



การควบคุมตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง
ในระบบจ่ายไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่

BI-DIRECTIONAL DC CONVERTER CONTROL
IN A POWER GENERATION SYSTEM WITH BATTERY

นายจิตติวุฒิ กระพันธ์เขียว รหัส 54360995
นายณัฐพงษ์ คำยา รหัส 54361015
นายสุรศักดิ์ จันทร์อิม รหัส 54361169

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 20.0.0. 2556
เลขทะเบียน..... 16903162
เลขเรียกหนังสือ..... 55.
บย.วิบูลย์ธรรมสาร 9426 ก 2557

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2557



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การควบคุมตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในระบบจ่ายไฟฟ้าที่ใช้
แบตเตอรี่

ผู้ดำเนินโครงการ นายจิตติวุฒิ กระพันธ์เขียว รหัส 54360995
นายณัฐพงษ์ คำยา รหัส 54361015
นายสุรศักดิ์ จันทร์อ้อม รหัส 54361169


ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทร์มินทร์

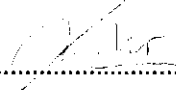
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

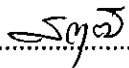
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทร์มินทร์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย)


.....กรรมการ
(ดร. สราวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การควบคุมตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในระบบจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ แบตเตอรี่
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายจิตติวุฒิ กระพันธ์เขียว รหัส 54360995
	นายณัฐพงษ์ คำยา รหัส 54361015
	นายสุรศักดิ์ จันทร์อิม รหัส 54361169
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทร์มินทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการควบคุมระบบจ่ายไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนให้กับโหลดที่ต้องการกำลังไฟฟ้าคงที่ โดยมีตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางเพื่อควบคุมการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328 ควบคุมการทำงานของระบบ ในโครงการงานได้สร้างแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 24 V สำหรับจำลองการสร้างกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนร่วมกับแบตเตอรี่แบบตะกั่ว 12 V และจ่ายโหลดตัวต้านทาน โดยเชื่อมต่อกันผ่านบัลลัสกระแสตรง 24 V รูปแบบวิธีการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าที่ออกแบบนี้ใช้ค่ากำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเงื่อนไขซึ่งแบ่งเป็นสามกรณี คือเมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความต้องการของโหลดจึงนำกำลังไฟฟ้าที่เหลือมาอัดประจุแบตเตอรี่ผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางซึ่งขณะนี้ทำหน้าที่เป็นวงจรทอนระดับแรงดัน กรณีที่สองคือเมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าความต้องการของโหลดจึงดึงกำลังไฟฟ้าส่วนที่ขาดมาจากแบตเตอรี่โดยคายประจุผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางซึ่งขณะนี้ทำหน้าที่เป็นวงจรทอนระดับแรงดัน และกรณีสุดท้ายคือเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้จึงควบคุมให้แบตเตอรี่คายประจุเพื่อจ่ายโหลดเพียงลำพัง

Project title Bi-directional DC Converter Control in a Power Generation System with Battery

Name Mr. Jittiwut Krapankiaw ID. 54360995
Mr. Nattapong Khamya ID. 54361015
Mr. Surasak Jan-im ID. 54361169

Project advisor Asst. Prof. Niphath Jantharamin, Ph.D.

Major Electrical Engineering

Department Electrical and Computer Engineering

Academic year 2014

Abstract

This thesis presents a power flow control in a renewable power generation system for a constant load demand, in which charging and discharging of a battery is controlled via a bi-directional DC converter. The system operation of the system is dictated by a microcontroller ATmega328. In a power generation model built in this project a 24V DC generator that is used for modeling the wavering power generation of the renewable sources, a 12V lead-acid battery, and a resistive load are interconnected via a 24V DC bus. Depending on the output power of the generator the system works in three operating modes. Firstly, the generator outputs more power than the load demand, so the surplus power is stored in the battery via the bi-directional converter, which acts now as a step-down converter. Secondly, the generator outputs less power than the load demand, so the battery discharges via the bi-directional converter, which acts now as a step-up converter. Last, the generator cannot power the load, so the load is supplied solely by the battery.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินโครงการขอขอบผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพัทธ์ จันทรินทร์อาจารย์ปรึกษาโครงการ ซึ่งเป็นผู้ที่เอาใจใส่ในทุกรายละเอียดของการดำเนินโครงการ โดยให้ทั้งความรู้และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งโครงการสำเร็จลุล่วง รวมถึงแนะนำการเขียนปริญญาบัตรการใช้ภาษา และตรวจทานแก้ไขอย่างละเอียดจนได้ปริญญาบัตรเป็นรูปเล่มสมบูรณ์

ขอขอบคุณคุณพลวัฒน์ ทองบัวบาน (พี่เกม) รุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันได้ทำงานเป็นวิศวกรระดับ 4 แผนกควบคุมการจ่ายไฟ กองควบคุมและบำรุงรักษาฝ่ายปฏิบัติการเครือข่ายเขต 2 ค 1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จ.พิษณุโลก ที่ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งในการเลือกใช้อุปกรณ์และการสร้างวงจรทำให้ผู้ดำเนินงานมีแนวทางในการสร้างชิ้นงานให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของโครงการที่ตั้งไว้

และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้อุปกรณ์ในการทดสอบชิ้นงานที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะที่ร้อยตรีธานี โกสุม (พี่ต้น) ซึ่งเป็นรุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และปัจจุบันเป็นครูช่างของภาควิชาที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและการยืมใช้เครื่องมือวัดจนกระทั่งการทดสอบต่างๆลุล่วง

รวมทั้งขอขอบคุณรัฐบาลไทยที่ตั้งกองทุนเงินให้กู้ยืมเพื่อการศึกษา (กยศ.) ซึ่งสนับสนุนให้ทุนการศึกษาแก่คณะผู้ดำเนินโครงการตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับปริญญาตรี

ในท้ายที่สุดนี้ เหนือสิ่งอื่นใด ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ซึ่งให้การสนับสนุนในทุกด้านเกี่ยวกับการศึกษาของผู้ดำเนินโครงการ รวมทั้งมอบความเมตตา และคอยเป็นกำลังใจให้จนประสบความสำเร็จในวันนี้

นายจิตติวุฒิ กระพันธ์เขียว

นายณัฐพงษ์ คำยา

นายสุรศักดิ์ จันทรอิม

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท..... ก	ก
บทคัดย่อภาษาไทย..... ข	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ค	ค
กิตติกรรมประกาศ..... ง	ง
สารบัญ..... จ	จ
สารบัญตาราง..... ช	ช
สารบัญรูป..... ฌ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของ โครงการงาน..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงาน..... 1	1
1.3 ขอบเขตของ โครงการงาน..... 2	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน..... 2	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจาก โครงการงาน..... 3	3
1.6 งบประมาณ..... 3	3
บทที่ 2 การควบคุมตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางที่ต่อกับแบตเตอรี่..... 4	4
2.1 แผนภาพวงจรของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง..... 4	4
2.1.1 วงจรทอนระดับแรงดัน..... 5	5
2.1.2 วงจรทบระดับแรงดัน..... 8	8
2.2 สัญญาณพีคดับเบิ้ลยูเอ็ม..... 13	13
2.3 สัญญาณฟันเลื่อยและสัญญาณสามเหลี่ยม..... 15	15
2.4 ออปแอมป์..... 17	17
2.4.1 สัญลักษณ์และตัวถังของออปแอมป์..... 17	17
2.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของออปแอมป์..... 18	18
2.4.3 การทำงานของออปแอมป์..... 19	19
2.4.4 การต่อออปแอมป์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์..... 20	20
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328..... 22	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 แหล่งพลังงานสำรองที่ใช้ในการจ่ายโหลด.....	24
2.6.1 โครงสร้างของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว.....	24
2.6.2 ปฏิกริยาทางเคมีในแบตเตอรี่แบบตะกั่ว.....	25
2.6.3 กราฟคุณสมบัติขณะการคายประจุ.....	27
2.6.4 การอัดประจุ.....	28
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า.....	29
3.1 การออกแบบขั้นตอนการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้า.....	29
3.2 การสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์.....	32
3.2.1 การสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม.....	32
3.2.2 วงจรเปรียบเทียบ.....	34
3.3 การขั้มนำมอสเฟตในตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง.....	37
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	41
4.1 การทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร.....	41
4.2 การทดสอบการทำงานของระบบจ่ายไฟ.....	44
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	48
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	49
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก ก รหัสต้นฉบับของโปรแกรมควบคุม.....	51
ภาคผนวก ข รายละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328.....	57
ภาคผนวก ค รายละเอียดของมอสเฟตหมายเลข IRFZ44N.....	64
ภาคผนวก ง รายละเอียดของไดโอดหมายเลข FR203.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ รายละเอียดของไอซีหมายเลข LF351	72
ภาคผนวก ฉ รายละเอียดของรีเลย์	81
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	84



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางช่วงทบทระดับแรงดัน.....	38
3.2 ผลการทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางช่วงทอนระดับแรงดัน.....	38
4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรทบทระดับแรงดัน.....	42
4.2 ผลการทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในช่วงการทบทระดับแรงดัน.....	42
4.3 ผลการทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในช่วงการทอนระดับแรงดัน.....	43
4.4 ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบแบบจำลองระบบจ่ายไฟ.....	45
4.5 ค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพจากการทดสอบแบบจำลองระบบจ่ายไฟ.....	45



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง	4
2.2 แผนภาพวงจรทอนระดับแรงดัน	5
2.3 แผนภาพวงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส	6
2.4 แผนภาพวงจรสมมูลวงจรทอนระดับแรงดันขณะสวิตช์ไม่นำกระแส	7
2.5 แผนภาพวงจรทอนระดับแรงดัน	8
2.6 แผนภาพวงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส	9
2.7 แผนภาพวงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส	10
2.8 รูปคลื่นสัญญาณในวงจรทอนระดับแรงดัน	12
2.9 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรทอนระดับแรงดัน	12
2.10 แผนภาพโครงสร้างการกำเนิดสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม	13
2.11 การสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มทั่วไป	14
2.12 แผนภาพ โครงสร้างการกำเนิดสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มอย่างง่าย	14
2.13 สัญญาณพื้นเลื้อย	15
2.14 สัญญาณสามเหลี่ยม	15
2.15 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม	16
2.16 สัญญาณของออปแอมป์	17
2.17 ตัวตั้งของออปแอมป์	17
2.18 การขยายสัญญาณกระแสสลับแบบวงเปิด โดยใช้วงจรกลับเฟส	18
2.19 การขยายสัญญาณกระแสตรงแบบวงเปิด โดยใช้วงจรกลับเฟส	18
2.20 การขยายสัญญาณกระแสสลับแบบวงเปิด โดยใช้วงจรไม่กลับเฟส	19
2.21 การขยายสัญญาณกระแสตรงแบบวงเปิด โดยใช้วงจร ไม่กลับเฟส	19
2.22 การทำงานของออปแอมป์ที่อินพุตด้านเดียว	20
2.23 การทำงานของออปแอมป์ที่อินพุตสองด้านแบบผลต่าง	20
2.24 การทำงานของออปแอมป์ที่อินพุตแบบ โหมดทั่วไป	20
2.25 ลักษณะวงจรป้อนกลับแบบลบ	21
2.26 ลักษณะวงจรป้อนกลับแบบลบ	21
2.27 แผงวงจร Arduino	22
2.28 หน่วยประมวลผลกลาง ATmega328 ขนาด 28 ขา	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว.....	25
2.30 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่อคายประจุ	26
2.31 การคายประจุของแบตเตอรี่	26
2.32 กราฟคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่ NP4-12	27
2.33 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่ออัดประจุ.....	28
3.1 แผนภาพแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าที่ออกแบบ	29
3.2 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบขณะที่กำลังการผลิตของ.....	30
3.3 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบขณะที่กำลังการผลิตของ.....	31
3.4 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบขณะที่กำลังการผลิตของ.....	31
3.5 รูปและขนาดต่างๆของ LF351	32
3.6 แผนภาพวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมจาก LF351	32
3.7 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้สร้างขึ้นที่ความถี่ 25 kHz	33
3.8 แผนภาพวงจรเปรียบเทียบ.....	34
3.9 แผนภาพวงจรสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์.....	34
3.10 สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล 20%.....	35
3.11 สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล 50%.....	35
3.12 สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ที่ค่าดีวตี้ไซเคิล 80%.....	36
3.13 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์	36
3.14 แผนภาพวงจรตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง.....	37
3.15 ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง.....	39
3.16 การติดตั้งแผงวงจรในแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า	40
3.17 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรของระบบจ่ายไฟฟ้าที่ออกแบบ.....	40
4.1 ค่ากำลังไฟฟ้าจากผลการทดสอบการทำงานของแบบจำลองระบบจ่ายไฟ.....	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

จากสถานการณ์ที่ความต้องการใช้พลังงานของโลกเพิ่มขึ้นทุกปี สภาวะราคาน้ำมันแพง ความกังวลเกี่ยวกับการหมดสิ้นไปของเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuels) อันได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งสภาวะโลกร้อน ส่งผลให้พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเพราะเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม จึงถูกนำมาใช้ทดแทนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยในสถานที่ที่ห่างไกลจากระบบจ่ายไฟของการไฟฟ้าทำให้การติดตั้งเสาและสายไฟฟ้าเป็นไปได้ด้วยความยากลำบากและใช้งบประมาณสูงจนอาจไม่คุ้มกับการลงทุน พลังงานหมุนเวียนจึงมีบทบาทสำคัญที่จะทำให้พื้นที่ในส่วนนั้นสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้ แต่เนื่องจากปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภทมีค่าไม่แน่นอนเพราะขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา เช่น ความเข้มแสงอาทิตย์ ความเร็วลม และความดันของน้ำ หรือความแรงของคลื่น ซึ่งมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นหากนำมาใช้ในการจ่ายพลังงานให้กับโหลดที่ต้องการกำลังไฟฟ้าคงที่จึงจำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่เพื่อช่วยส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในขณะที่กำลังการผลิตที่ได้จากพลังงานหมุนเวียนไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด

ในโครงการนี้ได้ให้ความสนใจกับการควบคุมระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟที่ใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ให้กับโหลดได้อย่างต่อเนื่อง โดยในขณะที่ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีมากกว่าที่โหลดต้องการ กำลังไฟฟ้าที่เหลือจะนำไปอัดประจุแบตเตอรี่ และในขณะที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าความต้องการของโหลด แบตเตอรี่จะคายประจุเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าส่วนต่างให้กับโหลด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองการควบคุมการจ่ายไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนให้โหลดที่ต้องการกำลังไฟฟ้าคงที่ โดยใช้ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง (Bi-directional DC converter) ในการควบคุมการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) จำลองการสร้างกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 V
- 2) สร้างตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางเพื่อใช้อัดประจุและคายประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่วขนาด 12 V
- 3) ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสองทิศทางเพื่อจ่ายไฟให้โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าคงที่ตลอดเวลา

1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	พ.ศ. 2557				พ.ศ. 2558				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1) ศึกษาการทำงานของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง									
2) ศึกษาหลักสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็ม									
3) ออกแบบระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่									
4) สร้างแบบจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่									
5) ทดสอบและปรับปรุงชิ้นงาน									
6) สรุปผลและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

แบบจำลองระบบควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดโดยใช้ตัวแปลงผันกำลัง กระแสตรงสองทิศทางที่สร้างขึ้นสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ โหลดได้อย่างต่อเนื่องและคงที่ทั้ง ในช่วงที่แหล่งกำเนิดสร้างกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าและน้อยกว่าค่าที่โหลดต้องการ จากหลักการ ดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ในระบบจ่ายไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีกำลังการผลิตไม่แน่นอนและ ยังสามารถนำมาปรับใช้เป็นระบบจ่ายไฟสำรองสำหรับโหลดที่เชื่อมต่อการไฟฟ้าฯ เพื่อ แก้ปัญหาในกรณีที่เกิดสถานะแรงดันตกหรือไฟดับได้

1.6 งบประมาณ

1) แบตเตอรี่แบบตะกั่ว 12 V	400 บาท
2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พิกัด 24 V	800 บาท
3) ตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงสองทิศทาง	400 บาท
4) ไมโครคอนโทรลเลอร์	400 บาท
5) อุปกรณ์ในการต่อวงจร	200 บาท
6) ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่มปริญญาบัตร	800 บาท
รวมทั้งสิ้นเป็นเงิน (สามพันบาทถ้วน)	<u>3,000 บาท</u>
หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	

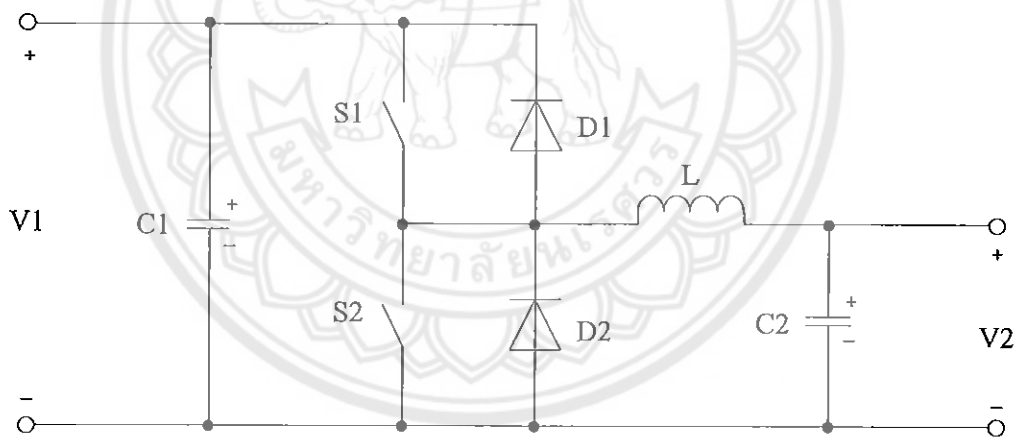
บทที่ 2

การควบคุมตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางที่ต่อกับแบตเตอรี่

ปัญหาที่มักพบกับการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนนั้นคือความไม่แน่นอนของกำลังการผลิต ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระบบที่ต้องการความมั่นคงสูง หรือระบบต่างๆที่ต้องใช้กำลังไฟฟ้าในการทำงานอย่างต่อเนื่องและคงที่ จึงมีการคิดระบบที่จะทำให้สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานสำรองด้วยระบบควบคุมตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางเพื่อใช้ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ ในโครงการนี้จึงได้อธิบายทฤษฎีและหลักการดำเนินงานพื้นฐานที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับระบบดังกล่าว

2.1 แผนภาพวงจรของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง

ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง (Bi-directional DC converter) สามารถสร้างขึ้นจากการรวมกันของวงจรทอนระดับแรงดันและวงจรทอนระดับแรงดันดังรูปที่ 2.1

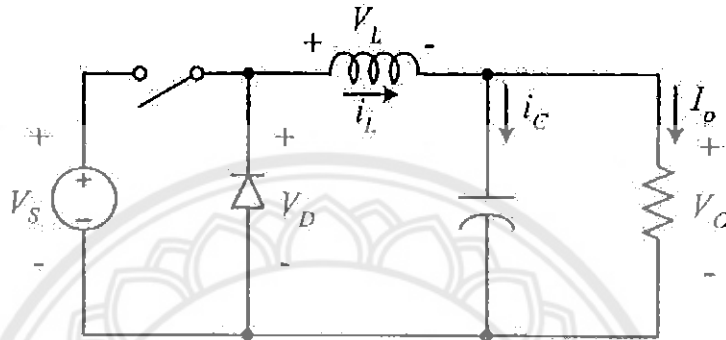


รูปที่ 2.1 แผนภาพตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง

เมื่อต้องการให้กำลังไฟฟ้าไหลผ่านตัวแปลงผันฯจากซ้ายไปขวา เราสามารถทำได้โดยควบคุมสวิตช์ S1 เท่านั้นที่ทำงาน ส่งผลให้สวิตช์ S2 และไดโอด D1 ไม่นำกระแสจึงทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน และเมื่อต้องการให้กำลังไฟฟ้าไหลผ่านตัวแปลงผันฯจากขวาไปซ้าย สามารถควบคุมสวิตช์ S2 ทำงาน ส่งผลให้สวิตช์ S1 และไดโอด D2 ไม่นำกระแสจึงทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน

2.1.1 วงจรทอนระดับแรงดัน

วงจรทอนระดับแรงดัน คือ วงจรที่ทำให้ระดับแรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุต และเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีความเป็นกระแตรงมากๆจะนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ซึ่งโดยมากจะเลือกใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการผกผันกับกำลังสองของความถี่แสดงแผนภาพวงจรได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพวงจรทอนระดับแรงดัน [1]

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน ในช่วงที่สถานะอยู่ตัว (Steady state) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันดังนี้

- 1) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ในแต่ละคาบเวลา (T) จะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2.1)$$

หมายถึง กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งเดียวกันทุกคาบเวลา

- 2) แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (V_L) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\tau) d\tau = 0 \quad (2.2)$$

หมายถึง ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลา (Volt-second) ในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

- 3) กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุ (I_C) มีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(\tau) d\tau = 0 \quad (2.3)$$

หมายถึง ประจุที่ถูกอัดและคายของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะต้องเท่ากัน

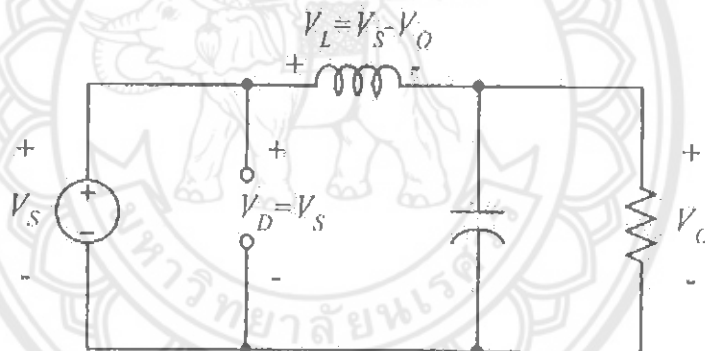
4) กำลังอินพุต (P_s) มีค่าเท่ากับกำลังเอาต์พุต (P_o)

$$P_s = P_o \quad (2.4)$$

กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจร ประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับ 100%

การออกแบบให้ได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการสามารถเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบมีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นสามารถคำนวณหาอัตราขยายแรงดันของวงจรได้ การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงต้องวิเคราะห์ในสถานะอยู่ตัวดังนี้

ขณะสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านสวิตช์ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บอยู่ที่ตัวเก็บประจุ แสดงแผนภาพวงจรดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพวงจรสมมูลของวงจรทอนระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส [1]

จากกฎของเคอร์ชอฟสำหรับแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

$$V_L = V_s - V_o$$

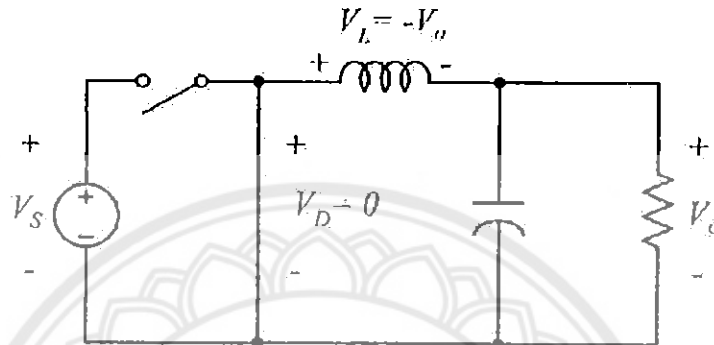
$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

dt กรณีอยู่ในช่วงเวลานำกระแส คือ $dt = DT$

$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT \quad (2.5)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบแอสไปหน้า (Forward bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่องแสดงแผนภาพวงจรได้ดังรูปที่ 2.4 จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.4 แผนภาพวงจรสมมูลวงจรทอนระดับแรงดันขณะสวิตช์ไม่นำกระแส [1]

$$V_L = -V_o$$

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{di_{L,off}}{\Delta t} = -\frac{V_o}{L} \quad (2.6)$$

ความหมายของสมการที่ (2.6) คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะค่อยๆ มีค่าลดลงเพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำต่อเวลาที่มีค่าเป็นลบ

dt ในกรณีอยู่ในช่วงเวลาหยุดนำกระแส คือ $dt = (1-D)T$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.6)

สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.7)$$

ในสถานะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ขณะที่สวิตช์นำกระแสเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำใน ขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\begin{aligned}\Delta i_{L,on} &= \Delta i_{L,off} = 0 \\ \left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT + \left(-\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T\right) &= 0 \\ \left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T &= 0 \\ (V_s - V_o)D - V_o(1-D) &= 0 \\ \frac{V_o}{V_s} &= D\end{aligned}\quad (2.8)$$

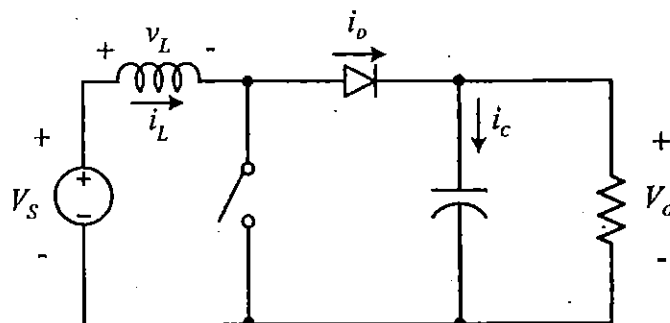
จากสมการที่ (2.12) จะได้

$$\begin{aligned}V_s I_s &= V_o I_o \\ \frac{V_o}{V_s} &= \frac{I_s}{I_o} = D\end{aligned}\quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเหมือนกรณีหม้อแปลงไฟฟ้า นั่นคือเราสามารถกล่าวได้ว่าวงจรทอนระดับแรงดันมีวงจรสมมูลเปรียบได้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

2.1.2 วงจรทอนระดับแรงดัน

แผนภาพของวงจรทอนระดับแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นตัวแปลงผันกำลังที่สร้างแรงดันเอาต์พุตให้มีระดับสูงกว่าแรงดันอินพุตของวงจร



รูปที่ 2.5 แผนภาพวงจรทอนระดับแรงดัน [1]

- โดยที่ V_s คือแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย
 V_L คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ
 i_L คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
 i_D คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด
 i_C คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ
 V_o คือแรงดันเอาต์พุต

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันในช่วงสถานะอยู่ตัว จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดัน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ดังนี้

1) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละคาบมีค่าเท่ากัน และมีค่าเป็นบวกเสมอ

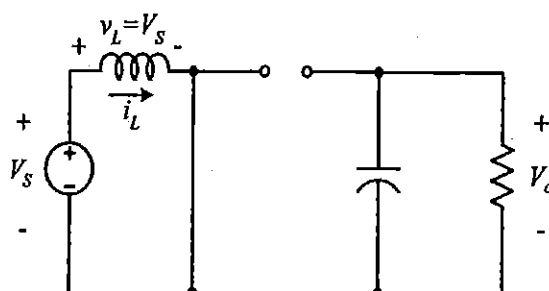
2) แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์หมายถึงผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบจะเท่ากับศูนย์

3) ตัวเก็บประจุต้องมีขนาดใหญ่พอ เพื่อให้แรงดันเอาต์พุต (V_o) มีค่าคงที่

4) กำลังอินพุตเท่ากับกำลังเอาต์พุต กรณีนี้ไม่คำนึงถึงการสูญเสีย เนื่องจากการทำงานของวงจร โดยให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของวงจรเป็น 100%

หลักการการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันเพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ เริ่มต้นจากข้อกำหนดที่ว่า แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้โดยวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ในแต่ละช่วงการทำงาน ทั้งนี้การทำงานต้องอยู่ในช่วงสถานะอยู่ตัวดังนี้

ขณะสวิตช์นำกระแส เมื่อสวิตช์นำกระแส กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำโดยผ่านสวิตช์ ขณะเดียวกันไดโอดจะถูกไบแอสย้อนกลับทำให้ไม่สามารถนำกระแสได้ แสดงแผนภาพดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพวงจรสมมูลของวงจรทบทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์นำกระแส [1]

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$-V_s + V_L = 0$$

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L}$$

ขณะที่สวิตช์นำกระแส $dt = DT$

โดยที่ D คือค่าตัวดีไซเคิล (Duty cycle)

เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าคงที่ อาจจะถือว่าการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{di_{L,on}}{dt} = \frac{V_s}{L}$$

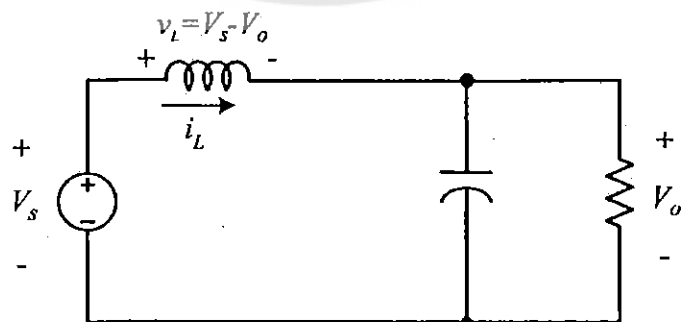
$$\frac{\Delta i_{L,on}}{\Delta t} = \frac{V_s}{L}$$

$$\Delta i_{L,on} = \frac{V_s DT}{L}$$

(2.10)

โดยที่ $\Delta i_{L,on}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส กระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ไดโอดถูกไบแอสไปข้างหน้าเพื่อนำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่อง สมมุติแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตมีค่าคงที่ดังแผนภาพในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพวงจรสมมุติของวงจรทระดับแรงดันเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส [1]

จากกฎของเคอร์ชอฟจะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้

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

$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

ขณะที่สวิตช์หยุดนำกระแส $dt = (1-D)T$ ดังรูปที่ 2.8(ก) อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าคงที่ และถือว่าการลดลงของกระแสไฟฟ้าเป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 2.8(ข) สามารถคำนวณได้จาก

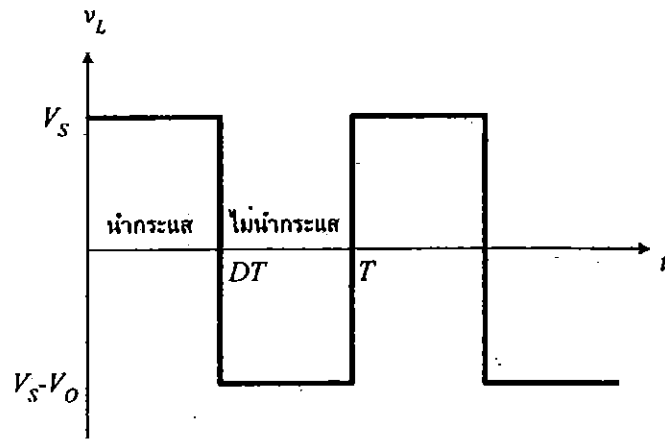
$$\Delta i_{L,off} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (2.11)$$

โดยที่ $\Delta i_{L,off}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

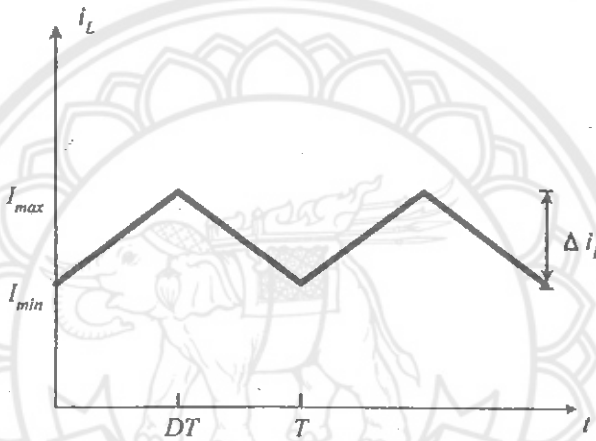
ในสถานะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\begin{aligned} \Delta i_{L,on} + \Delta i_{L,off} &= 0 \\ \left(\frac{V_s}{L} \right) DT + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} &= 0 \\ V_s D + (V_s - V_o)(1-D) &= 0 \\ V_s - V_o(1-D) &= 0 \\ \frac{V_o}{V_s} = \frac{I_s}{I_o} = \frac{1}{1-D} & \quad (2.12) \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันของวงจรทระดับแรงดันกับค่าดีวีไอที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 โดยจะเห็นว่า เมื่อค่า D เพิ่มขึ้นถ้าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้นในทางปฏิบัตินิยมปรับอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 4 เท่า ทั้งนี้เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพ โดยอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำสุดคือหนึ่ง หรือแรงดันเอาต์พุตเท่ากับแรงดันอินพุตในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแรงดันเอาต์พุตจะน้อยกว่าแรงดันอินพุตเล็กน้อย เนื่องจากค่าความสูญเสียจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดและตัวอุปกรณ์สวิตช์

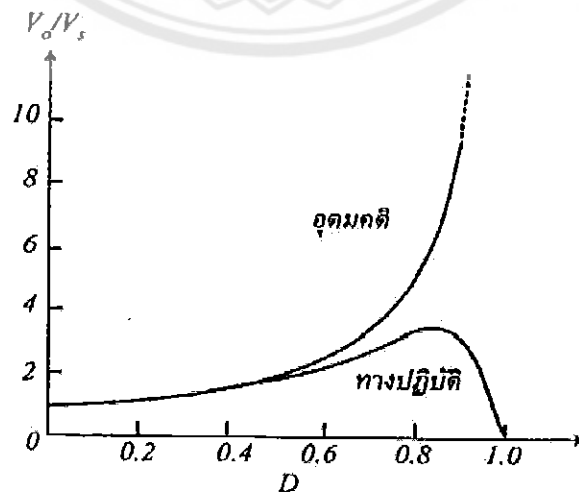


(ก) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



(ข) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

รูปที่ 2.8 รูปคลื่นสัญญาณในวงจรทบทระดับแรงดัน [1]

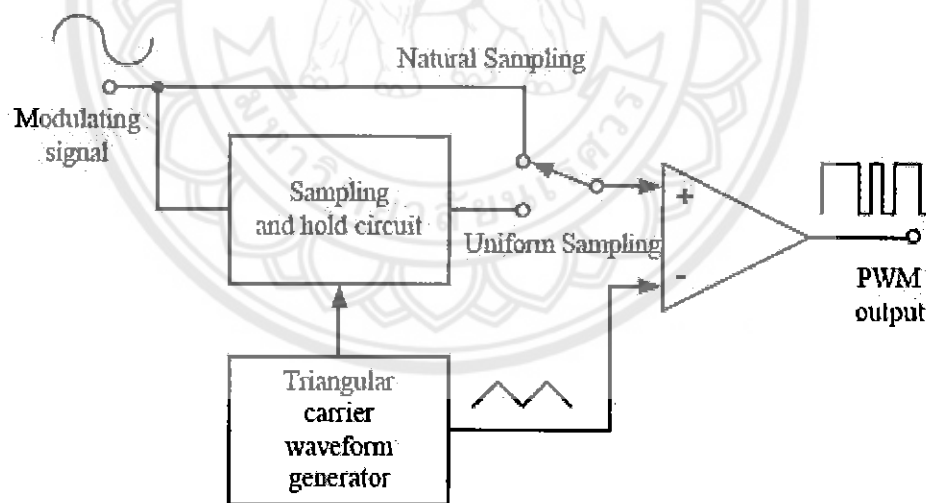


รูปที่ 2.9 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรทบทระดับแรงดัน [1]

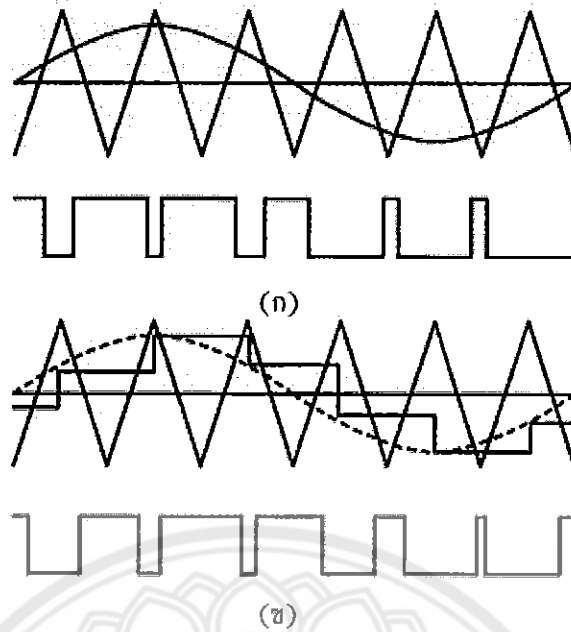
การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ในขณะที่ควบคุมการอันประจุและคายประจุของแบตเตอรี่นั้น เราได้เลือกใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลักในวงจรสร้างสัญญาณ โดยจะทำการสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

2.2 สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse width modulation, PWM) คือสัญญาณที่สามารถปรับความกว้างของพัลส์ (Pulse) ซึ่งเรียกว่าค่าดิวตี้ไซเคิลได้จึงสามารถกำหนดปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ เช่น ปรับความสว่างของหลอดไฟ ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ แบบแรกคือสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่เกิดจากการสุ่มแบบธรรมชาติ (Natural sampling) โดยสัญญาณนี้เรียกว่าสัญญาณเอ็นพีดับเบิลยูเอ็ม (NPWM) อีกแบบหนึ่งคือสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่เกิดจากการสุ่มแบบยูนิฟอร์ม (Uniform sampling) เรียกว่าสัญญาณยูพีดับเบิลยูเอ็ม (UPWM) การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มทั้งสองแบบแสดงด้วยแผนภาพในรูปที่ 2.10



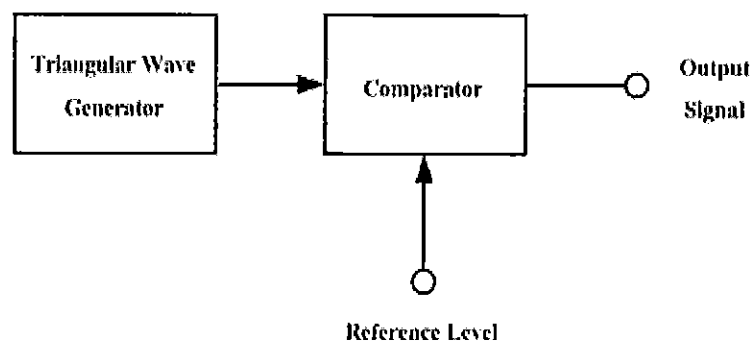
รูปที่ 2.10 แผนภาพโครงสร้างการกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม [2]



รูปที่ 2.11 การสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มทั่วไป
(ก) สัญญาณเอ็นพีคดับเบิลยูเอ็ม (ข) สัญญาณยูพีคดับเบิลยูเอ็ม [2]

กรณีการกำหนดสัญญาณเอ็นพีคดับเบิลยูเอ็ม สัญญาณไหนจะถูกเปรียบเทียบแรงดันกับสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบแรงดันก็จะเป็นสัญญาณเอ็นพีคดับเบิลยูเอ็มเช่นกัน ส่วนในกรณีของสัญญาณยูพีคดับเบิลยูเอ็ม สัญญาณไหนจะผ่านวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (Sample and hold) ก่อนเข้าเปรียบเทียบแรงดันกับสัญญาณสามเหลี่ยมจึงได้สัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 2.11

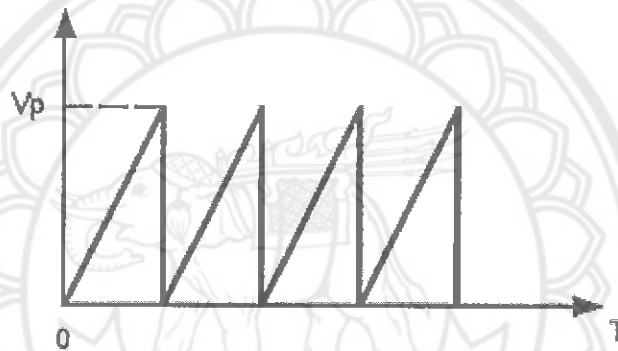
โครงสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มอย่างง่ายโดยทั่วไปแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มที่ได้เป็นการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างสัญญาณสามเหลี่ยมกับระดับอ้างอิง (Reference level)



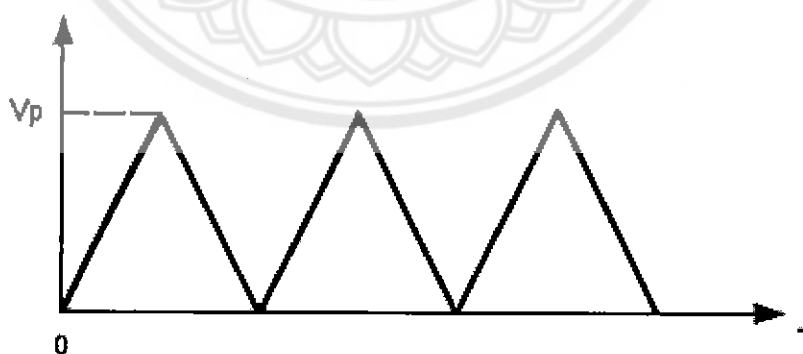
รูปที่ 2.12 แผนภาพโครงสร้างการกำเนิดสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มอย่างง่าย [2]

2.3 สัญญาณฟันเลื่อยและสัญญาณสามเหลี่ยม

โดยหลักการแล้วการสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็มนั้น ใช้การเปรียบเทียบสัญญาณไฟกระแสดตรงและสัญญาณฟันเลื่อย ซึ่งสัญญาณฟันเลื่อยมีคาบสัญญาณคงที่โดยมีความชันบวกน้อยและมีความชันทางลบมากเกือบ 90° ดังรูปที่ 2.13 แต่ในการสร้างวงจรเครื่องกำเนิดพีคดับเบิลยูเอ็มนั้นสามารถสร้างจากการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณไฟกระแสดตรงและสัญญาณสามเหลี่ยมได้เช่นกันซึ่งลักษณะของสัญญาณสามเหลี่ยมคือจะมีลักษณะความชันทางบวกและทางลบเท่ากันและมีคาบสัญญาณคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งโดยหลักการแล้วเมื่อมีการเปรียบเทียบสัญญาณไฟกระแสดตรงกับสัญญาณไม่ว่าจะเป็นสัญญาณฟันเลื่อยหรือสัญญาณสามเหลี่ยมย่อมได้สัญญาณที่สามารถปรับค่าความถี่ไซเคิลได้เหมือนกันเพราะว่าสัญญาณทั้งสองมีคาบสัญญาณคงที่



รูปที่ 2.13 สัญญาณฟันเลื่อย [2]



รูปที่ 2.14 สัญญาณสามเหลี่ยม [2]

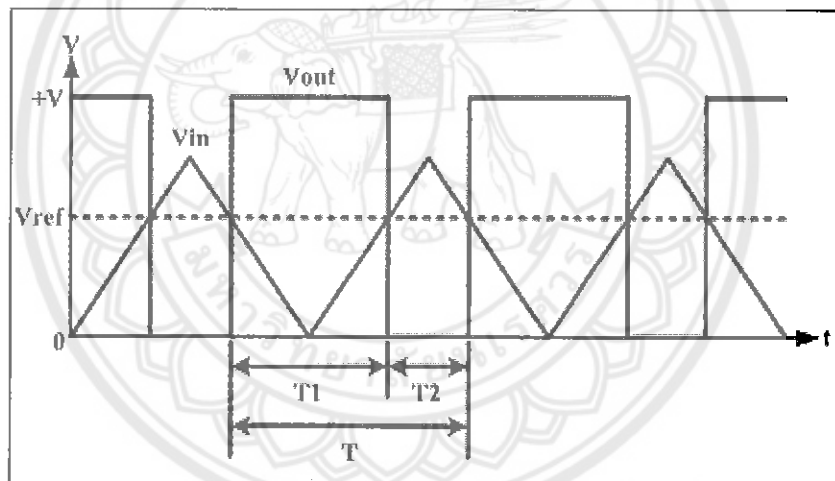
ในการใช้งานสามารถเลือกใช้สัญญาณทั้งสองแทนกันได้ แต่เหตุผลที่เลือกใช้งานสัญญาณสามเหลี่ยมแทนสัญญาณฟันเลื่อยคือ ในการสร้างสัญญาณฟันเลื่อยให้มีความชันด้านลบมีค่าเป็น 90° เป็นสัญญาณฟันเลื่อยโดยสมบูรณ์นั้นทำได้ยาก เพราะเมื่อมีการสร้างวงจรจริงแล้ว

สัญญาณที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนทำให้ไม่ได้รูปสัญญาณตามที่ต้องการ แต่การสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมให้เป็นสัญญาณที่สมบูรณ์ทำได้ง่ายกว่า เพราะฉะนั้นในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม จากวงจรสัญญาณสามเหลี่ยมจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่า

เมื่อนำสัญญาณสามเหลี่ยมและสัญญาณไฟกระแสดตรงมาเปรียบเทียบสัญญาณแล้ว ลักษณะของสัญญาณต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.15 พบว่ามีค่าแรงดันอยู่สามค่าด้วยกันซึ่งแรงดันทั้งหมดนี้ จะมีความสัมพันธ์กัน นั่นคือ แรงดันสามเหลี่ยม (V_{in}) แรงดันอ้างอิง (V_{ref}) และแรงดันด้านออก (V_{out}) ดังนั้นถ้าทำการพิจารณาถึงลักษณะรูปสัญญาณจะพบว่า

ถ้าแรงดัน V_{ref} นั้นมีค่ามากกว่าค่าของแรงดัน V_{in} จะได้ค่าแรงดันสัญญาณด้าน (V_{out}) ออกมามีค่าเท่ากับ $+V$

ถ้าแรงดัน V_{ref} นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าของแรงดัน V_{in} จะได้ค่าแรงดันสัญญาณด้าน (V_{out}) ออกมามีค่าเท่ากับ $0V$



รูปที่ 2.15 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม [2]

2.4 ออปแอมป์

ออปแอมป์ (Operational amplifier) เป็นอุปกรณ์ที่มีอินพุตเป็นการขยายของผลต่าง (Differential amplifier) และมีเอาต์พุตเดี่ยว ซึ่งมีอัตราขยายสูงจึงมีการนำไปใช้ในวงจรต่างๆ เช่น วงจรขยาย (Amplifier circuit) หรือวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator circuit) เป็นต้น

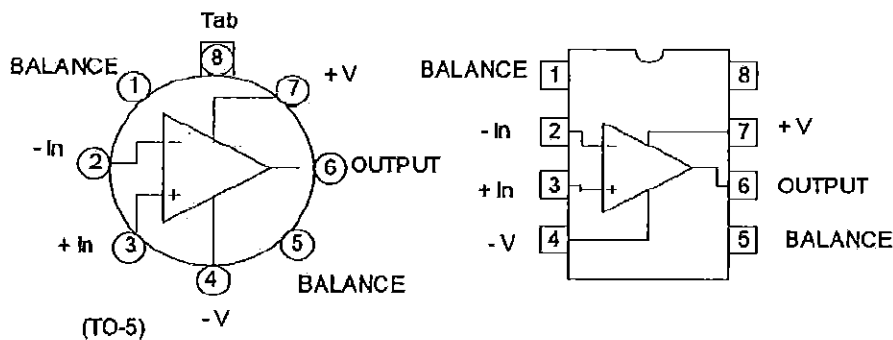
2.4.1 สัญลักษณ์และตัวถังของออปแอมป์

สัญลักษณ์ออปแอมป์จะใช้รูปสามเหลี่ยมมีขาสำหรับต่ออุปกรณ์ภายนอก ดังรูปที่ 2.16 รูปสามเหลี่ยมแสดงถึงการขยายและทิศทางการไหลของสัญญาณ ส่วนชื่อขาของออปแอมป์ได้แสดงการเปรียบเทียบกับจุดต่อวงจรภายใน



รูปที่ 2.16 สัญลักษณ์ของออปแอมป์ [2]

เนื่องจากวงจรที่ประกอบขึ้นมาเป็นออปแอมป์สร้างขึ้นบนแผ่นชิป (Chip) ที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องทำการบรรจุชิปนี้ลงในตัวถังซึ่งอาจเป็นพลาสติก เซรามิก แก้วหรือโลหะ โดยลักษณะของตัวถังที่พบมีอยู่ 2 แบบคือ ตัวถังแบบโลหะกลม (TO-5) และตัวถังแบบดีป (DIP) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



ก) แบบตัวถังโลหะกลม

ข) แบบดีป 8 ขา

รูปที่ 2.17 ตัวถังของออปแอมป์ [2]

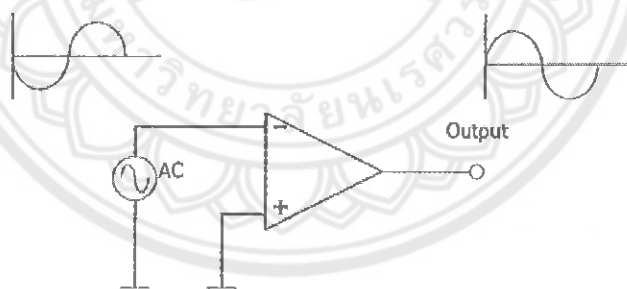
2.4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของออปแอมป์

ออปแอมป์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามอุดมคติ ดังนี้

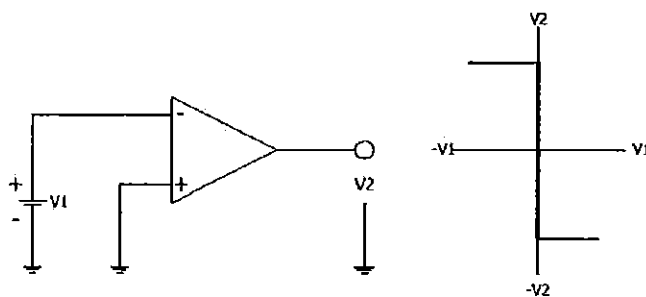
- 1) มีอัตราขยายแรงดันสูงมาก (Infinite voltage amplification: A)
- 2) มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูงมาก (Infinite input impedance: Z_{in})
- 3) มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำมาก (Zero output impedance: Z_{out})
- 4) มีความกว้างแถบความถี่ (ต่อการขยาย) (Infinite bandwidth)
- 5) มีอัตราขยายแรงดันทางด้านบวกและด้านลบเท่ากัน
- 6) แรงดันด้านออกเท่ากับศูนย์เมื่อแรงดันด้านเข้าเท่ากับศูนย์
- 7) ลักษณะของอินพุตมีลักษณะเป็นผลต่าง (Differential)

สัญลักษณ์ของออปแอมป์แบ่งเป็น 2 ส่วนคืออินพุตและเอาต์พุต และยังมีรายละเอียดอีกหลายส่วน เช่น ภาคปรับออฟเซต (Offset) ของกระแสและแรงดันจากสัญญาณของออปแอมป์ โดยขาของอินพุตมีคุณสมบัติดังนี้

1) ขาที่มีเครื่องหมายลบกำกับอยู่แบบกลับเฟส (Inverting) มีคุณสมบัติคือเมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าขานี้ สัญญาณเอาต์พุตจะมีเฟสต่างกับสัญญาณอินพุต 180° (Out of phase 180°) ดังรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19

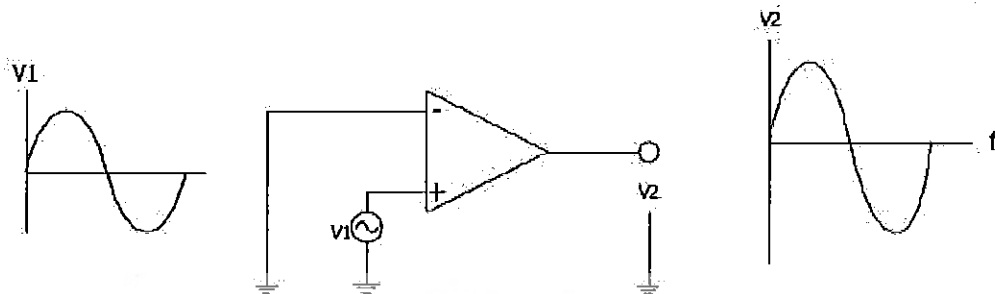


รูปที่ 2.18 การขยายสัญญาณกระแสกลับแบบวงเปิดโดยใช้วงจรกลับเฟส [2]

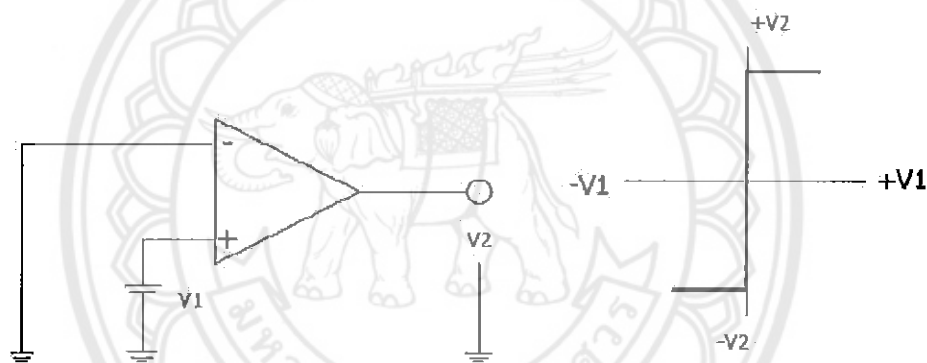


รูปที่ 2.19 การขยายสัญญาณกระแสตรงแบบวงเปิดโดยใช้วงจรกลับเฟส [2]

2) ขาที่มีเครื่องหมายบวกกำกับอยู่แบบไม่กลับเฟส (Non-inverting) มีคุณสมบัติคือถ้าป้อนสัญญาณอินพุตเข้าทางขานี้ จะได้สัญญาณเอาต์พุตมีเฟสเดียวกัน (In phase) กับสัญญาณทางอินพุต ดังรูปที่ 2.20 และ รูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 การขยายสัญญาณกระแสลับแบบวงเปิดโดยใช้วงจรไม่กลับเฟส [2]



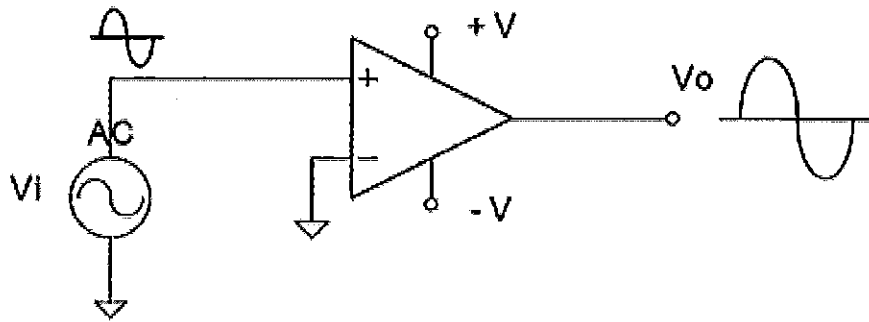
รูปที่ 2.21 การขยายสัญญาณกระแสตรงแบบวงเปิดโดยใช้วงจรไม่กลับเฟส [2]

2.4.3 การทำงานของออปแอมป์

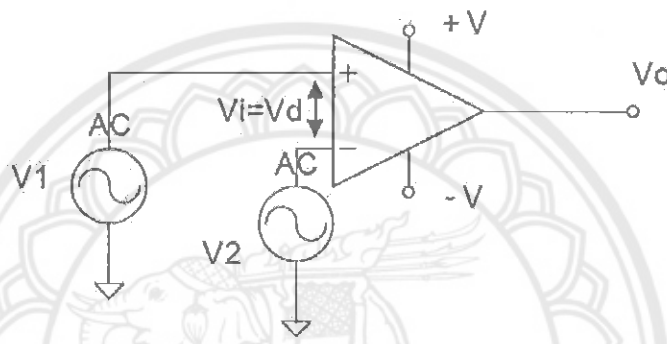
การทำงานของออปแอมป์สามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานได้ 2 ลักษณะคือ ลักษณะการทำงานที่อินพุตเดี่ยวและสองอินพุต

1) การทำงานที่อินพุตเดี่ยว (Single ended input) คือการป้อนสัญญาณอินพุตที่ขั้วใดขั้วหนึ่ง ส่วนขั้วที่เหลือต่อลงกราวด์ดังรูปที่ 2.22

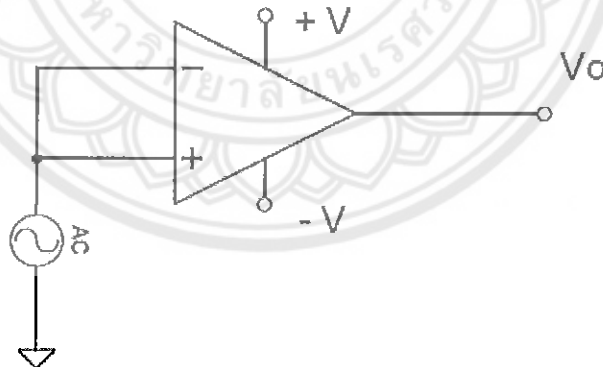
2) การทำงานที่อินพุตสองด้าน (Double Ended Input) คือการป้อนสัญญาณอินพุตทั้งสองด้าน ซึ่งแบ่งออกเป็นสองแบบคือ แบบผลต่างที่มีการป้อนสัญญาณอินพุตสองสัญญาณที่เป็นอิสระต่อกันให้กับขั้วอินพุตทั้งสองดังรูปที่ 2.23 และแบบโหมดทั่วไป (Common mode) ที่มีการป้อนสัญญาณอินพุตร่วมให้กับขั้วอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.22 การทำงานของออปแอมป์ที่อินพุตด้านเดียว [2]



รูปที่ 2.23 การทำงานของออปแอมป์ที่อินพุตสองด้านแบบผลต่าง [2]

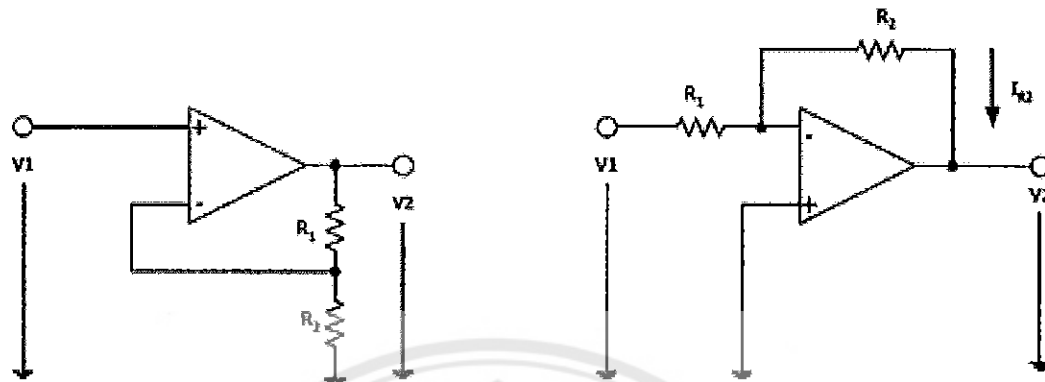


รูปที่ 2.24 การทำงานของออปแอมป์ที่สองอินพุตแบบโหมดทั่วไป [2]

2.4.4 การต่อออปแอมป์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์

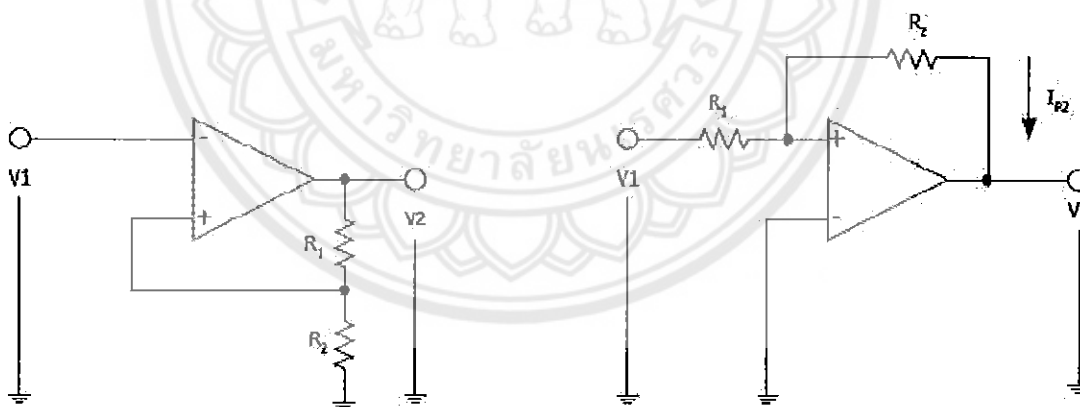
ในปัจจุบันออปแอมป์ได้ถูกออกแบบใช้งานด้านต่างๆ มากมายขึ้นอยู่กับความสามารถในการออกแบบเพื่อตอบสนองต่อการใช้งาน แต่หากเราแบ่งลักษณะการต่อการใช้งานโดยพิจารณาเรื่องการป้อนกลับ (Feedback) มาแบ่งสามารถแบ่งการต่อวงจรใช้งานได้ 2 ลักษณะคือ

1) การต่อวงจรใช้งานลักษณะการป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) ซึ่งวงจรจำพวกนี้นำไปใช้เป็นวงจรขยายสัญญาณ ลักษณะวงจรดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ลักษณะวงจรป้อนกลับแบบลบ [2]

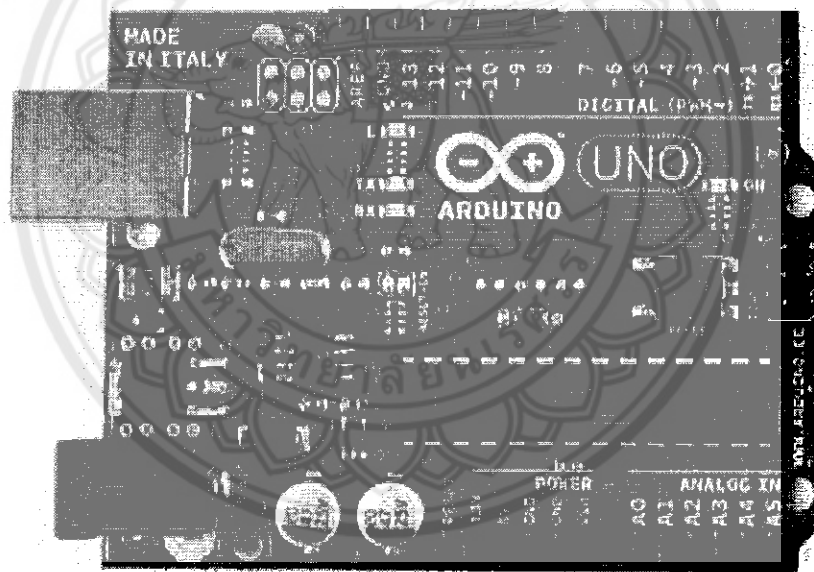
2) การต่อวงจรใช้งานลักษณะการป้อนกลับแบบบวก (Positive feedback) ดังรูปที่ 2.26 วงจรประเภทนี้ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์และผลิตสัญญาณ [2]



รูปที่ 2.26 ลักษณะวงจรป้อนกลับแบบลบ [2]

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 328

ในโครงการนี้ได้เลือกใช้วงจรถ่าย Arduino ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูลเอวีอาร์ (AVR) ขนาด 28 ขา หมายเลข ATmega328 แสดงดังรูปที่ 2.27 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นแพลตฟอร์ม (Platform) ของอินพุตและเอาต์พุต (I/O) ขั้นพื้นฐานที่พอเพียงกับการใช้งานและการเรียนรู้ โดยตัวแผงวงจรจะมีชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมพอร์ตอินพุตและเอาต์พุต ไม่ว่าจะเป็นพอร์ตดิจิทัล พอร์ตแอนะล็อกที่คัปเบิลยูเอ็ม และพอร์ตอนุกรม ซึ่งแผงวงจร Arduino ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรับสัญญาณจากภายนอกและส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ และตัวแผงวงจรมีโปรแกรมพัฒนาสำหรับเขียนโปรแกรมให้แผงวงจร Arduino ซึ่งสามารถรับสัญญาณจากสวิทช์หรือตัวรับรู้และควบคุมหลอดไฟมอเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่นๆ แผงวงจร Arduino สามารถทำงานอิสระหรือทำงานติดต่อกับโปรแกรมที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์



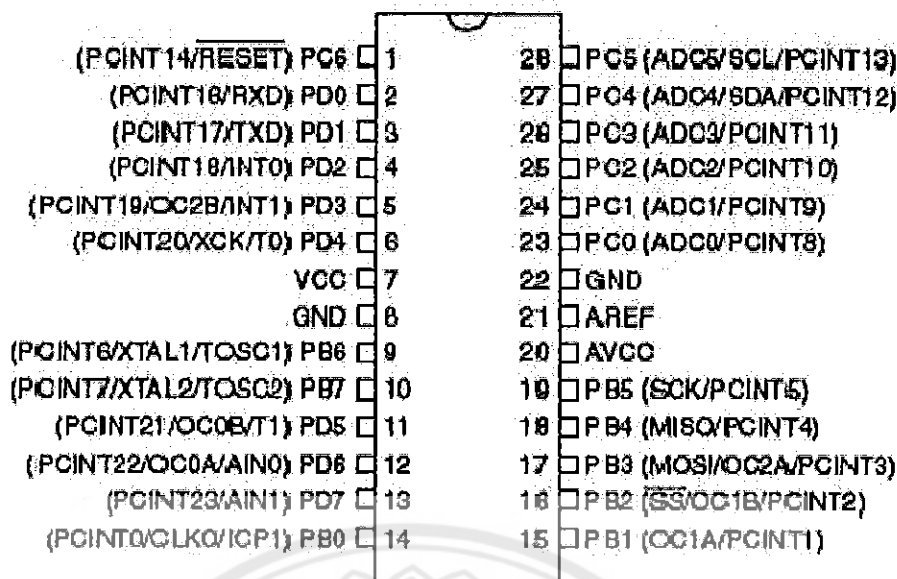
รูปที่ 2.27 แผงวงจร Arduino [3]

แผงวงจร Arduino ซึ่งมีจุดเด่นในเรื่องของความง่ายต่อการเรียนรู้และใช้งาน เนื่องจากมีการออกแบบคำสั่งต่างๆ เพื่อสนับสนุนการใช้งานด้วยรูปแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อนคือเน้นการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหลัก แผงวงจร Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้ AVR ขนาดเล็กซึ่งเป็นตัวประมวลผลและสั่งงานเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการศึกษาเรียนรู้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ และนำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการควบคุมอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตต่างๆ ได้มากมายทั้งในแบบที่เป็นการทำงานเดี่ยวอิสระ หรือเชื่อมต่อสั่งงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ

เช่น คอมพิวเตอร์ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า Arduino สนับสนุนการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตต่างๆ ได้มากมาย ทั้งแบบดิจิทัล (Digital) และแอนะล็อก (Analog) เช่น การรับค่าจากสวิทช์หรือตัวรับรู้แบบต่างๆ รวมไปถึงการควบคุมอุปกรณ์เอาต์พุตต่างๆ ส่วนภาษาในการเขียนโปรแกรมลงบนแผงวงจร Arduino นั้นใช้ภาษา C++ ซึ่งเป็นรูปแบบของโปรแกรมภาษาซีประยุกต์แบบหนึ่ง ที่มีโครงสร้างของตัวภาษาโดยรวมใกล้เคียงกันกับภาษาซีมาตรฐาน (ANSI-C) แต่ก็ได้มีการปรับปรุงการเขียนโปรแกรมบางส่วนที่คิดเขียนไปจาก ANSI-C เล็กน้อย เพื่อช่วยลดความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมและยังสามารถเขียนโปรแกรมได้ง่ายและสะดวกมากขึ้นกว่าการเขียนภาษาซีตามแบบมาตรฐานของ ANSI-C โดยตรง

ซึ่งตัวแผงวงจร Arduino ที่ใช้ในโครงการนี้จะกล่าวถึงสถาปัตยกรรมของเอวีอาร์ (AVR) ขนาด 8 บิต โดยเป็นซีพียูแบบ RISC (Reduced InstructionSet Computer) มีสถาปัตยกรรมการต่อหน่วยความจำแบบฮาร์วาร์ด (Harvard) ซึ่งแยกหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลออกจากกันโดยเด็ดขาด ดังแสดงในรูปที่ 2.28 โดยได้ใช้หน่วยความจำแบบแฟลช (Flash) สำหรับเป็นหน่วยความจำโปรแกรม และได้ใช้หน่วยความจำแบบ SRAM สำหรับหน่วยความจำข้อมูลและนอกจากนี้ยังมีหน่วยความจำแบบ EEPROM ซึ่งสามารถจัดเก็บข้อมูลเอาไว้ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีไฟเลี้ยงอีกด้วย ATmega328 ซึ่งมีคุณสมบัติเด่น ดังนี้

- 1) ทำงานได้ตั้งแต่ย่านแรงดัน 1.8-5.5 V
- 2) หน่วยความจำข้อมูลแบบ SRAM ขนาด 2 kb
- 3) หน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 1 kb
- 4) สนับสนุนการเชื่อมต่อแบบ I2C bus
- 5) พอร์ตอินพุตเอาต์พุตจำนวน 23 bit
- 6) วงจรสื่อสารอนุกรม
- 7) ตัวจับเวลา/ตัวนับ ขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัวและ U3586 ขนาด 16 บิตจำนวน 1 ตัว
- 8) สนับสนุนช่องสัญญาณสำหรับสร้างสัญญาณพีดับเบิลยู (PWM) จำนวน 6 ช่อง
- 9) วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิตในตัวจำนวน 8 ช่อง



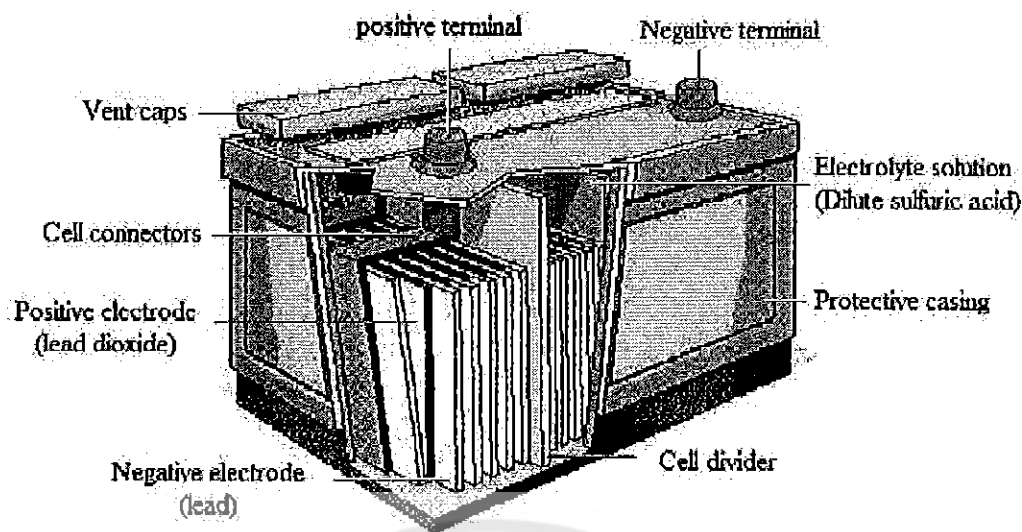
รูปที่ 2.28 หน่วยประมวลผลกลาง ATmega328 ขนาด 28 ขา [3]

2.6 แหล่งพลังงานสำรองที่ใช้ในการจ่ายโหลด

ในขณะที่แหล่งกำเนิดพลังงานไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของ โหลดจำเป็นที่จะต้องมีการมีแหล่งพลังงานสำรองในการช่วยจ่าย เพื่อให้โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าที่คงที่ โดยในโครงการนี้ได้เลือกใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่ว (Lead-acid battery) มาเป็นแหล่งพลังงานสำรอง ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อดีคือมีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ทั่วไป มีให้เลือกใช้หลายขนาดและมีความปลอดภัยในการใช้งานรวมถึงยังให้แรงดันต่อหนึ่งเซลล์ที่สูงอีกด้วย

2.6.1 โครงสร้างของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว

ส่วนประกอบของแบตเตอรี่แบบตะกั่วแสดงได้ดังรูปที่ 2.29 โดยประกอบด้วยแผ่นธาตุ (Plates) ในแบตเตอรี่มี 2 ชนิดคือแผ่นบวกและแผ่นลบ แผ่นธาตุบวกทำจากตะกั่วออกไซด์ (PbO_2) และแผ่นธาตุลบทำจากตะกั่ว (Pb) วางเรียงสลับกันจนเต็มในแต่ละเซลล์แล้วกันไม่ให้แตะกันด้วยแผ่นกั้น (Separators) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ธาตุบวกและธาตุลบแตะกันเพราะเกิดการลัดวงจรขึ้น ซึ่งแผ่นกั้นนี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเพื่อนำกรดหรือน้ำหรือน้ำยาลีอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ไหลถ่ายเทไปมาได้และมีขนาดความกว้างยาวเท่ากับแผ่นธาตุบวกและแผ่นลบ น้ำยาลีอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่เป็นน้ำกรดกำมะถันเจือจางประกอบด้วยกรดกำมะถัน (H_2SO_4) มีค่าประมาณ 38% และมีความถ่วงจำเพาะของน้ำกรด 1.26-1.28 ที่อุณหภูมิ $20^{\circ}C$



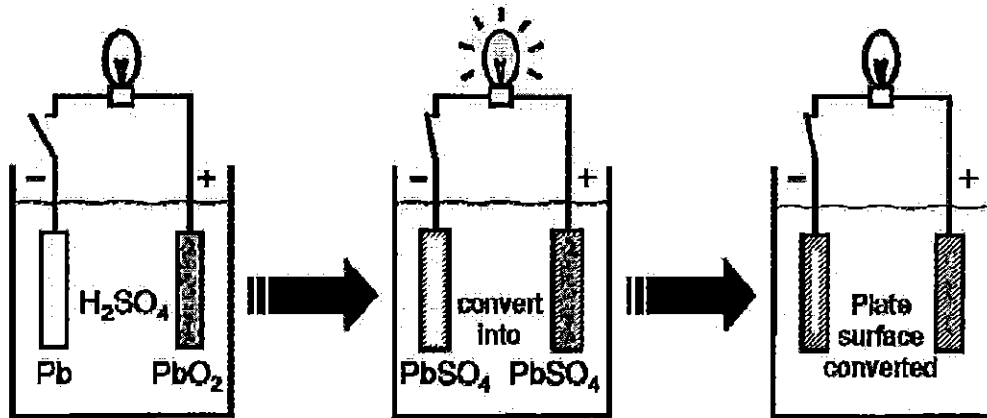
รูปที่ 2.29 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว [4]

เซลล์ (Cell) ในแบตเตอรี่คือช่องที่บรรจุแผ่นธาตุบวกและธาตุลบซึ่งวางสลับกันและกันด้วยแผ่นกั้นแล้วจุ่มลงในน้ำกรด โดยทั่วไปแบตเตอรี่จะสร้างให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 2 V ต่อเซลล์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละลูกจึงขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ในแบตเตอรี่นั้นๆ เช่น แบตเตอรี่ที่มี 6 เซลล์จะให้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 12 V [4]

ความจุของแบตเตอรี่ (Battery capacity) มีหน่วยคือ “แอมแปร์-ชั่วโมง” (Ah) หรือ “วัตต์-ชั่วโมง” (Wh) ซึ่งบ่งบอกถึงพลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายได้ เราสามารถคำนวณหาความจุของแบตเตอรี่ได้ด้วยการคายประจุของแบตเตอรี่ความจุที่ใช้งานได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโครงสร้าง ซึ่งเชื่อมโยงกับการออกแบบแบตเตอรี่ ได้แก่ ปริมาณของตะกั่ว ตะกั่วออกไซด์ น้ำกรดความหนาของแผ่นโลหะ และผิวสัมผัสของโลหะ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน ได้แก่ อุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความจุของแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น แต่จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ค่าพลังงานสูงสุดที่แบตเตอรี่จ่ายได้ ณ ค่ากระแส และอุณหภูมิค่าหนึ่งที่กำหนดโดยผู้ผลิต เรียกว่า พิกัดความจุ (Rated capacity หรือ Nominal capacity) ของแบตเตอรี่

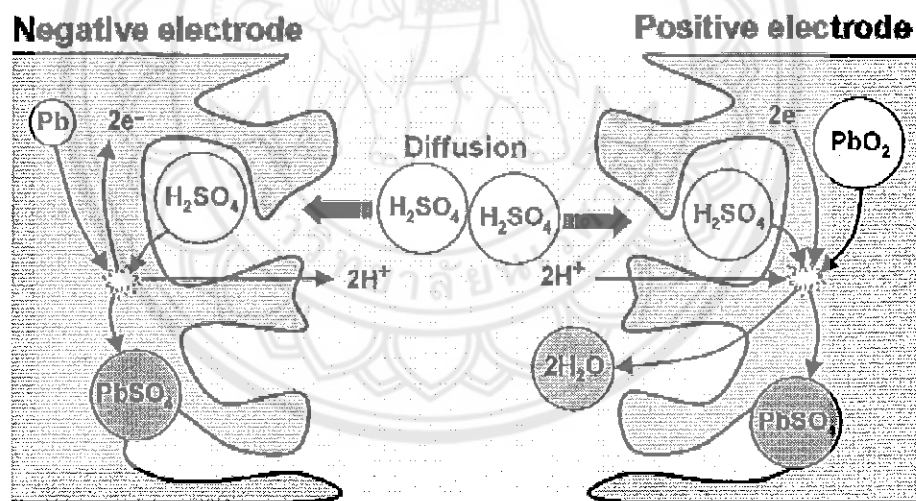
2.6.2 ปฏิกริยาทางเคมีในแบตเตอรี่แบบตะกั่ว

เราสามารถอธิบายปฏิกิริยาเคมีแบตเตอรี่แบบตะกั่วได้ดังรูปที่ 2.30 กำหนดให้แบตเตอรี่มีประจุเต็ม (Fully charged condition) ก่อนต่อโหลด เนื้อสารที่ขั้วลบจะเป็นตะกั่วส่วนขั้วบวกจะเป็นตะกั่วออกไซด์ หลังจากนั้นนำโหลดมาต่อ แบตเตอรี่จะเริ่มคายประจุโดยเนื้อสารที่ขั้วลบและขั้วบวกจะทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์จนกลายเป็นตะกั่วซัลเฟต การคายประจุของแบตเตอรี่จะสิ้นสุดลงเมื่อเนื้อสารทั้งขั้วลบและขั้วบวกกลายเป็นตะกั่วซัลเฟตทั้งหมด



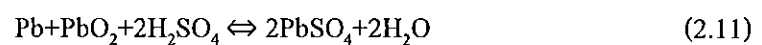
รูปที่ 2.30 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่อคายประจุ

ในระหว่างที่แบตเตอรี่กำลังคายประจุจะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.31 จึงเกิดกระแสไหลผ่านโหลด ซึ่งค่ากระแสที่แบตเตอรี่จ่ายได้ขึ้นอยู่กับพื้นผิวเนื้อสารกับน้ำกรด



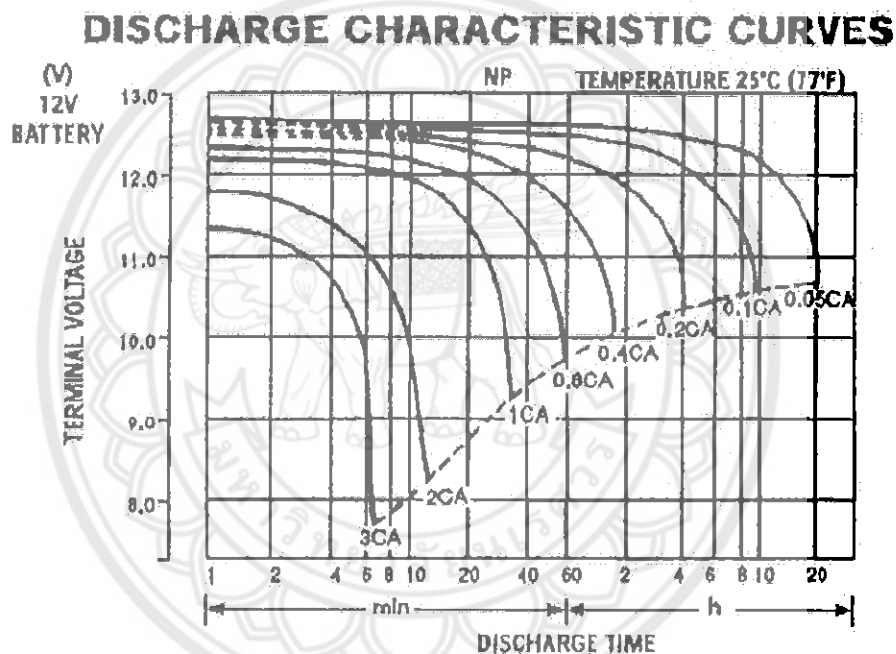
รูปที่ 2.31 การคายประจุของแบตเตอรี่

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่เป็นปฏิกิริยาชนิดย้อนกลับได้ (Reversible reaction) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการเคมีต่อไปนี้



2.6.3 กราฟคุณลักษณะการคายประจุ

จุดสิ้นสุดของการคายประจุ (End of discharge) คือระดับแรงดันที่เราจะยอมให้แบตเตอรี่คายประจุได้ก่อนสิ้นสุดกระบวนการคายประจุ จุดสิ้นสุดของการคายประจุนี้อยู่กับค่ากระแสคายประจุที่กำหนดไว้โดยผู้ผลิตดังตัวอย่างในรูปที่ 2.32 กราฟคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว NP4-12 ซึ่งมีค่าพิกัดความจุที่ค่า 4 Ah และกระแส 0.2 A (0.05C) อุณหภูมิ 25°C และจุดสิ้นสุดการคายประจุที่ 10.7 V จะเห็นว่าถ้าแบตเตอรี่คายประจุที่กระแสสูงกว่า 0.2 A จุดสิ้นสุดการคายประจุจะต่ำกว่าเนื่องจากยังมีเนื้อสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำกรดต่อได้อีก แต่ค่าความจุที่ใช้งานได้จะลดลงจากค่าพิกัด

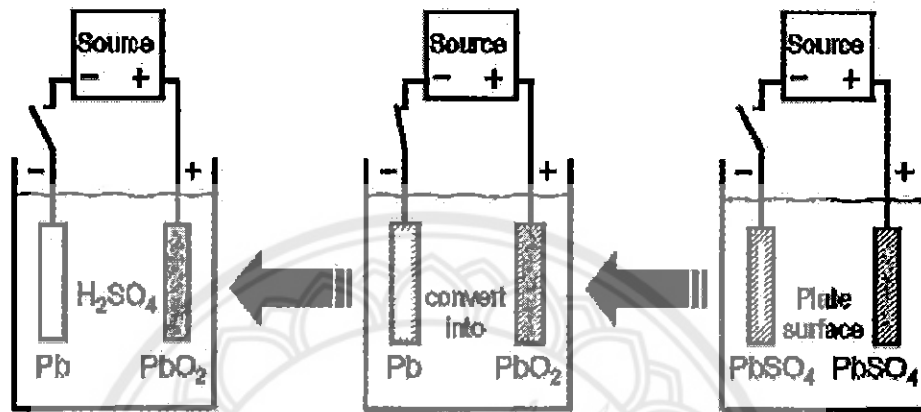


รูปที่ 2.32 กราฟคุณลักษณะการคายประจุของแบตเตอรี่ NP4-12

การคายประจุจนต่ำกว่าจุดสิ้นสุดของการคายประจุ (Deep discharge) จำทำให้แบตเตอรี่ทำงานหนักเกินไป หากเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ต้องรีบอัดประจุคืนให้เต็ม มิฉะนั้นจะเหลือผลึกตะกั่วซัลเฟตที่ขี้ขวมกและขี้ลอบ หากปล่อยไว้นานผลึกเหล่านี้จะโตขึ้นจนยากต่อการเปลี่ยนกลับคืนเป็นตะกั่วและตะกั่วออกไซด์ได้อีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การเกิดซัลเฟชัน” (Sulphation) ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่นั้นสั้นลงเนื่องจากสูญเสียเนื้อสารที่จะทำปฏิกิริยา ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องมีการป้องกันการคายประจุลึกกว่าจุดสิ้นสุดการคายประจุ (Deep discharge protection) โดยวิธีง่ายและเป็นที่ยอมรับคือการวัดค่ากระแสตรวจสอบแรงดันของแบตเตอรี่อยู่ตลอดเวลา

2.6.4 การอัดประจุ

จากสมการที่ (2.11) การคายประจุสามารถอธิบายได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากซัลไฟไปขาว ในขณะที่การอัดประจุแบตเตอรี่จะอธิบายได้โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในสมการจากขาว ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 การเกิดปฏิกิริยาภายในแบตเตอรี่เมื่ออัดประจุ

ในการอัดประจุแต่ละครั้งจำเป็นต้องใช้แรงดันของแหล่งจ่ายสูงกว่า เช่น ประมาณ 14.4 V สำหรับแบตเตอรี่ขนาด 12 V เมื่ออัดประจุจนแรงดันของแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้นถึงระดับหนึ่งจะทำให้ น้ำในน้ำกรดแตกตัวเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วลบและก๊าซออกซิเจนที่ขั้วบวก ถ้าอัดประจุนานเกินไป จะทำให้ปริมาณน้ำที่อยู่ในแบตเตอรี่ลดลงนอกจากนี้การอัดประจุด้วยกระแสที่สูงยังทำให้เกิด ความเครียดในเนื้อสาร ซึ่งทำให้การเกาะตัวของโมเลกุลในเนื้อสารแย่งจนส่งผลให้เนื้อสาร บางส่วนหลุดออกจากขั้ว ซึ่งนำไปสู่การสูญเสียความจุที่ใช้ได้ของแบตเตอรี่ดังนั้นในระหว่างการ อัดประจุจึงต้องมีการจำกัดแรงดันและกระแสด้วย เช่น การอัดประจุที่กระแสไม่เกิน 1 A และใช้ แรงดันในการอัดประจุประมาณ 2.3-2.4 V/cell หรือ 14.4 V (สำหรับแบตเตอรี่ขนาด 12 V) ที่ อุณหภูมิ 20°C

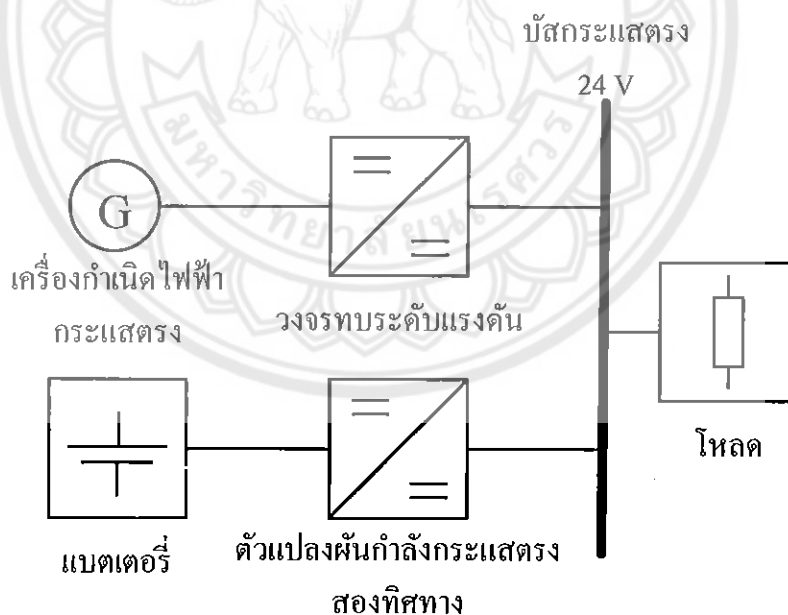
บทที่ 3

การออกแบบและสร้างแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า

ในโครงการได้สร้างแบบจำลองขึ้นเพื่อแสดงหลักการควบคุมระบบจ่ายไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียนโดยออกแบบขั้นตอนการทำงานของระบบตามเงื่อนไขของกำลังการผลิตของแหล่งกำเนิด รวมทั้งออกแบบและสร้างวงจรสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ด้วยหลักการพีดีบีแอลเพื่อขับนำสวิตช์ในตัวแปลงผันกำลังที่ใช้ในระบบ

3.1 การออกแบบขั้นตอนการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้า

แบบจำลองของระบบจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในโครงการถูกออกแบบให้จ่ายโหลดตัวต้านทานซึ่งต้องการกำลังไฟฟ้าที่คงที่ โดยต่ออยู่กับบัสกระแสตรง 24 V และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 24 V เพื่อจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่ โดยเชื่อมต่อกับบัสผ่านวงจรทระดับแรงดัน และมีแบตเตอรี่แบบตะกั่ว 12 V เชื่อมต่อกับบัสผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางดังรูปที่ 3.1

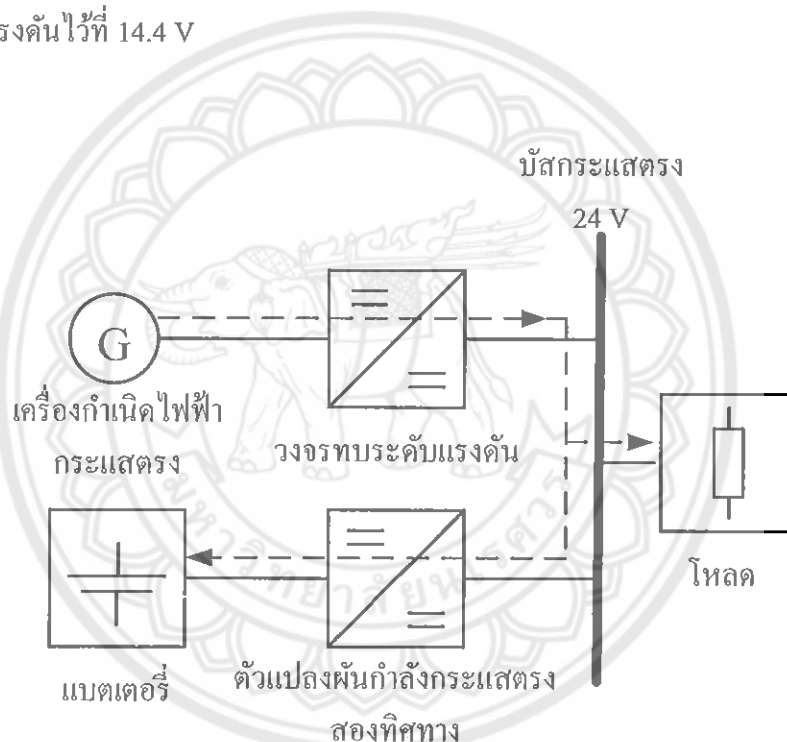


รูปที่ 3.1 แผนภาพแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าที่ออกแบบ

แบบวิธีการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้นแบ่งออกเป็นสามกรณีคือ กรณีแรก เมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความต้องการของ โหลด กรณีที่สอง เมื่อกำลัง

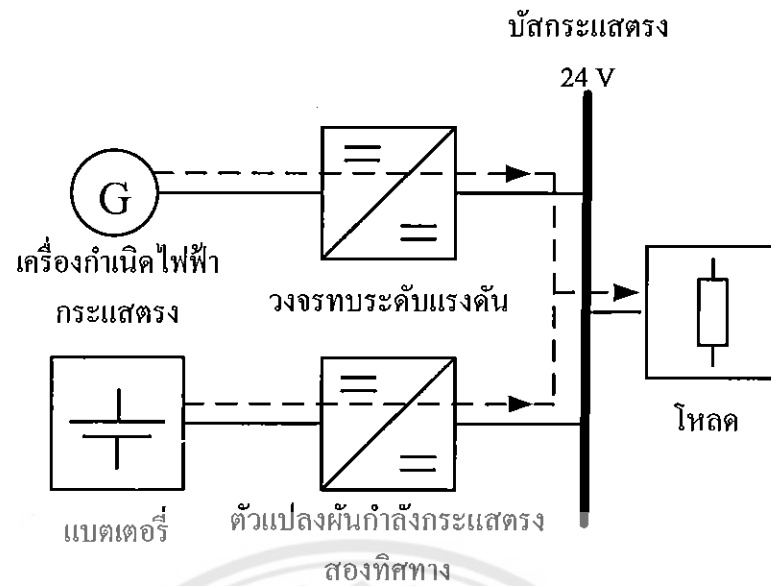
การผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด และกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้

โดยการทำงานของระบบในกรณีนี้หนึ่งคือเมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความต้องการของโหลดสามารถแสดงด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.2 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์กำหนดการทำงานของรีเลย์ภายในระบบเพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกส่งผ่านวงจรทระดับแรงดันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันในการจ่ายโหลดให้คงค่าไว้ที่ค่า 24 V และนอกจากจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดแล้ว ส่วนของกำลังไฟฟ้าที่เหลือจากการจ่ายโหลดถูกนำมาอัดประจุให้กับแบตเตอรี่โดยผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางซึ่งในขณะนี้ทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันเพื่อปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้าจากบัสแรงดันสูงให้มีค่าที่เหมาะสมต่อการอัดประจุดังกล่าว โดยรักษาระดับแรงดันไว้ที่ 14.4 V



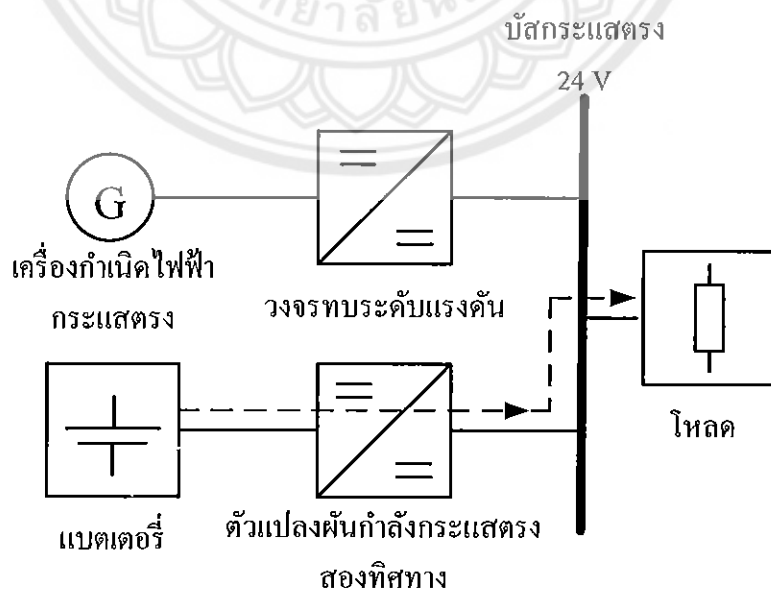
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบขณะที่กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงเกินกว่าความต้องการของโหลด

การทำงานของระบบในกรณีที่สอง เมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลดสามารถแสดงด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.3 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะกำหนดการทำงานของรีเลย์ภายในระบบเพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกเพิ่มระดับแรงดันและรักษาไว้ที่ 24 V ผ่านวงจรทระดับแรงดัน ส่วนกำลังไฟฟ้าที่ยังขาดอยู่นั้นจะได้รับการคายประจุของแบตเตอรี่ผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางซึ่งในขณะนี้ทำหน้าที่เป็นวงจรทระดับแรงดันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันและรักษาไว้ที่ 24 V เข้าสู่บัสและใช้ในการจ่ายโหลด



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบขณะที่กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด

การทำงานของระบบในกรณีที่สาม เมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้สามารถแสดงด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์กำหนดการทำงานของรีเลย์ในระบบ เพื่อให้แบตเตอรี่จ่ายประจุผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางซึ่งในขณะนี้ทำหน้าที่เป็นวงจรถับระดับแรงดันเพื่อเพิ่มระดับแรงดันให้มีค่าตามที่โหลดต้องการและทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดเพียงลำพัง



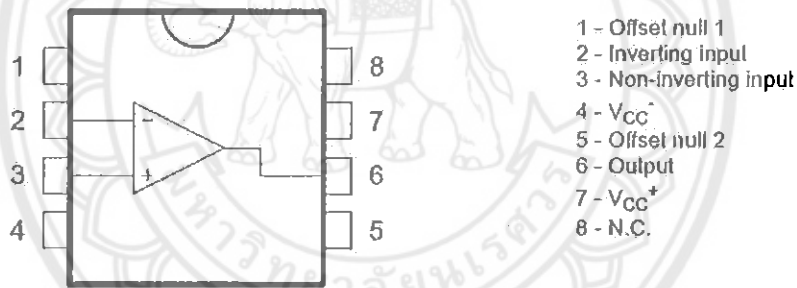
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบขณะที่กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้โหลด

3.2 การสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์

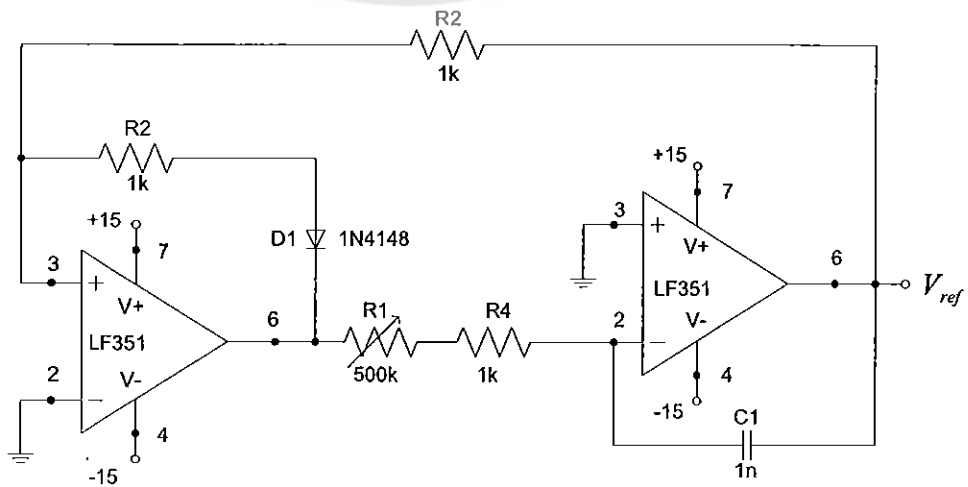
จากช่วงการทำงานของระบบ ตัวแปลงผันกำลังกระตงสองทิศทางและวงจรทระดับแรงดันสามารถควบคุมการทำงาน โดยการควบคุมสวิตช์ ซึ่งสัญญาณที่ใช้ใน ครงงานนี้สร้างจากหลักการพีดับเบิลยูเอ็มที่เกิดจากการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณควบคุม

3.2.1 การสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม

วงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยม เป็นสัญญาณที่กำหนด ความถี่ของสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ให้มีค่าความถี่สวิตซ์ซึ่งตามต้องการ อุปกรณ์หลักในการสร้างวงจรคือหมายเลข LF351 ซึ่งมีขาต่อใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 โดย LF351 จะสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมขึ้นจากหลักการป้อนกลับแรงดัน และสามารถวิเคราะห์การเกิดสัญญาณสามเหลี่ยมได้คือ ช่วงแรกที่สัญญาณสี่เหลี่ยมมีค่าเป็นบวก แรงดันด้านออกของสัญญาณอินทิเกรเตอร์ลดลงอย่างคงที่ แต่เมื่อสัญญาณสี่เหลี่ยมมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันด้านออกของสัญญาณอินทิเกรเตอร์จะเพิ่มขึ้นด้วยความชันขนาดเท่ากับที่ลดลง วงจรการทำงานที่ออกแบบขึ้นสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 รูปและขาต่างๆของ LF351 [2]



รูปที่ 3.6 แผนภาพวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมจาก LF351 [2]

ความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมสามารถคำนวณได้จาก

$$f = \frac{1}{2R_1C_1} \quad (3.1)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) ที่ $f = 1 \text{ kHz}$ และ $C_1 = 1 \text{ nF}$ จะได้

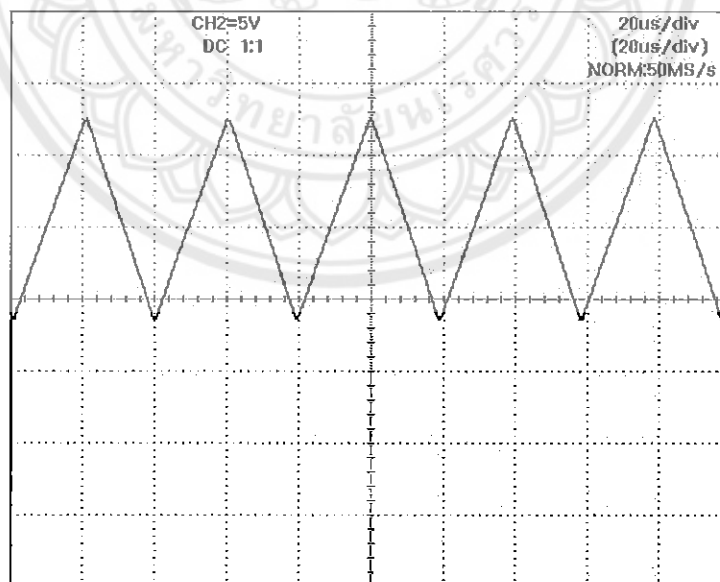
$$R_1 = \frac{1}{2fC_1} = \frac{1}{2 \times 1 \text{ kHz} \times 1 \text{ nF}} = 500 \text{ k}\Omega$$

และที่ $f = 100 \text{ kHz}$ และ $C_1 = 1 \text{ nF}$ จะได้

$$R_1 = \frac{1}{2fC_1} = \frac{1}{2 \times 100 \text{ kHz} \times 1 \text{ nF}} = 5 \text{ k}\Omega$$

ดังนั้นจึงได้พิกัดค่าความต้านทานที่ทำให้ได้ความถี่ที่ย่าน 1-100 kHz คือ 5-500 k Ω

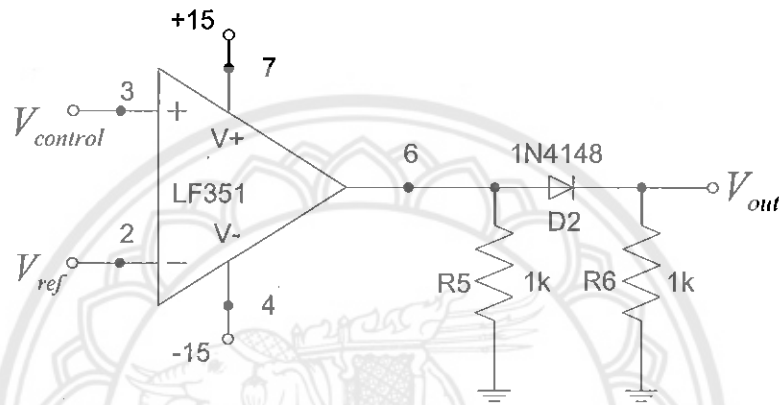
ในการเลือกค่าความถี่หากเลือกค่าที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในการขับนำสวิทช์และหากเลือกค่าที่ต่ำเกินไป ความพลีวของสัญญาณจะสูงส่งผลให้วงจรกรองต้องมีขนาดใหญ่ ในโครงการนี้จึงเลือกค่าความถี่ที่ไม่สูงและต่ำมากเกินไปโดยเลือกค่าความถี่เท่ากับ 25 kHz ทำให้รูปสัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้จากการสร้างวงจรที่ความถี่ 25 kHz แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 สัญญาณสามเหลี่ยมที่ได้สร้างขึ้นที่ความถี่ 25 kHz

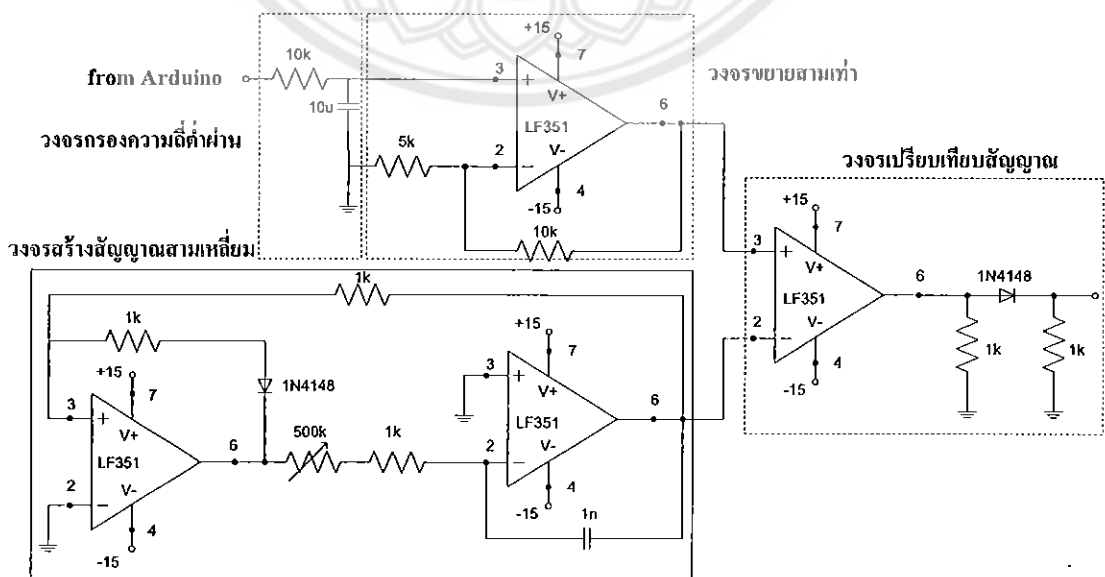
3.2.2 วงจรเปรียบเทียบ

จากหลักการที่ดับเบิ้ลยูเอ็ม สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์สร้างขึ้นจากการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุม ($V_{control}$) ซึ่งเป็นแรงดันไฟกระแสตรง กับสัญญาณอ้างอิง (V_{ref}) ซึ่งในที่นี้เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้น ในส่วนของวงจรเปรียบเทียบนั้นได้เลือกใช้ออปแอมป์หมายเลข LF351 เพื่อให้การทำงานของวงจรเปรียบเทียบสอดคล้องกับค่าแรงดันและความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมโดยวงจรเปรียบเทียบที่ออกแบบขึ้นสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.8



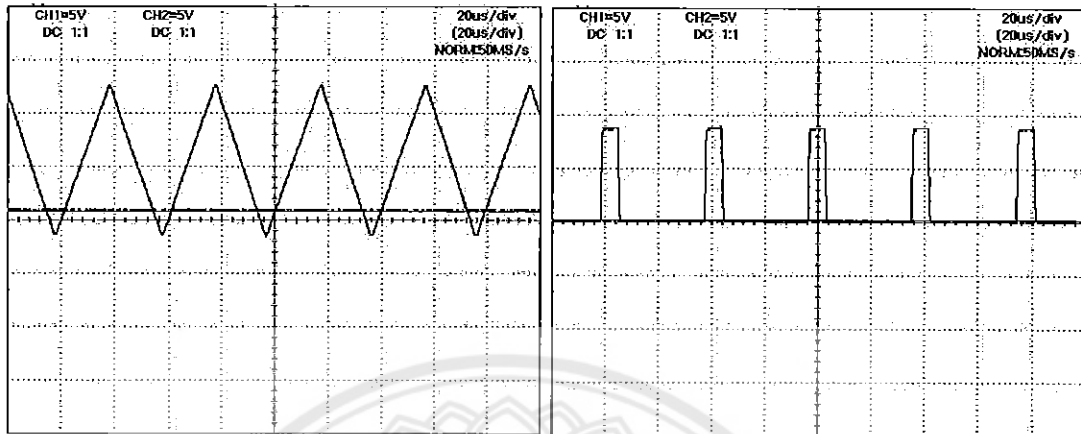
รูปที่ 3.8 แผนภาพวงจรเปรียบเทียบ [2]

นอกจากนี้ยังได้ต่อเพิ่มวงจรขยายแบบไม่กลับขั้วเข้ามาเพื่อให้การเปรียบเทียบของสัญญาณสามเหลี่ยมกับแรงดันอ้างอิงมีความละเอียดมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนภาพวงจรสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์

ตัวอย่างของการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิทช์ที่มีค่าดีวีไอเคิล 20% โดยเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมกับสัญญาณอ้างอิงรูปแสดงได้ดังรูปที่ 3.10(ก) และ (ข) ตามลำดับ

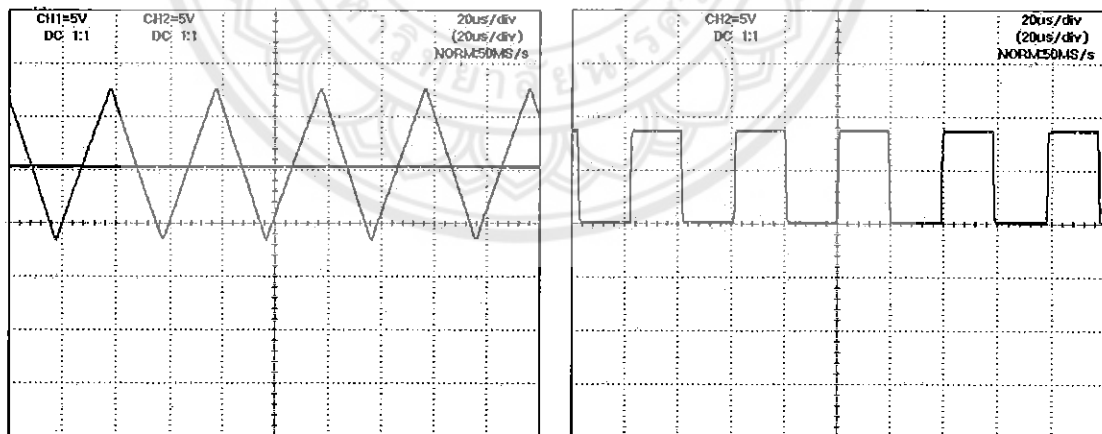


ก) สัญญาณอ้างอิงและสัญญาณควบคุม

ข) สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิทช์

รูปที่ 3.10 สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิทช์ที่มีค่าดีวีไอเคิล 20%

ตัวอย่างของการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิทช์ที่มีค่าดีวีไอเคิล 50% โดยเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมกับสัญญาณอ้างอิงรูปแสดงได้ดังรูปที่ 3.11(ก) และ (ข) ตามลำดับ

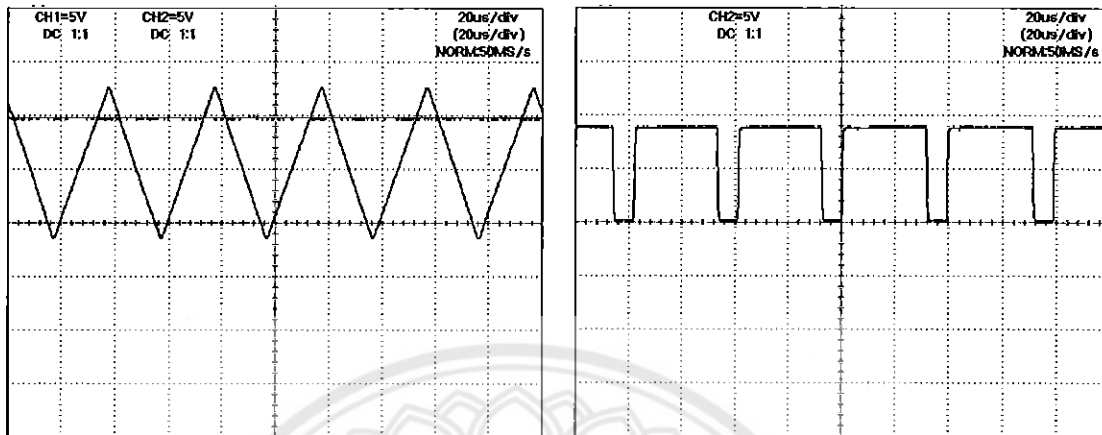


ก) สัญญาณอ้างอิงและสัญญาณควบคุม

ข) สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิทช์

รูปที่ 3.11 สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิทช์ที่มีค่าดีวีไอเคิล 50%

ตัวอย่างของการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ที่มีค่าความถี่ไซเคิล 80% โดยเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมกับสัญญาณอ้างอิงรูปแสดงได้ดังรูปที่ 3.12(ก) และ (ข) ตามลำดับ

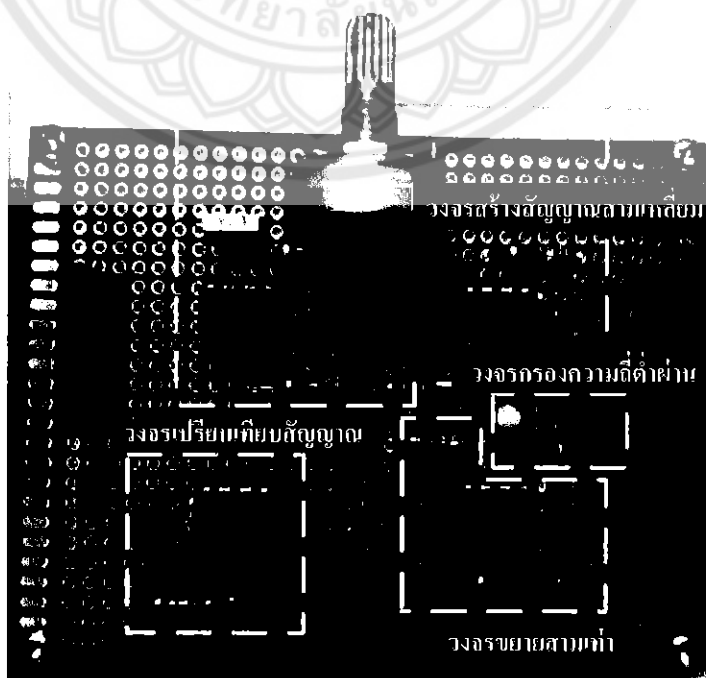


ก) สัญญาณอ้างอิงและสัญญาณควบคุม

ข) สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์

รูปที่ 3.12 สัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ที่มีค่าความถี่ไซเคิล 80%

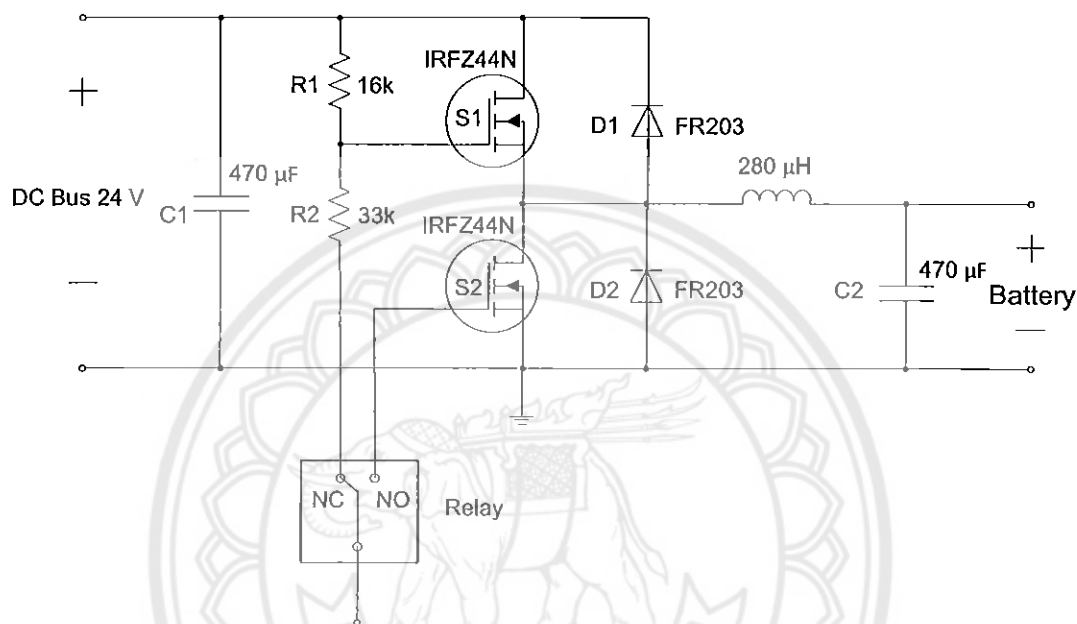
หลังจากทดสอบการทำงานของวงจรบนโปรโตบอร์ด (Protoboard) แล้วติดตั้งอุปกรณ์ลงบนบอร์ดไปปลา (Pretboard) ซึ่งประกอบด้วยวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมและวงจรเปรียบเทียบเข้าด้วยกันกลายเป็นวงจรสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.13 วงจรสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์

3.3 การขับนำมอสเฟตในตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง

แบบจำลองตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางที่ออกแบบขึ้นแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.14 แบ่งการทำงานออกเป็นสองช่วงคือทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันในช่วงการอัดประจุและทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดันในช่วงการคายประจุแบตเตอรี่ โดยจำลองการทำงานของวงจรในการควบคุมค่าแรงดันและจำกัดกระแส



รูปที่ 3.14 แผนภาพวงจรตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง

ในการทำงานเป็นวงจรทบระดับแรงดันของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางสามารถทำได้ด้วยการควบคุมให้มอสเฟต S2 ทำงาน โดยขาเกตของมอสเฟตได้รับสัญญาณควบคุมการนำกระแสและหยุดนำกระแสจากวงจรสร้างสัญญาณควบคุม

ในการทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางสามารถทำได้ด้วยการควบคุมให้มอสเฟต S1 ทำงาน ซึ่งในการขับมอสเฟตให้นำกระแส นั้นจำเป็นต้องให้ความต่างศักย์ระหว่างขาเกตและขาซอร์สมีค่าสูงพอเพราะ S1 นั้นมีศักย์ไฟฟ้าที่ขาซอร์สเท่ากับแรงดันของแบตเตอรี่ ส่งผลให้แรงดันที่จำเป็นต้องใช้ในการขับมอสเฟตมีค่าสูงขึ้นซึ่งแตกต่างจากการขับ S2 ที่ศักย์ไฟฟ้าขาซอร์สเป็นศูนย์ ดังนั้นในโครงการนี้จึงแก้ปัญหาการสร้างแรงดันที่ใช้ในการขับขาเกตของมอสเฟต S1 ด้วยการใช้วงจรแบ่งแรงดันชนิดตัวต้านทานเพื่อเพิ่มระดับแรงดันที่ใช้ขับขาเกตของมอสเฟตเพื่อให้มอสเฟตสามารถทำงานได้

อย่างไรก็ตามค่าระดับแรงดันที่ใช้ในการจับนำออสเฟด S1 นั้นได้มีการทดสอบเลือกใช้ค่าความต้านทานที่เหมาะสมเพื่อให้แรงดันที่ใช้ในการจับนำ S1 เพียงพอและได้ค่าแรงดันเอาต์พุตอยู่ในย่านที่ต้องการใช้งานคือ 12-15 V โดยใช้โหลดตัวต้านทาน 87.4 Ω และใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงทำการจ่ายแรงดันคงที่ 12 V ให้กับวงจรในช่วงทบทระดับแรงดันและจ่ายแรงดันคงที่ที่ 24 V ให้กับวงจรในช่วงทอนระดับแรงดัน จากนั้นได้ปรับค่าตัวรีซิสเตอร์แล้วบันทึกค่าแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

โดยที่	V_{in}	คือแรงดันอินพุตของวงจรทอนระดับแรงดัน (V)
	I_{in}	คือกระแสอินพุตของวงจรทอนระดับแรงดัน (A)
	V_{out}	คือแรงดันไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทาน (V)
	D	คือค่าตัวรีซิสเตอร์ (%)

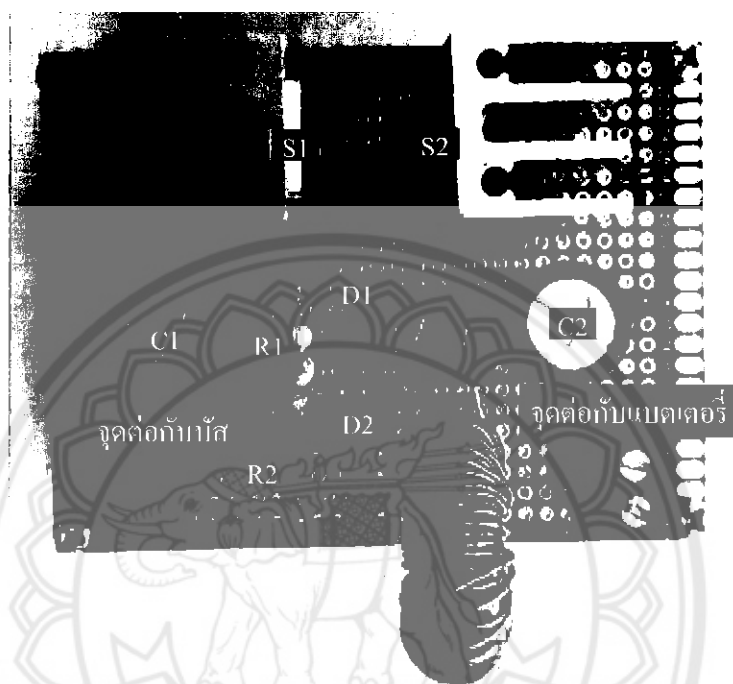
ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางช่วงทบทระดับแรงดัน

D (%)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)
20	12	0.35	17.55
30	12	0.61	22.45
40	12	1.08	29.32
50	12	1.77	37.07
60	12	2.11	40.44
70	12	2.78	45.87

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางช่วงทอนระดับแรงดัน

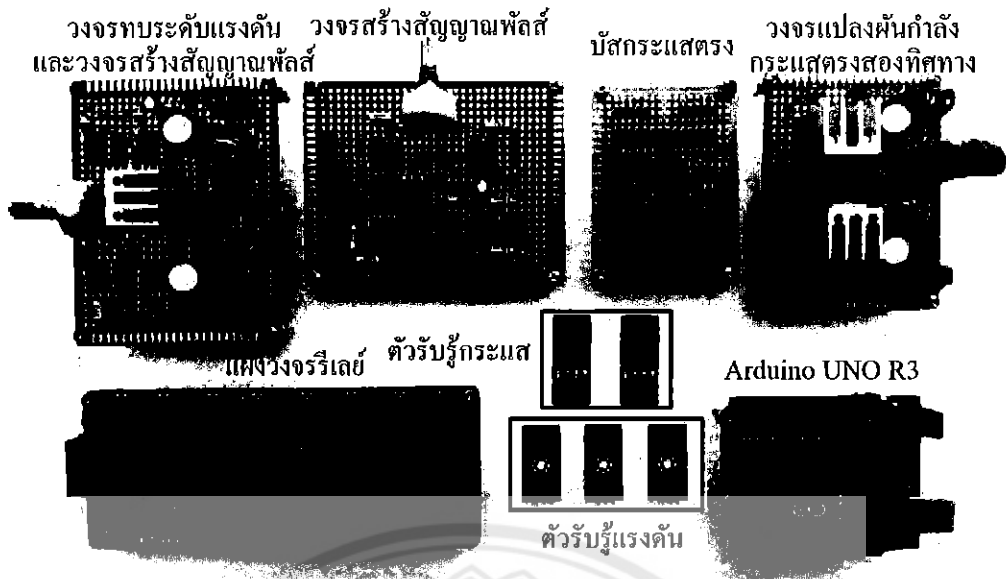
D (%)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)
20	24	0.15	13.27
30	24	0.16	13.69
40	24	0.16	14.06
50	24	0.16	14.35
60	24	0.17	14.56
70	24	0.17	14.73
80	24	0.17	14.85

ผลการทดสอบทั้งสองช่วงการทำงานแสดงให้เห็นว่าวงจรที่ออกแบบขึ้นสามารถใช้งานได้ โดยตัวต้านทานที่ใช้เพิ่มค่าแรงดันในการขับนำมอสเฟต S1 คือ $R1 = 16\text{ k}\Omega$ และ $R2 = 33\text{ k}\Omega$ และได้ค่าแรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วงที่ต้องการ การประกอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางที่ออกแบบขึ้นลงบนแผงวงจรไข่ปลาแสดงดังรูปที่ 3.15

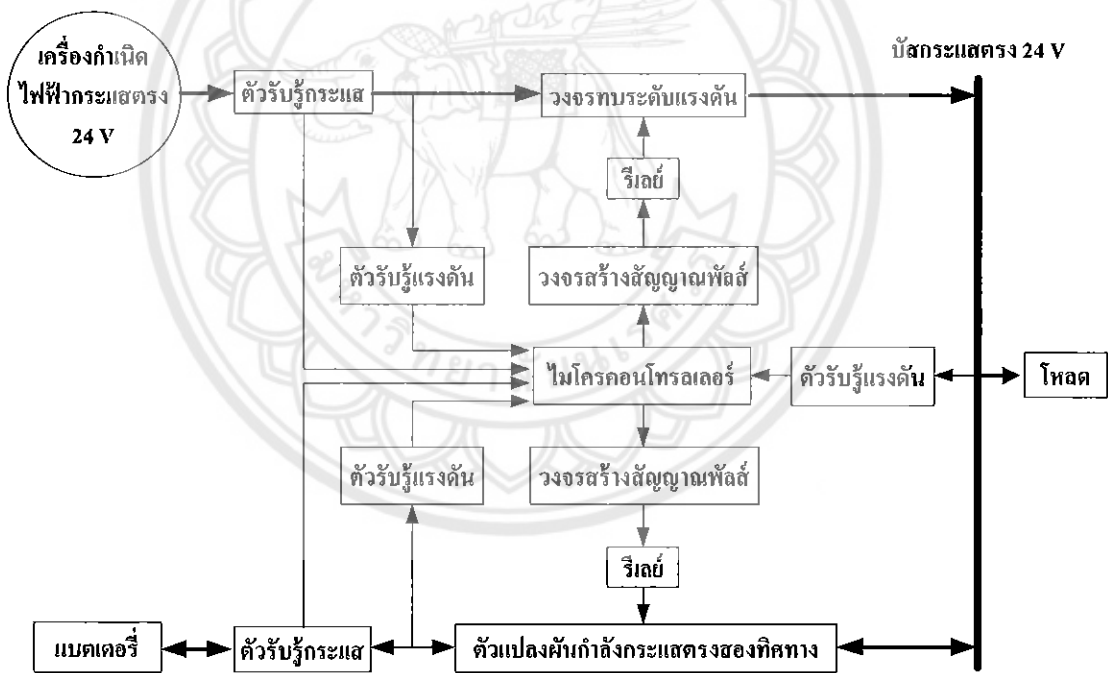


รูปที่ 3.15 ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง

หลังจากที่ประกอบวงจรต่างๆบนแผงวงจรไข่ปลาแล้วจึงนำวงจรทั้งหมดมาติดตั้งบนแผ่นอะคริลิกใสร่วมกับตัวรับรู้แรงดัน ตัวรับรู้กระแสรีเลย์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ดังรูปที่ 3.16 โดยจะทำการเชื่อมต่อวงจรและอุปกรณ์ข้างต้นเพื่อประกอบเป็นแบบจำลองระบบไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้นตามแผนภาพดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 การติดตั้งแผงวงจรในแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 3.17 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรของระบบจ่ายไฟฟ้าที่ออกแบบ

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของแบบจำลองระบบจ่ายไฟที่สร้างขึ้นเพื่อรักษาระดับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ ให้คงที่แม้กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะเปลี่ยนแปลงไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1) การทดสอบการทำงานของวงจรระดับแรงดันและตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางและหาประสิทธิภาพของวงจร

2) การทดสอบการรักษาระดับกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับให้คงที่ในสามกรณี คือกรณีที่ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความต้องการของโหลด กรณีที่ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด และกรณีที่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้

4.1 การทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจร

ในการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรระดับแรงดันและตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง ได้ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายแรงดันอินพุตให้กับวงจรเพื่อจ่ายโหลดตัวต้านทาน 87.4Ω และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ในขณะที่แรงดันอินพุตมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ผลการทดสอบการทำงานของวงจรระดับแรงดันและของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางที่ทำงานเป็นวงจรระดับแรงดันเพื่อคงค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ที่ 12 V แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

โดยที่	V_G	คือแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (V)
	I_G	คือกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (A)
	P_G	คือกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (W)
	V_{Load}	คือแรงดันไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทาน (V)
	P_{Load}	คือกำลังไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทานได้รับ (W)
	η	คือประสิทธิภาพของวงจร (%) ซึ่งหาจาก

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.1)$$

โดยที่	P_{out}	คือกำลังเอาต์พุตของวงจร (W)
	P_{in}	คือกำลังอินพุตของวงจร (W)

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดัน

V_G (V)	I_G (A)	P_G (W)	V_{Load} (V)	P_{Load} (W)	η (%)
4	0.64	2.56	12	1.65	64.45
5	0.47	2.35	12	1.65	70.21
6	0.37	2.22	12	1.65	74.32
7	0.33	2.31	12	1.65	71.43
8	0.29	2.32	12	1.65	71.12
9	0.26	2.34	12	1.65	70.51

การทดสอบหาประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดัน ได้พิจารณาจากค่าดิวิตีไซเคิลใช้งานในช่วง 0.2 ถึง 0.8 เพื่อให้สร้างแรงดันเอาต์พุตเป็น 12 V ได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้โดยมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงประมาณ 64% ถึง 74%

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในช่วงการทระดับแรงดัน

V_G (V)	I_G (A)	P_G (W)	V_{Load} (V)	P_{Load} (W)	η (%)
4	0.52	2.08	12	1.65	79.33
5	0.43	2.15	12	1.65	76.74
6	0.37	2.22	12	1.65	74.32
7	0.31	2.17	12	1.65	76.04
8	0.27	2.16	12	1.65	76.39
9	0.24	2.16	12	1.65	76.39

การทดสอบหาประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางช่วงทระดับแรงดันซึ่งได้พิจารณาจากค่าดิวิตีไซเคิลใช้งานในช่วง 0.2 ถึง 0.8 เพื่อให้วงจรสามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตเป็น 12 V ได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้โดยมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงประมาณ 74% ถึง 79%

การทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในช่วงที่ทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันได้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในการจ่ายแรงดันอินพุตและคงค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ที่ 14.4 V ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในช่วงการทอนระดับแรงดัน

V_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{in} (W)	V_{Load} (V)	P_{Load} (W)	η (%)
ใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายโหลดตัวต้านทาน 87.4 Ω และคุมค่าแรงดันไว้ที่ 14.4 V					
23	0.23	5.29	14.40	2.37	44.80
24	0.23	5.52	14.40	2.37	42.98
25	0.23	5.75	14.37	2.36	41.04
26	0.22	5.72	14.39	2.37	41.43
ใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายโหลดตัวต้านทาน 5 Ω โดยต้องการคุมค่าแรงดันไว้ที่ 5 V และจำกัดกระแสไหลไม่เกิน 0.5 A					
10	0.53	5.30	2.80	1.57	29.62
11	0.73	8.03	3.60	2.59	32.25
12	0.79	9.48	3.90	3.04	32.07

โดยที่ V_{in} คือแรงดันอินพุตของวงจรทอนระดับแรงดัน (V)
 I_{in} คือกระแสอินพุตของวงจรทอนระดับแรงดัน (A)
 P_{in} คือกำลังอินพุตของวงจรทอนระดับแรงดัน (W)
 V_{Load} คือแรงดันไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทาน (V)
 P_{Load} คือกำลังไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทานได้รับ (W)
 η คือประสิทธิภาพของวงจร (%)

จากการทดสอบใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายโหลดตัวต้านทาน 87.4 Ω และคุมค่าแรงดันไว้ที่ 14.4 V โดยมีเงื่อนไขคือแรงดันอินพุตต้องอยู่ในช่วง 23 V ถึง 26 V ตามการออกแบบค่าความต้านทานในหัวข้อที่ 3.3 และพบว่าวงจรสามารถสร้างแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ตามต้องการ และมีประสิทธิภาพการใช้งานอยู่ในช่วงประมาณ 41% ถึง 45% นอกจากนี้การทดสอบการจำกัดกระแสของวงจรโดยใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายโหลดตัวต้านทานขนาด 5 Ω โดยคุมค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ที่ 5 V และจำกัดกระแสเอาต์พุตให้ไม่เกิน 0.5 A พบว่าวงจรไม่สามารถคุมค่าแรงดันเอาต์พุตไว้ที่ 5 V ได้อันเป็นผลมาจากเงื่อนไขในการจำกัดกระแส (เพราะถ้าสร้างแรงดันเอาต์พุต 5 V จะทำให้เกิดกระแสไหล 1 A ซึ่งสูงเกินกว่าที่ต้องการ) แต่ผลการทดสอบพบว่ามีการเสถียรค่าสูงกว่า 0.5 A นั้นเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของตัวรับรู้กระแส อย่างไรก็ตามผลที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถจำกัดกระแสได้และมีประสิทธิภาพการทำงานอยู่ที่ 29% ถึง 32%

4.2 การทดสอบการทำงานของระบบจ่ายไฟ

การทำงานของระบบจ่ายไฟที่ออกแบบขึ้นถูกทดสอบกับแบบจำลองที่จ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ให้กับโหลดตัวต้านทานขนาด 87.4 Ω ซึ่งเชื่อมต่อโดยตรงกับบัลลิ่งกระแสตรง 24 V และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 V จำลองการสร้างกำลังไฟฟ้าที่ไม่คงที่จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนโดยเชื่อมต่อกับบัลลิ่งผ่านวงจรทระดับแรงดัน และใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่วขนาด 12 V เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานและเป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองโดยเชื่อมต่อกับบัลลิ่งผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง ซึ่งการทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยใช้กำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำหนดเงื่อนไขการทำงาน นั่นคือขณะที่กำลังไฟฟ้าเหลือจากการจ่ายโหลด ขณะที่กำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอในการจ่ายโหลด และขณะที่ไม่สามารถจ่ายโหลดได้ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลเพื่อควบคุมการทำงาน จากการทดสอบการทำงานของระบบค่าแรงดันและกระแสที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของวงจรที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.5

โดยที่	V_G	คือแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (V)
	I_G	คือกระแสเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (A)
	$I_{Boost \rightarrow Bus}$	คือกระแสจากวงจรทระดับแรงดันที่ไหลเข้าบัลลิ่ง (A)
	$V_{Battery}$	คือแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ (V)
	$I_{Battery}$	คือกระแสของแบตเตอรี่ (A) โดยกำหนดให้มีเครื่องหมายเป็นบวกถ้าไหลออก และเป็นลบถ้าไหลเข้า
	V_{Bus}	คือแรงดันของบัลลิ่งหรือแรงดันที่โหลด (V)
	P_G	คือกำลังเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (W)
	$P_{Boost \rightarrow Bus}$	คือกำลังไฟฟ้าจากวงจรทระดับแรงดันที่ไหลเข้าบัลลิ่ง (W)
	$P_{Battery}$	คือกำลังที่จ่ายออกหรือรับเข้าของแบตเตอรี่ (W) โดยกำหนดให้มีเครื่องหมายเป็นบวกถ้าจ่ายออก และเป็นลบถ้ารับเข้า
	P_{Load}	คือกำลังไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทานได้รับ (W)
	η_{Boost}	คือประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดัน (%)
	η_{Bi_Boost}	คือประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในขณะที่ทำงานเป็นวงจรทระดับแรงดัน (%)
	η_{Bi_Buck}	คือประสิทธิภาพของตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในขณะที่ทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดัน (%)

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบแบบจำลองระบบจ่ายไฟ

V_G (V)	I_G (A)	$I_{Boost \rightarrow Bus}$ (A)	$V_{Battery}$ (V)	$I_{Battery}$ (A)	V_{Bus} (V)
0.00	0.00	0.00	12.70	0.71	24.20
5.00	0.14	0.02	12.70	0.65	24.50
6.00	0.18	0.03	12.70	0.62	24.30
7.00	0.20	0.04	12.70	0.60	24.20
8.00	0.29	0.07	12.70	0.52	24.10
9.00	0.45	0.11	12.69	0.41	23.90
10.00	0.61	0.18	12.69	0.22	23.80
11.00	0.71	0.23	12.69	0.12	24.30
12.00	0.98	0.34	13.12	-0.04	24.10
13.00	1.32	0.49	13.30	-0.11	24.10
14.00	1.36	0.55	13.33	-0.15	23.90
15.00	1.41	0.59	13.47	-0.17	24.00

ตารางที่ 4.5 ค่ากำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพจากการทดสอบแบบจำลองระบบจ่ายไฟ

P_G (W)	$P_{Boost \rightarrow Bus}$ (W)	$P_{Battery}$ (W)	P_{Load} (W)	η_{Boost} (%)	η_{Bi_Boost} (%)	η_{Bi_Buck} (%)
0.00	0.00	9.02	6.70	-	74.30	-
0.70	0.49	8.26	6.87	70.00	77.29	-
1.08	0.73	7.87	6.76	67.50	76.59	-
1.40	0.97	7.62	6.70	69.14	75.22	-
2.32	1.69	6.60	6.65	72.72	75.15	-
4.05	2.63	5.20	6.54	64.91	75.17	-
6.10	4.28	2.79	6.48	70.23	78.66	-
7.81	5.59	1.52	6.76	71.56	76.90	-
11.76	8.19	-0.52	6.65	69.68	-	33.99
17.16	11.81	-1.46	6.65	68.82	-	28.36
19.04	13.15	-2.00	6.54	69.04	-	30.27
21.15	14.16	-2.29	6.59	66.95	-	30.25

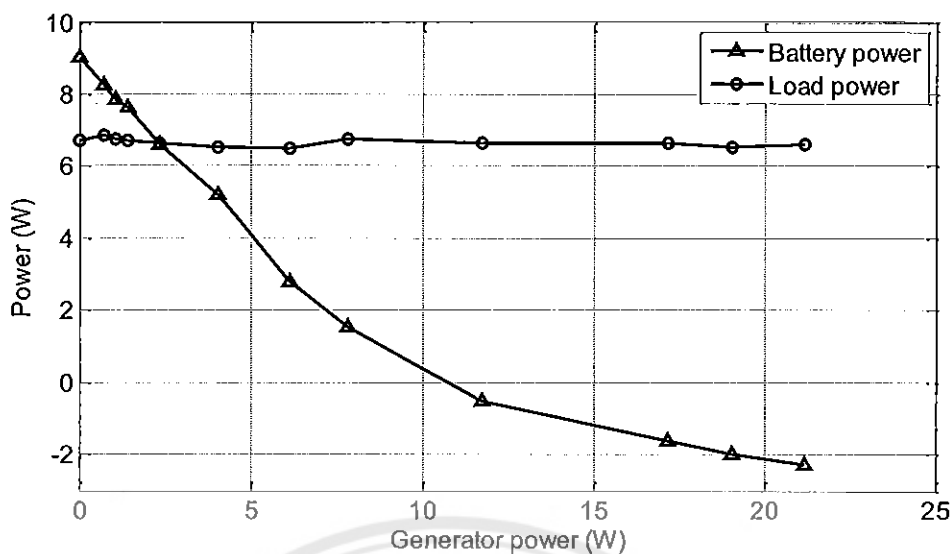
เงื่อนไขของการทำงานในแบบวิธีแรกคือแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้มากกว่า 4 V ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่วงจรสามารถเพิ่มระดับแรงดันขึ้นเป็น 24 V ได้ และให้กำลังไฟฟ้ามากกว่า 10 W ซึ่งมีค่าสูงพอสำหรับจ่ายโหลดและอัดประจุแบตเตอรี่ โดยออกแบบให้ครอบคลุมค่ากำลังสูญเสียวงจรตามผลการทดสอบที่ 4.1 ในแบบวิธีการทำงานนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่ในการจ่ายโหลดและอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4 ที่ค่า V_G ตั้งแต่ 12.00 V และตารางที่ 4.5 ที่ค่า P_G ตั้งแต่ 11.84 W เป็นต้นไป

เงื่อนไขของการทำงานในแบบวิธีที่สองคือแรงดันที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้มากกว่า 4 V ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่วงจรสามารถเพิ่มระดับแรงดันขึ้นเป็น 24 V ได้ แต่กำลังการผลิตน้อยกว่า 10 W ซึ่งไม่เพียงพอในการจ่ายโหลดเพียงลำพัง ในโหมดการทำงานนี้จึงให้แบตเตอรี่คายประจุเพื่อช่วยจ่ายโหลดร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.4 ที่ค่า V_G ตั้งแต่ 5.00 V ถึง 11.00 V และตารางที่ 4.5 ที่ค่า P_G ตั้งแต่ 0.72 W ถึง 7.84 W

เงื่อนไขของการทำงานแบบวิธีที่สามคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตแรงดันได้ต่ำกว่า 4 V วงจรจึงไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันขึ้นเป็น 24 V ได้ ในแบบวิธีนี้จึงเปิดวงจรการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และให้แบตเตอรี่คายประจุเพื่อจ่ายโหลดเพียงลำพัง ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4 ที่ค่า V_G เท่ากับ 0.00 V และตารางที่ 4.5 ที่ค่า P_G เท่ากับ 0.00 W

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกหรือไหลเข้าจากแบตเตอรี่ในแต่ละขณะแสดงดังรูปที่ 4.1 ค่ากำลังไฟฟ้าจากการทดสอบการทำงานของแบบจำลองระบบจ่ายไฟเมื่อไม่มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ($P_G = 0.00$ W) แบตเตอรี่ต้องคายประจุเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดตามลำพัง ($P_{Battery} = 9.02$ W และ $P_{Load} = 6.70$ W) โดยเกิดกำลังสูญเสียประมาณ 2.3 W ภายในตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง (ซึ่งขณะนี้มีค่าประสิทธิภาพ 74.30%)

หลังจากที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่บัส กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่จึงมีค่าลดลง ซึ่งในขณะนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบตเตอรี่ร่วมกันจ่ายโหลด เช่น ที่ $P_G = 6.10$ W $P_{Battery} = 2.79$ W และ $P_{Load} = 6.48$ W มีกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไหลเข้าบัส 4.28 W เพราะมีกำลังสูญเสีย 1.82 W ภายในวงจรทระดับแรงดัน (ขณะนี้จึงมีค่าประสิทธิภาพ 70.23%) และมีกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไหลเข้าบัส 2.2 W เพราะมีกำลังสูญเสียประมาณ 0.60 W ภายในตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง (ค่าประสิทธิภาพ 78.66%)



รูปที่ 4.1 ค่ากำลังไฟฟ้าจากผลการทดสอบการทำงานของแบบจำลองระบบจ่ายไฟ

จนกระทั่งเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างกำลังได้เกิน 10 W ซึ่งสูงกว่าที่โหลดต้องการรวมทั้งกำลังสูญเสียของวงจรระดับแรงดัน กำลังไฟฟ้าที่เหลือจึงถูกใช้อัดประจุแบตเตอรี่ (แสดงด้วยค่าลบ) เช่นที่ $P_G = 19.04$ W $P_{Battery} = -2.00$ W และ $P_{Load} = 6.54$ W มีกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไหลเข้าบัส 13.15 W เพราะมีกำลังสูญเสีย 5.90 W ภายในวงจรระดับแรงดัน (ขณะนี้มีความประสิทธิภาพ 69.04%) และแบตเตอรี่ถูกอัดประจุด้วยกำลังไฟฟ้า 2.00 W เพราะมีกำลังสูญเสีย 4.61 W ภายในตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง (ขณะนี้มีความประสิทธิภาพ 30.27%) ทั้งนี้ตลอดการทำงานของระบบสามารถรักษาระดับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดได้ค่อนข้างคงที่โดยมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าที่ต้องการไม่เกิน $\pm 5\%$

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินโครงการสามารถสรุปผล และชี้แจงปัญหาในการดำเนินงาน รวมทั้งเสนอแนะแนวทางการแก้ปัญหา และให้ข้อเสนอแนะในการนำโครงการไปพัฒนาต่อไปดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

ในโครงการนี้ได้ออกแบบและจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนให้กับโหลดที่ต้องการกำลังไฟฟ้าคงที่ โดยใช้ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางเพื่อควบคุมการอัดประจุและคายประจุให้กับแบตเตอรี่ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าได้ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 V สำหรับจำลองการสร้างกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียน โดยมีแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วขนาด 12 V เป็นแหล่งจ่ายสำรองและจำลอง โหลด โดยใช้ตัวต้านทาน ซึ่งรูปแบบการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าที่ออกแบบขึ้น ได้ใช้กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเงื่อนไขในการทำงาน โดยแบ่งได้เป็นสามกรณี เมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความต้องการของโหลด กำลังไฟฟ้าที่เหลือจะนำมาอัดประจุแบตเตอรี่ผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทาง ซึ่งขณะนี้ทำหน้าที่เป็นวงจรทอนระดับแรงดัน กรณีที่สอง เมื่อกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าความต้องการของโหลด โหลดจึงดึงกำลังไฟฟ้าส่วนที่ขาดมาจากแบตเตอรี่โดยคายประจุผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางซึ่งขณะนี้ทำหน้าที่เป็นวงจรทอนระดับแรงดัน และกรณีสุดท้าย เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้จึงควบคุมให้แบตเตอรี่คายประจุเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดเพียงลำพัง

การทำงานของแบบจำลองที่สร้างขึ้นแสดงให้เห็นว่าถึงแม้กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่แน่นอนแต่ระบบสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดได้อย่างต่อเนื่องและมีค่าคงที่เสมอ โดยในช่วงที่กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าความต้องการของโหลดรวมกับค่ากำลังสูญเสียในวงจรทอนระดับแรงดัน กำลังไฟฟ้าส่วนเหลือถูกนำมาอัดประจุแบตเตอรี่ผ่านตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางได้ ในช่วงที่กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าความต้องการของโหลดรวมกับค่ากำลังสูญเสียในวงจรทอนระดับแรงดัน ระบบสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มาช่วยในการจ่ายโหลดให้ยังคงได้รับกำลังไฟฟ้าคงที่ และในช่วงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้ โหลดยังคงได้รับกำลังไฟฟ้าคงที่จากแบตเตอรี่

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

- 1) ในช่วงระหว่างการเปลี่ยนรูปแบบการทำงานของระบบส่งผลให้แรงดันที่บัสตกลงเล็กน้อยเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนกลับมาคงที่ที่ 24 V ซึ่งกรณีนี้อาจแก้ไขโดยเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีรอบในการประมวลผลที่ไวขึ้น
- 2) แรงดันสูงสุดที่ใช้อัดประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่ว 12 V มีค่า 14.4 V แต่ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ตัวแปลงผันกำลังกระแสตรงสองทิศทางในขณะที่ทำงานเป็นวงจรทอนระดับแรงดันสามารถสร้างแรงดันเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่ได้ประมาณ 13 V ซึ่งเกิดจากกำลังสูญเสียจากการใช้วงจรแบ่งแรงดันชนิดตัวต้านทานที่ใช้ขั้วนำมอสเฟต โดยอาจแก้ไขได้โดยเพิ่มวงจรที่ใช้ในการขับมอสเฟต ซึ่งเพิ่มความซับซ้อนของวงจรควบคุมและเพิ่มต้นทุนในการสร้าง
- 3) ตัวรับรู้กระแสที่ใช้งานในระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนและการแกว่งของค่าที่วัด ส่งผลให้การนำค่ามาคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าเพื่อเป็นเงื่อนไขในการเปลี่ยนรูปแบบการทำงานของระบบมีการแกว่งขึ้นลงแต่ไม่มากนัก ส่งผลให้ในช่วงที่กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับค่าของเงื่อนไขเลยจะตัดต่อวงจรไปมาเพื่อเปลี่ยนรูปแบบการทำงานของระบบซึ่งเป็นการทำงานที่ผิดพลาด ในกรณีนี้อาจแก้ไขปัญหาโดยการเลือกใช้ตัวรับรู้กระแสที่แม่นยำขึ้นซึ่งเพิ่มต้นทุนในการสร้าง

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

- 1) การออกแบบการทำงานของระบบโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ต่อร่วมในระบบเพื่อจ่ายโหลดกระแสสลับ
- 2) การออกแบบการทำงานของระบบที่รองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนชนิดอื่น เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) การเพิ่มส่วนบันทึกข้อมูล ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือกำลังไฟฟ้าในระบบเพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์การทำงานของระบบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐุ์ ชันเงิน และวุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)”, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินตติ้ง, กรุงเทพฯ, 2550.
- [2] เอกพจน์ อิ่มเขียว และสุรพงศ์ มะหลิแก้ว, “เครื่องกำเนิดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม” ปรินทูนานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2553.
- [3] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. สืบค้นเมื่อ 8 กันยายน 2557 จาก <http://www.ee.buu.ac.th>.
- [4] กรมสรรพสามิต, “เบตเตอร์”, สามิตสาร ปีที่ 5 ฉบับที่ 5, กรมสรรพสามิต, กรุงเทพฯ, 2542.





```
//ประกาศตัวแปร
int val_BUCK;
float Vout_BUCK;
float temp_BUCK;
int val_BOOST;
float Vout_BOOST;
float temp_BOOST;
int val_GEN;
float Vout_GEN;
float temp_GEN;
int Vref=15;
float DutyCycle=20;
int Vref_BUCK=15;
float DutyCycle_BUCK=20;
int Vref_GEN=15;
float DutyCycle_GEN=20;
int RELAY_1 = 7; //สัญญาณ Bi-directional M1 ต่อกับ NC M2 ต่อกับ NO
int RELAY_2 = 2; //สัญญาณ Generator NC
int RELAY_3 = 3; //เหนือ M1 ต่อกับ NO
int RELAY_4 = 4; //เหนือ M2 ต่อกับ NO
int RELAY_5 = 8; //Generator ต่อกับ NC
float Current;
float Current2;
float Current3;
float Current4;
float A;
float V[20];
float B;
float V2[20];
float Power;
float PowerOutBoostGEN;
```

```

void setup()
{กำหนดรูปแบบการเชื่อมต่อของรีเลย์
pinMode(RELAY_1,OUTPUT);
pinMode(RELAY_2,OUTPUT);
pinMode(RELAY_3,OUTPUT);
pinMode(RELAY_4,OUTPUT);
pinMode(RELAY_5,OUTPUT); }

```

```

void loop()
{ VoltageSensor_GEN();
CurrentSensor();
CurrentSensorPower();
VoltageSensor_BUCK();
VoltageSensor_BOOST();
CurrentNew();
Power=abs(Vout_GEN*A);
if( Power > 10 ) //กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า 10 W
{ digitalWrite(RELAY_5,HIGH);
digitalWrite(RELAY_3,LOW);
digitalWrite(RELAY_4,HIGH);
digitalWrite(RELAY_2,HIGH);
digitalWrite(RELAY_1,HIGH);
VoltageSensor_BOOST();
GEN();
VoltageSensor_BUCK();
BUCK();
}
if( (Vout_GEN > 4) && (Power < 10) ) //กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า
4 V แต่จ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 10 W
{ digitalWrite(RELAY_5,HIGH);
digitalWrite(RELAY_3,HIGH);
digitalWrite(RELAY_4,LOW);

```

```

digitalWrite(RELAY_2,HIGH);
digitalWrite(RELAY_1,LOW);
VoltageSensor_BOOST();
GEN();
VoltageSensor_BOOST();
BOOST();
}
if( Vout_GEN < 4 ) //กรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้น้อยกว่า 4 V
{ digitalWrite(RELAY_5,LOW);
digitalWrite(RELAY_3,HIGH);
digitalWrite(RELAY_4,LOW);
digitalWrite(RELAY_2,LOW);
digitalWrite(RELAY_1,LOW);
VoltageSensor_BOOST();
BOOST();
}

void VoltageSensor_BUCK() //ตรวจวัดค่าแรงดันของแบตเตอรี่
{ val_BUCK=analogRead(0);
temp_BUCK=val_BUCK/4.092;
val_BUCK=(int)temp_BUCK;//
Vout_BUCK=((val_BUCK%1000)/10.0); }

void VoltageSensor_BOOST() //ตรวจวัดค่าแรงดันของบัส
{ val_BOOST=analogRead(1);
temp_BOOST=val_BOOST/4.092;
val_BOOST=(int)temp_BOOST;//
Vout_BOOST=((val_BOOST%1000)/10.0); }

void VoltageSensor_GEN()//ตรวจวัดค่าแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
{ val_GEN=analogRead(2);
temp_GEN=val_GEN/4.092;

```

```

val_GEN=(int)temp_GEN;//
Vout_GEN=((val_GEN%1000)/10.0); }

```

```

void BUCK();//ควบคุมการทำงานของตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้าสองทิศทางขณะทำงานเป็นวงจรทอน
ระดับแรงดัน

```

```

{ if(B<0.5)
{ if(Vout_BUCK<14.4)
{ DutyCycle=DutyCycle+0.2; }
if(Vout_BUCK>14.4)
{ DutyCycle=DutyCycle-0.2; } }
if(B>0.5)
{ DutyCycle=DutyCycle-0.2; }
Vref=map(DutyCycle,0,100,0,255);
analogWrite(5,Vref_BUCK); }

```

```

void BOOST();//ควบคุมการทำงานของตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้าสองทิศทางขณะทำงานเป็นวงจรทบ
ระดับแรงดัน

```

```

{ if(Vout_BOOST<24.5)
{ DutyCycle=DutyCycle+0.2; }
if(Vout_BOOST>24.5)
{ DutyCycle=DutyCycle-0.2; } }
Vref=map(DutyCycle,0,100,0,255);
analogWrite(5,Vref); }

```

```

void GEN();//ควบคุมการทำงานของวงจรทบระดับแรงดันที่เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

```

```

{ if(Vout_BOOST<24.5)
{ DutyCycle_GEN=DutyCycle_GEN+0.2; }
if(Vout_BOOST>24.5)
{ DutyCycle_GEN=DutyCycle_GEN-0.2; }
Vref_GEN=map(DutyCycle_GEN,0,100,0,255);
analogWrite(9,Vref_GEN); }

```

```

void CurrentSensor()//ตรวจวัดค่ากระแสที่เข้าแบตเตอรี่
Current = analogRead(A3);
Current2=(((Current-511)*5)/1023)/0.066);
//Current2=((0.0049 * Current) - 2.5)/0.066;
for(int j=0;j<20;j++)
{V2[j]= Current2; }
B=(V2[0]+V2[1]+V2[2]+V2[3]+V2[4]+V2[5]+V2[6]+V2[7]+V2[8]+V2[9]+V2[10]+V2[11]+V2
[12]+V2[13]+V2[14]+V2[15]+V2[16]+V2[17]+V2[18]+V2[19])/20; }

```

```

void CurrentSensorPower()//ตรวจวัดค่ากระแสที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
{ Current3 = analogRead(A4);
Current4=(((Current3-511)*5)/1023)/0.066);
for(int i=0;i<20;i++)
{ V[i]= Current4; }
A=(V[0]+V[1]+V[2]+V[3]+V[4]+V[5]+V[6]+V[7]+V[8]+V[9]+V[10]+V[11]+V[12]+V[13]+V[
14]+V[15]+V[16]+V[17]+V[18]+V[19])/20; }

```



ภาคผนวก ข

รายละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328

มหาวิทยาลัยสุรินทร์

Features

- **High Performance, Low Power AVR® 8-Bit Microcontroller**
- **Advanced RISC Architecture**
 - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 20 MIPS Throughput at 20 MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier
- **High Endurance Non-volatile Memory Segments**
 - 4/8/16/32K Bytes of In-System Self-Programmable Flash program memory (ATmega48PA/88PA/168PA/328P)
 - 256/512/512/1K Bytes EEPROM (ATmega48PA/88PA/168PA/328P)
 - 612/1K/1K/2K Bytes Internal SRAM (ATmega48PA/88PA/168PA/328P)
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
In-System Programming by On-chip Boot Program
True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
- **Peripheral Features**
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Six PWM Channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
Temperature Measurement
 - 6-channel 10-bit ADC in PDIP Package
Temperature Measurement
 - Programmable Serial USART
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte-oriented 2-wire Serial Interface (Philips I²C compatible)
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- **Special Microcontroller Features**
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- **I/O and Packages**
 - 23 Programmable I/O Lines
 - 28-pin PDIP, 32-lead TQFP, 28-pad QFN/MLF and 32-pad QFN/MLF
- **Operating Voltage:**
 - 1.8 - 5.5V for ATmega48PA/88PA/168PA/328P
- **Temperature Range:**
 - -40°C to 85°C
- **Speed Grade:**
 - 0 - 20 MHz @ 1.8 - 5.5V
- **Low Power Consumption at 1 MHz, 1.8V, 25°C for ATmega48PA/88PA/168PA/328P:**
 - Active Mode: 0.2 mA
 - Power-down Mode: 0.1 µA
 - Power-save Mode: 0.75 µA (including 32 kHz RTC)



**8-bit AVR®
Microcontroller
with 4/8/16/32K
Bytes In-System
Programmable
Flash**

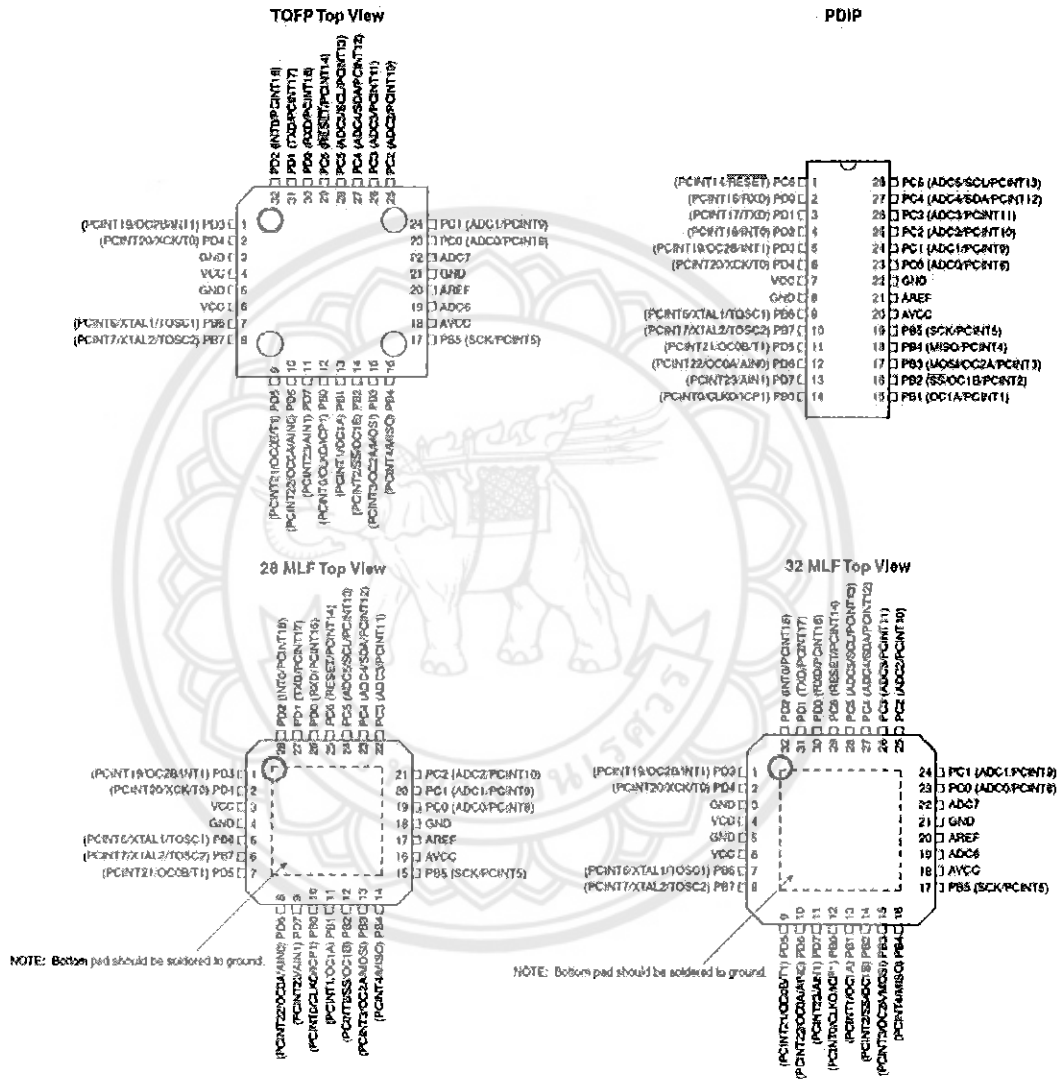
**ATmega48PA
ATmega88PA
ATmega168PA
ATmega328P**

Summary

ATmega48PA/88PA/168PA/328P

1. Pin Configurations

Figure 1-1. Pinout ATmega48PA/88PA/168PA/328P



ATmega48PA/88PA/168PA/328P

1.1 Pin Descriptions

1.1.1 VCC

Digital supply voltage.

1.1.2 GND

Ground.

1.1.3 Port B (PB7:0) XTAL1/XTAL2/TOSC1/TOSC2

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Depending on the clock selection fuse settings, PB6 can be used as input to the inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

Depending on the clock selection fuse settings, PB7 can be used as output from the inverting Oscillator amplifier.

If the Internal Calibrated RC Oscillator is used as chip clock source, PB7..6 is used as TOSC2..1 input for the Asynchronous Timer/Counter2 if the AS2 bit in ASSR is set.

The various special features of Port B are elaborated in "Alternate Functions of Port B" on page 76 and "System Clock and Clock Options" on page 26.

1.1.4 Port C (PC5:0)

Port C is a 7-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The PC5..0 output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

1.1.5 PC6/RESET

If the RSTDISBL Fuse is programmed, PC6 is used as an I/O pin. Note that the electrical characteristics of PC6 differ from those of the other pins of Port C.

If the RSTDISBL Fuse is unprogrammed, PC6 is used as a Reset input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a Reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in Table 28-3 on page 308. Shorter pulses are not guaranteed to generate a Reset.

The various special features of Port C are elaborated in "Alternate Functions of Port C" on page 79.

1.1.6 Port D (PD7:0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

The various special features of Port D are elaborated in "Alternate Functions of Port D" on page 82.

1.1.7 AV_{CC}

AV_{CC} is the supply voltage pin for the A/D Converter, PC3:0, and ADC7:6. It should be externally connected to V_{CC}, even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to V_{CC} through a low-pass filter. Note that PC6..4 use digital supply voltage, V_{CC}.

1.1.8 AREF

AREF is the analog reference pin for the A/D Converter.

1.1.9 ADC7:6 (TQFP and QFN/MLF Package Only)

In the TQFP and QFN/MLF package, ADC7:6 serve as analog inputs to the A/D converter. These pins are powered from the analog supply and serve as 10-bit ADC channels.

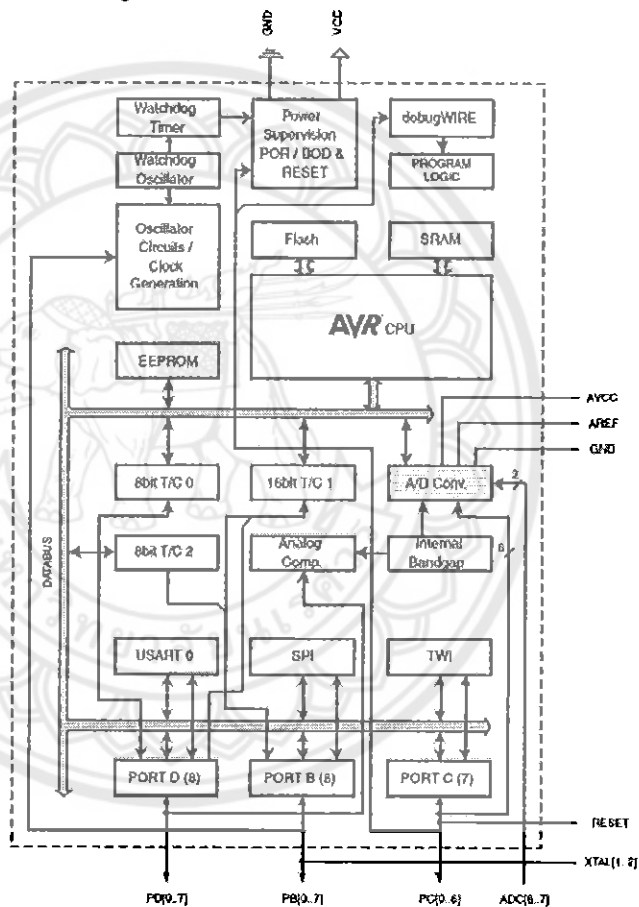
ATmega48PA/88PA/168PA/328P

2. Overview

The ATmega48PA/88PA/168PA/328P is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR enhanced RISC architecture. By executing powerful instructions in a single clock cycle, the ATmega48PA/88PA/168PA/328P achieves throughputs approaching 1 MIPS per MHz allowing the system designer to optimize power consumption versus processing speed.

2.1 Block Diagram

Figure 2-1. Block Diagram



The AVR core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in one single instruction executed in one clock cycle. The resulting

architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.

The ATmega48PA/88PA/168PA/328P provides the following features: 4/8/16/32K bytes of In-System Programmable Flash with Read-While-Write capabilities, 256/512/512/1K bytes EEPROM, 512/1K/1K/2K bytes SRAM, 23 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, three flexible Timer/Counters with compare modes, internal and external interrupts, a serial programmable USART, a byte-oriented 2-wire Serial Interface, an SPI serial port, a 6-channel 10-bit ADC (8 channels in TQFP and QFN/MLF packages), a programmable Watchdog Timer with internal Oscillator, and five software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the SRAM, Timer/Counters, USART, 2-wire Serial Interface, SPI port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or hardware reset. In Power-save mode, the asynchronous timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except asynchronous timer and ADC, to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the crystal/resonator Oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low power consumption.

The device is manufactured using Atmel's high density non-volatile memory technology. The On-chip ISP Flash allows the program memory to be reprogrammed In-System through an SPI serial interface, by a conventional non-volatile memory programmer, or by an On-chip Boot program running on the AVR core. The Boot program can use any interface to download the application program in the Application Flash memory. Software in the Boot Flash section will continue to run while the Application Flash section is updated, providing true Read-While-Write operation. By combining an 8-bit RISC CPU with In-System Self-Programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel ATmega48PA/88PA/168PA/328P is a powerful microcontroller that provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

The ATmega48PA/88PA/168PA/328P AVR is supported with a full suite of program and system development tools including: C Compilers, Macro Assemblers, Program Debugger/Simulators, In-Circuit Emulators, and Evaluation kits.

2.2 Comparison Between ATmega48PA, ATmega88PA, ATmega168PA and ATmega328P

The ATmega48PA, ATmega88PA, ATmega168PA and ATmega328P differ only in memory sizes, boot loader support, and interrupt vector sizes. Table 2-1 summarizes the different memory and interrupt vector sizes for the three devices.

Table 2-1. Memory Size Summary

Device	Flash	EEPROM	RAM	Interrupt Vector Size
ATmega48PA	4K Bytes	256 Bytes	512 Bytes	1 Instruction word/vector
ATmega88PA	8K Bytes	512 Bytes	1K Bytes	1 instruction word/vector
ATmega168PA	16K Bytes	512 Bytes	1K Bytes	2 instruction words/vector
ATmega328P	32K Bytes	1K Bytes	2K Bytes	2 Instruction words/vector

ATmega88PA, ATmega168PA and ATmega328P support a real Read-While-Write Self-Programming mechanism. There is a separate Boot Loader Section, and the SPM instruction can only execute from there. In ATmega48PA, there is no Read-While-Write support and no separate Boot Loader Section. The SPM instruction can execute from the entire Flash.

7.3 ATmega168PA

Speed (MHz) ⁽³⁾	Power Supply	Ordering Code ⁽²⁾	Package ⁽¹⁾	Operational Range
20	1.8 - 5.5	ATmega168PA-AU ATmega168PA-MMH ⁽⁴⁾ ATmega168PA-MU ATmega168PA-PU	32A 28M1 32M1-A 28P3	Industrial (-40°C to 85°C)

- Note:
1. This device can also be supplied in wafer form. Please contact your local Atmel sales office for detailed ordering information and minimum quantities.
 2. Pb-free packaging complies to the European Directive for Restriction of Hazardous Substances (RoHS directive). Also Halide free and fully Green.
 3. See "Speed Grades" on page 312.
 4. NiPdAu Lead Finish.

9.4 Errata ATmega328P

The revision letter in this section refers to the revision of the ATmega328P device.

9.4.1 Rev D

No known errata.

9.4.2 Rev C

Not sampled.

9.4.3 Rev B

• Unstable 32 kHz Oscillator

1. Unstable 32 kHz Oscillator

The 32 kHz oscillator does not work as system clock.

The 32 kHz oscillator used as asynchronous timer is inaccurate.

Problem Fix/ Workaround

None

9.4.4 Rev A

• Unstable 32 kHz Oscillator

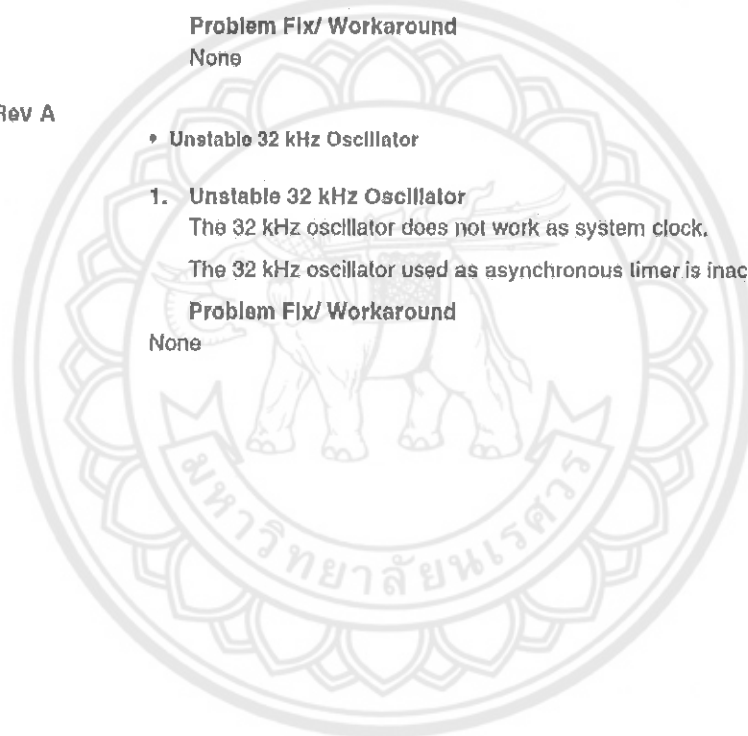
1. Unstable 32 kHz Oscillator

The 32 kHz oscillator does not work as system clock.

The 32 kHz oscillator used as asynchronous timer is inaccurate.

Problem Fix/ Workaround

None





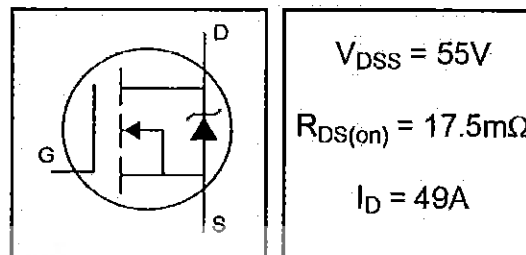
International
IR Rectifier

PD - 94053

IRFZ44N

HEXFET® Power MOSFET

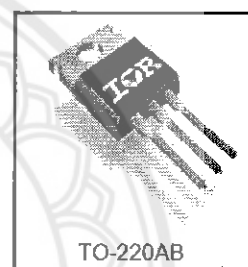
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	49	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	35	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ①	25	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°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 (1.1N·m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

IRFZ44N

International
IOR RectifierElectrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.058	—	V/°C	Reference to 25°C , $I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	17.5	m Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	19	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ②
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	63	nC	$I_D = 25A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14	nC	$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	23	nC	$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	60	—	ns	$I_D = 25A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	44	—	ns	$R_G = 12\Omega$
t_f	Fall Time	—	45	—	ns	$V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ③
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—	nH	
C_{iss}	Input Capacitance	—	1470	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	360	—	pF	$V_{DS} = 25V$
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance	—	88	—	pF	$f = 1.0MHz$, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ④	—	530	150	mJ	$I_{AS} = 25A, L = 0.47mH$

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	49	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	160	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ②
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	63	95	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 25A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	170	260	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ③
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)

② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 0.48mH$
 $R_G = 25\Omega, I_{AS} = 25A$. (See Figure 12)③ $I_{SD} \leq 25A, di/dt \leq 230A/\mu s, V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$,
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$ ④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.

⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.

⑥ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.

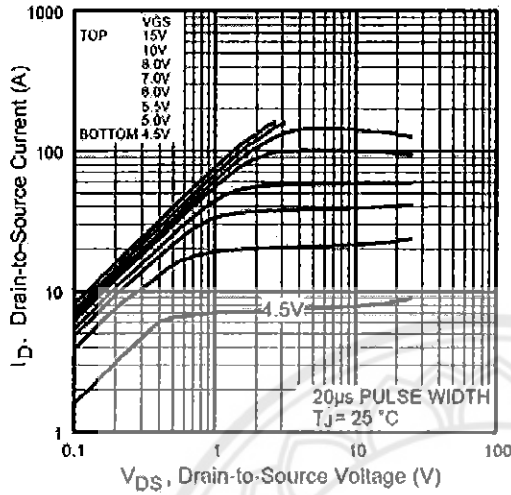


Fig 1. Typical Output Characteristics

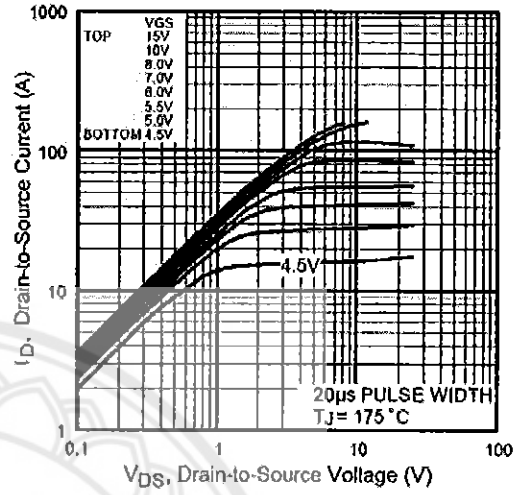


Fig 2. Typical Output Characteristics

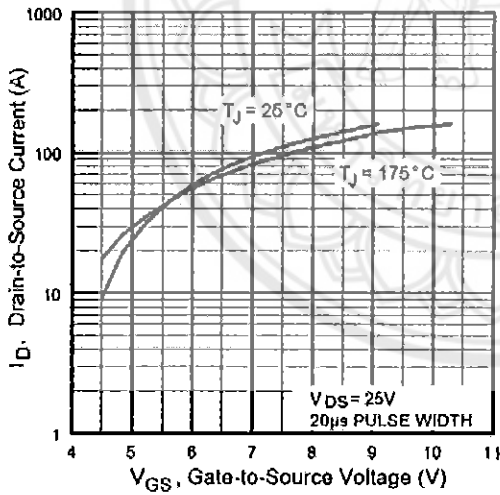


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

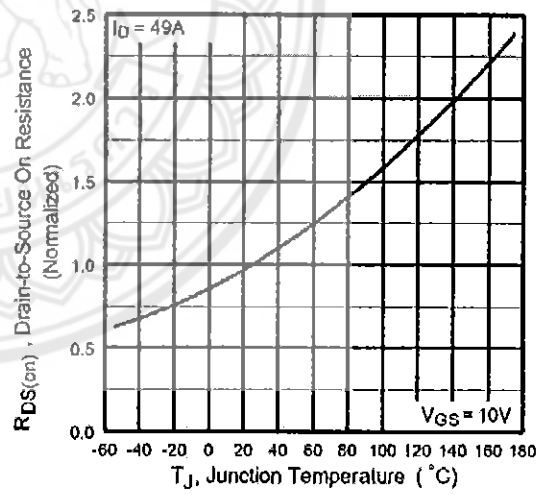


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

IRFZ44N

International
IR Rectifier

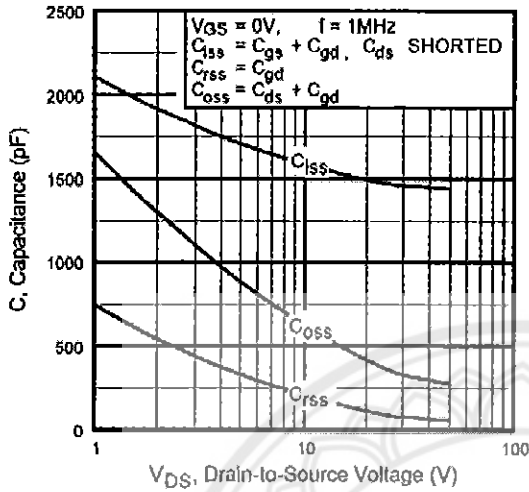


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

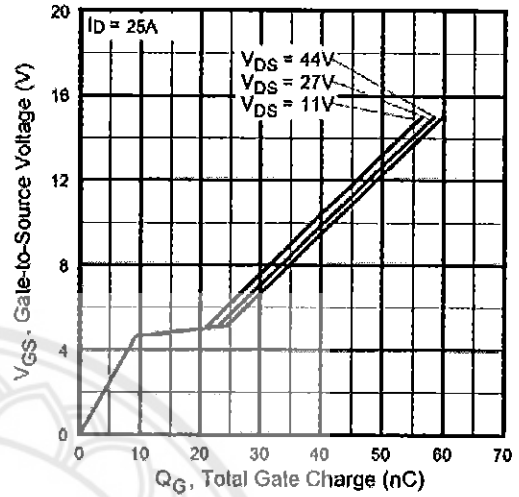


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

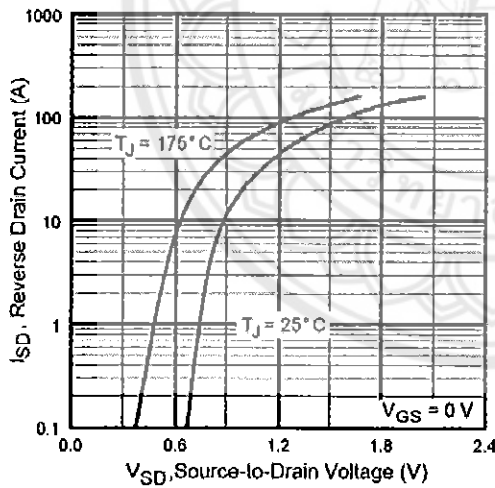


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

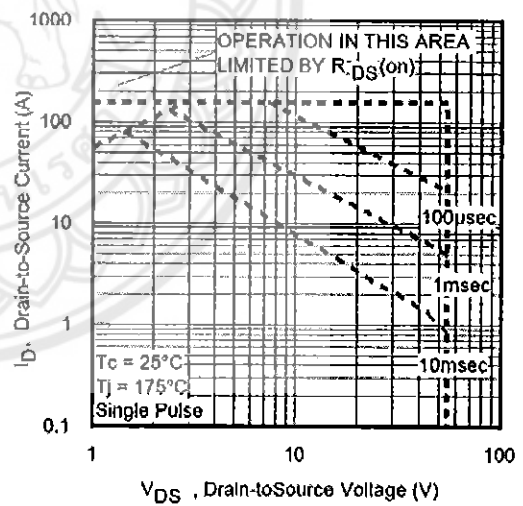


Fig 8. Maximum Safe Operating Area



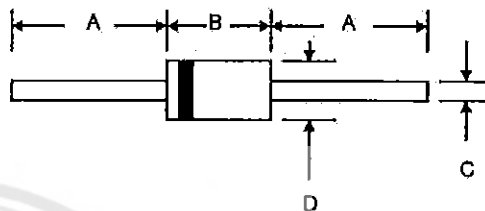


FR201 – FR207

2.0A FAST RECOVERY RECTIFIER

Features

- Diffused Junction
- Low Forward Voltage Drop
- High Current Capability
- High Reliability
- High Surge Current Capability



Mechanical Data

- Case: Molded Plastic
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Weight: 0.40 grams (approx.)
- Mounting Position: Any
- Marking: Type Number

DO-15		
Dim	Min	Max
A	25.4	—
B	5.50	7.62
C	0.71	0.864
D	2.60	3.60
All Dimensions in mm		

Maximum Ratings and Electrical Characteristics @ $T_A=25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristic	Symbol	FR201	FR202	FR203	FR204	FR205	FR206	FR207	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	V
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1) @ $T_A = 55^\circ\text{C}$	I_o	2.0							A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms Single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC Method)	I_{FSM}	60							A
Forward Voltage @ $I_f = 2.0\text{A}$	V_{FM}	1.2							V
Peak Reverse Current At Rated DC Blocking Voltage @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ @ $T_A = 100^\circ\text{C}$	I_{RM}	5.0 100							μA
Reverse Recovery Time (Note 2)	t_r	150			250		500		nS
Typical Junction Capacitance (Note 3)	C_j	30							pF
Operating Temperature Range	T_j	-65 to +125							$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{sto}	-65 to +150							$^\circ\text{C}$

*Glass passivated forms are available upon request

Note: 1. Leads maintained at ambient temperature at a distance of 0.5mm from the case

2. Measured with $I_F = 0.5\text{A}$, $I_R = 1.0\text{A}$, $I_{RR} = 0.25\text{A}$. See figure 5.

3. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0V D.C.

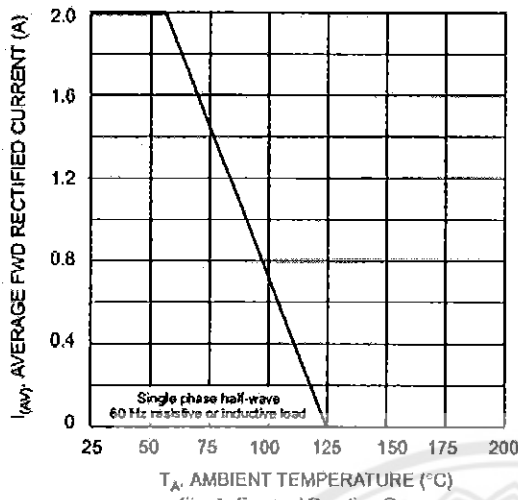


Fig. 1 Forward Derating Curve

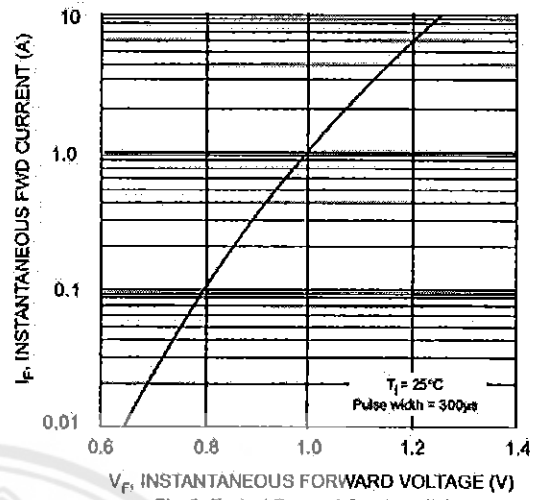


Fig. 2 Typical Forward Characteristics

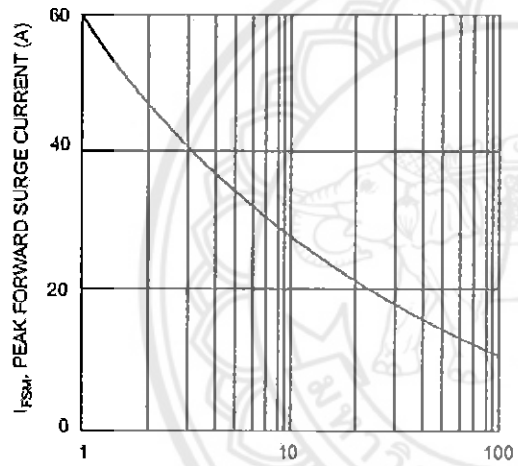


Fig. 3 Peak Forward Surge Current

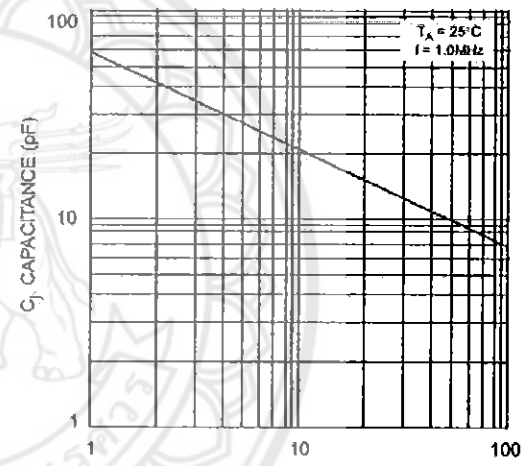
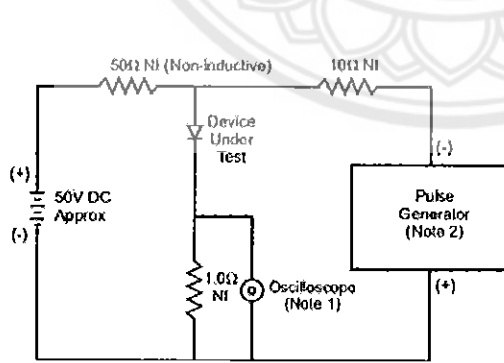
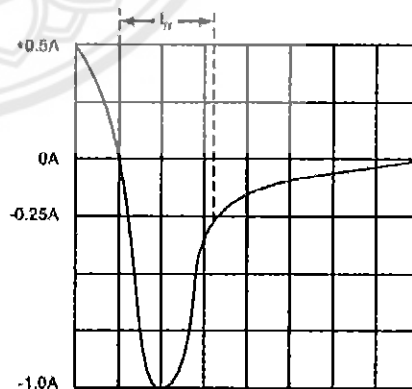


Fig. 4 Typical Junction Capacitance



- Notes:
1. Rise Time = 7.0ns max. Input Impedance = 1.0MΩ, 22pF.
 2. Rise Time = 10ns max. Input Impedance = 50Ω.



Set time base for 5/10ns/cm

Fig. 5 Reverse Recovery Time Characteristic and Test Circuit

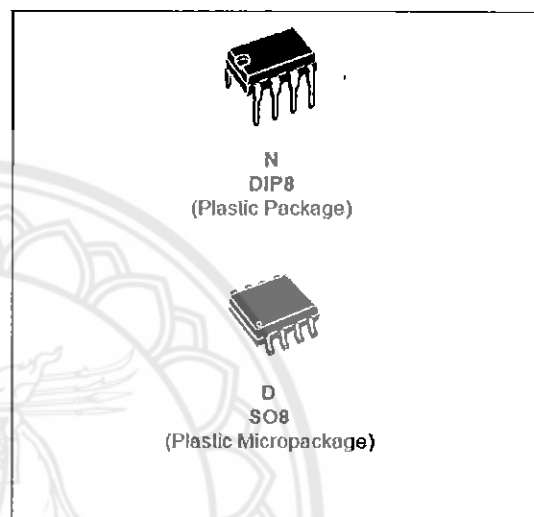




LF151
LF251 - LF351

**WIDE BANDWIDTH
SINGLE J-FET OPERATIONAL AMPLIFIER**

- INTERNALLY ADJUSTABLE INPUT OFFSET VOLTAGE
- LOW POWER CONSUMPTION
- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC}^+) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : $16V/\mu s$ (typ)



DESCRIPTION

These circuits are high speed J-FET input single-operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

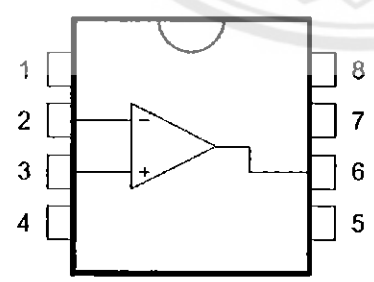
The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
LF351	0°C, +70°C	•	•
LF251	-40°C, +105°C	•	•
LF151	-55°C, +125°C	•	•

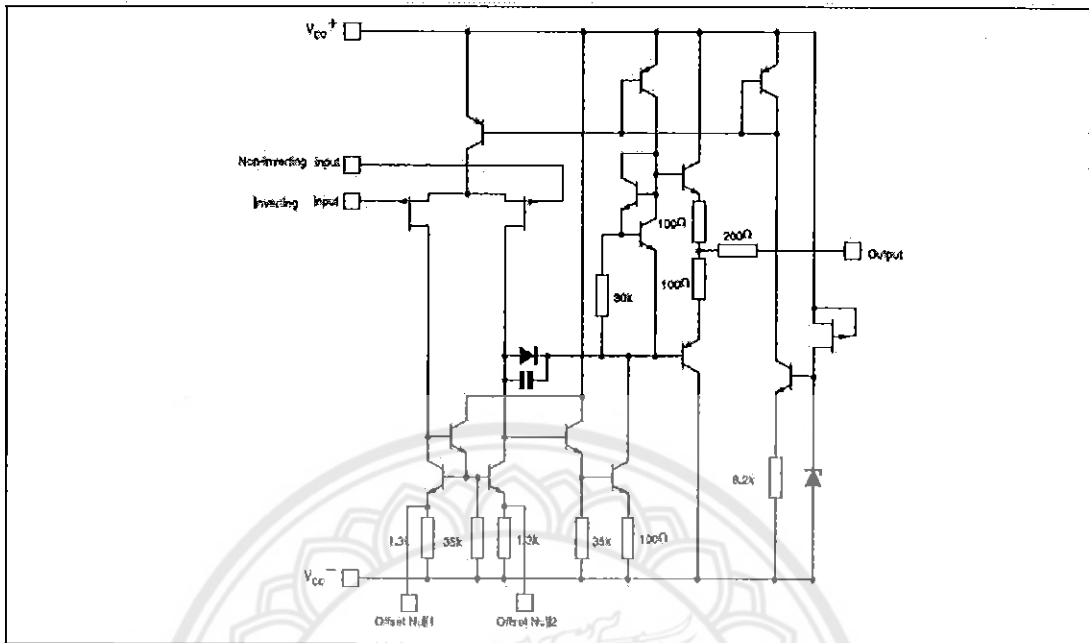
N = Dual in Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)

PIN CONNECTIONS (top view)

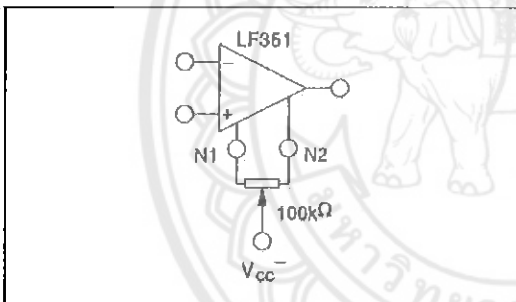


- 1 - Offset null 1
- 2 - Inverting input
- 3 - Non-inverting input
- 4 - V_{CC}^-
- 5 - Offset null 2
- 6 - Output
- 7 - V_{CC}^+
- 8 - N.C.

SCHEMATIC DIAGRAM



INPUT OFFSET VOLTAGE NULL CIRCUIT



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	LF151	LF251	LF351	Unit
V_{CC}	Supply voltage - note 1)		± 18		V
V_I	Input Voltage - note 2)		± 15		V
V_{Id}	Differential Input Voltage - note 3)		± 30		V
P_{tot}	Power Dissipation		600		mW
	Output Short-circuit Duration - note 4)		Infinite		
T_{oper}	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range		-65 to +150		°C

1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-} .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
3. Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

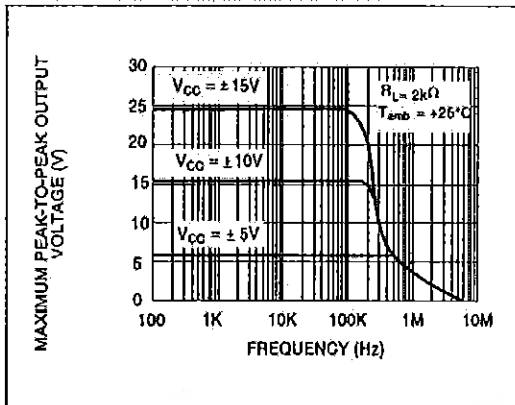
ELECTRICAL CHARACTERISTICS $V_{CC} = \pm 15V$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_{io}	Input Offset Voltage ($R_S = 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		3	10 13	mV
DV_{io}	Input Offset Voltage Drift		10		$\mu V/^{\circ}C$
I_{io}	Input Offset Current- note 1) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	100 4	μA nA
I_{ib}	Input Bias Current -note 1 $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	200 20	nA
A_{vd}	Large Signal Voltage Gain ($R_L = 2k\Omega$, $V_o = \pm 10V$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ($R_S = 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	80 80	86		dB
I_{CC}	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.4	3.4 3.4	mA
V_{icm}	Input Common Mode Voltage Range	± 11	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ($R_S = 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 70	86		dB
I_{OS}	Output Short-circuit Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	10 10	40	60 60	mA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$				V
				$R_L = 2k\Omega$ 12 $R_L = 10k\Omega$ 13.5 $R_L = 2k\Omega$ 10 $R_L = 10k\Omega$ 12	
SR	Slew Rate $V_I = 10V$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$, unity gain	12	16		V/ μs
t_r	Rise Time $V_I = 20mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$, unity gain		0.1		μs
K_{ov}	Overshoot $V_I = 20mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$, unity gain		10		%
GBP	Gain Bandwidth Product $f = 100kHz$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$, $V_{in} = 10mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$	2.5	4		MHz
R_i	Input Resistance		10^{12}		Ω
THD	Total Harmonic Distortion ($f = 1kHz$, $A_v = 20dB$ $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$, $V_o = 2V_{pp}$)		0.01		
e_n	Equivalent Input Noise Voltage $R_S = 100\Omega$, $f = 1kHz$		15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
ϕ_m	Phase Margin		45		Degrees

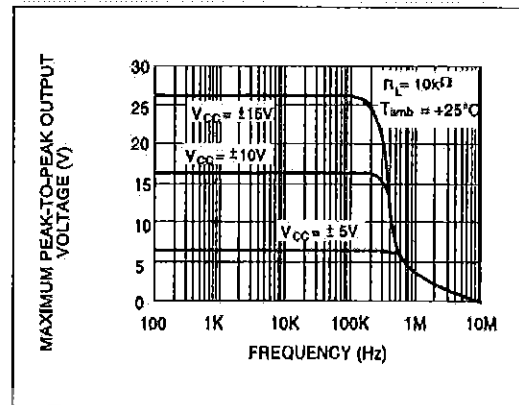
1. The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every $10^{\circ}C$ increase in the junction temperature.

MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT

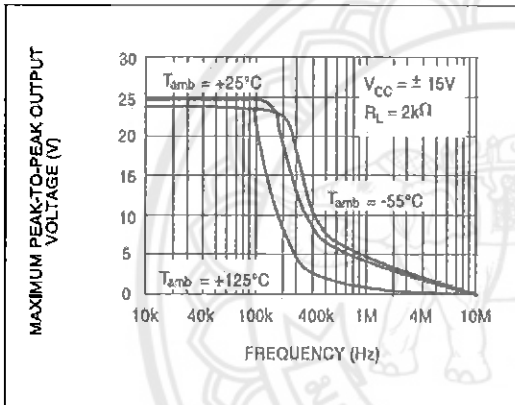
VOLTAGE versus FREQUENCY



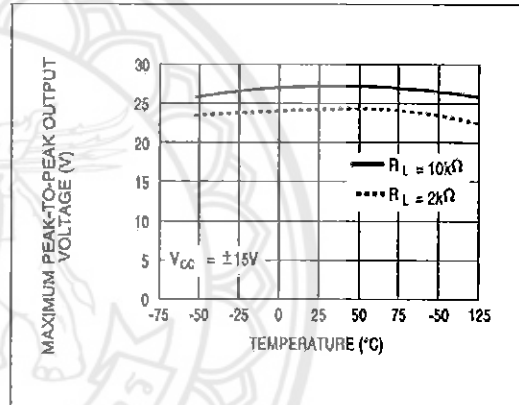
VOLTAGE versus FREQUENCY



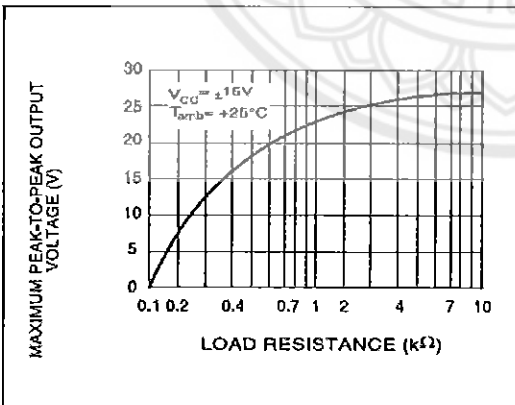
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREQUENCY



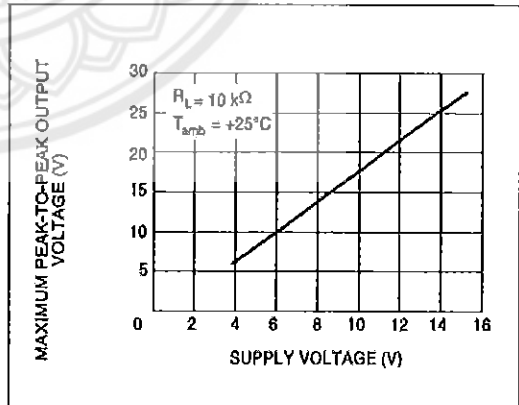
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREE AIR TEMP.



MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus LOAD RESISTANCE



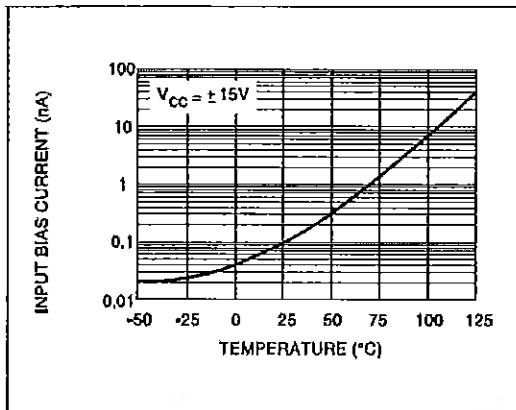
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus SUPPLY VOLTAGE



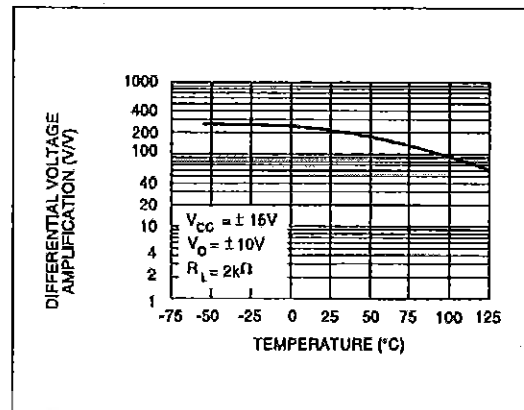
MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT

INPUT BIAS CURRENT versus FREE AIR

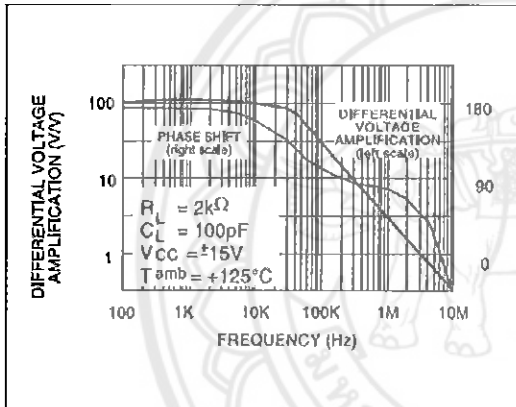
TEMPERATURE



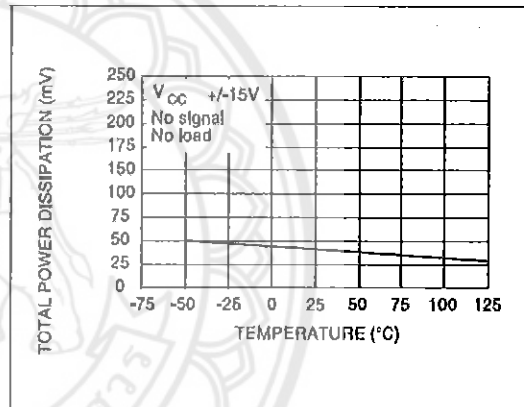
AMPLIFICATION versus FREE AIR TEMP.



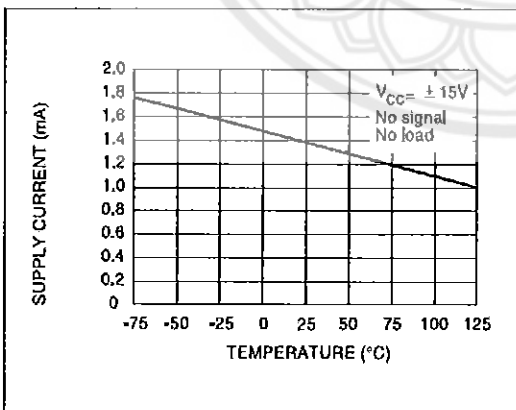
LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION AND PHASE SHIFT versus FREQUENCY



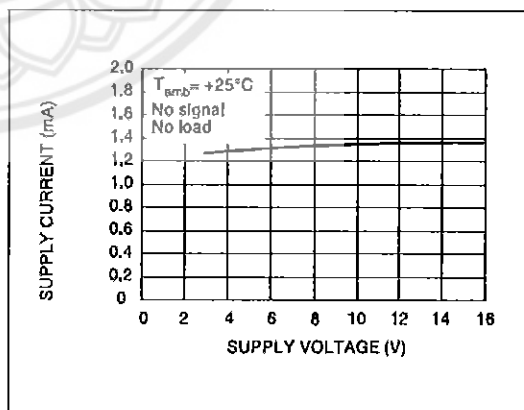
TOTAL POWER DISSIPATION versus FREE AIR TEMPERATURE



SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER versus FREE AIR TEMPERATURE



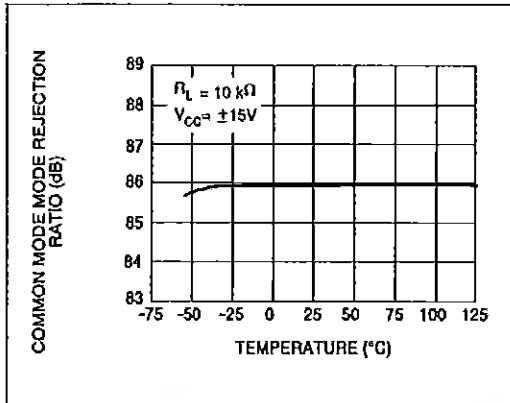
SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER versus SUPPLY VOLTAGE



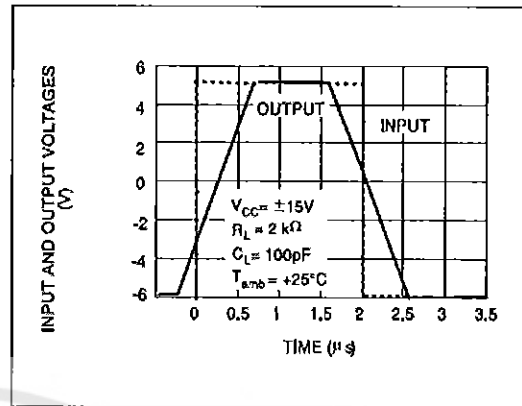
LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE

COMMON MODE REJECTION RATIO versus

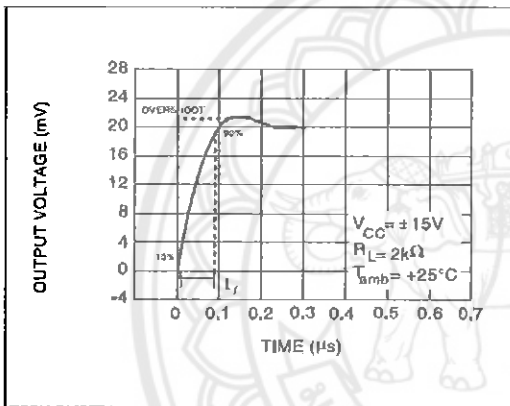
FREE AIR TEMPERATURE



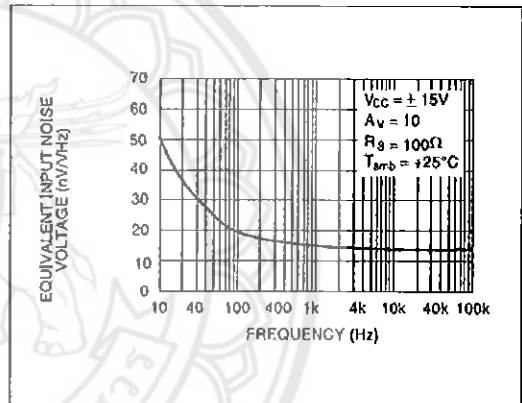
VOLTAGE FOLLOWER LARGE SIGNAL PULSE RESPONSE



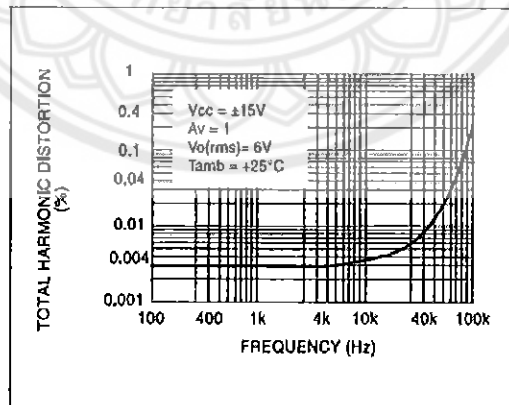
OUTPUT VOLTAGE versus ELAPSED TIME



EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE versus FREQUENCY



TOTAL HARMONIC DISTORTION versus FREQUENCY



PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

Figure 1 : Voltage Follower

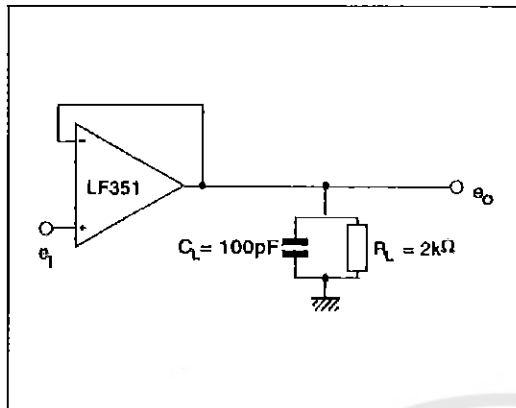
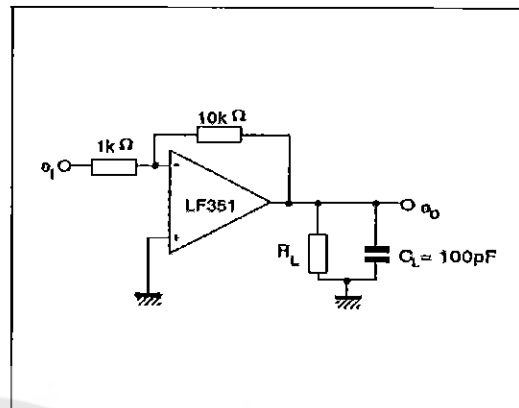
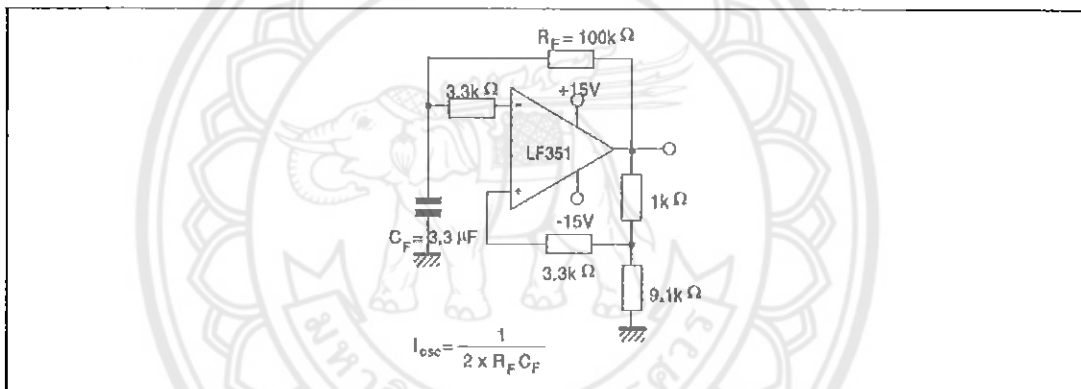


Figure 2 : Gain-of-10 inverting amplifier

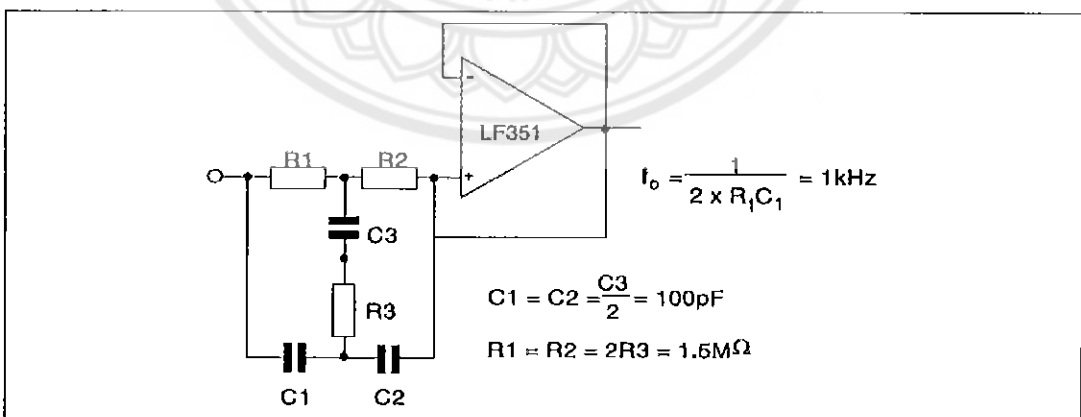


TYPICAL APPLICATION

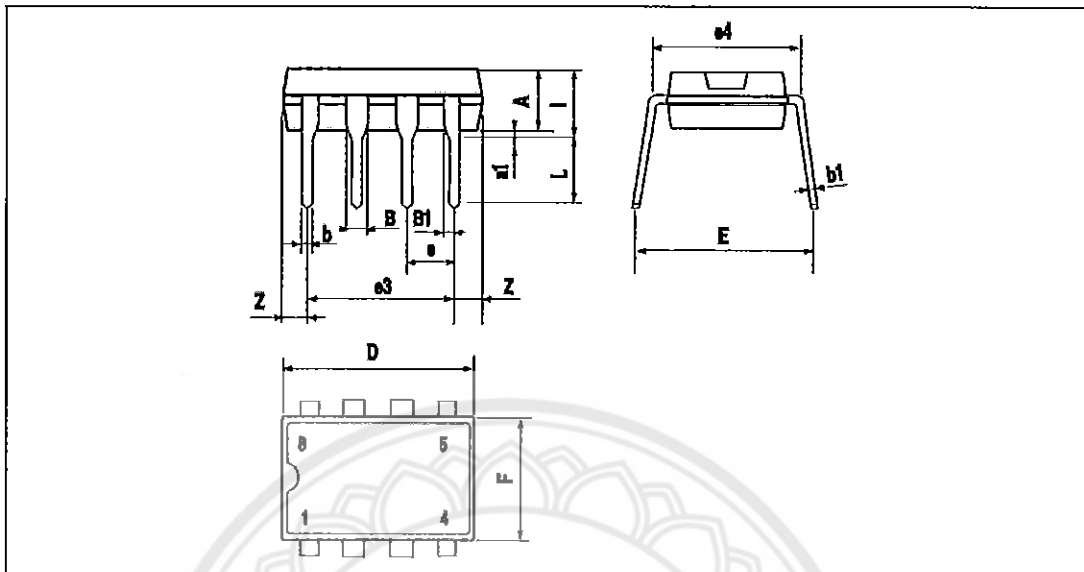
(0.5Hz) SQUARE WAVE OSCILLATOR



HIGH Q NOTCH FILTER



PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC DIP

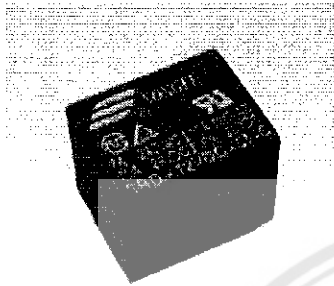


Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A		3.32			0.131	
a1	0.51			0.020		
B	1.15		1.65	0.045		0.065
b	0.356		0.55	0.014		0.022
b1	0.204		0.304	0.008		0.012
D			10.92			0.430
E	7.95		9.75	0.313		0.384
e		2.54			0.100	
e3		7.62			0.300	
e4		7.62			0.300	
F			6.6			0.260
i			5.08			0.200
L	3.18		3.81	0.125		0.150
Z			1.52			0.060



SONGLE RELAY

	RELAY ISO9002	SRD
---	---------------	------------



1. MAIN FEATURES

- Switching capacity available by 10A in spite of small size design for high density P.C. board mounting technique.
- UL, CUL, TUV recognized.
- Selection of plastic material for high temperature and better chemical solution performance.
- Sealed types available.
- Simple relay magnetic circuit to meet low cost of mass production.

2. APPLICATIONS

- Domestic appliance, office machine, audio, equipment, automobile, etc.
(Remote control TV receiver, monitor display, audio equipment high rushing current use application.)

3. ORDERING INFORMATION

SRD	XX VDC	S	L	C
Model of relay	Nominal coil voltage	Structure	Coil sensitivity	Contact form
SRD	03, 05, 06, 09, 12, 24, 48VDC	S: Sealed type	L: 0.36W	A: 1 form A
		F: Flux free type	D: 0.45W	B: 1 form B C: 1 form C

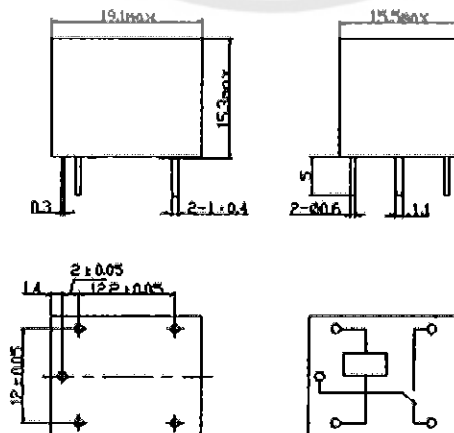
4. RATING

CCC	FILE NUMBER: CH0052885-2000	7A/240VDC
CCC	FILE NUMBER: CH0036746-99	10A/250VDC
UL/CUL	FILE NUMBER: E167996	10A/125VAC 28VDC
TUV	FILE NUMBER: R9933789	10A/240VAC 28VDC

5. DIMENSION (unit:mm)

DRILLING (unit:mm)

WIRING DIAGRAM



6. COIL DATA CHART (AT20°C)

Coil Sensitivity	Coil Voltage Code	Nominal Voltage (VDC)	Nominal Current (mA)	Coil Resistance (Ω) ±10%	Power Consumption (W)	Pull-In Voltage (VDC)	Drop-Out Voltage (VDC)	Max. Allowable Voltage (VDC)
SRD (High Sensitivity)	03	03	120	25	abt. 0.36W	75%Max.	10% Min.	120%
	05	05	71.4	70				
	06	06	60	100				
	09	09	40	225				
	12	12	30	400				
	24	24	15	1600				
SRD (Standard)	03	03	150	20	abt. 0.45W	75% Max.	10% Min.	110%
	05	05	89.3	55				
	06	06	75	80				
	09	09	50	180				
	12	12	37.5	320				
	24	24	18.7	1280				
	48	48	10	4500	abt. 0.51W			

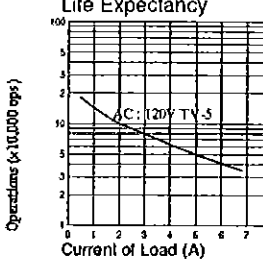
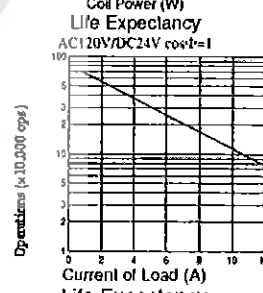
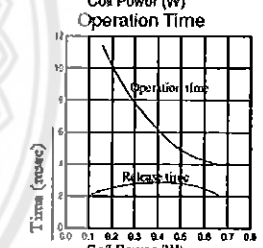
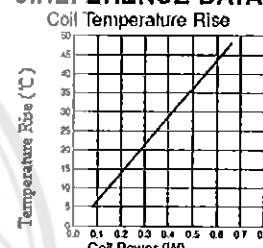
7. CONTACT RATING

Item	Type	SRD	
		FORM C	FORM A
Contact Capacity		7A 28VDC	10A 28VDC
Resistive Load (cosφ=1)		10A 125VAC 7A 240VAC	10A 240VAC
Inductive Load (cosφ=0.4 L/R=7msec)		3A 120VAC 3A 28VDC	5A 120VAC 5A 28VDC
Max. Allowable Voltage		250VAC/110VDC	250VAC/110VDC
Max. Allowable Power Force		800VAC/240W	1200VA/300W
Contact Material		AgCdO	AgCdO

8. PERFORMANCE (at initial value)

Item	Type	SRD
Contact Resistance		100mΩ Max.
Operation Time		10msec Max.
Release Time		5msec Max.
Dielectric Strength	Between coil & contact	1500VAC 50/60HZ (1 minute)
	Between contacts	1000VAC 50/60HZ (1 minute)
Insulation Resistance		100 MΩ Min. (500VDC)
Max. ON/OFF Switching		
Mechanically		300 operation/min
Electrically		30 operation/min
Ambient Temperature		-25°C to +70°C
Operating Humidity		45 to 85% RH
Vibration		
Endurance		10 to 55Hz Double Amplitude 1.5mm
Error Operation		10 to 55Hz Double Amplitude 1.5mm
Shock		
Endurance		100G Min.
Error Operation		10G Min.
Life Expectancy		
Mechanically		10 ⁷ operations. Min. (no load)
Electrically		10 ⁵ operations. Min. (at rated coil voltage)
Weight		abt. 10grs.

9. REFERENCE DATA



ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายจิตติวุฒิ กระพันธ์เขียว
 ภูมิลำเนา 69/2 หมู่ 1 ต.คลองขลุง อ.คลองขลุง จ.กำแพงเพชร
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนคลองขลุงราษฎร์รังสรรค์
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: krapankiaw11970@hotmail.com



ชื่อ นายณัฐพงษ์ คำยา
 ภูมิลำเนา 36 ถนน วิจิตร 2 ต.ในเมือง อ.เมือง จ.กำแพงเพชร
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัชรวิทยา
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: dynamation_baba@hotmail.com



ชื่อ นายสุรศักดิ์ จันทร์อ้อม
 ภูมิลำเนา 432/1 หมู่ 3 ต.วังทอง อ.วังทอง จ.พิษณุโลก
 ประวัติการศึกษา
 - จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวังทองพิทยาคม
 - ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: yoksurasak7420@gmail.com