

การพัฒนาแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับขนาด 5 กิโลโวลต์ 5 แอมแปร์ที่ปรับความถี่ได้ในช่วง
10 – 500 เฮิรตซ์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

นายอธิป สุমনะไพศาล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 0 7 0 7 0 4 0 2 1

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A DEVELOPMENT OF 5KV-AC HIGH VOLTAGE, 5A. WITH A VARIABLE FREQUENCY IN
RANGE OF 10 – 500 HZ. FROM DC HIGH VOLTAGE SUPPLY

Mr. Atip Sumanapisan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับขนาด 5 กิโลโวลต์ 5 แอมแปร์ที่ปรับความถี่ได้ในช่วง 10 - 500 เฮิรตซ์ จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
โดย	นายอภิป สุমনะไพศาล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรณวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรวัชร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. อภิบาล พฤษานาภูบาล)

อธิป สุমনะไพศาล : การพัฒนาแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับขนาด 5 กิโลโวลต์ 5 แอมแปร์ที่ปรับความถี่ได้ในช่วง 10 – 500 เฮิร์ตซ์ จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง. (A DEVELOPMENT OF 5KV-AC HIGH VOLTAGE, 5A. WITH A VARIABLE FREQUENCY IN RANGE OF 10 – 500HZ. FROM DC HIGH VOLTAGE SUPPLY)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา, 81 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาตัวต้นแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้ในช่วง 10 – 500 เฮิร์ตซ์ จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำไปใช้เป็นชุดแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่มีตัวเก็บประจุมากสำหรับการทดสอบหน่วยงาน เช่น สายเคเบิลแรงสูงใต้ดินหรือสถานีตัดตอนไฟฟ้าที่อัดความดันด้วยก๊าซ SF₆ เป็นต้น โดยใช้งานร่วมกับหม้อแปลงเรโซแนนซ์เพื่อเพิ่มขนาดแรงดันให้ได้ 5 กิโลโวลต์ โดยปกติชุดทดสอบที่ใช้ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์จะมีขนาดใหญ่ รวมทั้งการขนย้ายชุดทดสอบดังกล่าวทำได้ลำบาก ดังนั้นการพัฒนาชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้ โดยนำอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาประยุกต์ใช้ในการสร้างชุดแหล่งจ่ายและใช้การปรับความถี่ของชุดแหล่งจ่ายให้เกิดเรโซแนนซ์กับอุปกรณ์ทดสอบ จะสามารถลดกระแสด้านขาเข้าของชุดทดสอบ ทำให้อายุการใช้งานของชุดทดสอบเล็กลง ซึ่งผลการทดสอบที่แรงดันทดสอบขนาด 5 กิโลโวลต์กับตัวเก็บประจุขนาด 600 พิโกฟารัดและ 48.2 นาโนฟารัด ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 333 และ 45.5 เฮิร์ตซ์ตามลำดับ และได้ค่ากระแสของชุดแหล่งจ่ายต่ำสุดที่ 637.7 มิลลิแอมแปร์และ 3.1743 แอมแปร์

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

5070704021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS: AC VOLTAGE SUPPLY, FREQUENCY CONTROL, DC TO AC INVERTER

ATIP SUMANAPISAN : A DEVELOPMENT OF 5KV-AC HIGH VOLTAGE, 5A. WITH A VARIABLE FREQUENCY IN RANGE OF 10 – 500HZ. FROM DC HIGH VOLTAGE SUPPLY. ADVISOR: ASST.PROF.WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, Dr.-Ing. 81 pp.

This thesis presents the prototype of AC voltage supply which can be controlled the frequency in the range of 10 - 500 Hz from DC power supply. This uses to supply the power for high voltage electrical equipment with high capacity load such as underground high voltage cable or GIS etc. Using the AC output voltage through the resonance transformer for increasing the voltage up to 5 kV. Typically, the test system of electrical equipment on-site with 50 Hz is large, the transportation of the testing device is quiet difficult. This test system can be adjusted the frequency of AC output voltage to fit with resonance frequency with the test equipment. This reduces its primary current and size. The results from the test system can be used with the capacitor between 600pF and 48.2nF at testing voltage of 5kV. It is given the resonance frequency at 333 Hz and 45.5 Hz and provide the minimum currents from AC power supply at 637.7 mA and 3.1743 A, respectively.

Department:Electrical Engineering.... Student's Signature:

Field of Study: ...Electrical Engineering... Advisor's Signature:

Academic Year:2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางศึกษาวิจัย การแก้ปัญหา และแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์ และอาจารย์ ดร. อภิบาล พฤษานาบุญนาค ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ คุณถาวร เอื้อดี และคุณเกรียงไกร โขษฐิธนู ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์วัด และอุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และในการทดลองมาโดยตลอด ตลอดจนเพื่อนๆ พี่น้องๆ ทุกคนซึ่งเป็นกำลังใจให้ฝ่าฟันจนประสบความสำเร็จ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งมอบโอกาสให้ได้รับสิ่งที่มีคุณค่าอย่างยิ่งสำหรับชีวิตข้าพเจ้านั้นคือการศึกษา และเป็นกำลังใจรวมทั้งสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านตลอดมาจนประสบความสำเร็จในที่สุด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	2
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	2
2 หลักการและทฤษฎี.....	3
2.1 ทฤษฎีแหล่งจ่ายแรงดันแบบสวิตซิง.....	3
2.2 ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลัง.....	4
2.2.1 ทรานซิสเตอร์กำลัง.....	4
2.2.2 มอสเฟตกำลัง.....	5
2.2.2.1 เส้นใยของวงจรรีบมอสเฟตกำลัง.....	7
2.2.2.2 ไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว.....	8
2.3 วงจรเรโซแนนซ์.....	8
2.4 หลักการที่ใช้ในการออกแบบวงจร.....	11
2.4.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันขาเข้า.....	12
2.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อแบบเรียงกระแสเต็มคลื่น.....	12
2.4.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	14
2.4.4 วงจรชุดขับมอสเฟต.....	17

2.4.4.1	ตัวแยกทางไฟฟ้า	17
2.4.4.2	ตัวขับมอสเฟต	17
2.4.5	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) แบบ LC ต่ออนุกรม	18
3	การจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมความถี่ได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB	20
3.1	แบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันเป็นความถี่	20
3.2	แบบจำลองของวงจรฟูลบริดจ์ต่อโหลดแบบอนุกรม	21
3.3	แบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	21
3.4	ผลการจำลองวงจรโดยโปรแกรม MATLAB	22
4	การออกแบบและสร้างแบบจำลอง	27
4.1	ชุดวงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ	28
4.1.1	แหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ และ 5 โวลต์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์	28
4.1.2	แหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ สำหรับวงจรขับนำเกต	28
4.1.3	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ 0-220 โวลต์	29
4.2	ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์	30
4.3	ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	34
4.3.1	การตั้งค่าต่างๆของไมโครคอนโทรลเลอร์	34
4.3.2	การออกแบบชุดคำสั่งควบคุม	34
4.4	ชุดวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)	35
4.5	การสร้างแบบจำลอง	37
5	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	38
5.1	การทดสอบวงจรควบคุมการทำงานของมอสเฟต	38
5.1.1	การคำนวณหาค่าที่จุดต่างๆของสัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่สวิตชิง	38
5.1.1	การปรับค่าเวลาทำงานเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดในการสวิตชิงของ มอสเฟต	40
5.2	การตรวจสอบเรโซแนนซ์ของสัญญาณขาออก	41
5.3	ผลของสัญญาณแรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ต่างๆ	44
5.4	วิเคราะห์ผลการจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุม ความถี่ได้	55

6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	56
6.1 สรุปผลการสร้างแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุม ความถี่ได้	56
6.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ	57
รายการอ้างอิง	58
ภาคผนวก	59
ภาคผนวก ก	60
ภาคผนวก ข	64
ภาคผนวก ค	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	81

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	แสดงขนาดของแรงดันกระแสตรงที่ได้จากไฟบ้าน 220 โวลต์ส่งเข้าหม้อแปลง ควบคุมแรงดันและผ่านวงจรแปลงแรงดันจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง	30
5.1	ความสัมพันธ์ของความถี่เรโซแนนซ์กับตัวเก็บประจุที่ขนาดต่างๆ.....	43
5.2	ผลของแรงดันกระแสสลับขาออกเมื่อป้อนแรงดันขาเข้า 110 โวลต์ที่ความถี่ ต่างๆ.....	45
5.3	ผลของแรงดันกระแสสลับขาออกเมื่อป้อนแรงดันขาเข้า 170 โวลต์ที่ความถี่ ต่างๆ	49
5.4	ขนาดของแรงดันและกระแสที่ความถี่ต่างๆของชุดแหล่งจ่ายแรงดันกระแส สลับขนาด 5 กิโลโวลต์ เมื่อต่อกับโหลดทดสอบขนาด 600 พิโกฟารัด.....	52
5.5	ขนาดของแรงดันและกระแสที่ความถี่ต่างๆของชุดแหล่งจ่ายแรงดันกระแส สลับขนาด 5 กิโลโวลต์ เมื่อต่อกับโหลดทดสอบขนาด 25.1 นาโนฟารัด.....	53
5.6	ขนาดของแรงดันและกระแสที่ความถี่ต่างๆของชุดแหล่งจ่ายแรงดันกระแส สลับขนาด 5 กิโลโวลต์ เมื่อต่อกับโหลดทดสอบขนาด 48.2 นาโนฟารัด.....	54
5.7	ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ขนาดตัวเก็บประจุ ต่างๆ.....	55

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	วงจรรวมสวิตชิงทั่วไป.....3
2.2	ชนิดของทรานซิสเตอร์.....4
2.3	ชนิดของมอสเฟต.....5
2.4	มอสเฟตชนิดเอ็นแชนซ์เมนต์แบบช่องผ่านเอ็น.....6
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันคร่อมขาเกตและขาซอร์ส.....6
2.6	ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับอุณหภูมิที่รอยต่อ.....7
2.7	วงจร LC แบบขนาน.....8
2.8	วงจร LC แบบอนุกรม.....8
2.9	วงจร RLC อนุกรม.....9
2.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกระแสเมื่อเกิดเรโซแนนซ์ของวงจร RLC แบบอนุกรม.....9
2.11	วงจร RLC ขนาน.....10
2.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกระแสเมื่อเกิดเรโซแนนซ์ของวงจร RLC ขนาน.....10
2.13	หลักการต่อวงจรแหล่งจ่ายแรงดันขาเข้า.....12
2.14	วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อแบบเรียงกระแสเต็มคลื่น.....13
2.15	แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 4 ตัว.....13
2.16	การควบคุมการทำงานของมอสเฟตด้วยสัญญาณ PWM.....14
2.17	PIC24HJ128GP306 (Top view).....16
2.18	ตัวแยกทางไฟฟ้าแบบ Opto-Coupler.....17
2.19	ตัวขับมอสเฟต IR2110.....18
2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ที่ความถี่สวิตชิง 1 กิโลเฮิร์ตซ์.....19
2.21	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ที่ความถี่สวิตชิงเรโซแนนซ์.....19
3.1	แบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันเป็นความถี่.....20
3.2	แบบจำลองของวงจรฟูลบริดจ์ต่อโหลดอนุกรม.....21
3.3	แบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....22
3.4	สัญญาณของวงจรฟูลบริดจ์ที่ผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น.....23

ภาพที่	หน้า
3.5 สัญญาณของวงจรฟูลบริดจ์ที่ผ่านการกลับเฟส.....	24
3.6ก สัญญาณขาออกที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์.....	24
3.6ข สัญญาณขาออกที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์.....	25
3.6ค สัญญาณขาออกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์.....	25
3.7 หม้อแปลงเรโซแนนซ์.....	26
4.1 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมความถี่ได้.....	27
4.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ และ 5 โวลต์สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์.....	28
4.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ สำหรับ PC923 ด้านสัญญาณสูง.....	28
4.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ สำหรับ PC923 ด้านสัญญาณต่ำ.....	29
4.5 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้.....	29
4.6 ไดอะแกรมการต่อมอสเฟตแบบเรียงกระแสเต็มคลื่น.....	31
4.7 วงจรสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์.....	32
4.8 การสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์.....	32
4.9 วงจร Dead time.....	33
4.10 วงจรขับเคลื่อนโดยไอซี PC923L0NSZ0F.....	33
4.11 แผนผังการทำงานชุดคำสั่งหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC24HJ128GP306.....	35
4.12 สัญญาณขาออกที่มีความถี่สูงปะปน.....	36
4.13 สัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	36
4.14 การต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและการต่อหม้อแปลง.....	36
4.15 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้.....	37
5.1 ค่าในจุดต่างๆของรูปสัญญาณไซน์ที่ความถี่สวิตชิง 5 กิโลเฮิรตซ์.....	39
5.2 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ความถี่สวิตชิง 5 กิโลเฮิรตซ์.....	40
5.3 สัญญาณที่ส่งไปขับขาเกตด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ.....	41
5.4 การปรับค่าเวลา Dead time ของวงจรขั้วนำเกต.....	41
5.5 สัญญาณแรงดันขาออกที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ ผ่าน.....	42
5.6 สัญญาณแรงดันขาออกที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ ผ่าน.....	42

ภาพที่	หน้า
5.7 สัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าตัวเก็บประจุ 0.33 ไมโครฟารัด.....	43
5.8 สัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าตัวเก็บประจุ 0.47 ไมโครฟารัด.....	44
5.9 สัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าตัวเก็บประจุ 1.33 ไมโครฟารัด.....	44
5.10 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 110 โวลต์.....	46
5.11 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 110 โวลต์.....	46
5.12 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 500 เฮิร์ตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 110 โวลต์.....	46
5.13 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ยังไม่ต่อโหลด เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 220 โวลต์....	47
5.14 แรงดันกระแสสลับขาออกเมื่อต่อโหลดขนาด 100 วัตต์ เมื่อจ่ายแรงดัน ขาเข้า 220 โวลต์.....	47
5.15 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้ เมื่อต่อโหลดขนาด 100 วัตต์.....	48
5.16 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 170 โวลต์.....	49
5.17 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 170 โวลต์.....	50
5.18 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 500 เฮิร์ตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 170 โวลต์.....	50
5.19 การต่อวงจรชุดแหล่งจ่ายเข้ากับตัวเก็บประจุทดสอบขนาดต่างๆ.....	51
5.20 การวัดค่ากระแสต้านปฏิกิริยาของชุดแหล่งจ่าย.....	51
5.21 ความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่ที่โหลดทดสอบขนาด 600 พิโกฟารัด....	52
5.22 ความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่ที่โหลดทดสอบขนาด 25.1 นาโนฟารัด....	53
5.23 ความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่ที่โหลดทดสอบขนาด 48.2 นาโนฟารัด....	54
5.24 ขนาดกระแส ณ จุดความถี่เรโซแนนซ์ที่ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ.....	55

ภาพที่	หน้า
ก.1	ไดอะแกรมของ PIC24HJ128GP306.....60
ก.2	ขาของ PIC24HJ128GP306.....61
ก.3	รายละเอียดทางเทคนิคของมอสเฟตกำลังเบอร์ IRFP460PbF.....62
ก.4	รายละเอียดทางเทคนิคของตัวขับเคลื่อน PC923.....63
ข.1	แสดงวงจรของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับแรงดันสูงที่สามารถควบคุม ความถี่ได้ตั้งแต่ 10 – 500 เฮิรตซ์.....64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าทางด้านแรงสูงเช่น การทดสอบสายเคเบิลใช้งาน โดยปกติชุดทดสอบเหล่านี้จะมีขนาดใหญ่เพราะจำเป็นต้องจ่ายกำลังไฟมากขึ้นให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการจะทดสอบหน่วยงานซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าสูง จึงทำให้การขนย้ายชุดทดสอบหรือการจัดหาแหล่งจ่ายไฟที่เพียงพอทำได้ยาก ดังนั้นการพัฒนาชุดทดสอบซึ่งสามารถรองรับการทดสอบอุปกรณ์ทางด้านแรงสูงได้ โดยที่ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กและใช้กำลังไฟเหมาะสม จึงทำให้การทดสอบหน่วยงานเป็นไปได้ง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการพัฒนาแบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสลับที่สามารถควบคุมความถี่ของแรงดันขาออกได้ตั้งแต่ 10 – 500 เฮิร์ตซ์ตามมาตรฐานการทดสอบหน่วยงาน IEC 60060-3, 2006[1] ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าหน่วยงานได้ โดยที่ชุดทดสอบนี้จะใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในควบคุมความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสลับเพื่อให้ได้ความถี่ที่เหมาะสมเกิดเรโซแนนซ์กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เราต้องการทดสอบ เช่น สายเคเบิลใช้งาน ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ไฟเลี้ยงมากและยังช่วยลดขนาดของชุดอุปกรณ์ทดสอบลงได้ สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและการทำงานที่หน่วยงานมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้ตั้งแต่ 10 – 500 เฮิร์ตซ์และประยุกต์ใช้ในการสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงยังสามารถลดน้ำหนักของชุดอุปกรณ์ทดสอบลงได้
2. เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการทำงานและกระบวนการขั้นตอนในการทดสอบสายเคเบิลใช้งาน
3. เพื่อศึกษาการนำอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาประยุกต์ใช้กับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าทางด้านแรงสูง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พัฒนาชุดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับต้นแบบ ที่สามารถรองรับแรงดันกระแสตรงขาเข้าขนาด 220 โวลต์ และสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อสร้างแรงดันทดสอบกระแสสลับขนาด 5 กิโลโวลต์ได้
2. จุดทดสอบสามารถควบคุมความถี่ของแรงดันกระแสสลับให้อยู่ในย่าน 10 – 500 เฮิรตซ์

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและกระบวนการทำงานของชุดทดสอบแรงดันกระแสสลับหน้างานและศึกษาวิธีการออกแบบชุดควบคุมแรงดันกระแสสลับโดยใช้วงจรถออิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาช่วยในการควบคุมความถี่
2. ศึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์
3. ออกแบบและประมวลผลวงจรโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. สร้างแบบจำลองและทดสอบการทำงาน
5. สรุปลงและแก้ไขข้อบกพร่อง
6. เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

การศึกษาและพัฒนาชุดต้นแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงสูงโดยใช้วงจรถออิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาช่วยในการควบคุมความถี่นี้ จะมีประโยชน์มากในการนำความรู้ไปใช้พัฒนาอุปกรณ์ทดสอบสายเคเบิลในสถานะหน้างานให้มีขนาดเล็กลงและลดขนาดของกำลังไฟฟ้าที่ใช้กับอุปกรณ์ทดสอบ ทำให้การเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ทดสอบและการจัดหาแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ทดสอบทำได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้การทดสอบสายเคเบิลหน้างานเป็นไปด้วยความสะดวกรวดเร็วมากขึ้น

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะนำเสนอในแต่ละบทเรียงลำดับดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีของแหล่งจ่ายแรงดันแบบสวิตชิง

บทที่ 3 กล่าวถึงการจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้โปรแกรม MATLAB

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างแบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดัน

บทที่ 5 กล่าวถึงผลของการจำลองแหล่งจ่ายแรงดันและวิเคราะห์ผล

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลและข้อเสนอแนะ

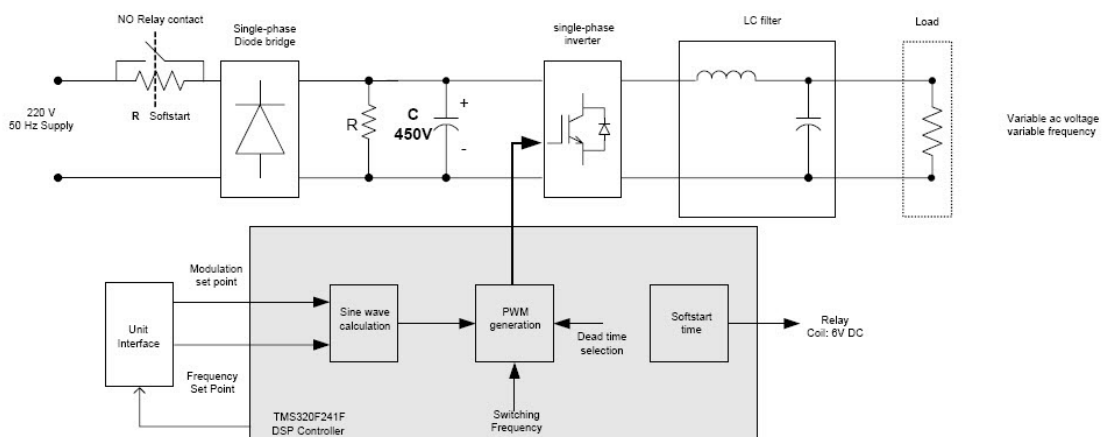
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

วิทยานิพนธ์นี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับการจัดทำชุดต้นแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งสามารถควบคุมความถี่ของแรงดันขาออกได้ในช่วง 10 – 500 เฮิร์ตซ์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลแรงสูงหน้างาน

2.1 ทฤษฎีแหล่งจ่ายแรงดันแบบสวิตชิง

แหล่งจ่ายแรงดันแบบสวิตชิงโดยทั่วไป ถูกออกแบบมาให้ใช้กับระบบแรงดันไฟสลับ ซึ่งแรงดันไฟสลับจะต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสด้านเข้า ซึ่งถูกเปลี่ยนเป็นไฟกระแสตรง จากนั้นวงจรอินเวอร์เตอร์จะทำการแปลงสัญญาณจากแรงดันกระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟกระแสสลับ ซึ่งส่วนของวงจรสวิตชิงนี้อาจจะสร้างได้จากอุปกรณ์หลายชนิด อาทิเช่น ทรานซิสเตอร์กำลัง, มอสเฟตกำลัง และรูปคลื่นที่ออกจากวงจรสวิตชิงจะถูกส่งเข้าหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อให้ได้แรงดันขาออกตามต้องการ และแรงดันขาออกจะถูกส่งเข้าวงจรกรองอีกครั้งหนึ่งเพื่อกรองสัญญาณรบกวน แต่ถึงอย่างไร แรงดันไฟสลับทางด้านขาเข้าหรือโหลดทางด้านขาออกอาจเปลี่ยนแปลงไปบ้าง ทำให้แรงดันขาออกไม่คงที่ ดังนั้นแรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสด้านออกพร้อมกับวงจรกรองกระแสจะถูกป้อนกลับมาควบคุม และตรวจสอบแรงดันที่ขาออกให้มีค่าคงที่ด้วยอีกทีหนึ่ง

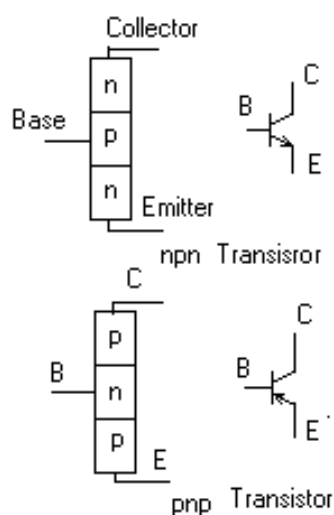


รูปที่ 2.1 วงจรรวมสวิตชิงทั่วไป

2.2 ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลัง

2.2.1 ทรานซิสเตอร์กำลัง

ในระบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง ส่วนมากมักจะใช้ทรานซิสเตอร์กำลังราวๆ 50เปอร์เซ็นต์ แต่ในสภาวะปัจจุบันมอสเฟตได้เข้ามาแทนที่อย่างรวดเร็วแต่ข้อดีของทรานซิสเตอร์กำลังก็มีอยู่ คือ มีอัตราทนแรงดันสูงและมีราคาถูก



รูปที่ 2.2 ชนิดของทรานซิสเตอร์

การออกแบบทรานซิสเตอร์กำลังนั้นต้องคำนึงถึงกราฟคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์กำลังตัวนั้นๆ ด้วยเพราะทรานซิสเตอร์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยกระแสโดยกระแสควบคุมนั้นได้จากสมการที่ 1

$$I_b > \frac{I_e}{h_{fe}} \quad (2.1)$$

I_b = กระแสเบส

I_e = กระแสอิมิตเตอร์

h_{fe} = อัตราการขยายกระแสไฟฟ้า เท่ากับ กระแสขาออก(I_c) / กระแสขาเข้า(I_b)

กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง เป็นไปได้ 2 ลักษณะ คือ กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นขณะเปลี่ยนสถานะการทำงาน (Switching loss) และกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสที่จุดอิ่มตัว (Saturation loss) แต่กำลังงานสูญเสียนั้นจะเกิดขณะที่เริ่มหยุดนำกระแสเป็นหลัก

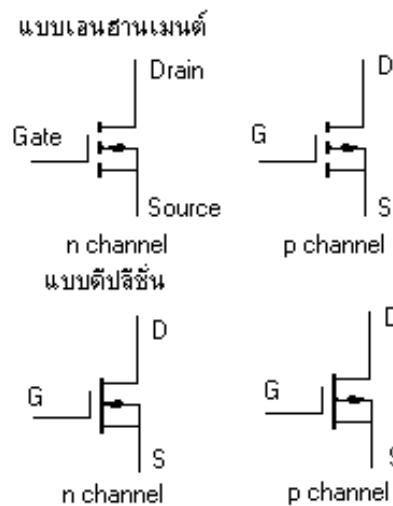
การทำให้กำลังสูญเสียขณะเริ่มหยุดนำกระแสมีค่าน้อยที่สุดจะทำให้ทรานซิสเตอร์กำลังมีประสิทธิภาพสูงสุด และจะช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นที่ทรานซิสเตอร์กำลังขณะทำงานด้วย

การพิจารณาในการเลือกใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังควรพิจารณาดังนี้ คือ

- อัตราทนแรงดันและกระแสสูงสุด
- ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะ
- อัตราทนกำลังสูญเสีย

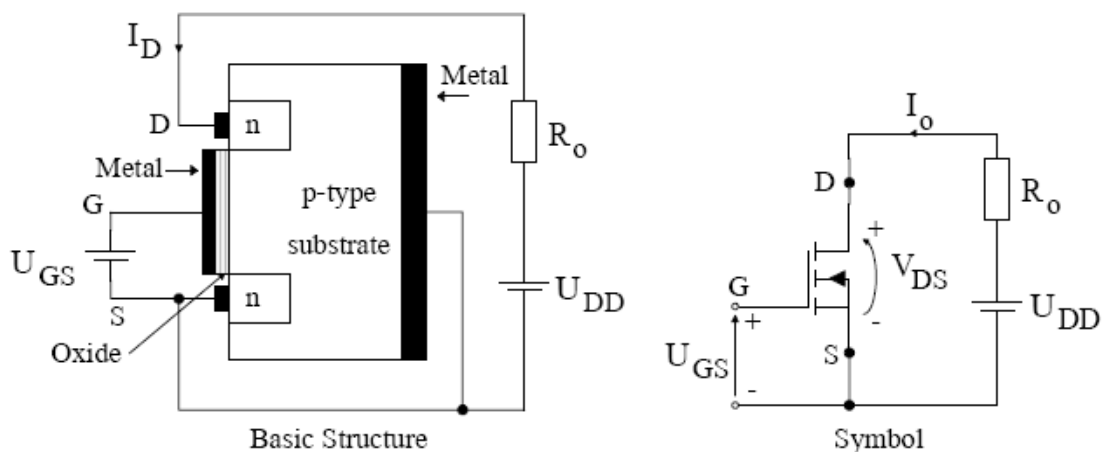
2.2.2. มอสเฟตกำลัง

มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการสวิตชิง หาซื้อได้ง่าย และราคาไม่แพง การทำงานของมอสเฟตควบคุมด้วยแรงดัน และต้องการกระแสขาเข้าต่ำมากๆ ความเร็วในการตอบสนองความถี่อยู่ในระดับสูง และใช้เวลาในการสวิตชิงต่ำมาก มอสเฟตกำลังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านตัวแปลงผันที่กำลังต่ำ ความถี่สูง ชนิดของมอสเฟตกำลังมีทั้งแบบ ช่องผ่านเอ็นและช่องผ่านพี ชนิดเอ็นแชนแนลเมนต์หรือชนิดดีปลิซัน

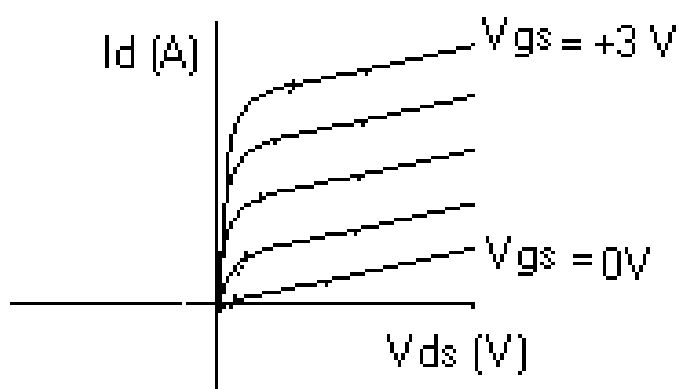


รูปที่ 2.3 ชนิดของมอสเฟต

มอสเฟตที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบเอ็นแชนแนลเมนต์มอสเฟตแบบช่องผ่านเอ็น (n-channel enhancement-type MOSFET) ซึ่งมีคุณลักษณะคือ เมื่อขาเดรนเป็นบวกเทียบกับขาซอสและ $V_{GS} = 0V$ จะไม่มีกระแสเดรนไหล เมื่อ V_{GS} เริ่มเป็นบวก กระแสเดรนจะเริ่มไหลและไหลมากขึ้นเมื่อ V_{GS} เป็นบวกมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5

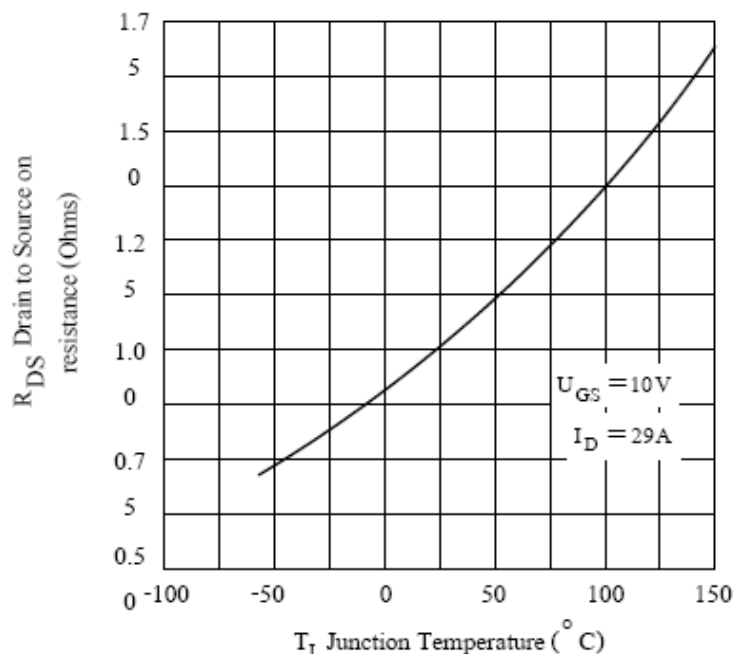


รูปที่ 2.4 มอสเฟตชนิดเอ็นแชนซ์เมนต์แบบช่องผ่านเอ็น



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันคร่อมขาเกตและขาซอร์ส

องค์ประกอบที่สำคัญในการทำงานของมอสเฟตกำลังคือ อัตราทวนแรงดันระหว่างเดรนกับซอร์ส (V_{DS}), อัตราการทวนกระแสไหลจากเดรนไปยังซอร์ส (I_{DS}) และค่าความต้านทานในขณะทำงานที่สภาวะคงตัว ($R_{DS(ON)}$) คุณสมบัตินี้ของมอสเฟตกำลังเบอร์ต่างๆ สามารถค้นหาข้อมูลได้จากบริษัทผู้ผลิต ความต้านทานขณะทำงาน ($R_{DS(ON)}$) เป็นการแสดงถึงการสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้า ในขณะที่มอสเฟตนำกระแส R_{DS} มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิที่รอยต่อ (T_j) เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับอุณหภูมิที่รอยต่อ

กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนของมอสเฟตกำลังมี 2 ลักษณะเช่นเดียวกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ คือ กำลังงานสูญเสียขณะเปลี่ยนสถานะและกำลังงานสูญเสียขณะนำกระแสแต่ช่วงเวลาการเปลี่ยนสถานะของมอสเฟตกำลังจะสั้นกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์มากเพราะตามโครงสร้างจะไม่มีประจุสะสมเกิดขึ้นในตัวมอสเฟตกำลังแต่จะมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสสูงกว่าทรานซิสเตอร์กำลัง

2.2.2.1 เงื่อนไขของวงจรขับมอสเฟตกำลัง

ค่าความจุไฟฟ้า (MOSFET Capacitor) เนื่องจากโครงสร้างภายในตัวมอสเฟตกำลังเหมือนมีตัวเก็บประจุต่ออยู่รอบๆ ขาตัวเก็บประจุจะทำให้มอสเฟตกำลังต้องเก็บประจุเข้าไปที่ตัวเก็บประจุก่อน เพื่อที่จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมขาเกต (V_{GS}) มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันเริ่มทำงาน ส่วนในการที่จะทำให้มอสเฟตกำลังหยุดนำกระแสก็ต้องทำให้ตัวเก็บประจุคายประจุออกจนแรงดันตกคร่อมที่ขาเกตลดต่ำกว่าแรงดันเริ่มทำงานจึงเป็นผลให้มอสเฟตกำลังหยุดนำกระแส

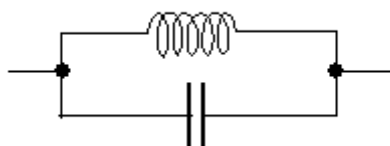
ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่อยู่ในตัวมอสเฟตกำลังนี้จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเปลี่ยนสถานะของตัวมอสเฟตกำลังเองดังนั้นการขับมอสเฟตกำลังให้นำกระแสได้นั้นจะต้องมีการเก็บประจุและคายประจุที่ขาเกตและต้องให้แรงดันตกคร่อมที่ขาเกตมีค่ามากพอเพื่อที่มอสเฟตกำลังจะได้ทำงานเต็มประสิทธิภาพ

2.2.2.2 ไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว (Ultrafast and Hyperfast diode)

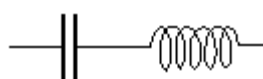
ไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว (Ultrafast and Hyperfast diode) เหมาะสำหรับงานที่มีความถี่สูงมาก การทำงานจึงต้องการให้ไดโอดที่นำกระแสอยู่ เปลี่ยนสภาวะเป็นหยุดนำกระแสอย่างรวดเร็ว ขณะที่ไดโอดนำกระแสจะมีประจุไฟฟ้าที่รอยต่อของสารพีและเอ็นเหมือนตัวเก็บประจุและเมื่อมีแรงดันไบอัสย้อนกลับอย่างทันทีทันใด จะมีกระแสไหลย้อนกลับผ่านไดโอดในเวลาชั่วขณะหนึ่ง ช่วงเวลานี้เรียกว่าช่วงเวลาในการฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse Recovery Time) ซึ่งไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว Ultrafast diode มีช่วงเวลาในการฟื้นตัวย้อนกลับประมาณ 75 ถึง 100 นาโนวินาที ส่วนไดโอดชนิดกลับคืนสภาวะใหม่ได้เร็ว Hyperfast diode มีช่วงเวลาในการฟื้นตัวย้อนกลับมีค่าน้อยกว่า 55 นาโนวินาที การทำงานของไดโอดนั้นมีข้อจำกัดทั้งทางด้านกระแสและแรงดัน สามารถศึกษารายละเอียดของข้อกำหนดได้จากบริษัทผู้ผลิต

2.3 วงจรเรโซแนนซ์

วงจรเรโซแนนซ์หมายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ณ ความถี่เฉพาะค่าหนึ่ง ที่ค่าแรงดัน หรือค่ากระแส หรือค่าอิมพีแดนซ์อย่างใดอย่างหนึ่งมีค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุด ซึ่งจากรูปที่ 2.7 เป็นวงจร LC ต่อแบบขนาน ขนาดอิมพีแดนซ์มีค่ามากที่สุดที่เรโซแนนซ์ และรูปที่ 2.8 เป็นวงจร LC ที่ต่อแบบอนุกรม ขนาดอิมพีแดนซ์มีค่าน้อยที่สุดที่เรโซแนนซ์ ค่าที่มากที่สุดหรือน้อยสุดของขนาดอิมพีแดนซ์ขึ้นกับคุณภาพของชิ้นส่วนประกอบย่อย แต่ในวงจรอุดมคติขนาดของอิมพีแดนซ์จะมีค่าเป็นอนันต์หรือเป็นศูนย์โอห์มตามลำดับ

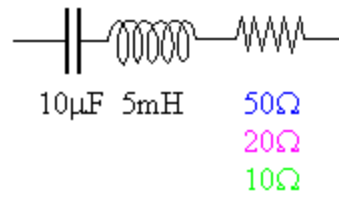


รูปที่ 2.7 วงจร LC แบบขนาน

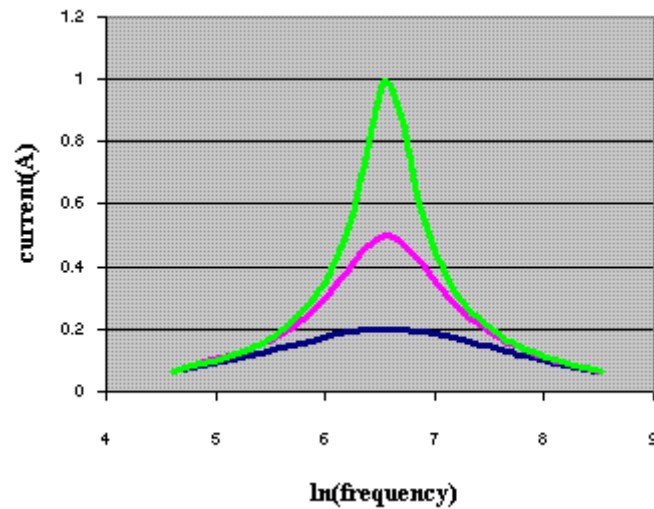


รูปที่ 2.8 วงจร LC แบบอนุกรม

จากรูปที่ 2.9 เป็นตัวอย่างวงจร RLC เมื่อเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะทำให้ค่าน้อยที่สุดของอิมพีแดนซ์คือ 50 โอห์ม ซึ่งมาจากตัวต้านทาน 50 โอห์ม ถ้าเราเปลี่ยนค่าของตัวต้านทาน ค่าของกระแสที่ไหลในวงจรจะเปลี่ยนกับความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ที่เรโซแนนซ์กระแสจะมีค่าสูงสุดเพราะอิมพีแดนซ์มีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.9 วงจร RLC อนุกรม



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกระแสเมื่อเกิดเรโซแนนซ์ของวงจร RLC อนุกรม

ซึ่งสามารถหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร RLC อนุกรมได้จากความสัมพันธ์ตามสมการด้านล่าง

$$\vec{Z} = R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2.2)$$

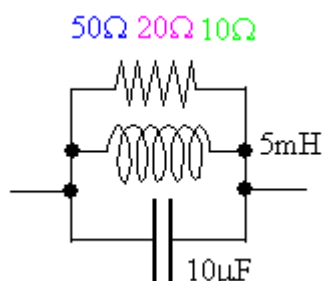
$$X_L = X_C$$

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C}$$

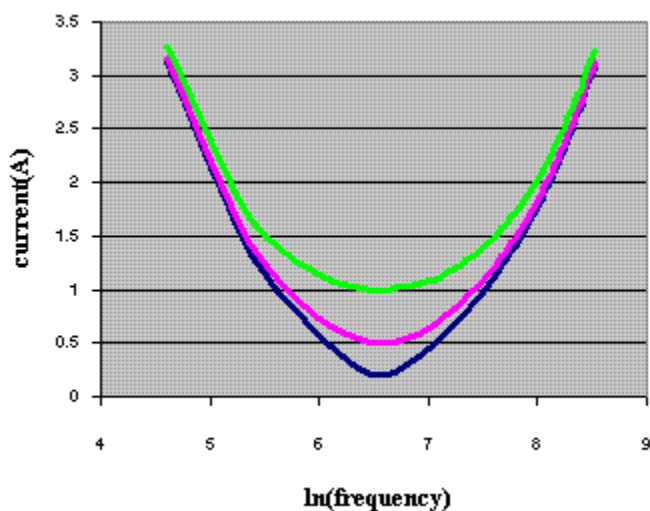
$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

จากรูปที่ 2.11 เป็นวงจร RLC ต่อแบบขนานซึ่งกรณีเมื่อเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นแล้วเราเปลี่ยนค่าของตัวต้านทาน ค่ากระแสที่เรโซแนนซ์จะมีค่าน้อยที่สุดแต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความต้านทานลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 วงจร RLC ขนาน



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกระแสเมื่อเกิดเรโซแนนซ์ของวงจร RLC ขนาน

ซึ่งสามารถหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจร RLC แบบขนานได้จากความสัมพันธ์ตามสมการด้านล่าง

$$\begin{aligned} \frac{1}{\bar{Z}} &= \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} - \frac{\omega C}{j} \\ &= \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}
 X_L &= X_C \\
 \omega_r L &= \frac{1}{\omega_r C} \\
 2\pi f_r L &= \frac{1}{2\pi f_r C} \\
 f_r &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

ซึ่งจะเห็นว่าสมการที่ 2.3 และ 2.5 เป็นสมการเดียวกัน ดังนั้นการหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรแบบอนุกรมและแบบขนานจะใช้สมการเดียวกันในการหาค่า นอกจากนี้ยังมีปริมาณที่ใช้บอกความคมของเรโซแนนซ์ (ยอดของเรโซแนนซ์แคบหรือกว้าง) ซึ่งเป็นตัวชี้บอกคุณภาพของวงจรคือ แฟกเตอร์คุณภาพ (Quality factor) หรือค่า Q ของวงจร ซึ่งทั้งในกรณีต่อแบบอนุกรมและขนานจะมีค่า $Q = X_L/R$

2.4 หลักการที่ใช้ในการออกแบบวงจร

การออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันในวิทยานิพนธ์นี้ ชู่อินเวอร์เตอร์ต่อแบบวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น ให้แรงดันขาออกสูงสุดขนาด 220 โวลต์และจะส่งเข้าหม้อแปลงเรโซแนนซ์เพื่อเพิ่มค่าแรงดันให้ได้ 5 กิโลโวลต์ต่อไป โดยแรงดันขาเข้าเป็นกระแสตรง 0 – 220 โวลต์ซึ่งได้จากวงจรแปลงแรงดันจากไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ให้เป็นกระแสตรงและควบคุมขนาดของแรงดันโดยใช้หม้อแปลงควบคุมแรงดัน ทั้งนี้การควบคุมระบบการทำงานของวงจรจะใช้ PIC-คอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC24HJ128GP306 เป็นตัวควบคุมขาเกตของอินเวอร์เตอร์และเป็นตัวกำหนดความถี่ของแรงดันขาออก

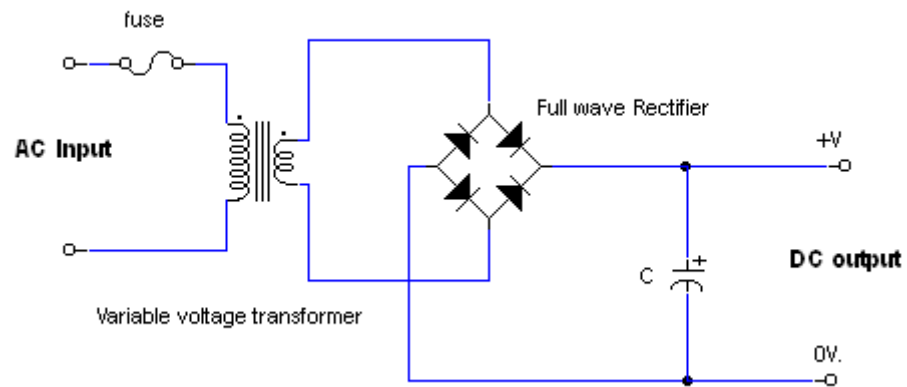
หลักการที่ใช้ในการออกแบบวงจร จะสามารถแบ่งแยกออกเป็นทั้งหมด 4 ส่วนหลักๆ ซึ่งประกอบกันเข้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับดังนี้

- 2.4.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันขาเข้า
- 2.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อแบบเรียงกระแสเต็มคลื่น
- 2.4.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์
- 2.4.4 วงจรชุดขับมอสเฟต
- 2.4.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) แบบ LC ต่ออนุกรม

2.4.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันขาเข้า

แหล่งจ่ายแรงดันขาเข้าให้กับวงจรใช้หลักการแปลงแรงดันกระแสสลับให้เป็นแรงดันกระแสตรงเพื่อส่งให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยควบคุมขนาดของแรงดันขาเข้าได้จากการต่อไฟบ้านกระแสสลับขนาด 220 โวลต์ ผ่านหม้อแปลงควบคุมแรงดัน ทำให้สามารถควบคุมขนาดของแรงดันขาเข้าได้ตามที่ต้องการ หลังจากนั้นต่อกับวงจรแปลงแรงดัน (Rectifier) เพื่อแปลงแรงดันจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงและส่งต่อไปกับชุดอินเวอร์เตอร์ต่อไป

ตัวเก็บประจุในวงจรมีหน้าที่ในการกรองแรงดันกระแสตรงขาเข้าก่อนเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์ให้เรียบขึ้น โดยวงจรแหล่งจ่ายแรงดันขาเข้าแสดงดังรูปที่ 2.13

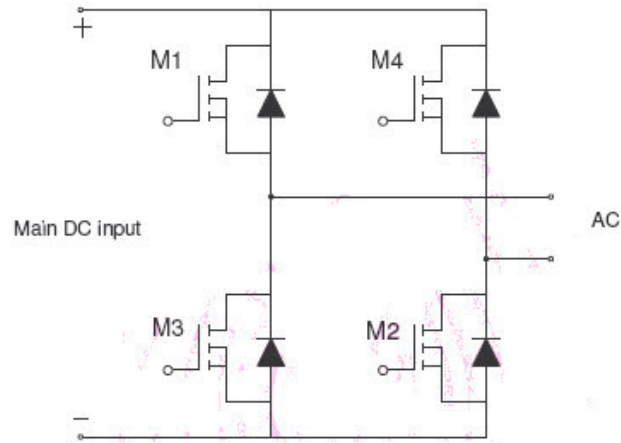


รูปที่ 2.13 หลักการต่อวงจรแหล่งจ่ายแรงดันขาเข้า

2.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อแบบเรียงกระแสเต็มคลื่น

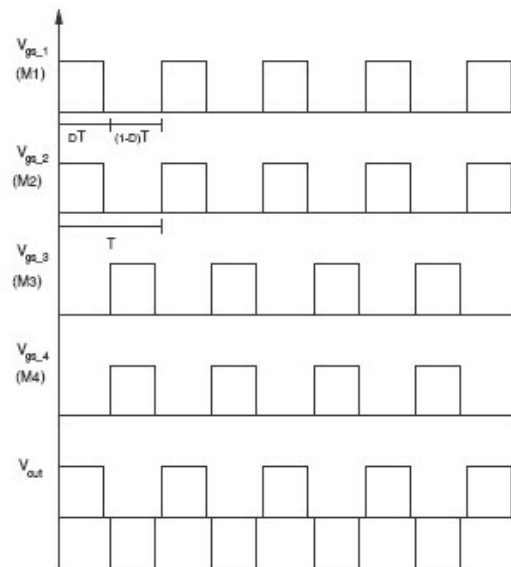
พื้นฐานของการแปลงระบบไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับนั้นเราจะทำการแปลงโดยใช้ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยการออกแบบอินเวอร์เตอร์นั้นหลักๆ อยู่ที่ขนาดของกำลัง (วัตต์) ที่เราใช้งาน, รูปแบบการสวิตชิง, ความถี่ในการสวิตชิงสัญญาณและอีกหลายๆอย่างที่จะกล่าวต่อไป

การออกแบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานในที่นี้ เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ต่อแบบวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น ซึ่งจะได้สัญญาณขาออกเป็นสัญญาณรูปไซน์ จากรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นการจัดเรียงของมอสเฟตจำนวน 4 ตัวในอินเวอร์เตอร์แบบเรียงกระแสเต็มคลื่น



รูปที่ 2.14 วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อแบบเรียงกระแสเต็มคลื่น

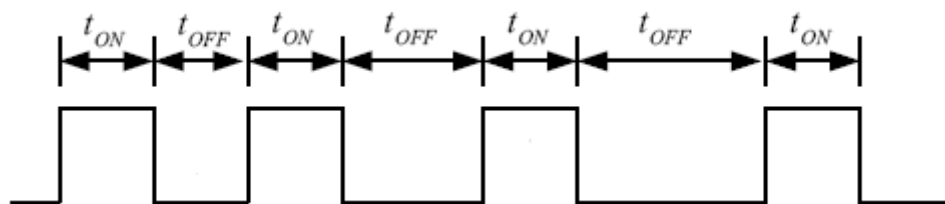
หลักการการทำงานของวงจรสวิตซิ่งนั้น จะเห็นว่า M1 และ M2 จะทำงานพร้อมกันในการทำงานเดียวกันนี้ M3 และ M4 ก็จะทำางานพร้อมกัน ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 4 ตัว

ถ้าสังเกตจากรูปที่ 2.15 แล้วนั้น M1 และ M3 จะทำงานพร้อมกันไม่ได้ ในทำงานองเดียวกัน M2 และ M4 ก็ไม่สามารถที่จะทำงานพร้อมกันได้ เนื่องจากหากคู่ใดคู่หนึ่งเกิดทำงานพร้อมกันขึ้นมา จะเกิดการลัดวงจรขึ้นและส่งผลให้มอสเฟตเกิดความร้อนหรือเสียหายได้ ดังนั้น

การควบคุมการทำงานของมอเตอร์จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยวิธีการควบคุมนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ที่จะกล่าวถึงคือควบคุมโดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation : PWM) วิธีการนี้จะได้ความถี่ที่คงที่ตลอดเวลา แต่จะใช้เวลาปรับช่วงเวลาการทำงานของมอเตอร์ซึ่งในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยจะเขียนโปรแกรมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ส่งคำสั่งไปควบคุมมอเตอร์ผ่านขาเกต



รูปที่ 2.16 การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ด้วยสัญญาณ PWM

จากหลักการการทำงานเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์แบบวงจรถ่ายกระแสเต็มคลื่นนั้นเป็นพื้นฐานในการแปลงกระแสตรงเป็นกระแสสลับ การเลือกมอเตอร์พร้อมทั้งชุดขับมอเตอร์จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการออกแบบระบบโดยรวม

มอเตอร์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจะมีหลายรูปแบบ มีทั้งแบบเดี่ยว อย่างเช่น มอเตอร์ตระกูล IR ซึ่งเป็นที่นิยมแพร่หลายกับการใช้งานในระดับการทดลองเนื่องจากมีราคาค่อนข้างจะประหยัด การที่เราจะเลือกใช้งานมอเตอร์ ตัวใดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยหลักๆแล้วนั้น แรงดันและกระแสจะเป็นตัวเลือกแรกของการกำหนดอุปกรณ์นั้นๆ

2.4.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์

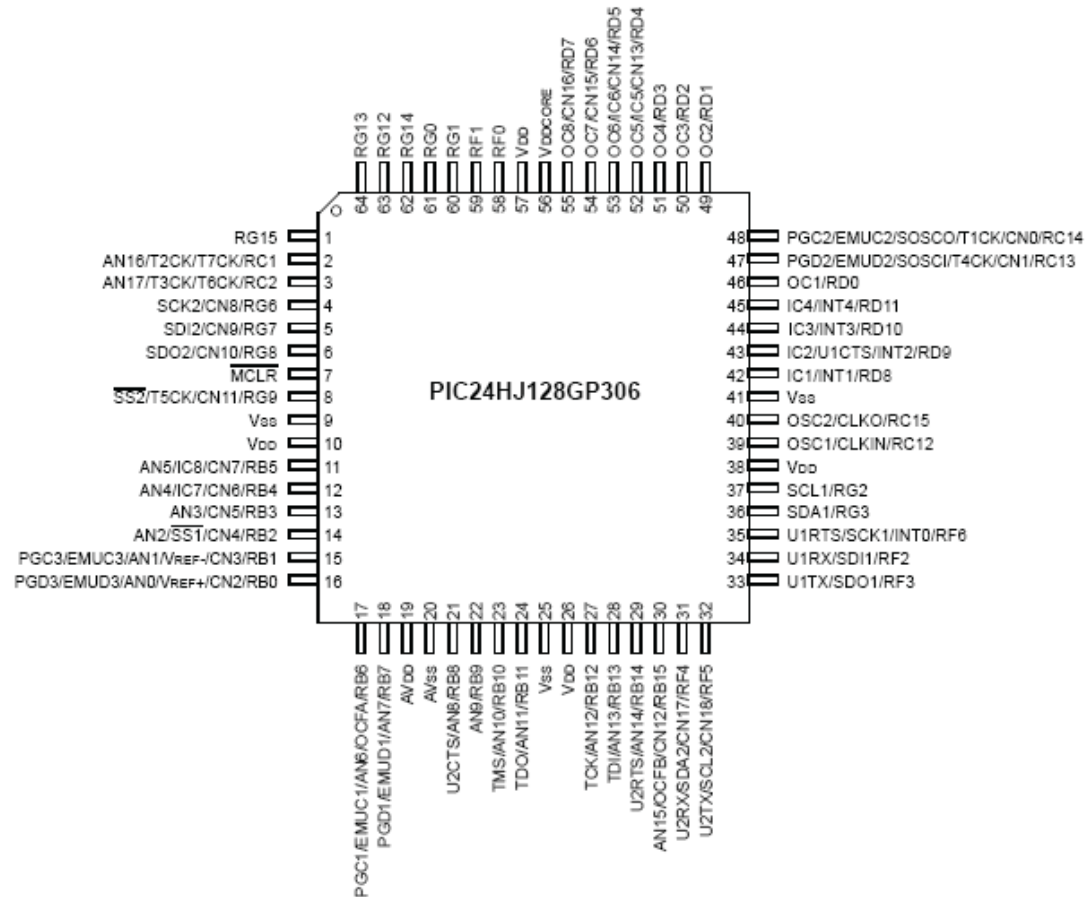
ตัวประมวลผลสัญญาณที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้เป็นเบอร์ PIC24HJ128GP306 เป็น MCU ซึ่งใช้การประมวลผลข้อมูลแบบ 16 บิต จากค่าย Microchips ซึ่งมีจุดเด่นในด้านของความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัล สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่างๆ ซึ่งในปัจจุบัน MCU ในตระกูล PIC24H ของ Microchips นั้นจะมีการผลิตออกมาจำหน่ายให้ผู้ใช้งานได้เลือกใช้งานกันอยู่มากมายหลายเบอร์ตามความเหมาะสมของงาน เช่น PIC24HJ64GP206, PIC24HJ64GP210, PIC24HJ64GP506, PIC24HJ128GP306, PIC24HJ128GP310 เป็นต้น ซึ่งทุกเบอร์จะใช้โครงสร้างและสถาปัตยกรรมการประมวลผลแบบเดียวกันทั้งหมด แต่จะมีความแตกต่างกันในเรื่องของทรัพยากรภายใน เช่น ขนาดของหน่วยความจำใช้งาน จำนวนของพอร์ตขาเข้าและขาออก เป็นต้น ซึ่งอาจมีการบรรจุไว้ในแต่ละ

เบอร์ด้วยจำนวนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงเพียงเฉพาะข้อมูลในส่วนที่เป็นของ PIC24HJ128GP306 เท่านั้น

คุณสมบัติด้านการประมวลผล

ใช้สถาปัตยกรรมแบบ RISC โดยมี 72 คำสั่งมาตรฐาน รองรับการทำงานตำแหน่งแอดเดรสแบบต่างๆได้โดยอิสระ โดยรูปแบบโครงสร้างการจัดผังหน่วยความจำจะดัดแปลงมาจากสถาปัตยกรรมของ “Harvard Architecture”

ชุดคำสั่งใช้การอ้างแอดเดรสแบบ 24 บิต และการอ้างถึงข้อมูลขนาด 16 บิต มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash ขนาด 256 กิโลไบต์ สามารถทำการลบและโปรแกรมซ้ำใหม่ได้กว่า 100,000 ครั้ง พร้อมระบบป้องกันการอ่าน, มีหน่วยความจำ SRAM ขนาด 16 กิโลไบต์, มีรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต ให้ใช้งานจำนวน 16 ชุด สามารถประมวลผลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 40 MIPS (40 ล้านคำสั่งต่อวินาที), รองรับสัญญาณนาฬิกาจากแหล่งกำเนิดภายนอก 0 ถึง 32.768 กิโลเฮิร์ตซ์, รองรับการใช้งานกับแหล่งกำเนิดความถี่แบบ XTAL และรองรับการ Interrupt ได้ถึง 61 แหล่ง พร้อมสัญญาณ Interrupt จากภายนอก 5 แหล่งและสามารถจัดระดับความสำคัญของการ Interrupt ได้ 7 ระดับ



รูปที่ 2.17 PIC24HJ128GP306 (Top view)

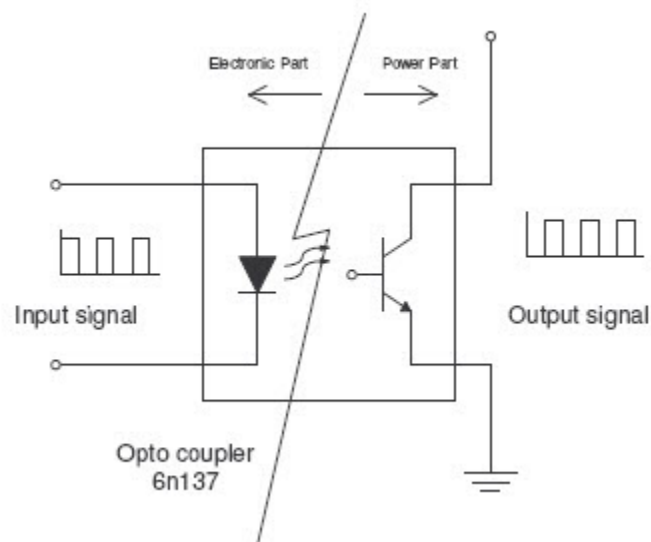
หลักการการทำงานของตัวคอนโทรลเลอร์ รุ่น PIC24HJ128GP306 จะทำการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (pulse width modulation : PWM) โดยทำการตั้งค่าความถี่ในการสวิตชิงสัญญาณ และรับค่าความถี่มูลฐานโดยการปรับที่ตัวต้านทานปรับค่าได้ จากนั้นทำการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog to Digital : ADC) จากนั้นวงจร Timer อ่านค่าสัญญาณความถี่มูลฐานแล้วทำการส่งคำสั่งไปควบคุมขาเกตของวงจรถ่ายสัญญาณให้ทำการแปลงสัญญาณแรงดันจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับตามความถี่ที่เราต้องการ ซึ่งโปรแกรมควบคุมสามารถเขียนผ่านโปรแกรมภาษาซี หรือโปรแกรม Visual development โดยสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ได้จะถูกส่งไปที่ชุดขับมอสเฟตก่อน เพื่อทำการแยกเป็นสัญญาณด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ เพื่อนำไปขับขาเกตของมอสเฟตในอินเวอร์เตอร์ ซึ่งต่อกันแบบวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น

2.4.4 วงจรชุดขับมอเตอร์

สามารถแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 ส่วน

2.4.4.1 ตัวแยกทางไฟฟ้า

การแยกกันทางไฟฟ้า มีความจำเป็นมากสำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง เนื่องจากการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างด้านกำลังและด้านอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว เป็นการป้องกันการลัดวงจรซึ่งกันและกัน หรือเรียกง่าย ๆ ว่าเป็นระบบป้องกันอย่างหนึ่งในการขับมอเตอร์ โดยทั่วไปนิยมใช้ Opto-Coupler เบอร์ 6N137 เป็นตัวแยกทางไฟฟ้า การทำงานของ Opto-Coupler นั้นจะทำงานด้วยแสง กล่าวคือถ้ามีสัญญาณทางด้านแรงดันขาเข้า แล้วนั้นจะเกิดแสงไปปิดวงจรอีกฝั่ง ดังนั้น วงจรอีกฝั่งจึงต้องมีแรงดันหรือไฟเลี้ยงเสมอ อธิบายได้ดังรูปที่ 2.18

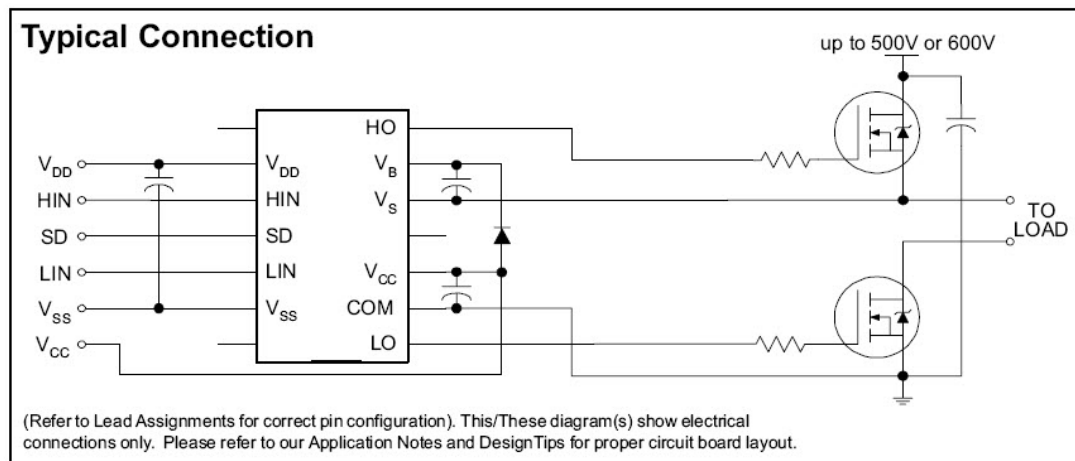


รูปที่ 2.18 ตัวแยกทางไฟฟ้าแบบ Opto-Coupler

2.4.4.2 ตัวขับมอเตอร์

ส่วนนี้จะมีหน้าที่ในการขับมอเตอร์ซึ่งจะมีสัญญาณขับชุดล่างและบน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงตัวขับมอเตอร์ 2 แบบคือ IR2110 และ PC923 โดยที่การขับมอเตอร์นั้น เราจะต้องให้ความสนใจทั้งระดับแรงดันและกระแสที่เหมาะสมกับมอเตอร์ชนิดนั้นๆ สำหรับการขับมอเตอร์โดยใช้ IR2110 นั้น สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM : Pulse Width Modulation) จะถูกต่อเข้ากับ IR2110 โดยที่ IR2110 1 ตัว สามารถที่จะขับมอเตอร์ได้ 2 ตัวในรูปแบบของสัญญาณขาออกด้านสูงกับสัญญาณขาออกด้านต่ำ ความหมายก็คือ ในการต่ออินเวอร์เตอร์แบบวงจรวอร์มกระแสเต็มคลื่นจะใช้งาน IR2110 2 ตัว

กล่าวคือ IR2110 ตัวที่ 1 จะต่อสัญญาณขาออกด้านสูงเข้ากับขาเกตของมอสเฟตตัวที่ 1 สัญญาณขาออกด้านต่ำจะต่อเข้ากับมอสเฟตตัวที่ 3 โดยที่สัญญาณขาออกด้านต่ำมักจะต่อขาซอร์สของมอสเฟตตัวนั้นกับสายดินเสมอ ส่วน สัญญาณขาออกด้านสูงจะมีลักษณะสายดินลอย การทำงานของชุดขับตัวที่ 2 จะทำงานในลักษณะที่เหมือนกับตัวที่หนึ่ง กล่าวคือ การทำงานของชุดขับตัวที่ 2 สัญญาณขาออกด้านสูงจะต่อเข้ากับมอสเฟตตัวที่ 4 และสัญญาณขาออกด้านต่ำจะต่อกับมอสเฟตตัวที่ 2 ซึ่งขาซอร์สของมอสเฟตตัวที่ 2 จะต่อกับสายดินเสมอตามที่กล่าวข้างต้น



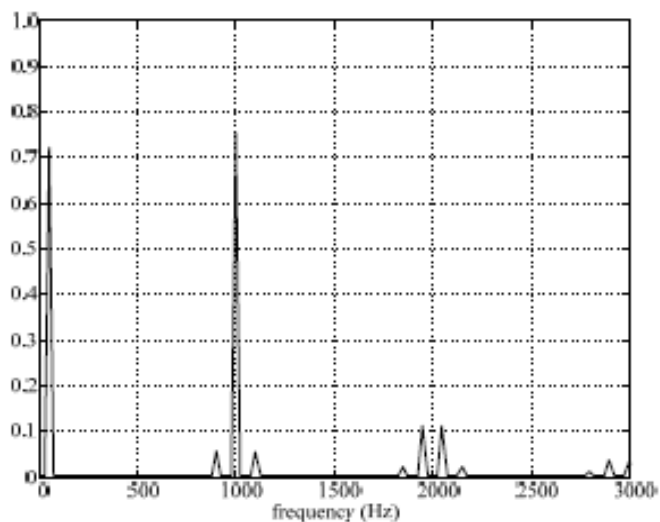
รูปที่ 2.19 ตัวขับมอสเฟต IR2110

ส่วนการขับมอสเฟตโดยใช้ PC923 นั้นจะแตกต่างจาก IR2110 ตรงที่ PC923 1 ตัวสามารถขับมอสเฟตได้เพียงตัวเดียวดังนั้นในวงจรมอสเฟตที่ต่อแบบเรียงกระแสเต็มคลื่นนั้นจำเป็นต้องใช้ PC923 ในการขับมอสเฟตจำนวน 4 ตัว และต้องจ่ายไฟเลี้ยงแยกสำหรับ PC923 แต่สามารถใช้ไฟเลี้ยงรวมได้เลยสำหรับ IR2110

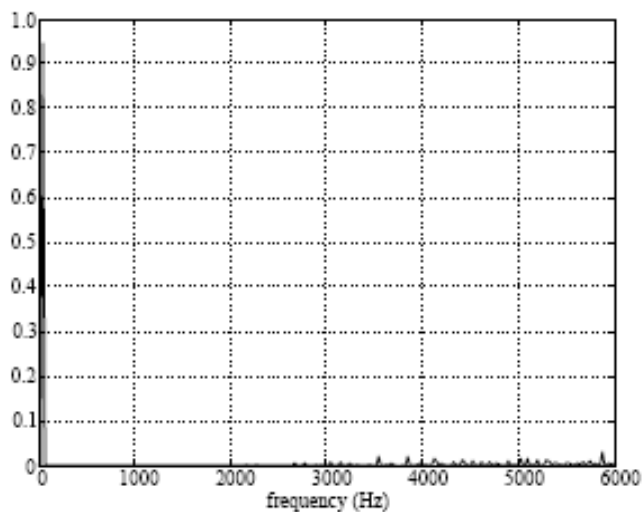
2.4.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) แบบ LC ต่ออนุกรม

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านใช้ในการกรองความถี่สูงที่ปนอยู่กับสัญญาณขาออก เพื่อให้ได้สัญญาณขาออกรูปไซน์ที่มีความถี่มูลฐานที่เราต้องการ ซึ่งวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่จะกล่าวถึงนี้เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านลำดับที่ 1 (1st order) โดยส่วนประกอบของวงจรจะเป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ต่อกันแบบอนุกรม การคำนวณค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุนั้น ควรจะคำนวณให้ได้ค่าที่เกิดเรโซแนนซ์กับความถี่ในการสวิตชิง โดยคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ได้จากสมการที่ (2.3) เนื่องจากวิธีการกรองแบบเรโซแนนซ์นั้นจะลดกำลังไฟสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในการสวิตชิง ทำให้การกรองความถี่สูงหรือฮาร์มอนิกที่ปนมากับสัญญาณขาออกทำได้ง่ายขึ้น และไม่จำเป็นต้องใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบลำดับที่ 2

รูปที่ 2.20 และ 2.21 จะแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันกับความถี่ที่เกิดจากการสวิตชิงที่ความถี่สวิตชิง 1 กิโลเฮิร์ตซ์และสวิตชิงที่ความถี่เรโซแนนซ์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการสวิตชิงที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์จะเกิดฮาร์มอนิกสูงซึ่งต่างจากการสวิตชิงที่ความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งเกิดฮาร์มอนิกน้อยกว่ามาก



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ที่ความถี่สวิตชิง 1 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ที่ความถี่สวิตชิงเรโซแนนซ์

บทที่ 3

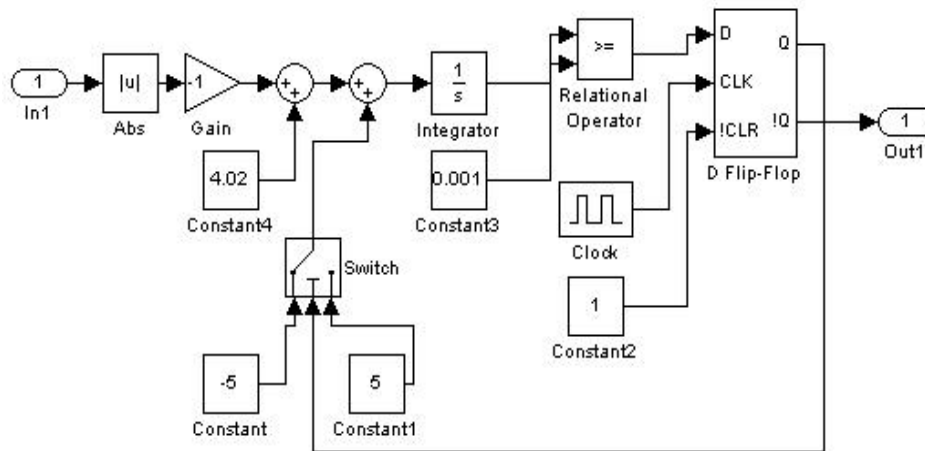
การจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมความถี่ได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB

ในการจำลองการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับนี้ ใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองผลการทำงาน เพื่อศึกษาหลักการของวงจรสวิตชิงและศึกษาการควบคุมความถี่ของแรงดันกระแสสลับขาออก โดยกำหนดให้ค่าแรงดันกระแสตรงขาเข้าเป็น 24 โวลต์ โดยมีส่วนประกอบต่างๆของวงจรมีดังนี้

3.1 แบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันเป็นความถี่

ในการจำลองวงจรแปลงผันแรงดันเป็นความถี่ เลือกใช้ความถี่สวิตชิงที่สูงเพื่อลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ แบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันเป็นความถี่นี้แสดงในรูปที่

3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองวงจรแปลงผันแรงดันเป็นความถี่

เราสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ โดยวงจรมีเลือกใช้ความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ ในการสวิตชิง มีช่วงเวลาในการนำกระแสที่คงที่ 5 ไมโครวินาที ค่าความถี่นี้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$f_o = \frac{f_{CLK}}{2} \left[\frac{V_i - V_x}{V_r} + 1 \right] \quad (3.1)$$

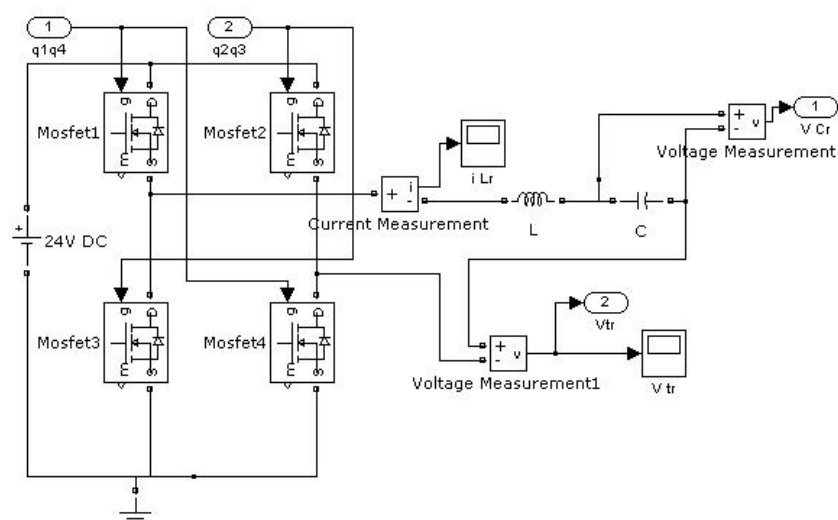
$$f_o = \frac{1000000}{2 \times 5} \left[\frac{4 - 4.02}{5} + 1 \right] = 99.6 \text{ กิโลเฮิรตซ์}$$

โดย $V_x \geq V_{i(\max)} + 0.02$ เมื่อ V_i คือแรงดันขาเข้า, $V_{i(\max)}$ คือแรงดันขาเข้าสูงสุด, V_r คือแรงดันอ้างอิง และ f_{CLK} คือความถี่ของสัญญาณนาฬิกา

ในการจำลองนี้ กำหนดให้ V_i คือสัญญาณรูปไซน์ มีค่าแรงดันสูงสุด $V_{i(\max)} = 4$ โวลต์ ดังนั้นจะได้ $V_x = 4.02$ โวลต์ และกำหนดให้แรงดันอ้างอิง $V_r = 5$ โวลต์ และตั้งค่าคาบของสัญญาณนาฬิกา = 5 ไมโครวินาที

3.2 แบบจำลองของวงจรฟูลบริดจ์ต่อโหลดแบบอนุกรม

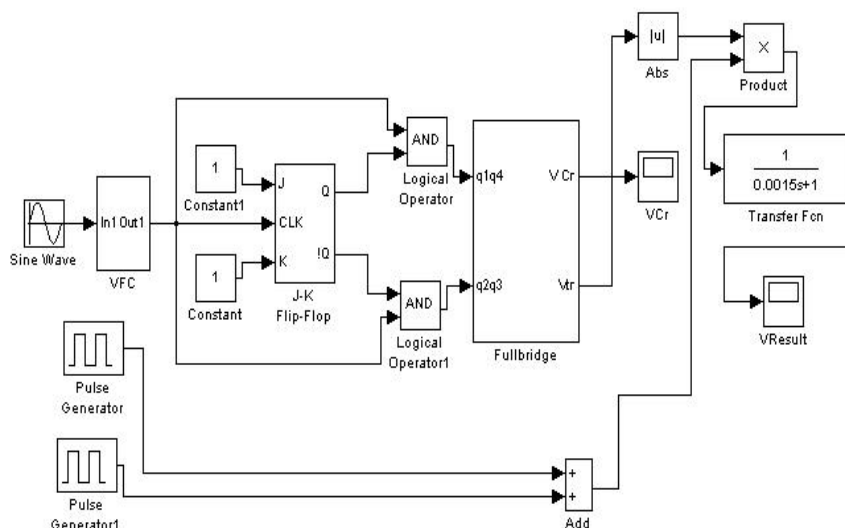
บล็อกต่างๆของวงจรฟูลบริดจ์นี้ นำมาจากเครื่องมือ SIMULINK ในโปรแกรม MATLAB นำมาต่อดังรูปที่ 3.2 โดยกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้ $C_r = 1$ ไมโครฟารัด, $L_r = 1.126$ ไมโครเฮนรี่



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของวงจรฟูลบริดจ์ต่อโหลดแบบอนุกรม

3.3 แบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถนำมาสร้างบล็อกการจำลองได้ดังรูปที่ 3.3 โดยนำแบบจำลองของวงจรแปลงผันแรงดันเป็นความถี่ในรูปที่ 3.1 ทำเป็น Subsystem สร้างเป็นบล็อกชื่อ VFC และแบบจำลองของวงจรฟูลบริดจ์ต่อโหลดแบบอนุกรมในรูปที่ 3.2 ทำ Subsystem สร้างเป็นบล็อกชื่อ Fullbridge



รูปที่ 3.3 แบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ในรูปที่ 3.3 เราได้จำลองวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มาจากแรงดันขาเข้ากระแสตรง 24 โวลต์ โดยกำหนดให้บล็อก Sine Wave จ่ายสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่มูลฐาน 50 เฮิรตซ์ ซึ่งจะเป็นความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และบล็อก Pulse Generator ทั้งสองตัวทำหน้าที่กลับรูปสัญญาณที่ได้หลังจากผ่านวงจรฟูลบริดจ์ทุกๆ 0.01 วินาที โดยทั้งสองตัวทำงานสลับกัน โดยตัวที่ 1 ทำการกลับรูปสัญญาณในด้านแรงดันบวกและตัวที่ 2 ทำการกลับรูปสัญญาณในด้านแรงดันลบ

ในตอนท้ายของผลการทดลองได้มีการแสดงผลการจำลองวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่มูลฐาน 10 เฮิรตซ์ และ 100 เฮิรตซ์ ด้วย เพื่อศึกษาว่าวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับนี้สามารถควบคุมความถี่ของสัญญาณขาออกได้

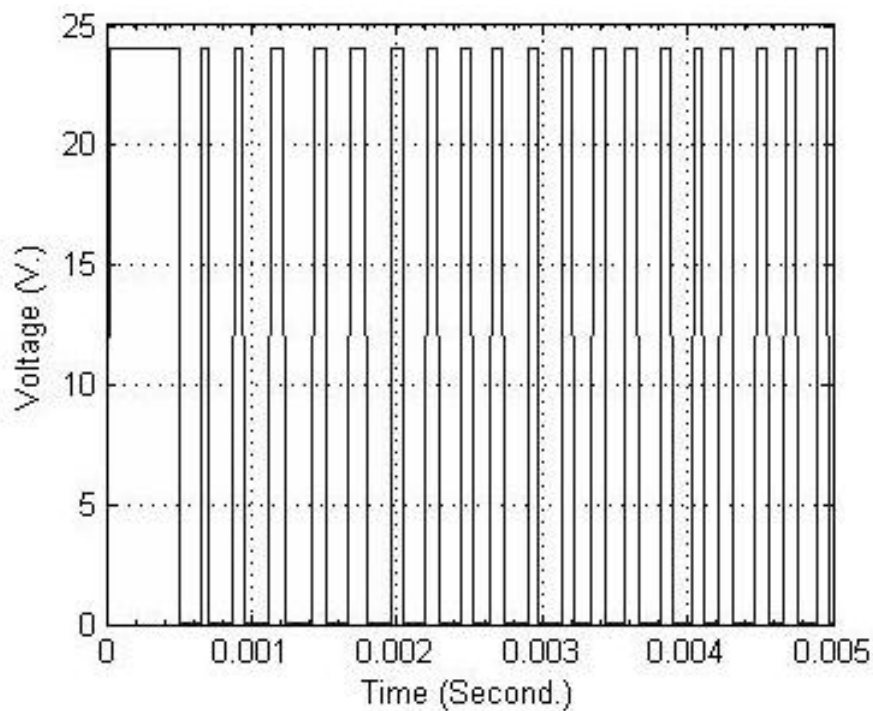
3.4 ผลการจำลองวงจรโดยโปรแกรม MATLAB

ผลการจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ โดยจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้ผลของสัญญาณดังรูปที่ 3.4 – 3.6

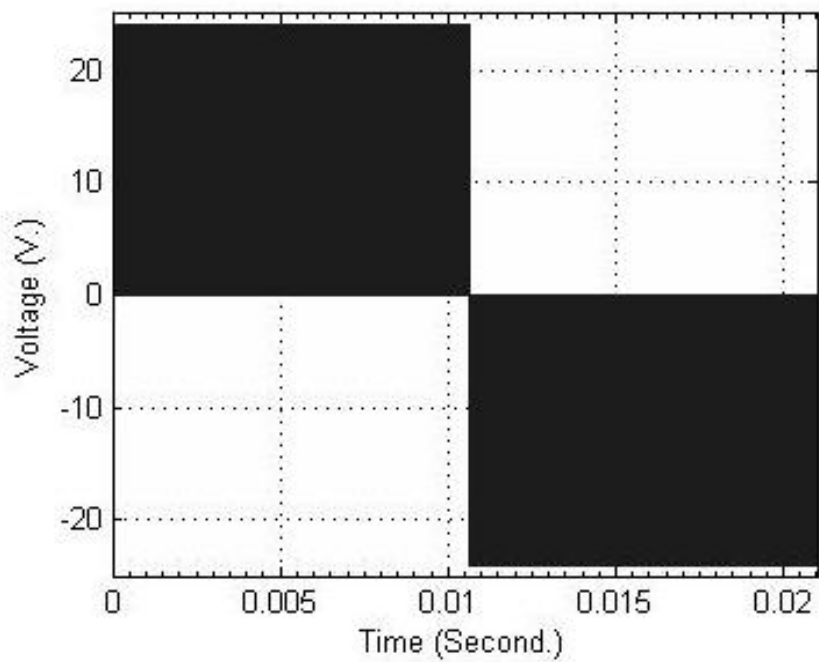
รูปที่ 3.4 เป็นผลการจำลองสัญญาณเมื่อผ่านวงจรฟูลบริดจ์และหม้อแปลงแปลงแรงดันขึ้น ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (V_r) กับเวลา (Time) โดยแรงดันสูงสุดมีค่าประมาณ 24 โวลต์ หลังจากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวผ่านเข้าสู่วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (บล็อก Abs) จะได้กราฟแรงดันเทียบกับเวลาอยู่ในชื่อกบวทั้งหมด จากนั้นแรงดันนี้จะถูกกลับรูปสัญญาณโดยวงจรกลับรูปสัญญาณ(บล็อก Pulse Generator) ซึ่งถูกกำหนดให้กลับรูปสัญญาณทุกๆ 0.01 วินาที เพื่อให้ได้แรงดันขาออกที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ ตามที่ต้องการ แต่แรงดันขาออกนี้ยังมีความถี่สูงปน

อยู่ดังรูปที่ 3.5 จึงต้องนำแรงดันขาออกนี้ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) ซึ่งมีฟังก์ชันคือ $\frac{1}{0.0015s+1}$ จะได้สัญญาณขาออกเป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 3.6ก

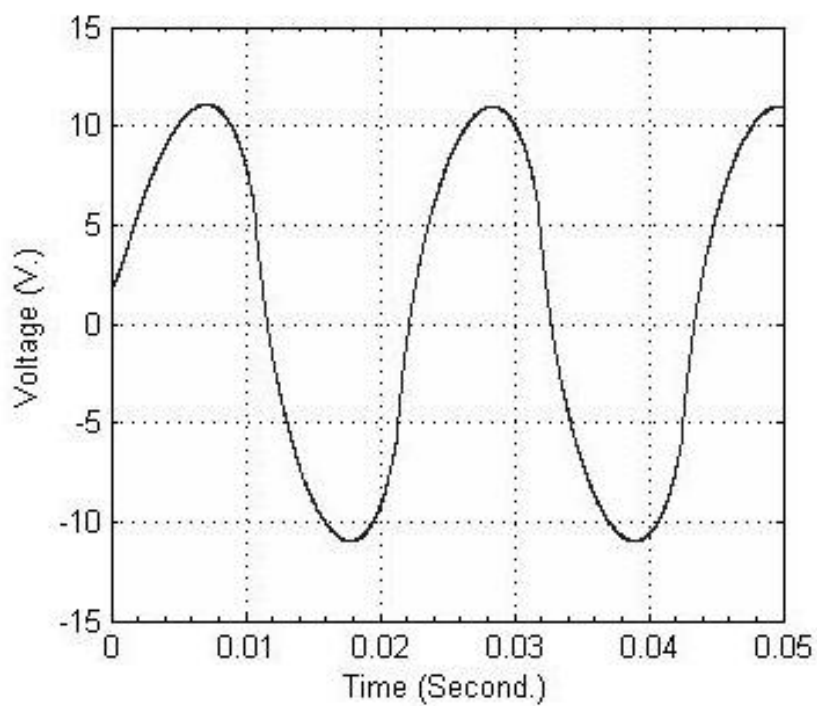
รูปที่ 3.6ข และ 3.6ค เป็นการจำลองสัญญาณขาออกที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ และ 100 เฮิรตซ์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นการศึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมความถี่มูลฐาน เพื่อให้แรงดันกระแสสลับขาออกที่ได้สามารถควบคุมความถี่ได้ ทำได้โดยการปรับค่าความถี่มูลฐานของแหล่งกำเนิดสัญญาณไซน์ (บล็อก Sine Wave) และทำการปรับช่วงเวลากลับรูปสัญญาณของวงจรกลับรูปสัญญาณให้เป็นตามค่าที่เราต้องการ (บล็อก Pulse Generator) โดยสำหรับความถี่ 10 เฮิรตซ์ และ 100 เฮิรตซ์ จะกลับรูปสัญญาณทุกๆ 0.05 วินาที และ 0.005 วินาที ตามลำดับ



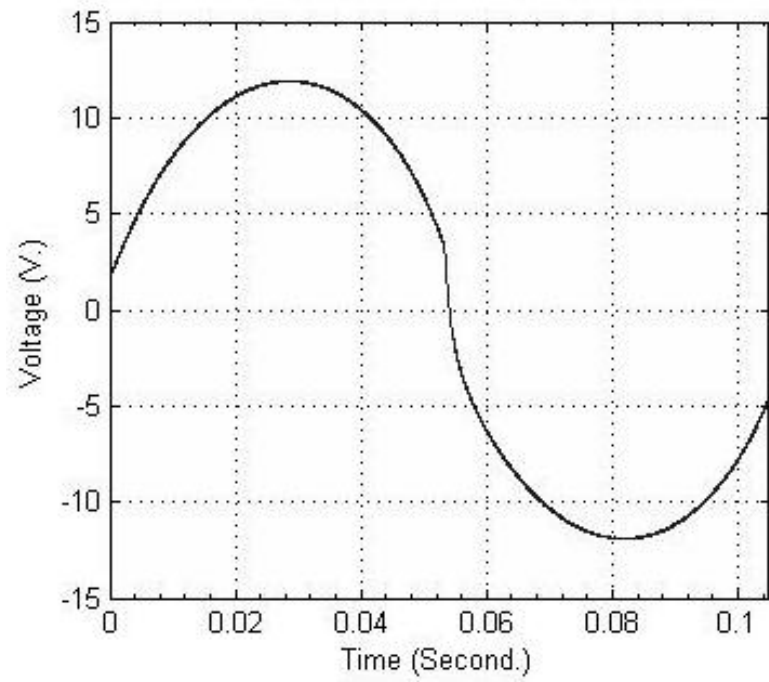
รูปที่ 3.4 สัญญาณของวงจรพูลบริดจ์ที่ผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น



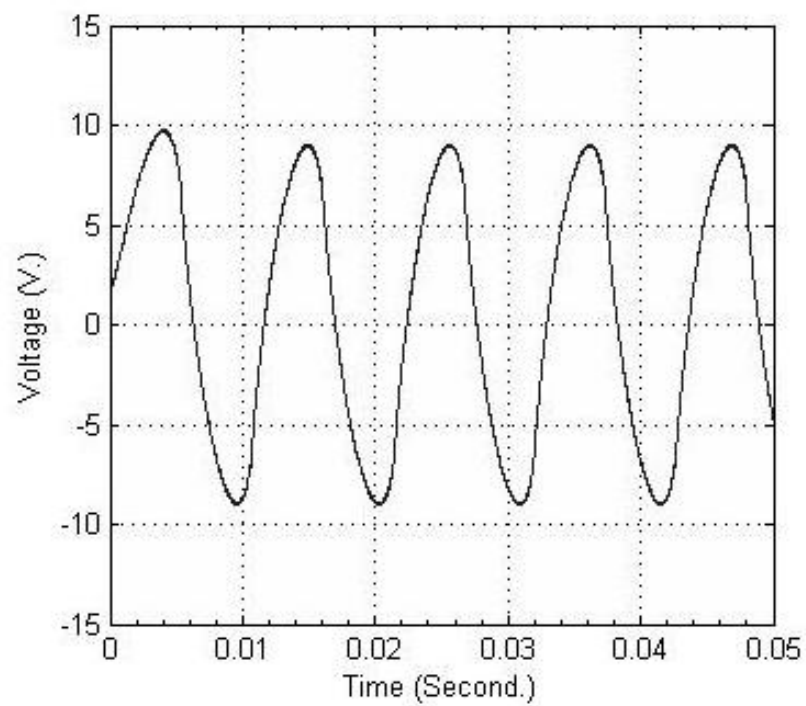
รูปที่ 3.5 สัญญาณของวงจรฟูลบริดจ์ที่ผ่านการกลับเฟส



ก) ความถี่ = 50 เฮิรตซ์



ข) ความถี่ = 10 เฮิรตซ์



ค) ความถี่ = 100 เฮิรตซ์

รูปที่ 3.6 สัญญาณขาออกที่ความถี่ ก) 50 เฮิรตซ์ ข) 10 เฮิรตซ์ ค) 100 เฮิรตซ์



รูปที่ 3.7 หม้อแปลงเรโซแนนซ์

รูปที่ 3.7 เป็นรูปของหม้อแปลงเรโซแนนซ์ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 220V/50kV เมื่อเรานำหลักการจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับข้างต้นนี้ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างชุดทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าพลังงาน เราจะได้ชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมความถี่ได้ ซึ่งแรงดันขาออกที่ได้จะอยู่ในย่านแรงดันต่ำ ซึ่งเมื่อนำแรงดันขาออกนี้ต่อผ่านหม้อแปลงเรโซแนนซ์ แรงดันจากหม้อแปลงเรโซแนนซ์ด้านทุติยภูมิที่ได้จะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่อยู่ในย่านแรงดันสูง ซึ่งสามารถนำแรงดันนี้ไปใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงพลังงานได้ต่อไป

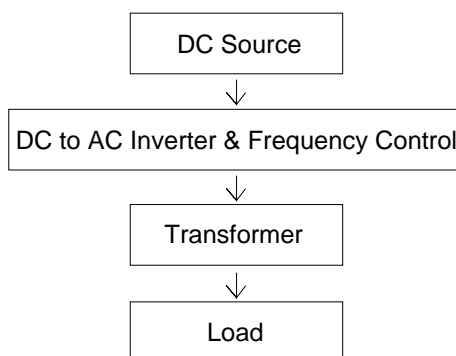
บทที่ 4

การออกแบบและสร้างแบบจำลอง

การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่สามารถควบคุมความถี่ได้นั้น การศึกษาทฤษฎีและการทำงานของระบบสามารถศึกษาจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรม MATLAB ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 แต่ในการศึกษาผลการทดลองในสถานะจริง จำเป็นที่จะต้องศึกษาจากการสร้างแบบจำลองของชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากระบบการทำงานต่างๆภายในชุดอุปกรณ์จริงนั้นสามารถเกิดความผิดพลาดหรือเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีได้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆมากมาย และยังเป็นการพิสูจน์ทฤษฎีการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้ ที่เราได้ศึกษามาด้วยว่าเมื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลองจริงแล้ว จะสามารถทำงานได้ถูกต้องตามทฤษฎีหรือไม่ ซึ่งส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้ สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- ชุดวงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ
- ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์
- ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์
- ชุดวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)

ภาพรวมระบบการทำงานของชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่สามารถควบคุมความถี่ได้ แสดงดังในรูป 4.1



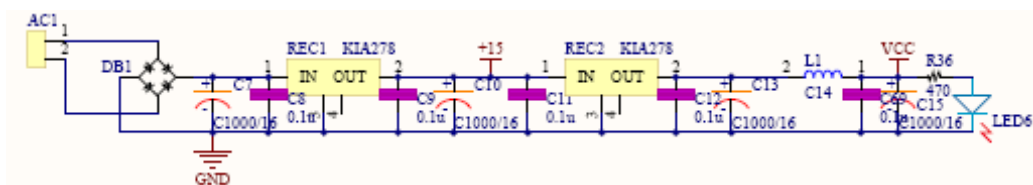
รูปที่ 4.1 หลักการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมความถี่ได้

4.1 ชุดวงจรภาคแหล่งจ่ายไฟ

วงจรมอดูลแหล่งจ่ายไฟจะรวมถึงวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อผลิตแรงดันเพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวกไอซีต่างๆ และวงจรที่ใช้ในการแปลงสัญญาณแรงดันจากไฟฟ้าบ้าน 220 โวลต์ เพื่อมาใช้เป็นแรงดันกระแสตรงขาเข้าของวงจร ซึ่งมีส่วนประกอบในแต่ละวงจรมอดูลดังนี้

4.1.1 แหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ และ 5 โวลต์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

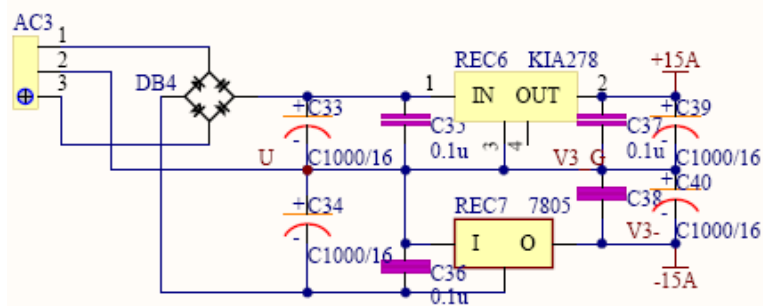
แรงดัน ± 15 โวลต์ จะเป็นไฟเลี้ยงให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC24HJ128GP306 ส่วนแรงดัน 5 โวลต์ เป็นแหล่งจ่ายสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวอื่นๆ เช่น ไอซี Max-232, ทีทีแอลเบอร์ 7404 เป็นต้น รูปที่ 4.2 แสดงวงจรมอดูลแหล่งจ่ายไฟ



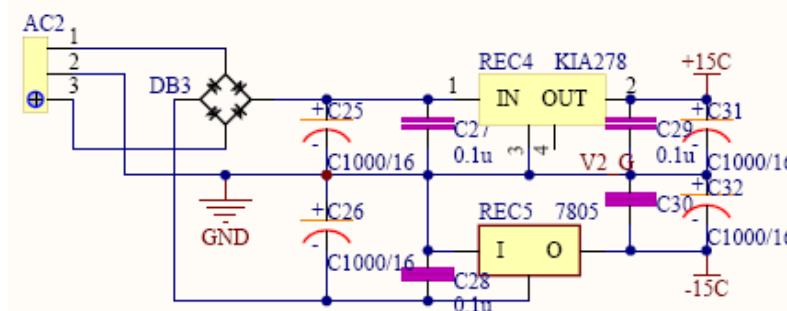
รูปที่ 4.2 วงจรแหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ และ 5 โวลต์สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

4.1.2 แหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ สำหรับวงจรขับนำเกต

สำหรับวงจรขับนำเกตในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ตัว PC923LONSOZ0F ซึ่งเป็นตัวขับเกตแบบ Photocoupler ซึ่งมีข้อดีกว่าตัวขับเกตแบบ IR2110 ที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ สามารถทนแรงดันไฟเลี้ยง (Vcc) ได้ตั้งแต่ 15 ถึง 30 โวลต์, มีช่วงเวลาในการตอบสนองที่เร็ว (0.5 ไมโครวินาที), มีการแยกกันระหว่างด้านขาเข้าและขาออกทำให้ป้องกันการลัดวงจรของระบบได้ โดยในการขับมอสเฟตของวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นจะต้องใช้ PC923 ในการขับมอสเฟตทั้งหมด 4 ตัวและการสร้างวงจรมอดูลแหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ ให้กับ PC923 จะต้องแยกเป็นแหล่งจ่ายไฟสำหรับด้านสูงและแหล่งจ่ายไฟสำหรับด้านต่ำ โดยด้านสัญญาณสูงนั้นมีการต่อวงจรมอดูลรูปที่ 4.3 และด้านสัญญาณต่ำมีการต่อวงจรมอดูลรูปที่ 4.4



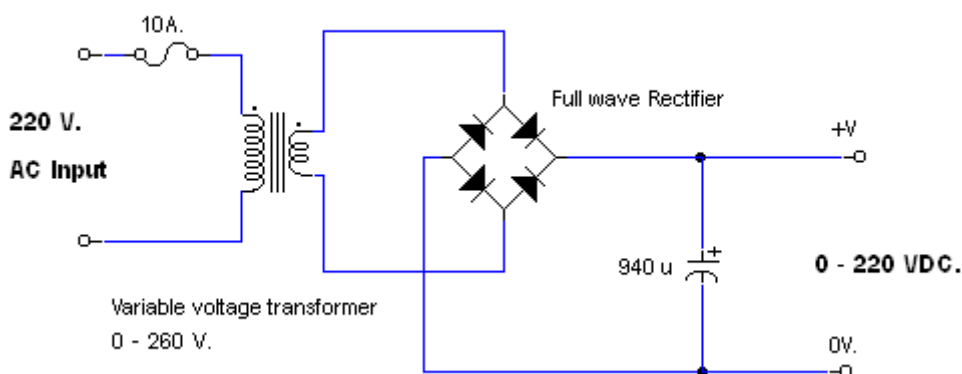
รูปที่ 4.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟ ± 15 โวลต์ สำหรับ PC923 ด้านสัญญาณสูง



รูปที่ 4.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟ ±15 โวลต์ สำหรับ PC923 ด้านสัญญาณต่ำ

4.1.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ 0-220 โวลต์

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนี้จะใช้เป็นแรงดันขาเข้าให้กับชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้ โดยใช้แรงดันไฟบ้าน 220 โวลต์ต่อผ่านหม้อแปลงควบคุมแรงดันแล้วต่อเข้ากับวงจรแปลงจากแรงดันกระแสสลับให้เป็นแรงดันกระแสตรง (Rectifier) โดยสามารถควบคุมแรงดันขาเข้าได้จากการปรับค่าของหม้อแปลงควบคุมแรงดัน โดยพิกัดของหม้อแปลงควบคุมแรงดันที่ใช้คือ 1 กิโลโวลต์แอมแปร์ แรงดันขาเข้า 220 โวลต์ แรงดันขาออก 0 ถึง 260 โวลต์ โดยรูปแบบการต่อวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้

ตัวเก็บประจุในวงจรมีหน้าที่กรองกระแสให้เรียบ ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 470 ไมโครฟารัด 2 ตัวต่อขนานกัน และตัวเก็บประจุสามารถทนแรงดันได้สูงสุด 450 โวลต์ เราสามารถควบคุมแรงดันให้อยู่ในย่านที่เราต้องการได้โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง V_{rms} และ V_{max}

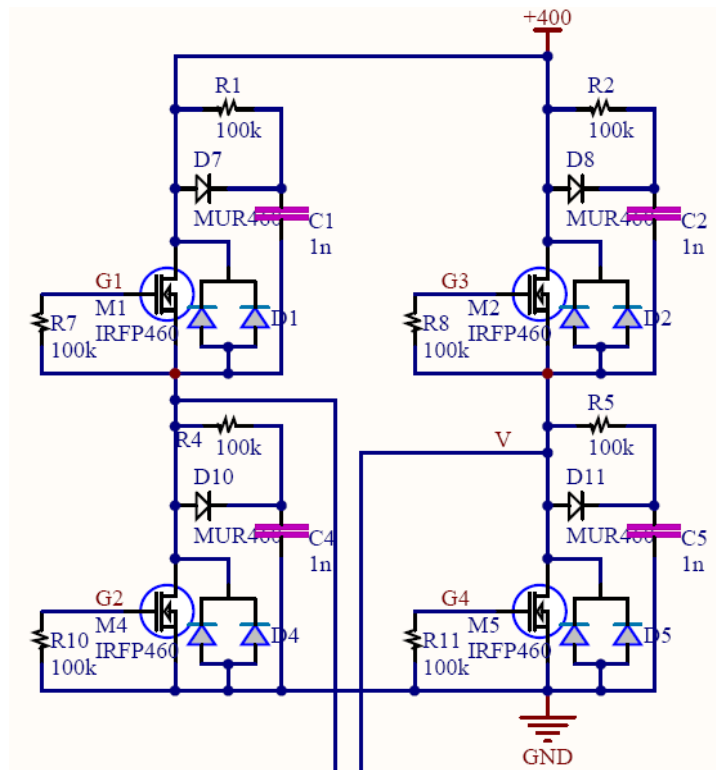
$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \tag{4.1}$$

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของแรงดันกระแสตรงขาเข้าที่ได้จากไฟบ้าน 220 โวลต์ส่งเข้าหม้อแปลงควบคุมแรงดันและผ่านวงจรแปลงแรงดันจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง

V_{rms} (โวลต์)	V_{max} (โวลต์)	V_{rms} (โวลต์)	V_{max} (โวลต์)
20	28.28	140	197.96
40	56.56	160	226.24
60	84.84	180	254.52
80	113.12	200	282.8
100	141.4	220	311.08
120	169.68		

4.2 ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์

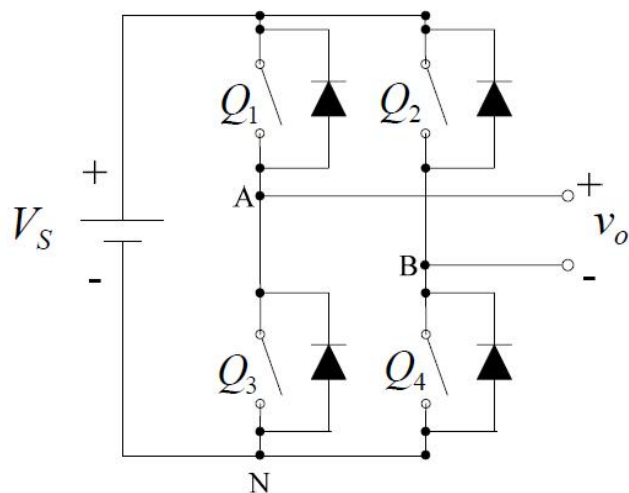
ในการสร้างแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้นั้น วงจรอินเวอร์เตอร์ถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากส่วนหนึ่ง หน้าที่ของชุดวงจรอินเวอร์เตอร์จะเป็นตัวที่รับสัญญาณแรงดันกระแสตรงขาเข้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้แรงดันกระแสตรงขาเข้าจะอยู่ระหว่าง 0 - 220 โวลต์ และทำการแปลงให้เป็นสัญญาณแรงดันกระแสสลับขาออก โดยการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นใช้การต่อวงจรแบบเรียงกระแสเต็มคลื่น โดยใช้มอสเฟตรุ่น IRFP460 ซึ่งสามารถทนแรงดันได้สูงสุด 500 โวลต์และทนกระแสสูงสุดได้ 20 แอมแปร์ มีเวลาในการทำงานที่เร็วและมีไดโอดชนิดไฮเปอร์ฟาสต์ไดโอด (Hyperfast diode) อยู่ในตัว



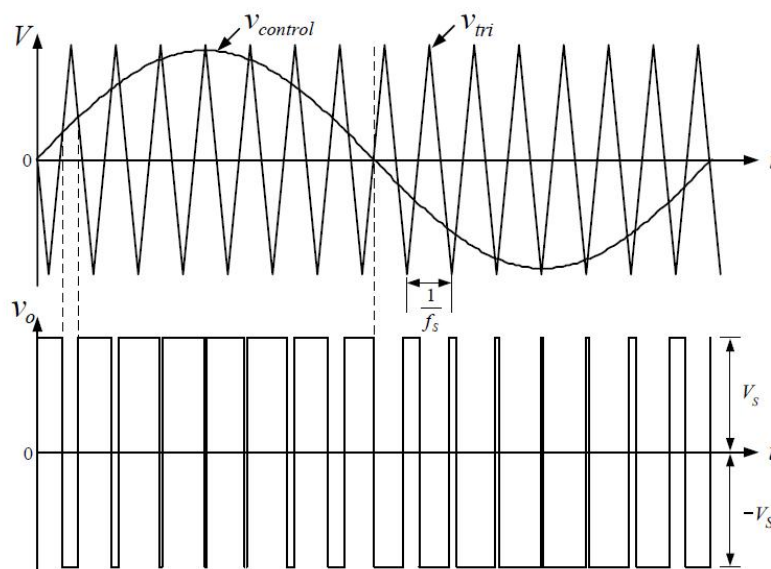
รูปที่ 4.6 ไคอะแกรมการต่อมอเตอร์แบบเรียงกระแสเต็มคลื่น

ในการควบคุมวงจรถานอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ทำการสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ใช้วิธีการควบคุมการสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM : Pulse Width Modulation) โดยใช้วิธีการสร้างสัญญาณควบคุมรูปไซน์ ($V_{control}$) นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม (V_{tri})

การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็มแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบไบโพลาร์ และแบบยูนิโพลาร์ ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์คือการควบคุมให้สวิตช์แบบฟูลบริดจ์ทำงานพร้อมกันเป็นคู่ดังรูปที่ 4.7 สวิตช์ Q1 ทำงานร่วมกับ Q4 และสวิตช์ Q2 ทำงานร่วมกับ Q3 เมื่อสัญญาณควบคุมรูปไซน์มีค่ามากกว่าสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม สวิตช์ Q1 และ Q4 จะนำกระแส ขนาดแรงดันขาออก (V_o) มีค่าเท่ากับ V_s แต่ถ้าสัญญาณควบคุมรูปไซน์มีค่าน้อยกว่าสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม สวิตช์ Q2 และ Q3 จะนำกระแส ขนาดแรงดันขาออก (V_o) มีค่าเท่ากับ $-V_s$ ภาพการสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 วงจรสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์

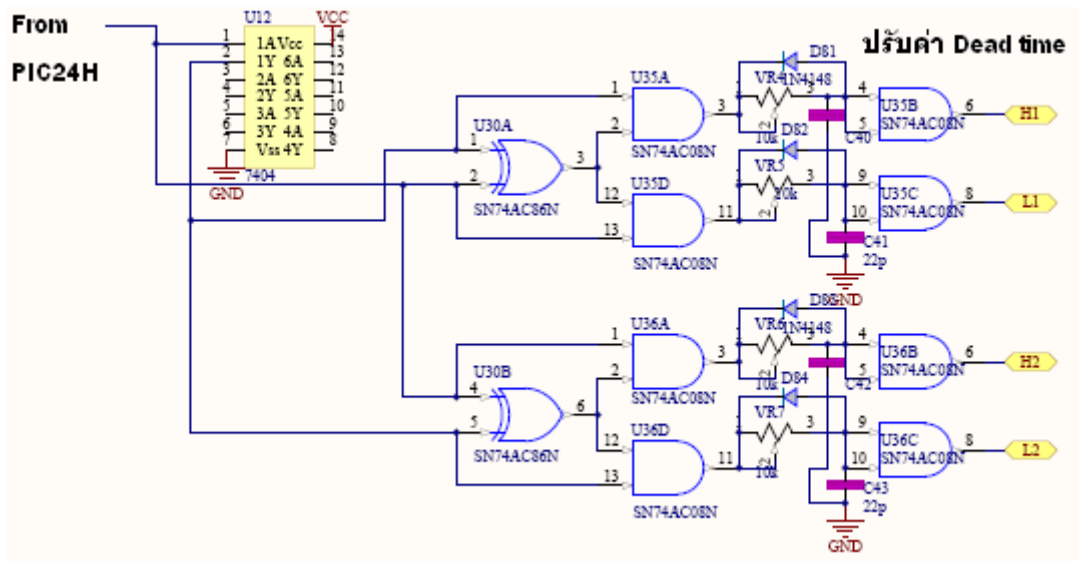


รูปที่ 4.8 การสวิตชิงแรงดันแบบไบโพลาร์

ในการควบคุมการทำงานของชุดวงจรอินเวอร์เตอร์นั้น จำเป็นที่จะต้องใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสั่งการควบคุม โดยการเขียนโปรแกรมสั่งการลงในไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้โปรแกรมภาษาซี โดยรายละเอียดต่างๆของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เราใช้ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อ 4.3

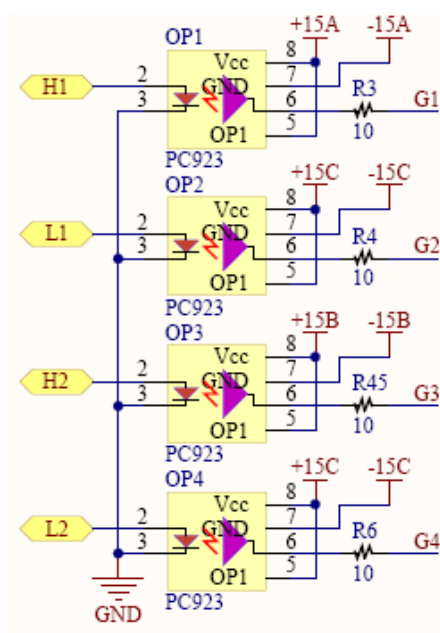
สัญญาณที่ส่งมาขาขาเกตของมอสเฟตนั้นจะอยู่ในรูปของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งไม่สามารถส่งเข้าไปขาเกตของมอสเฟตได้โดยตรง ต้องผ่านชุดขับมอสเฟต ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เรา

ใช้วงจร Dead time ในการกำหนดเวลาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์และแยกสัญญาณออกเป็นสัญญาณด้านสูงและสัญญาณด้านต่ำ วงจร Dead time แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 วงจร Dead time

หลังจากทำการแยกสัญญาณออกเป็นด้านสูงและด้านต่ำแล้ว จะทำการส่งสัญญาณนี้ไปขับขาเกตของมอสเฟตโดยผ่านไอซี PC923L0NSZ0F ซึ่งใช้ทั้งหมด 4 ตัวในการขับมอสเฟตของวงจรอินเวอร์เตอร์ การต่อวงจรขับเกตโดยใช้ไอซี PC923L0NSZ0F แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 วงจรขับเกตโดยไอซี PC923L0NSZ0F

4.3 ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้คอนโทรลเลอร์แบบ PIC ของบริษัทไมโครชิพ เบอร์ PIC24HJ128GP306 เนื่องจากสามารถรองรับการใช้งานได้หลายคำสั่ง ได้แก่

- สามารถสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของขาเกตของมอสเฟตในวงจรอินเวอร์เตอร์
- สามารถควบคุมความถี่มูลฐานได้จากการปรับค่าความต้านทานในวงจร ซึ่งขนาดและความถี่ของสัญญาณต้องมีความแม่นยำสูงเพราะความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) นี้จะเป็นความถี่ของสัญญาณแรงดันกระแสสลับขาออก โดยความสัมพันธ์ระหว่างความถี่มูลฐานกับตัวต้านทานปรับค่าได้ในวงจรแสดงดังสมการที่ 4.2

$$f = \frac{1}{2\pi(Ra + Rb)C} \quad (4.2)$$

เลือก $C = 0.01$ ไมโครฟารัด $Rb = 5$ กิโลโอห์มและปรับค่า Ra ให้ได้ความถี่ของแรงดันกระแสสลับขาออกตั้งแต่ 10 ถึง 500 เฮิร์ตซ์

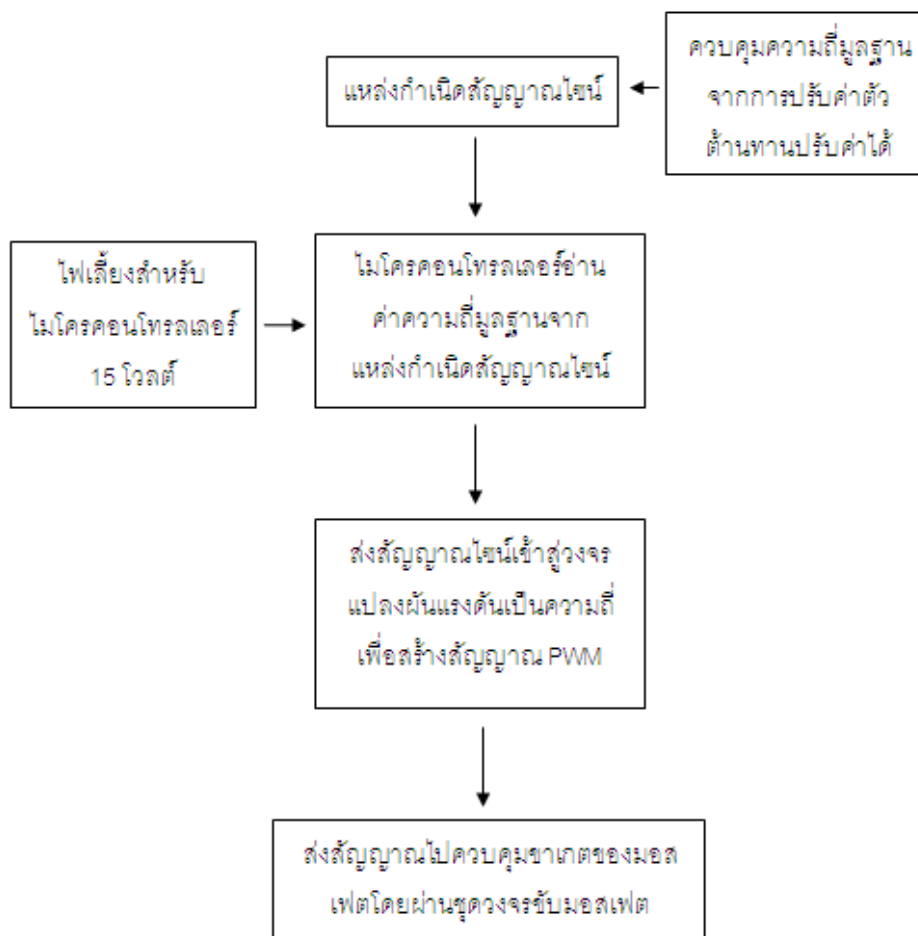
4.3.1 การตั้งค่าต่างๆของไมโครคอนโทรลเลอร์

การกำหนดค่าต่างๆให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์มีความสำคัญมาก เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำงานได้ตามคำสั่งและได้ผลลัพธ์ตามเป้าหมายที่ต้องการ โดยวิธีการกำหนดค่าสามารถทำได้โดยผ่านโปรแกรมภาษาซีหรือปรับค่าผ่านตัวความต้านทานปรับค่าได้ในวงจร ค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สำคัญๆ มีดังนี้

- การกำหนดค่าความถี่สวิตชิง ซึ่งสามารถกำหนดค่าได้ผ่านทางโปรแกรมภาษาซี
- การกำหนดค่า Dead time หรือกำหนดเวลาขอบขาขึ้น ขาลงของสัญญาณนาฬิกา เพื่อเป็นการกำหนดเวลาทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์
- การกำหนดค่าความถี่มูลฐาน ซึ่งสามารถปรับค่าได้ผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ในวงจร

4.3.2 การออกแบบชุดคำสั่งควบคุม

ชุดคำสั่งควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC24HJ128GP306 จะเขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรมภาษาซี โดยมีแผนผังของชุดคำสั่งหลักดังนี้

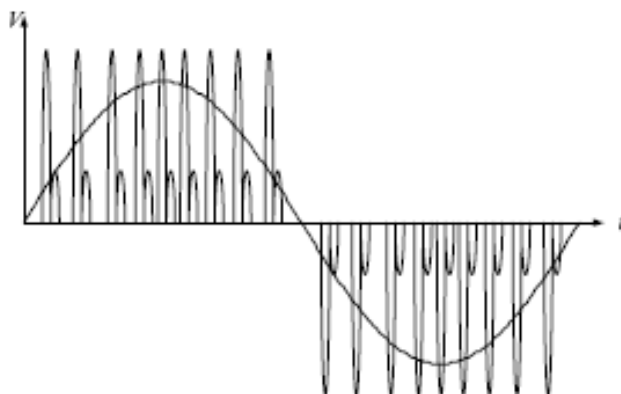


รูปที่ 4.11 แผนผังการทำงานชุดคำสั่งหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC24HJ128GP306

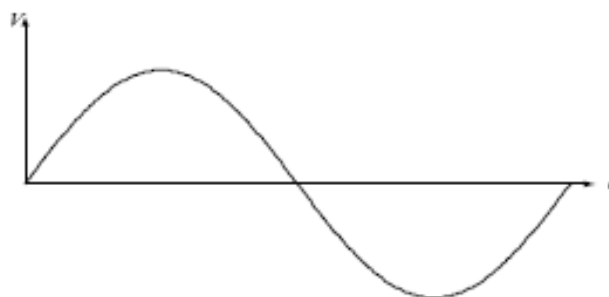
4.4 ชุดวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter)

เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีการสวิตชิงที่กล่าวมาในบทที่ 2 จะเห็นว่าสัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรถูกอินเวอร์เตอร์จะมีความถี่สูงปะปนมา ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ดังนั้นต้องทำการกรองความถี่สูงออกไป ให้เหลือเฉพาะความถี่มูลฐานตามที่เราต้องการ (10 – 500 เฮิร์ตซ์) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้นใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อกันแบบอนุกรม เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบลำดับที่ 1 (1st order) ก็เพียงพอต่อการกรองสัญญาณเนื่องจากเราทำการเลือกค่าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่เกิดเรโซแนนซ์กับความถี่สวิตชิง ทำให้ลดฮาร์มอนิกและสัญญาณรบกวนลงได้มาก ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.21 โดยการคำนวณค่าของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้น สามารถใช้สมการที่ (2.3) มาคำนวณได้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความถี่ในการสวิตชิงสัญญาณที่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ (C_r) ขนาด 1.33 ไมโครฟารัด และค่าตัวเหนี่ยวนำ (L_r) ขนาด 760 ไมโครเฮนรี่

$$f = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{(1.33 \times 10^{-6}) \times (760 \times 10^{-6})}} = 5.004 \text{ กิโลเฮิรตซ์}$$

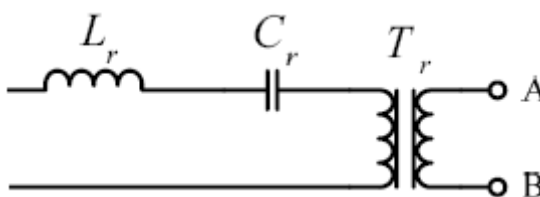


รูปที่ 4.12 สัญญาณขาออกที่มีความถี่สูงปะปน



รูปที่ 4.13 สัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมความถี่ได้นี้ สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในการศึกษาการสร้างชุดทดสอบสายเคเบิลหน้างานต่อไปได้ โดยการนำสัญญาณแรงดันกระแสสลับด้านขาออกนี้ จ่ายให้กับหม้อแปลงเรโซแนนซ์ซึ่งมีพิกัดของหม้อแปลง 220V/50kV เพื่อเพิ่มขนาดของแรงดันกระแสสลับขาออกให้อยู่ในช่วง 1 – 5 กิโลโวลต์ตามที่ต้องการ แล้วจึงนำแรงดันนี้ไปต่อโหนดทดสอบ ซึ่งคือสายเคเบิลหน้างานต่อไป

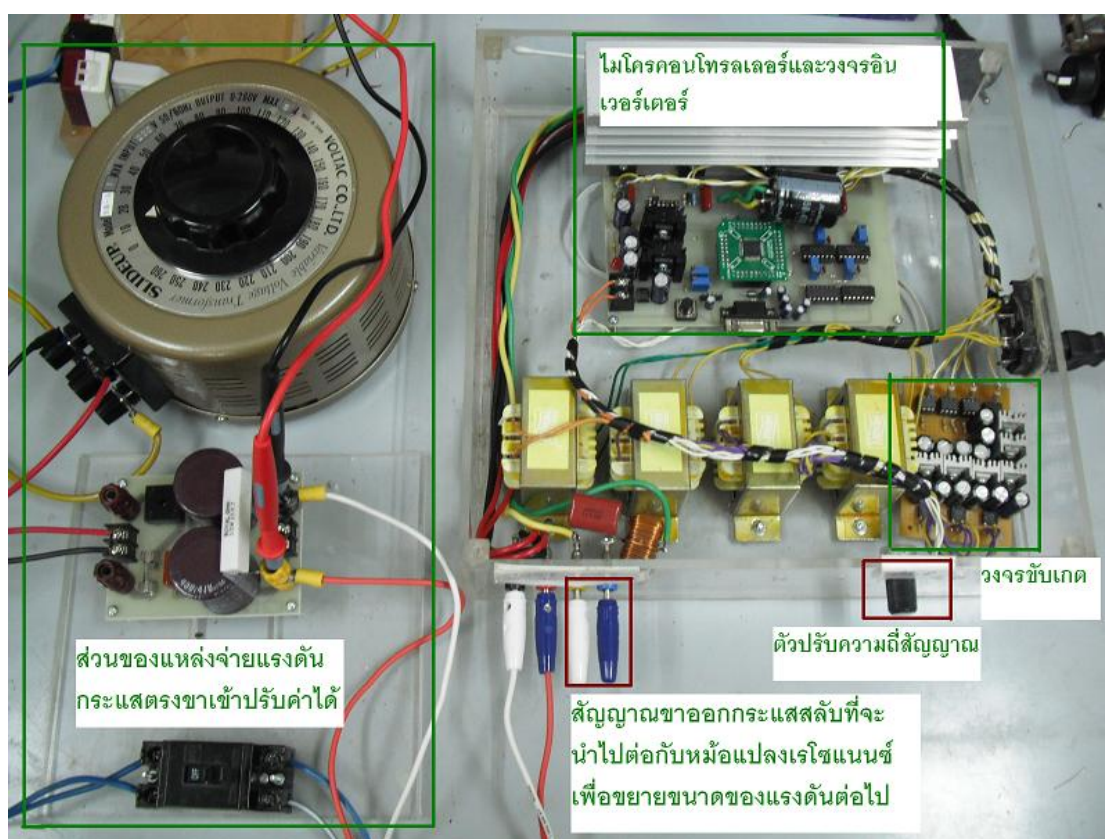


รูปที่ 4.14 การต่อวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและการต่อหม้อแปลง

4.5 การสร้างแบบจำลอง

เมื่อนำอุปกรณ์ทุกส่วนประกอบเข้าด้วยกันจะได้แบบจำลองชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงที่สามารถควบคุมความถี่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยชุดอุปกรณ์สามารถทำงานได้ดังนี้

- สามารถรับแรงดันกระแสตรงขาเข้าได้ตั้งแต่ 0 – 220 โวลต์
- สามารถปรับค่าความถี่ของแรงดันกระแสสลับขาออกได้ตั้งแต่ 10 – 500 เฮิรตซ์ตามมาตรฐานการทดสอบหน่วยงาน IEC60060-3
- สามารถนำแรงดันกระแสสลับขาออกนี้จ่ายให้กับหม้อแปลงเพื่อเพิ่มขนาดของแรงดันเป็น 5 กิโลโวลต์และประยุกต์ใช้กับการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าหน่วยงานได้ต่อไป



รูปที่ 4.15 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

หลังจากสร้างแบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้แล้ว จะทำการทดลองชุดอุปกรณ์ได้โดย การทดสอบทางไฟฟ้าซึ่งเป็นการวัดค่าและสัญญาณต่างๆทางไฟฟ้าตามจุดที่สำคัญในวงจร เพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานของวงจร

5.1 การทดสอบวงจรควบคุมการทำงานของมอสเฟต

การทดสอบในส่วนนี้ จะเป็นการแสดงค่าของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งเป็นสัญญาณที่สร้างขึ้นโดยกำหนดคำสั่งผ่านตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC24H ที่เราใช้ โดยในวิทยานิพนธ์นี้เราเลือกใช้ความถี่ในการสวิตซิงที่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์ (การเลือกค่าความถี่สวิตซิงขึ้นอยู่กับวงจรของสัญญาณที่เราใช้ด้วย ถ้าต้องการลดขนาดของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในวงจรของสัญญาณ ควรเลือกความถี่สวิตซิงที่มีค่าสูงๆ)

5.1.1 การคำนวณหาค่าที่จุดต่างๆของสัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่สวิตซิง

ในการคำนวณเพื่อเขียนคำสั่งควบคุมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำการสวิตซิงสัญญาณที่ 5 กิโลเฮิร์ตซ์นั้น ทำได้โดยการกำหนดค่า ณ จุดเวลาต่างๆในรูปสัญญาณไซน์และทำการแปลงค่าเหล่านั้นให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอล (Analog to Digital) เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเข้าใจได้ โดยอธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

หาค่าคาบของเวลา(T) ที่ความถี่สวิตซิง 5 กิโลเฮิร์ตซ์ได้โดยสมการที่ (5.1) จะได้คาบของเวลาสวิตซิงเท่ากับ 0.2 ไมโครวินาที

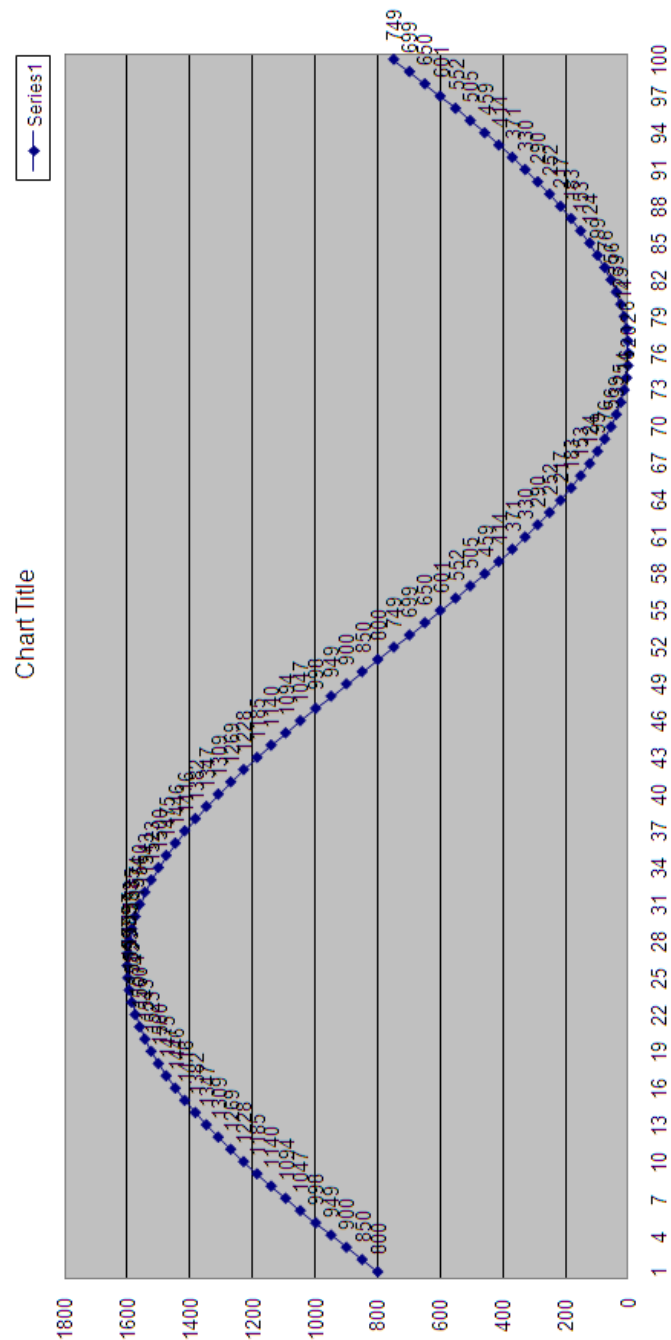
$$T = \frac{1}{f} \quad (5.1)$$

T= คาบเวลา(วินาที)

f= ความถี่ของสัญญาณ (เฮิร์ตซ์)

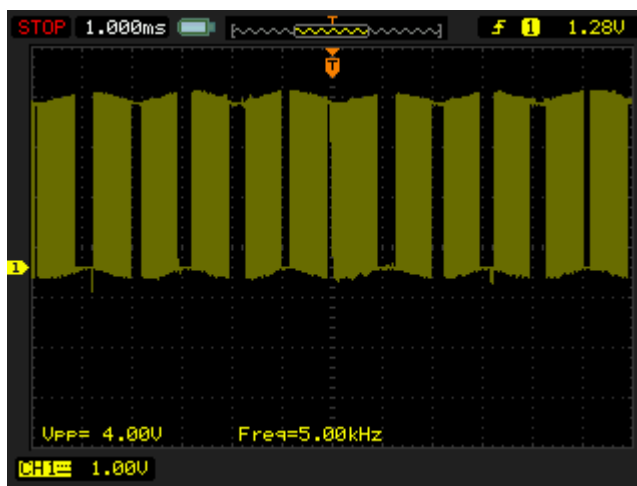
จากแผ่นข้อมูล (Datasheet) ของไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้ความถี่ในการทำงานของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เท่ากับ 8 เมกกะเฮิร์ตซ์ ทำการหาคาบเวลาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เช่นกัน โดยใช้สมการที่ (5.1) จะได้คาบเวลาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เท่ากับ 125 นาโนวินาที

จากนั้นทำการหาค่าที่จุดสูงสุดของสัญญาณไซน์ได้โดย นำค่าคาบเวลาสวิตชิงหารด้วยคาบเวลาทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ($0.2 \times 10^{-6} / 125 \times 10^{-9}$) จะได้ค่าที่จุดสูงสุดของสัญญาณรูปไซน์เท่ากับ 1600 ทำการแบ่งจุดต่างๆภายในสัญญาณรูปไซน์เป็น 100 ช่อง (จำนวนช่องที่แบ่งขึ้นอยู่กับความละเอียดของความถี่ของสัญญาณที่เราต้องการและเวลาในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย) จะได้ค่าที่จุดต่างๆของสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่สวิตชิง 5 กิโลเฮิร์ตซ์ดังแสดงในรูปแบบที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ค่าในจุดต่างๆของรูปสัญญาณไซน์ที่มีความถี่สวิตชิง 5 กิโลเฮิร์ตซ์

การกำหนดค่า ณ จุดเวลาต่างๆให้กับสัญญาณรูปไซน์นั้นมีความสำคัญในการควบคุมความถี่ของสัญญาณกระแสสลับขาออก ซึ่งอยู่ระหว่าง 10 – 500 เฮิร์ตซ์ เพราะว่าเมื่อทำการปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้เพื่อทำการปรับความถี่มูลฐานของสัญญาณดังสมการที่ (4.2) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการรับค่าความถี่นั้นแล้วแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัลและทำการป้อนค่าลงไปทีจุดเวลาต่างๆในสัญญาณรูปไซน์ ทำให้วงจรสามารถควบคุมความถี่ของสัญญาณได้ และเมื่อทำการจับรูปของสัญญาณพีคเบิลยูเอมซึ่งจะเป็นสัญญาณที่ส่งไปขับเคลื่อนผ่านออสซิลโลสโคปจะได้รูปของสัญญาณดังรูปที่ 5.2

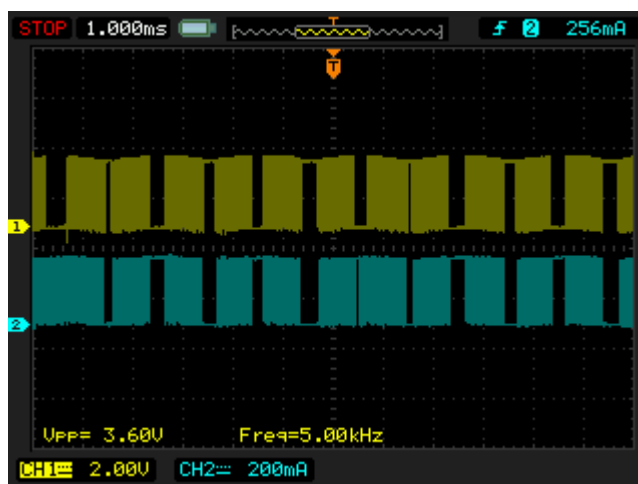


รูปที่ 5.2 สัญญาณพีคเบิลยูเอมที่ความถี่สวิตซิง 5 กิโลเฮิร์ตซ์

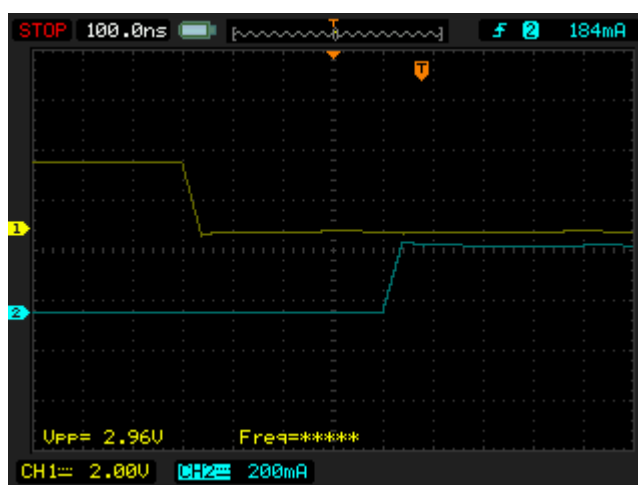
5.1.2 การปรับค่าเวลาทำงานเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดในการสวิตซิงของมอสเฟต

เป็นการปรับค่าเวลา Dead time ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอยู่ในวงจรขั้วนำเกต โดยเป็นการปรับค่าเวลาของสัญญาณระหว่างขอบขาลงจนถึงขอบขาขึ้นของสัญญาณที่จะไปขับนำขาเกต เพื่อกำหนดเวลาในการเปิด-ปิดของมอสเฟตซึ่งทำงานเป็นคู่ๆ การกำหนดค่าเวลานี้ใช้การกำหนดค่าจากการทดลองจริง เนื่องจากต้องปรับค่าเวลาทำงานให้เหมาะสม เพื่อจะให้มอสเฟตสามารถทำงานสลับกันเป็นคู่ๆได้อย่างถูกต้องและป้องกันการลัดวงจรที่อาจจะเกิดขึ้นในกรณีที่มอสเฟตเกิดทำงานพร้อมกัน

โดยในการทดลองนี้ เราปรับค่า Dead time ของสัญญาณไว้ที่ 400 นาโนวินาที ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4



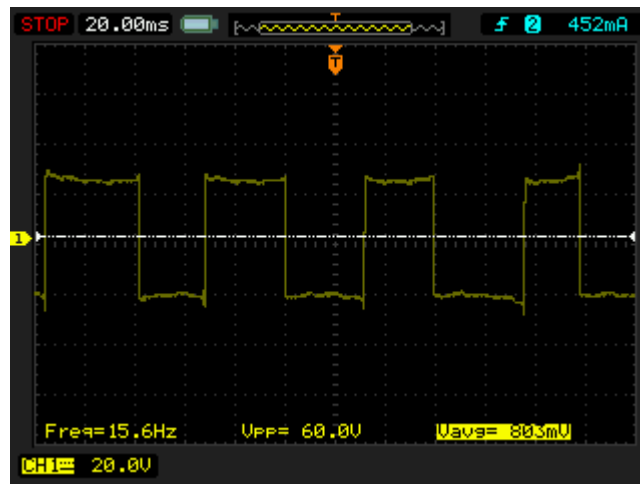
รูปที่ 5.3 สัญญาณที่ส่งไปขับขาเกตด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ



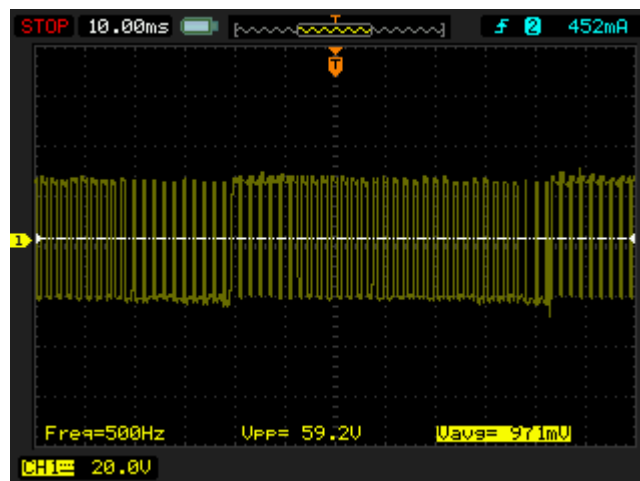
รูปที่ 5.4 การปรับค่าเวลา Dead time ของวงจรถับนำเกต

5.2 การตรวจสอบเรโซแนนซ์ของสัญญาณขาออก

จากทฤษฎีการสวิตชิงที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เพื่อเราได้สัญญาณที่ผ่านวงจรถับนำเกตออกมาแล้ว สัญญาณดังกล่าวยังคงมีความถี่สูงปะปนอยู่ เราจึงจำเป็นที่จะต้องกรองความถี่สูงเหล่านั้นออกไป โดยใช้ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ต่อกันอย่างอนุกรม ในการทดลองนี้จะทำการพิสูจน์ทฤษฎีของการสวิตชิงที่ความถี่เรโซแนนซ์ว่า สามารถลดฮาร์มอนิกหรือสัญญาณรบกวนในวงจรถับนำได้ ทำให้ได้รูปสัญญาณไซน์ที่ต่อเนื่อง จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 แสดงสัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรถับนำเกตซึ่งยังมีความถี่สูงปะปนอยู่



รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงดันขาออกที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 5.6 สัญญาณแรงดันขาออกที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

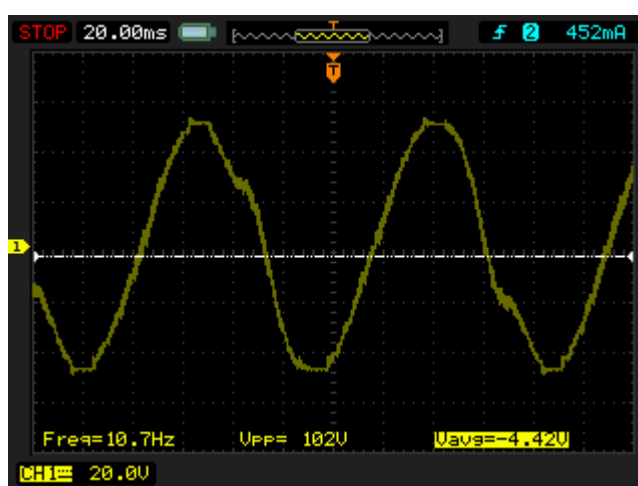
การเลือกค่าของวงจรกรองความถี่เพื่อให้เกิดเรโซแนนซ์กับความถี่สวิตชิ่งนั้น การทดลองนี้เลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่คงที่ขนาด 760 ไมโครเฮนรี่และทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 5 กิโลเฮิรตซ์ซึ่งเป็นความถี่ของการสวิตชิ่ง การคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ นั้นทำได้โดยใช้สมการที่ (2.3) ในการคำนวณ โดยแสดงความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุที่ใช้กับลักษณะของสัญญาณขาออกและความถี่เรโซแนนซ์ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของความถี่เรโซแนนซ์กับตัวเก็บประจุที่ขนาดต่างๆ

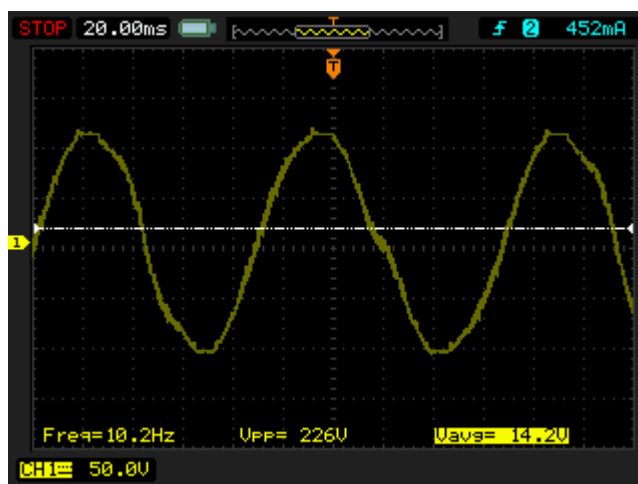
ขนาดของตัวเก็บประจุ (ไมโครฟารัด)	ลักษณะของรูป สัญญาณขาออก	แรงดันทดสอบ(โวลต์) V_{peak}	ความถี่เรโซแนนซ์ (กิโลเฮิรตซ์)
0.33	ไซน์ รูปร่างผิดเพี้ยน	50	10.054
0.47	ไซน์ รูปร่างผิดเพี้ยน	110	8.425
1.0	ไซน์ มีฮาร์มอนิก เล็กน้อย	110	5.776
1.33	สัญญาณไซน์ที่ ความถี่เรโซแนนซ์	110	5.004
2.2	ไซน์ มีฮาร์มอนิก เล็กน้อย	110	3.894

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าการที่เราเลือกค่าตัวเก็บประจุในวงจรของความถี่ต่ำผ่าน ให้เกิดเรโซแนนซ์กับความถี่สวิตซิ่งนั้นจะทำให้สัญญาณแรงดันขาออกที่ได้มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ที่สวยงาม และยังไม่จำเป็นต้องใช้วงจรของความถี่ต่ำที่ซับซ้อนในการกรองความถี่สูงออกไป ใช้เพียงวงจรของความถี่ต่ำผ่านลำดับที่ 1 (1st order) เท่านั้น

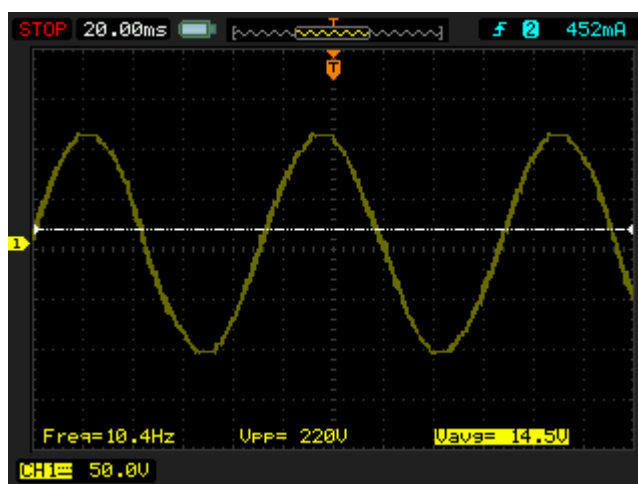
รูปที่ 5.7 ถึง 5.9 จะแสดงรูปสัญญาณแรงดันขาออกที่ผ่านวงจรของความถี่ต่ำผ่าน ที่ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ



รูปที่ 5.7 สัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรของความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าตัวเก็บประจุ 0.33 ไมโครฟารัด



รูปที่ 5.8 สัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าตัวเก็บประจุ 0.47 ไมโครฟารัด



รูปที่ 5.9 สัญญาณขาออกหลังจากผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าตัวเก็บประจุ 1.33 ไมโครฟารัด

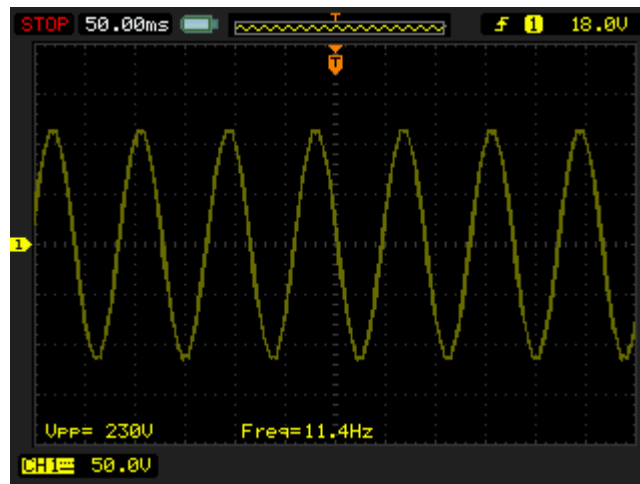
5.3 ผลของสัญญาณแรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ต่างๆ

การทดสอบการทนแรงดันของสายเคเบิลหน้างานทั่วไป โดยปกติชุดทดสอบหน้างานที่มีขายตามท้องตลาดจะแบ่งออกเป็น ชุดทดสอบแบบ Power frequency voltage testing ซึ่งมีขนาดใหญ่มากเหมาะสำหรับการทดสอบในห้องทดลองหรือโรงงาน เพราะการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ทำได้ยาก, ชุดทดสอบแบบ VLF (Very low frequency voltage testing) จะเป็นชุดทดสอบหน้างานที่ใช้ความถี่ในการทดสอบต่ำมาก เช่น 0.1 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น และชุดทดสอบแบบ Resonance frequency voltage testing ซึ่งเป็นชุดทดสอบที่เรากำลังทำการศึกษาอยู่ เพราะจะทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์ทดสอบ และการเคลื่อนย้ายชุดทดสอบทำได้ง่ายขึ้น ซึ่งโดยปกติชุดทดสอบทั้งสามชนิดนี้จะรับแรงดันกระแสตรงขาเข้าขนาด 110 โวลต์ หรือ 220 โวลต์ มีค่าความคลาดเคลื่อน

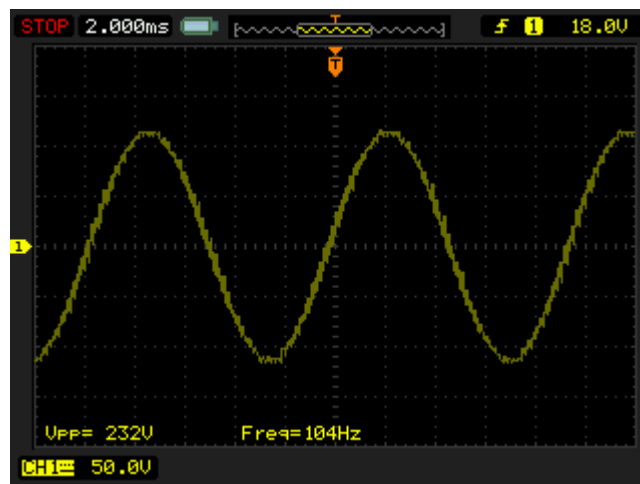
ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการบันทึกค่าของสัญญาณแรงดันขาออกในวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการบันทึกค่าที่แรงดันกระแสตรงขาเข้า 110 โวลต์ และ 220 โวลต์ ตามลำดับและปรับค่าที่ความถี่ต่างๆตั้งแต่ 10 – 500 เฮิรตซ์ เพื่อดูรูปสัญญาณ, ขนาดและลักษณะของแรงดันขาออกว่าเป็นอย่างไร

ตารางที่ 5.2 ผลของแรงดันกระแสสลับขาออกเมื่อป้อนแรงดันขาเข้า 110 โวลต์ที่ความถี่ต่างๆ

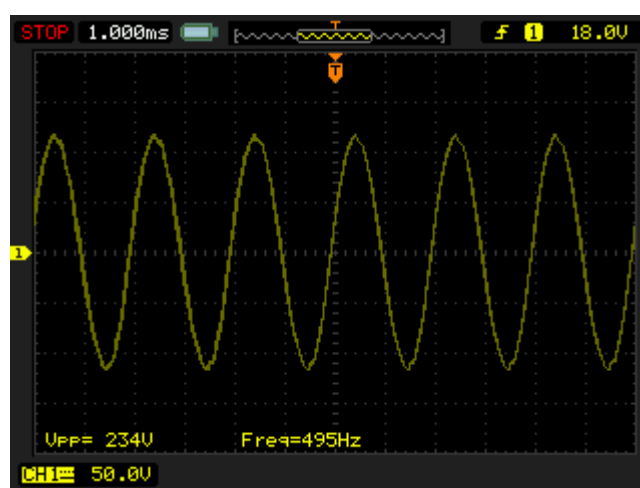
ความถี่ของแรงดันขาออก (เฮิรตซ์)	ขนาดของแรงดันขาออก peak to peak (โวลต์)	ฮาร์มอนิก	ความต่อเนื่องของรูปคลื่น
10	230	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นเล็กน้อยที่ทุกช่วงสัญญาณ	สัญญาณกระตุก มีความถี่ขึ้นปน
50	234	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นเล็กน้อยที่ทุกช่วงสัญญาณ	ต่อเนื่อง มีความถี่ขึ้นปน
100	232	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นเล็กน้อยที่ทุกช่วงสัญญาณ	ต่อเนื่อง
300	236	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นน้อยมาก	ต่อเนื่อง
500	234	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นน้อยมาก	ต่อเนื่อง



รูปที่ 5.10 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 110 โวลต์

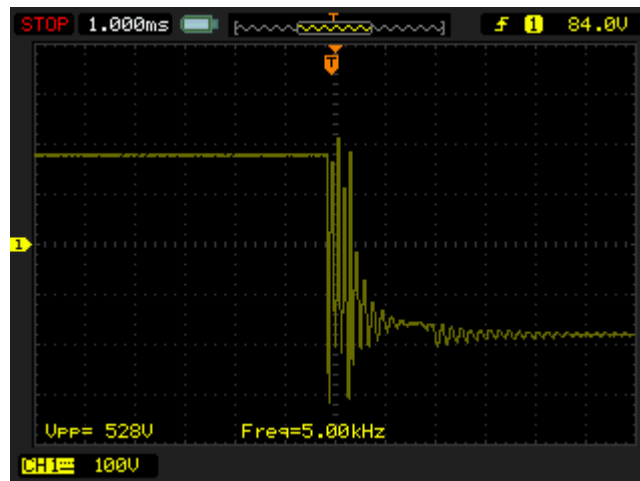


รูปที่ 5.11 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 110 โวลต์

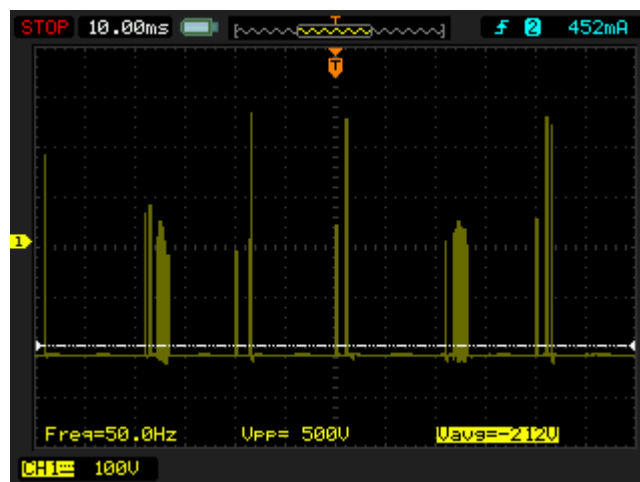


รูปที่ 5.12 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 110 โวลต์

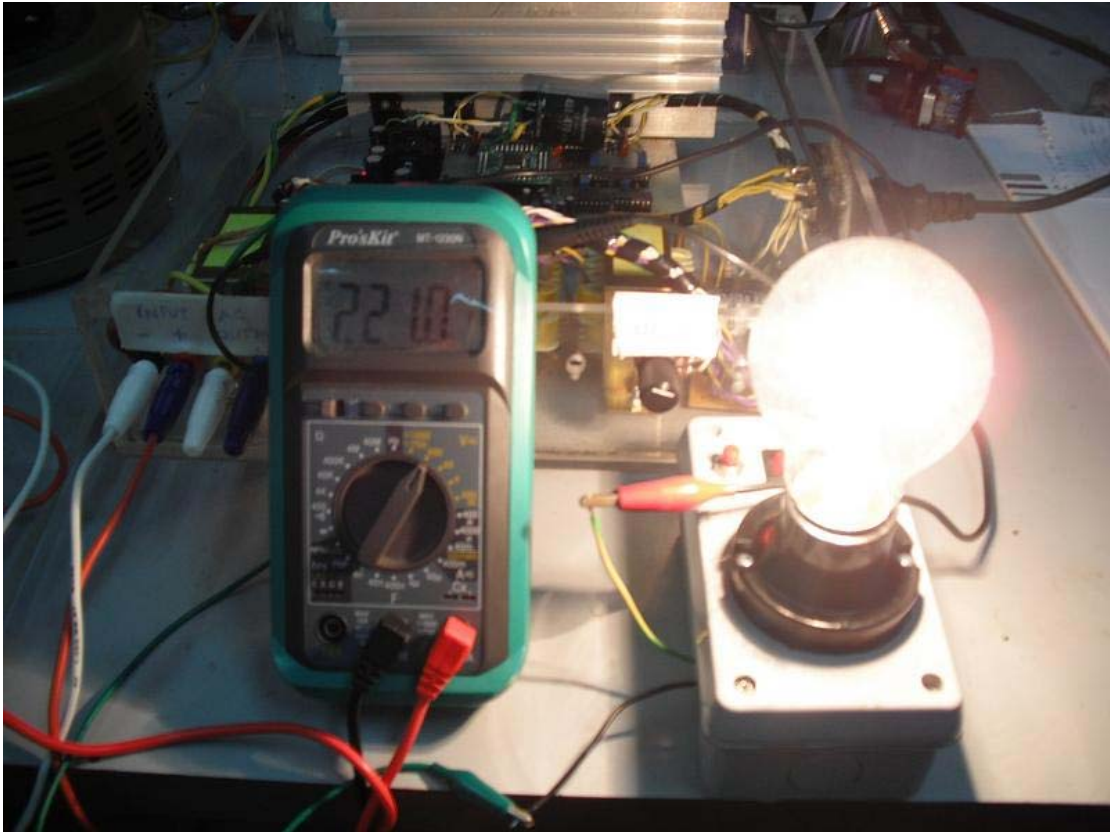
การวัดค่าแรงดันกระแสสลับขาออกเมื่อจ่ายแรงดันกระแสตรงขาเข้า 220 โวลต์ในการทดลองเกิดปัญหาขึ้น เนื่องจากสัญญาณขาออกไม่มีลักษณะเป็นรูปไซน์อันเนื่องมาจากสาเหตุของตัวเก็บประจุ ไม่ทำการคายประจุ แต่แรงดันขาออกยังสามารถนำไปจ่ายโหลดได้ จึงได้ทดลองต่อโหลดขนาด 100 วัตต์และทำการบันทึกรูปสัญญาณขาออกและเป็นการทดสอบชุดอุปกรณ์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้สร้างขึ้น ว่าสามารถทนแรงดันกระแสตรงขาเข้าที่ 220 โวลต์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ถึง 5.15



รูปที่ 5.13 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ยังไม่ต่อโหลด เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 220 โวลต์



รูปที่ 5.14 แรงดันกระแสสลับขาออกเมื่อต่อโหลดขนาด 100 วัตต์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 220 โวลต์

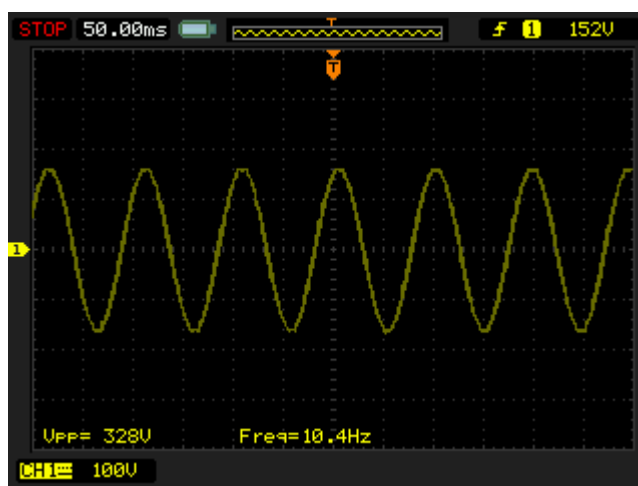


รูปที่ 5.15 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้เมื่อต่อโหลดขนาด 100 วัตต์

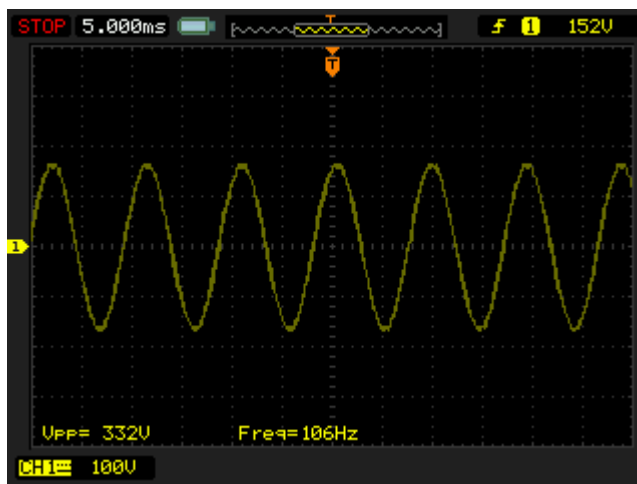
จากการทดลองจะพบว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมความถี่ได้สามารถสร้างสัญญาณขาออกรูปคลื่นไซน์ได้ที่แรงดันกระแสตรงขาเข้าสูงสุดประมาณ 170 โวลต์ ดังนั้นจึงได้ทำการวัดค่าของสัญญาณขาออกและลักษณะของรูปสัญญาณที่ความถี่ต่างๆไว้ ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลของแรงดันกระแสสลับขาออกเมื่อป้อนแรงดันขาเข้า 170 โวลต์ที่ความถี่ต่างๆ

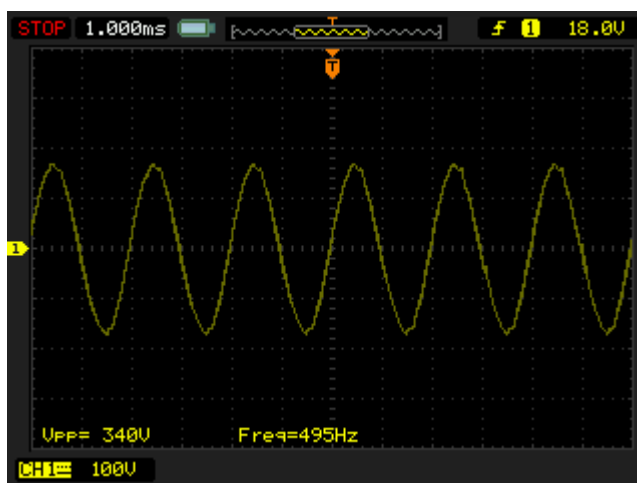
ความถี่ของแรงดันขาออก (เฮิรตซ์)	ขนาดของแรงดันขาออก peak to peak (โวลต์)	ฮาร์มอนิก	ความต่อเนื่องของรูปคลื่น
10	328	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นเล็กน้อยที่ทุกช่วงสัญญาณ	สัญญาณกระตุก มีความถี่ขึ้นปน
50	332	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นเล็กน้อยที่ทุกช่วงสัญญาณ	สัญญาณกระตุก มีความถี่ขึ้นปน
100	332	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นเล็กน้อยที่ทุกช่วงสัญญาณ	ต่อเนื่อง
300	340	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นเล็กน้อยที่ทุกช่วงสัญญาณ	ต่อเนื่อง
500	340	มีฮาร์มอนิกครบ กว้นน้อยมาก	ต่อเนื่อง



รูปที่ 5.16 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 10 เฮิรตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 170 โวลต์



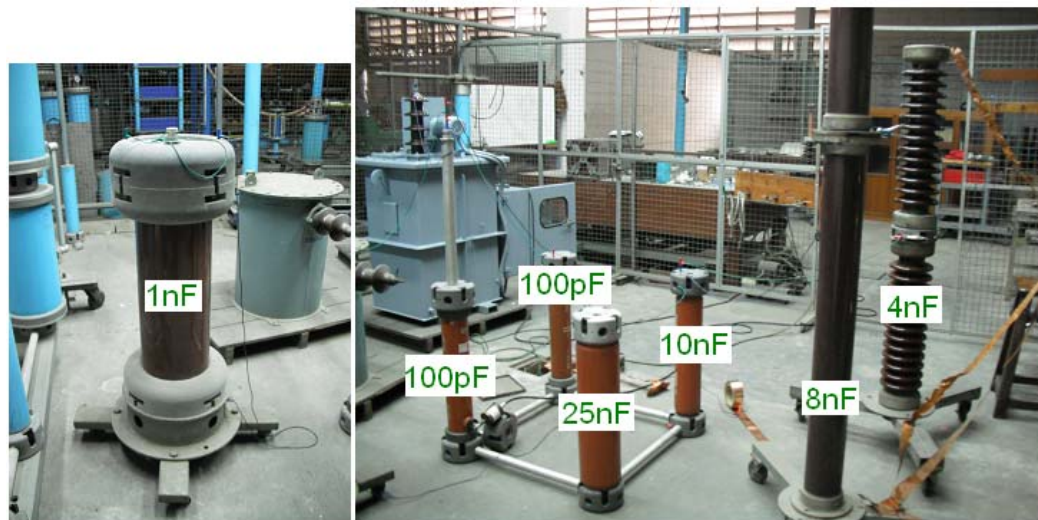
รูปที่ 5.17 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 170 โวลต์



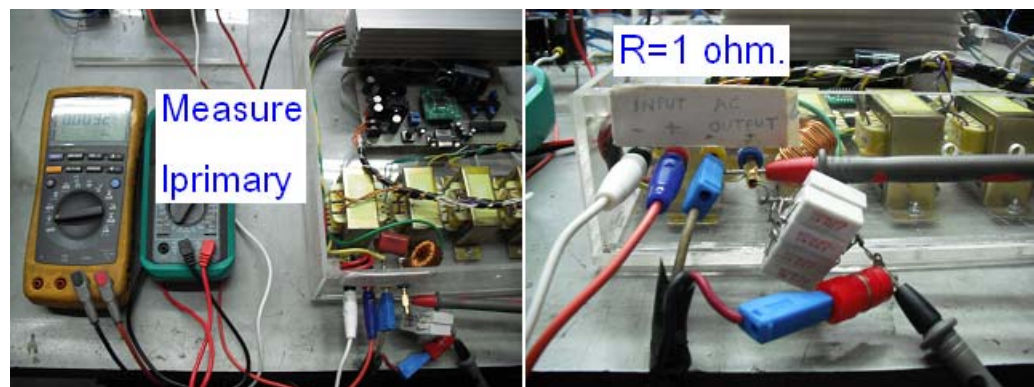
รูปที่ 5.18 แรงดันกระแสสลับขาออกที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ เมื่อจ่ายแรงดันขาเข้า 170 โวลต์

เมื่อเราได้สัญญาณขาออกด้านแรงต่ำจากชุดแหล่งจ่ายแล้ว เราจะนำสัญญาณนี้ต่อเข้ากับหม้อแปลงเรโซแนนซ์เพื่อขยายขนาดของแรงดันให้ได้ 5 กิโลโวลต์ตามที่ต้องการ โดยหม้อแปลงเรโซแนนซ์ที่นำมาต่อมีพิกัด 220โวลต์/50กิโลโวลต์ และต่อกับตัวเก็บประจุ C₁ ขนาด 100 พิโกฟารัด ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุ C₂ ขนาด 110.4 นาโนฟารัด มีอัตราส่วนลดทอน 1 ต่อ 1000 และเก็บข้อมูลขนาดของแรงดัน กระแสของชุดแหล่งจ่ายและรูปสัญญาณด้านแรงสูงของหม้อแปลงผ่านมิเตอร์วัดและออสซิลโลสโคป โดยทำการทดสอบที่โหลดตัวเก็บประจุขนาด 600 พิโกฟารัด, 1.1 นาโนฟารัด, 10.1 นาโนฟารัด, 25.1 นาโนฟารัด, 35.1 นาโนฟารัดและ 48.2 นาโนฟารัด ตามลำดับ รูปการต่อวงจรชุดทดสอบและการวัดขนาดของกระแสของชุดแหล่งจ่ายที่โหลดตัวเก็บประจุขนาดต่างๆแสดงดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 โดยจะทำการแสดงผลการบันทึกค่าเพื่อหาจุดทดสอบที่เรโซแนนซ์ของโหลดทดสอบขนาด 600 พิโกฟารัด, 25.1 นาโนฟารัดและ 48.2 นาโนฟารัด ตามลำดับ เพื่อแสดงค่าแรงดันขาเข้าที่ใช้ แรงดันขาออกอาร์เอ็มเอส กระแสของชุด

แหล่งจ่ายและความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ในการทดสอบและแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของชุดแหล่งจ่ายและความถี่ เพื่อพิสูจน์ทฤษฎีการทดสอบที่เรโซแนนซ์ว่าสามารถลดกระแสของชุดแหล่งจ่ายที่ใช้ในการจ่ายโหลดทดสอบได้จริง



รูปที่ 5.19 การต่อวงจรชุดแหล่งจ่ายเข้ากับตัวเก็บประจุทดสอบขนาดต่างๆ

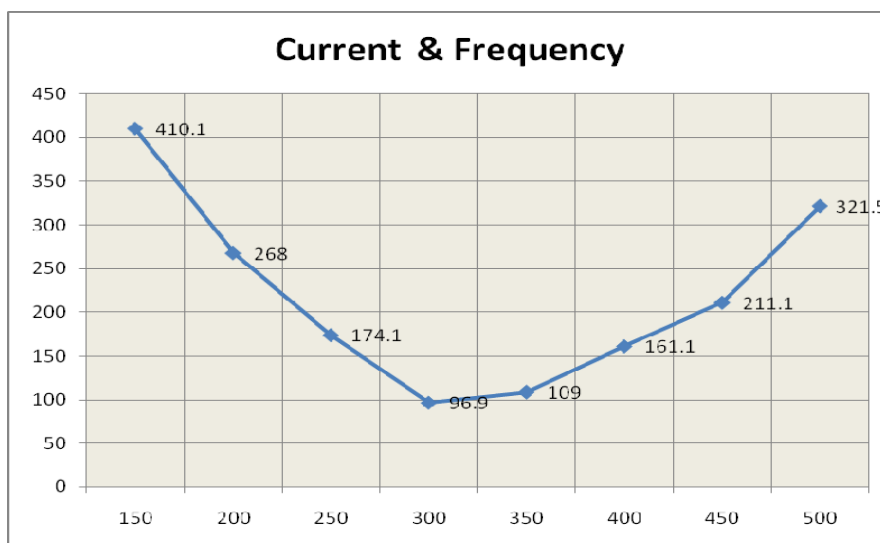


รูปที่ 5.20 การวัดค่ากระแสด้านปฐมภูมิของชุดแหล่งจ่าย

ตารางที่ 5.4 ขนาดของแรงดันและกระแสที่ความถี่ต่างๆของชุดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับขนาด 5 กิโลโวลต์ เมื่อต่อกับโหลดทดสอบขนาด 600 พิโกฟารัด

ความถี่ของแรงดันขาออก (เฮิรตซ์)	แรงดันกระแสตรงขาเข้า (โวลต์)	แรงดันกระแสตรงที่เรโซแนนซ์ (โวลต์)	แรงดันขาออก อาร์เอ็มเอส (โวลต์)	กระแสต้านปฏิกิริยา ภูมิภาค (มิลลิแอมแปร์) R = 1 ohm.
333	5.5	-	626.2	94.6
333	-	47.7	5.09 kV.	637.7
150	5.5	-	516.1	410.1
200	5.5	-	561.4	268.0
250	5.5	-	588.1	174.1
300	5.5	-	620.1	96.9
350	5.5	-	659.7	109.0
400	5.5	-	678.8	161.1
450	5.5	-	699.6	211.1
500	5.5	-	738.4	321.5

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นว่ากรทดสอบที่โหลด 600 พิโกฟารัดจะเกิดการทดสอบแบบเรโซแนนซ์ (Resonance testing) ที่ความถี่ 333 เฮิรตซ์ ได้แรงดันทดสอบที่ 5.09 กิโลโวลต์และกระแสของชุดแหล่งจ่ายต่ำที่สุด ความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่เป็นไปตามรูปที่ 5.21

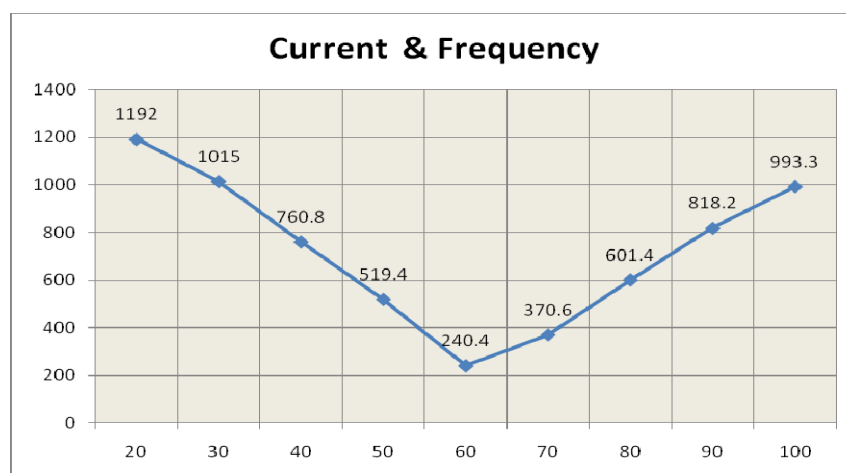


รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่ที่โหลดทดสอบขนาด 600 พิโกฟารัด

ตารางที่ 5.5 ขนาดของแรงดันและกระแสที่ความถี่ต่างๆของชุดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับขนาด 5 กิโลโวลต์ เมื่อต่อกับโหลดทดสอบขนาด 25.1 นาโนฟารัด

ความถี่ของแรงดันขาออก (เฮิรตซ์)	แรงดันกระแสตรงขาเข้า (โวลต์)	แรงดันกระแสตรงที่เรโซแนนซ์ (โวลต์)	แรงดันขาออกอาร์เอ็มเอส (โวลต์)	กระแสต้านปฏิกิริยา (มิลลิแอมแปร์) R = 1 ohm.
62.5	5.3	-	546.3	226.6
62.5	-	51.7	5.08 kV.	2272
20	5.3	-	245.3	1192
30	5.3	-	355.7	1015
40	5.3	-	445.4	760.8
50	5.3	-	508.2	519.4
60	5.3	-	544.3	240.4
70	5.3	-	547.5	370.6
80	5.3	-	524.4	601.4
90	5.3	-	486.8	818.2
100	5.3	-	443.4	993.3

จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่ากรทดสอบที่โหลด 25.1 นาโนฟารัดจะเกิดการทดสอบแบบเรโซแนนซ์ (Resonance testing) ที่ความถี่ 62.5 เฮิรตซ์ ได้แรงดันทดสอบที่ 5.08 กิโลโวลต์และกระแสของชุดแหล่งจ่ายต่ำที่สุด ความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่เป็นไปตามรูปที่ 5.22

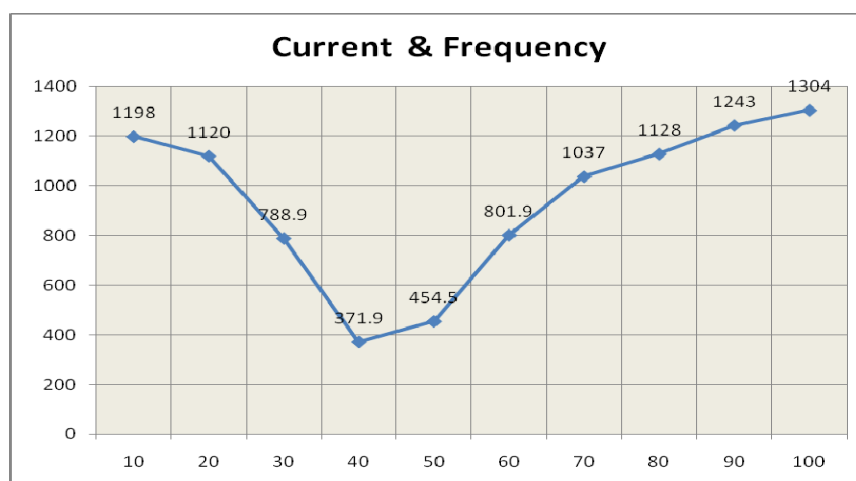


รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่ที่โหลดทดสอบขนาด 25.1 นาโนฟารัด

ตารางที่ 5.6 ขนาดของแรงดันและกระแสที่ความถี่ต่างๆของชุดแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับขนาด 5 กิโลโวลต์ เมื่อต่อกับโหลดทดสอบขนาด 48.2 นาโนฟารัด

ความถี่ของแรงดันขาออก (เฮิรตซ์)	แรงดันกระแสตรงขาเข้า (โวลต์)	แรงดันกระแสตรงที่เรโซแนนซ์ (โวลต์)	แรงดันขาออก อาร์เอ็มเอส (โวลต์)	กระแสต้านปฏิกิริยา (มิลลิแอมแปร์) R = 1 ohm.
45.5	5.2	-	487.9	316.5
45.5	-	53.0	5.07 kV	3174.3
10	5.2	-	211.3	1198
20	5.2	-	273.5	1120
30	5.2	-	404.1	788.9
40	5.2	-	496.3	371.9
50	5.2	-	478.6	454.5
60	5.2	-	453.3	801.9
70	5.2	-	382.5	1037
80	5.2	-	347.2	1128
90	5.2	-	284.8	1243
100	5.2	-	246.6	1304

จากตารางที่ 5.6 จะเห็นว่า การทดสอบที่โหลด 48.2 นาโนฟารัด จะเกิดการทดสอบแบบเรโซแนนซ์ (Resonance testing) ที่ความถี่ 45.5 เฮิรตซ์ ได้แรงดันทดสอบที่ 5.07 กิโลโวลต์และกระแสของชุดแหล่งจ่ายต่ำที่สุด ความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่เป็นไปตามรูปที่ 5.23

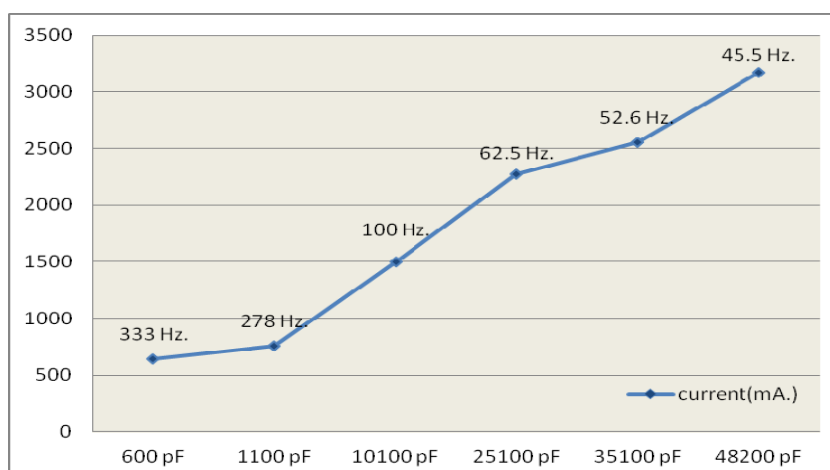


รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ของกระแสและความถี่ที่โหลดทดสอบขนาด 48.2 นาโนฟารัด

5.4 วิเคราะห์ผลการจำลองแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้ ตารางที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ขนาดตัวเก็บประจุต่างๆ

ขนาดของตัวเก็บประจุ (พิโกฟารัด)	ความถี่เรโซแนนซ์ (เฮิรตซ์)	แรงดันกระแสตรงที่เรโซแนนซ์ (โวลต์)	แรงดันขาออก อาร์เอ็มเอส (โวลต์)	กระแสต้านป้อนรวม (มิลลิแอมแปร์) R = 1 ohm.
600	333	47.7	5.09	637.7
1100	278	48.1	5.08	758.4
10100	100	49.9	5.05	1499.4
25100	62.5	51.7	5.08	2272.0
35100	52.6	52.2	5.03	2557.0
48200	45.5	53.0	5.07	3174.3

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นว่าที่แรงดันทดสอบขนาด 5 กิโลโวลต์ที่โหลดตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ ที่จุดทดสอบเรโซแนนซ์ของวงจรจะได้ขนาดกระแสของชุดแหล่งจ่ายน้อยที่สุด โดยที่ยังสามารถจ่ายแรงดันทดสอบที่ขนาด 5 กิโลโวลต์ได้เท่าเดิม แต่เมื่อเปรียบเทียบโดยการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุ จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรทดสอบมีค่าลดลงและขนาดกระแสของชุดแหล่งจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ จากรูปที่ 5.24 จะแสดงค่ากระแสของชุดแหล่งจ่ายที่จุดเรโซแนนซ์ของโหลดตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ



รูปที่ 5.24 ขนาดกระแส ณ จุดความถี่เรโซแนนซ์ที่ตัวเก็บประจุขนาดต่างๆ

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการสร้างแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมความถี่ได้ ซึ่งใช้หลักการสวิตชิงแรงดันแบบพีดับเบิลยูเอ็ม ในการสร้างสัญญาณแรงดันกระแสสลับขาออกจากแรงดันกระแสตรงขาเข้าซึ่งได้จากการต่อไฟบ้านกระแสสลับ 220 โวลต์ผ่านหม้อแปลงควบคุมแรงดันและวงจรแปลงแรงดันให้เป็นกระแสตรง ซึ่งจากการสร้างแบบจำลองของชุดแหล่งจ่ายและบันทึกผลการทดลอง ได้ผลสรุปดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามารถสร้างแรงดันกระแสสลับขาออกที่เป็นสัญญาณไซน์ได้ โดยมีขนาดของแรงดันกระแสสลับขาออกด้านแรงสูง 5 กิโลโวลต์(อาร์เอ็มเอส) หลังจากต่อผ่านหม้อแปลงและสามารถควบคุมขนาดของแรงดันกระแสตรงขาเข้าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 220 โวลต์

2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามารถควบคุมความถี่ของแรงดันกระแสสลับขาออกได้ตั้งแต่ 10 ถึง 500 เฮิร์ตซ์ ตามมาตรฐานการทดสอบหน้างาน IEC 60060-3

3. วงจรทั้งหมดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งใช้หลักการสวิตชิงสัญญาณและนำอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ามาใช้ในการสร้างแบบจำลองนั้น สามารถทนแรงดันกระแสตรงขาเข้าได้มากกว่า 220 โวลต์โดยที่ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในวงจรรวมทั้งมอสเฟตไม่ลัดวงจรและไม่เกิดความร้อนมาก

4. ในการทดสอบที่โหลดตัวเก็บประจุขนาด 600 พิโกฟารัด, 1.1 นาโนฟารัด, 10.1 นาโนฟารัด, 25.1 นาโนฟารัด, 35.1 นาโนฟารัดและ 48.2 นาโนฟารัดที่แรงดันทดสอบ 5 กิโลโวลต์ สามารถทำการทดสอบที่ความถี่เรโซแนนซ์(Resonance testing) ซึ่งอยู่ในช่วง 10 – 500 เฮิร์ตซ์ได้ทั้งหมด โดยความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้คือ 333, 278, 100, 62.5, 52,6 และ 45.5 เฮิร์ตซ์ตามลำดับและได้ค่ากระแสต่ำสุดที่จุดความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นการลดกระแสของชุดแหล่งจ่ายที่ต้องใช้ในการทดสอบลงได้มาก

6.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการสร้างวงจรสวิตชิงสัญญาณนั้น เกิดปัญหาการลัดวงจรหรือเกิดความร้อนขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้บ่อยครั้ง เช่น
 - ปัญหาตัวขับมอสเฟตที่ใช้ (IR2110) ร้อนและไหม้ที่ค่าแรงดันขาเข้าสูงๆเพราะไม่สามารถควบคุมการเปิด-ปิดของสัญญาณที่ไปขับมอสเฟตได้ทัน ทำให้เกิดการทำงานพร้อมกันและเกิดลัดวงจร แก้ไขโดยทำการเปลี่ยนตัวขับเกตใหม่ไปใช้ไอซีเบอร์ PC923 ซึ่งใช้เวลาในการควบคุมการเปิด-ปิดสัญญาณที่เร็วกว่ามาก
 - ปัญหาไฟตกเนื่องจากโหลดภายในวงจร แก้ไขโดยต่อตัวเก็บประจุคร่อมระหว่างขั้วบวกและลบของแรงดันกระแสตรงขาเข้าเพื่อให้ช่วยเก็บประจุไฟฟ้า
2. สามารถนำแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ควบคุมความถี่ได้นี้ไปพัฒนาต่อเพื่อให้สามารถสร้างแรงดันขาออกกระแสสลับรูปไซน์ได้ที่แรงดันอาร์เอ็มเอส 220 โวลต์
3. ในการสร้างแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับนี้ ใช้การปรับค่าตัวต้านทานในการควบคุมความถี่มูลฐานของสัญญาณขาออก ซึ่งอาจนำไปพัฒนาโดยใส่แป้นพิมพ์หรือปุ่มกดตัวเลขเพื่อใส่ค่าความถี่มูลฐานที่เราต้องการลงไปเพื่อให้เกิดความสะดวกมากยิ่งขึ้น
4. สำหรับการพัฒนาชุดทดสอบหน้างานเพื่อใช้ในการทดสอบสายเคเบิลนั้น สามารถนำสัญญาณแรงดันกระแสสลับขาออกจากชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ปรับความถี่ได้นี้ ไปต่อผ่านหม้อแปลงเรโซแนนซ์เพื่อเพิ่มค่าแรงดันให้มากกว่าระดับ 5 กิโลโวลต์ต่อไป เพื่อรองรับโหลดทดสอบที่มีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นไป

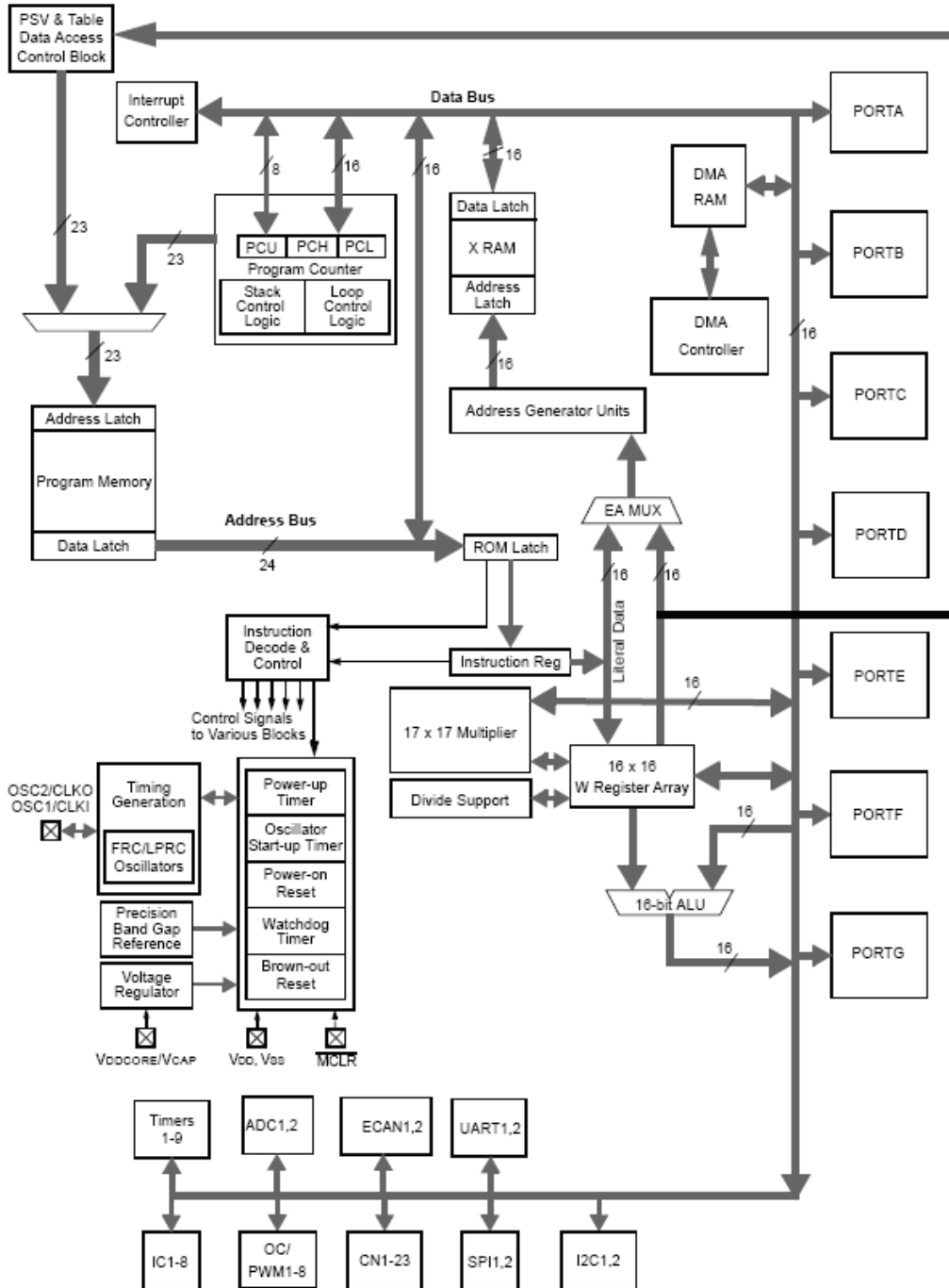
รายการอ้างอิง

- [1] IEC 60060-3, High-voltage test techniques-Part 3: Definitions and requirements For on-site testing, pp. 14-17, 2006.
- [2] IEC 60-1, International Standard High-Voltage Test Technique, 2nd Edition, 1989.
- [3] สำรวัย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [4] วรพงษ์ ไพรินทร์, การออกแบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่ง, รายงานการวิจัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, หน้า 26-49, 2552.
- [5] Chugiat Garagate, Power Electronic Design, the Faculty of Engineering, Electrical Department, Kasetsart University, 2005.
- [6] Miaja, P.F. Lamar, D.G. Arias, M. Hernando, A switching power supply design tool for educational purposes in power electronics, EPE'09 13th European Conference, pp.1 – 10. 8 – 10 September 2009. Barcelona, 2009.
- [7] Beyer, M., Boeck, W., Mouller, K. and Zaengl, W., High Voltage Engineering (Theoretical and Practical fundamentals for application), Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [8] Arora, R. and Mosch, W., High Voltage Insulation Engineering, New Age International Publishers Limited, Wiley Eastern Limited, India, p. 206, 1995.
- [9] ประจัน พลังสันติกุล, PIC Works Examples and C Source Code, กรุงเทพฯ: แอปซอฟต์แวร์เทค
- [10] ณัฐพล วงศ์สุนทรชัย และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC, กรุงเทพมหานคร: อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์
- [11] Gregory Washington, Simulink Tutorial, OHU-ME, pp. 1-31, 2002.
- [12] The MathWorks, Inc., Dynamic System Simulation for MATLAB, Copyright 1990-1999.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

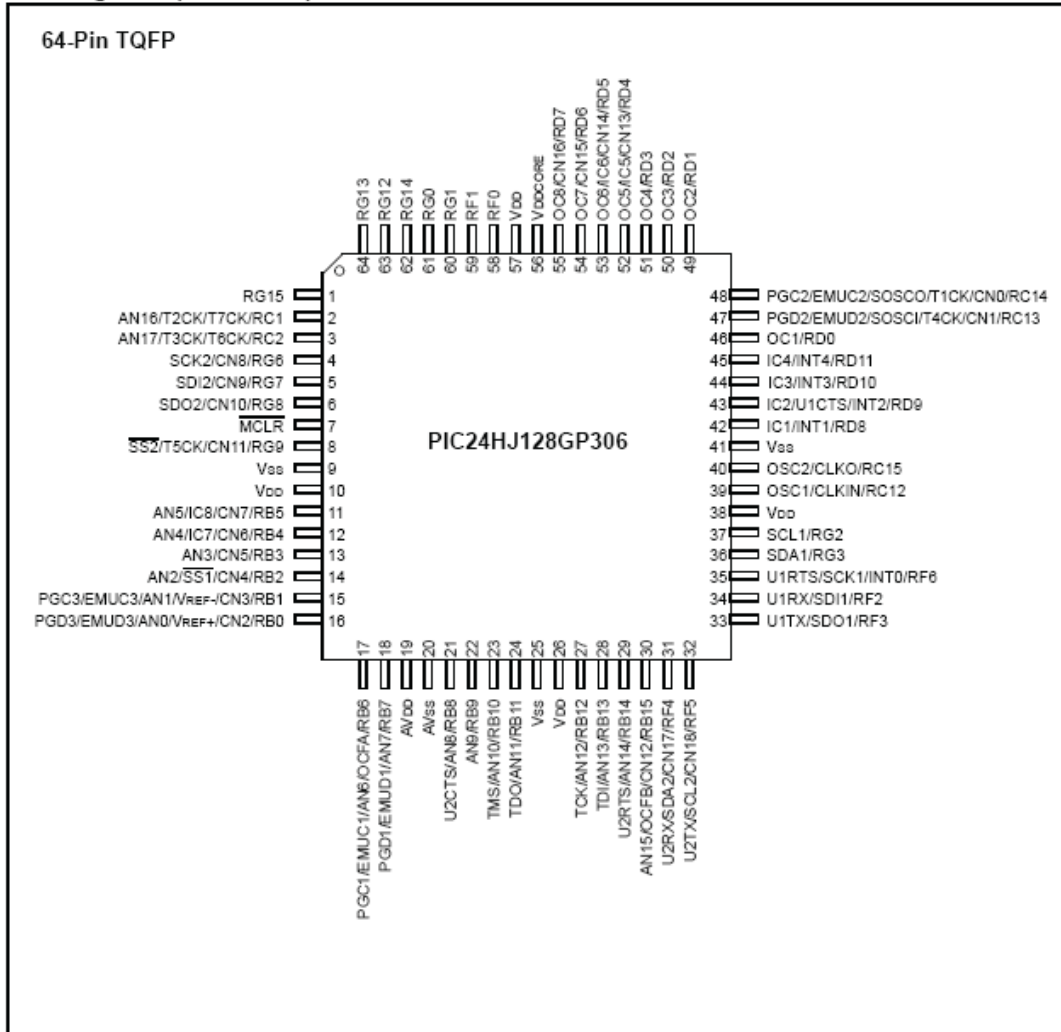
รายละเอียดทางเทคนิคของของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC24HJ128GP306



รูปที่ ก.1 ไตอะแกรมของ PIC24HJ128GP306

PIC24H

Pin Diagrams (Continued)



รูปที่ ก.2 ขาของ PIC24HJ128GP306

รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์ที่สำคัญภายในวงจร

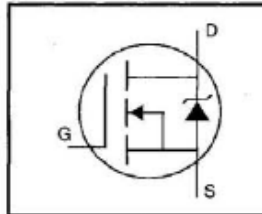
International
IR Rectifier

PD - 94901

IRFP460PbF

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Isolated Central Mounting Hole
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Lead-Free



$$V_{DSS} = 500V$$

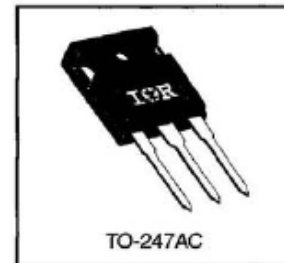
$$R_{DS(on)} = 0.27\Omega$$

$$I_D = 20A$$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-247 package is preferred for commercial-industrial applications where higher power levels preclude the use of TO-220 devices. The TO-247 is similar but superior to the earlier TO-218 package because of its isolated mounting hole. It also provides greater creepage distance between pins to meet the requirements of most safety specifications.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	20	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	13	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	80	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	280	W
	Linear Derating Factor	2.2	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	960	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ③	20	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ④	28	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ⑤	3.5	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to +150	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1 N-m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	0.45	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	40	

รูปที่ ก.3 รายละเอียดทางเทคนิคของมอสเฟตกำลังเบอร์ IRFP460PbF

PC923L0NSZ0F Series

High Speed, Gate Drive DIP 8 pin
*OPIC Photocoupler



■ Description

PC923L0NSZ0F Series contains a LED optically coupled to an OPIC chip.

It is packaged in a 8 pin DIP, available in SMT gullwing lead form option.

Input-output isolation voltage(rms) is 5.0 kV, High speed response (t_{FHL} , t_{PLH} : MAX. 0.5 μ s).

■ Features

1. 8 pin DIP package
2. Double transfer mold package
(Ideal for Flow Soldering)
3. Built-in direct drive circuit for MOSFET / IGBT drive
(I_{O1P} , I_{O2P} : 0.6 A)
4. High speed response (t_{FHL} , t_{PLH} : MAX. 0.5 μ s)
5. Wide operating supply voltage range
(V_{CC} = 15 to 30 V)
6. High noise immunity due to high instantaneous common mode rejection voltage (CM_H : MIN. – 15kV/ μ s, CM_L : MIN. 15kV/ μ s)
7. High isolation voltage between input and output
($V_{iso(rms)}$) : 5.0 kV)
8. Lead-free and RoHS directive compliant

■ Agency approvals/Compliance

1. Recognized by UL1577 (Double protection isolation), file No. E64380 (as model No. PC923L)
2. Approved by VDE, DIN EN60747-5-2^(*) (as an option), file No. 40008898 (as model No. PC923L)
3. Package resin : UL flammability grade (94V-0)

^(*)DIN EN60747-5-2 : successor standard of DIN VDE0984

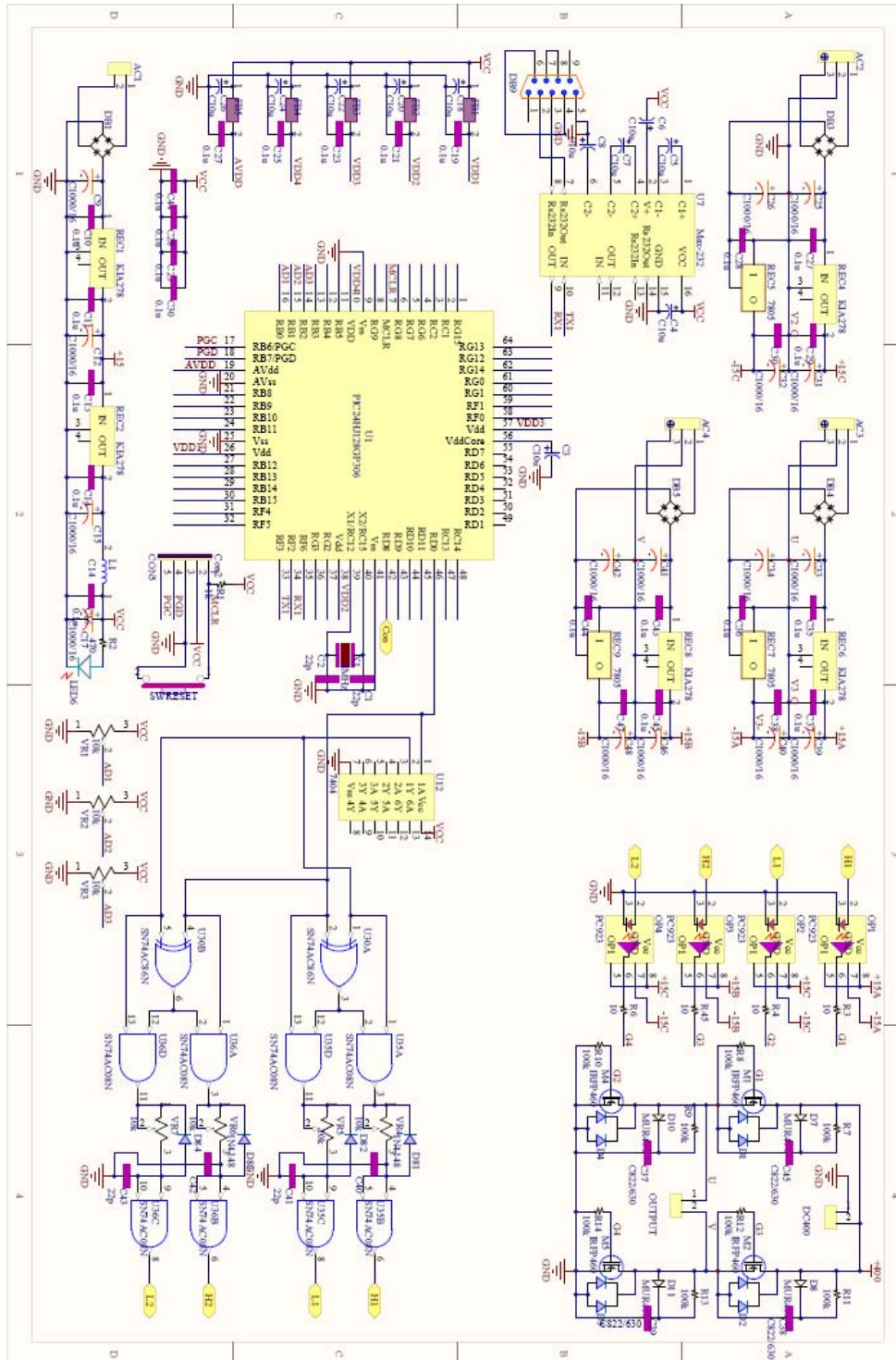
■ Applications

1. IGBT/MOSFET gate drive for inverter control

รูปที่ ก.4 รายละเอียดทางเทคนิคของตัวขับเกต PC923

ภาคผนวก ข

วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลัมแรงสูงที่สามารถควบคุมความถี่ได้ตั้งแต่ 10 – 500 เฮิรตซ์



รูปที่ ข.1 แสดงวงจรของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลัมแรงดันสูงที่สามารถควบคุมความถี่ได้ตั้งแต่ 10 – 500 เฮิรตซ์

ภาคผนวก ค

โปรแกรมและชุดคำสั่งหลักของไมโครคอนโทรลเลอร์

```
#include <p24HJ128GP306.h>
#include <timer.h>
#include <uart.h>
#include <math.h>

#define PI 3.14159265
#define TEST1          LATDbits.LATD1
#define FCY            80000000
#define THE_BAUD_RATE 115200

_FOSCSEL(FNOSC_PRI);      // Primary (XT, HS, EC) Oscillator
_FOSC(FCKSM_CSECME & OSCIOFNC_OFF & POSCMD_XT);
_FWDT(FWDTEN_OFF);      // Watchdog Timer Enabled/disabled by user software

const unsigned char Patt1[8]={0x01,0x02,0x04,0x08,0x10,0x20,0x40,0x80};
const unsigned char PattC[16]={'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','A','B','C','D','E','F'};

unsigned char i;
unsigned char RxArray[256],RxCount,RxIndex,RxStatus;
unsigned char Rx2Array[256],Rx2Count,Rx2Index,Rx2Status,Rx2Start;
unsigned char Status,Buf,A_Act;
unsigned int SubCount1,SubCount2,ADCValue,AD1;
unsigned char CountAdc,Index;
unsigned long TmpAdc;
unsigned int Frequency,FrequencyOld;
unsigned int Array[100];
```

```
float f1,f2;
```

```
const unsigned int SineTable[100] = {
```

```
800,
```

```
850,
```

```
900,
```

```
949,
```

```
998,
```

```
1047,
```

```
1094,
```

```
1140,
```

```
1185,
```

```
1228,
```

```
1269,
```

```
1309,
```

```
1347,
```

```
1382,
```

```
1416,
```

```
1446,
```

```
1475,
```

```
1500,
```

```
1523,
```

```
1543,
```

```
1560,
```

```
1574,
```

```
1585,
```

```
1593,
```

```
1597,
```

```
1599,
```

```
1597,
```

```
1593,
```


1585,
1574,
1560,
1543,
1523,
1500,
1475,
1446,
1416,
1382,
1347,
1309,
1269,
1228,
1185,
1140,
1094,
1047,
998,
949,
900,
850,
800,
749,
699,
650,
601,
552,
505,
459,
414,

371,
330,
290,
252,
217,
183,
153,
124,
99,
76,
56,
39,
25,
14,
6,
2,
0,
2,
6,
14,
25,
39,
56,
76,
99,
124,
153,
183,
217,
252,
290,

```

330,
371,
414,
459,
505,
552,
601,
650,
699,
749
};

```

```
void Delay1(unsigned long Dat)
```

```
{ unsigned char i;
```

```
while(Dat > 1)
```

```
{
```

```
for(i=0;i<=250;i++){
```

```
Dat--;
```

```
}
```

```
}
```

```
void _ISR_U1TXInterrupt(void)
```

```
{
```

```
IFS0bits.U1TXIF = 0;    // Clear TX interrupt flag
```

```
}
```

```
//----- Interrupt service routine RX UART1 -----//
```

```
void _ISR_U1RXInterrupt(void)
```

```
{ unsigned char buff;
```

```
IFS0bits.U1RXIF = 0;    // Clear RX interrupt flag
```

```
RxArray[RxCount] = ReadUART1();
```

```

RxCount++;
}

void _ISR_U2TXInterrupt(void)
{
IFS1bits.U2TXIF = 0;    // Clear TX interrupt flag
}

//----- Interrupt service routine  RX UART1 -----//
void _ISR_U2RXInterrupt(void)
{ unsigned char buff;
IFS1bits.U2RXIF = 0;    // Clear RX interrupt flag
}

void InitUART_1(void)
{
U1MODEbits.UARTEN = 0;    // Bit15 TX, RX DISABLED, ENABLE at end of func
U1MODEbits.USIDL = 0;    // Bit13 Continue in Idle
U1MODEbits.IREN = 0;    // Bit12 No IR translation
U1MODEbits.RTSMD = 0;    // Bit11 Simplex Mode
U1MODEbits.UEN = 0;    // Bits8,9 TX,RX enabled, CTS,RTS not
U1MODEbits.WAKE = 0;    // Bit7 No Wake up (since we don't sleep here)
U1MODEbits.LPBACK = 0;    // Bit6 No Loop Back
U1MODEbits.ABAUD = 0;    // Bit5 No Autobaud (would require sending '55')
U1MODEbits.BRGH = 1;
U1MODEbits.PDSEL = 0;    // Bits1,2 8bit, No Parity
U1MODEbits.STSEL = 0;    // Bit0 One Stop Bit
U1BRG = 86;
U1STAbits.UTXISEL1 = 0;    //Bit15 Int when Char is transferred (1/2 config!)
U1STAbits.UTXINV = 0;    //Bit14 N/A, IRDA config
U1STAbits.UTXISEL0 = 0;    //Bit13 Other half of Bit15
U1STAbits.UTXBRK = 0;    //Bit11 Disabled
U1STAbits.UTXEN = 0;    //Bit10 TX pins controlled by periph

```

```

U1STAbits.UTXBF = 0;           //Bit9 *Read Only Bit*
U1STAbits.TRMT = 0;           //Bit8 *Read Only bit*
U1STAbits.URXISEL = 0;        //Bits6,7 Int. on character recieved
U1STAbits.ADDEN = 0;          //Bit5 Address Detect Disabled
U1STAbits.RIDLE = 0;          //Bit4 *Read Only Bit*
U1STAbits.PERR = 0;           //Bit3 *Read Only Bit*
U1STAbits.FERR = 0;           //Bit2 *Read Only Bit*
U1STAbits.OERR = 0;           //Bit1 *Read Only Bit*
U1STAbits.URXDA = 0;          //Bit0 *Read Only Bit*
IEC0bits.U1RXIE = 1;          // Enable Recieve Interrupts
U1MODEbits.UARTEN = 1;        // And turn the peripheral on
U1STAbits.UTXEN = 1;
}

void InitUART_2(void)
{
U2MODEbits.UARTEN = 0;         // Bit15 TX, RX DISABLED, ENABLE at end of func
U2MODEbits.USIDL = 0;          // Bit13 Continue in Idle
U2MODEbits.IREN = 0;           // Bit12 No IR translation
U2MODEbits.RTSMD = 0;          // Bit11 Simplex Mode
U2MODEbits.UEN = 0;            // Bits8,9 TX,RX enabled, CTS,RTS not
U2MODEbits.WAKE = 0;           // Bit7 No Wake up (since we don't sleep here)
U2MODEbits.LPBACK = 0;         // Bit6 No Loop Back
U2MODEbits.ABAUD = 0;          // Bit5 No Autobaud (would require sending '55')
U2MODEbits.BRGH = 1;
U2MODEbits.PDSEL = 0;          // Bits1,2 8bit, No Parity
U2MODEbits.STSEL = 0;          // Bit0 One Stop Bit
U2BRG = 86;
U2STAbits.UTXISEL1 = 0;        //Bit15 Int when Char is transferred (1/2 config!)
U2STAbits.UTXINV = 0;          //Bit14 N/A, IRDA config
U2STAbits.UTXISEL0 = 0;        //Bit13 Other half of Bit15

```

```

U2STAbits.UTXBRK = 0;           //Bit11 Disabled
U2STAbits.UTXEN = 0;           //Bit10 TX pins controlled by periph
U2STAbits.UTXBF = 0;           //Bit9 *Read Only Bit*
U2STAbits.TRMT = 0;           //Bit8 *Read Only bit*
U2STAbits.URXISEL = 0;         //Bits6,7 Int. on character recieved
U2STAbits.ADDEN = 0;           //Bit5 Address Detect Disabled
U2STAbits.RIDLE = 0;           //Bit4 *Read Only Bit*
U2STAbits.PERR = 0;           //Bit3 *Read Only Bit*
U2STAbits.FERR = 0;           //Bit2 *Read Only Bit*
U2STAbits.OERR = 0;           //Bit1 *Read Only Bit*
U2STAbits.URXDA = 0;           //Bit0 *Read Only Bit*
IEC1bits.U2RXIE = 1;          // Enable Recieve Interrupts
U2MODEbits.UARTEN = 1;        // And turn the peripheral on
U2STAbits.UTXEN = 1;
}

// Initial UART1 Function
void MonInt(unsigned int Dat)
{
while(BusyUART1());putcUART1('\n');
while(BusyUART1());putcUART1('\r');
if(Dat >= 10000){ while(BusyUART1());putcUART1(PattC[(Dat/10000)%10]);}
if(Dat >= 1000){ while(BusyUART1());putcUART1(PattC[(Dat/1000)%10]);}
if(Dat >= 100){ while(BusyUART1());putcUART1(PattC[(Dat/100)%10]);}
if(Dat >= 10){ while(BusyUART1());putcUART1(PattC[(Dat/10)%10]);}
while(BusyUART1());putcUART1(PattC[Dat%10]);
}

void MonInt_2(unsigned int Dat)
{
while(BusyUART2());putcUART2('\n');
while(BusyUART2());putcUART2('\r');
}

```

```

if(Dat >= 10000){ while(BusyUART2());putcUART2(PattC[(Dat/10000)%10]);}
if(Dat >= 1000){ while(BusyUART2());putcUART2(PattC[(Dat/1000)%10]);}
if(Dat >= 100){ while(BusyUART2());putcUART2(PattC[(Dat/100)%10]);}
if(Dat >= 10){ while(BusyUART2());putcUART2(PattC[(Dat/10)%10]);}
while(BusyUART2());putcUART2(PattC[Dat%10]);
}

```

```

void MonInt_(unsigned int Dat)
{
while(BusyUART1());putcUART1(' ');
if(Dat >= 10000){ while(BusyUART1());putcUART1(PattC[(Dat/10000)%10]);}
if(Dat >= 1000){ while(BusyUART1());putcUART1(PattC[(Dat/1000)%10]);}
if(Dat >= 100){ while(BusyUART1());putcUART1(PattC[(Dat/100)%10]);}
if(Dat >= 10){ while(BusyUART1());putcUART1(PattC[(Dat/10)%10]);}
while(BusyUART1());putcUART1(PattC[Dat%10]);
}

```

```

void Timer1_Init(void)
{ unsigned int config,period;
CloseTimer1();
ConfigIntTimer1(T1_INT_ON);
config = T1_ON & T1_IDLE_STOP & T1_GATE_OFF & T1_PS_1_8 & T1_SYNC_EXT_OFF &
T1_SOURCE_INT;
period = 50; //5000;//3125;
OpenTimer1(config,period);
}

```

```

void _ISR_T1Interrupt(void)
{
_T1IF = 0;
}

```

```

void configure_CN(void)
{
    CNEN1bits.CN2IE = 1;
    CNEN1bits.CN3IE = 1;
    CNEN1bits.CN4IE = 1;
    CNEN1bits.CN5IE = 1;    // Enable CN3 pin for interrupt detection
    IEC1bits.CNIE = 1;      // Enable CN interrupts
    IFS1bits.CNIF = 0;      // Reset CN interrupt
}

void __attribute__((__interrupt__)) _CNInterrupt(void)
{
    IFS1bits.CNIF = 0; // Clear CN interrupt

}

void Rx_00(void)
{
    if(RxCount != RxIndex)
    {
        if(RxArray[RxIndex] == '+')
        {
            if(Frequency < 500){Frequency++;}
            MonInt(Frequency);
        }
        else if(RxArray[RxIndex] == '-')
        {
            if(Frequency > 0){Frequency--;}
            MonInt(Frequency);
        }
        RxIndex++;
    }
}

```



```
}  
}  
void Rx_01(void)  
{  
  
}  
void Rx_02(void)  
{  
  
}  
void Rx_03(void)  
{  
  
}  
void Rx_04(void)  
{  
  
}  
  
void RxService(void)  
{  
switch(RxStatus)  
{  
case 0x00 : Rx_00(); break;  
case 0x01 : Rx_01(); break;  
case 0x02 : Rx_02(); break;  
case 0x03 : Rx_03(); break;  
case 0x04 : Rx_04(); break;  
}  
}  
unsigned char Convert(unsigned char Dat)
```

```

{ unsigned char Tmp;
if(Dat > 150){Tmp = Dat-150; Tmp = 150 - Tmp; return(Tmp); }
else{Tmp = 150 - Dat; Tmp = 150 + Tmp; return(Tmp); }
}

void __attribute__((__interrupt__, no_auto_psv)) _T2Interrupt( void )
{

IFS0bits.T2IF = 0; // Clear Timer 2 interrupt flag
}

void __attribute__((__interrupt__, no_auto_psv)) _T3Interrupt( void )
{

IFS0bits.T3IF = 0; // Clear Timer 3 interrupt flag

Index++;
if(Index > 99){Index = 0;}
OC1RS = SineTable[Index];
}

void Init_OC_Timer2( void )
{
OC1CONbits.OCM = 0b000;           // Disable Output Compare Module
OC1RS = 800;                     // Write the duty cycle for the first PWM pulse
OC1R = 0;                        // Write the duty cycle for the second PWM pulse
OC1CONbits.OCTSEL = 0; // 1= Tim3 // Select Timer 2 as output compare time base
OC1CONbits.OCM = 0b110;         // Select the Output Compare mode
}

void Init_timer2( void )

```

```

{
// 0.000000025 At 40 MIP
T2CONbits.TON = 0;           // Disable Timer
T2CONbits.TSIDL = 0;
T2CONbits.TGATE = 0;        // Disable Gated Timer mode
T2CONbits.TCKPS = 0b00;
T2CONbits.TCS = 0;          // Select internal instruction cycle clock
TMR2 = 0x0000;              // Clear timer register
//PR2 = 0x224f;              // Load the period value 14ms
//PR2 = 8000;                 // = 5.0 kHz
PR2 = 1600;
IFS0bits.T2IF = 0;          // Clear Timer 2 Interrupt Flag
IEC0bits.T2IE = 1;          // Enable Timer 2 interrupt
T2CONbits.TON = 1;          // Start Timer
}

```

```
void Init_timer3( void )
```

```

{
T3CONbits.TON = 0;           // Disable Timer
T3CONbits.TSIDL = 0;
T3CONbits.TGATE = 0;        // Disable Gated Timer mode
T3CONbits.TCKPS = 0b00;
T3CONbits.TCS = 0;          // Select internal instruction cycle clock
TMR3 = 0x0000;              // Clear timer register
PR3 = 2000;
IFS0bits.T3IF = 0;          // Clear Timer 3 Interrupt Flag
IEC0bits.T3IE = 1;          // Enable Timer 3 interrupt
T3CONbits.TON = 1;          // Start Timer
}

```

```
unsigned int CalFre(unsigned int Dat)
```

```

{ unsigned int Buff;
  unsigned long Tmp1;
  Tmp1 = Dat;
  Tmp1 *= 39200;
  Tmp1 /= 1023;
  Buff = Tmp1;
  Buff += 800;
  return(Buff);
}

```

```

void CalTable(unsigned int Dat)
{
}

```

```

int main (void)
{
  PLLFBD=38; // M=40
  CLKDIVbits.PLLPOST=0; // N1=2
  CLKDIVbits.PLLPRE=0; // N2=2
  OSCTUN=0; // Tune FRC oscillator, if FRC is used
  RCONbits.SWDTEN=0;
  __builtin_write_OSCCONH(0x03); // Initiate Clock Switch to Primary
  // Oscillator with PLL (NOSC=0b011)
  __builtin_write_OSCCONL(0x01); // Start clock switching
  while (OSCCONbits.COSC != 0b011); // Wait for Clock switch to occur

  while(OSCCONbits.LOCK!=1) {};
  AD1PCFGL = 0xFFFF;
  AD1PCFGH = 0xFFFF;
  TRISD = 0x00;//0b1111111111111000;

```

```
PORTD = 0x0000;
LATD = 0x0000;
TRISC = 0x00;
PORTC = 0x0000;
LATC = 0x0000;
TRISG = 0x00;//0b0000110010111100;
ODCG = 0x0000;
PORTG = 0x0000;
LATG = 0xFFFF;
TRISF = 0b1111111111001100;
PORTF = 0x0000;
LATF = 0x0000;
TRISB = 0b1111100111001111;
PORTB = 0x0000;
LATB = 0x0000;
InitUART_1();
InitUART_2();
configure_CN();

Init_OC_Timer2();
Init_timer2();
Init_timer3();

AD1PCFGL = 0xFFFFB;           // all PORTB = Digital; RB2 = analog
AD1CON1 = 0x0000;             // SAMP bit = 0 ends sampling ...
AD1CHS0 = 0x0002;            // Connect RB2/AN2 as CH0 input ..
AD1CSSL = 0;
AD1CON3 = 0x0002;            // Manual Sample, Tad = internal 2 Tcy
AD1CON2 = 0;
AD1CON1bits.ADON = 1;        // turn ADC ON
```

```
MonInt(1234);
MonInt_2(7890);
RxStatus = 0x00;
Status = 0x00;
SubCount1 = 10;
Frequency = 50;
PR3 = 40000;

while (1)
{
  RxService();
  AD1CON1bits.SAMP = 1;      // start sampling ...
  Delay1(100);
  AD1CON1bits.SAMP = 0;     // start Converting
  while (!AD1CON1bits.DONE); // conversion done?
  ADCValue = ADC1BUF0;     // yes then get ADC value
  TmpAdc += ADCValue;
  CountAdc++;
  if(CountAdc >= 15)
  {
    CountAdc = 0;
    TmpAdc /= 15;
    AD1 = TmpAdc;
    TmpAdc = 0;
    PR3 = CalFre(AD1);
  }
}
}
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอริป สุমনะไพศาล เกิดเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า กำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษา ต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550