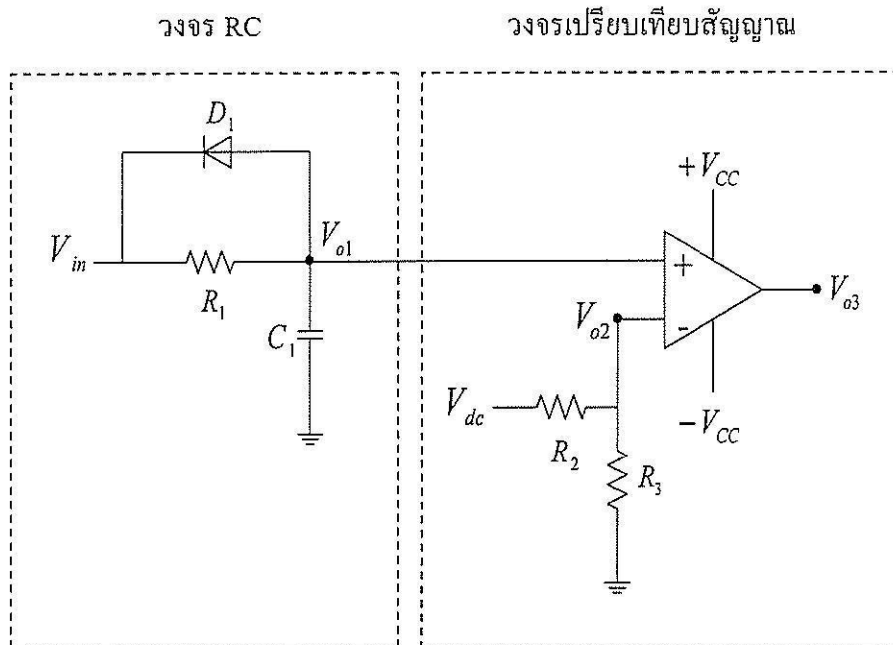




รูปที่ 3.21 รูปสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอนอสแตบิล

### 3.4.5 วงจรกำหนดช่วงเวลาตาย

วงจรถัดมาคือวงจรกำหนดช่วงเวลาตาย (dead time) เป็นวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อปรับช่วงเวลาตาย (dead time) ของสัญญาณอินพุต ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้มอสเฟต นำกระแสพร้อมกันในแต่ละกิ่ง เพราะอาจทำให้มอสเฟตเกิดความเสียหายได้ โดยวงจรถัดมาประกอบด้วยวงจร RC ที่มีไดโอดต่อขนานกับความต้านทาน และวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 วงจรกำหนดช่วงเวลาตาย

การกำหนดช่วงเวลาตาย ได้มีการศึกษาข้อมูลของมอสเฟต เบอร์ STW12NK0Z ซึ่งพบว่ามีค่า  $t_f$  เท่ากับ 15 ns ซึ่งการกำหนดช่วงเวลาตายดังกล่าวต้องมากกว่าค่า  $t_f$  ของมอสเฟต ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยจึงกำหนดให้ช่วงเวลาตายเท่ากับ 5  $\mu$ s ไดโอดที่ใช้งานในวงจร RC ใช้เบอร์ 1N4007 กำหนดให้แรงดันอินพุต ( $V_m$ ) ของวงจร RC เป็นรูปสัญญาณสี่เหลี่ยมมีแรงดันเท่ากับ  $\pm 15$  V แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) เท่ากับ 15 V ค่าตัวเก็บประจุ ( $C_1$ ) ของวงจร RC เท่ากับ 1 nF การออกแบบหาความต้านทาน  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  สามารถทำได้ดังนี้

ค่าความต้านทาน  $R_1$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-43)

$$\tau = R_1 C_1 \quad (3-43)$$

เมื่อแทนค่าคงที่ทางเวลาเท่ากับ 5  $\mu$ s และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 1 nF ในสมการที่ (3-43) จะได้ค่าความต้านทาน  $R_1$  ดังนี้

$$R_1 = \frac{5 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-9}} = 5 \text{ k}\Omega$$

เมื่อทราบค่าความต้านทาน  $R_1$  และตัวเก็บประจุ  $C_1$  สามารถหาค่าแรงดันอัดประจุได้จากสมการที่ (3-44) เมื่อ  $t = \tau = RC$  ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าว คือ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณ ( $V_{o2}$ ) นั่นเอง

$$\begin{aligned} V_{Charge} &= V_m (1 - e^{-t/RC}) \\ &= 15(1 - e^{-1}) \\ &= 9.48 \text{ V} \end{aligned} \quad (3-44)$$

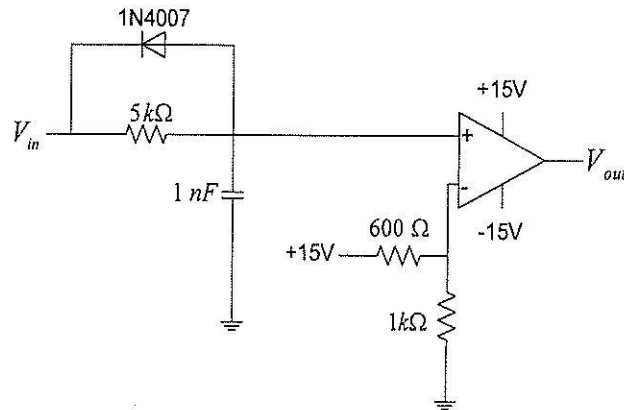
จากค่าแรงดันดังกล่าว สามารถหาค่าความต้านทาน  $R_2$  และ  $R_3$  ได้จากสมการที่ (3-45)

$$V_{o2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_{dc} \quad (3-45)$$

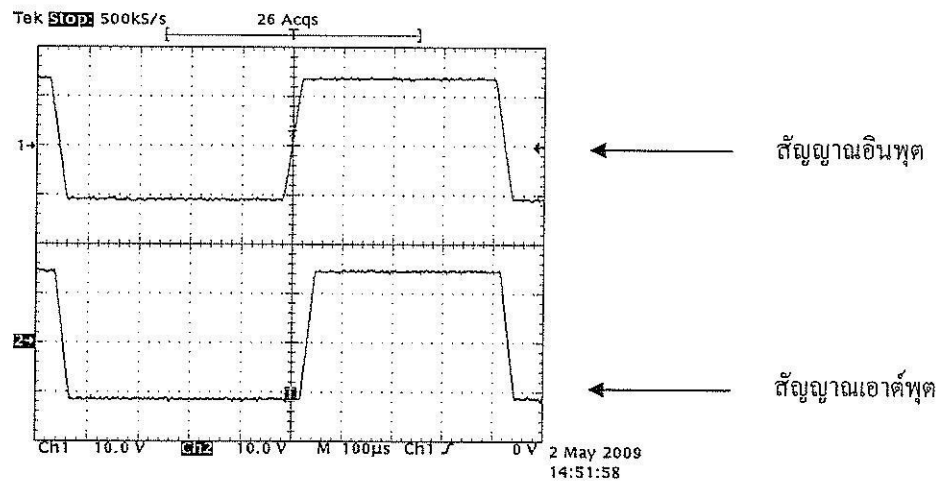
จากสมการดังกล่าว กำหนดให้ค่าความต้านทาน  $R_3$  เท่ากับ 1 k $\Omega$  จะได้ค่าความต้านทาน  $R_2$  ดังนี้

$$R_2 = \left( \frac{1000\Omega \times 15}{9.48} \right) - 1000\Omega = 582.27 \Omega \approx 600 \Omega$$

จากการออกแบบ จะได้วงจรที่นำไปใช้งานตามรูปที่ 3.24 ซึ่งมีผลการทดสอบดังรูปที่ 3.25



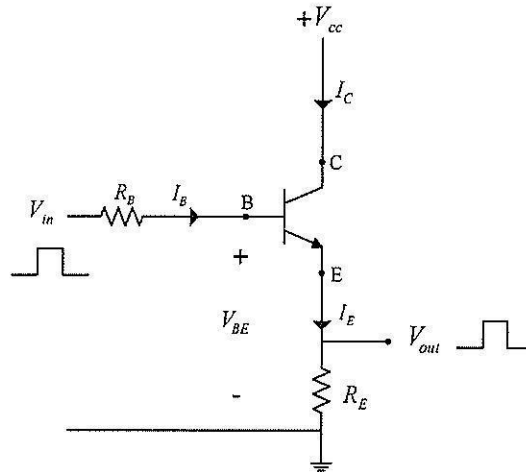
รูปที่ 3.24 วงจรกำหนดช่วงเวลาตายที่ใช้งานจริง



รูปที่ 3.25 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำหนดช่วงเวลาตาย

#### 3.4.6 วงจรยกระดับสัญญาณ

วงจรยกระดับสัญญาณเป็นวงจรที่นำมาใช้เพื่อยกระดับของสัญญาณอินพุต เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตอยู่บนซีกบวก ซึ่งวงจรดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 วงจรยกระดับสัญญาณ

จากวงจรยกระดับสัญญาณในรูปที่ 3.26 ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ทรานซิสเตอร์เบอร์ P2N2222A โดยในการออกแบบวงจรต้องการให้กระแสอิมิตเตอร์อิมิตตัว ( $I_E$ ) เท่ากับ 15 mA และการออกแบบหาค่าความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์ ( $R_E$ ) โดยให้แรงดันอินพุตเท่ากับ 15 V (แรงดันอินพุตของวงจรยกระดับสัญญาณ คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรกำหนดเวลาตาย) แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{CC}$ ) มีค่าเท่ากับ 5 V และกำหนดให้ค่าความต้านทาน  $R_B = 1 \text{ k}\Omega$  สามารถคำนวณกระแสเบสได้ดังสมการที่ (3-46)

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} \quad (3-46)$$

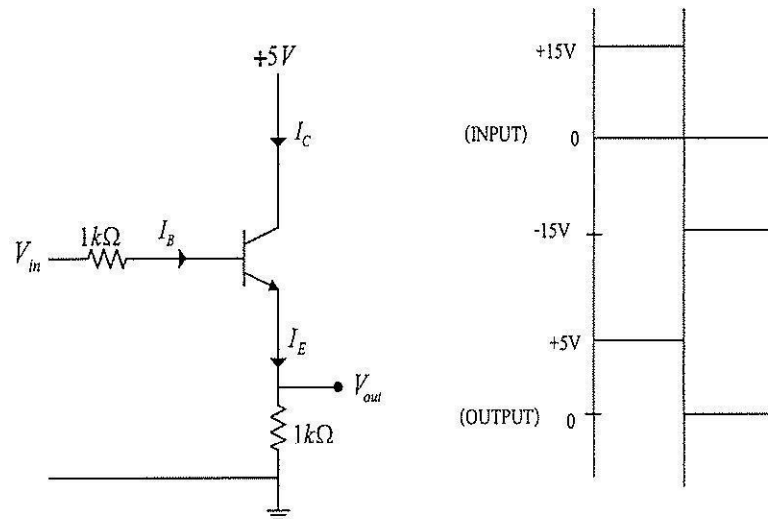
แทนค่า  $I_E = 15 \text{ mA}$  และค่า  $\beta = 300$  (ค่า  $\beta$  สามารถดูได้จากเอกสารข้อมูลของทรานซิสเตอร์เบอร์ P2N2222A) ลงในสมการที่ (3-46) จะได้

$$I_B = \frac{15 \text{ mA}}{301} = 49.83 \times 10^{-6}$$

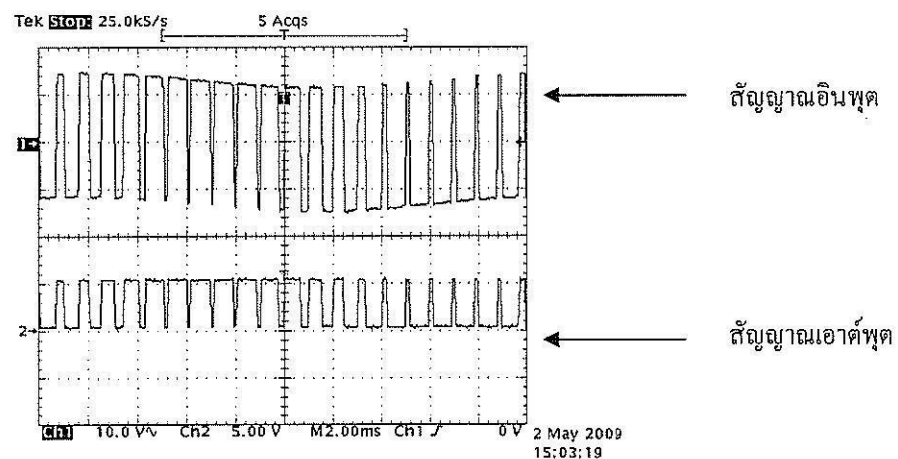
เมื่อได้กระแสเบสของทรานซิสเตอร์ สามารถคำนวณหาความต้านทานของอิมิตเตอร์จากสมการที่ (3-47) ดังนี้

$$I_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \quad (3-47)$$

จากสมการข้างต้น เมื่อทำการแก้สมการ จะได้ค่าความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์เท่ากับ  $R_E = 956.38\Omega \approx 1k\Omega$  จากการออกแบบดังกล่าว จะได้วงจรที่นำไปใช้งานดังรูปที่ 3.27 ซึ่งผลการทดสอบวงจรจะเป็นดังรูปที่ 3.28



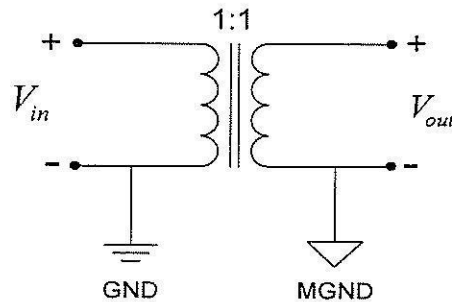
รูปที่ 3.27 วงจรยกระดับสัญญาณและสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 3.28 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรยกระดับสัญญาณ

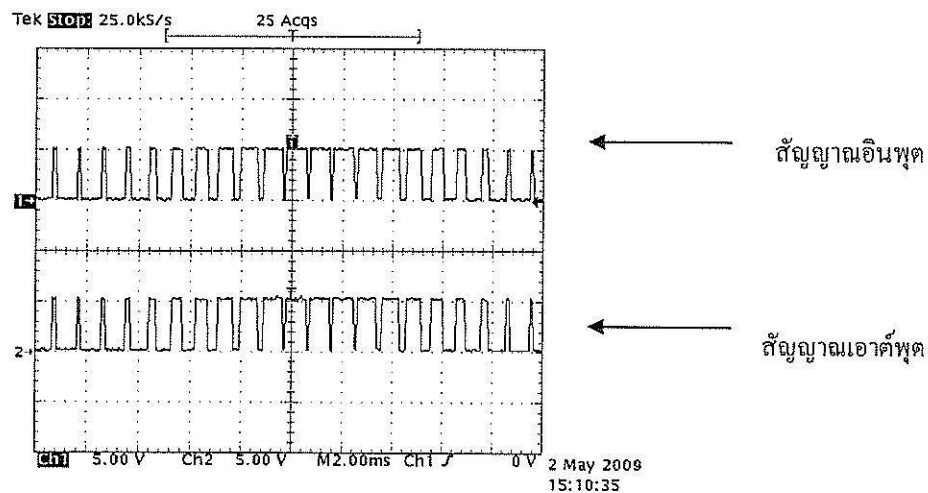
### 3.4.7 วงจรแยกโคคัลสัญญาณ

วงจรแยกโคคัลสัญญาณ เป็นวงจรสำหรับแยกกราวด์ของสัญญาณใด ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในวงจร ซึ่งจากวงจรรวมในรูปที่ 3.11 สังเกตได้ว่าจะใช้หม้อแปลงแบบพัลส์เป็นอุปกรณ์ในการแยกโคคัลสัญญาณ โดยมีโครงสร้างของวงจรงดรูปที่ 3.29 ซึ่งเหมือนกับกรณีที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์ของบทที่ 2



รูปที่ 3.29 วงจรแยกโคคัลสัญญาณ

การทำงานของวงจรแยกโคคัลสัญญาณในรูปที่ 3.29 เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต  $V_{in}$  ซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรระดับสัญญาณ ซึ่งมีกราวด์ของวงจรระดับสัญญาณ คือ GND ให้กับหม้อแปลงทางด้านปฐมภูมิ หม้อแปลงจะแยกกราวด์ของด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิออกจากกัน และกราวด์ของด้านทุติยภูมิ คือ MGND สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ทางด้านทุติยภูมิ จะมีขนาดของแอมพลิจูด และความถี่ เท่ากับด้านอินพุต เนื่องจากเป็นหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 ดังรูปที่ 3.30

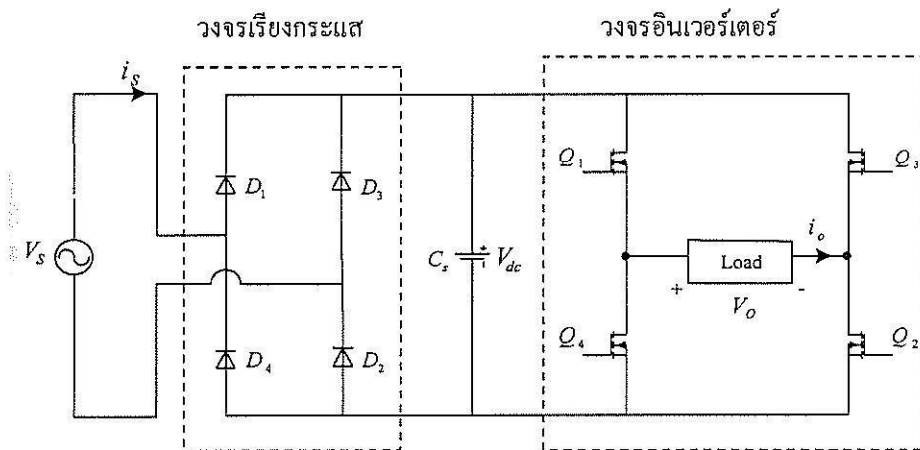


รูปที่ 3.30 รูปสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแยกโคคัลสัญญาณ

หม้อแปลงแบบพัลส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้หม้อแปลงแบบพัลส์เบอร์ PT4 สามารถซื้อได้จาก บริษัท อาร์เอส คอมโพเนนท์ จำกัด ซึ่งอัตราส่วนของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงเป็น 1:1

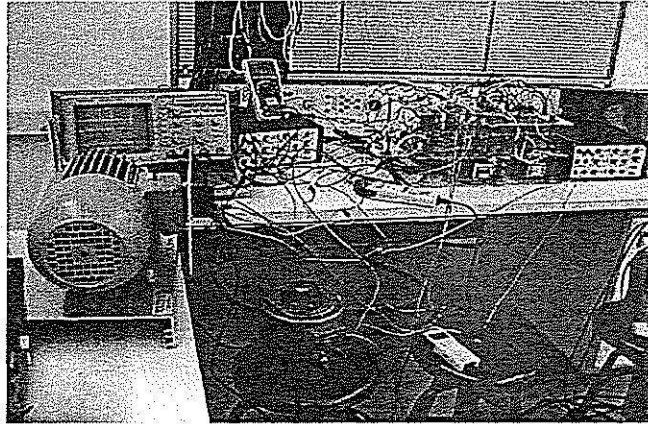
### 3.5 ผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม ที่นำเสนอในบทนี้ จะทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสตัวเดียวกับที่ทดสอบในบทที่ 2 โดยวงจรที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.31 ซึ่งเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะได้จากวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส ซึ่งโครงสร้างวงจรในลักษณะนี้จะเหมือนกับการทดสอบในบทที่ 2 ทุกประการ แต่จะแตกต่างกันตรงที่วิธีการสวิตช์มอสเฟตทั้งสี่ตัวเท่านั้น

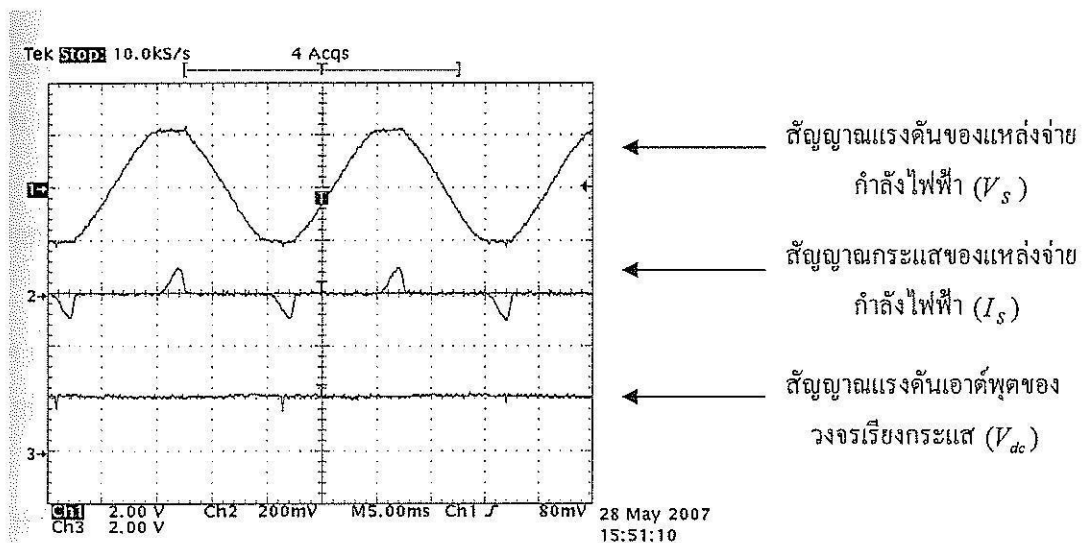


รูปที่ 3.31 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสดังกล่าวที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส มีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 3.32 จากการทดสอบดังกล่าว มีการวัดสัญญาณอินพุตของ  $V_s$ ,  $i_s$  และ  $V_{dc}$  โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป เป็นอุปกรณ์ในการวัด โดยสัญญาณที่วัดได้มีลักษณะดังรูปที่ 3.33 ในขณะที่รูปสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับดูได้จากรูปที่ 3.34



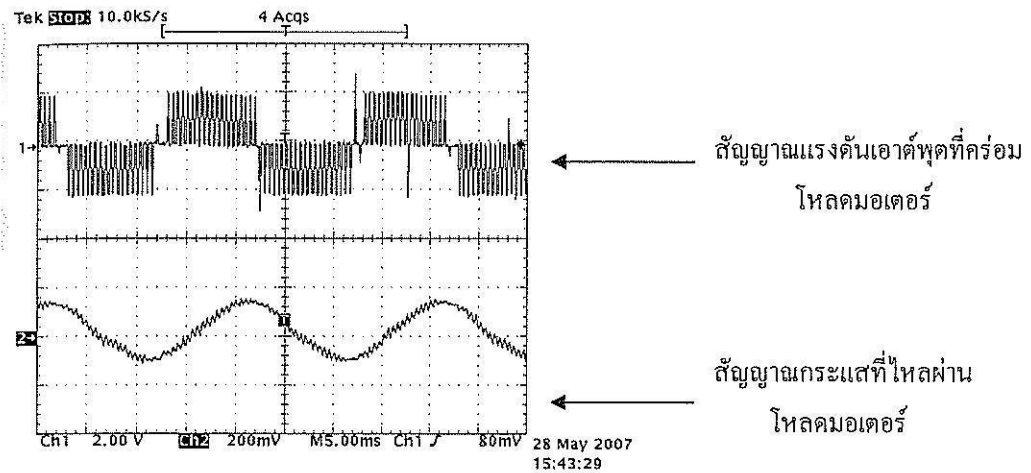
รูปที่ 3.32 การทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีคดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 3.33 สัญญาณอินพุต  $V_s$ ,  $I_s$  และ  $V_{dc}$  ของโพลคอมอเตอร์ (อัตราส่วน 1:100)

จากรูปที่ 3.33 เป็นสัญญาณที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ที่วัดได้ขณะทำการทดสอบ โดยผลที่ได้จากการวัดค่ามีดังนี้ แรงดันอินพุต  $V_{rms} = 150$  V กระแสจ่ายออกอินพุตเท่ากับ 1 A และแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส  $V_{dc} = 200$  V





รูปที่ 3.34 สัญญาณแรงดันและกระแสเอาต์พุตที่คร่อมโพลมอเตอร์ (อัตราส่วน 1:100)

จากรูปที่ 3.34 เป็นผลการทดสอบโดยการวัดสัญญาณทางด้านเอาต์พุต ได้ผลจากการวัดค่าดังนี้ แรงดันเอาต์พุตที่คร่อมโพลมอเตอร์  $V_{rms} = 126.9$  V และกระแสจ่ายออกเอาต์พุตที่โพลเท่ากับ 1.6 A

### 3.6 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิก

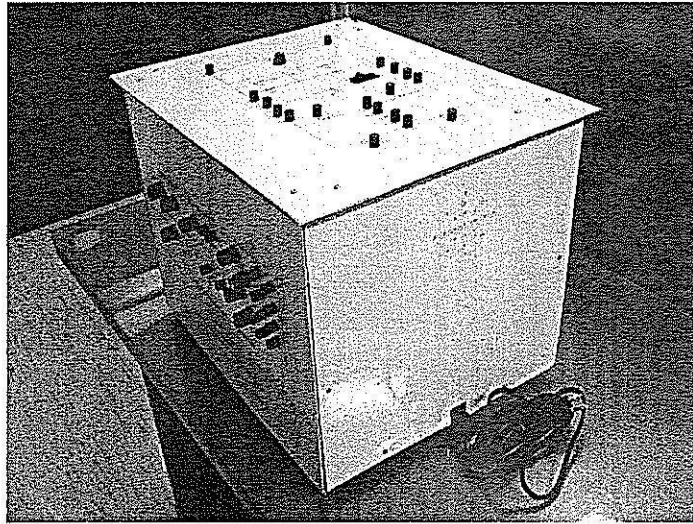
เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบด้านฮาร์มอนิกส์ คือ Fluke 434 จาก บริษัท เมเซอร์โทรนิคส์ จำกัด เช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้านี้ในบทที่ 2 การทดสอบด้านฮาร์มอนิกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม

วงจร	%THD( $v_s$ )	%THD( $i_s$ )	%THD( $v_o$ )	%THD( $i_o$ )
วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม	2.8	149.0	95.3	19.9

จากตารางที่ 3.1 สังเกตได้ว่าค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายจะมีค่ามากกว่าที่แรงดันของแหล่งจ่าย ทั้งนี้เนื่องจากโหลดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้จะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกเนื่องจากโหลดดังกล่าวเปรียบเสมือนเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นนั่นเอง

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม เมื่อทำการทดสอบวงจรเรียบร้อยแล้ว ได้นำวงจรดังกล่าวไปลงกล่อง ทั้งนี้เพื่อง่ายต่อการใช้งาน โดยกล่องดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสแบบแบบพีดับเบิลยูเอ็ม

### 3.7 สรุป

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ที่นำเสนอในบทนี้เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมแบบแบบพีดับเบิลยูเอ็ม โดยมีส่วนประกอบของวงจรที่ใช้ในการทดสอบคือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ วงจรอินเวอร์เตอร์นี้ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับซึ่งใช้มอเตอร์ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ ประกอบไปด้วยมอเตอร์เฟด 4 ตัว ซึ่งมีการควบคุมแรงดันด้วยวิธีการมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์แบบไซน์ โดยมีการควบคุมการสวิทช์แบบยูนิโพลาร์สัญญาณจุดชนวนเกทของมอเตอร์เฟดที่ใช้เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มในงานวิจัยนี้ได้สร้างสัญญาณจุดชนวนเกทด้วยวงจรแอนะล็อก และจากการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิกของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็มในงานวิจัยนี้ สังเกตได้ว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณมาก ซึ่งถ้าจะใช้งานชุดขับเคลื่อนนี้โดยคำนึงถึงเรื่องคุณภาพกำลังไฟฟ้าจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน

## บทที่ 4

### วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไทรแอก

#### 4.1 คำนำ

รายละเอียดเนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอเกี่ยวกับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไทรแอก ซึ่งจะแตกต่างจากสองบทก่อนหน้านี้ที่เป็นการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยในบทนี้จะมีการอธิบายเกี่ยวกับวงจรจุดชนวนเกทของไทรแอกที่ใช้ไอซี TCA785 วงจรขับเคลื่อนที่ใช้ไทรแอก และผลการทำสอบวงจรเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น

#### 4.2 วงจรจุดชนวนเกท

วงจรจุดชนวนเกทให้กับไทรแอก จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ด้วยกัน คือ ไอซี TCA785 และวงจรแยก โคคัลญูณวม ซึ่งในหัวข้อนี้จะแยกการอธิบายในแต่ละส่วนอย่างละเอียดเพื่อง่ายต่อความทำความเข้าใจดังนี้

##### 4.2.1 ไอซี TCA785

TCA785 เป็นไอซีที่สร้างพัลส์จุดชนวนเกทไทรแอก ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ ดังเช่น สามารถปรับมุมจุดชนวนเกทได้ตั้งแต่  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$  แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้ TCA785 อยู่ในช่วง 8-18 V กระแสภายในวงจรรวมใช้ประมาณ 4.5 mA ถึง 10 mA สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ  $-25$  ถึง  $85^\circ\text{C}$  กระแสจุดชนวนเกท สามารถจ่ายได้ถึง 250 mA สัญญาณจุดชนวนเกท สามารถควบคุมได้ที่ขา 11 (control voltage) ลักษณะของสัญญาณจุดชนวนเกทสามารถกำหนดได้เป็นแบบเดี่ยวและแบบต่อเนื่อง อีกทั้งย่านความถี่ใช้งานอยู่ในย่าน 10-500 Hz โดยโครงสร้างของ TCA785 จะเป็นไอซีที่มี 16 ขา ดังรูปที่ 4.1 โดยรายละเอียดที่ขาต่าง ๆ ของไอซีเป็นดังนี้

- ขา 16 คือ  $+V_s$  รับแรงดันไบแอสในย่าน  $+8$  ถึง  $+18\text{ V}_{dc}$

- ขา 5 คือ ขาที่รับแรงดันซิงโครนัส ( $V_{syn}$ ) ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสลับที่ต่อกับวงจรภาคกำลัง

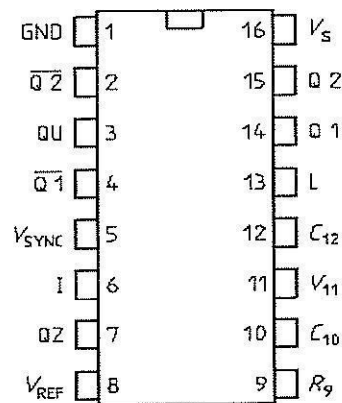
-  $R_9$  คือ ตัวต้านทานสร้างสัญญาณลาดเอียง มีค่าเหมาะสมในช่วง  $3\text{ k}\Omega$  ถึง  $300\text{ k}\Omega$

-  $C_{10}$  คือ ตัวเก็บประจุสร้างสัญญาณลาดเอียงต่อกับขา 9 และขา 10 ค่าของ  $C_{10}$  มีค่าในช่วง 500 pF ถึง  $1\text{ }\mu\text{F}$

หมายเหตุ ค่า  $R_9$  และ  $C_{10}$  จะเป็นตัวกำหนดขนาดของสัญญาณลาดเอียง ( $V_{10}$ ) ถ้า  $R_9$  และ  $C_{10}$  มีค่ามาก ความลาดเอียงของ  $V_{10}$  จะมีค่ามากตามไปด้วย

- ขา 11 คือ ขาที่ต่อแรงดันควบคุม ( $V_{11}$ ) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ แรงดันควบคุมนี้จะเปรียบเทียบกับแรงดัน  $V_{10}$  เพื่อกำหนดขนาดของมุมจุดชนวนเกทที่เอาต์พุตของวงจร

หมายเหตุ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีขา 14 และ 15 โดยพัลส์ที่ขา 15 จะทำงานในช่วงมุม  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$  และพัลส์ที่ขา 14 จะทำงานในช่วงมุม  $180^\circ$  ถึง  $360^\circ$



รูปที่ 4.1 ไอซี TCA785

การนำ TCA785 ไปใช้ในการสร้างสัญญาณจุดชนวนเกทให้กับไทรแอก ควรทำการศึกษาหลักการทางานเพื่อเรียนรู้ถึงวิธีการควบคุมมุมจุดชนวนเกทได้อย่างเหมาะสม การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีผลต่อสัญญาณจุดชนวน ดังนั้นการใช้งาน TCA785 ควรกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในย่านการทำงานดังนี้

- $V_s$  ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 8 ถึง  $18 V_{dc}$  ดังนั้นจึงกำหนดให้  $V_s$  เท่ากับ  $15 V_{dc}$
- $V_{syn}$  คือ แรงดันที่ได้มาจากระบบการซิงโครไนซ์ ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ  $12 V_{rms}$  50 Hz
- Inhibit นำไปต่อกับแรงดัน  $15 V_{dc}$  โดยมีตัวต้านทานขนาด  $10 k\Omega$  จำกัดกระแสก่อนต่อเข้าที่

ขา 16

- $C_{10}$  ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 500 pF ถึง  $1 \mu F$  ดังนั้นจึงเลือกตัวเก็บประจุขนาด 47 nF
- $R_9$  ควรมีค่าอยู่ระหว่าง  $3 k\Omega$  ถึง  $300 k\Omega$  เลือกความต้านทานชนิดปรับค่าได้ขนาด  $10 k\Omega$  ต่อ

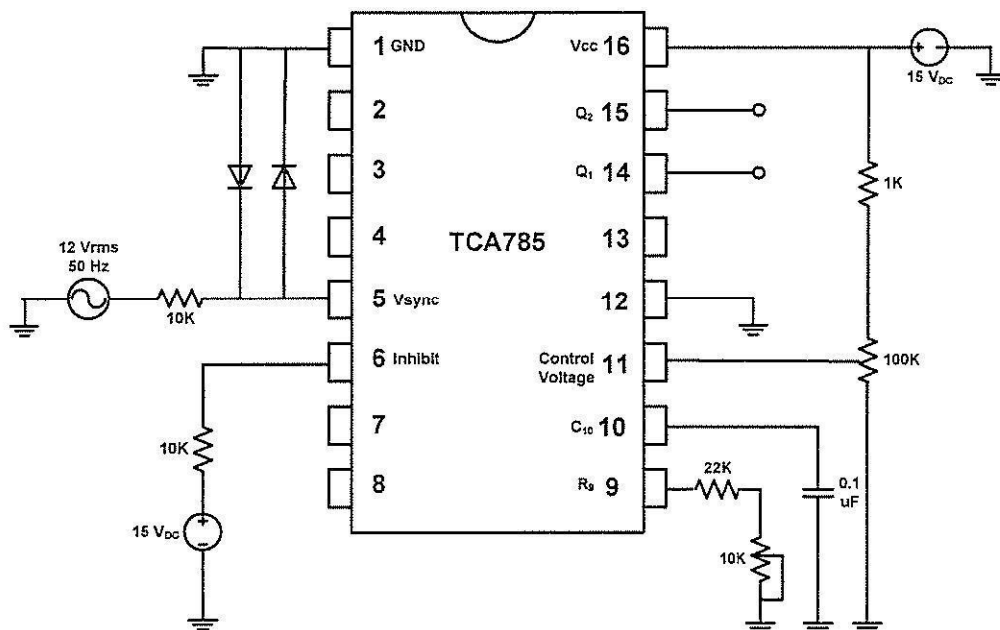
อนุกรมกับ  $22 k\Omega$

-  $V_{11}$  (control voltage) เลือกลงแรงดัน 15 V<sub>dc</sub> ต่อเข้ากับความต้านทานชนิดปรับค่าได้ ขนาด 100 k $\Omega$  ที่ต่ออนุกรมกับ 1 k $\Omega$  เพื่อปรับระดับแรงดันที่เหมาะสม

-  $C_{12}$  นำไปต่อกับสายดินเนื่องจากการความกว้างพัลส์ขนาด 180° -  $\alpha$

จากเงื่อนไขทั้งหมด เมื่อนำมาสร้างวงจรทดสอบการสร้างสัญญาณจุดชนวนเกท จะได้วงจรดัง

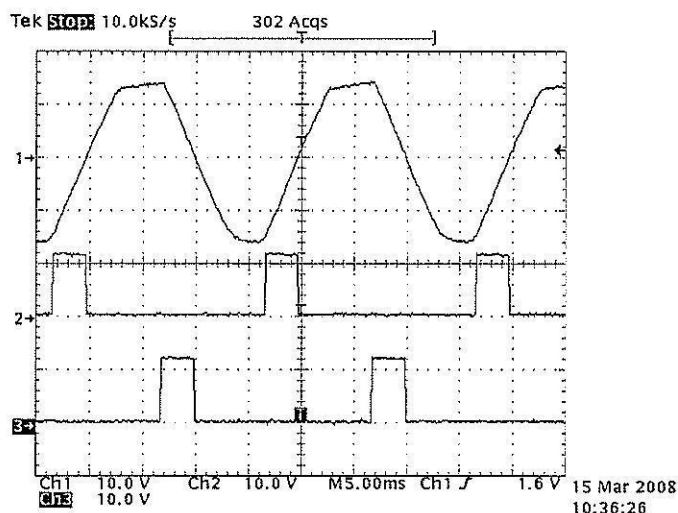
รูปที่ 4.2 ดังนี้



รูปที่ 4.2 วงจร TCA785 ที่ใช้ทดสอบ

หมายเหตุ การใช้งาน TCA785 สำหรับงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากเอกสารข้อมูล (data sheet) ของ TCA785 ที่ดาวน์โหลดจาก [www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

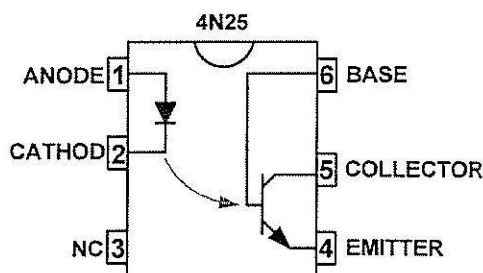
จากการทดสอบเมื่อวัดสัญญาณที่ขา 14 และขา 15 ของวงจรเทียบกับแรงดันซิงโครไนซ์ ( $V_{syn}$ ) จะได้ดังรูปที่ 4.3 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือ แรงดันซิงโครไนซ์ ช่องสัญญาณที่ 2 คือ สัญญาณที่วัดจากขา 14 ช่องสัญญาณที่ 3 คือ สัญญาณที่วัดจากขา 15



รูปที่ 4.3 สัญญาณที่ขา 14 และ 15 เทียบกับแรงดันซิงโครไนซ์

#### 4.2.2 วงจรแยกโคตสัญญาณ

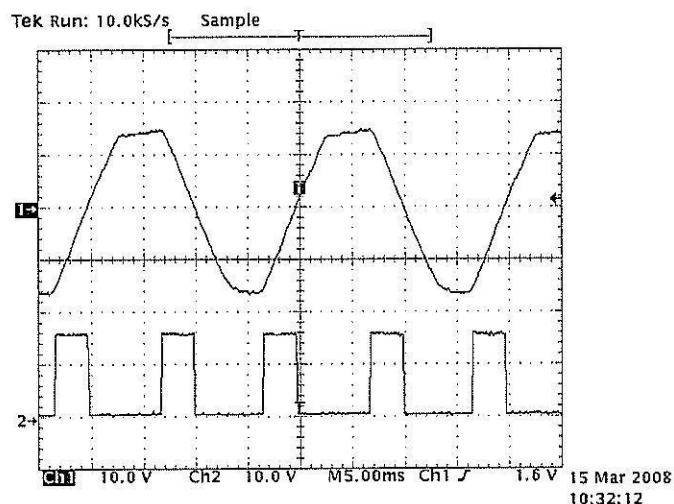
ออปโตคอปเปลอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการเชื่อมโยงสัญญาณทางไฟฟ้าจากวงจรอินพุตกับวงจรเอาต์พุตโดยใช้แสงเป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงแทนกระแสไฟฟ้า ประโยชน์ของการเชื่อมโยงทางแสง คือ เป็นการป้องกันวงจรระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตเพื่อป้องกันอันตรายระหว่างวงจรสองวงจรที่ต้องส่งสัญญาณทางไฟฟ้าถึงกัน หรือนิยมใช้ในวงจรเชื่อมโยง (interface circuit) ที่มีความแตกต่างของระดับแรงดันไบแอส หรือวงจรที่มีความแตกต่างกราวด์ (different ground) ช่วงความถี่ในการใช้งานขึ้นอยู่กับออปโตคอปเปลอร์แต่ละชนิด ดังนั้นในการเลือกใช้งานออปโตคอปเปลอร์ควรเลือกชนิดให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ออปโตคอปเปลอร์เบอร์ 4N25 ดังรูปที่ 4.4 เพื่อใช้เป็นวงจรแยกโคตสัญญาณ



รูปที่ 4.4 ออปโตคอปเปลอร์เบอร์ 4N25

การทดสอบวัดสัญญาณจุดชนวนเกณฑ์ของไทรแอกที่ผ่านจากออปโตคอปเปลอร์ดูได้จากรูปที่

4.5 ดังนี้



รูปที่ 4.5 สัญญาณเอาต์พุตของออปโตคอปเปลอร์เทียบกับ  $V_{syn}$

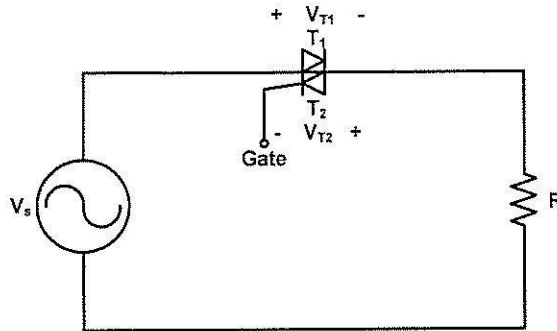
#### 4.3 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไทรแอกในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยวงจรหลัก 2 วงจรด้วยกัน คือ วงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยไทรแอกและวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งในรายละเอียดในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะการทำงานของวงจรดังกล่าว โดยมีการวิเคราะห์การทำงานของวงจรเป็นโหมด ๆ อย่างละเอียด ซึ่งการอธิบายจะแยกการอธิบายออกเป็นสามหัวข้อย่อยด้วยกัน คือ วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยไทรแอก วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ และวงจรรวมสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

##### 4.3.1 วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยไทรแอก

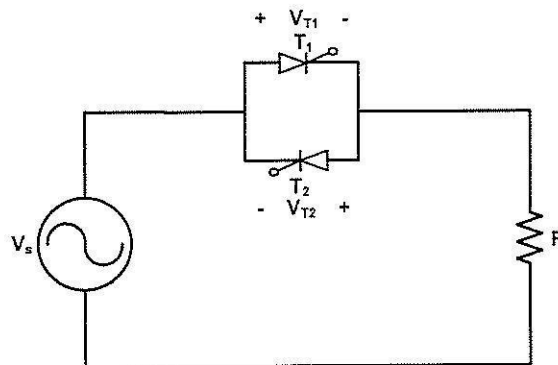
วงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยไทรแอก ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตด้วยการปรับมุมจุดชนวนเกณฑ์ โดยสามารถปรับมุมจุดชนวนเกณฑ์ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา ซึ่งการปรับมุมจุดชนวนเกณฑ์จะทำให้ได้แรงดันทางด้านเอาต์พุตตามที่ต้องการ จากหลักการการทำงานของไทรแอก ที่นำกระแสได้ทั้งซีกบวกและลบของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยไทรแอกจะนำกระแสเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขา  $MT_1$  และ  $MT_2$  และต้องได้รับกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขาเกต เมื่อต่อไทรแอกเข้า

กับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและโหลด จะได้วงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามการปรับมุมจุดชนวนเกท ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าด้วยไทรแอก

การวิเคราะห์หลักการทำงานของไทรแอก สามารถนำหลักการวิเคราะห์เอสซีอาร์มาใช้ได้ เนื่องจากโครงสร้างภายในของไทรแอก เปรียบเสมือนการนำเอสซีอาร์ 2 ตัวมาทำงานร่วมกันในลักษณะที่เอสซีอาร์แต่ละตัวจะสลับกันทำงานในแต่ละช่วงคลื่นของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยแสดงดังรูปที่ 4.7



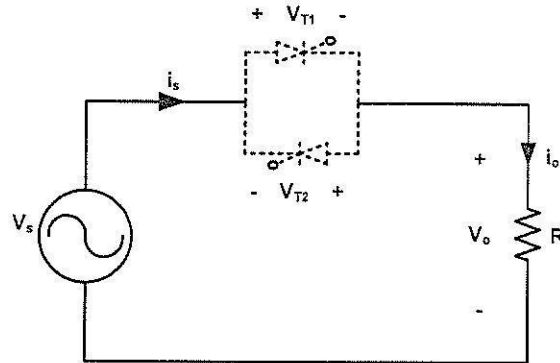
รูปที่ 4.7 วงจรที่ใช้เอสซีอาร์แทนโครงสร้างภายในของไทรแอก

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.7 สามารถนำมาวิเคราะห์หลักการทำงานในโหมดต่าง ๆ ได้ดังนี้



โหมดที่ 1 ไตรแอกได้รับสัญญาณซิกบวก แต่ยังไม่ได้รับกระแสกระตุ้นที่ขาเกต

เนื่องจากไตรแอกยังไม่ได้รับสัญญาณจุดชนวนที่ขาเกต ไตรแอกจึงยังไม่สามารถนำกระแสได้นั้นคือ ไตรแอกจะมีลักษณะเหมือนสวิตช์ที่ถูกเปิดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลใน โหมดที่ 1

จากวงจรรูปที่ 4.8 สามารถวิเคราะห์วงจรโดยใช้กฎเคอร์ชอฟฟ์ ได้ดังนี้

KVL :

$$-V_s + V_{T1} + V_o = 0$$

$$-V_s + V_{T1} + 0 = 0$$

$$V_{T1} = V_s$$

จะได้

$$V_{T2} = -V_{T1} = -V_s$$

และ

$$V_o = 0$$

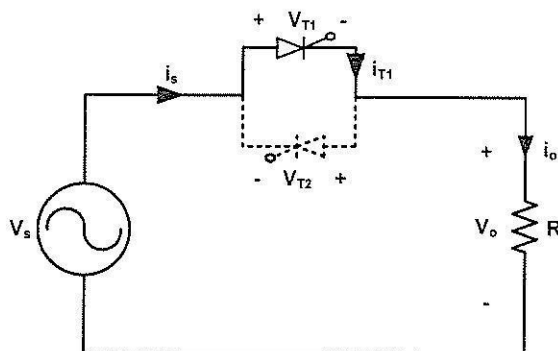
$$i_o = 0$$

$$i_{T1} = 0$$

$$i_{T2} = 0$$

โหมดที่ 2 ไตรแอกได้รับสัญญาณซิกบวก และได้รับกระแสกระตุ้นที่ขาเกต

เมื่อไตรแอกได้รับสัญญาณไฟฟ้าด้านซิกบวก พร้อมทั้งมีกระแสจุดชนวนที่ขาเกต จะทำให้  $T_1$  นำกระแสได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลในโหมดที่ 2

จากวงจรรูปที่ 4.9 สามารถวิเคราะห์ห้วงจรโดยใช้กฎเคอร์ชอฟฟ์ ได้ดังนี้

*KVL :*

$$-V_s + V_{T1} + V_o = 0$$

$$-V_s + 0 + V_o = 0$$

$$V_o = V_s$$

จะได้

$$V_{T1} = 0$$

และ

$$V_{T2} = 0$$

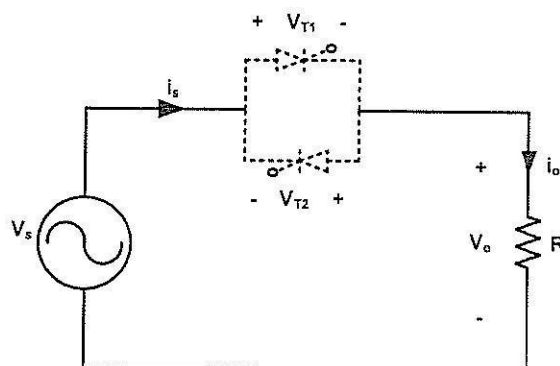
$$i_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_s}{R}$$

$$i_{T1} = i_o$$

$$i_{T2} = 0$$

โหมดที่ 3 ไตรแอกได้รับสัญญาณซิกลอป แต่ยังไม่ได้รับกระแสกระตุ้นที่ขาเกต

เนื่องจากไตรแอกยังไม่ได้รับสัญญาณจุดชนวนที่ขาเกต ไตรแอกจึงยังไม่สามารถทำงานได้ นั่นคือ ไตรแอกจะมีลักษณะเหมือนสวิตช์ที่ถูกเปิดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 วงจรสมมูลในโหมดที่ 3

จากวงจรรูปที่ 4.10 สามารถวิเคราะห์วงจรโดยใช้กฎเคอร์ชอฟฟ์ ได้ดังนี้

*KVL :*

$$-V_s + V_{T1} + V_o = 0$$

$$-V_s + V_{T1} + 0 = 0$$

$$V_{T1} = V_s$$

จะได้

$$V_{T2} = -V_{T1} = -V_s$$

และ

$$V_o = 0$$

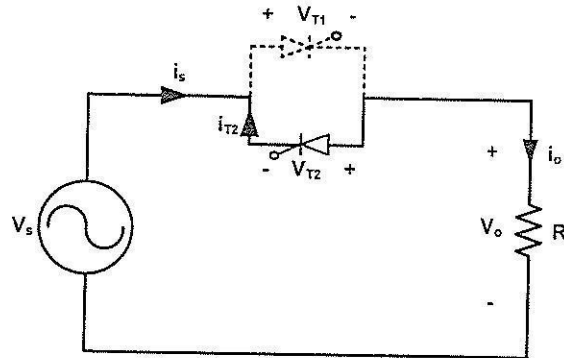
$$i_o = 0$$

$$i_{T1} = 0$$

$$i_{T2} = 0$$

โหมดที่ 4 ไตรแอกได้รับสัญญาณซิกลบ และได้รับกระแสกระตุ้นที่ขาเกต

เมื่อไตรแอกได้รับสัญญาณไฟฟาด้านซิกบวก พร้อมทั้งมีกระแสจุกชนวนที่ขาเกต จะทำให้  $T_2$  นำกระแสได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วงจรสมมูลในโหมดที่ 4

จากวงจรรูปที่ 4.11 สามารถวิเคราะห์วงจรโดยใช้กฎเคอร์ชอฟฟ์ ได้ดังนี้

KVL :

$$-V_s + V_{T2} + V_o = 0$$

$$-V_s + 0 + V_o = 0$$

$$V_o = V_s$$

จะได้

$$V_{T1} = 0$$

และ

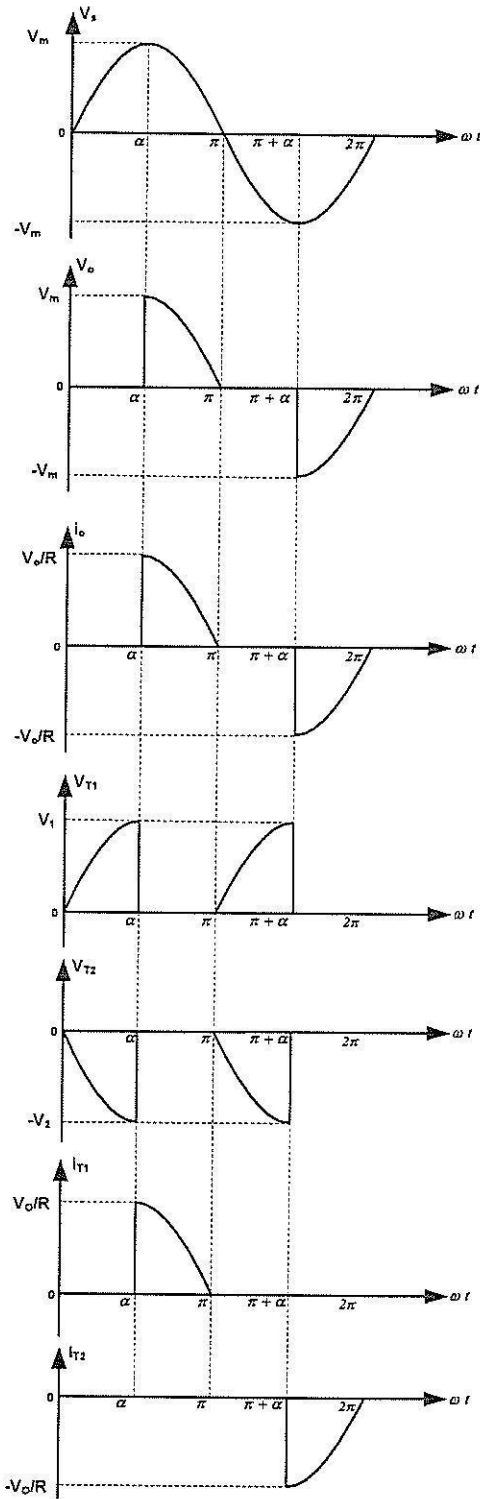
$$V_{T2} = 0$$

$$i_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_s}{R}$$

$$i_{T1} = 0$$

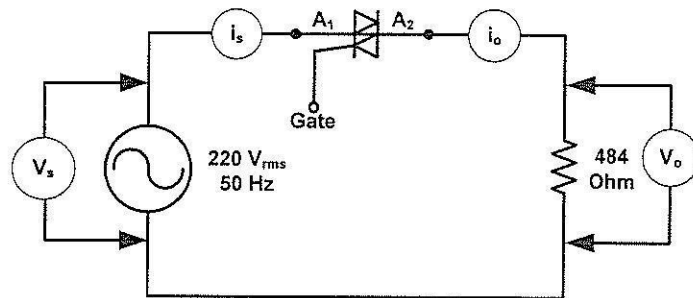
$$i_{T2} = -i_o$$

จากการวิเคราะห์การทำงานในโหมดต่าง ๆ สัญญาณที่ได้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 รูปสัญญาณต่างๆ ของวงจรที่ใช้ไทรแอก

การทดสอบวงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยไครแอก จะทำการทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ  $220 \text{ V}_{\text{rms}}$   $50 \text{ Hz}$  การทดสอบจะวัดแรงดันที่แหล่งจ่าย ( $V_s$ ) กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ ) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ( $i_o$ ) โดยวงจรที่ใช้ทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.13



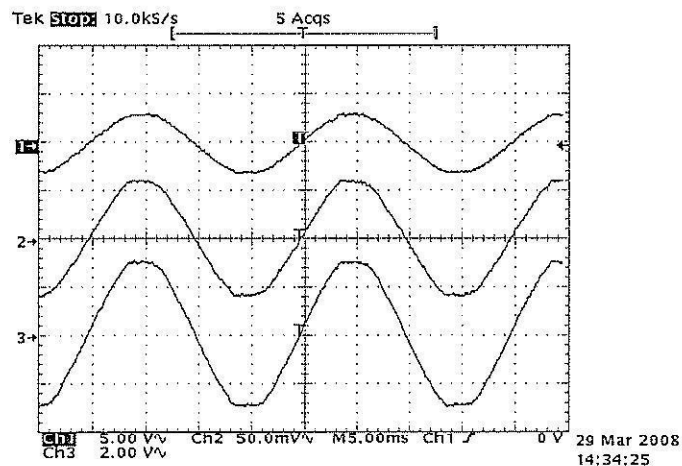
รูปที่ 4.13 แผนภาพการติดตั้งมิเตอร์สำหรับการทดสอบวงจรปรับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ไครแอก

แรงดันเอาต์พุตดังรูปที่ 4.13 จะมีลักษณะรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 4.12 ที่อธิบายไว้ในข้างต้น และจากผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 4.1 ดังนี้

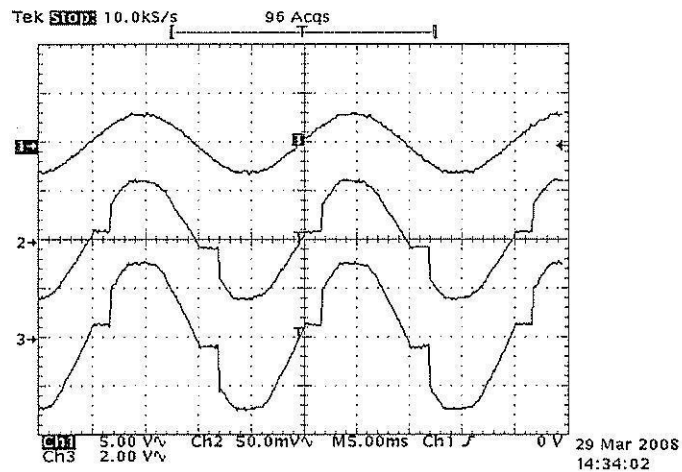
ตารางที่ 4.1 วงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยไครแอก

มุม $\alpha$	$V_{o,rms}$ (ปฏิบัติ)	ความคลาด เคลื่อน	$i_{o,rms}$ ( $A_{rms}$ )	$I_{s,rms}$ ( $A_{rms}$ )
$0^\circ$	219.90	0.05	0.432	0.432
$30^\circ$	216.60	0.04	0.429	0.429
$60^\circ$	192.84	2.00	0.403	0.403
$90^\circ$	160.41	3.11	0.366	0.366
$120^\circ$	109.80	11.60	0.299	0.300
$150^\circ$	32.47	13.32	0.166	0.167
$180^\circ$	0	0	0	0

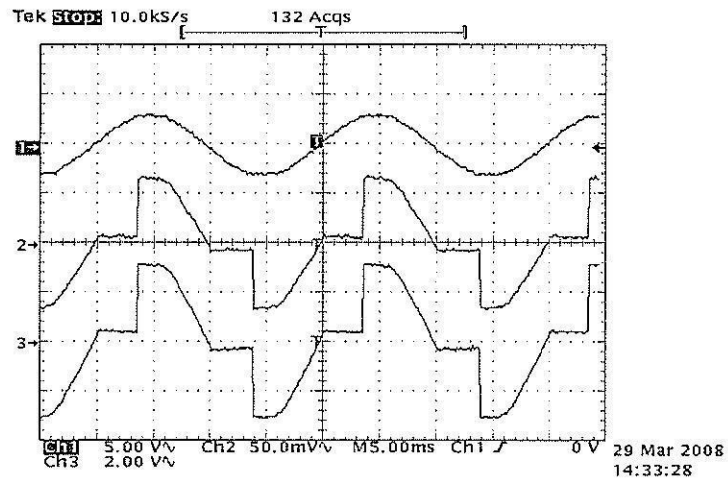
จากการทดสอบ สามารถบันทึกกราฟ ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 ถึง 4.20 ดังต่อไปนี้  
 หมายเหตุ จากรูปที่ 4.14 ถึง 4.20 ช่องสัญญาณที่ 1 คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V<sub>rms</sub> ช่องสัญญาณ  
 ที่ 2 คือ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ( $i_s$ ) ช่องสัญญาณที่ 3 คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ )



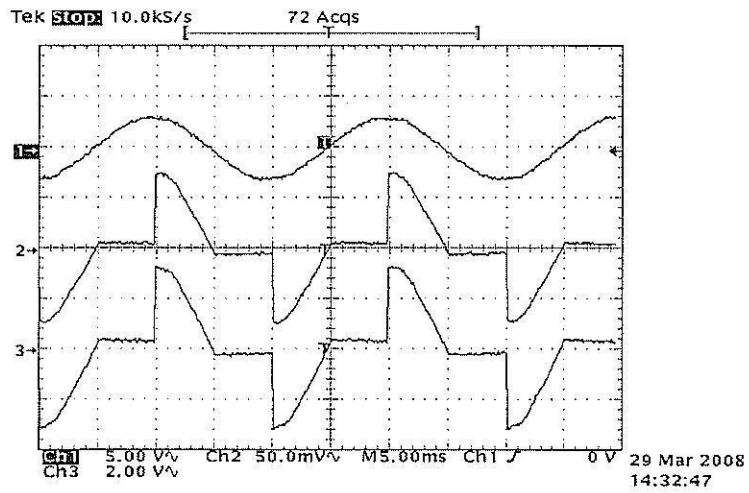
รูปที่ 4.14 การทดสอบวงจรไทรแอกที่มีมุม 0 องศา



รูปที่ 4.15 การทดสอบวงจรไทรแอกที่มีมุม 30 องศา

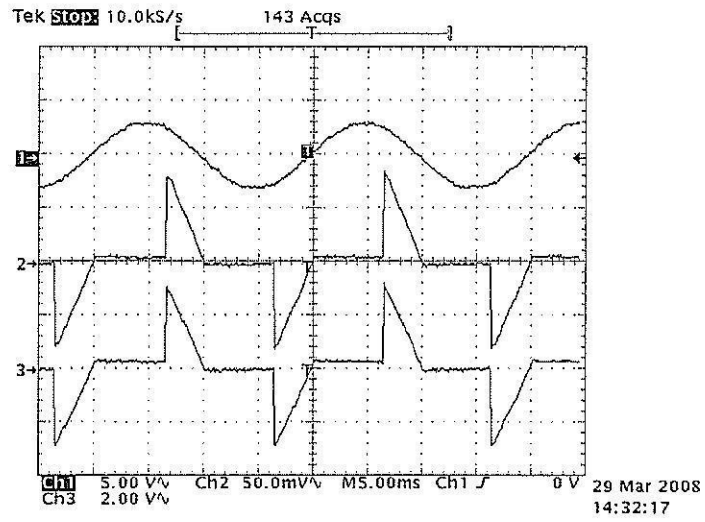


รูปที่ 4.16 การทดสอบวงจร ไดรแอกที่มุม 60 องศา

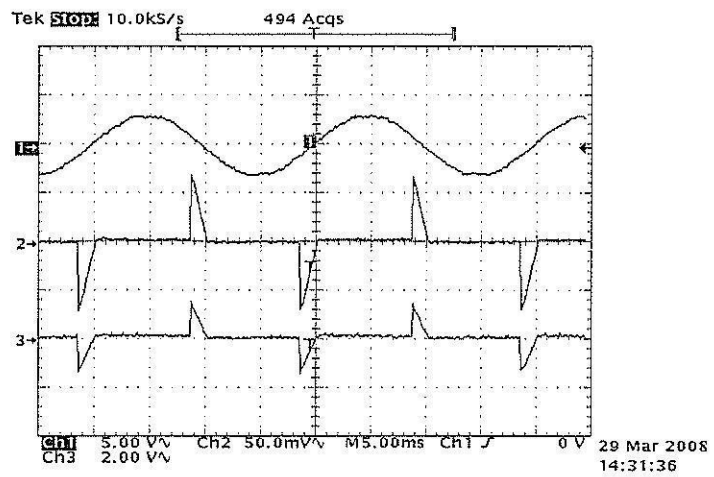


รูปที่ 4.17 การทดสอบวงจร ไดรแอกที่มุม 90 องศา

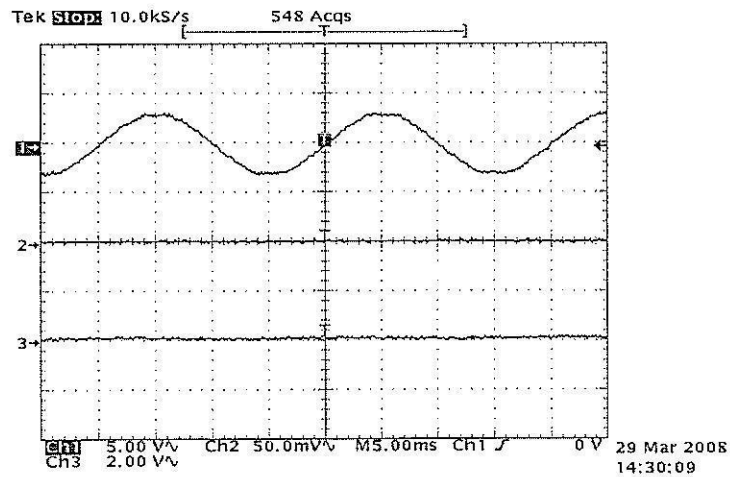




รูปที่ 4.18 การทดสอบวงจรไทรแอกที่มุม 120 องศา



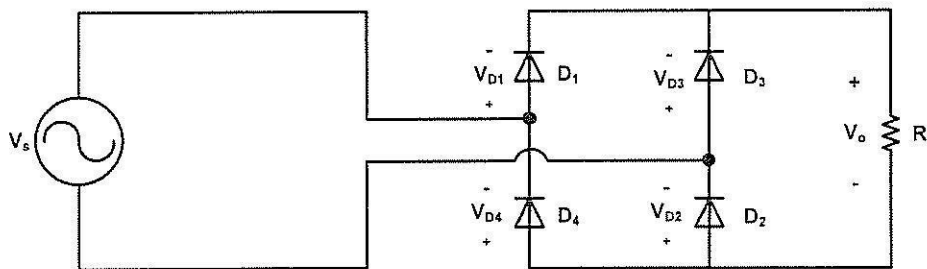
รูปที่ 4.19 การทดสอบวงจรไทรแอกที่มุม 150 องศา



รูปที่ 4.20 การทดสอบวงจรไดรแอกที่มูม 180 องศา

#### 4.3.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ คือ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ไดโอด 4 ตัวมาต่อกันแบบบริดจ์ ซึ่งจะมีไดโอด 2 ตัวที่สามารถนำกระแสเมื่อแหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้าจ่ายสัญญาณในซีกบวก และอีก 2 ตัวจะนำกระแสได้เมื่อแหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้าจ่ายสัญญาณในซีกลบ วงจรดังกล่าวพิจารณาได้จากรูปที่ 4.21 ดังนี้

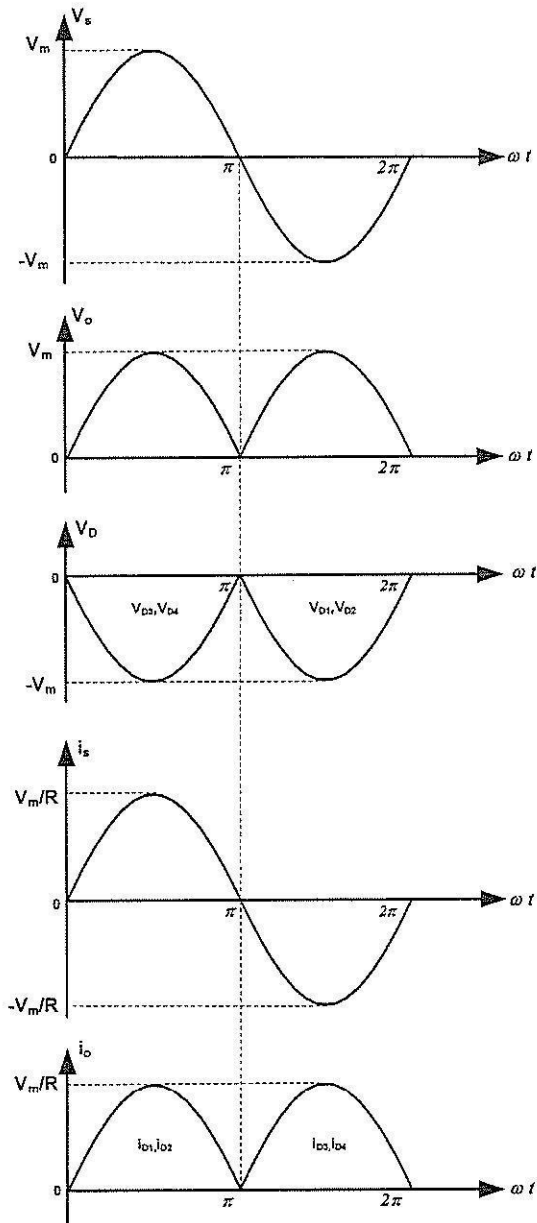


รูปที่ 4.21 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์

การอธิบายลักษณะการทำงานของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้ จะแบ่งอธิบายออกเป็น 2 กรณีด้วยกัน คือ กรณีไม่มีตัวเก็บประจุ และมีตัวเก็บประจุ เพื่อลดค่าแรงดันพลิว (ripple voltage)

กรณีไม่มีตัวเก็บประจุ

รูปสัญญาณต่าง ๆ ของวงจรในกรณีที่มีตัวเก็บประจุได้จากรูปที่ 4.22 ดังนี้



รูปที่ 4.22 รูปสัญญาณต่าง ๆ ที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและที่เอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส

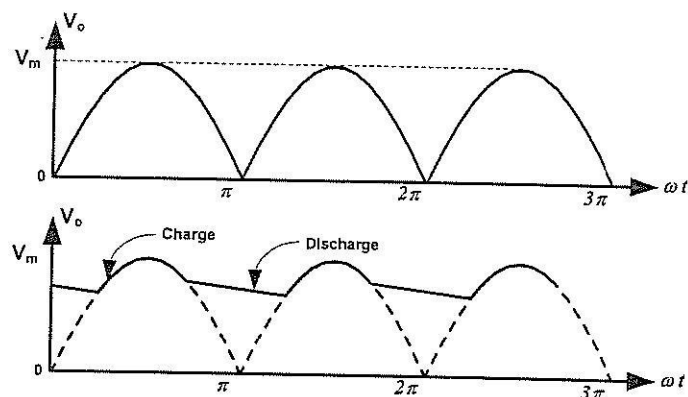
### กรณีมีตัวเก็บประจุ

แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ยังมีความพลัว (ripple) ปนอยู่ในปริมาณสูง ซึ่งยังไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้นต้องนำแรงดันนี้ไปผ่านวงจรกรองเพื่อลดค่าแรงดันพลัวให้มีค่าลดลง วงจรกรองแบบที่ง่ายและนิยมที่สุดก็คือ วงจรกรองแบบใช้ตัวเก็บประจุ วงจรกรองประเภทนี้จะใช้ตัวเก็บประจุ C ต่อขนานกับตัวต้านทานโหลด R ตัวเก็บประจุ C จะทำหน้าที่เก็บประจุไว้ในเวลาที่ไดโอดนำกระแสและทำหน้าที่คายประจุผ่านโหลดตัวต้านทานในเวลาที่ไดโอดไม่นำกระแส การทำงานของวงจรกรองจะทำการกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ยังไม่เรียบให้มีความราบเรียบยิ่งขึ้น อีกทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้เมื่อผ่านการกรองแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยคำนวณหาได้จากสมการ (4-1) และ (4-2) และรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตก่อนและหลังมีตัวเก็บประจุได้จากรูปที่ 4.23

$$V_{o,av} = V_m - \frac{V_m}{4fRC} \quad (4-1)$$

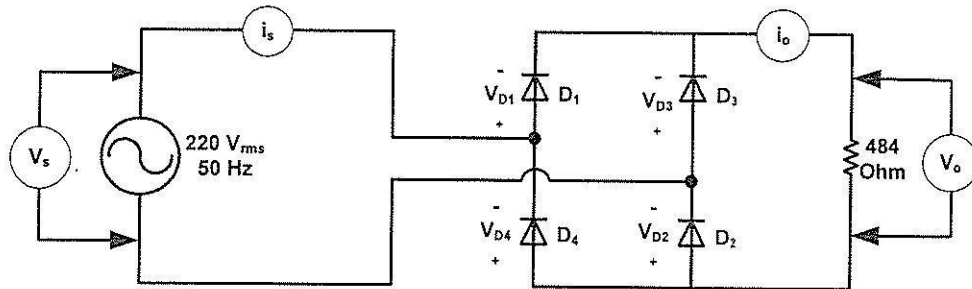
$$V_{r,p-p} = \frac{V_m}{2fRC} \quad (4-2)$$

เมื่อ  $V_{r,p-p}$  คือ แรงดันพลัว จากจุดยอดถึงจุดต่ำสุด



รูปที่ 4.23 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตก่อนและหลังมีตัวเก็บประจุ

การทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ จะทำการทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V<sub>rms</sub> 50 Hz การทดสอบจะวัดแรงดันที่แหล่งจ่าย ( $V_s$ ) กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ ) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ( $i_o$ ) ดังรูปที่ 4.24 ดังนี้



รูปที่ 4.24 แผนภาพการติดตั้งมิเตอร์สำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ กรณีไม่มีตัวเก็บประจุ

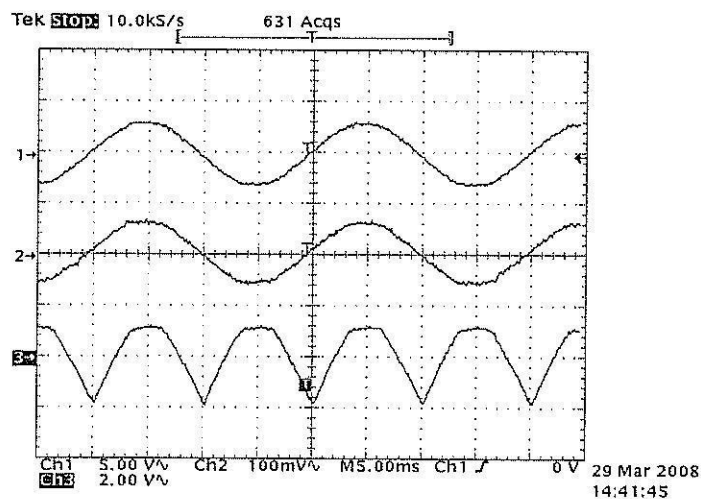
เมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 4.23 การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุต ( $V_{o,av}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-3)

$$V_{o,av} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m \quad (4-3)$$

จากผลการทดสอบดังกล่าว ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดแสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 และจะได้รูปกราฟจากการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.25

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ กรณีไม่มีตัวเก็บประจุ

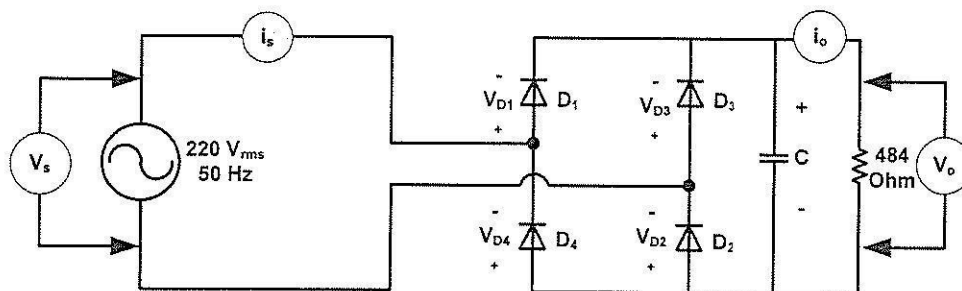
ปริมาณที่วัด	ค่าที่วัดได้
$V_{s,rms}$	220.0 V <sub>rms</sub>
$i_{s,rms}$	0.431 A <sub>rms</sub>
$V_{o,av}$	195.4 V <sub>dc</sub>
$I_{o,av}$	0.385 A <sub>dc</sub>



รูปที่ 4.25 รูปสัญญาณวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ กรณีไม่มีตัวเก็บประจุ

หมายเหตุ ช่องสัญญาณที่ 1 คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ  $220\text{ V}_{\text{rms}}$  ช่องสัญญาณที่ 2 คือ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ( $i_s$ ) ช่องสัญญาณที่ 3 คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ )

การทดสอบกรณีมีตัวเก็บประจุ จะทำการทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ  $220\text{ V}_{\text{rms}}$   $50\text{ Hz}$  การทดสอบจะวัดแรงดันที่แหล่งจ่าย ( $V_s$ ) กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ ) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ ) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต ( $i_o$ ) ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 แผนภาพการติดตั้งมิเตอร์สำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ กรณีมีตัวเก็บประจุ

การออกแบบหาค่าตัวเก็บประจุ

$$\text{จาก } V_{o,av} = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2 \times 220\sqrt{2}}{\pi} = 198.1 \text{ V}$$

กำหนด  $V_{r,p-p} = 0.02 V_m$  จะได้

$$0.02V_m = \frac{V_m}{2 \times 50 \times 392.4 \times C} \rightarrow C = \frac{I}{2 \times 50 \times 392.4 \times 0.02} \\ = 1274 \text{ } \mu\text{F}$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุ  $470 \text{ } \mu\text{F}$  จำนวน 4 ตัว ต่อขนานกัน

$$\text{ได้ } 470 \text{ } \mu\text{F} \times 4 = 1880 \text{ } \mu\text{F}$$

แรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ กรณีสมีตัวเก็บประจุ

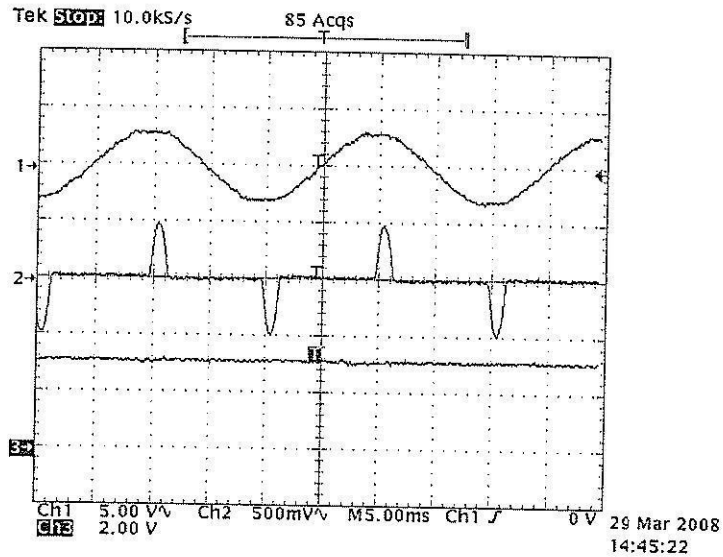
$$V_{o,av} = V_m - \frac{V_m}{4fRC} \\ = 220\sqrt{2} - \frac{220\sqrt{2}}{4 \times 50 \times 392.4 \times 1880 \times 10^{-6}} \\ = 309.02 \text{ V}$$

จะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ กรณีสมีตัวเก็บประจุ

ปริมาณที่วัด	ค่าที่วัดได้
$V_{s,rms}$	$220.0 \text{ V}_{rms}$
$i_{s,rms}$	$1.410 \text{ A}_{rms}$
$V_{o,av}$	$299.4 \text{ V}_{dc}$
$I_{o,av}$	$0.509 \text{ A}_{dc}$

ซึ่งสามารถบันทึกกราฟการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ดังนี้

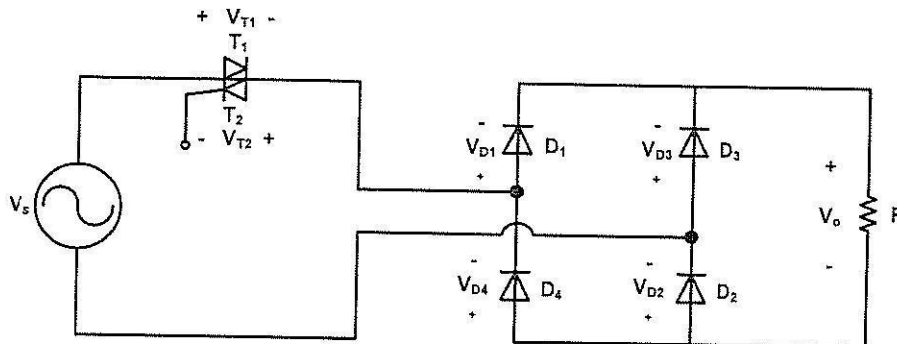


รูปที่ 4.27 รูปสัญญาณวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ กรณีมีตัวเก็บประจุ

หมายเหตุ ช่องสัญญาณที่ 1 คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V<sub>rms</sub> ช่องสัญญาณที่ 2 คือ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ( $i_s$ ) ช่องสัญญาณที่ 3 คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ( $V_o$ )

### 4.3.3 วงจรรวมสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

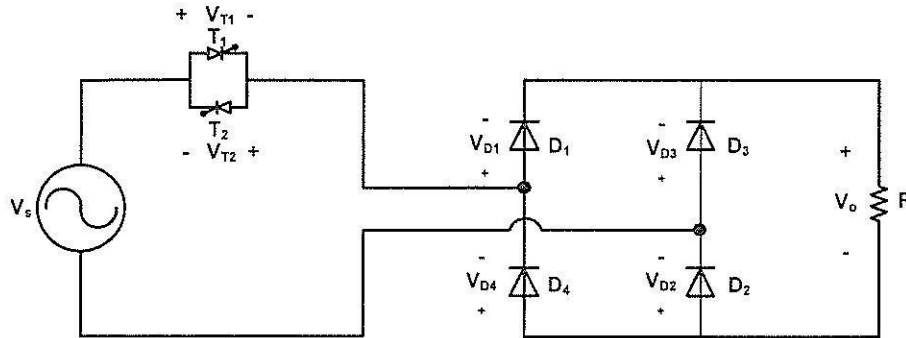
วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นวงจรที่สามารถปรับระดับแรงดันเอาต์พุตได้ โดยอาศัยหลักการของการควบคุมและปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยไครเอกร่วมกับชุดจุดชนวนเกท โดยใช้ไอซี TCA785 ร่วมกับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ โดยวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไครเอกในงานวิจัยนี้ดูได้จากรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไครเอก



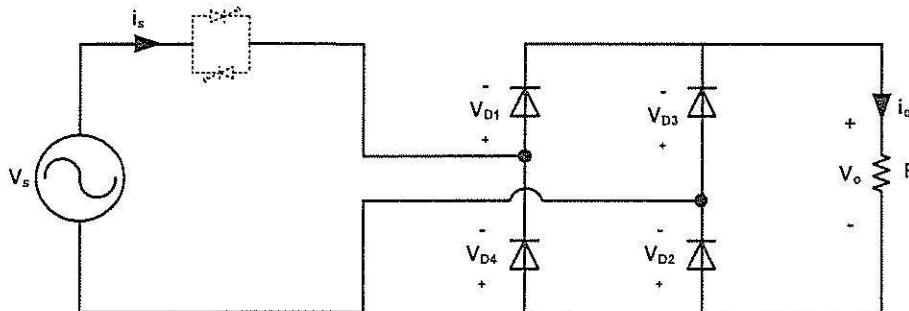
จากรูปที่ 4.29 ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถวิเคราะห์โหมคการทำงานของวงจรได้ดังนี้



รูปที่ 4.29 วงจรที่ใช้วิเคราะห์การทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไทรแอก

โหมคที่ 1 วงจรได้รับสัญญาณไฟฟ้าทางซีกบวก แต่ยังไม่ได้รับกระแสกระตุ้นที่ขาเกต

เนื่องจากไทรแอกยังไม่ได้รับสัญญาณจุดชนวนที่ขาเกต ไทรแอกจึงไม่สามารถนำกระแสได้ นั่นคือ ไทรแอกจะมีลักษณะเหมือนสวิตช์ที่ถูกเปิดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 วงจรสมมูลในโหมคที่ 1

จากวงจรรูปที่ 4.30 สามารถวิเคราะห์วงจรโดยใช้กฎเคอร์ชอฟฟ์ ได้ดังนี้

KVL :

$$-V_s + V_T + V_o = 0$$

$$-V_s + V_T + 0 = 0$$

จะได้  $V_T = V_s$

และ

$$i_s = 0$$

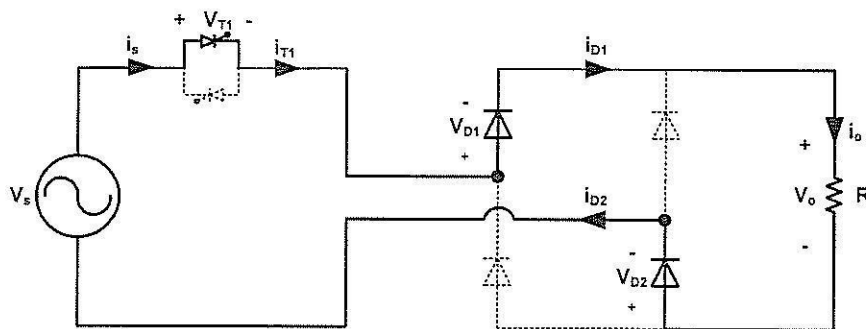
$$i_o = 0$$

$$i_{T1} = 0$$

$$i_{T2} = 0$$

โหมดที่ 2 วงจรได้รับสัญญาณไฟฟ้าทางซีกบวก และได้รับกระแสกระตุ้นที่ขาเกต

เมื่อไครแอกได้รับสัญญาณไฟฟ้าด้านซีกบวก พร้อมทั้งมีกระแสจุดชนวนที่ขาเกต จะทำให้  $T_1$  นำกระแสได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 วงจรสมมูลในโหมดที่ 2

จากวงจรรูปที่ 4.31 สามารถวิเคราะห์ห้วงจรโดยใช้กฎเคอร์ชอฟฟ์ ได้ดังนี้

*KVL :*

$$-V_s + V_{T1} + V_{D1} + V_o + V_{D2} = 0$$

$$-V_s + 0 + 0 + V_o + 0 = 0$$

จะได้

$$V_o = V_s$$

$D_3, D_4$  ไม่นำกระแส เปรียบเสมือนถูกเปิดวงจร

*KVL :*

$$-V_s - V_{D4} - V_o - V_{D3} = 0$$

จะได้

$$-V_m - V_D - V_m - V_D = 0$$

$$V_D = -V_m$$

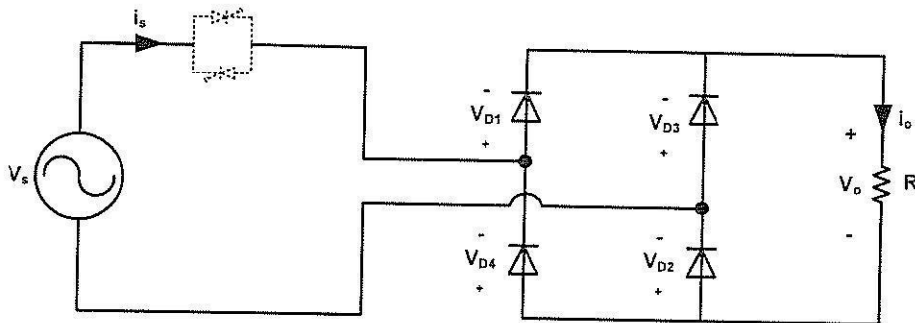
และ

$$V_{T2} = 0$$

$$i_s = i_{D1} = i_{D2} = i_o$$

$$i_{D3} = i_{D4} = 0$$

โหมดที่ 3 ไตรแอกได้รับสัญญาณไฟฟ้าทางซิกลอป แต่ยังไม่ได้รับกระแสกระตุ้นที่ขาเกต  
 เนื่องจากไตรแอกยังไม่ได้รับสัญญาณจุดชนวนที่ขาเกต ไตรแอกจึงยังไม่สามารถนำกระแสได้  
 นั่นคือ ไตรแอกจะมีลักษณะเหมือนสวิตช์ที่ถูกเปิดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 วงจรสมมูลในโหมดที่ 3

จากวงจรรูปที่ 3.29 สามารถวิเคราะห์วงจรโดยใช้กฎเคอร์ชอฟฟ์ ได้ดังนี้

KVL :

$$-V_s + V_T + V_o = 0$$

$$-V_s + V_T + 0 = 0$$

จะได้

$$V_T = V_s$$

และ

$$i_s = 0$$

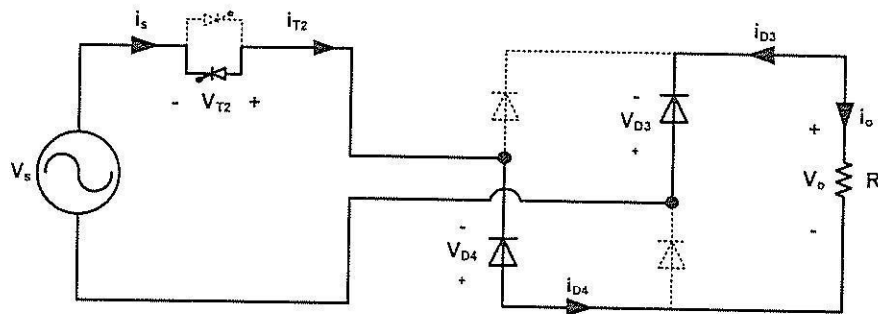
$$i_o = 0$$

$$i_{T1} = 0$$

$$i_{T2} = 0$$

โหมดที่ 4 ไตรแอกได้รับสัญญาณซิกลอป และได้รับกระแสกระตุ้นที่ขาเกต

เมื่อไตรแอกได้รับสัญญาณไฟฟ้าด้านซิกบวค พร้อมทั้งมีกระแสจุดชนวนที่ขาเกต จะทำให้  $T_2$  นำกระแสได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 วงจรสมมูลในโหมดที่ 4

จากวงจรรูปที่ 4.33 สามารถวิเคราะห์วงจรโดยใช้กฎเคอร์ชอฟฟ์ ได้ดังนี้

KVL :

$$-V_s + V_{T2} + V_{D3} + V_o + V_{D4} = 0$$

$$-V_s + 0 + 0 + V_o + 0 = 0$$

จะได้  $V_o = V_s$

$D_1, D_2$  ไม่นำกระแส เปรียบเสมือนถูกเปิดวงจร

KVL :

$$+V_s + V_{D1} + V_o + V_{D2} = 0$$

$$+V_m + V_D + V_m + V_D = 0$$

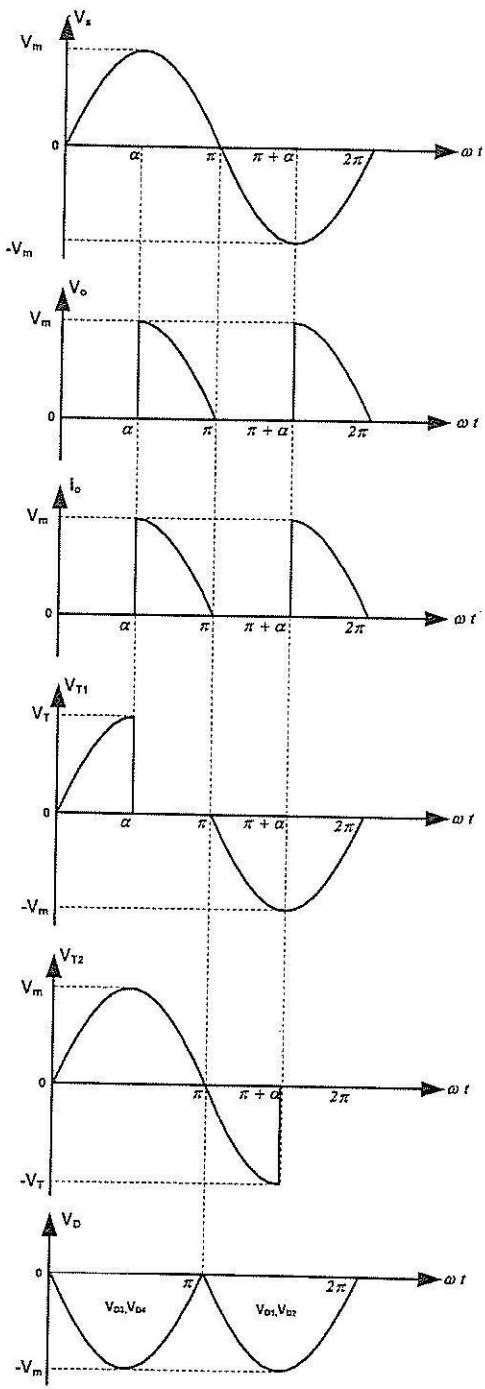
จะได้  $V_D = -V_m$

และ  $V_{T1} = 0$

$$i_s = i_{D3} = i_{D4} = i_o$$

$$i_{D1} = i_{D2} = 0$$

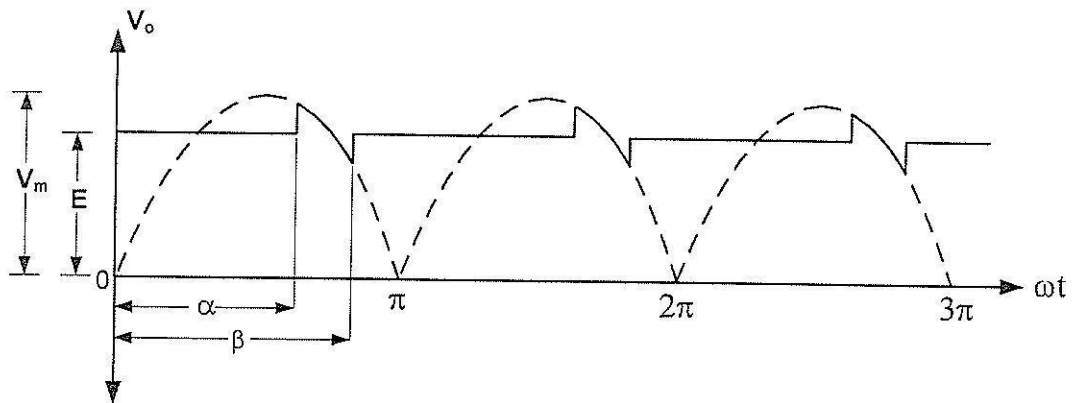
จากการวิเคราะห์การทำงานในโหมดต่างๆ สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.34 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.34 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของวงจรที่จุดต่างๆ

#### 4.4 ผลการทดสอบวงจรกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อพิจารณาค่าแรงดันเอาต์พุตของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ในกรณีที่โหลดของวงจรเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น รูปสัญญาณดังกล่าวจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.35



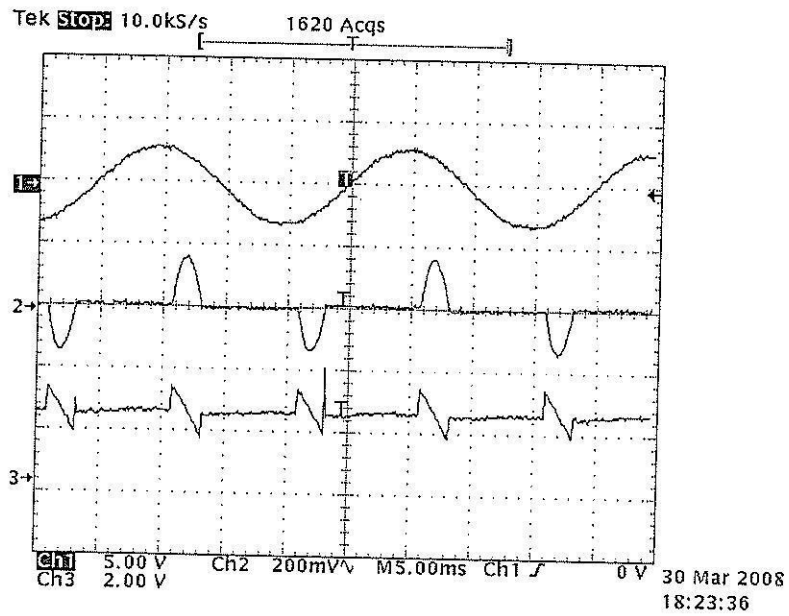
รูปที่ 4.35 แรงดันตกคร่อมมอเตอร์เมื่อต่อกับชุดขับเคลื่อน

จากรูปที่ 4.35 สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ( $V_{o,av}$ ) จากพื้นที่ใต้กราฟได้โดยการอินทิเกรต  
ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{o,av} &= \frac{I}{\pi} \left[ \int_0^{\alpha} E \cdot d(\omega t) + \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) + \int_{\beta}^{\pi} E \cdot d(\omega t) - \int_{\beta}^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) \right] \\
 V_{o,av} &= \frac{I}{\pi} [V_m (\cos \alpha + 1) + E(\alpha - \beta + \pi) - V_m (\cos \beta + 1)] \\
 V_{o,av} &= \frac{V_m}{\pi} [\cos \alpha + 1] + E \left[ \frac{\alpha}{\pi} - \frac{\beta}{\pi} + 1 \right] - \frac{V_m}{\pi} [\cos \beta + 1] \quad (4-4)
 \end{aligned}$$

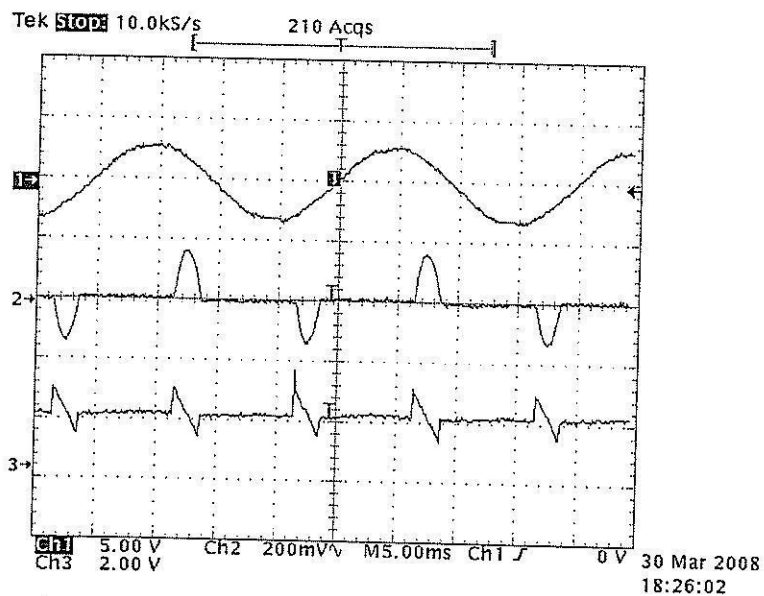
เมื่อ  $\alpha, \beta$  มีค่าเป็นเรเดียน

จากการทดสอบจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.36 ถึง 4.40 ดังนี้

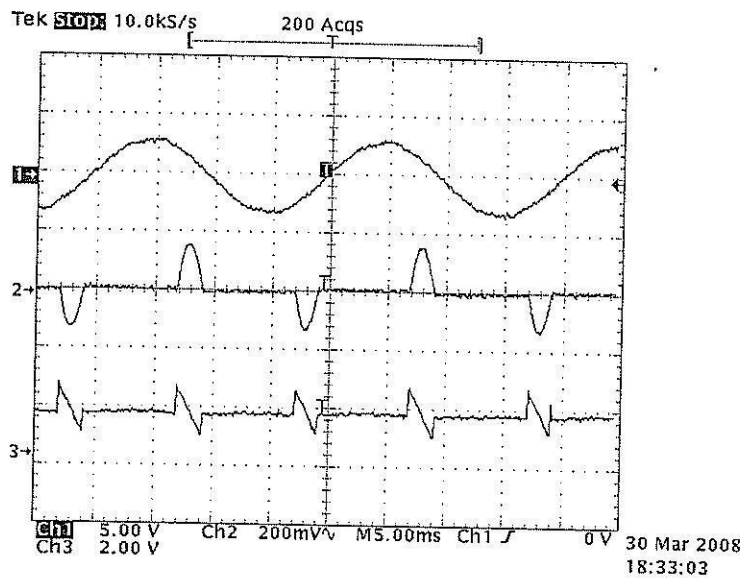


รูปที่ 4.36 รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่สภาวะ 2563 rpm

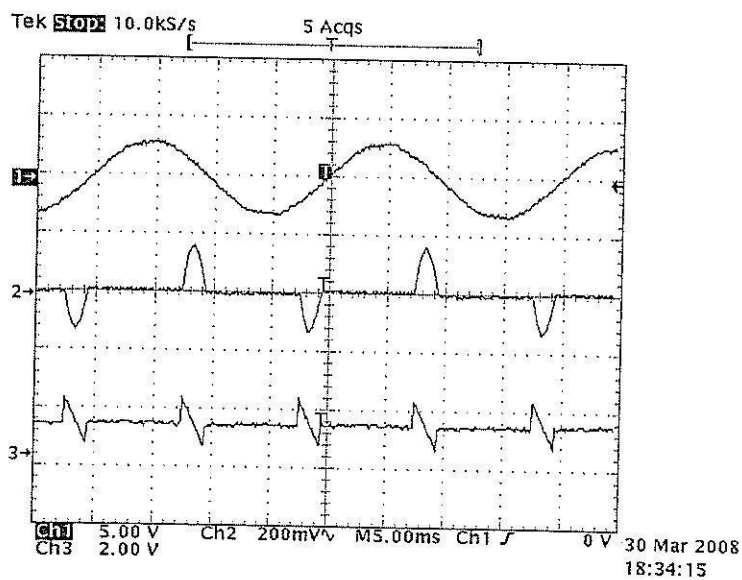
หมายเหตุ จากรูปที่ 4.36 ถึง 4.40 ช่องสัญญาณที่ 1 คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V<sub>rms</sub> ช่องสัญญาณที่ 2 คือ กระแสอาร์เมเจอร์ ( $i_a$ ) ช่องสัญญาณที่ 3 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ ( $v_a$ )



รูปที่ 4.37 รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่สภาวะ 1987 rpm

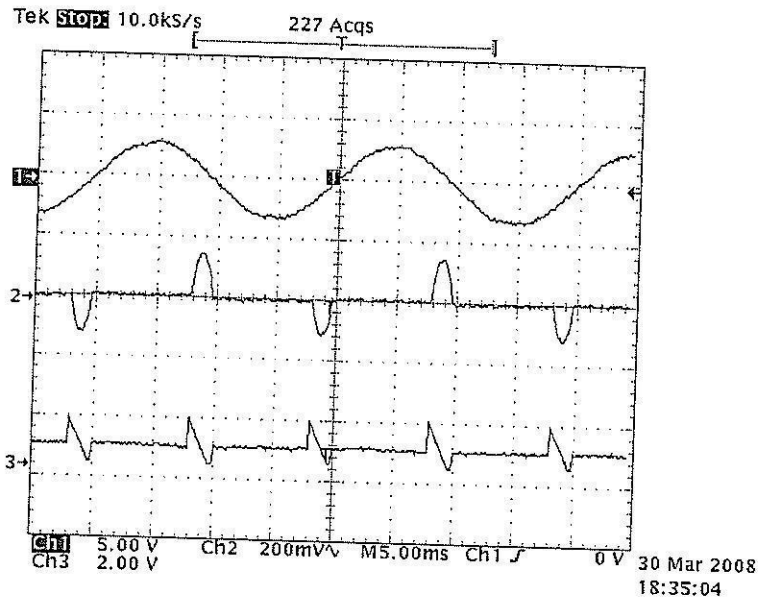


รูปที่ 4.38 รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่สภาวะ 1533 rpm



รูปที่ 4.39 รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่สภาวะ 1131 rpm





รูปที่ 4.40 รูปสัญญาณกระแสและแรงดันที่สภาวะ 637 rpm

จากผลการทดสอบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

$V_{o,av}$ (V)	ความเร็วรอบ (rpm)
211.0	2563
165.0	1987
128.0	1533
95.0	1131
55.0	637

#### 4.5 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิก

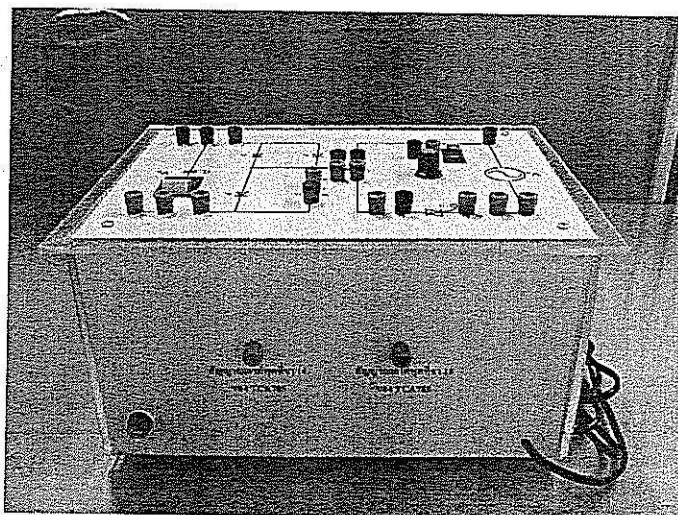
เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบด้านฮาร์มอนิกส์ คือ Fluke 434 จาก บริษัท เมเซอร์ โทรนิคส์ จำกัด เช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้านี้ การทดสอบด้านฮาร์มอนิกของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงที่ใช้ไครแอก แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิกของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไครแอก

วงจร	%THD( $v_s$ )	%THD( $i_s$ )
วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไครแอก	2.3	142.0

จากตารางที่ 4.5 สังเกตได้ว่าจะดำเนินการวัดปริมาณฮาร์มอนิกเฉพาะที่แหล่งจ่ายเท่านั้น ทั้งนี้ เนื่องจากทางด้านเอาต์พุตของวงจรดังกล่าวเป็นปริมาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าตรง จึงไม่พิจารณาปริมาณฮาร์มอนิกทางด้านเอาต์พุต และจากผลการทดสอบในตารางที่ 4.5 ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายจะมีค่ามากกว่าที่แรงดันของแหล่งจ่าย ทั้งนี้เนื่องจากโหลดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้จะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก เนื่องจากโหลดดังกล่าวเปรียบเสมือนเป็น โหลดไม่เป็นเชิงเส้นนั่นเอง

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไครแอกเมื่อทำการทดสอบวงจรเรียบร้อยแล้ว ได้นำวงจรดังกล่าวไปลงกล่อง ทั้งนี้เพื่ออำนวยความสะดวกการใช้งาน โดยกล่องดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไครแอก

#### 4.6 สรุป

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำเสนอในบทนี้ เป็นชุดขับเคลื่อนที่ใช้ไทรแอก โดยการสร้างวงจรดังกล่าวต้องเริ่มต้นจากการศึกษาคุณลักษณะของ ไทรแอก โดยเรียนรู้หลักการการทำงานของ ไทรแอก รวมทั้งฝึกการทำงานเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบวงจร นอกจากนี้ต้องทำการศึกษาลักษณะการทำงานของ ไอซี TCA785 เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบวงจรจุดชนวนเกท โดยวงจรที่สร้างขึ้นนี้ ประกอบด้วยวงจร 2 ส่วนประกอบ โดยในส่วนแรกเป็นวงจรปรับรูปคลื่นกระแสสลับโดยใช้ไทรแอก หลังจากนั้นเอาต์พุตของวงจรดังกล่าวจะเป็นอินพุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ ไดโอดเพื่อทำให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยวงจรถูกกล่าวสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยปรับที่มุมจุดชนวนเกทของไทรแอกนั่นเอง และจากการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิกของวงจรถูกกล่าวในงานวิจัยนี้ สังเกตได้ว่า มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณมาก ซึ่งถ้าจะใช้งานชุดขับเคลื่อนนี้โดยคำนึงถึงเรื่องคุณภาพกำลังไฟฟ้า จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน

## บทที่ 5

### วงจรชอปเปอร์สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

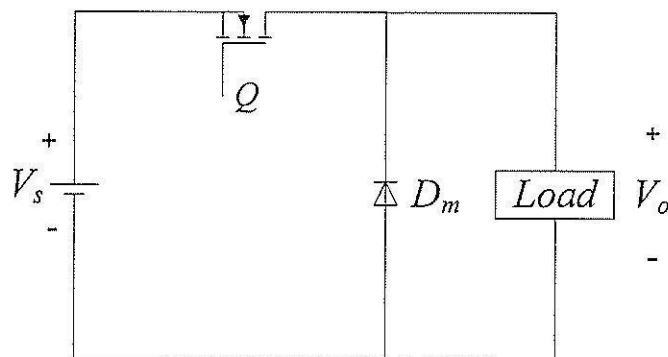
#### 5.1 กล่าวนำ

วงจรชอปเปอร์เป็นวงจรสำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง โดยวงจรนี้สามารถปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ตามที่ต้องการ ในขณะที่แรงดันอินพุตยังคงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยเหตุนี้วงจรชอปเปอร์จึงมักนิยมใช้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแหล่งพลังงานเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังเช่น แบตเตอรี่ หรือ โซลาร์เซลล์ เป็นต้น ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบ และอภิปรายผลที่ได้จากการทดสอบวงจรชอปเปอร์และวงจรเรกูเลเตอร์แบบบัค ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ่น รวมถึงผลการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน

#### 5.2 วงจรชอปเปอร์พื้นฐาน

##### 5.2.1 หลักการทำงานของวงจรและการออกแบบ

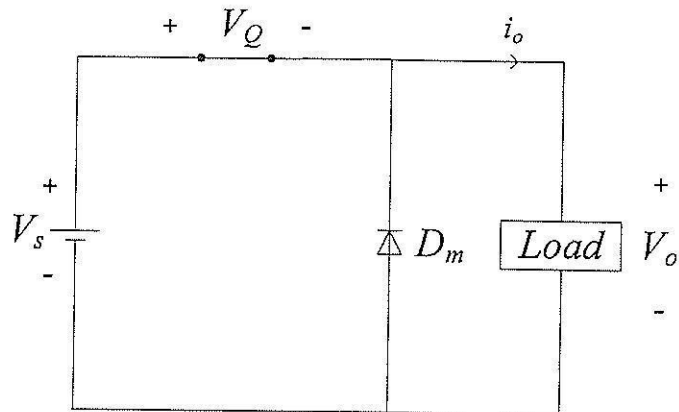
วงจรชอปเปอร์พื้นฐาน เป็นวงจรหนึ่งในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง โครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วยมอสเฟตจำนวน 1 ตัว ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรชอปเปอร์พื้นฐาน

จากวงจรรูปที่ 5.1 สามารถพิจารณาโหมดการทำงานได้เป็น 2 โหมดดังนี้  
**โหมดที่ 1** พิจารณาช่วง  $Q$  นำกระแส (ช่วงเวลา  $t_1$ )

จากรูปวงจรที่ 5.1 เมื่อมอสเฟต  $Q$  นำกระแส วงจรสมมูลจะเป็นดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลในโหมดที่ 1

จากรูปที่ 5.2 เมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (5-1)

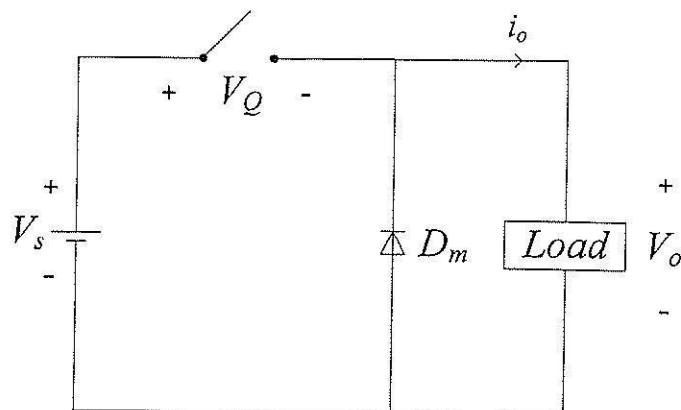
$$V_o = V_s \quad (5-1)$$

ดังนั้นจะได้กระแสที่ไหลตามสมการที่ (5-2)

$$i_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_s}{R} \quad (5-2)$$

โหมดที่ 2 พิจารณาช่วง  $Q$  หยุคนำกระแส (ช่วงเวลา  $t_2$ )

จากรูปวงจรที่ 5.1 เมื่อมอสเฟต  $Q$  หยุคนำกระแส วงจรสมมูลจะเป็นดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลในโหมดที่ 2

จากรูปที่ 5.3 เมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการที่ (5-3)

$$V_o = 0 \quad (5-3)$$

ดังนั้นจะได้กระแสที่ไหลตามสมการที่ (5-4)

$$i_o = 0 \quad (5-4)$$

จากการวิเคราะห์ห้วงจรชอปเปอร์พื้นฐานในแต่ละโหมดข้างต้น รูปสัญญาณของค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะเป็นดังรูปที่ 5.4 จากรูปดังกล่าว สามารถหาสมการแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย ( $V_{o,av}$ ) ได้ดังสมการที่ (5-5)

$$\begin{aligned} V_{o,av} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_o(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^{t_1} V_s dt \\ &= \frac{V_s}{T} [t_1 - 0] \\ &= \frac{t_1}{T} V_s \end{aligned}$$

จาก  $k = \frac{t_1}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$

ดังนั้น

$$V_{o,av} = kV_s \quad (5-5)$$

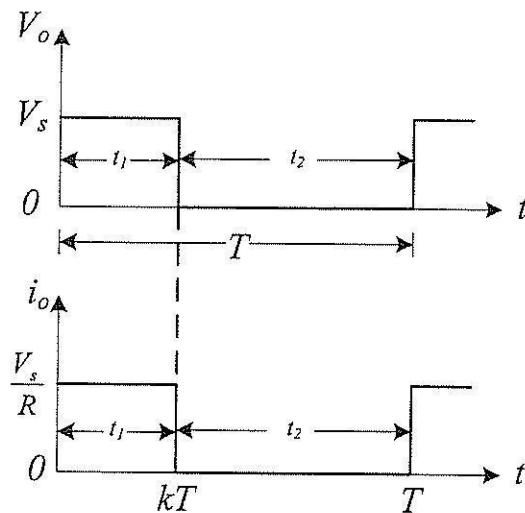
เมื่อพิจารณาสมการคำนวณค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ไหล ( $V_{o,rms}$ ) จะได้ดังสมการที่ (5-6)

$$V_{o,rms} = \sqrt{k}V_s \quad (5-6)$$

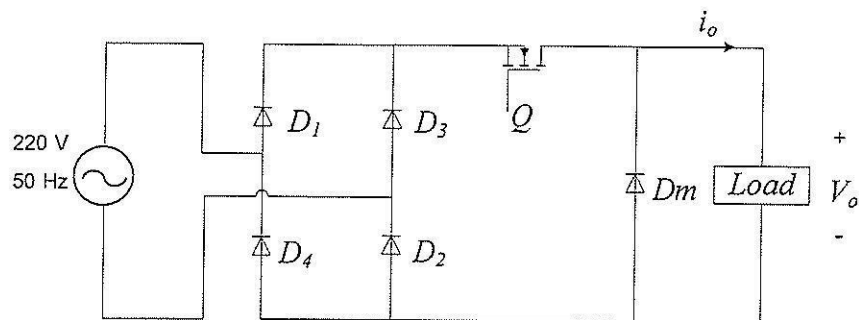
สมการกระแสเอาต์พุตเฉลี่ย ( $I_{o,av}$ ) และสมการค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ไหล ( $I_{o,rms}$ ) จะเป็นไปตามสมการที่ (5-7) และ (5-8) ตามลำดับ

$$I_{o,av} = \frac{V_{o,av}}{R} = \frac{kV_s}{R} \tag{5-7}$$

$$I_{o,rms} = \frac{V_{o,rms}}{R} = \frac{\sqrt{k}V_s}{R} \tag{5-8}$$



รูปที่ 5.4 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของวงจรชอปเปอร์พื้นฐาน



รูปที่ 5.5 การทดสอบวงจรชอปเปอร์พื้นฐาน

การใช้งานวงจรชอปเปอร์พื้นฐานในงานวิจัยนี้จะต่อวงจรตามรูปที่ 5.5 ซึ่งจากรูปดังกล่าว แรงดันอินพุตของวงจรชอปเปอร์พื้นฐาน คือ แรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบ บริดจ์ ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 200 V และต้องการแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรมีค่าเท่ากับ 150 V

และกำหนดให้ความถี่ในการสวิตช์ของมอสเฟตมีค่าเท่ากับ 10 kHz จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้นสามารถออกแบบค่าช่วงการทำงานได้ดังนี้

$$\text{จากสมการที่ (5-5)} \quad V_{o,av} = kV_s$$

$$150 = k \times 200$$

$$k = 0.75 = 75\%$$

$$\text{และจาก } f_s = 10\text{kHz} \Rightarrow T_s = 100\mu\text{s}$$

$$\text{จากสมการ} \quad k = \frac{t_{on}}{T_s}$$

$$\text{จะได้} \quad t_{on} = 0.75 \times 100\mu\text{s} = 75\mu\text{s}$$

ดังนั้นสัญญาณในการจูนขบวนการมอสเฟตมีเวลาในการนำกระแสเท่ากับ  $75\mu\text{s}$  และหยุดนำกระแส  $25\mu\text{s}$  ในหนึ่งรอบของการทำงาน

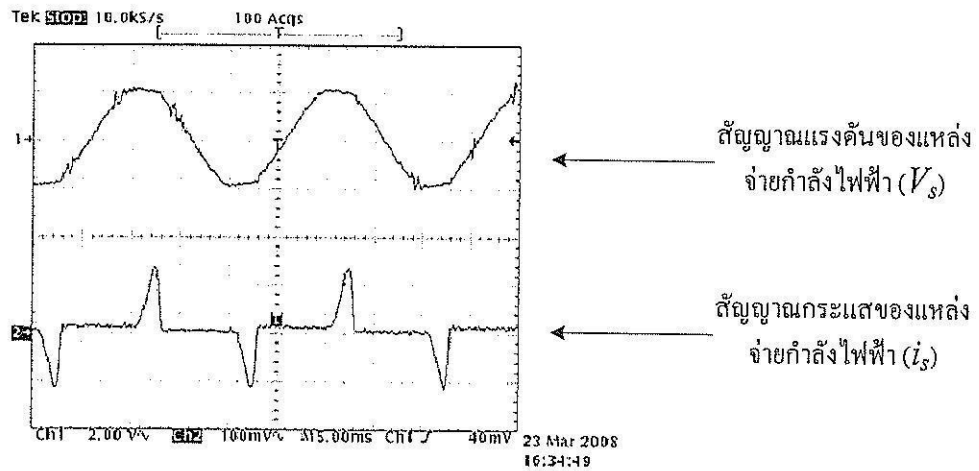
### 5.2.2 ผลการทดสอบวงจรกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การทดสอบวงจรชอปเปอร์พื้นฐานตามวงจรดังรูปที่ 5.5 ได้มีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระดุนเป็นโหลดให้กับวงจร โดยในการทดสอบจะใช้มอเตอร์ที่กักความเร็วรอบ 2360 rpm มีพิกัดด้านวงจรสนามขนาด 220 V, 0.3 A และพิกัดด้านวงจรอาร์มเจอร์ขนาด 220 V 2.2 A ดังที่แสดงระบบการทดสอบในรูปที่ 5.6 ซึ่งการทดสอบจะเริ่มต้นจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ( $V_s$ ) ให้กับวงจรเรียงกระแส ซึ่งแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ( $V_{dc}$ ) จะเป็นแรงดันอินพุตของวงจรชอปเปอร์พื้นฐาน (โดยการทดสอบนี้จะทดสอบที่  $V_{dc} = 200\text{ V}$  และ  $V_o = 150\text{ V}$  ซึ่งจากการออกแบบนั้นได้กำหนดค่า k (duty cycle) เท่ากับ 75% สัญญาณของ  $V_s$  และ  $i_s$  ที่ได้จากการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 5.6 และสัญญาณ  $V_o$  และ  $i_o$  แสดงไว้ดังรูปที่ 5.7 ดังนี้

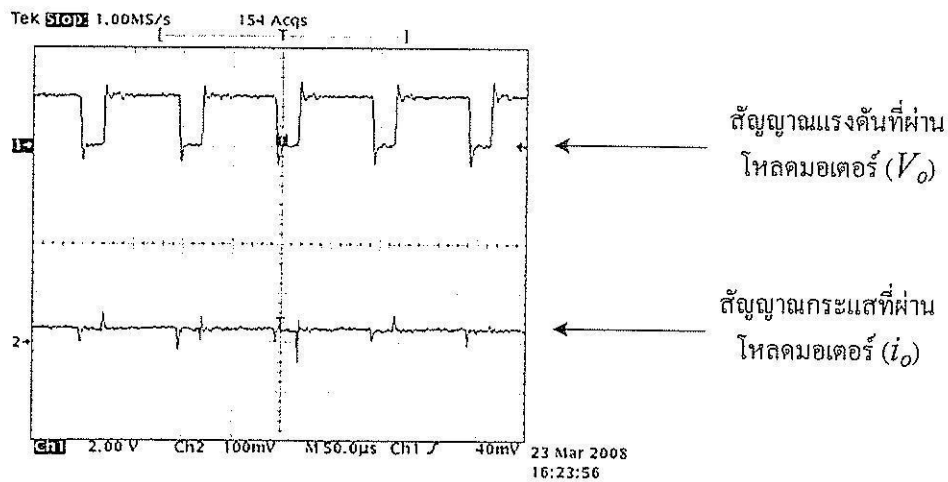


รูปที่ 5.6 ระบบสำหรับการทดสอบวงจรชอปเปอร์พื้นฐาน





รูปที่ 5.6 สัญญาณอินพุตของแรงดันและกระแสไฟฟ้า

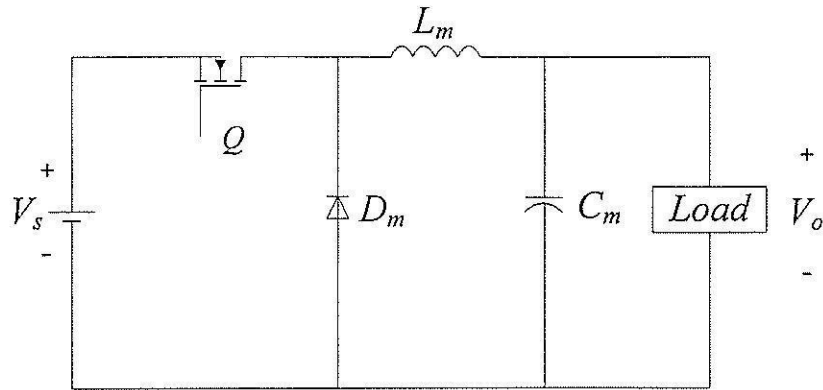


รูปที่ 5.7 รูปสัญญาณตกคร่อมโหลดมอเตอร์ (อัตราส่วน 1:100)

### 5.3 วงจรเรกูเลเตอร์แบบบัคค์

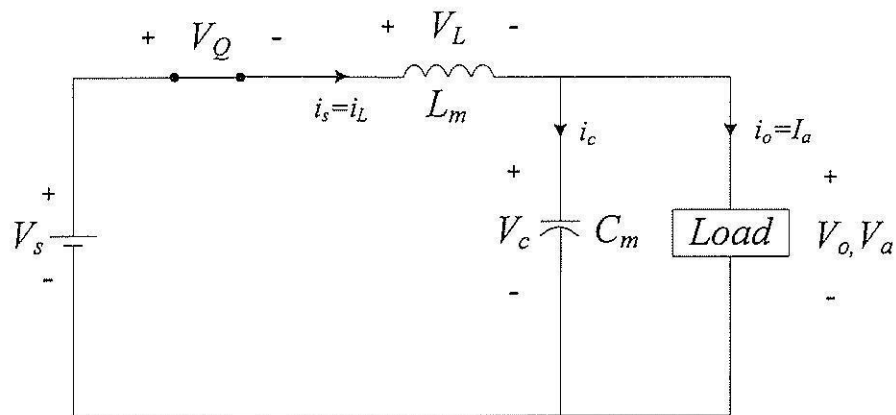
#### 5.3.1 หลักการทำงานของวงจรและการออกแบบ

วงจรเรกูเลเตอร์แบบบัคค์ เป็นอีกวงจรหนึ่งในการแปลงกระแสตรงเป็นกระแสตรง และเป็นวงจรที่สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตให้มิต่ำลงจากแรงดันอินพุตกระแสตรงได้ โครงสร้างของวงจรจะประกอบด้วยมอสเฟตจำนวน 1 ตัว ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 วงจรเรกเตเตอร์แบบบัคค์

จากวงจรดังรูปที่ 5.8 สามารถพิจารณาโหมดการทำงานได้เป็น 2 โหมดดังนี้  
 โหมดที่ 1 พิจารณาช่วง  $Q$  นำกระแส  
 จากรูปวงจรที่ 5.8 เมื่อมอสเฟต  $Q$  นำกระแส วงจรสมมูลจะเป็นดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 วงจรสมมูลในโหมดที่ 1

จากรูปที่ 5.9 เมื่อพิจารณาแรงดันตกคร่อม  $L_m$  จะได้ดังสมการที่ (5-9)

$$V_L = L_m \frac{di_L}{dt} \quad (5-9)$$

และจากรูปที่ 5.9 สังเกตได้ว่า  $V_L = V_s - V_c$  ซึ่ง  $V_c = V_{load} = V_a$  เมื่อแทนค่า  $V_L$  ลงในสมการที่ (5-9) จะเป็นดังสมการที่ (5-10)

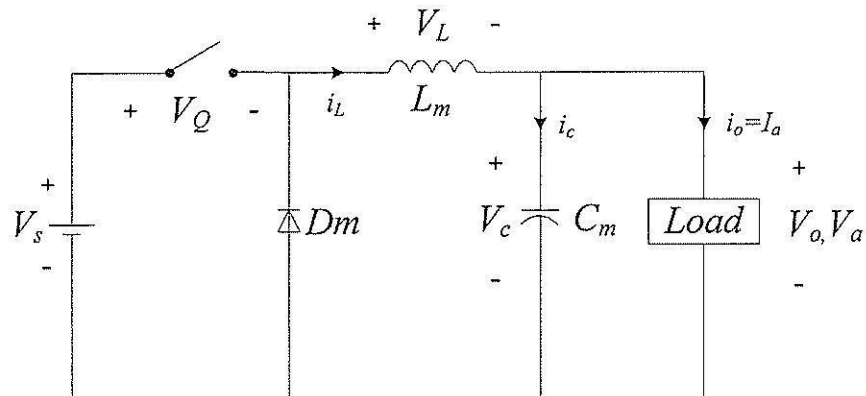
$$V_s - V_a = \frac{L_m(I_2 - I_1)}{t_1} \quad ; \quad \frac{di}{dt} = \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (5-10)$$

จากสมการดังกล่าวจะได้ช่วงเวลา  $t_1$  ตามสมการที่ (5-11) ดังนี้

$$t_1 = \frac{L_m \Delta I}{V_s - V_a} \quad (5-11)$$

โหมดที่ 2 พิจารณาช่วง  $Q$  หยุดนำกระแส

จากรูปวงจรที่ 5.8 เมื่อมอสเฟต  $Q$  หยุดกระแส วงจรสมมูลจะเป็นดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 วงจรสมมูลในโหมดที่ 2

จากรูปที่ 5.10 พิจารณาได้เช่นเดียวกันกับสมการที่ (5-9) แต่  $V_L = -V_c = -V_a$  เมื่อแทนค่า  $V_L$  ลงในสมการที่ (5-9) จะเป็นดังสมการที่ (5-12)

$$-V_a = -\frac{L_m \Delta I}{t_2} \quad (5-12)$$

ดังนั้นจะได้ช่วงเวลา  $t_2$  ตามสมการที่ (5-13)

$$t_2 = \frac{L_m \Delta I}{V_a} \quad (5-13)$$

จากสมการที่ (5-11) และ (5-13) จะได้ดังสมการที่ (5-14)

$$\Delta I = \frac{(V_s - V_a)t_1}{L_m} = \frac{V_a t_2}{L_m} \quad (5-14)$$

แทนค่า  $t_1 = kT$  และ  $t_2 = (1-k)T$  ลงในสมการที่ (5-14) จะได้ดังสมการที่ (5-15)

$$\frac{(V_s - V_a)kT}{L_m} = \frac{V_a(1-k)T}{L_m} \quad (5-15)$$

จากสมการที่ (5-15) จะได้แรงดันที่เอาต์พุตดังสมการที่ (5-16)

$$V_a = kV_s \quad (5-16)$$

เมื่อไม่พิจารณาการสูญเสียพลังงานของวงจรจะได้ว่ากำลังไฟฟ้าอินพุตจะเท่ากับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทางด้านอินพุตและเอาต์พุตดังสมการที่ (5-17) ดังนี้

$$\begin{aligned} P_m &= P_{out} \\ I_s V_s &= V_a I_a \\ I_s V_s &= kV_s I_a \\ I_s &= kI_a \end{aligned} \quad (5-17)$$

เมื่อพิจารณาการทำงานในหนึ่งคาบการสวิตช์จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าพลิว (ripple current :  $\Delta I$ ) ดังสมการที่ (5-18) และจะได้สมการหาขนาดของตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ (5-19) ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad T &= \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L}{V_s - V_a} + \frac{\Delta I L}{V_a} \\ &= \frac{\Delta I L V_s}{V_a (V_s - V_a)} \\ \Delta I &= \frac{V_a (V_s - V_a)}{f L_m V_s} \end{aligned} \quad (5-18)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad L_m = \frac{V_a (V_s - V_a)}{\Delta I f V_s} \quad (5-19)$$

เมื่อพิจารณาโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้  $i_L = i_c + i_a$  และไม่พิจารณา  $\Delta i_a$  เพราะถือว่า มีค่าน้อยมาก ทำให้  $\Delta i_a = 0$  ดังนั้นจะได้  $\Delta i_L = \Delta i_c$  เมื่อต้องการหาค่ากระแสเฉลี่ยสามารถ คำนวณได้จากสมการที่ (5-20) และค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุเฉลี่ย ( $i_{c,av}$ ) ได้ดังสมการที่ (5-21)

$$i_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (5-20)$$

$$i_{c,av} = \frac{I_2 - I_1}{4} = \frac{\Delta I}{4} \quad (5-21)$$

และเมื่อพิจารณาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุจากสมการที่ (5-22) จะได้สมการหาค่า แรงดันพลิวดังสมการที่ (5-23) และสมการหาขนาดของตัวเก็บประจุดังสมการที่ (5-24) ดังต่อไปนี้

$$V_c = \frac{1}{C} \int i_c(dt) + V_c(t=0) \quad (5-22)$$

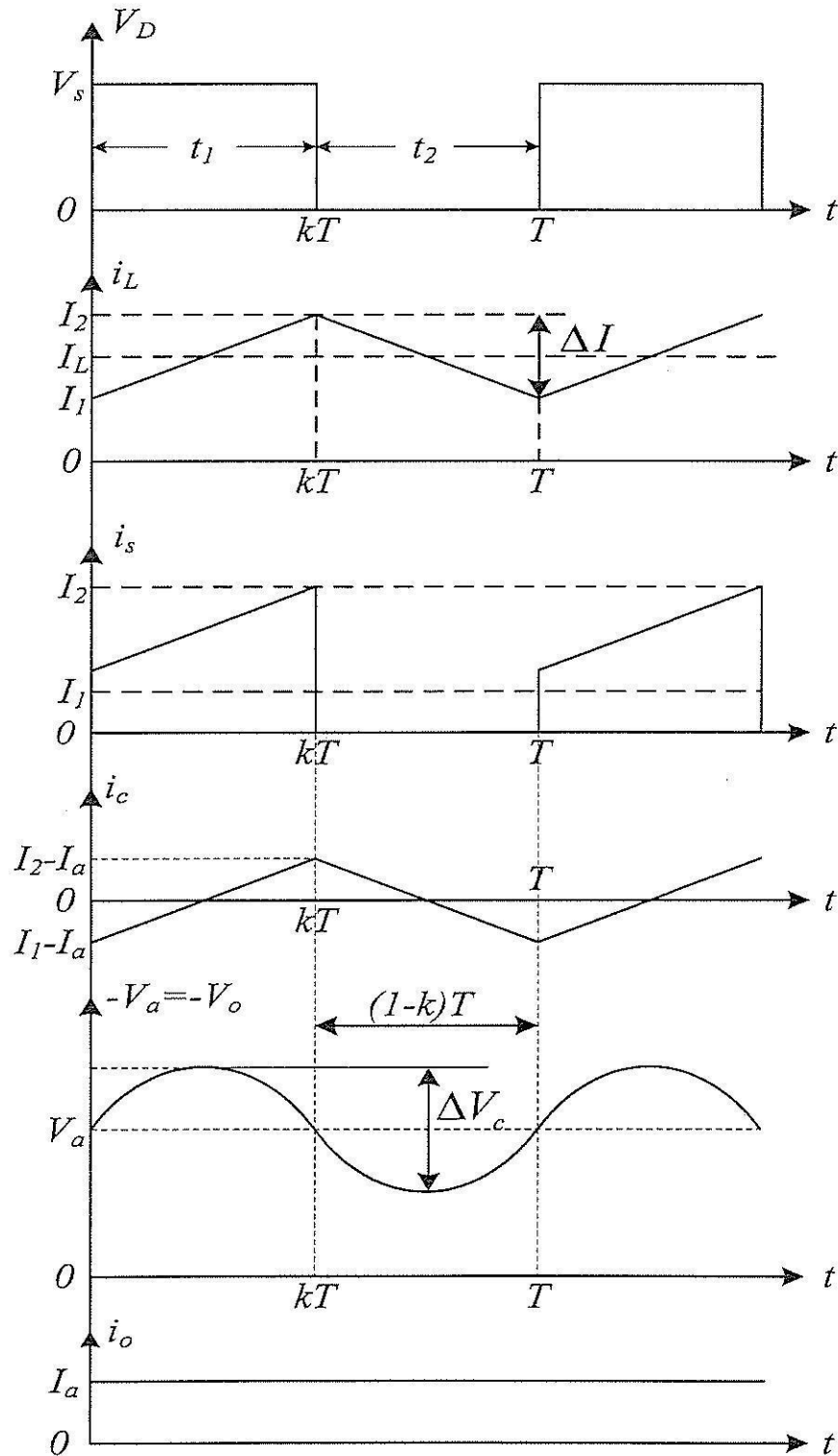
$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int_0^{T/2} \frac{\Delta I}{4} dt$$

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I T}{8C} = \frac{\Delta I}{8fC} \quad (5-23)$$

ดังนั้น

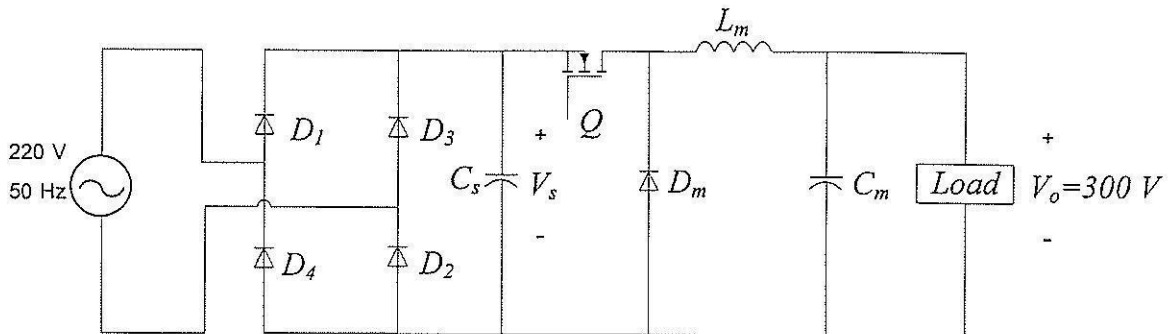
$$C = \frac{V_a(V_s - V_a)}{8L_m f^2 V_s \Delta V_c} \quad (5-24)$$

จากการวิเคราะห์วงจรเรกเตเตอร์แบบบักกิ้งในแต่ละโหมดข้างต้น จะได้รูปสัญญาณของค่า แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.11 ดังนี้



รูปที่ 5.11 รูปสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ของวงจรเรกูลเลเตอร์แบบบักกิ้ง

วงจรเรกเตเตอร์แบบบักก์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้จะต่อพ่วงกับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 วงจรเรกเตเตอร์แบบบักก์

จากรูปที่ 5.12 วงจรเรกเตเตอร์แบบบักก์ต่ออยู่กับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งค่าแรงดันอินพุตของวงจรเรกเตเตอร์แบบบักก์ ( $V_s$ ) จะกำหนดให้ เท่ากับ 320 V โดยที่ค่าแรงดันเอาต์พุตกำหนดให้เท่ากับ 300 V ความถี่ในการสวิตช์ เท่ากับ 10 kHz และการนำตัวเก็บประจุ ( $C_s$ ) มาต่อขนานกับโหลดเพื่อเป็นการปรับค่าแรงดันพลิว ของแรงดันเอาต์พุตให้เรียบ โดยการทดลองนี้ ได้กำหนดค่าแรงดันพลิว ( $\Delta V_c$ ) ให้มีค่าเท่ากับ 1% ของแรงดันสูงสุดส่วนการต่อตัวเหนี่ยวนำ ( $L_m$ ) อนุกรมนั้นเพื่อปรับกระแสพลิวของกระแสเอาต์พุตให้เรียบ โดยจะกำหนดค่ากระแสพลิว ( $\Delta I$ ) เท่ากับ 0.2 A จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้นสามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการเลือกอุปกรณ์ในการทดลองได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 จำนวนขนาดของตัวเหนี่ยวนำ

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (5-19)} \quad L_m &= \frac{V_a(V_s - V_a)}{\Delta I f V_s} \\ &= \frac{300(320 - 300)}{10 \times 10^3 \times 320 \times 0.2} \\ &= 9.375 \text{ mH} \approx 10 \text{ mH} \end{aligned}$$

ดังนั้นตัวเหนี่ยวนำที่ใช้จึงเลือกขนาด เท่ากับ 10 mH

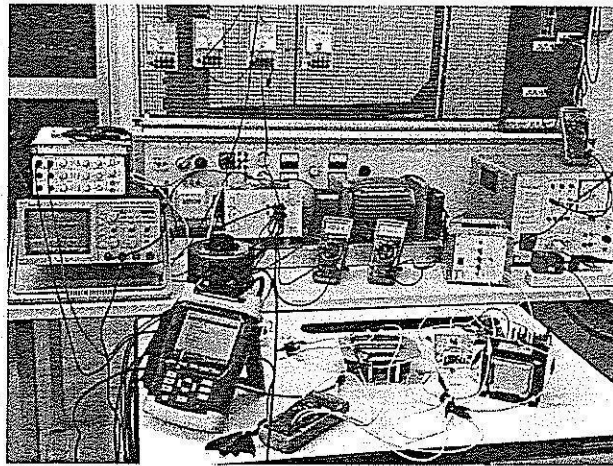
ขั้นที่ 2 จำนวนขนาดของตัวเก็บประจุ

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (5-23)} \quad \Delta V_c &= \frac{\Delta I}{8 f C} \\ \text{ดังนั้น} \quad C &= \frac{0.2}{8 \times 10 \times 10^3 \times 0.01 \times 300} \\ &= 0.83 \mu\text{F} \approx 1 \mu\text{F} \end{aligned}$$

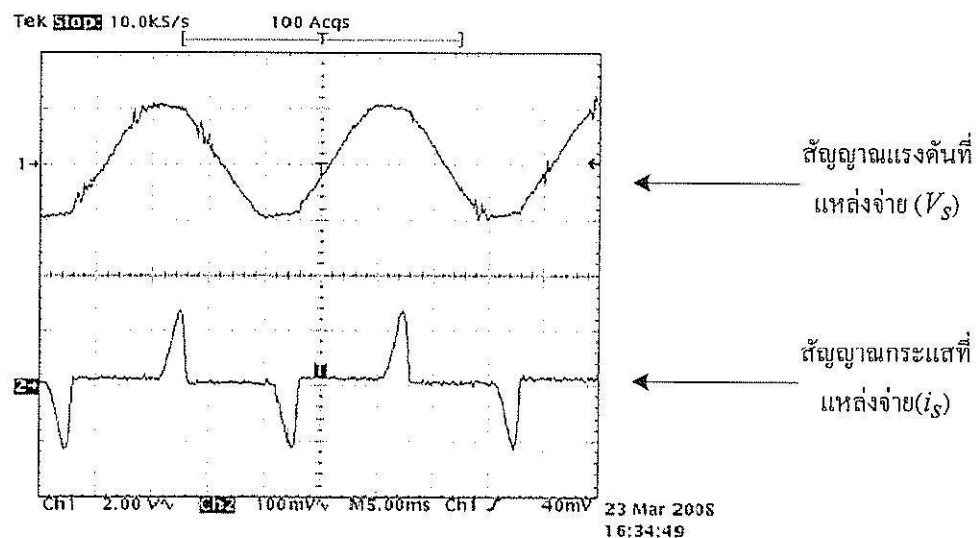
ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้จึงเลือกขนาด เท่ากับ  $1\mu F$

### 5.3.2 ผลการทดสอบวงจรกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การทดสอบวงจรเรกูเลเตอร์แบบบัคก็ตามวงจรดังรูปที่ 5.12 ได้มีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้นเป็นโหลดให้กับวงจร โดยในการทดสอบจะใช้มอเตอร์พิกัดเดียวกันกับการทดสอบในหัวข้อที่ 5.2 โดยระบบที่ดำเนินการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งการทดสอบได้ใช้ค่า  $k$  เท่ากับ 64% ซึ่งจะมีผลทำให้รูปสัญญาณของ  $V_s$  และ  $i_s$  ได้ดังรูปที่ 5.14 และผลการวัดสัญญาณของ  $V_{dc}$  และ  $i_L$  ได้ดังรูปที่ 5.15 และสัญญาณ  $V_o$  และ  $i_o$  ได้ดังรูปที่ 5.16 ดังนี้

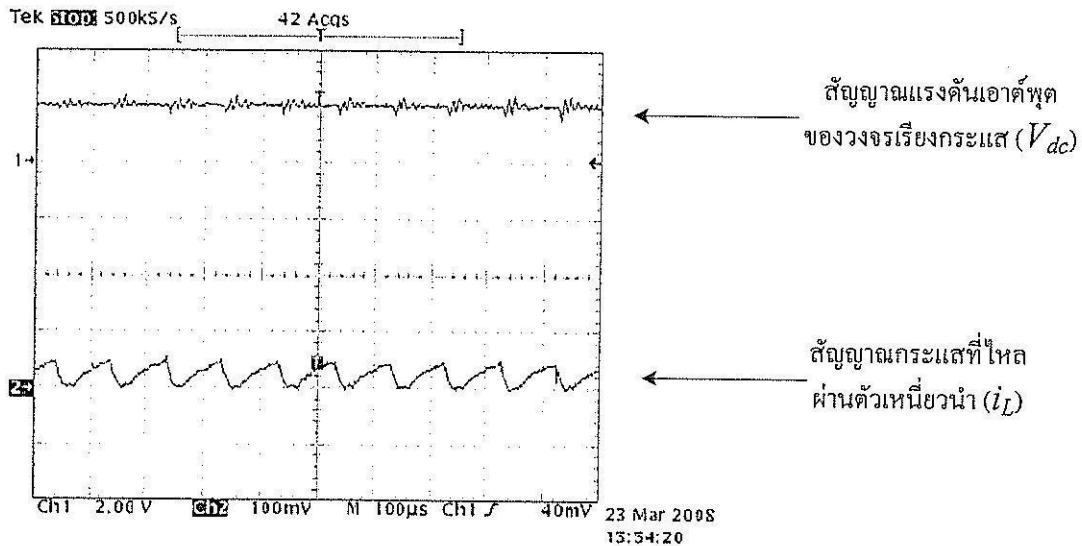


รูปที่ 5.13 ระบบสำหรับการทดสอบวงจรเรกูเลเตอร์แบบบัค

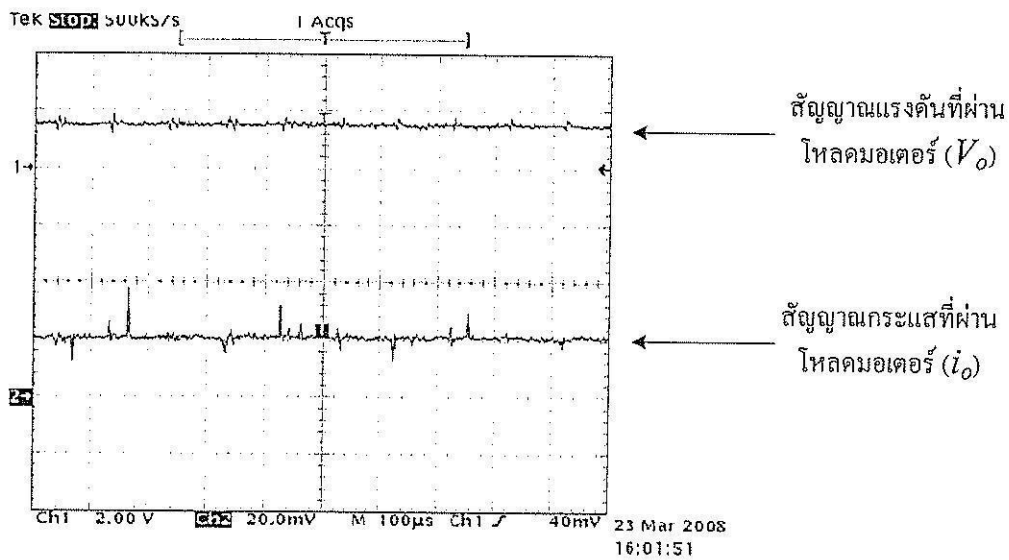


รูปที่ 5.14 สัญญาณอินพุตของแรงดันและกระแสไฟฟ้า





รูปที่ 5.15 สัญญาณแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.16 รูปสัญญาณตกคร่อมโหลดมอเตอร์ (อัตราส่วน 1:100)

#### 5.4 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิก

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบด้านฮาร์มอนิกส์ คือ Fluke 434 จาก บริษัท เมเซอร์โทรนิคส์ จำกัด เช่นเดียวกับการทดสอบก่อนหน้านี้ การทดสอบด้านฮาร์มอนิกของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรชอปเปอร์ แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบด้านฮาร์มอนิกของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง  
ด้วยวงจรชอปเปอร์

วงจร	%THD( $v_s$ )	%THD( $i_s$ )
วงจรชอปเปอร์พื้นฐาน	2.5	94.8
วงจรเรกูลเตอร์แบบบัคค์	2.9	100.6

จากตารางที่ 5.1 สังเกตได้ว่าจะดำเนินการวัดปริมาณฮาร์มอนิกเฉพาะที่แหล่งจ่ายเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากทางด้านเอาต์พุตของวงจрдังกล่าวเป็นปริมาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าตรง จึงไม่พิจารณาปริมาณฮาร์มอนิกทางด้านเอาต์พุต และจากผลการทดสอบในตารางที่ 5.1 ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายจะมีค่ามากกว่าที่แรงดันของแหล่งจ่าย ทั้งนี้เนื่องจากโหลดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้จะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก เนื่องจากโหลดดังกล่าวเปรียบเสมือนเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นนั่นเอง

### 5.5 สรุป

วงจรชอปเปอร์พื้นฐาน และวงจรเรกูลเตอร์แบบบัคค์ มีลักษณะวงจรคล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันที่วงจรเรกูลเตอร์แบบบัคค์จะมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อกับโหลด ทั้งนี้เพื่อให้รูปสัญญาณกระแสและแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียบมากขึ้น ส่วนการวัดปริมาณฮาร์มอนิกของวงจрдังกล่าวทั้งสองสังเกตได้ว่ามีปริมาณใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากวงจรทั้งสองต่อพ่วงกับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งวงจรดังกล่าวเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก

## บทที่ 6

### ชุดแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์

#### 6.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอชุดแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์แบบออนไลน์ โดยใช้โปรแกรม LabVIEW เพื่อแสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์ DAQ (Data Acquisition) เนื่องจากมีการวัดความเร็วรอบผ่านตัวตรวจรู้ผ่านอุปกรณ์ DAQ แล้วนำมาประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ ชุดแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยทางด้านระบบขับเคลื่อนในอนาคต โดยการอธิบายรายละเอียดในบทนี้จะนำเสนอเฉพาะข้อมูลที่สำคัญเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อความง่ายต่อการทำความเข้าใจในหลักการ

#### 6.2 การใช้งานโปรแกรม LabVIEW ร่วมกับอุปกรณ์ DAQ

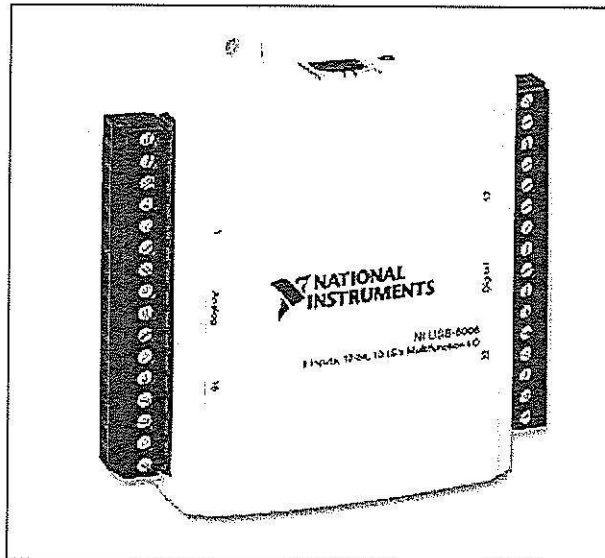
DAQ ย่อมาจาก Data Acquisition คือ กระบวนการอ่านค่าสัญญาณทางไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ และนำข้อมูลมาเก็บบนคอมพิวเตอร์ เพื่อการวัด วิเคราะห์ จัดเก็บ หรือ แสดงผลด้วยซอฟต์แวร์ ปัจจุบันมีอุปกรณ์ DAQ รุ่นใหม่ๆ ให้เลือกมากมาย เช่น แบบ PCI, PCI Express, PXI, Ethernet, PCMCIA, USB เป็นต้น ซึ่งแต่ละรุ่น แต่ละประเภท จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป เช่น จำนวนช่องสัญญาณอินพุต-เอาต์พุต ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ เป็นต้น ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้ตามต้องการ ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะ DAQ รุ่น NI USB-6009 ซึ่งเป็นรุ่นที่ใช้ในงานวิจัยเท่านั้น

##### 6.2.1 การ์ด NI USB-6009

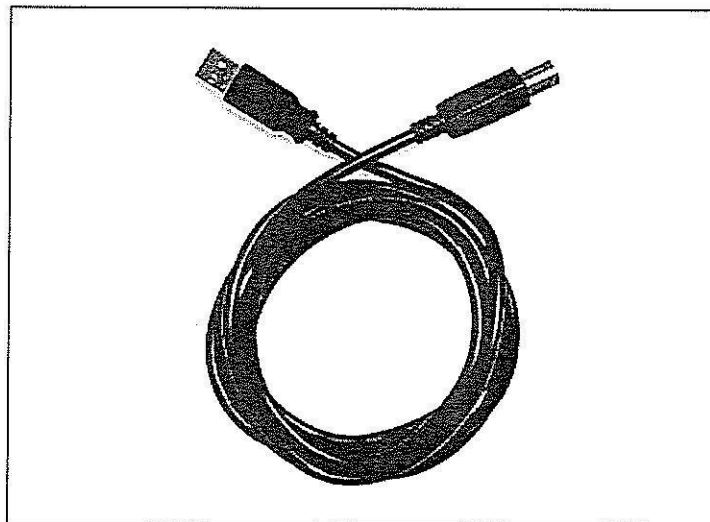
ปัจจุบันอุปกรณ์ DAQ แบบ USB เป็นที่นิยมมาก ทั้งนี้เนื่องจากความรวดเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลสูง มีความคล่องตัวในการใช้งาน ขนาดเล็ก ทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะและโน้ตบุ๊กส่วนตัว NI USB-6009 เป็นอุปกรณ์ DAQ รุ่นเล็กที่มีฟังก์ชันพื้นฐานครบถ้วน ซึ่งประกอบด้วย

- Analog Input 8 ช่อง
- Analog Output 2 ช่อง
- Digital I/O 12 ช่อง
- Counter 1 ตัว
- ความเร็วในการดึงข้อมูล 48 kilo sampling /second

ภาพของ NI USB-6009 และสายเชื่อมต่อแบบ USB แสดงดังรูปที่ 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ



รูปที่ 6.1 NI USB-6009

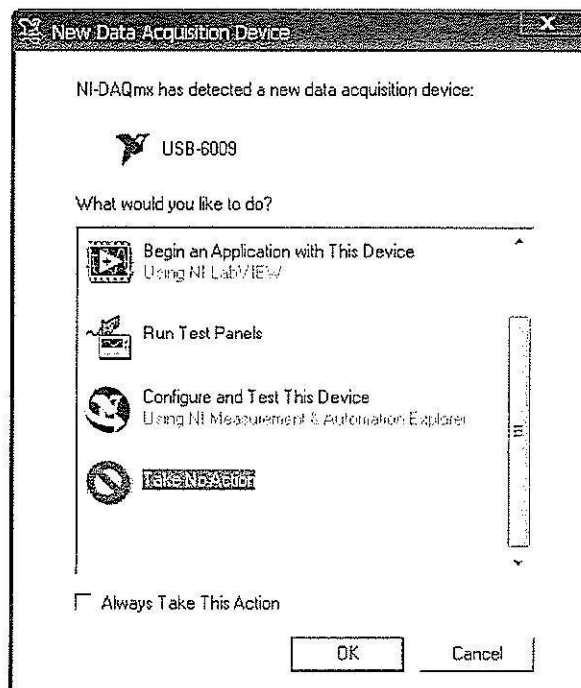


รูปที่ 6.2 สายเชื่อมต่อแบบ USB ของ NI USB-6009

## 6.2.2 การใช้งาน NI USB-6009 ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW

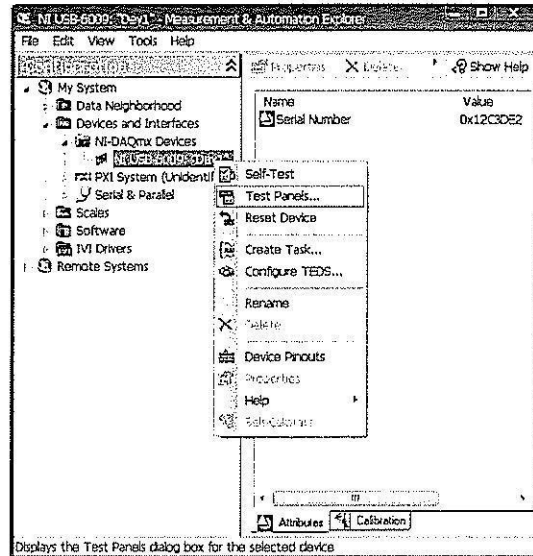
การใช้งาน NI USB-6009 ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนอย่างละเอียดได้ดังนี้

**ขั้นที่ 1** เชื่อมต่อ NI USB-6009 เข้ากับคอมพิวเตอร์จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 6.3 ให้เลือก Take No Action แล้วคลิก OK



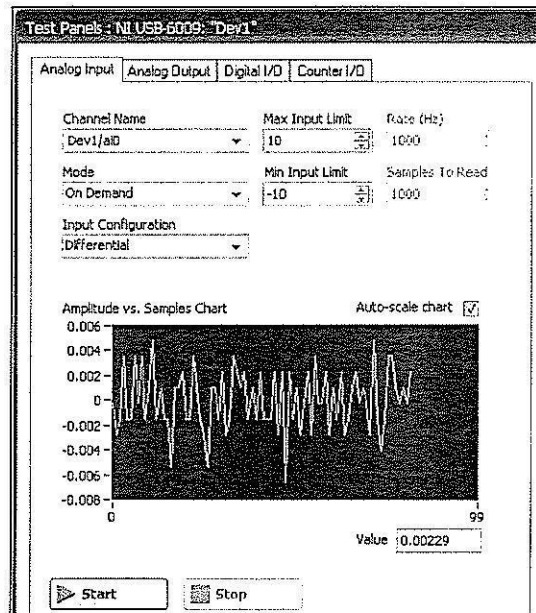
รูปที่ 6.3 หน้าต่าง New Data Acquisition Device

**ขั้นที่ 2** รันโปรแกรม Measurement & Automation บน Desktop หลังจากนั้นให้เลือก Devices and Interfaces => NI-DAQmx Devices => NI USB-6009: "Dev 1" คลิกขวาที่ NI USB-6009: "Dev 1" เลือก Test Panels... ดังรูปที่ 6.4



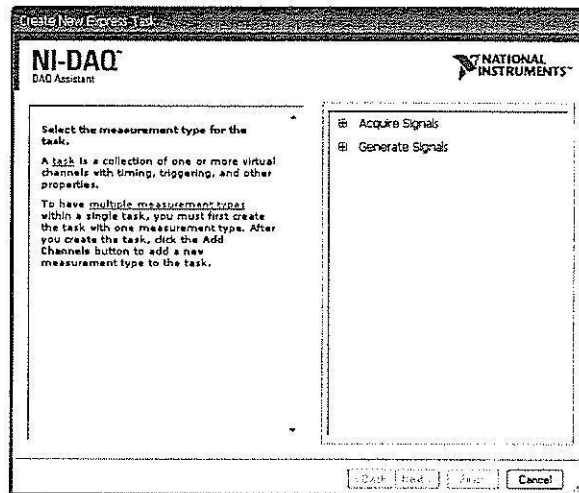
รูปที่ 6.4 หน้าต่างสำหรับเลือกการทดสอบช่องสัญญาณ

ขั้นที่ 3 เมื่อปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 6.5 ให้เลือกช่องสัญญาณที่ต้องการทดสอบที่ช่อง Channel Name หลังจากนั้นคลิก Start ถ้ามีสัญญาณแสดงว่าอุปกรณ์พร้อมใช้งาน



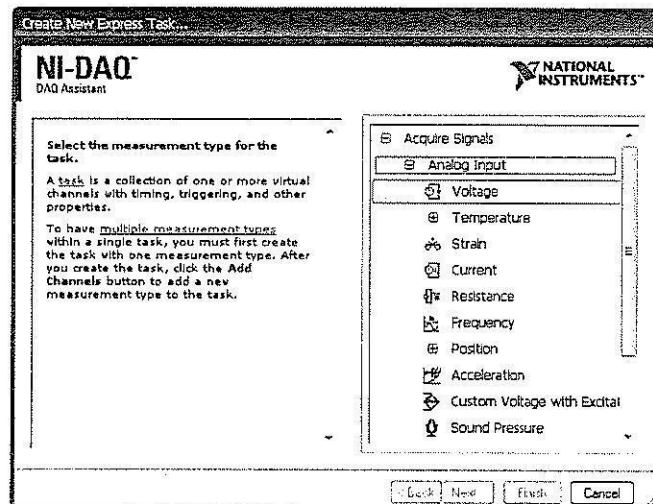
รูปที่ 6.5 หน้าต่างขณะดำเนินการทดสอบช่องสัญญาณ

ขั้นที่ 4 เมื่อดำเนินการขั้นตอนที่ 3 เรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะเริ่มเขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้งานกับ อุปกรณ์ DAQ เริ่มต้นจากคลิกขวาที่หน้าต่าง Block Diagram เลือก Express => Input => DAQ Assistant => จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 6.6



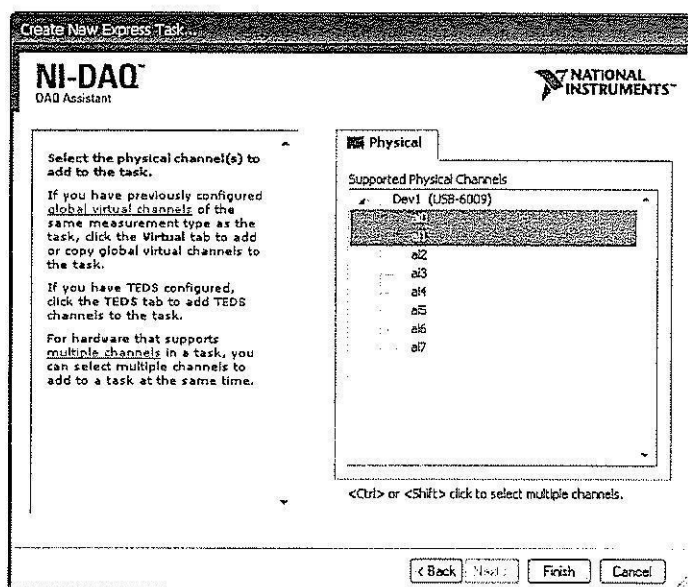
รูปที่ 6.6 หน้าต่างสำหรับเลือกโหมดสัญญาณ

ขั้นที่ 5 เลือก Acquire Signal => Analog Input => Voltage ดังรูปที่ 6.7

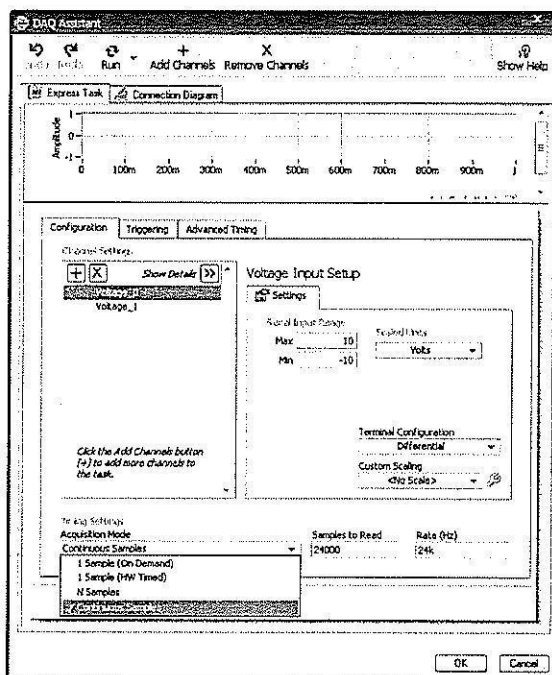


รูปที่ 6.7 หน้าต่างสำหรับเลือกประเภทสัญญาณ

ขั้นที่ 6 เมื่อเสร็จขั้นที่ 5 จะปรากฏหน้าต่างให้เลือกช่องสัญญาณอินพุต ในกรณีเลือกหลายช่องสัญญาณ ให้กดปุ่ม Ctrl ค้างไว้ แล้วเลือกช่องสัญญาณดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 หน้าต่างสำหรับเลือกช่องสัญญาณ



รูปที่ 6.9 หน้าต่างสำหรับกำหนดค่าของการตั้งข้อมูล



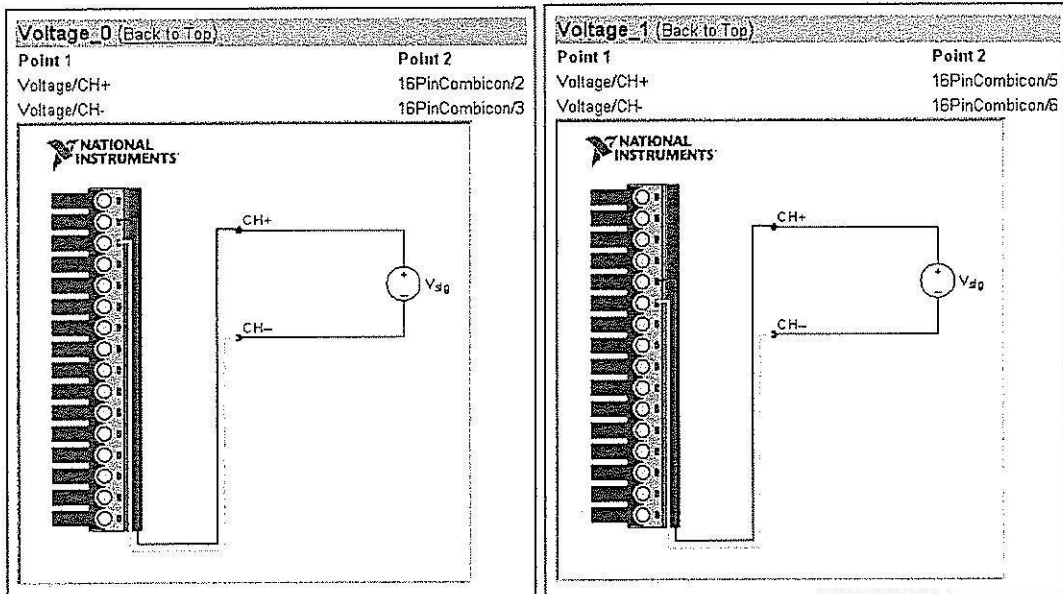
ขั้นที่ 7 เมื่อปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ 6.9 สำหรับให้กำหนดค่าของการดึงข้อมูล ประกอบด้วย

- Signal Input Range: กำหนดค่า สูงสุด/ต่ำสุดของสัญญาณที่วัด
- Terminal Configuration: กำหนดวิธีการต่อสายสัญญาณ มีด้วยกัน 2 แบบ คือ Differential และ RSE (Referenced Single-Ended) โดย แบบ Differential เป็นการต่อสัญญาณเข้าที่ช่องสัญญาณ 2 ช่อง แล้วนำค่ามาลบกัน ส่วน แบบ RSE เป็นการต่อสัญญาณบวก 1 ช่อง และ GND 1 ช่อง ซึ่งเหมาะกับการวัดหลายสัญญาณ
- Custom Scaling: กำหนดการวัดค่าให้เป็นหน่วยอื่น ๆ
- Timing Setting : กำหนดค่าความเร็วในการดึงข้อมูล โดยประกอบด้วย
  - 1 Sample คือ การดึงข้อมูลครั้งละ 1 จุด
  - N Sample คือ การดึงข้อมูลครั้งละหลายจุด เพียงครั้งเดียว
  - Continuous คือ การดึงข้อมูลแบบต่อเนื่อง (ต้องอยู่ใน Loop)

ให้เลือกแบบ Continuous หลังจากนั้น ให้ตั้งค่า Sample to Read และ Rate (Hz) โดยที่ Sample to Read เป็นจำนวนจุดข้อมูลที่ได้ในแต่ละครั้ง และ Rate คือ ความเร็วในการดึงข้อมูล มีหน่วยเป็นจุดต่อวินาที

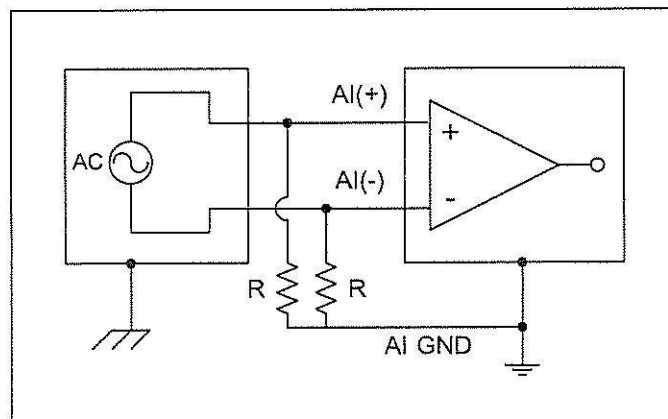
หมายเหตุ: ตามทฤษฎี Sampling Rate จะต้องใช้อย่างน้อยสองเท่าของความถี่ของสัญญาณที่จะดึงข้อมูล

ขั้นที่ 8 หลังจากตั้งค่าต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว สามารถตรวจสอบวิธีการต่อสายได้โดย คลิกที่แท็บ Connection Diagram กรณีที่มีหลายช่องสัญญาณ ให้คลิกเลือกที่ Channels in Task ที่ช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 6.10



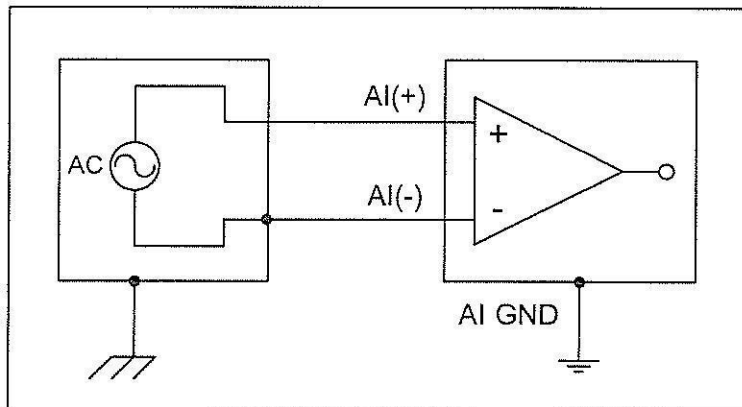
รูปที่ 6.10 รูปแสดงวิธีการต่อช่องสัญญาณที่ 1 และช่องสัญญาณที่ 2

โดยวิธีการต่อสายสัญญาณแบ่งเป็น 2 แบบ คือ ระบบที่ไม่มีกราวด์ และระบบที่มีกราวด์ แสดงดังรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12 ตามลำดับ หลังจากนั้นให้ต่อสายสัญญาณดังรูปที่ 6.13



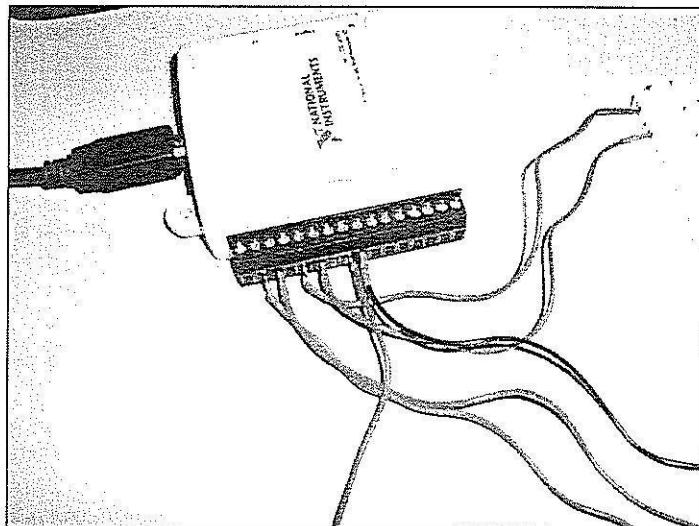
รูปที่ 6.11 ลักษณะการต่อระบบที่ไม่มีกราวด์

หมายเหตุ : จาก รูปที่ 6.11 ใช้ตัวต้านทาน (R) อยู่ในช่วง 10 k $\Omega$  ถึง 100 k $\Omega$



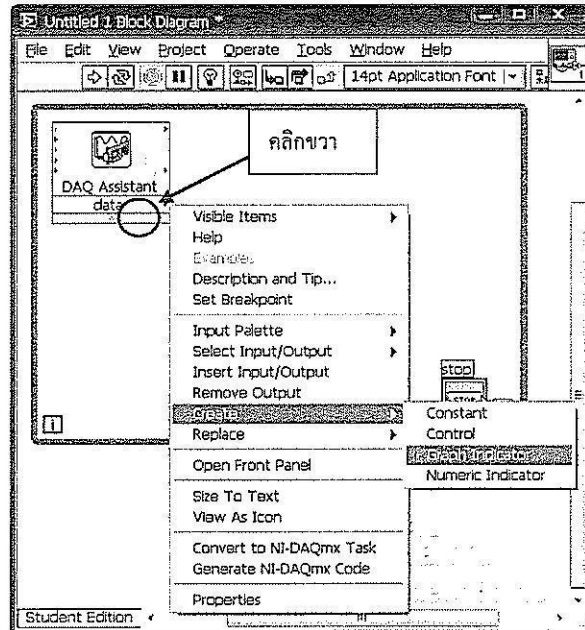
รูปที่ 6.12 ลักษณะการต่อระบบที่มีกราวด์

หมายเหตุ : จาก รูปที่ 6.11 และ รูปที่ 6.12 เป็นข้อมูลทางเทคนิคของการ์ด สามารถศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก [www.ni.com](http://www.ni.com)



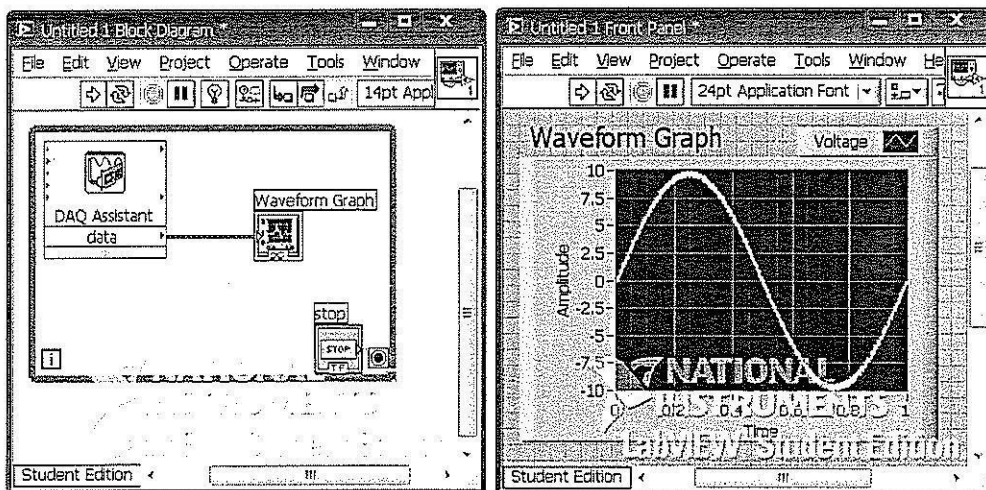
รูปที่ 6.13 วิธีการต่อช่องสัญญาณเข้ากับการ์ด NI USB-6009

ขั้นที่ 9 จากรูปที่ 6.14 หลังจากขั้นที่ 8 จะปรากฏบล็อก DAQ Assistant ขั้นที่หน้าต่าง Block Diagram ให้ดำเนินการคลิกขวาที่ data เลือก Create => Graph Indicator เพื่อแสดงเอาต์พุตเป็นรูปกราฟสัญญาณ



รูปที่ 6.14 ภาพการสร้างสัญญาณเอาต์พุตในรูปแบบกราฟ

ขั้นที่ 10 เมื่อเสร็จขั้นที่ 9 จะปรากฏหน้าต่าง Block Diagram และ Front Panel ดังรูปที่ 6.15 หลังจากขั้นตอนนี้ ก็จะสามารถนำข้อมูลที่ได้ออกไปวิเคราะห์ในโปรแกรม LabVIEW ได้



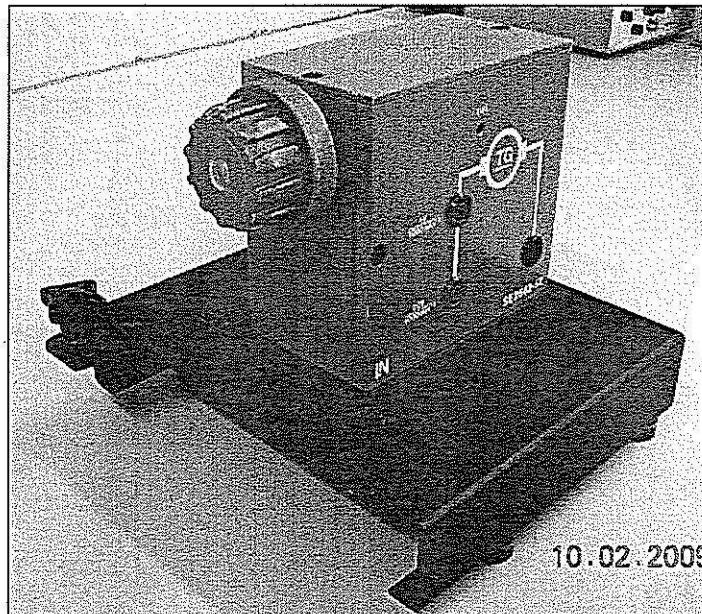
รูปที่ 6.15 หน้าต่าง Block Diagram และ Front Panel ขณะรัน โปรแกรม

### 6.3 ตัวตรวจรู้ความเร็วรอบมอเตอร์

ตัวตรวจรู้ความเร็วรอบมอเตอร์ในงานวิจัยนี้ ใช้ Tachometer ยี่ห้อ LN รุ่น SE 2662-5Z สำหรับตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยมีช่องอัตราส่วนเอาต์พุตให้เลือก 2 ช่องดังนี้

- ความเร็วรอบ 1000 rpm (รอบ/นาที) ให้แรงดันเอาต์พุต 1 V<sub>DC</sub>
- ความเร็วรอบ 1000 rpm (รอบ/นาที) ให้แรงดันเอาต์พุต 20 V<sub>DC</sub>

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ช่องอัตราส่วน 1000 rpm / 1 V<sub>DC</sub> เพราะการ์ด NI USB 6009 สามารถรับแรงดันได้ในช่วง  $\pm 10$  V เท่านั้น ตัวตรวจรู้ความเร็วรอบมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 6.16

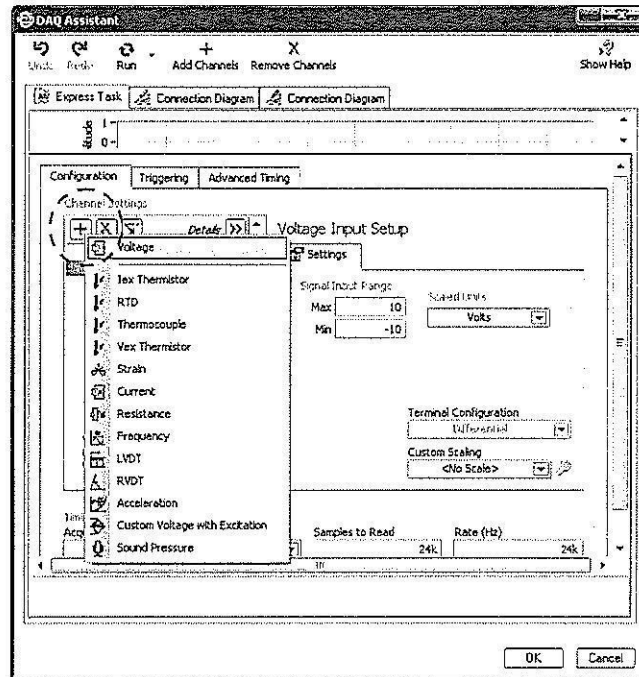


รูปที่ 6.16 ตัวตรวจรู้ความเร็วรอบมอเตอร์ (Tachometer)

### 6.4 การสร้างโปรแกรมแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์

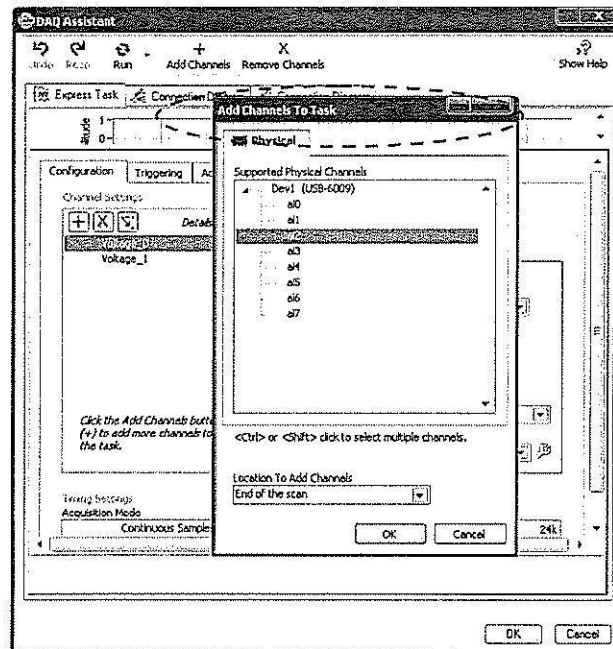
กรณีที่ต้องการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ จะเขียนโปรแกรมโดยมีขั้นตอนดังนี้

**ขั้นที่ 1** ดับเบิ้ลคลิกที่บล็อก DAQ Assistant จะปรากฏหน้าต่างสำหรับการตั้งค่า DAQ ให้คลิกที่เครื่องหมาย “+” เพื่อเพิ่มช่องสัญญาณอินพุตเพิ่มอีก 1 ช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 6.17



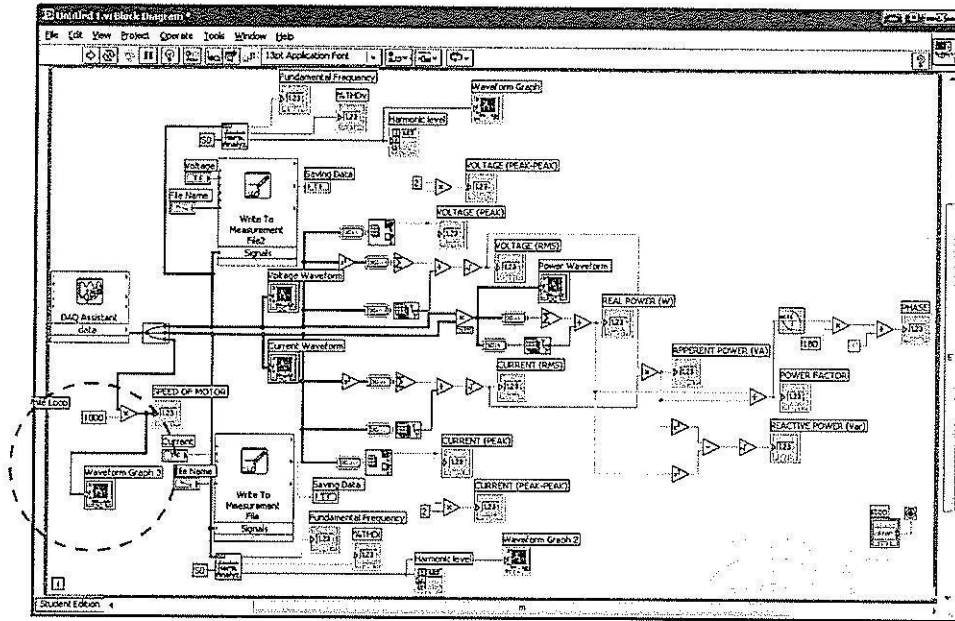
รูปที่ 6.17 การเพิ่มช่องสัญญาณของ DAQ Assistant

ขั้นที่ 2 เมื่อปรากฏหน้าต่าง Add Channel To Task ดำเนินการเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการ หลังจากนั้น กดปุ่ม OK ดังรูปที่ 6.18



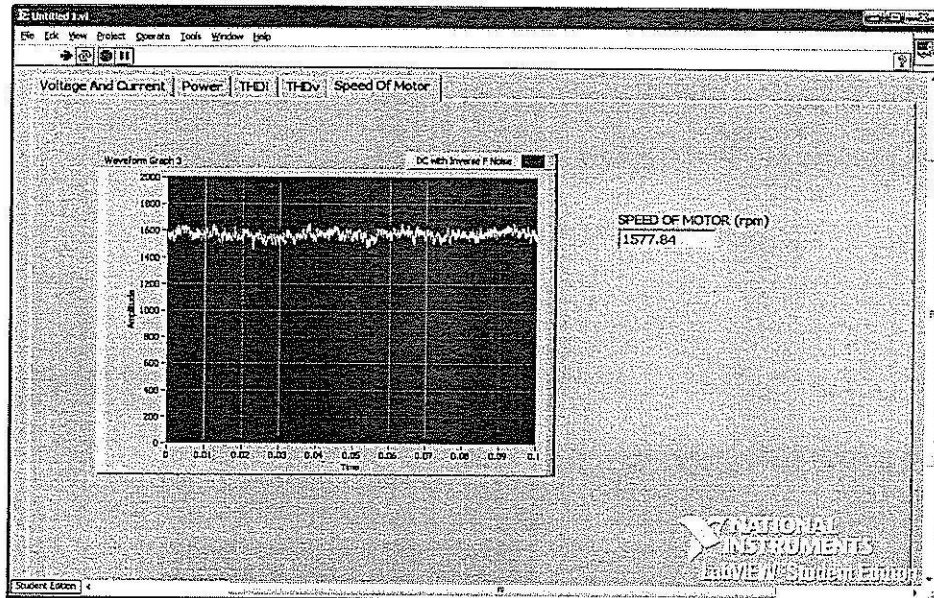
รูปที่ 6.18 หน้าต่าง Add Channel To Task สำหรับเลือกช่องสัญญาณ

ขั้นที่ 3 ดำเนินการเขียน โปรแกรมเพื่อคำนวณค่าเอาต์พุต และกราฟความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 โปรแกรมคำนวณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์

ขั้นที่ 4 ดำเนินการเพิ่มหน้า Tab Control เพื่อแสดงค่าเอาต์พุตและกราฟความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.20 หน้าต่าง Speed of Motor ขณะรัน โปรแกรม

## 6.5 สรุป

การสร้างชุดแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์ที่นำเสนอในบทนี้ ใช้โปรแกรม LabVIEW ร่วมกับอุปกรณ์ DAQ ในการแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ โดยตัวตรวจรู้ความเร็วรอบของมอเตอร์ใช้ Tachometer ยี่ห้อ LN รุ่น SE 2662-5Z สำหรับตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยผลการตรวจวัดความเร็วรอบที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้งานได้เป็นที่น่าพอใจสำหรับใช้งานในห้องปฏิบัติการ



## บทที่ 7

### บทสรุป

#### 7.1 สรุป

งานวิจัยเรื่อง การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ที่นำเสนอใน รายงานวิจัยนี้ เป็นการนำเสนอวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบแยกกระตุ้น ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบกรง กระรอก วงจรที่สร้างขึ้นในงานวิจัยสำหรับทดสอบสมรรถนะของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงดังกล่าวมีทั้งหมด 3 วงจรด้วยกัน คือ วงจรขับเคลื่อนที่ใช้ไตรแอก วงจรชอปเปอร์พื้นฐาน และวงจรเรกูลเลเตอร์แบบบัค ส่วนวงจรที่ใช้สำหรับทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมี ทั้งหมด 3 วงจรเช่นเดียวกัน คือ วงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมแบบครึ่งบริดจ์และเต็ม บริดจ์ และวงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีคดับเบิลยูเอ็ม การทดสอบวงจรถัดไปจะตรวจวัดปริมาณกระแส และแรงดันฮาร์มอนิกเป็นสำคัญ ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ใช้งานวงจรเหล่านี้ตระหนักถึงปริมาณฮาร์มอนิกที่ เกิดขึ้น และถ้าจะใช้วงจรดังกล่าวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในอุตสาหกรรม อาจมีความจำเป็นต้องมีการ ชดเชยกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกดังกล่าวด้วยเช่นกัน

ทฤษฎีและรายละเอียดต่าง ๆ ในการสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมแบบครึ่ง บริดจ์และเต็มบริดจ์ ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 โดยในบทนี้ได้มีการนำเสนอเกี่ยวกับวิธีการออกแบบวงจรถัดไป รวมถึงรายละเอียดพื้นฐานของ บอร์ด dsPIC30F2010 ของบริษัท ETT ที่ใช้สำหรับการจุดชนวนให้กับมอเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์การ สวิตซ์ให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง นอกจากนี้ในบทนี้ได้นำเสนอโค้ด โปรแกรมในการจุดชนวน มอเตอร์ที่โปรแกรมด้วยภาษาซี สำหรับใช้งานร่วมกับบอร์ด dsPIC30F2010 โดยนำเสนอทั้งหมด 3 รูปแบบ โดยในรูปแบบแรกเป็นการใช้คำสั่ง if เป็นตัวสั่งหยุดการทำงาน รูปแบบที่สองเป็นการใช้ INTERRUPT เป็นตัวสั่งหยุดการทำงาน และรูปแบบที่สามเป็นโปรแกรมที่ผู้ใช้สามารถเลือกความถี่ได้ หลายความถี่ในการสร้างรูปคลื่นสัญญาณในการขับเคลื่อน และในตอนท้ายของบทที่ 2 เป็นการ นำเสนอผลการทดสอบการขับเคลื่อน และผลการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิก ซึ่งพบว่า ปริมาณกระแส ฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายของวงจรอินเวอร์เตอร์ดังกล่าว มีค่ามาก โดยพิจารณาได้จากค่า %THD ซึ่งถ้าเป็น วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งบริดจ์จะมีค่าเท่ากับ 140% ในขณะที่แบบเต็มบริดจ์ มีค่าเท่ากับ 104.8% ซึ่ง

ค่าดังกล่าวมีค่าเกินมาตรฐาน IEE Std.519-1992 และถ้าพิจารณาแรงดันฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย สังเกตได้ว่ามีปริมาณไม่มากและอยู่ในกรอบมาตรฐาน ดังนั้นถ้าผู้ใช้งานวงจรขับเคลื่อนประเภทนี้คำนึงถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านฮาร์มอนิก ควรมีการติดตั้งตัวชดเชยกระแสฮาร์มอนิก เพื่อให้ปริมาณฮาร์มอนิกอยู่ในกรอบมาตรฐานสากล

วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสอีกประเภทหนึ่งที่น่าสนใจในรายงานวิจัยนี้คือ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม ที่มีการควบคุมแรงดันด้วยวิธีการมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์แบบไซน์ หรืออาจเรียกว่า เอสพีดับเบิลยูเอ็ม (Sinusoidal Pulse Width Modulation: SPWM) โดยการมอดูเลตดังกล่าว จะใช้การควบคุมการสวิตช์แบบยูนิโพลาร์ ที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดแรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าได้ตามต้องการ โดยรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับหลักการทำงานของวงจร การออกแบบพิกัดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังและการออกแบบวงจรจุดชนวน ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 นอกจากนี้ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบวงจรอินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ และผลการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิก ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย เมื่อใช้วงจรดังกล่าว %THD อยู่ที่ประมาณ 149.0% ซึ่งมีค่าสูงเช่นเดียวกับการใช้วงจรอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม ส่วนปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายมีค่าไม่สูงมากนัก ซึ่งอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std.519-1992

วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ไตรแอก ซึ่งเป็นวงจรหนึ่งสำหรับการทดสอบในงานวิจัย ได้นำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอการใช้ไอซี TCA785 สำหรับสร้างสัญญาณจุดชนวนเกทให้กับไตรแอก วงจรขับเคลื่อนที่นำเสนอนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน โดยในส่วนแรกเป็นการใช้ไตรแอกปรับรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ในขณะที่ส่วนที่สองเป็นการใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์สำหรับทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าว เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้นี้สามารถปรับค่าแรงดันเฉลี่ยได้ตามมุมจุดชนวนของไตรแอก ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรขับเคลื่อนนี้สามารถปรับได้ ซึ่งแรงดันดังกล่าวจะเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับขั้วอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น โดยการปรับแรงดันดังกล่าวจะส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ได้มีการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิกของวงจรขับเคลื่อนประเภทนี้ด้วยเช่นกัน โดยผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายมีค่า %THD ประมาณ 142% ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน IEEE Std.519-1992 มาก

การใช้วงจรชอปเปอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ มีสองวงจรด้วยกัน โดยวงจรแรกเป็นวงจรชอปเปอร์พื้นฐาน ในขณะที่วงจรที่สองเป็นวงจรเรกูเลเตอร์

แบบบัก์ โดยหลักการทำงานและการออกแบบของวงจรดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 โดยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ของวงจรจะใช้วิธีการปรับค่ารอบการทำงาน (k) ของมอเตอร์เฟดที่ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ให้กับวงจรดังกล่าว นอกจากนี้ในตอนท้ายของบทได้นำเสนอการทดสอบทางด้านฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่าย ซึ่งพบว่า ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกของวงจรชอปเปอร์พื้นฐาน มีค่า %THD เท่ากับ 94.8% ในขณะที่วงจรเรกเตอ์แบบบัก์มีค่า %THD เท่ากับ 100.6% ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std.519-1992

จากการศึกษา ออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าดังกล่าว ได้มีการวัดปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเมื่อใช้งานชุดขับเคลื่อน ซึ่งปริมาณฮาร์มอนิกนี้วัดด้วยเครื่องมือ Fluke 434 ซึ่งผลการวัดปริมาณฮาร์มอนิก พบว่า ชุดขับเคลื่อนที่สร้างขึ้นทั้งหมดมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่สูงมาก ในขณะที่แรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่สูงมากนัก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากวงจรดังกล่าวใช้วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ในส่วนที่เป็นการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง และเนื่องจากวงจรดังกล่าวนี้ ทำหน้าที่เปรียบเสมือนโหลดไม่เป็นเชิงเส้นให้กับระบบ จึงทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณมากที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นถ้าจะใช้วงจรเหล่านี้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ควรพิจารณาติดตั้งตัวชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ดังเช่น วงจรกรองกำลังพาสซีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ หรือวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ เพื่อกำจัด หรือบรรเทาปริมาณกระแสฮาร์มอนิกให้ลดน้อยลงกว่าเดิม ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้ดีขึ้นด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ในงานวิจัยได้มีการสร้างชุดแสดงผลความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ที่แสดงผลความเร็วรอบผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์แบบออนไลน์ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม LabVIEW การใช้ตัวตรวจรู้ความเร็วรอบมอเตอร์ และผลการตรวจวัดดังกล่าว ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. H. Rashid, "Power Electronics Circuits, Devices, and Applications", Pearson Prentice Hall, 2004.
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, "Power Electronics Converters, Applications, and Design", John Wiley & Sons, 1995.
- [3] PC Sen, "Power Electronics", TATA McGraw Hill, 1987.
- [4] D. W. Hart, "Introduction to Power Electronics", Prentice Hall, 1997.
- [5] B. M. Bird, K. G. King and D. A. G. Pedder, "An Introduction to Power Electronics", Wiley, 1993.
- [6] IEEE Std. 519-1992., IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems., 1993.

## ประวัติผู้วิจัย

ดร.ทองพล อารีรักษ์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี โท และเอก ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2543 2546 และ 2550 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ และหัวหน้าหน่วยวิจัยคุณภาพกำลังไฟฟ้า ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญทางด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรกรองกำลังแอคทีฟ การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า คุณภาพกำลังไฟฟ้า ระบบควบคุม และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์