

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง  
SIMULATOR AND PROGRAMMABLE POWER SUPPLY FOR POWER  
ELECTRONICS EQUIPMENT VALIDATION



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....110828  
วัน,เดือน,ปี.....18 ๗๒. 2553

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SIMULATOR AND PROGRAMMABLE POWER SUPPLY FOR POWER  
ELECTRONICS EQUIPMENT VALIDATION**



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2009**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2552

เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง  
SIMULATOR AND PROGRAMMABLE POWER SUPPLY FOR POWER ELECTRONICS  
EQUIPMENT VALIDATION



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย

รองศาสตราจารย์ ประภาส ไพรสวรรณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2552

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ผู้จัดทำ

1. นายจิรวิชัย จิตถวิล
2. นายฐาปนา เมฆอรุณกมล
3. นายรัชพล จิรโมฬี



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ประภาส ไพรสุวรรณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจำลองแหล่งกำลังงานโปรแกรมได้  
เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

นายจิรวิชช์ จิตถวิล  
นายฐาปนา เมฆอรุณกมล  
นายรัชพล จิรโมฬี  
รศ.ประภาษา ไพรสวรรณา อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2552

บทคัดย่อ

ปฏิญานพนธ์ฉบับนี้ มุ่งเน้นที่จะศึกษาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าและสร้างเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานแบบโปรแกรมได้ เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันกำลังสูงในการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ผลิตขึ้นก่อนนำไปติดตั้งจริงในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น อินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยทำการเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงดันขนาดเล็กจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่างๆตามทฤษฎีคุณภาพกำลังไฟฟ้า เช่น การเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ แล้วนำสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์มาขยายผ่านวงจรขยายเชิงเส้นกำลังสูงคลาสเอบี ให้สัญญาณไฟฟ้ามี่ขนาดพิกัดกำลังสูงขึ้นประมาณ 3kW ที่แรงดันปกติเท่ากับ  $311V_p$  หรือ  $220V_{rms}$  ซึ่งจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทดสอบอุปกรณ์ได้จริงได้ในทางปฏิบัติ โดยไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานของจริงติดตั้งในห้องวิจัย

# Simulator and Programmable Power Supply for Power Electronics Equipment Validation

Mr.Jeerawit	Chittavil	
Mr.Tapana	Mekaroonkamon	
Mr.Thouchapol	Jiramoree	
Assoc. Prof. Prapart	Prisuwanna	Adviser
Asst. Prof. Dr.Surin	Khomfoi	Adviser

2009

## ABSTRACT

The design and implementation paradigm of simulator and programmable power supply for power electronics equipment validation are presented in this paper. A power electronics equipment, such as hybrid inverter, multilevel inverter and multilevel dc/dc converter will be tested before applied in micro grid system. Equipment test signal will be generated by microcontroller, and then these signals are amplified by using power amplifier class AB rated 3kW for magnifying signals. Finally this simulator and programmable power supply can be utilized to validate power electronics equipment instead of the real renewable energy resources.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยของคณะผู้จัดทำสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี นั้นมาจากการได้รับการสนับสนุนด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านวิชาการ เทคนิค รวมถึงคำแนะนำต่างๆ จาก รศ.ประภาส ไพรสุวรรณและผศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้และรุ่นพี่ทุกคน ไม่ว่าจะเป็นรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทหรือรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาเอก ที่ช่วยทำให้โครงการวิจัยของคณะผู้จัดทำนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี (พี่ตัวเล็ก) ที่คอยอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดภายในห้องวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกๆ ฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ขอขอบคุณ บริษัทพีระบราเธอร์ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ในการทำโครงการวิจัย รวมถึงเงินทุนในการทำโครงการวิจัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการ IRPUS 2552 ทางคณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ บุคคลที่สำคัญที่สุดที่มีอาจลืมได้คือ บิดา มารดา ที่ได้ให้กำเนิด เลี้ยงดูและอุปถัมภ์คณะผู้จัดทำมาจนถึงบัดนี้ ทางคณะผู้จัดทำต้องกราบขอขอบพระคุณท่านด้วยความเคารพสูงสุด

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ.....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	6
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 ทฤษฎีของคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	7
2.2.1 เหตุที่ทำให้ต้องคำนึงถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	7
2.2.2 ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า.....	8
2.2.3 ประเภทของปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า.....	8
2.2.4 ปัญหาจากแรงดันตกชั่วระยะสั้น.....	10
2.2.4.1 คุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ.....	11
2.2.4.2 ผลกระทบจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ.....	12
2.3 วงจรแปรผันสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (D/A Converter).....	13
2.3.1 ประเภทของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก.....	13
2.3.2 คุณลักษณะและพารามิเตอร์ของ D/A converter.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 วงจรขยายแบบทรานซิสเตอร์.....	16
2.4.1 โครงสร้างและการทำงานของทรานซิสเตอร์.....	16
2.5 วงจรขยายสัญญาณเชิงเส้น.....	19
2.5.1 วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ (Class A power amplifier).....	19
2.5.1.1 กำลังอินพุต ( $P_i(\text{dc})$ ) วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ.....	21
2.5.1.2 กำลังเอาต์พุต ( $P_o(\text{ac})$ ) วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ.....	21
2.5.2 วงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี (Class B power amplifier).....	22
2.5.2.1 กำลังอินพุต ( $P_i(\text{dc})$ ) วงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี.....	24
2.5.2.2 กำลังเอาต์พุต ( $P_o(\text{ac})$ ) วงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี.....	24
2.5.2.3 ประสิทธิภาพวงจขยายเชิงเส้นคลาสบี.....	24
2.5.3 วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี (Class AB power amplifier).....	26
2.5.4 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier).....	28
2.6 บทสรุป.....	28
บทที่ 3 การออกแบบ และสร้างเครื่องต้นแบบ.....	29
3.1 บทนำ.....	29
3.2 โครงสร้างพื้นฐาน.....	29
3.3 เครื่องจำลองแหล่งจ่ายพลังงานโปรแกรมได้.....	30
3.3.1 ส่วนการกำเนิดสัญญาณ.....	30
3.3.1.1 การออกแบบโปรแกรม.....	30
3.3.1.2 การออกแบบวงจร.....	33
3.3.1.3 วงจรควบคุมระดับแรงดันและกลับเฟสสัญญาณ.....	34
3.3.1.4 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง +5V, +/-15V.....	36
3.3.2 ส่วนการขยายสัญญาณ.....	38
3.3.2.1 ส่วนการขับสัญญาณ (Drive Board).....	38
3.3.2.2 ส่วนการขับสัญญาณสูงยิ่ง (Super Drive).....	39

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2.3 ส่วนการขยายกำลัง (Power Output).....	39
3.3.2.4 ภาคการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply 3 KVA).....	40
3.3.2.5 การทดสอบวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี.....	40
3.4 ข้อควรระวัง.....	48
3.5 ข้อเสนอแนะ.....	48
3.6 บทสรุป.....	48
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>49</b>
4.1 บทนำ.....	49
4.2 การจำลองวงจรในคอมพิวเตอร์.....	49
4.2.1 การสร้างแบบจำลองส่วนการกำเนิดสัญญาณ.....	49
4.2.2 การสร้างแบบจำลองส่วนการขยายสัญญาณ.....	50
4.3 ผลการจำลองวงจรในคอมพิวเตอร์.....	51
4.3.1 ผลการจำลองส่วนการกำเนิดสัญญาณ.....	51
4.3.2 ผลการจำลองส่วนการขยายสัญญาณ.....	53
4.4 ผลการทดสอบชิ้นงานจริง.....	56
4.4.1 การทดสอบส่วนการกำเนิดสัญญาณ.....	57
4.4.2 การทดสอบส่วนการขยายสัญญาณ.....	60
4.5 ข้อควรระวัง.....	66
4.6 บทสรุป.....	66
<b>บทที่ 5 บทสรุป เสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา.....</b>	<b>67</b>
5.1 บทสรุป.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง.....	68
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	69

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก ก เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	71
ภาคผนวก ข Data Sheet.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	105



# สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้.....	2
รูปที่ 1.2 โครงสร้างแผนการดำเนินโครงการ.....	4
รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ.....	11
รูปที่ 2.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกแบบรวมกระแส.....	14
รูปที่ 2.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกแบบโครงข่ายแบบ R-2R.....	14
รูปที่ 2.4 กราฟการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกแบบโครงข่ายแบบ R-2R.....	15
รูปที่ 2.5 วงจรของทรานซิสเตอร์ที่ประกอบด้วยขาต่างๆ.....	16
รูปที่ 2.6 หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรขยาย.....	19
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ.....	20
รูปที่ 2.8 จุดทำงานของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ.....	20
รูปที่ 2.9 กราฟการไบอัสของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ.....	21
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี ขณะขับสัญญาณครึ่งซีกบวก.....	22
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี ขณะขับสัญญาณครึ่งซีกลบ.....	23
รูปที่ 2.12 จุดทำงานของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี.....	23
รูปที่ 2.13 จุดทำงานของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี.....	24
รูปที่ 2.14 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี.....	25
รูปที่ 2.15 ความผิดเพี้ยนช่วงรอยต่อจากวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี.....	25
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี ที่ต่อแบบผลัดตั้ง.....	26
รูปที่ 2.17 จุดการทำงานของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี.....	27
รูปที่ 2.18 กราฟการไบอัสของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี.....	27
รูปที่ 2.19 วงจรขยายแบบกลับเฟส.....	28
รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้.....	29
รูปที่ 3.2 สัญญาณที่สร้างได้จากสมการที่ (3.1) $m_a = 1$ .....	31
รูปที่ 3.3 สัญญาณที่สร้างได้จากสมการที่ (3.1) $m_a = 0.8$ .....	32
รูปที่ 3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณ.....	33

## สารบัญญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมระดับแรงดันและกลับเฟสสัญญาณ.....	34
รูปที่ 3.6 ลายวงจรกำเนิดสัญญาณ.....	34
รูปที่ 3.7 วงจรกำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้น.....	35
รูปที่ 3.8 ปุ่มควบคุมการทำงานและจอแสดงผล LCD.....	35
รูปที่ 3.9 ผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณ.....	36
รูปที่ 3.10 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณ.....	36
รูปที่ 3.11 ลายวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณ.....	37
รูปที่ 3.12 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้น.....	37
รูปที่ 3.13 วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี ขนาดพิกัด 3 kW.....	41
รูปที่ 3.14 วงจรส่วนการขับสัญญาณ.....	42
รูปที่ 3.15 ลายวงจรส่วนการขับสัญญาณ.....	43
รูปที่ 3.16 วงจรส่วนการขับสัญญาณที่สร้างขึ้น.....	43
รูปที่ 3.17 ลายวงจรส่วนการขับสัญญาณสูงยิ่ง.....	44
รูปที่ 3.18 วงจรส่วนการขับสัญญาณสูงยิ่งที่สร้างขึ้น.....	44
รูปที่ 3.19 ลายวงจรส่วนการขยายกำลัง.....	45
รูปที่ 3.20 วงจรขยายกำลังที่สร้างขึ้น.....	45
รูปที่ 3.21 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	46
รูปที่ 3.22 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้น.....	46
รูปที่ 3.23 ผลการทดสอบวงจขยายสัญญาณเชิงเส้นคลาสเอบี.....	47
รูปที่ 3.24 เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ต้นแบบที่สร้างขึ้น.....	47
รูปที่ 4.1 แบบจำลองวงจกำเนิดสัญญาณ.....	49
รูปที่ 4.2 แบบจำลองวงจขยายสัญญาณ.....	50
รูปที่ 4.3 แบบจำลองวงจรับสัญญาณ.....	50
รูปที่ 4.4 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ จากไมโครคอนโทรเลอร์.....	52
รูปที่ 4.5 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะที20% จากไมโครคอนโทรเลอร์.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา IX เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อใช้อุปกรณ์กลับเฟสกัน.....	52
รูปที่ 4.7 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (วงจรถี 1).....	54
รูปที่ 4.8 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (วงจรถี 2).....	54
รูปที่ 4.9 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา.....	54
รูปที่ 4.10 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (2 วงจรรวมกัน).....	55
รูปที่ 4.11 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ20% เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (2 วงจรรวมกัน).....	55
รูปที่ 4.12 เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ต้นแบบ.....	56
รูปที่ 4.13 การทดสอบเครื่องด้วยการจ่ายภาระทางไฟฟ้า 1 kW.....	57
รูปที่ 4.14 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ จากไมโครคอนโทรลเลอร์.....	58
รูปที่ 4.15 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ20% จากไมโครคอนโทรลเลอร์.....	58
รูปที่ 4.16 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อใช้อุปกรณ์กลับเฟสกัน.....	59
รูปที่ 4.17 ค่าความผิดพลาดของแรงดันไซน์ จากไมโครคอนโทรลเลอร์.....	59
รูปที่ 4.18 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (วงจรถี 1).....	62
รูปที่ 4.19 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (วงจรถี 2).....	62
รูปที่ 4.20 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติที่กลับเฟสกัน เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ 2 วงจร.....	63
รูปที่ 4.21 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (2 วงจรรวมกัน).....	63
รูปที่ 4.22 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ20% เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ 2 วงจรรวมกัน).....	64
รูปที่ 4.23 สัญญาณแรงดันและกระแส ขณะขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW.....	64
รูปที่ 4.24 ค่าความผิดพลาดของแรงดันไซน์ ขณะขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW.....	65
รูปที่ 4.25 ค่าความผิดพลาดของกระแสไซน์ ขณะขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW .....	65

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	5
ตารางที่ 2.1 สาเหตุของการเกิดแรงดันตกบนระบบไฟฟ้า.....	11
ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะของอุปกรณ์แต่ละชนิด.....	12



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็ก (Microgrid) หมายถึง การเชื่อมต่อระหว่างกลุ่มผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กกับกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ไม่ไกลจากกันมากนัก เป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นส่วนใหญ่ เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานคลื่น และอื่นๆ การผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานหมุนเวียนนี้มีข้อได้เปรียบเหนือการผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil) ในเชิงการลดการเกิดสภาวะโลกร้อนด้วยการลดการปล่อยก๊าซมลภาวะ หลักการสำคัญของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ การสร้างสมดุลระหว่างการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กดังกล่าวให้พอดีกับภาระทางไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กนั้นๆ แนวคิดดังกล่าวจะอนุญาตให้ผู้ใช้ไฟฟ้าและผู้ผลิตไฟฟ้าภายในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กใดๆ สามารถผลิตและใช้ไฟฟ้าในขณะที่มีการเชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ หรือระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กอื่นๆ ได้ ซึ่งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กจะมองเห็นการเชื่อมต่อนั้นๆ เป็นแหล่งกำเนิด/ภาระทางไฟฟ้าอีกแหล่งหนึ่งที่เพิ่มเข้ามา หรือจ่ายออกไปนั่นเอง ซึ่งการที่จะต่อแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนเข้ากับระบบส่งจ่ายขนาดเล็ก การต่อระบบส่งจ่ายขนาดเล็กเข้ากับระบบส่งจ่ายขนาดใหญ่ หรือการต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กเข้าด้วยกันนั้น จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นตัวเชื่อมต่อ

ดังนั้นจากหลักการข้างต้นจึงต้องมีการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้มีประสิทธิภาพสูงและสามารถติดตั้งใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนนั้นมีความไม่สม่ำเสมอสูง ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมให้ส่งผลต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า โดยเราไม่สามารถทำการทดสอบทุกสภาวะการทำงานจริงในห้องวิจัยได้ เพราะมีราคาแพงและไม่สะดวกที่จะทำการติดตั้งแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนในห้องวิจัย ด้วยเหตุนี้การสร้างเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในห้องวิจัย ก่อนนำไปติดตั้งใช้งานจริง

เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้นี้เป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ที่

น่าจะเหมาะสมสำหรับการใช้ทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพราะสามารถทดสอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

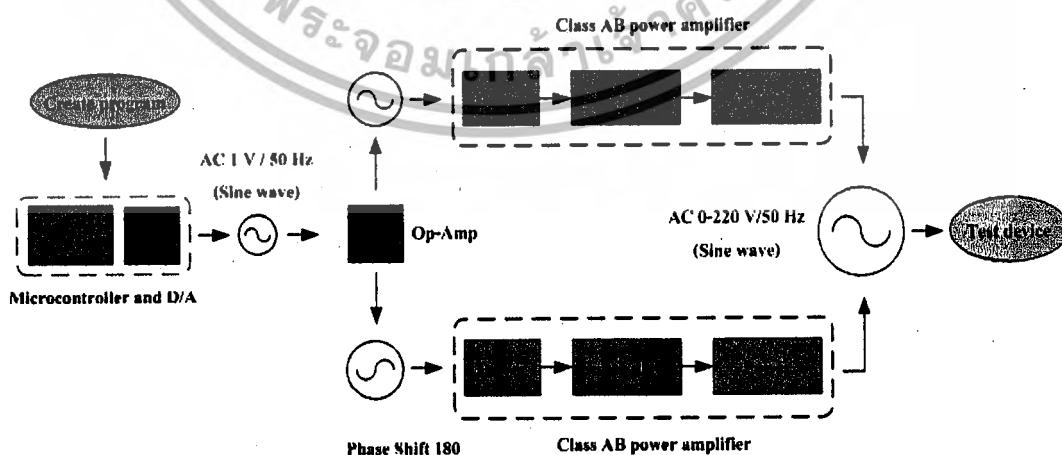
ละเอียด สะดวก และประหยัดมากขึ้น ทั้งยังช่วยเพิ่มอัตราการขยายตัวและพัฒนาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของวงจรขยายสัญญาณ (Power amplifier) ชนิดต่างๆ
2. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องขยายสัญญาณคลาสเอบี ขนาดพิกัด 3 kW
3. เพื่อศึกษาการโปรแกรมการสร้างสัญญาณรูปแบบต่างๆด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)
4. เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังตามเงื่อนไขการทำงานต่างๆก่อนนำไปติดตั้งใช้งานจริงมีความถูกต้อง และเหมาะสมหรือไม่

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

จัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย ศึกษาข้อมูลและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งหมด จำลองการทำงาน of เครื่องขยายสัญญาณด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และสร้างต้นแบบเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ โดยใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณที่สามารถโปรแกรมได้จากการเขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4431 แล้วขยายสัญญาณผ่านวงจรขยายสัญญาณเชิงเส้นคลาสเอบี (Class AB power amplifier) ขยายสัญญาณเพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณทดสอบที่พิกัด 3kW ที่พร้อมต่อการทดสอบอุปกรณ์



รูปที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีจากตำราต่าง ๆ งานวิจัย และบทความปริยัตินิพนธ์
2. ออกแบบโครงสร้างแบบจำลองโครงการด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
3. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์แล้วนำไปใช้พัฒนาโครงการ

#### 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาหาข้อมูล ทฤษฎีต่าง ๆ จากตำรา งานวิจัย และบทความปริยัตินิพนธ์
2. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อออกแบบ และจำลองการทำงานของเครื่องขยายสัญญาณคลาสเอบีด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
3. เขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณขนาดเล็ก
4. ออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณเชิงเส้นคลาสเอบีพิกัด 3kW ตามที่ได้  
ออกแบบ ทดสอบและศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากชิ้นงานจริง
5. สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง



## แผนการดำเนินโครงการ



รูปที่ 1.2 โครงสร้างแผนการดำเนินโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินโครงการ**

ขั้นตอนการดำเนินงาน	2551							2552			
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาทฤษฎีและการออกแบบเครื่องขยายสัญญาณชนิดต่างๆ											
2. Simulation เครื่องขยายสัญญาณคลาสเอบี ที่ได้ออกแบบจากทฤษฎี											
3. เขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ											
4. สร้างเครื่องขยายสัญญาณคลาสเอบี พิกัด3kW ตามที่ได้ออกแบบ											
5. สรุปและจัดทำปริญญาณิพนธ์											

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ได้เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในห้องวิจัย ทำให้มีความสะดวกมากขึ้นในการทดสอบการทำงานที่สภาวะต่างๆ และลดต้นทุนการผลิต
2. เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้รองรับระบบพลังงานหมุนเวียนในอนาคต

## 1.5 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปริญญาโท

1. บทที่ 1 บทนำ
2. บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  
กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงาน นั่นก็คือทฤษฎีเกี่ยวกับคุณภาพของไฟฟ้า ความผิดปกติของแรงดัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ และทฤษฎีของวงจรขยายแบบต่างๆ รวมไปถึงทฤษฎีที่เหมาะสมและสามารถนำมาใช้ในโครงงานนี้ได้ อีกทั้งยังบ่งบอกถึงข้อดีและข้อเสียของทฤษฎีวงจรขยายแบบต่างๆ เพื่อสะดวกต่อการตัดสินใจ
3. บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้  
เป็นการนำเสนอถึงการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ ของเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ ซึ่ง เป็นการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี ซึ่งเครื่องต้นแบบนี้จะใช้ประโยชน์ในการจำลองสร้างสัญญาณแรงดันตกชั่วคราว เพื่อใช้สำหรับทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำพวกอินเวอร์เตอร์ ก่อนนำไปติดตั้งใช้งานจริงในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็ก
4. บทที่ 4 ชิ้นงานจริงและผลการทดลอง  
เป็นการนำเสนอถึงผลการจำลองของเครื่องต้นแบบ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตามวงจรที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 เพื่อเป็นการยืนยันว่าหลักการถูกต้องตามทฤษฎี เป็นการสร้างความเชื่อมั่นว่าสามารถทำงานได้จริง ก่อนที่จะลงมือปฏิบัติสร้างชิ้นงานจริง อีกทั้งยังเป็นการนำเสนอผลการทดสอบชิ้นงานต้นแบบด้วยว่ามีความแตกต่างจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์หรือไม่อย่างไร
5. บทที่ 5 บทสรุป เสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงานนี้ นั่นก็คือทฤษฎีเกี่ยวกับคุณภาพของไฟฟ้า ความผิดปกติของแรงดัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ และทฤษฎีของวงจรรขยายแบบต่างๆ รวมไปถึงทฤษฎีที่เหมาะสมและสามารถนำมาใช้ในโครงงานนี้ได้ อีกทั้งยังบ่งบอกถึงข้อดีและข้อเสียของทฤษฎีวงจรรขยายแบบต่างๆ เพื่อสะดวกต่อการตัดสินใจ

#### 2.2 ทฤษฎีของคุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้า คือประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าที่มีการนำมาใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ หรือในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งคุณภาพไฟฟ้าที่ได้ก็ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่มีการจ่ายเข้าไปในอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ หรือในระบบอุตสาหกรรมนั้นๆ ซึ่งตามมาตรฐาน IEC และ IEEE นั้นได้นิยามคุณภาพกำลังไฟฟ้าไว้ว่า คือคุณลักษณะของกระแส แรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติ ซึ่งไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด หรือเกิดการเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้านั้นๆ

##### 2.2.1 เหตุที่ทำให้ต้องคำนึงถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

1. เนื่องจากในปัจจุบันในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้นซึ่งจะมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันกระแส และคุณภาพของกำลังไฟฟ้ามากกว่าในอดีต โดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะมีความไวในการตอบสนองต่อแรงดันและกระแสดังเช่นอุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์, Programmable Logic Controller (PLC), Adjustable Speed Drive (ASD) และรีเลย์บางชนิดฯ

2. การเพิ่มขึ้นของการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้า ดังเช่นตัวอย่างของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งมีการใช้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์ (ASD) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตซึ่งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์ เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้านั้นได้ และถ้ามีคาปาซิเตอร์ติดตั้งอยู่ในระบบเพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าก็จะยิ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์รุนแรงมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผู้ใช้ไฟทราบถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมของตัวเองมากขึ้น ดังเช่น ปัญหาจากแรงดันตกชั่วระยะสั้น (Voltage Sag) ปัญหาแรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ทำให้ผู้ผลิตไฟฟ้าต้องหาแนวทางและวิธีการเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น

4. ระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกัน ถ้าส่วนใดของระบบเกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าก็จะส่งผลกระทบต่อส่วนอื่นๆ ของระบบได้รับผลกระทบจากปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามไปด้วยเช่น โรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งมีการใช้โหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ ฮาร์มอนิกส์นั้นอาจไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้จึงอาจทำให้โรงงานบริเวณข้างเคียงได้รับผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน

### 2.2.2 ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า

1. จากปรากฏการณ์ธรรมชาติเช่น ฟ้าผ่า
2. จากการเกิดสภาวะความผิดปกติ (fault) ทางไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า
3. จากการกระทำการสวิตซ์อุปกรณ์ในระบบ
4. จากการใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม
5. จากการต่อลงดินที่ไม่ถูกต้อง

### 2.2.3 ประเภทของปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า

1. ภาวะชั่วคราว (Transient) คือปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพไฟฟ้า (แรงดันและกระแส) ในเวลาทันทีทันใดจากสภาพปกติแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Impulsive Transients และ Oscillatory Transients
2. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variation) คือ การเปลี่ยนแปลงค่ารากที่สองของแรงดันเฉลี่ย ( $V_{rms}$ ) ที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสภาวะความผิดปกติ (Fault) ทางไฟฟ้า ทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตก แรงดันเกิน และไฟดับ (Interruptions) มาตรฐาน IEEE Std. 1159-1995 มีการเรียกชื่อแรงดันดังกล่าวตามระยะเวลาที่เกิดคือเวลาทันทีทันใด (Instantaneous) ชั่วขณะ (Momentary) และชั่วคราว (Temporary)

3. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว (Long Duration Voltage Variation) คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเฉลี่ยที่มีระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าเกิน 1 นาที มีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลดขนาดใหญ่ ทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตก (Under voltage) แรงดันเกิน (Over voltage) และไฟดับ (Sustained Interruptions)

4. แรงดันไม่สมดุล (Voltage unbalance) คือแรงดันของระบบ 3 เฟสมีขนาดแตกต่างกัน (0.5-2%) หรือมีมุมเปลี่ยนไปจาก 120 องศา เกิดจากความไม่สมดุลขนาดของโหลดแต่ละเฟส สามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนขององค์ประกอบลำดับลบ  $V_2$  (Negative sequence) หรือองค์ประกอบลำดับศูนย์  $V_0$  (Zero sequence) ต่อบางองค์ประกอบลำดับบวก  $V_1$  (Positive sequence) ผลทำให้อุปกรณ์เช่นมอเตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานน้อยลง เนื่องจากผลความร้อนที่เกิดขึ้น

5. ความผิดเพี้ยนรูปคลื่น (Waveform Distortion) การผิดเพี้ยนของรูปคลื่น คือการเบี่ยงเบนในสภาวะคงตัวของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ทางกำลังไฟฟ้า และสามารถอธิบายคุณลักษณะได้โดยแยกองค์ประกอบทางความถี่ทางไฟฟ้าออกมา

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแบ่งออกได้ 5 ชนิด

1. องค์ประกอบไฟตรง (DC offset)
2. ฮาร์โมนิก (Harmonic)
3. อินเตอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonic)
4. คลื่นรอยบาก (Notching)
5. สัญญาณรบกวน (Noise)
6. แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) คือการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าแรงดันเฉลี่ยมีขนาดไม่เกินช่วงแรงดัน 0.95-1.05 p.u. เป็นผลเกิดจากการใช้อุปกรณ์ประเภทเตาหลอมแบบอาร์ค ทำให้เกิดไฟกระพริบ (Flicker) ที่หลอดไฟ และอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมาก

7. การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า (Power Frequency Variation) คือปรากฏการณ์ที่ความถี่ของระบบไฟฟ้า มีค่าเปลี่ยนไปจากค่าความถี่ปกติ 50 Hz เป็นผลเกิดจากการทำงานของผลิตผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่หรือมีการหลุดออกจากระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเครื่องจักรขนาดใหญ่ ทำให้มีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานสัมพันธ์กับความถี่ระบบไฟฟ้า

ซึ่งโดยทั่วไปปัญหาหลักๆ นั้นไม่ได้อยู่ในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า แต่ปัญหาส่วนใหญ่จะเกิดจากผู้ผลิตไฟฟ้า ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นนั้น แรงดันที่เปลี่ยนแปลงนั้นมีผลต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความไวต่อแรงดันที่ค่อนข้างสูง เช่นจำพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งบางทีอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ ทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ โดยสาเหตุหลักมักเกิดจากผู้ผลิตไฟฟ้านั้นก็คือ ปัญหาจากแรงดันตกชั่วระยะสั้นและปัญหาแรงดันเกินชั่วขณะ

#### 2.2.4 ปัญหาจากแรงดันตกชั่วระยะสั้น

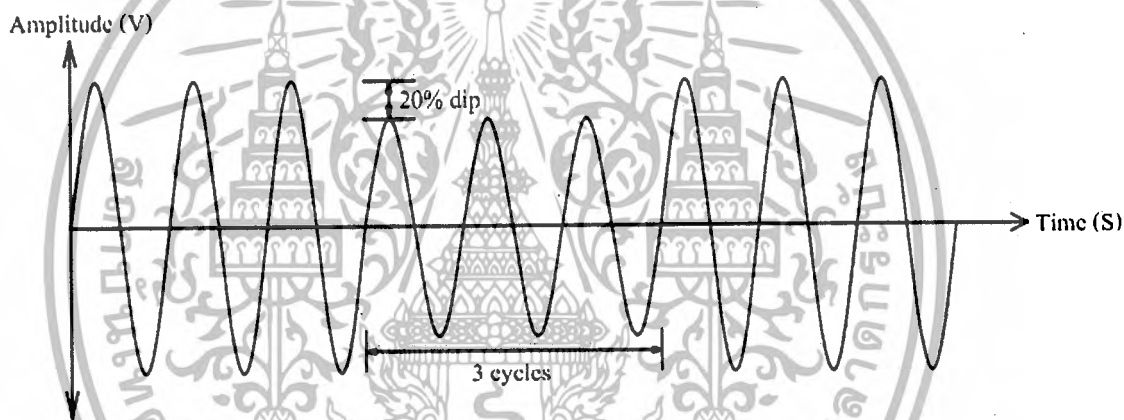
แรงดันตกชั่วขณะนั้นคือตาม IEEE Standard ได้ให้ความหมายไว้ว่าแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะคือ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 p.u. จากระดับแรงดัน RMS ปกติภายในระยะเวลา 0.5 cycle ถึง 1 นาที ตามประเภทของแรงดันไฟฟ้าตกดังนี้

- ทันทีทันใด (Instantaneous) : 0.5-30 cycles
- ชั่วขณะ (Momentary) : 30 cycles - 3 sec
- ชั่วคราว (Temporary) : 3 sec-1 min

แรงดันไฟฟ้าที่เราจะได้รับในประเทศไทยคือ 220 V แต่ได้รับแรงดันไม่ถึงพิกัดที่ควรจะได้รับ คือได้รับแรงดันที่ต่ำกว่า 90 % ของแรงดันพิกัด ช่วงเวลานั้นก็มีตั้งแต่ไม่กี่ไมโครวินาทีไปจนถึงเป็นวินาที ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะสามารถดูได้จากตาราง 2.1 ซึ่งแรงดันตกชั่วขณะนั้นอาจเกิดมาจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมอเตอร์อินดักชันขณะสตาร์ทจะมีกระแสสูงสูงถึง 6-10 เท่าของกระแสโหลดปกติ รวมไปถึงเกิดการลัดวงจรขึ้นที่ระบบจำหน่ายหรือระบบส่ง ซึ่งอาจจะเกิดจากสาเหตุหลายอย่างเช่น ลมพัดสายส่ง หรือมีพายุเข้า จนทำให้สายส่งเกิดความผิดปกติขึ้น และการเริ่มต้นใช้งานโหลดขนาดใหญ่ของโรงงานอุตสาหกรรม

## ตารางที่ 2.1 สาเหตุของการเกิดแรงดันตกบนระบบไฟฟ้า

ชนิดของการเกิด	จำนวนครั้งที่ปรากฏ	เปอร์เซ็นต์
ลมและฟ้าผ่า	37	46%
เครื่องมือเกิดผิดพลาด	8	10%
ปัญหาจากสิ่งก่อสร้างและการจราจร	8	10%
สัตว์	5	6%
กิ่งไม้	1	1%
อื่นๆ	21	26%



รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ

### 2.2.4.1 คุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ

จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ คือ การลดลงอย่างทันทีทันใดของแรงดันปกติ โดยทั่วไปจะถูกกำหนดในรูปแบบของ 3 องค์ประกอบด้วยกันดังนี้

1. ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (amplitude of voltage sags) คือ ระดับของค่าแรงดันที่เกิดขึ้นผลของขนาดที่ลดลง
2. คาบเวลาของการเกิด (duration of voltage sags) คาบเวลาของการเกิด คือ ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มเกิดการลดลงของแรงดันจนกระทั่งกลับเข้าสู่สภาวะปกติ
3. ตำแหน่งที่ลูกคลื่นขณะเริ่มเกิดไฟฟ้าตกชั่วขณะ (phase angle beginning of voltage sags) คือ ค่ามุมเฟสในการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะเนื่องจากเกิดในช่วงเวลา

สั้นๆ อย่างกะทันหัน ส่งผลให้เกิดความผิดปกติขึ้นในรูปแบบสภาวะชั่วคราว (transient response) แบบต่างๆ

#### 2.2.4.2 ผลกระทบจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ

ปัญหาของการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะนั้นจัดเป็นปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่สำคัญ ซึ่งส่งผลต่อผู้ใช้งาน โดยเฉพาะผู้ใช้งานประเภทโรงงานอุตสาหกรรม เพราะว่าในปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานส่วนใหญ่เป็นประเภทควบคุมกระบวนการผลิต (Process Control), การควบคุมแบบลอจิก การควบคุมความเร็วมอเตอร์ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้อาจทำงานล้มเหลวได้หากเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ ทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่อุปกรณ์ต้องการไม่เพียงพอในการทำงาน นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะยังมีผลต่อความเชื่อมั่นในระบบไฟฟ้ากำลัง (Reliability) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่มีความไวในการตอบสนองต่อความผิดปกติของแหล่งจ่ายไฟฟ้า อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของแรงดันไฟฟ้า เช่น เกิดการลัดวงจรทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงมา หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของภาระทางไฟฟ้า ไกล่เคียง

#### ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะของอุปกรณ์แต่ละชนิด

ตัวอย่างอุปกรณ์	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ทนได้ (เทียบกับแรงดันไฟฟ้าใช้งาน ตามปกติ)	เวลาสูงสุดที่ยังทำงาน ได้ (ms)
อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ มอเตอร์	85%	10
ลีเลย์	50-60%	15-40
เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า	50%	0.5
อุปกรณ์พีแอลซี	90%	20
อุปกรณ์ควบคุมการผลิต	70%	8
คอมพิวเตอรส์ส่วนตัว	50-70%	60-100
อุปกรณ์ควบคุมความเร็ว มอเตอร์(ASD)	82%	1.5
หน้าสัมผัส	60%	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 วงจรแปรผันสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (D/A Converter)

วงจรแปรผันสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก ทำหน้าที่แปลงข้อมูลผลลัพธ์จากการประมวลผลเป็นสัญญาณไฟฟ้า ให้เป็นสัญญาณที่มนุษย์รับรู้ได้ สัมผัสได้ เป็นการแสดงผลข้อมูล (Output unit) การแปรผันสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก เป็นกระบวนการซึ่งสัญญาณมีการกำหนดระดับ หรือสถานะจำนวนหนึ่ง (ปกติ คือ 2 สถานะ) หรือสัญญาณดิจิทัล ให้เป็นสัญญาณที่ไม่จำกัดจำนวนของสถานะ หรือสัญญาณอนาล็อก ตัวอย่าง กระบวนการของโมเด็ม ในการแปลงข้อมูลคอมพิวเตอร์ เป็นความถี่เสียง ให้สามารถส่งผ่านสายโทรศัพท์ (Twisted pair) ในวงจรที่ทำงานให้กับฟังก์ชันนี้ เรียกว่า การแปรผันสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก โดยพื้นฐาน การแปรผันสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก ตรงข้ามกับการแปรผันสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ถ้า การแปรผันสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล วางอยู่ในวงจรการสื่อสารต่อจากวงจรแปรผันสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก สัญญาณดิจิทัลส่งออก จะตรงกับสัญญาณดิจิทัลนำเข้า ในกรณีที่วงจรแปรผันสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกวางอยู่ในวงจรต่อจาก วงจรแปรผันสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล สัญญาณอนาล็อกส่งออกจะเป็นตรงกับสัญญาณอนาล็อกนำเข้า สัญญาณดิจิทัล ในระบบเลขฐานสอง (binary) จะปรากฏเป็นข้อความขนาดยาว ของ 1 และ 0 ซึ่งจะไม่มีความหมายต่อการอ่าน แต่เมื่อวงจรแปรผันสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก ใช้ถอดรหัสสัญญาณดิจิทัลในระบบเลขฐานสอง จึงปรากฏผลลัพธ์ที่มีความหมาย ซึ่งอาจจะเป็น เสียง ภาพ เสียงดนตรี และกลไกการเคลื่อน

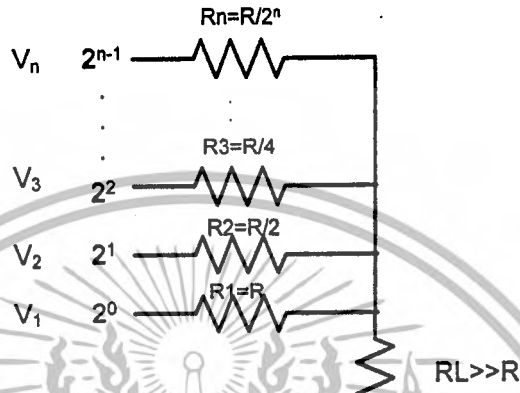
### 2.3.1 ประเภทของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

- แบบรวมกระแส (weighted-resistor)
- แบบโครงข่ายแบบ R-2R (R-2R network)
- แบบรวมกระแส ดังรูปที่ 2.2 มีคุณสมบัติคือ
  - จะต้องมิตัวต้านทานทุกอินพุทของสัญญาณดิจิทัล
  - ตัวต้านทานนี้อินพุทของทุกบิตจะมีค่าเท่ากับเอาต์พุทของระดับดิจิทัลสูงสุด
  - แรงเคลื่อนที่เอาต์พุทเต็มสเกลจะมีค่าเท่ากับเอาต์พุทของระดับดิจิทัลสูงสุด
  - บิตต่ำสุด (LSB จะมีน้ำหนักเป็น  $1/(2^n-1)$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนบิตที่อินพุท
  - เมื่อ LSB เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เอาต์พุทจะเปลี่ยนไป  $1/(2^n-1)$  เมื่อ  $V$  เป็นระดับสัญญาณดิจิทัลดังรูปที่ 2.2

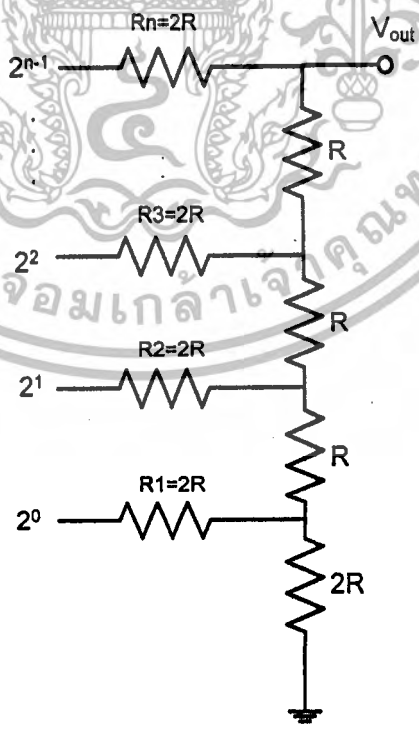
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบโครงข่ายแบบ R-2R ดังรูปที่ 2.3 จะได้แรงดันที่ออกมาตามสูตรคำนวณคือ

$$[(\text{เลขฐานสิบของดิจิตอล} \times \text{บิต}) \times \frac{V_{\text{ref}}}{2^x}] \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกแบบรวมกระแส



รูปที่ 2.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกแบบโครงข่ายแบบ R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 คุณสมบัติและพารามิเตอร์ของ D/A converter

1. ความละเอียด (Resolution) หมายถึงจำนวนบิตทางด้านอินพุตในกรณีที่รับอินพุตได้  $n$  บิต

$$\% \text{ Resolution} = \frac{1}{(2^n - 1)} \cdot 100 \quad (2.2)$$



2. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ค่าแรงดันและดิจิตอลอินพุตจะต้องเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นค่า linearity error จะต้องน้อยกว่า Volt /2 เมื่อดิจิตอลอินพุตเป็น 0001 ตั้งความสัมพันธ์รูปที่ 2.4

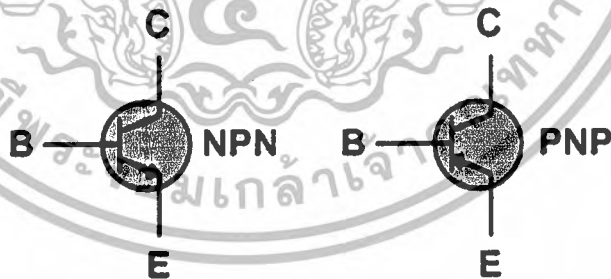
3. ความแม่นยำ (Accuracy) เป็นค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันที่วัดได้กับค่าในอุดมคติกำหนดค่านี้เป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกลส่วนคุณลักษณะอื่น ๆ

## 2.4 ทรานซิสเตอร์ (Transistor)

ทรานซิสเตอร์ คือ สิ่งประดิษฐ์ทำจากสารกึ่งตัวนำมีสามขา (Three leads) กระแสหรือแรงเคลื่อน เพียงเล็กน้อยที่ขาหนึ่งจะควบคุมกระแสที่มีปริมาณมากที่ไหลผ่านขาทั้งสองข้างได้ หมายความว่าทรานซิสเตอร์เป็นทั้งเครื่องขยาย (Amplifier) และสวิตช์ทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อเรียกด้วยตัวย่อว่า BJT (Bipolar Junction Transistor) BJT ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น วงจรขยายในเครื่องรับวิทยุและเครื่องรับโทรทัศน์หรือนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ (Switching) เช่น เปิด-ปิด รีเลย์ (Relay) เพื่อควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ เป็นต้น

### 2.4.1 โครงสร้างและการทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ชนิดสองรอยต่อหรือ BJT นี้ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นต่อกัน โดยการเติมสารเจือปน (Doping) จำนวน 3 ชั้นทำให้เกิดรอยต่อ (Junction) ขึ้นจำนวน 2 รอยต่อ การสร้างทรานซิสเตอร์จึงสร้างได้ 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีสารชนิด N จำนวน 2 ชั้น เรียกว่าชนิด NPN และชนิดที่มีสารชนิด P จำนวน 2 ชั้น เรียกว่าชนิด PNP โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และชนิด PNP แสดงเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าโครงสร้างของทรานซิสเตอร์จะมีสารกึ่งตัวนำ 3 ชั้น แต่ละชั้นจะต่อลวดตัวนำจากเนื้อสารกึ่งตัวนำไปใช้งาน ชั้นที่เล็กที่สุด (บางที่สุด)



รูปที่ 2.5 วงจรของทรานซิสเตอร์ที่ประกอบด้วยขาต่างๆ

เรียกว่า เบส (Base) ตัวอักษรย่อ B สำหรับสารกึ่งตัวนำชั้นที่เหลือนคือ คอลเล็กเตอร์ (collector หรือ c) และอิมิตเตอร์ (Emitter หรือ E) นั่นคือทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด NPN จะมี 3 ขา คือ ขาเบส (B) ขาอิมิตเตอร์ (E) และขาคอลเล็กเตอร์ (C) ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ นิยมเขียนทรานซิสเตอร์แทนด้วยสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.5 ทรานซิสเตอร์ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำ 3 ชั้นต่อเชื่อมกันดังนั้นจึงมีรอยต่อ PN จำนวน 2 ตำแหน่งตำแหน่งที่อิมิตเตอร์กับเบสเชื่อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เป็นรอยต่อ PN เรียกว่ารอยต่ออิมิตเตอร์-เบส (Emitter Base Junction) ส่วนตำแหน่งที่ คอลเลคเตอร์กับเบสต่อเชื่อมกันเรียกว่า รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส (Collector Base Junction) เขียนแทนได้ด้วย ค่าเทียบเคียงของไดโอดเมื่อนำหลักการ มาร่วมพิจารณา ทำให้ทราบว่า การที่จะนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานได้นั้นต้องต่อแรงดัน ไฟฟ้าเพื่อทำการไบอัสที่รอยต่อ หรือไดโอดเทียบเคียงทั้งสอง เนื่องจากทรานซิสเตอร์ มี 3 ขั้ว การต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเพื่อให้ ทรานซิสเตอร์ทำงานจึงเป็นไปได้ 3 แบบคือ

- การให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่บริเวณคัตออฟ (Cut-off region)
- การให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่บริเวณอิ่มตัว (Saturation region)
- การให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่บริเวณแอกทีฟ (Active region)

ในการอธิบายถึงการทำงานที่บริเวณต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์นั้น จะเริ่มต้น จากกรณีที่ไม่มีการต่อแรงดันที่ขั้ว ของทรานซิสเตอร์ หรือกรณีที่ไม่ได้รับการไบอัส

กรณีไม่ได้รับการไบอัส

ขณะทรานซิสเตอร์ไม่ได้รับการไบอัส จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ

(Depletion region) ที่รอยต่อทั้งสอง

การทำงานที่บริเวณคัตออฟ

การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณคัตออฟเป็นการไบอัส กลับที่รอยต่อทั้ง 2 ตำแหน่ง ซึ่งจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านขั้วทั้งสามมีค่าใกล้ศูนย์ จากลักษณะ ดังกล่าวบริเวณปลอดพาหะทั้งสองบริเวณจะขยายกว้างขึ้นจึงมีเพียงกระแสนย้อนกลับ กระแส รั่วไหลปริมาณต่ำมากเท่านั้นที่ไหลจากคอลเลคเตอร์ไปยังอิมิตเตอร์ได้

การทำงานที่บริเวณอิ่มตัว

ทำให้ทราบว่าถ้าค่ากระแสที่ขาเบส ( $I_B$ ) เพิ่มขึ้นกระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ก็ จะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อกระแสที่ขาคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด หรือเรียกว่าทรานซิสเตอร์ เกิดการอิ่มตัว ณ ตำแหน่งนี้ค่ากระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ จะเพิ่มตามค่ากระแสที่ขาเบสไม่ได้อีก แล้ว การหาค่ากระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ ทำได้โดยใช้แรงดันขาเข้า ( $V_{CC}$ )หารด้วยผลรวมของ ความต้านทานที่ขั้วคอลเลคเตอร์ ( $R_C$ ) กับความต้านทาน ที่ขั้วอิมิตเตอร์ ( $R_E$ )

## การทำงานที่บริเวณแอกตีฟ

การต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในบริเวณแอกตีฟเป็นการแอกตีฟเป็นการไบอัสตรงที่รอยต่อ อิมิตเตอร์-เบส และไบอัสกลับที่รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ในบริเวณนี้จะง่ายขึ้น ถ้าพิจารณาเฉพาะรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ของไดโอด [สมมติแรงดันระหว่างขาเบสและขาคอลเลคเตอร์ ( $V_{BE}$ ) มีค่ามากพอที่จะทำให้ไดโอดทำงาน ( $S_i$  ประมาณ 0.7 V และ  $G_e$  ประมาณ 0.3 V)] รอยต่อคอลเลคเตอร์-เบสได้รับการไบอัสกลับ ทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างกว่าที่รอยต่ออิมิตเตอร์-เบสซึ่ง ได้รับการไบอัสตรง ดังนั้น ความต้านทานที่เบสจึงมีค่าสูง เมื่อพิจารณาในรูปของไดโอดจะเห็นว่า ค่ากระแสที่ขาเบส เป็นกระแสที่มีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับกระแสคอลเลคเตอร์ และเป็นส่วนหนึ่งของกระแสคอลเลคเตอร์ ดังนั้นกระแสอิมิตเตอร์ ส่วนใหญ่จึงเป็นกระแสอิมิตเตอร์ ซึ่งผ่านรอยต่อคอลเลคเตอร์-เบส ของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ซึ่งถูกควบคุมด้วยกระแสเบส กล่าวคือ เมื่อกระแสที่ขาเบส มีการเปลี่ยนแปลงแม้เพียง เล็กน้อยก็จะทำให้กระแสอิมิตเตอร์ และกระแสคอลเลคเตอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้าเราเลือกบริเวณการทำงาน (Operating Region) หรือทำการไบอัสที่รอยต่อของทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตำแหน่งให้เหมาะสม ก็จะได้กระแสอิมิตเตอร์ และกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งมีขนาดมากขึ้นเมื่อเทียบกับค่ากระแสที่ขาเบส โดยที่ เมื่อจ่ายสัญญาณกระแส ac ที่ขาเบส หรือที่ด้านอินพุตของทรานซิสเตอร์ก็จะได้รับสัญญาณเอาต์พุตที่ขาอิมิตเตอร์ และที่ขาคอลเลคเตอร์ มีขนาดเพิ่มขึ้น ตัวประกอบหรือแฟกเตอร์ที่ทำให้กระแสไฟฟ้าจากขั้วเบสไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเรียกว่า อัตราขยายกระแสไฟฟ้า (Current Gain) ซึ่งแทนด้วยอักษรกรีก คือ เบตา (Beta:  $\beta$ ) ถ้าต้องการหาปริมาณกระแสที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ก็เพียงแต่คูณ  $I_B$  ด้วยพิกัดเบตา เขียนเป็นสมการได้คือ

$$I_C = \beta I_B \quad (2.3)$$

$$I_E = I_B + I_C \quad (2.4)$$

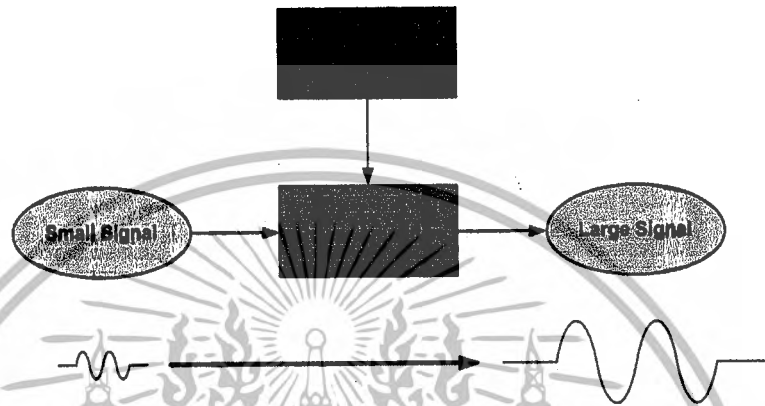
เมื่อ  $I_C$  คือ กระแสที่ไหลผ่านขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์

$I_B$  คือ กระแสที่ไหลผ่านขาเบสของทรานซิสเตอร์

$I_E$  คือ กระแสที่ไหลผ่านขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์

## 2.5 วงจรขยายสัญญาณเชิงเส้น

วงจรขยายทำหน้าที่ขยายสัญญาณขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้น กล่าวคือ สัญญาณที่ผ่านวงจรขยายจะมีพิกัดกำลังที่สูงขึ้น ด้วยการดึงกำลังจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า กระแสตรง แต่รูปแบบของสัญญาณที่ได้คงเดิมจากสัญญาณต้นแบบ ดังรูปที่ 2.6

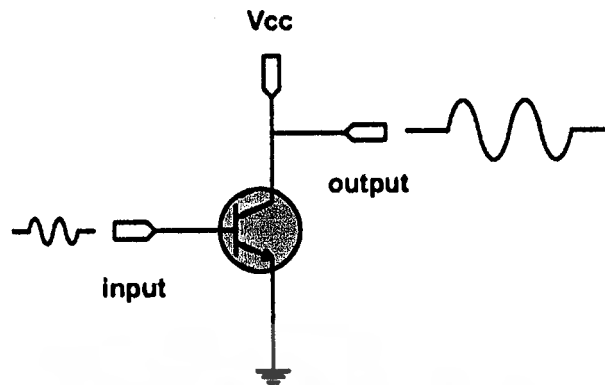


รูปที่ 2.6 หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรขยาย

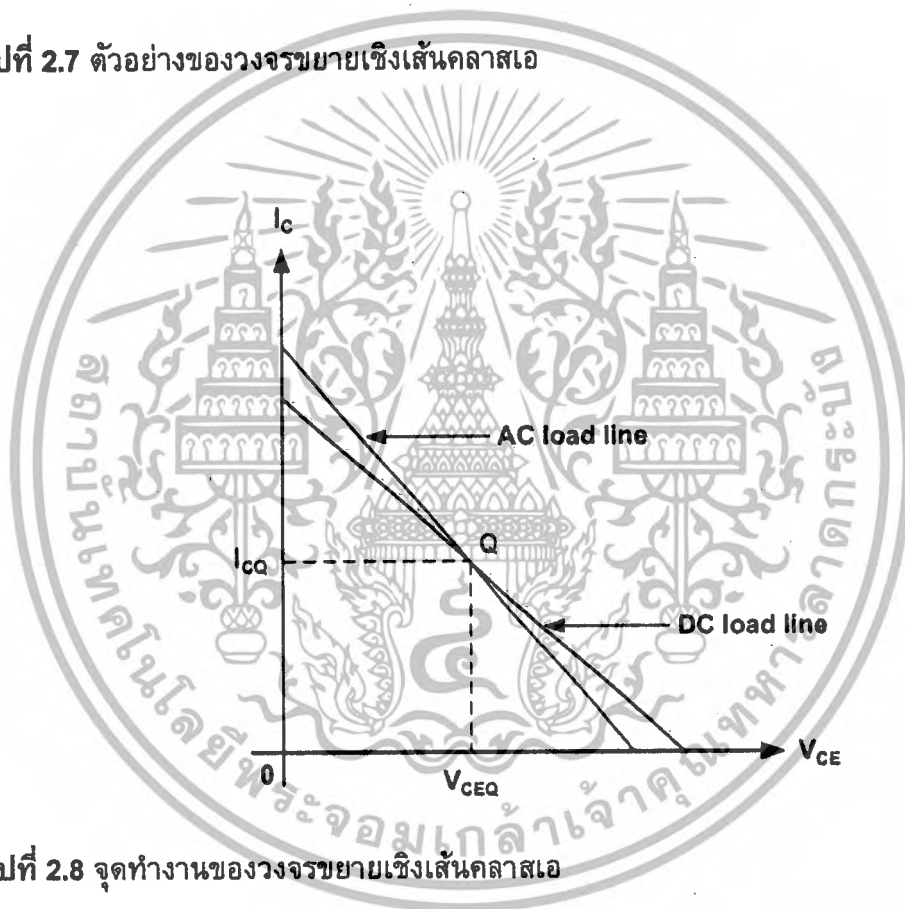
### 2.5.1 วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ (Class A power amplifier)

วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ รูปที่ 2.7 คือ วงจรขยายที่มีการไบอัสทรานซิสเตอร์ ตลอดไซเคิล หรือ 1 คาบเวลาของสัญญาณอินพุตและเป็นวงจรที่กำหนดจุดทำงาน ที่ประมาณกึ่งกลางเส้นโหลด (Load line) ดังรูปที่ 2.8 โดยวงจรนี้จะทำงานเป็นวงจรขยายเชิงเส้นในกรณีที่มีสัญญาณอินพุตขนาดน้อยๆ วงจรนี้ส่วนมากจะใช้ทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียว โดยทรานซิสเตอร์ตัวนี้จะทำงานขยายสัญญาณอินพุตตลอดทั้ง 1 คาบเวลา โดยที่วงจรจะทำการขยายสัญญาณซีกบวกและลบพร้อมๆ กัน รูปที่ 2.9 ทำให้มีความผิดเพี้ยนน้อย ให้คุณภาพดีมาก แต่มักจะร้อนได้ง่าย วงจรประเภทนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำเนื่องจากทรานซิสเตอร์ทำงานตลอดเวลาแม้ไม่มีสัญญาณอินพุตเข้ามาก็ตาม โดยมีประสิทธิภาพต่ำเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ โดย สามารถหาประสิทธิภาพได้จากสมการที่ 2.5

$$\% \eta = \frac{P_{OUT}}{P_{dc}} \times 100 \quad (2.5)$$

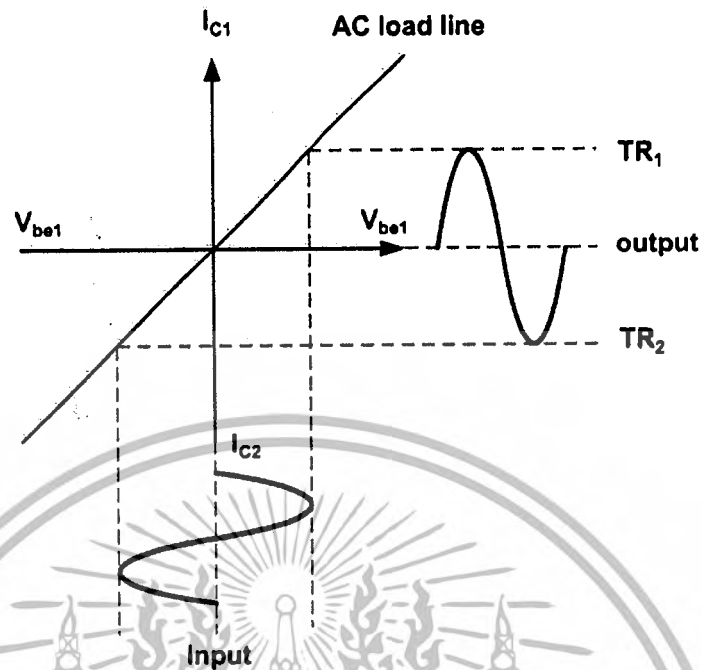


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ



รูปที่ 2.8 จุดทำงานของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กราฟการไบอัสของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ

### 2.5.1.1 กำลังขาเข้า ( $P_i(\text{dc})$ ) วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ

กำลังขาเข้าของวงจรขยายจากแหล่งจ่าย ขณะไม่มีสัญญาณขาเข้าจ่ายให้วงจร จะมีเพียงไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้นที่ไหลในวงจร ไฟฟ้ากระแสตรงนี้คือ กระแสไบอัสคอลเล็กเตอร์ ( $I_{CQ}$ ) ดังนั้น

$$P_i(\text{dc}) = V_{CC} \cdot I_{CQ} \quad (2.6)$$

แม้ว่ามีการจ่ายสัญญาณอินพุต แต่ค่าเฉลี่ยของกระแสที่ออกมาจากแหล่งจ่ายยังคงเท่าเดิม ดังนั้นสมการ 2.6 นี้ จึงใช้หา กำลังขาเข้าที่จ่ายให้วงจรขยายคลาสเอ แบบต่อโหลดโดยตรงได้

### 2.5.1.2 กำลังขาออก ( $P_o(\text{ac})$ ) วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ

แรงดันขาออกและกระแสขาออกที่สวิตช์รอบๆ จุดทำงานทำหน้าที่สร้างกำลังเออร์ท์พุด เพื่อจ่ายให้แก่ภาระทางไฟฟ้า กรณีพิจารณา ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ ( $P_o(\text{ac})$ )

$$P_o(\text{ac}) = V_{CE}(\text{rms}) \times I_C(\text{rms}) \quad (2.7)$$

$$P_o(\text{ac}) = I_C^2(\text{rms}) \times R_C \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

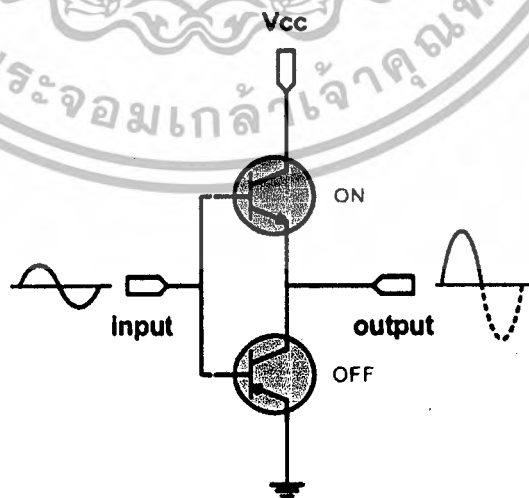
$$P_o(ac) = \frac{V_C^2(rms)}{R_C} \quad (2.9)$$

สำหรับกำลังสูญเสียจะพิจารณาเฉพาะกำลังสูญเสียของการแพร่กระจายในรูปแบบความร้อน (Power Dissipation:  $P_Q$ ) ภายในตัวทรานซิสเตอร์เท่านั้นจะได้จาก

$$P_Q = P_i(dc) - P_o(ac) \quad (2.10)$$

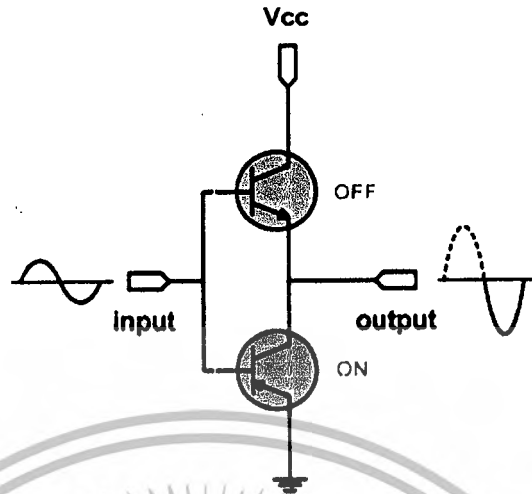
### 2.5.2 วงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี (Class B power amplifier)

การทำงานของวงจรขยายคลาสบี วงจรขยายที่มีการไบอัสทรานซิสเตอร์เพียงครึ่งไซเคิล มีจุดการทำงานอยู่ที่จุดศูนย์ (cut off) รูปที่ 2.12 - 2.13 แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนหรือแต่ละครึ่งของวงจร (One-Half Circuit) นำกระแสเพียงครึ่งไซเคิลที่ตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ ส่วนหนึ่งของวงจรจะผลักสัญญาณให้มีค่าสูงขึ้นระหว่างช่วงครึ่งไซเคิลด้านบวก แต่อีกส่วนหนึ่งของวงจรจะดึงสัญญาณให้มีค่าต่ำลงระหว่างช่วงครึ่งไซเคิลด้านลบ เพื่อส่งสัญญาณให้ปรากฏที่ภาระทางไฟฟ้า เราจึงเรียกวงจรนี้ว่า วงจรผลักดึง (Push-Pull circuit) ดังรูปที่ 2.10 - 2.11 แสดงการทำงานของวงจรผลักดึง เมื่อมีการจ่ายสัญญาณขาเข้าให้กับวงจร จะเห็นได้ว่าแต่ละครึ่งซีกของวงจรทำงานสลับกันเพื่อส่งสัญญาณขาออกแต่ละครึ่งไซเคิลมายังภาระทางไฟฟ้า การทำงานในลักษณะนี้จึงทำให้วงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี มีประสิทธิภาพในการทำงานมากกว่าวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ เพราะจุดทำงานที่ต่ำกว่า

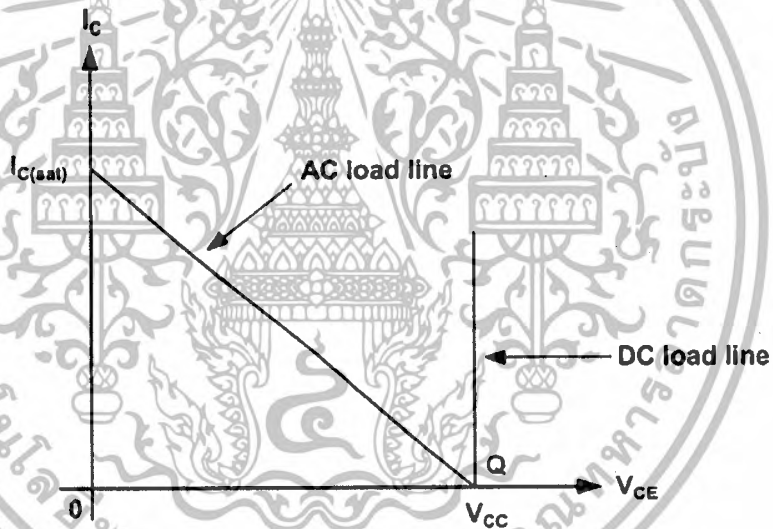


รูปที่ 2.10 ตัวอย่างวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี ขณะขับสัญญาณครึ่งซีกบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

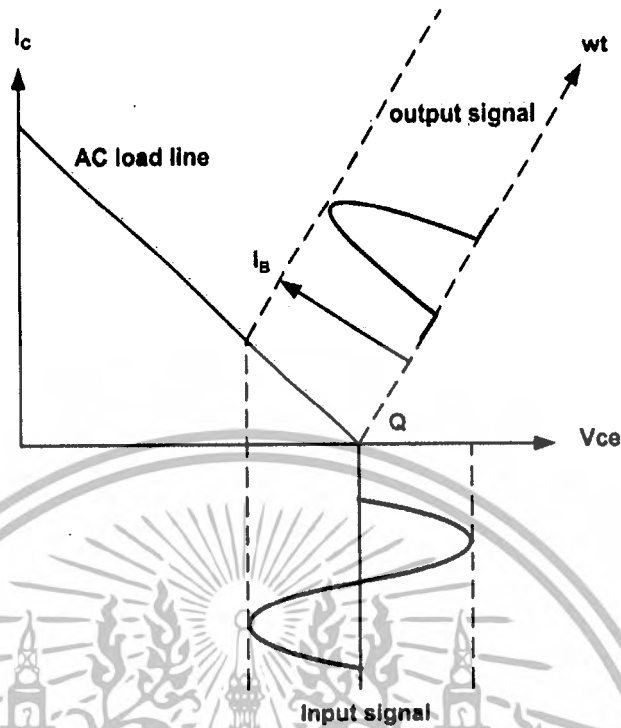


รูปที่ 2.11 ตัวอย่างวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี ขณะขับสัญญาณครึ่งซีกลบ



รูปที่ 2.12 จุดทำงานของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟการไบอัสของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี

### 2.5.2.1 กำลังขาเข้า ( $P_{dc}$ ) วงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี

หาได้จาก

$$P_i(dc) = V_{cc} I_{cq} \quad (2.11)$$

### 2.5.2.2 กำลังขาออก [ $P_o(ac)$ ] วงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี

หาได้จาก

$$P_o(ac) = \frac{V_L^2 (rms)}{R_L} \quad (2.12)$$

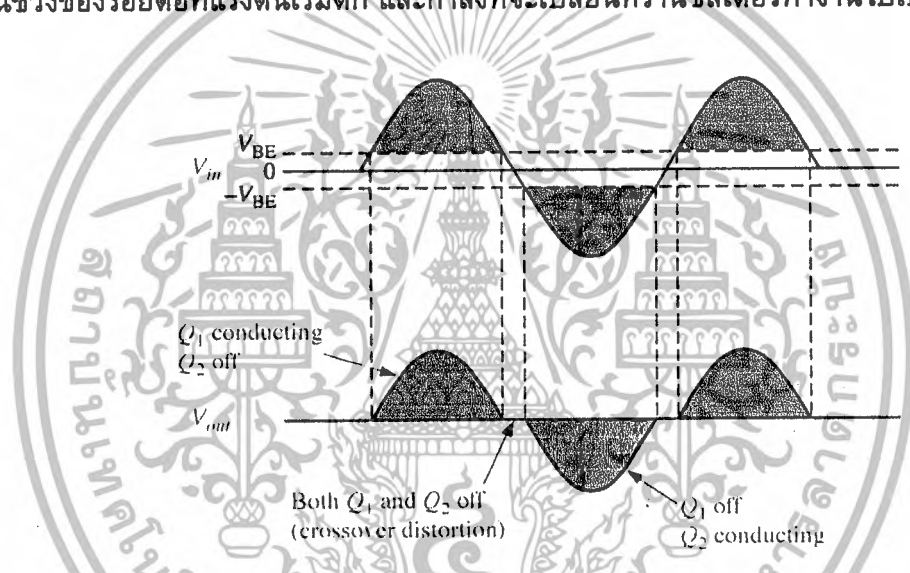
### 2.5.2.3 ประสิทธิภาพพวงจขยายเชิงเส้นคลาสบี

$$\% \eta = \frac{P_{OUT}}{P_{dc}} \times 100 \quad (2.13)$$

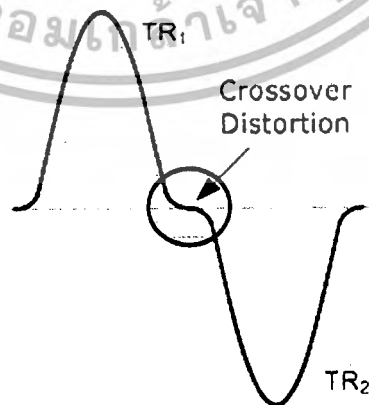
โดยที่ประสิทธิภาพที่ได้นั้นจะดีกว่าวงจรขยายแบบเชิงเส้นคลาสเอ โดยที่ไม่มีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ในขณะที่ไม่มีความต้องการเข้าเข้ามา โดยจะไม่มีกระแสของกำลังบนทรานซิสเตอร์ ไม่เหมือนวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ ที่จะมีการสูญเสียตลอดเวลาไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าจะมีหรือไม่มีสัญญาณขาเข้า โดยที่วงจรรขยายเชิงเส้นคลาส บี นี้จะมีประสิทธิภาพสูงถึง 75% แต่อย่างไรก็ดี วงจรรขยายเชิงเส้นคลาสบี นั้นยังมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ค่าพอสสมควร ดังรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่า เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าต่ำลง ซึ่งเมื่อต่ำลงน้อยกว่าแรงดันระหว่างขาเบสและขาอิมิตเตอร์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์นั้นหยุดทำงาน ซึ่งก็เป็นเช่นเดียวกันทั้งสองซีกการทำงาน คือแรงดันอินพุตต้องมากกว่าแรงดันระหว่างขาเบสและขาอิมิตเตอร์ ทรานซิสเตอร์จึงเริ่มทำงาน และในส่วนเมื่อแรงดันอินพุตลดลงต่ำกว่าแรงดันระหว่างขาเบสและขาอิมิตเตอร์ ทรานซิสเตอร์ก็จะหยุดทำงาน ซึ่งรูปคลื่นที่ได้เมื่อนำทั้งสองครึ่งไซเคิลมารวมกันจะได้คลื่นสัญญาณ ดังรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าคลื่นที่ได้จะมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นต้นแบบในช่วงของรอยต่อที่แรงดันเริ่มตก และกำลังที่จะเปลี่ยนทรานซิสเตอร์ทำงานไปเป็นอีกตัวหนึ่ง



รูปที่ 2.14 ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากวงจรรขยายเชิงเส้นคลาสบี

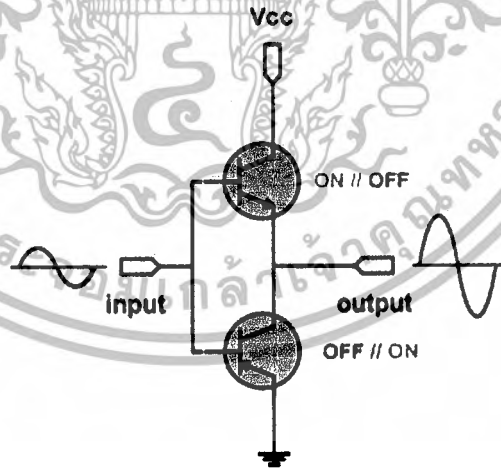


รูปที่ 2.15 ความผิดเพี้ยนช่วงรอยต่อจากวงจรรขยายคลาสบี

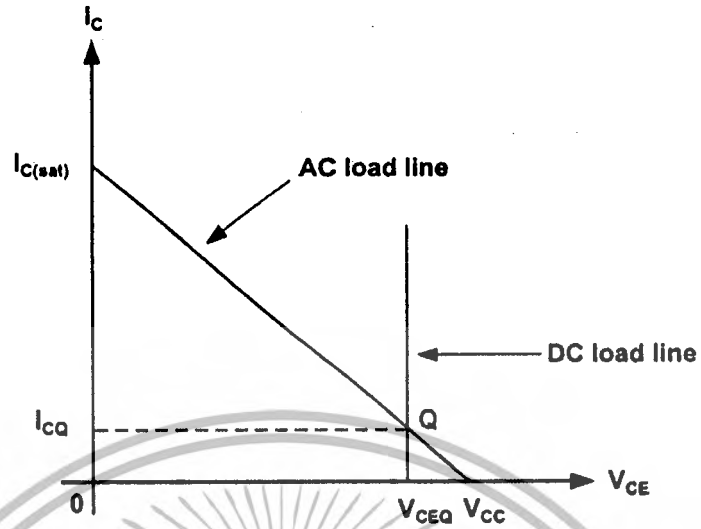
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี (Class AB power amplifier)

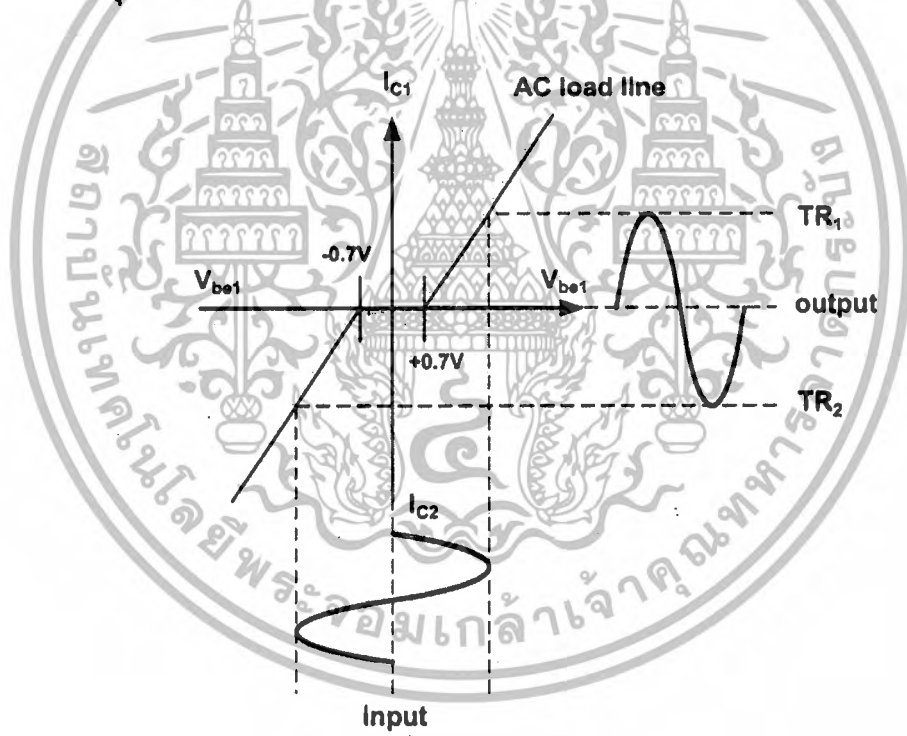
วงจรขยายคลาสบี เป็นวงจรขยายที่มีการไบอัสทรานซิสเตอร์ครึ่งไซเคิล หรือ 180 องศา ของสัญญาณขาเข้า ซึ่งอาจทำให้เกิดการเพี้ยนที่ช่วงต่อของสัญญาณขาออกที่ได้ วงจรขยายเชิงเส้นคลาสบีมีความเพี้ยนที่ช่วงรอยต่อ ปัญหาดังกล่าวจะหายไปถ้าตัดแปลง วงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี ให้ไบอัสทรานซิสเตอร์มากกว่า 180 องศาของสัญญาณขาเข้า เราเรียกวงจรนี้ว่า “วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี” เนื่องจากความต้องการลดความเพี้ยนตรงรอยต่อ ระหว่างรอยต่อของสัญญาณซีกบวกและซีกลบของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี จึงต้องลด ประสิทธิภาพของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบีลงไป เป็นการนำเอาคุณสมบัติของวงจรขยายเชิง เส้นคลาสเอและวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบีมาใช้ร่วมกัน โดยการใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อแบบ วงจรผลัดดึงในคลาสบี ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งจะมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่างวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ กับวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบีโดยที่จุดทำงาน Q-point ของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบีจะอยู่สูง กว่าวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบีอยู่ประมาณ 0.7V หรือมากกว่านั้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.17 – 2.18 จึงมีกระแสคอลเล็กเตอร์ไหลในวงจรเพียงเล็กน้อยในขณะที่ไม่มีสัญญาณขาเข้า จึงสามารถลด ความเพี้ยนช่วงรอยต่อได้ ทำให้วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบีที่มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อย เหมือนวงจรขยายคลาสเอและมีกำลังสูงเหมือนวงจรขยายคลาสบี



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี ที่ต่อแบบผลัดดึง (push pull)



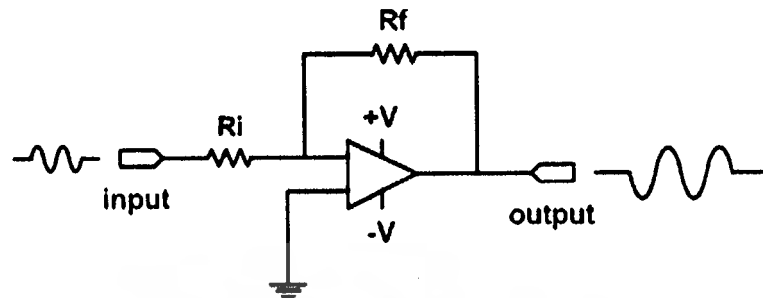
รูปที่ 2.17 จุดการทำงานของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี



รูปที่ 2.18 กราฟการไบอัสของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.4 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)



รูปที่ 2.19 วงจรขยายแบบกลับเฟส

จากรูปที่ 2.19 วงจรขยายแบบกลับเฟสโดยใช้ออปแอมป์ เป็นวงจรขยายที่สามารถขยายสัญญาณและกลับเฟสสัญญาณ (ความแตกต่างของสัญญาณ 180 องศา) โดยที่อัตราขยายของวงจรขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานป้อนกลับส่วนด้วยค่าความต้านทานขาเข้า  $(-R_f/R_i)$  ขนาดของแรงดันขาออกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.14

$$V_{out} = - \left( \frac{R_f}{R_i} \right) \times V_{in} \quad (2.14)$$

### 2.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ทั้งในเรื่องของความสัมพันธ์ของคุณภาพกำลังไฟฟ้า สาเหตุ และผลกระทบที่เกิดจากปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ รวมถึงหลักการทำงานของวงจรขยายเชิงเส้นที่ใช้ทรานซิสเตอร์และออปแอมป์เป็นส่วนประกอบ สำหรับข้อดีของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบีนั้นมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ อีกทั้งยังมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยกว่าวงจรขยายเชิงเส้นคลาสบี จึงได้ทำการเลือกที่จะนำวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบีไปศึกษาต่อในการออกแบบและจัดสร้างชิ้นงานจริง ซึ่งจะได้นำเสนอต่อในบทที่ 3

### บทที่ 3

## การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

### 3.1 บทนำ

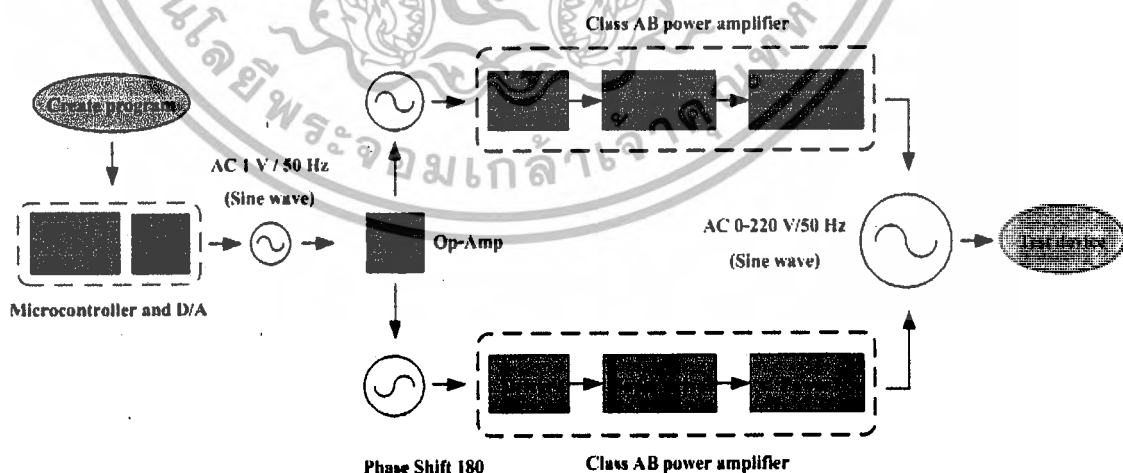
สำหรับบทนี้จะเป็นการนำเสนอถึงการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ ของเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ เป็นการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) และวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี (Class AB power amplifier) การเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ

### 3.2 โครงสร้างพื้นฐาน

เครื่องจำลองแหล่งจ่ายพลังงานโปรแกรมได้ มีโครงสร้างพื้นฐานดังรูปที่ 3.1 ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. ส่วนการกำเนิดสัญญาณ
2. ส่วนการขยายสัญญาณ

สามารถเขียนโปรแกรมให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่างๆ ตามทฤษฎีคุณภาพกำลังไฟฟ้า โดยมีพิกัดกำลังสูงสุดที่ประมาณ 3 kW ที่แรงดัน  $311 V_p$  ( $220 V_{rms}$ )



รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้

### 3.3 เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้

#### 3.3.1 ส่วนการกำเนิดสัญญาณ

##### 3.3.1.1 การออกแบบโปรแกรม

ทำการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่สามารถกำหนดให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sag) ตามสมการที่ (3.1) ซึ่งเราสามารถใช้ในการคำนวณฟังก์ชัน  $\sin ()$  ได้จาก Math Library ซึ่งมีในคอมไพเลอร์ (Compiler) แต่เนื่องจากการคำนวณเป็นแบบเลขทศนิยม (Float point) ทำให้ต้องใช้ระยะเวลานานในการประมวลผล จึงใช้วิธีการคำนวณฟังก์ชัน  $\sin ()$  จากโปรแกรมภายนอกแล้วเก็บค่าไว้ในรูปของตาราง (Lookup table) แล้วส่งโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าจากตารางที่คำนวณได้

$$y_x = 128 + 127(m_a)\sin\left(2P \times \frac{\pi}{180}\right) \quad (3.1)$$

โดยที่  $P$  คือ การแบ่งช่วงของรูปคลื่นไซน์ 360 องศาหรือ  $0-2\pi$  ออกเป็น 180 จุด

$m_a$  คือ แอมพลิจูดของรูปคลื่นไซน์

จากสมการที่ (3.1) การบวกค่าฟังก์ชัน  $\sin ()$  ด้วย 128 เป็นการยกระดับอ้างอิงสัญญาณขึ้นมาไว้ที่ค่า 128 เนื่องจากสัญญาณรูปคลื่นไซน์มีทั้งค่าบวกและค่าลบ การทำในลักษณะนี้ จะทำให้การคำนวณค่าฟังก์ชันไม่มีค่าที่เป็นลบ เพราะไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณค่าลบออกมาไม่ได้ ส่วนการโปรแกรมให้เกิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกไฟฟ้าชั่วขณะได้ด้วยการเปลี่ยนค่า  $m_a$

ซึ่งถ้าค่า  $m_a = 1$  หมายถึงสัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ และถ้าค่า  $m_a = 0.8$  หมายถึงการเกิดสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 20% จากสมการข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟ จะได้กราฟสัญญาณรูปคลื่นไซน์ได้ดังรูปที่ 3.2-3.3 ซึ่งเกิดจากการคำนวณค่าฟังก์ชันฟังก์ชัน  $\sin ()$  ตามสมการที่ (3.1) ในแต่ละจุดบนกราฟในแกน X (180 จุด) แล้วจะได้ค่าแอมพลิจูดในแกน Y ทั้งหมด 180 โดยใช้โปรแกรม MATLAB แสดงตัวอย่างการคำนวณดังนี้

## ตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชัน $\sin()$

รูปคลื่นไซน์ปกติ

ถ้า  $P = 0, m_a = 1$  จะได้

$$\begin{aligned} y_0 &= 128 + 127(1) \sin\left(2(0) \times \frac{\pi}{180}\right) \\ &= 128 \end{aligned}$$

ถ้า  $P = 45, m_a = 1$  จะได้

$$\begin{aligned} y_{45} &= 128 + 127(1) \sin\left(2(45) \times \frac{\pi}{180}\right) \\ &= 255 \end{aligned}$$

ถ้า  $P = 90, m_a = 1$  จะได้

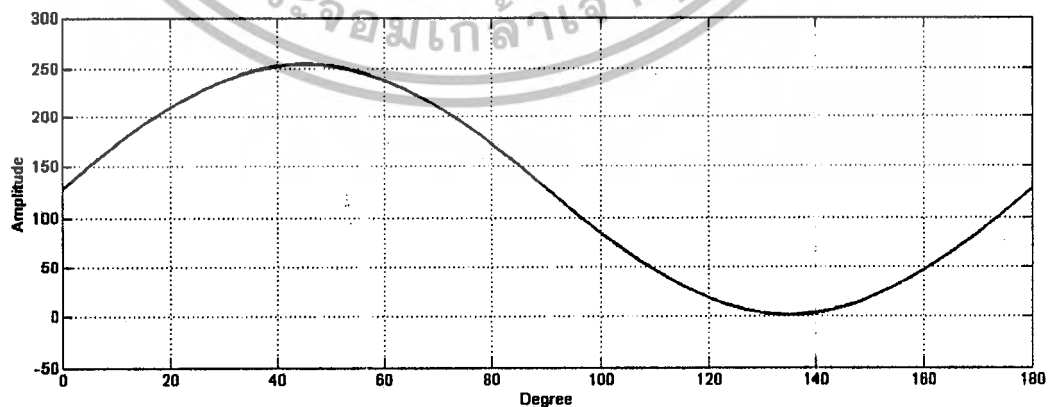
$$\begin{aligned} y_{90} &= 128 + 127(1) \sin\left(2(90) \times \frac{\pi}{180}\right) \\ &= 128 \end{aligned}$$

ถ้า  $P = 135, m_a = 1$  จะได้

$$\begin{aligned} y_{135} &= 128 + 127(1) \sin\left(2(135) \times \frac{\pi}{180}\right) \\ &= 1 \end{aligned}$$

ถ้า  $P = 180, m_a = 1$  จะได้

$$\begin{aligned} y_{180} &= 128 + 127(1) \sin\left(2(180) \times \frac{\pi}{180}\right) \\ &= 128 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.2 สัญญาณที่สร้างได้จากสมการที่ (3.1)  $m_a = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชัน $\sin ()$ ต่อ

รูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (ที่ 20%)

ถ้า  $P = 0$ ,  $m_a = 0.8$  จะได้

$$\begin{aligned} Y_0 &= 128 + 127(0.8) \sin \left( 2(0) \times \frac{\pi}{180} \right) \\ &= 128 \end{aligned}$$

ถ้า  $P = 45$ ,  $m_a = 0.8$  จะได้

$$\begin{aligned} Y_{45} &= 128 + 127(0.8) \sin \left( 2(45) \times \frac{\pi}{180} \right) \\ &= 230.4 \end{aligned}$$

ถ้า  $P = 90$ ,  $m_a = 0.8$  จะได้

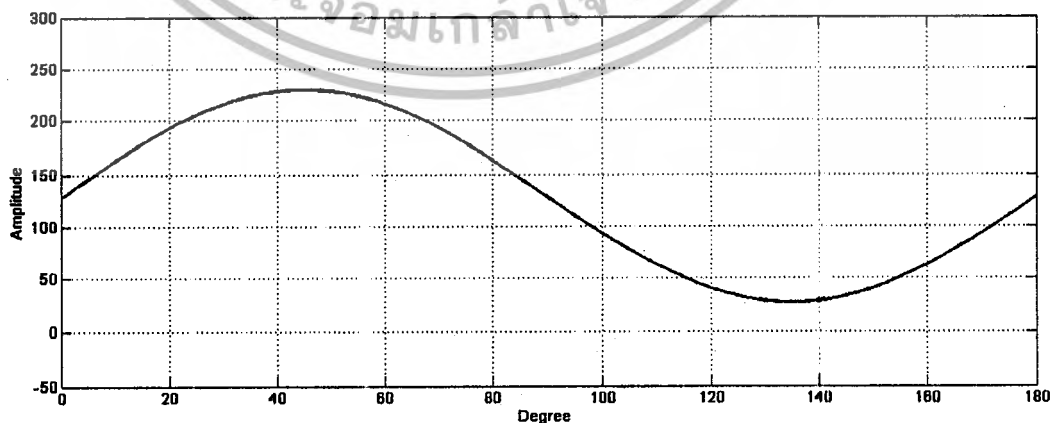
$$\begin{aligned} Y_{90} &= 128 + 127(0.8) \sin \left( 2(90) \times \frac{\pi}{180} \right) \\ &= 128 \end{aligned}$$

ถ้า  $P = 135$ ,  $m_a = 0.8$  จะได้

$$\begin{aligned} Y_{135} &= 128 + 127(0.8) \sin \left( 2(135) \times \frac{\pi}{180} \right) \\ &= 25.6 \end{aligned}$$

ถ้า  $P = 180$ ,  $m_a = 0.8$  จะได้

$$\begin{aligned} Y_{180} &= 128 + 127(0.8) \sin \left( 2(180) \times \frac{\pi}{180} \right) \\ &= 128 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.3 สัญญาณที่สร้างได้จากสมการที่ (3.1)  $m_a = 0.8$

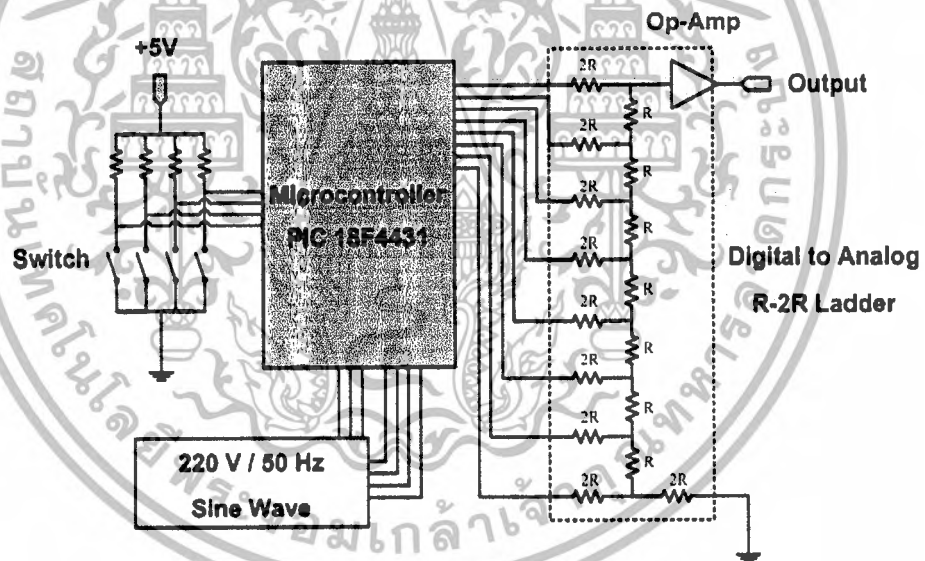
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1.2 การออกแบบวงจร

วงจรที่ใช้สำหรับสร้างสัญญาณ ดังรูปที่ 3.4 ในการออกแบบจะใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ชนิด PIC18F4431 สำหรับการคำนวณการกำเนิดสัญญาณ ส่งสัญญาณที่คำนวณได้ออกพอร์ตซี (Port C) ผ่านวงจรแปลงผันสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 8 บิต ต่อแบบ R-2R Ladder

ควบคุมการทำงานของโปรแกรม เช่น การ Start/Stop การทำงานหรือสั่งงาน โปรแกรมให้เกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะที่ 10% และ 20% จาก Push button switch ต่อแบบการทำงานเป็นศูนย์ (Active low) สั่งการทำงานโดยใช้พอร์ตเอ (Port A)

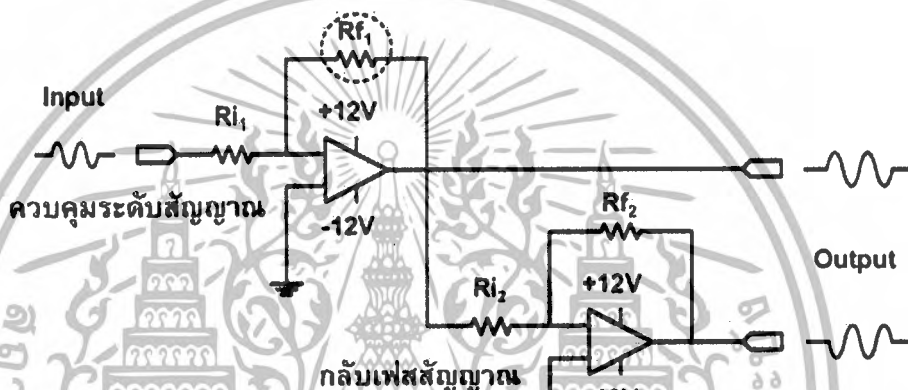
การแสดงผลสถานะทำงานของวงจรผ่านจอแสดงผล LCD ขนาด 16×2 โดยการเขียนโปรแกรมแสดงผลออกพอร์ตบี (Port B) ส่งข้อมูลแบบ 4 บิต โดยใช้ฟังก์ชัน LCD.C ในคอมไพเลอร์



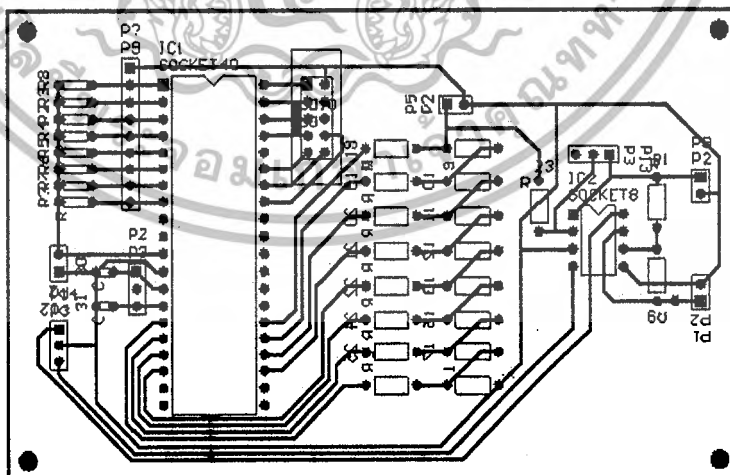
รูปที่ 3.4 วงจรกำเนิดสัญญาณ

### 3.3.1.3 วงจรควบคุมระดับแรงดันและกลับเฟสสัญญาณ

การออกแบบจะใช้ออปแอมป์ (Op-Amp) เบอร์ TL072 ทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันของสัญญาณและกลับเฟสของสัญญาณจากไมโครคอนโทรเลอร์ ทำให้ได้สัญญาณต้นแบบ 2 สัญญาณ กลับเฟสกัน 180 องศา ดังรูปที่ 3.5 เป็นการต่อในลักษณะขยายแบบกลับเฟสสัญญาณ (Inverting amplifier) 2 วงจร อัตราขยายของวงจร คือ  $(R_f / R_i)$  ซึ่งการควบคุมระดับแรงดันสัญญาณทำได้โดยการปรับค่า  $(R_{f1})$  ซึ่งใช้เป็นตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ สามารถควบคุมระดับแรงดันได้ในช่วง 0-2.4V ใช้ไฟเลี้ยงวงจร +/-12VDC

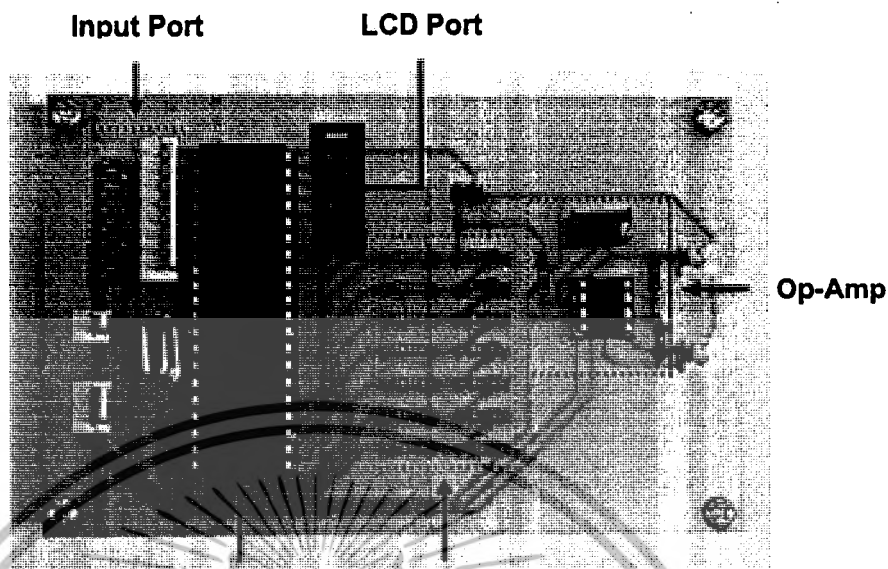


รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมระดับแรงดันและกลับเฟสสัญญาณ



รูปที่ 3.6 ลายวงจรกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 วงจรกำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้น

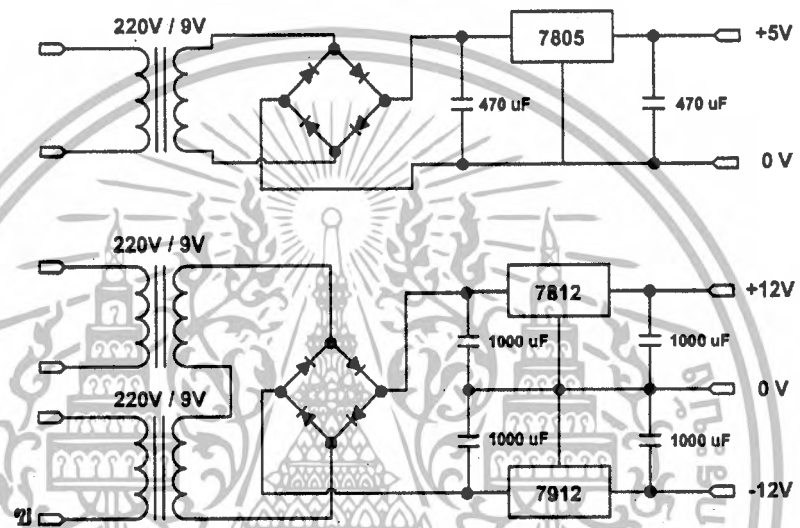


รูปที่ 3.8 ปุ่มควบคุมการทำงานและจอแสดงผล LCD

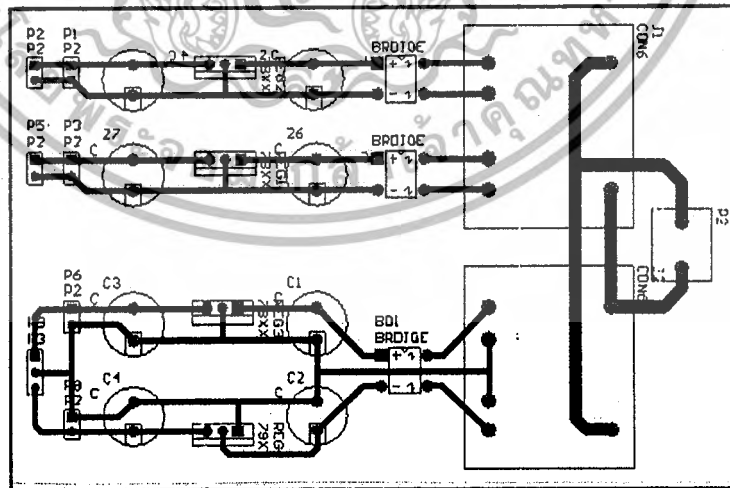
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.3.1.4 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง +5V, +/-15V**

วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง รูปที่ 3.9 ประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าอัตราส่วน Ratio 220V/9V เรียงกระแสด้วยวงจรบริดจ์ไดโอดเบอร์ DB104G ฟิลเตอร์ด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาด 470uF/16V ผ่านไอซีเบอร์ 7805 จะได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์เท่ากับ +5V และ 1000uF / 25V ผ่านไอซีเบอร์ 7812 / 7912 จะได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรอปแอมป์เท่ากับ +/-12V

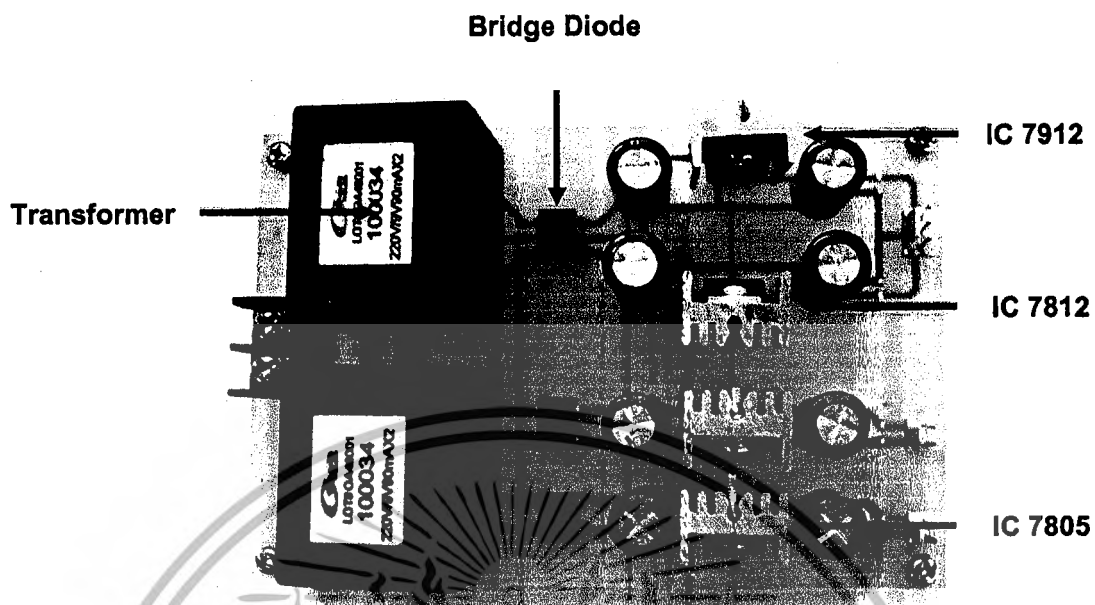


รูปที่ 3.9 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 3.10 ลายวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณที่สร้างขึ้น

### 3.3.1.4 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณ

ผลการทดสอบเบื้องต้นของวงจรกำเนิดสัญญาณ รูปที่ 3.12 จะได้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติที่มีแรงดันเท่ากับ  $1.45V_p$  ( $1V_{rms}$ ) ความถี่ประมาณ 50.3 Hz



รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 ส่วนการขยายสัญญาณ

การขยายสัญญาณ เป็นการเพิ่มขนาดของสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้มีขนาดพิกัดกำลังที่สูงขึ้นด้วยการดึงกำลังไฟฟ้าจากวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในการ ออกแบบจะใช้วงจรขยายแบบเชิงเส้นคลาสเอบีเพราะมีคุณภาพของสัญญาณที่ดี กล่าวคือมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้านขาออก (Output) ต่อสัญญาณด้านขาเข้า (Input) น้อยมากและมี ประสิทธิภาพสูงถึง 78.5% ตามทฤษฎี

โดยในการออกแบบกำหนดให้เครื่องต้นแบบมีพิกัดกำลังสูงสุด 3 kW ที่แรงดัน 311 V<sub>p</sub> (220V<sub>rms</sub>) จะใช้วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบีจำนวน 2 วงจร ทำการขับสัญญาณแรงดัน 2 สัญญาณที่กลับเฟสกัน 180 องศา จากส่วนการกำเนิดสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ขยาย แรงดันได้สูงถึง 311 V<sub>p</sub> (220V<sub>rms</sub>) และทำให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคร่อมแต่ละวงจรไม่สูงมาก นัก วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี ดังรูปที่ 3.13 แบ่งการทำงานออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

1. ส่วนการขับสัญญาณ (Drive)
2. ส่วนการขับสัญญาณสูงยิ่ง (Super drive)
3. ส่วนการขยายกำลัง (Power output)
4. ส่วนการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)

#### 3.3.2.1 ส่วนการขับสัญญาณ (Drive Board)

วงจรขับสัญญาณ รูปที่ 3.14 - 3.16 ทำหน้าที่ค่อยๆ ขยายสัญญาณต้นแบบที่มี ขนาดเล็กมากให้มีขนาดใหญ่ขึ้นตามภาคส่วนต่างๆ เพื่อใช้เป็นสัญญาณขับขาเบสให้ ทรานซิสเตอร์ในวงจรขับสัญญาณสูงยิ่งต่อไป มีส่วนประกอบและหลักการทำงานของแต่ละส่วน ดังนี้

- ภาคสัญญาณขาเข้า ใช้วงจร Low pass filter ทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวน (noise) ที่มีความถี่สูงๆ ที่ปะปนมากับสัญญาณต้นแบบลงกราวด์
- ภาคขยายแรงดัน ด้วยวงจรขยายความแตกต่าง (Differential amplifier) ใช้ ทรานซิสเตอร์ที่เข้าคู่ NPN-PNP (MPSA42 และ MPSA92) ทำหน้าที่ขยาย สัญญาณแรงดันให้เพิ่มสูงขึ้น โดยอัตราขยายแรงดันของวงจรมี คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานที่ขาคอลเล็กเตอร์ต่อค่าความต้านทานที่ ขาเอมิเตอร์ ( $R_C/R_E$ ) ของคู่ทรานซิสเตอร์ แล้วส่งต่อไปยังวงจรปริไดร์ (Pre-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Drive) เพื่อขยายและรักษาระดับสัญญาณแรงดันจากวงจรขยายความแตกต่าง ก่อนป้อนให้กับภาคขยายกระแส (Drive)

- ภาคขยายกระแส ใช้ทรานซิสเตอร์ที่เข้าคู่ NPN-PNP (MJE340 และ MJE350) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณกระแสต้นแบบให้สูงขึ้น เพื่อสามารถขับทรานซิสเตอร์ในวงจรกำลังที่ต่อขนานกันหลายๆคู่ได้ โดยมีซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) ทำการสร้างแรงดันอ้างอิงให้แรงไฟไบอัสทรานซิสเตอร์ในภาคขยายกำลัง เพื่อให้ได้อัตราขยายกระแสสูง อาจใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวต่อกันแบบดาสิงตัน (Darlington) อัตราขยายกระแสมีค่าเท่ากับ อัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวคูณกัน
- ภาคการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) ทำหน้าที่กำหนดอัตราขยายรวมของวงจรทั้งหมด
- ภาคการควบคุม ใช้การไบอัสทรานซิสเตอร์คลาสเอบี แบบ  $V_{BE}$  Multiplier เป็นตัวควบคุมการไบอัสให้กับวงจรขยายกระแสทั้งหมดประกอบด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ เพื่อปรับค่าแรงไฟไบอัส ( $R=47\Omega$ ) ให้ทรานซิสเตอร์ในวงจรกำลัง (Power output) ทำงานในย่านคลาสเอบีและยังเป็นตัวปรับกระแสสงบของวงจร เมื่อไม่มีสัญญาณขาเข้า เพื่อเป็นการป้องกันทรานซิสเตอร์นำกระแสแล้วเกิดความร้อนสะสมจนเสียหายได้

### 3.3.2.2 ส่วนการขับสัญญาณสูงยิ่ง (Super Drive)

วงจรขับสัญญาณสูงยิ่ง รูปที่ 3.17 - 3.18 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันและกระแสจากวงจรขับสัญญาณให้สูงขึ้นไปอีก เพื่อรองรับการไบอัสทรานซิสเตอร์ที่ต่อขนานกันหลายๆ คู่ในวงจรขยายกำลัง โดยใช้ทรานซิสเตอร์ ชนิด NPN เบอร์ 2SC5200 และ PNP เบอร์ 2SA1943 เป็นตัวขับสัญญาณ

### 3.3.2.3 ส่วนการขยายกำลัง (Power Output)

วงจรการขยายกำลัง รูปที่ 3.19 - 3.20 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากส่วนการขับสัญญาณสูงยิ่ง ให้มีขนาดพิกัดกำลังสูงขึ้น เป็นภาคขยายภาคสุดท้ายของวงจร มีกระแสไหลผ่านมากที่สุด ในการออกแบบจึงต้องใช้ทรานซิสเตอร์ที่เข้าคู่ NPN-PNP (2SC5200 และ 2SA1943) ต่อขนานกันแบบ Class AB push pull complementary ซึ่งการต่อขนานทรานซิสเตอร์หลายๆคู่แบบนี้สามารถรองรับการไบอัสกระแสสูงๆได้

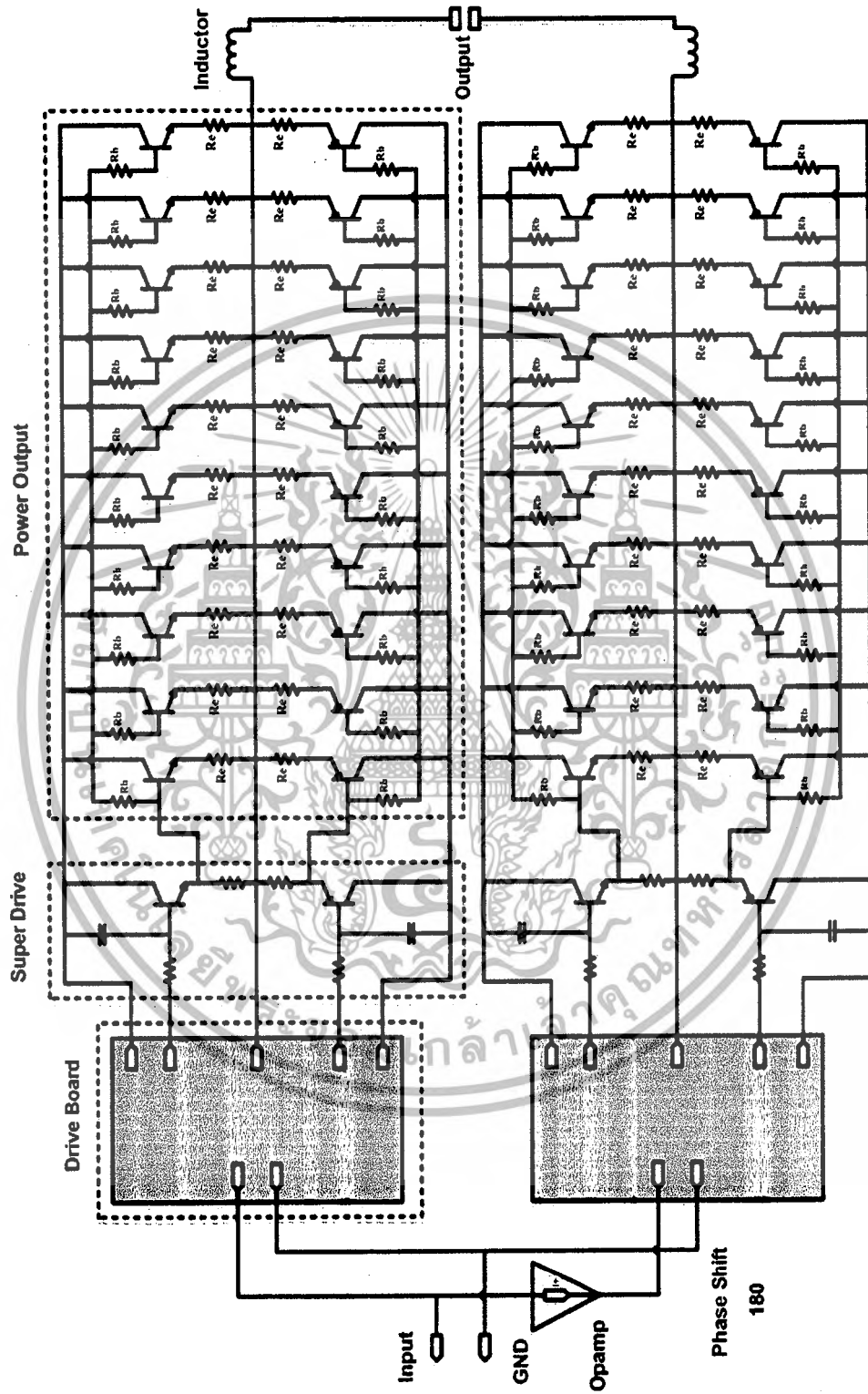
### 3.3.2.4 ภาคการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply 3 KVA)

วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง รูปที่ 3.21 - 3.22 จะได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ  $\pm 155\text{Vdc}$ ,  $\pm 170\text{Vdc}$ ,  $\pm 185\text{Vdc}$ ,  $\pm 200\text{Vdc}$   $\pm 215\text{Vdc}$  เป็นแรงดันไปเลี้ยงให้กับวงจรขยาย มีส่วนประกอบดังนี้

- หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัด 3kVA มีอัตราส่วน Ratio 220V / (110 0 110) V, (120 0 120) V, (130 0 130) V, (140 0 140) V, (150 0 150) V เพื่อสามารถปรับเปลี่ยนระดับแรงดันไฟเลี้ยงวงจรได้
- วงจรเรียงกระแส (Bridge rectifier) ขนาดพิกัด 400V / 50 A
- ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาด 10,000 $\mu\text{F}$  / 450V จำนวน 4 ตัว ทำหน้าที่ฟิลเตอร์ คือ ป้องกันการกระเพื่อมของสัญญาณแรงดัน (Ripple) ทำให้แรงดันที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบ
- ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ขนาด 5mH จำนวน 2 ตัว โดยเลือกใช้แกนชนิดเทอร์รอยด์และใช้ลวดทองแดงเบอร์ 17 ทำหน้าที่ป้องกันกระแสกระชากขณะเปิดเครื่อง (ช่วงการ Charge Capacitor) และทำหน้าที่หน่วงกระแสขณะขั้วโหลดป้องกันไม่ให้กระแสเปลี่ยนแปลงในทันทีทันใดเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

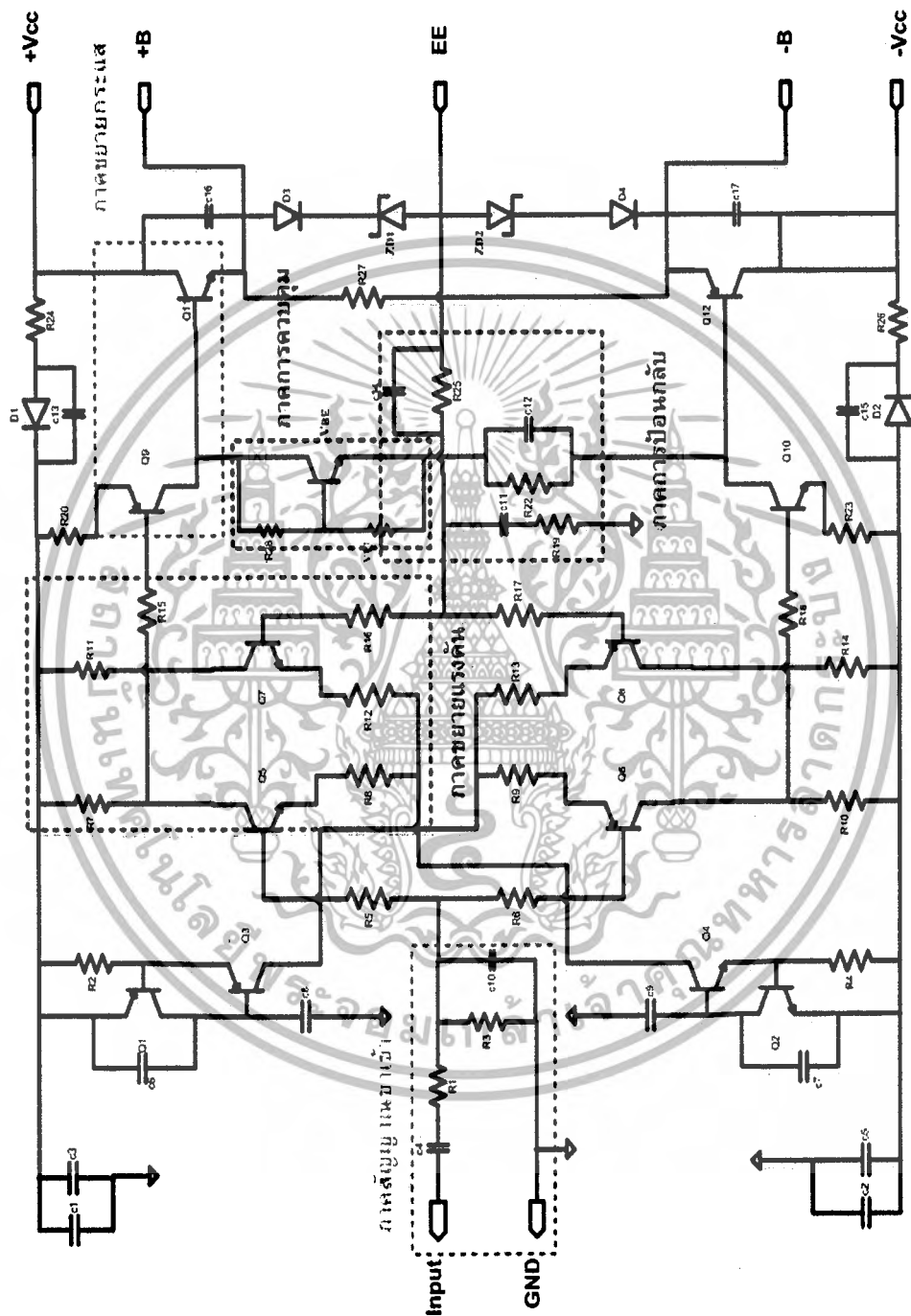
### 3.3.2.5 การทดสอบวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี

ทำการทดสอบวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี รูปที่ 3.23 จะเห็นได้ว่า ได้แรงดันปกติที่  $311\text{V}_p$  ( $220\text{V}_{\text{rms}}$ ) โดยสัญญาณที่ผ่ายวงจรขยายนั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับสัญญาณที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณและรูปที่ 3.24 เป็นภาพรวมของเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ที้ออกแบบและสร้างขึ้น



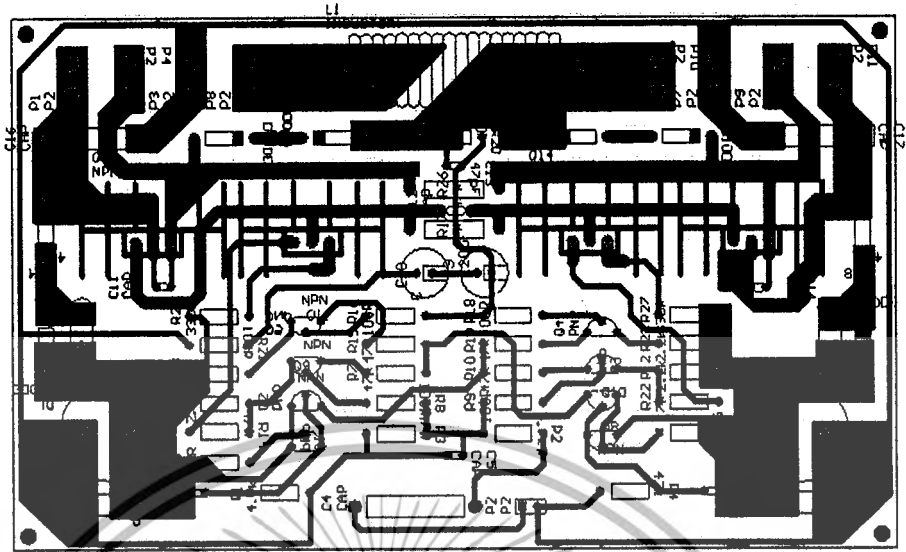
รูปที่ 3.13 วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี ขนาดพิกัด 3kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

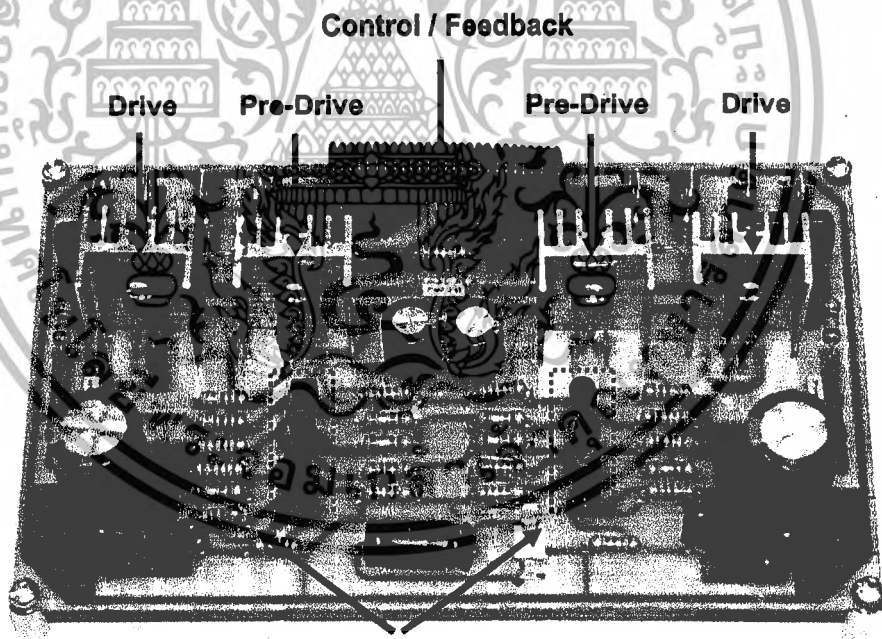


รูปที่ 3.14 วงจรส่วนการขับสัญญาณ (Drive)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



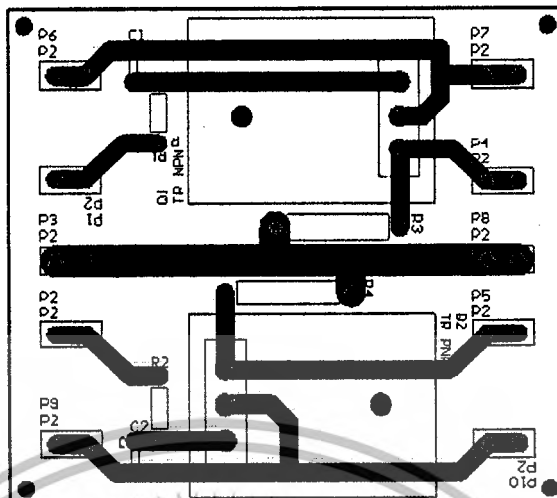
รูปที่ 3.15 ลายวงจรส่วนการขับสัญญาณ (Drive)



Differential Amplifier

รูปที่ 3.16 วงจรส่วนการขับสัญญาณ (Drive) ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

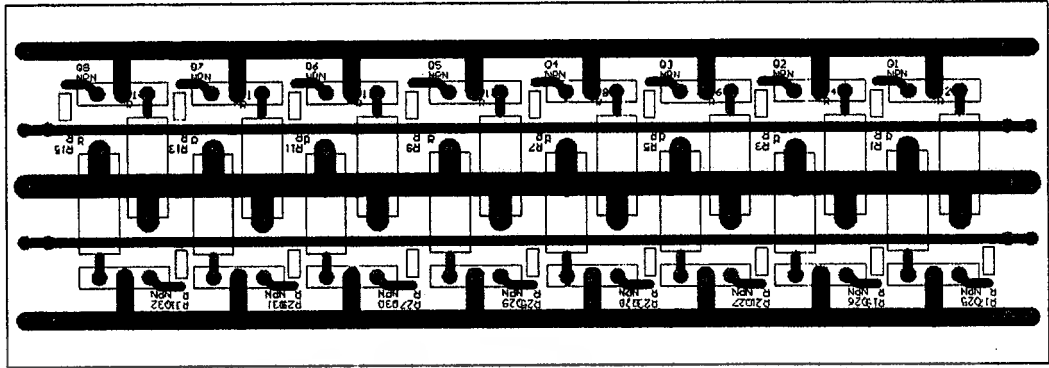


รูปที่ 3.17 ลายวงจรส่วนการขับสัญญาณสูงยิ่ง (Super drive)

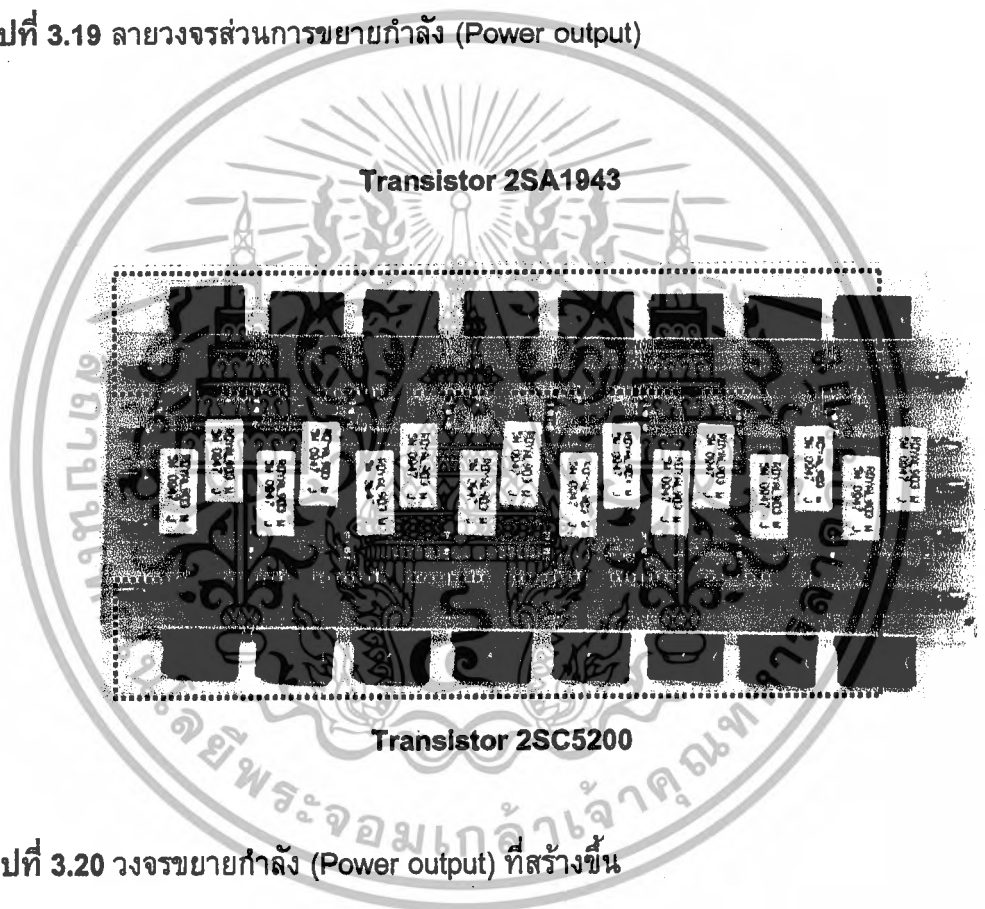


รูปที่ 3.18 วงจรส่วนการขับสัญญาณสูงยิ่ง (Super drive) ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

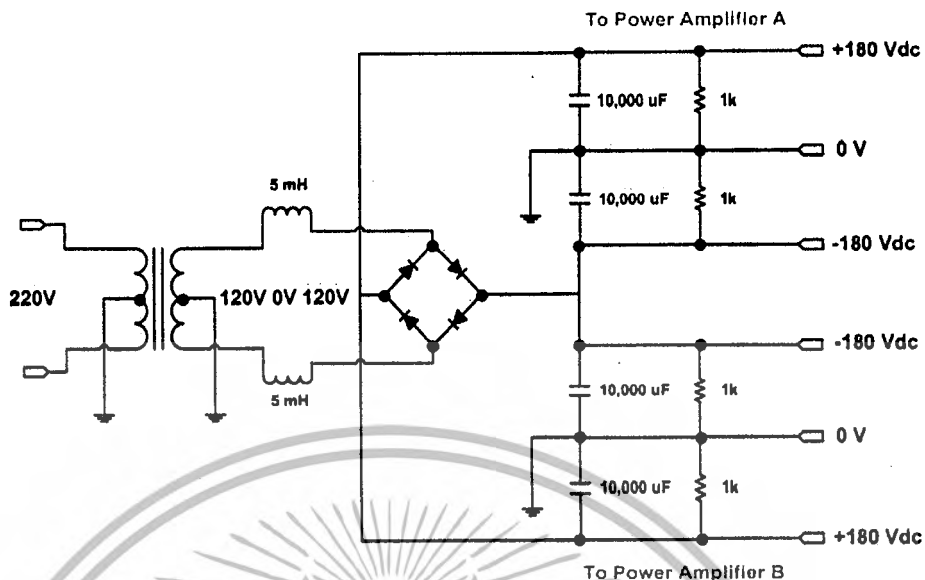


รูปที่ 3.19 ลายวงจรส่วนการขยายกำลัง (Power output)

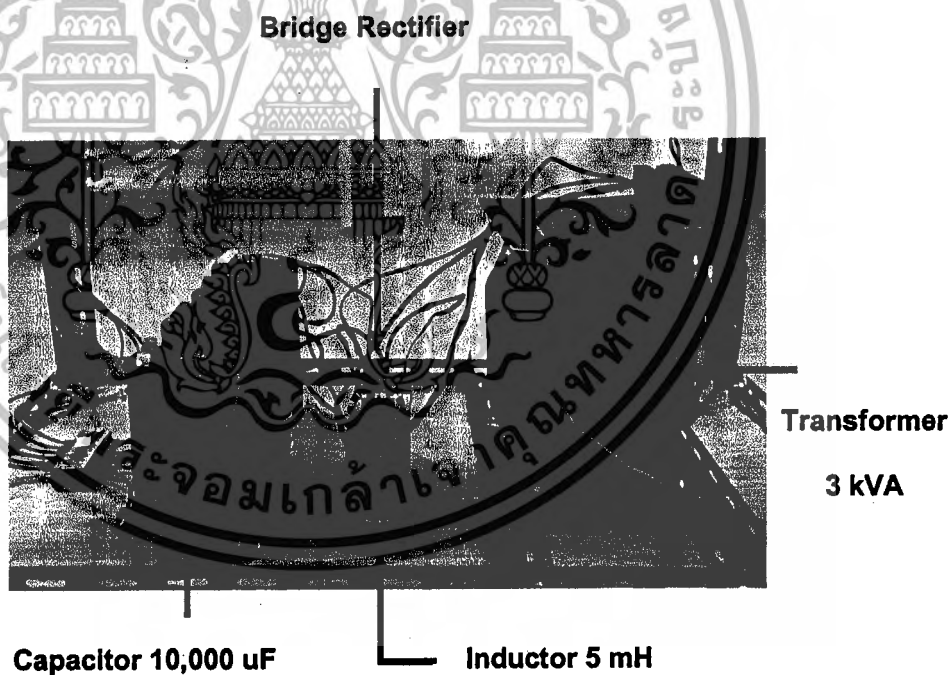


รูปที่ 3.20 วงจรขยายกำลัง (Power output) ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

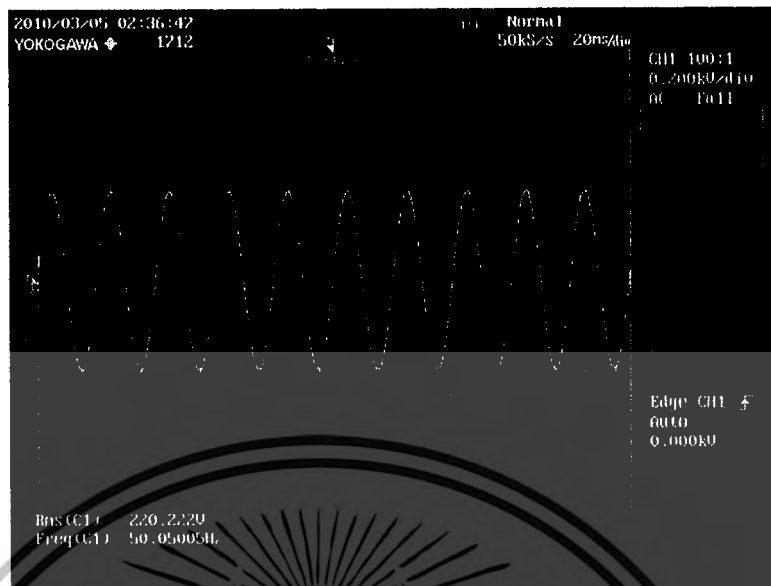


รูปที่ 3.21 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)

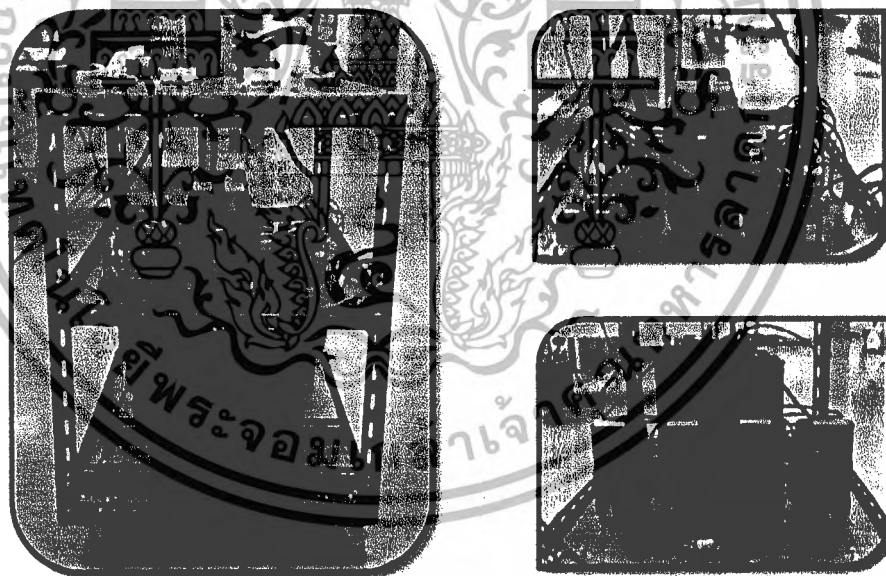


รูปที่ 3.22 วงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply 3kVA) ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณเชิงเส้นคลาสเอบี



รูปที่ 3.24 ภาพรวมเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ข้อควรระวัง

1. การต่อตัวเก็บประจุผิดขั้วจะทำให้เกิดความเสียหายและเกิดอันตราย
2. เนื่องจากตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ จะเกิดกระแสกระชากขึ้นขณะชาร์จประจุ จำเป็นต้องมีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่ป้องกัน
3. การเลือกใช้อุปกรณ์ ต้องไม่เกินค่าพิกัดที่กำหนด
4. เชื่อมต่อวงจรแต่ละภาคส่วนให้ถูกต้องและจุดเชื่อมต่อต้องแน่นหนา

### 3.5 ข้อแนะนำ

1. ควรมีอุปกรณ์ในการป้องกันการลัดวงจร (Short Circuit) และการป้องกันกระแสเกิน (Over Current) ด้วยการใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ที่มีคุณภาพและได้มาตรฐาน โดยติดตั้งในจุดเชื่อมต่อต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Voltage input) แรงดันไฟฟ้าขาออก (Voltage output) และแรงดันไฟเลี้ยงวงจร (DC Link)
2. ควรมีมิเตอร์ (Meter) แสดงผลค่าแรงดันและกระแส เมื่อผ่านจุดเชื่อมต่อต่างๆ เช่นเดียวกับการติดตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์

### 3.6 บทสรุป

การออกแบบและสร้างเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ต้นแบบ จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณและใช้วงจรขยายเชิงเส้น คลาสเอบี (Class AB power amplifier) 2 วงจร เป็นตัวขยายสัญญาณ ซึ่งเครื่องต้นแบบนี้สามารถโปรแกรมให้สร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติและสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตก ชั่วขณะ (Voltage sag) ได้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

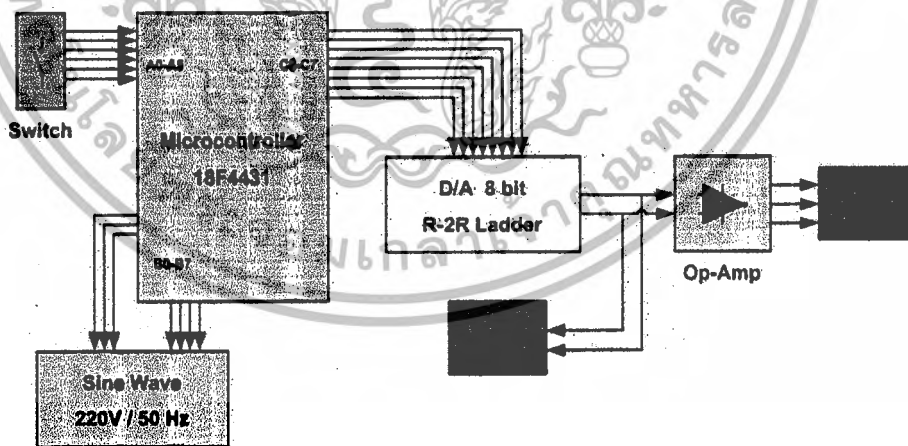
#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอใน 2 ส่วน คือ ผลการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจริง ของเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานต้นที่สร้างขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 เพื่อเป็นการยืนยันว่าหลักการถูกต้องตามทฤษฎี เป็นการสร้างความเชื่อมั่นว่าสามารถทำงานได้จริง ก่อนที่จะลงมือปฏิบัติสร้างชิ้นงานจริง อีกทั้งยังเป็นการนำเสนอผลการทดสอบชิ้นงานต้นแบบด้วยว่ามีประสิทธิภาพเป็นอย่างไร

#### 4.2 การจำลองวงจรในคอมพิวเตอร์

##### 4.2.1 การสร้างแบบจำลองส่วนการกำเนิดสัญญาณ

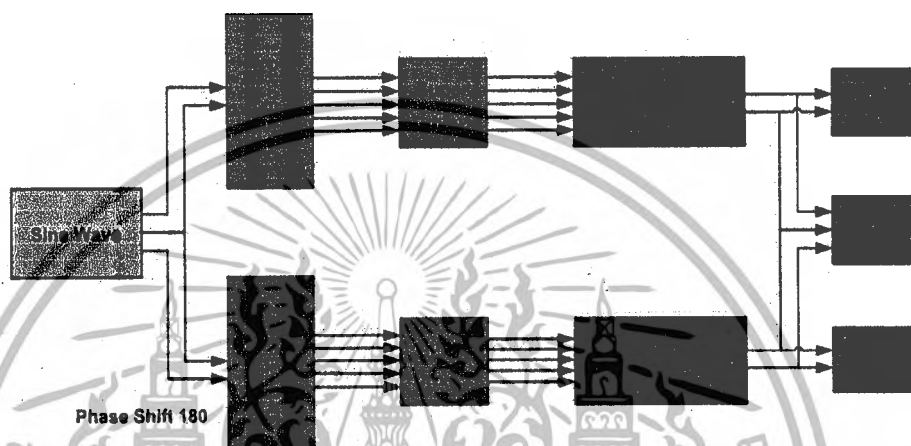
การสร้างแบบจำลองวงจรกำเนิดสัญญาณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ดังรูปที่ 4.1 จำลองการทำงานในโปรแกรม Proteus เพื่อวิเคราะห์การเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติและสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ



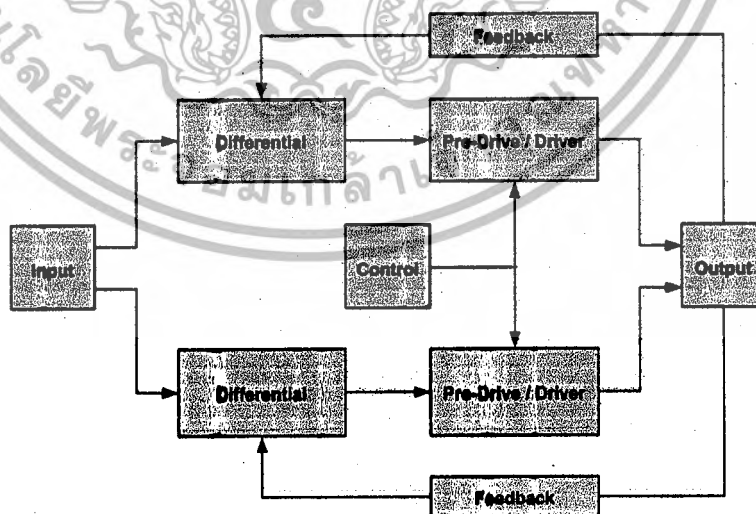
รูปที่ 4.1 แบบจำลองวงจรกำเนิดสัญญาณ

## 4.2.2 การสร้างแบบจำลองส่วนการขยายสัญญาณ

การสร้างแบบจำลองส่วนการขยายสัญญาณ ด้วยวงจรถยายเชิงเส้นคลาสเอบี (Class AB power amplifier) ดังรูปที่ 4.2 และวงจรถยายสัญญาณ ดังรูปที่ 4.3 ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อวิเคราะห์ผลของการขยายสัญญาณที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.2 แบบจำลองวงจรถยายสัญญาณ



รูปที่ 4.3 แบบจำลองวงจรถยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการจำลองวงจรในคอมพิวเตอร์

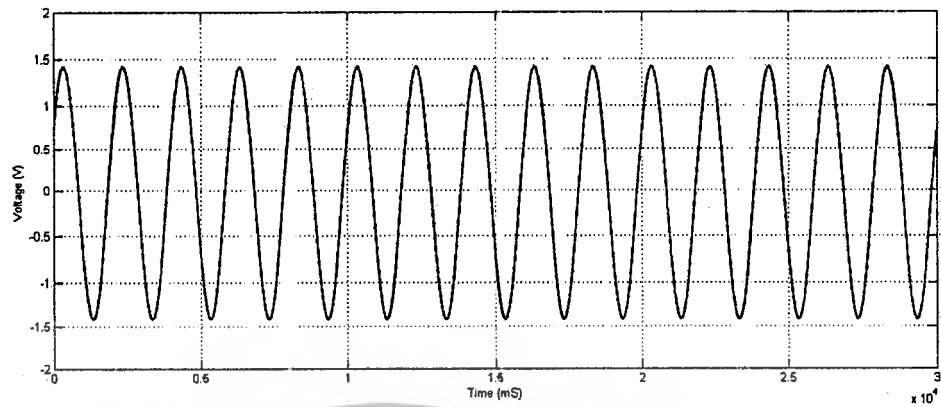
#### 4.3.1 ผลการจำลองส่วนการกำเนิดสัญญาณ

จากแบบจำลองวงจรถูกกำเนิดสัญญาณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ในหัวข้อที่ 4.2.1 รูปที่ 4.1 ได้ทำการทดสอบดังนี้

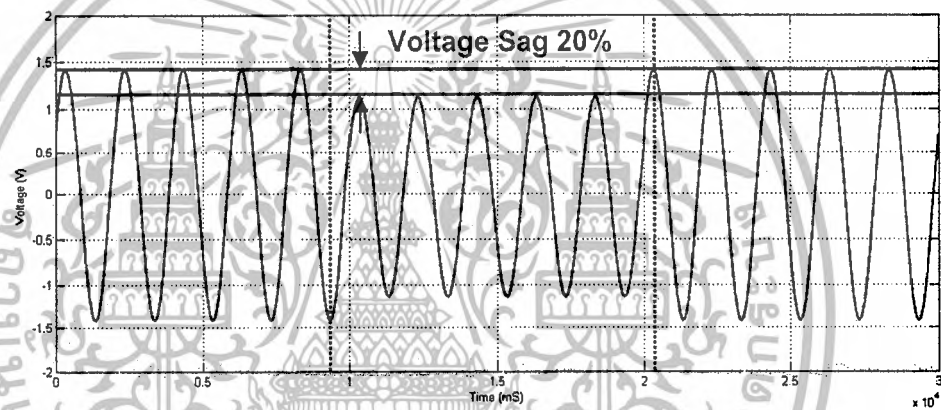
ทำการวัดสัญญาณจาก Scope 1 ในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าสัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติจากไมโครคอนโทรลเลอร์ มีแรงดันเท่ากับ  $1.45V_p$  ดังรูปที่ 4.4 และเมื่อทำการโปรแกรมให้สัญญาณเกิดแรงดันตกชั่วขณะ 20% สัญญาณจะมีแรงดันเท่ากับ  $1.15V_p$  ดังรูปที่ 4.5 ค่าของผลต่างของแรงดันประมาณ  $0.3V_p$  คิดเป็น 20% ของแรงดันปกติ

ทำการวัดสัญญาณจาก Scope 2 ในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณผ่านวงจรออปแอมป์ จะมีสัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ 2 สัญญาณกลับเฟสกันและมีแรงดันเท่ากับ  $1.45V_p$  ดังรูปที่ 4.6 เพื่อจ่ายให้กับวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี 2 วงจรที่ทำงานแบบกลับเฟสสัญญาณกัน

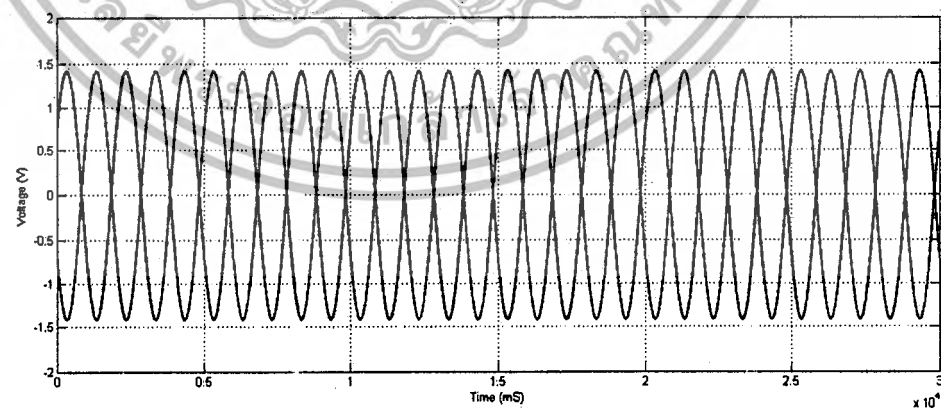




รูปที่ 4.4 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ จากไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.5 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ 20% จากไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.6 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อใช้ออปแอมป์กลับเฟสกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

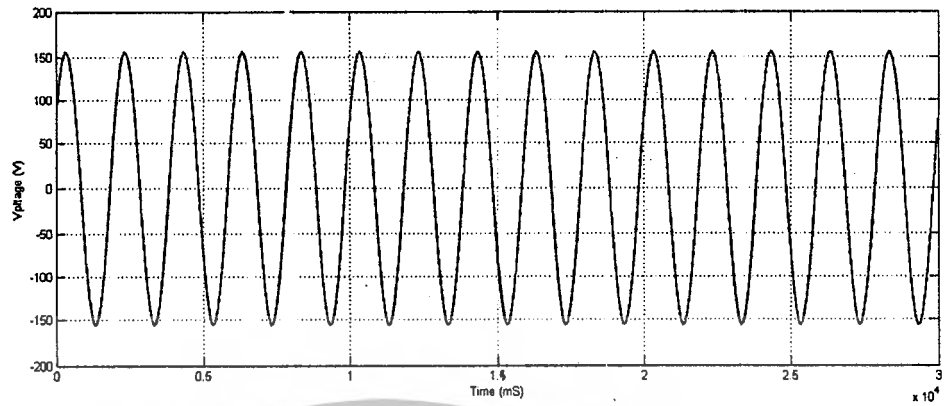
### 4.3.2 ผลการจำลองส่วนการขยายสัญญาณ

จากแบบจำลองวงจรขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี ในหัวข้อที่ 4.2.2 รูปที่ 4.2 - 4.3 ได้ทำการทดสอบดังนี้

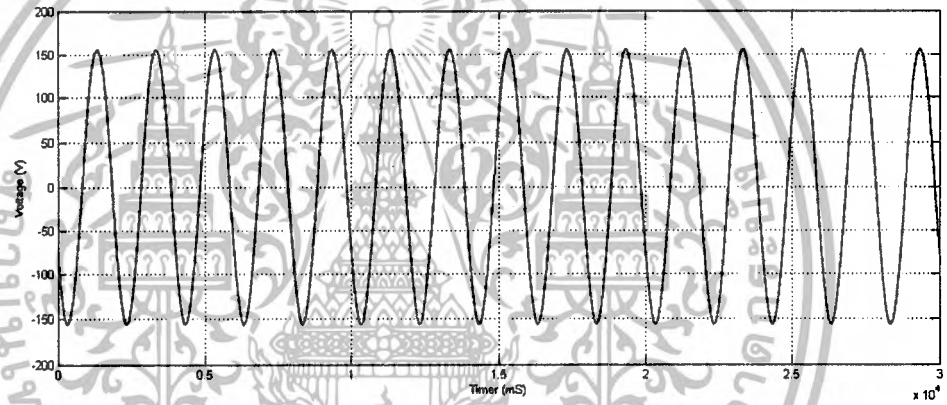
ทำการวัดสัญญาณจาก Scope 1 ในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำสัญญาณเฟสปกติจากวงจรกำเนิดสัญญาณมาผ่านวงจรขยายวงจรที่ 1 จะได้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติที่มีแรงดันเท่ากับ  $150V_p$  และมีเฟสสัญญาณปกติเช่นเดิม ดังรูปที่ 4.7

ทำการวัดสัญญาณจาก Scope 2 ในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา จากวงจรกำเนิดสัญญาณมาผ่านวงจรขยายวงจรที่ 2 จะได้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติที่มีแรงดันเท่ากับ  $150V_p$  และมีการเลื่อนเฟส 180 องศาเช่นเดิม ดังรูปที่ 4.8

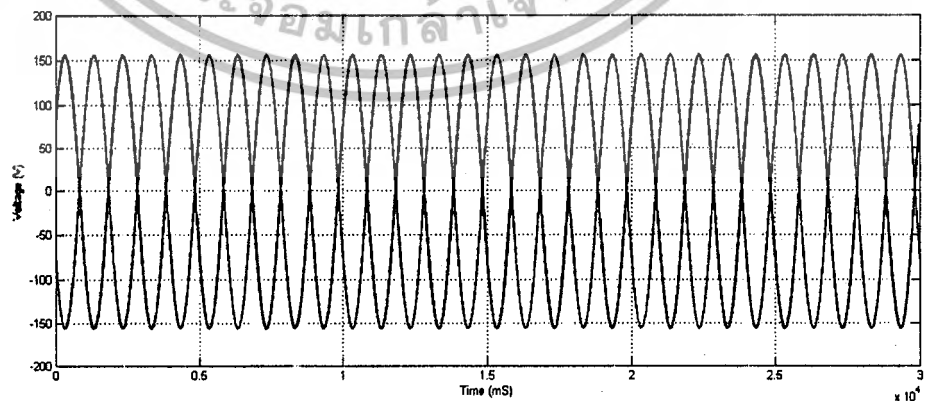
ทำการวัดสัญญาณจาก Scope 3 ในรูปที่ 4.2 วัดสัญญาณทั้ง 2 เปรียบเทียบกันได้ดังรูปที่ 4.9 และเมื่อสัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา 2 สัญญาณผ่านวงจรขยายแล้ววัดสัญญาณรวมกันจะมีแรงดันเท่ากับ  $311V_p$  ( $220V_{rms}$ ) ดังรูปที่ 4.10 และเมื่อทำการโปรแกรมให้เกิดเป็นสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะ 20% จากไมโครคอนโทรลเลอร์จะได้สัญญาณที่มีแรงดันเท่ากับ  $248 V_p$  ดังรูปที่ 4.11 ค่าแอมพลิจูดแรงดันได้เท่ากับ  $83V_p$  คิดเป็น 20% ของแรงดันปกติ



รูปที่ 4.7 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (วงจรที่ 1)

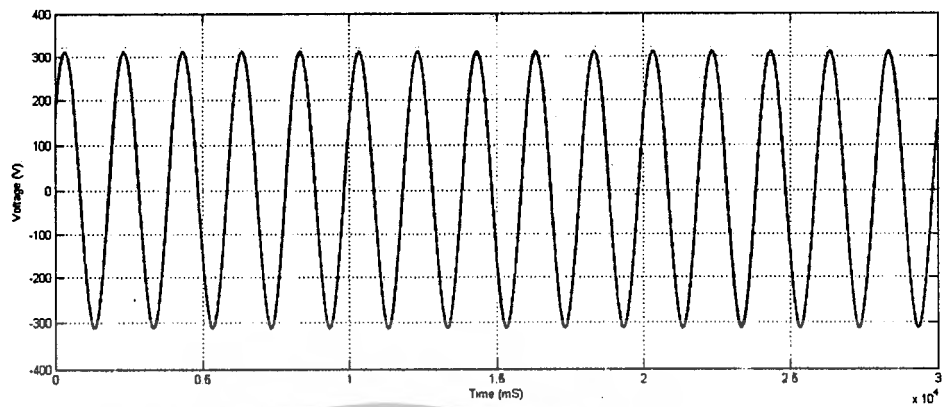


รูปที่ 4.8 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (วงจรที่ 2)

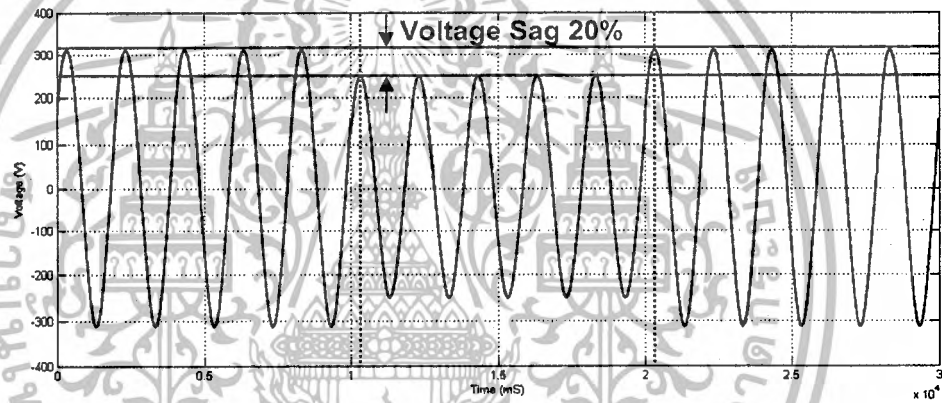


รูปที่ 4.9 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (2 วงจรรวมกัน)

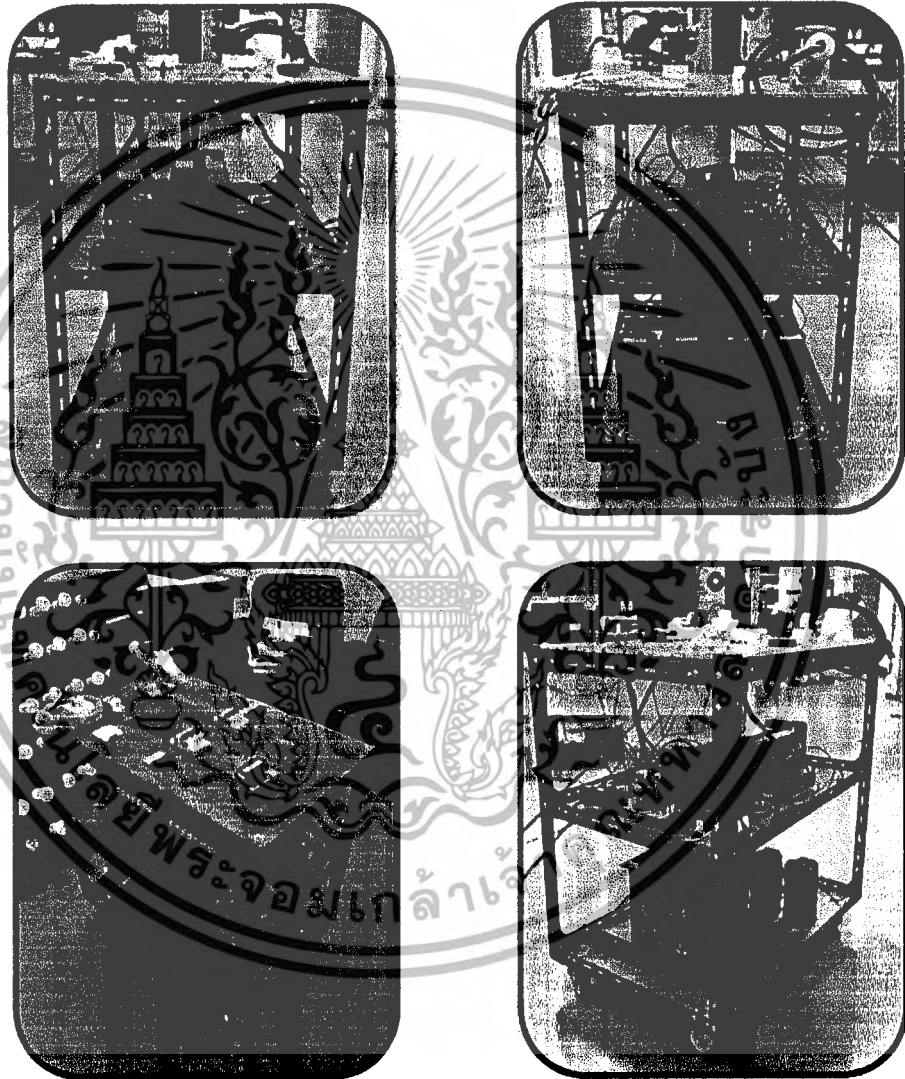


รูปที่ 4.11 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ 20% เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (2 วงจรรวมกัน)

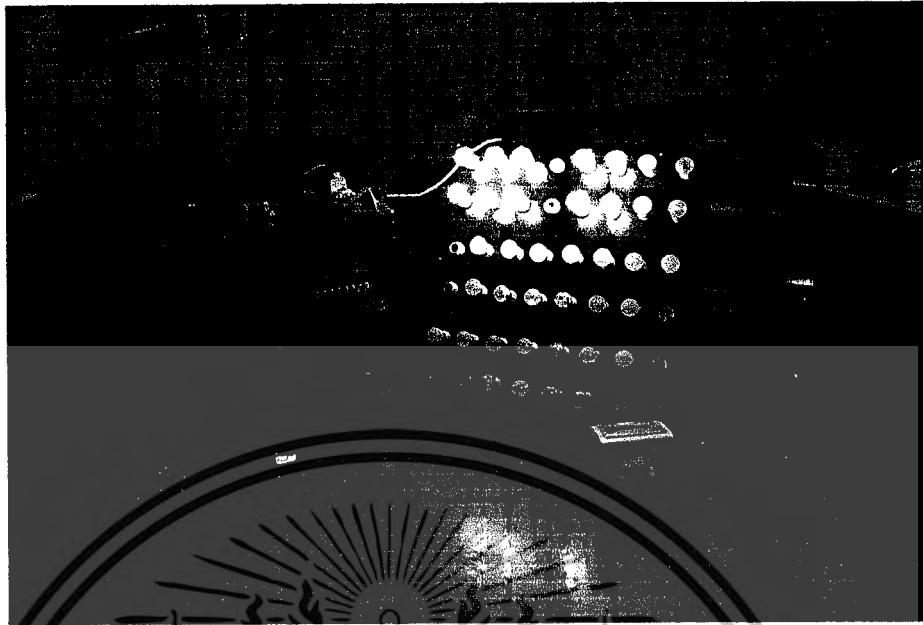
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการทดสอบชิ้นงานจริง

ประกอบชิ้นงานแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน ดังโครงพื้นฐานในบทที่ 3 รูปที่ 3.1 จะได้เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ต้นแบบ ดังรูปที่ 4.12 และทำการทดสอบการทำงานในส่วนต่างๆ และประสิทธิภาพของเครื่อง ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ที่สร้างขึ้น



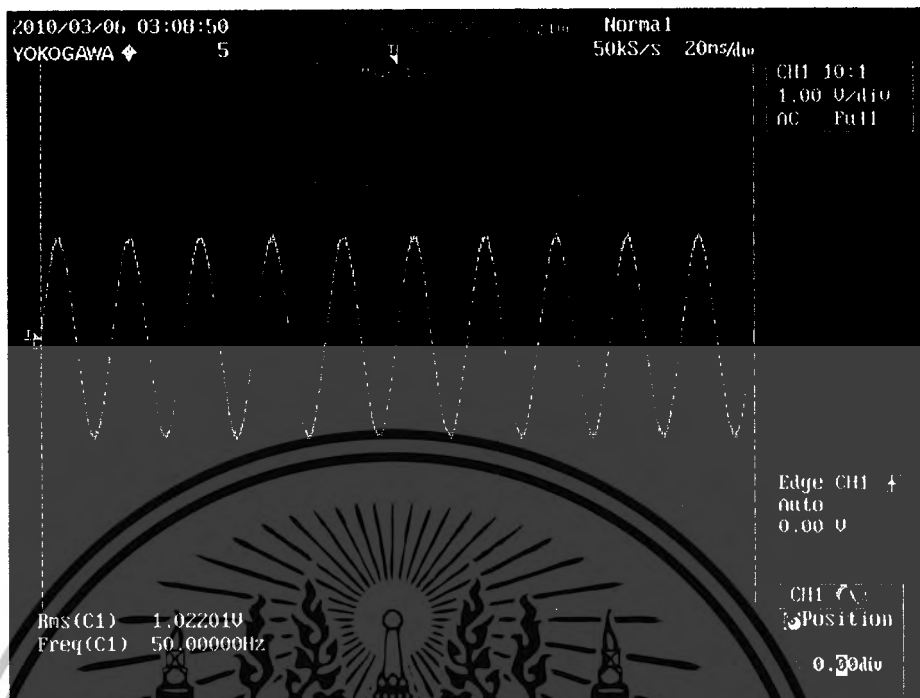
รูปที่ 4.13 การทดสอบเครื่องด้วยการชั้บภาระทางไฟฟ้า 1 kW

#### 4.4.1 การทดสอบส่วนการกำเนิดสัญญาณ

ทำทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติและสัญญาณที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะจากไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าสัญญาณมีแรงดันปกติ  $1.45V_p$  และเมื่อสัญญาณเกิดแรงดันตกชั่วขณะสัญญาณมีแรงดัน  $1.15V_p$  ดังรูปที่ 4.15 ผลต่างของแรงดันประมาณ  $0.3V_p$  คิดเป็น 20 % ของแรงดันปกติ

ทำการทดสอบวงจรออปแอมป์ จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณผ่านวงจรจะได้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ 2 สัญญาณที่มีการเลื่อนเฟสกัน 180 องศา มีแรงดันเท่ากับ  $1.45V_p$  ดังรูปที่ 4.16 เพื่อจ่ายให้กับวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี 2 วงจรที่ทำงานแบบชั้บสัญญาณกลับเฟสกัน

ทำการคำนวณค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเก็บข้อมูลผลการทดสอบจาก Oscilloscope มาทำการคำนวณในโปรแกรม MATLAB ได้ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไซน์ (Total Harmonic Distortion : THD<sub>v</sub>) ได้ 2.72% ดังรูปที่ 4.17

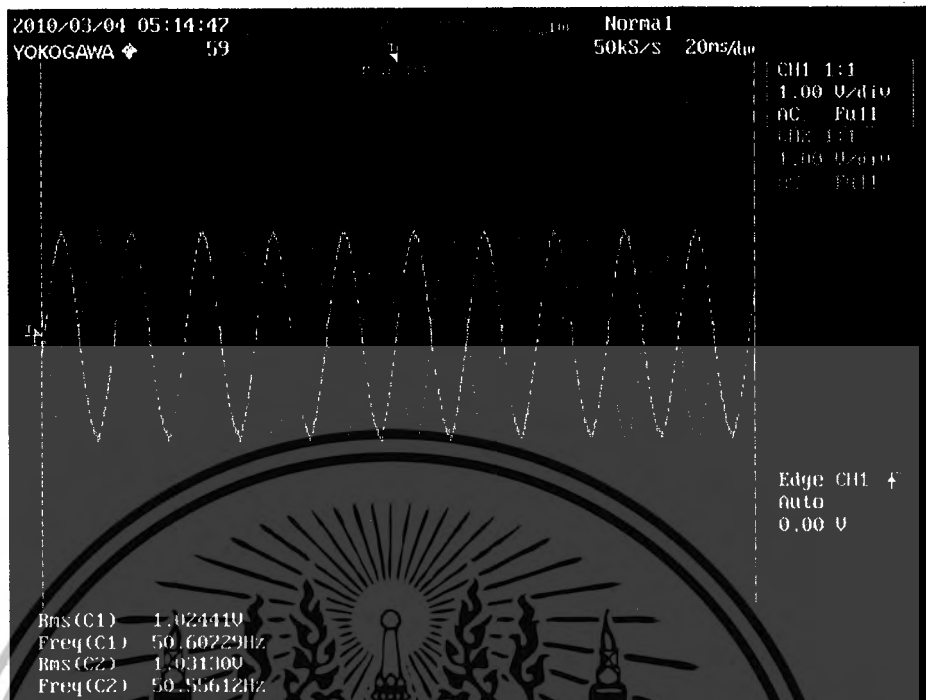


รูปที่ 4.14 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ จากไมโครคอนโทรลเลอร์

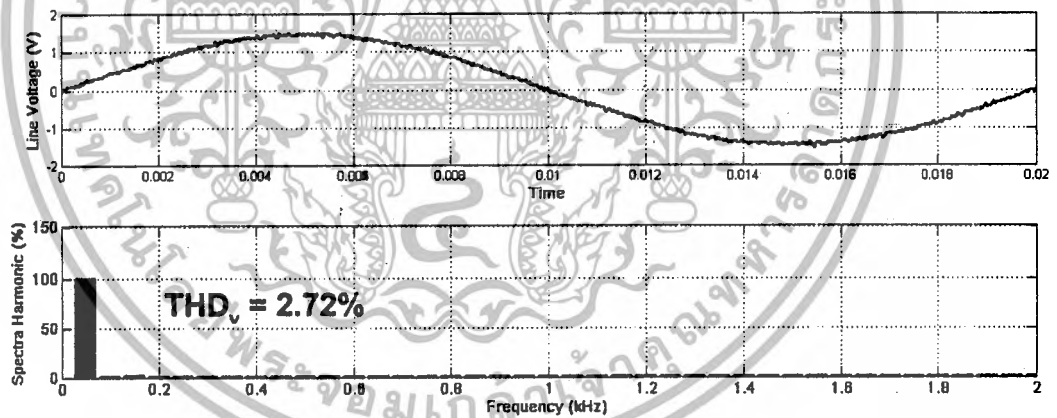


รูปที่ 4.15 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ 20% จากไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อใช้อุปกรณ์กลับเฟสกัน



รูปที่ 4.17 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไซน์ จากไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 การทดสอบส่วนการขยายสัญญาณ

ทำการทดสอบวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบีวงจรที่ 1 ใช้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณขาเข้า เมื่อผ่านวงจรขยายแล้วได้สัญญาณขาออกดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้มีลักษณะเหมือนกับสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่มีพิกัดแรงดันเพิ่มขึ้น คือ มีแรงดันปกติที่  $150V_p$

ทำการทดสอบวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบีวงจรที่ 2 ใช้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส 180 องศา ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณขาเข้า เมื่อผ่านวงจรขยายแล้วได้สัญญาณขาออกดังรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้มีลักษณะเหมือนกับสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ สัญญาณมีการเลื่อนเฟส 180 องศา แต่มีพิกัดแรงดันเพิ่มขึ้น คือ มีแรงดันปกติที่  $150V_p$

ทำการทดสอบวัดสัญญาณของวงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอบี 2 วงจรเทียบกันดังรูปที่ 4.20 และวัด 2 วงจรรวมกัน ดังรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่า สัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์มีแรงดันปกติที่  $311V_p$  ( $220V_{rms}$ ) และเมื่อทำการโปรแกรมให้เกิดเป็นสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะที่ 20% จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 4.22 จะได้สัญญาณที่มีแรงดันเท่ากับ  $248 V_p$  ค่าแอมพลิจูดต่างแรงดันได้เท่ากับ  $63V_p$  คิดเป็น 20% ของแรงดันปกติ

ทำการทดสอบเมื่อเครื่องขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW ดังรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าสัญญาณแรงดันตกลงจากปกติเหลือ  $216.62V_{rms}$  และได้สัญญาณกระแส 4.05A

ทำการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องขณะทำการขับภาระที่พิกัด 1 kW ตามสมการที่ 4.1 ได้ค่าประสิทธิภาพดังนี้

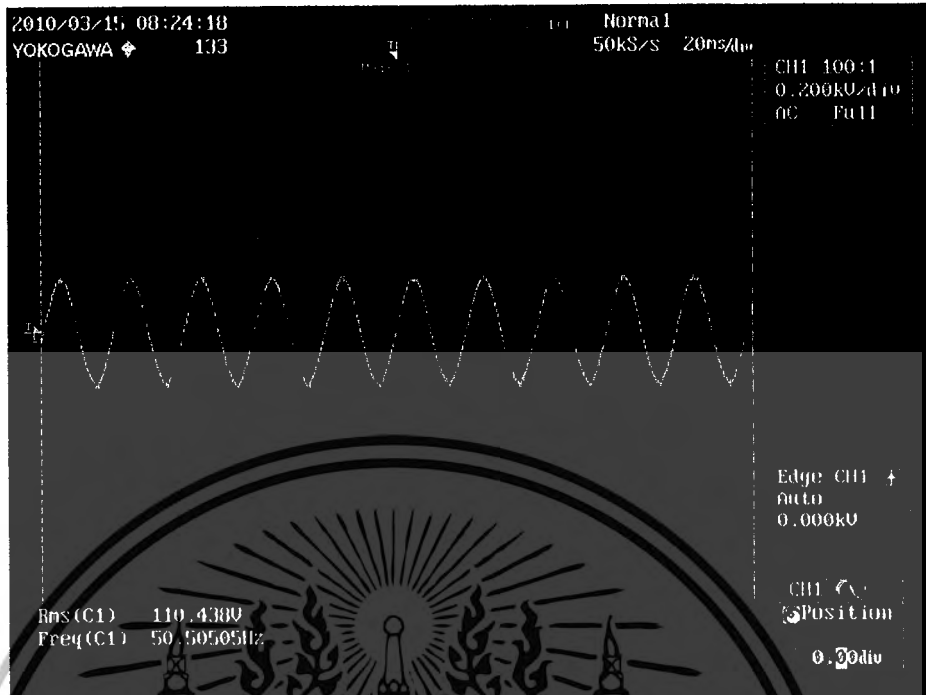
$$\begin{aligned}
 EFF &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% & (4.1) \\
 &= \frac{(216.62)(4.05)}{(240)(4.28)} \times 100\% \\
 &= 85.4\%
 \end{aligned}$$

ทำการคำนวณค่าความผิดเพี้ยนของเครื่องขณะทำการขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW โดยเก็บข้อมูลผลการทดสอบจาก Oscilloscope มาทำการคำนวณในโปรแกรม MATLAB ได้ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไซน์ (Total Harmonic Distortion: THD<sub>v</sub>) เท่ากับ 2.78% ดังรูปที่ 4.24 และได้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไซน์ (Total Harmonic Distortion: THD<sub>i</sub>) เท่ากับ 5.54% ดังรูปที่ 4.25

ทำการคำนวณค่า %Voltage Regulation ของเครื่องขณะขับภาระทางไฟฟ้า 1kW ตามสมการที่ 4.2 ได้ค่า %Voltage Regulation ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{\%Voltage Regulation} &= \frac{V(\text{no load}) - V(\text{full load})}{V(\text{no load})} \times 100 & (4.2) \\ &= \frac{220.22 - 216.622}{220.22} \times 100\% \\ &= 1.633\% \end{aligned}$$



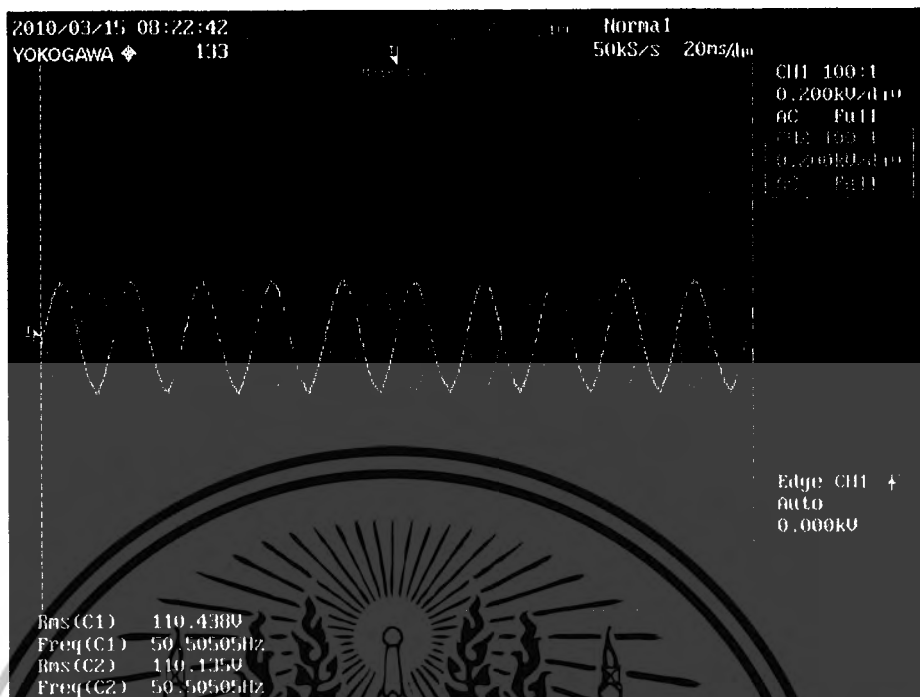


รูปที่ 4.18 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (วงจรที่ 1)



รูปที่ 4.19 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (วงจรที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

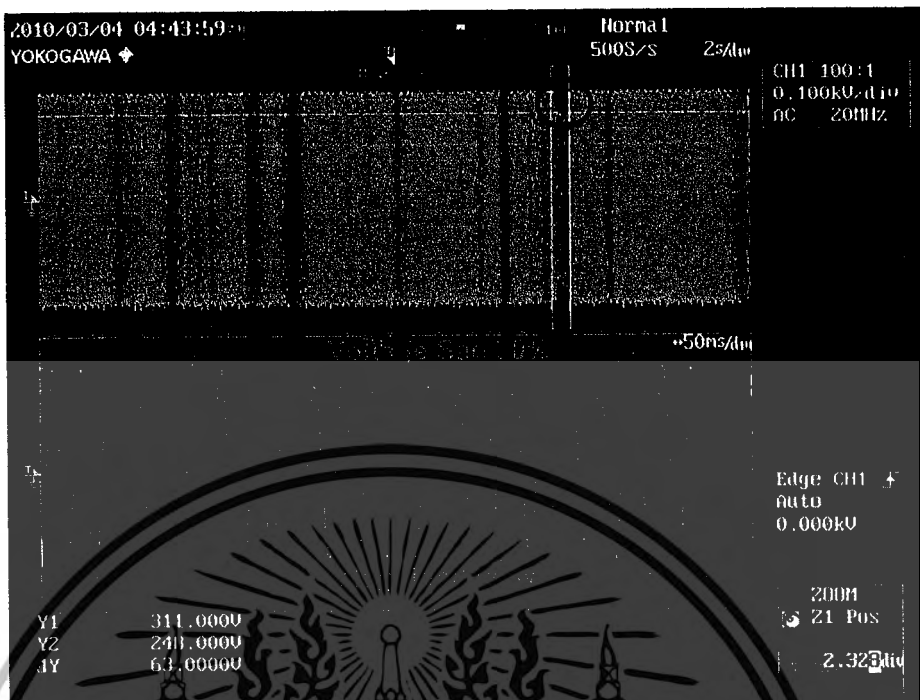


รูปที่ 4.20 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติที่กลับเฟสกัน เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ 2 วงจร

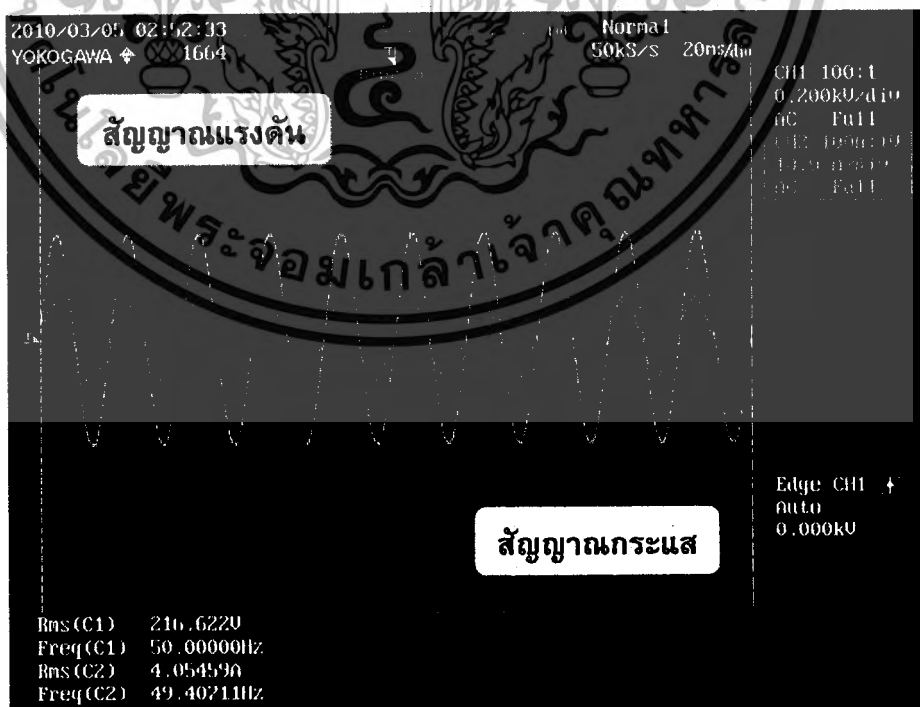


รูปที่ 4.21 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ปกติ เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (2 วงจรรวมกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

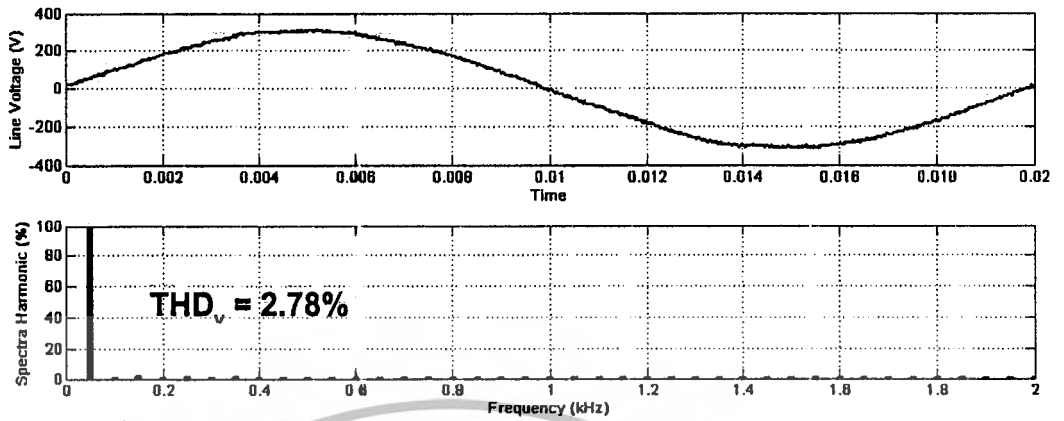


รูปที่ 4.22 สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ (ที่20%) เมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณ (2 วงจรรวมกัน)

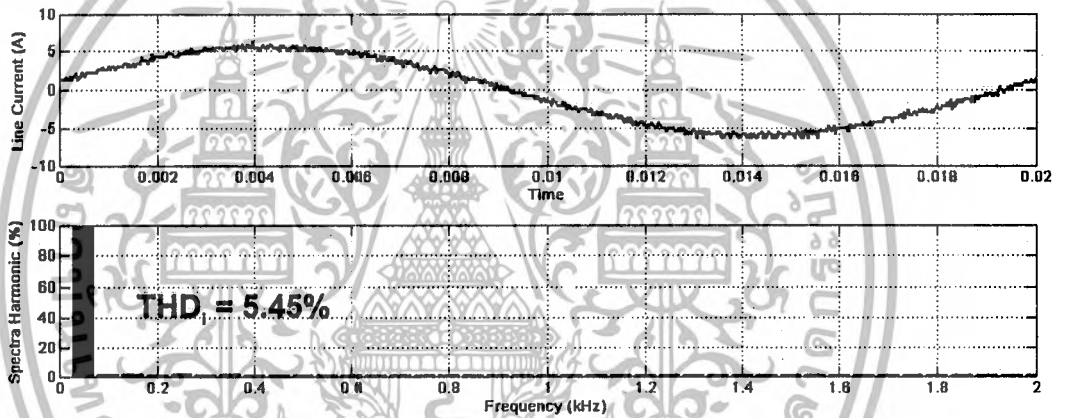


รูปที่ 4.23 สัญญาณแรงดันและกระแส ขณะขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไซน์ ขณะชั้บภาระทางไฟฟ้า 1 kW



รูปที่ 4.25 ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไซน์ ขณะชั้บภาระทางไฟฟ้า 1 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ข้อควรระวัง

- 1.ในการทดสอบทุกครั้งควรมีสติ รอบคอบและระมัดระวัง สวมแว่นตานิรภัยทุกครั้งที่ทำกรทดสอบ
- 2.วางแผนการทดสอบ จัดอุปกรณ์ในการวัดผลให้พร้อม
- 3.ขณะทำการทดสอบขั้วภาระทางไฟฟ้า อุปกรณ์ต่างๆภายในวงจร เช่น ทรานซิสเตอร์ในวงจรกำลัง จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนที่ดี

#### 4.6 บทสรุป

จากการผลการทดสอบเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานต้นแบบ จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบเครื่องจริงได้ผลที่คล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีพิกัดประมาณ 3kW ทดลองทำการทดสอบที่ภาระทางไฟฟ้า 1kW ที่แรงดันปกติเท่ากับ  $311V_p$  ( $220V_{rms}$ ) สามารถโปรแกรมให้สร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ มีประสิทธิภาพประมาณ 85.4% มีค่า %Voltage Regulation เท่ากับ 1.633% มีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไซน์เท่ากับ 2.78% และค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไซน์เท่ากับ 5.45%

## บทที่ 5

### บทสรุป เสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

#### 5.1 บทสรุป

จากการศึกษาเทคโนโลยีระบบส่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก (Microgrid) ทำให้ทราบถึงความจำเป็นของการมีเครื่องจำลองแหล่งจ่ายพลังงานโปรแกรมได้ในห้องวิจัย เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronics equipment) ในเงื่อนไขการทำงานต่างๆ ก่อนการนำไปติดตั้งใช้งานจริง เพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการติดตั้งใช้งานจริง ซึ่งจากการค้นคว้าได้เห็นแนวทางการออกแบบและสร้างเครื่องจำลองแหล่งจ่ายพลังงานโปรแกรมได้โดยการสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณขนาดเล็กที่สามารถโปรแกรมลักษณะสัญญาณได้ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) แล้วขยายสัญญาณดังกล่าวด้วยวงจขยายเชิงเส้นคลาสเอบี (Class AB power amplifier) เพื่อให้ได้สัญญาณที่พิกัดสูงสุด 3kW โดยจำลองการทำงานเบื้องต้นด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในปริิถุณยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วงจรที่ออกแบบสามารถใช้งานได้จริง จึงนำไปสู่การดำเนินการสร้างเป็นชิ้นงานจริง

จากการทดลองพบว่า สามารถสร้างเครื่องจำลองแหล่งจ่ายโปรแกรมได้ได้ โดยสัญญาณขนาดเล็กที่สร้างขึ้นมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะมีรูปร่างตามที่เราได้เขียนโปรแกรมไว้ ซึ่งในปริิถุณยานิพนธ์นี้โปรแกรมเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sin wave) ที่สามารถจำลองการเกิดแรงดันตก (Voltage sag) ที่ 20% ได้ โดยสัญญาณที่ได้มีสัญญาณรบกวน (Noise) อยู่บ้างเล็กน้อย โดยมีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรูปคลื่นไซน์ (Total Harmonic Distortion: THD<sub>v</sub>) มีค่าเท่ากับ 2.72% สัญญาณดังกล่าวถูกขยายด้วยวงจขยายเชิงเส้นคลาสเอบี ซึ่งสัญญาณขาออก (Output) มีลักษณะเหมือนกับสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่มีการกรองสัญญาณรบกวนบางส่วนออก ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรูปคลื่นไซน์ (Total Harmonic Distortion: THD<sub>v</sub>) มีค่าลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 2.78% สัญญาณที่ได้นี้เมื่อนำไปจ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นโหลดไฟที่พิกัด 1kW พบว่า รูปคลื่นสัญญาณแรงดันยังมีลักษณะเช่นเดิม แต่มีค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันรูปคลื่นไซน์ (Total Harmonic Distortion: THD<sub>v</sub>) เพิ่มขึ้นเป็น 2.78% ทั้งนี้ทางคณะผู้จัดทำได้นำเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้นี้ โปรแกรมสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sin wave) ที่สามารถจำลองการเกิดแรงดันตกที่ 20% ได้ เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานเพื่อทดสอบการทำงานแก้ปัญหาแรงดันตกของอินเวอร์เตอร์

หลายระดับชนิดเอช-บริดจ์อินเวอร์เตอร์ 11 ระดับพบว่า สามารถใช้ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ตามเงื่อนไขได้จริง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังงานเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในห้องวิจัย เนื่องจากมีความสะดวก สามารถโปรแกรมเพื่อสร้างลักษณะสัญญาณที่ต้องการทดสอบอุปกรณ์เองได้ มีความผิดพลาดของสัญญาณต่ำ ทำให้มีความน่าเชื่อถือของสัญญาณทดสอบสูง

## 5.2 ข้อเสนอนะและข้อควรระวัง

จากการดำเนินการทดลองตลอดโครงการวิจัยนี้พบว่า มีข้อควรเสนอนะและข้อควรระวังดังต่อไปนี้

เนื่องจากตัวเก็บประจุของ DC-link มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดกระแสกระชากขึ้นขณะชาร์จประจุ จำเป็นต้องมีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่ป้องกันกระแสกระชากนั้น โดยการคำนวณขนาดตัวเหนี่ยวนำนั้นต้องมีความเหมาะสม ถ้ามีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้ป้องกันกระแสกระชากได้ไม่ดี แต่ถ้าหากมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำมาก ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน

ส่วนการขยายกำลัง (Power output) ของวงจรจะต้องมีการระบายความร้อนอย่างเพียงพอ เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์

ควรตรวจสอบแรงดันขาออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และแรงดันขาออกจากเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ก่อนจ่ายภาระทางไฟฟ้าเสมอ เพราะถ้าแรงดันขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์สูง จะทำให้แรงดันขาออกของเครื่องสูงตามไปด้วย ซึ่งอาจเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ทดสอบได้

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการนี้สามารถพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานให้มีประสิทธิภาพ และความหลากหลายในการใช้งานได้ ดังต่อไปนี้

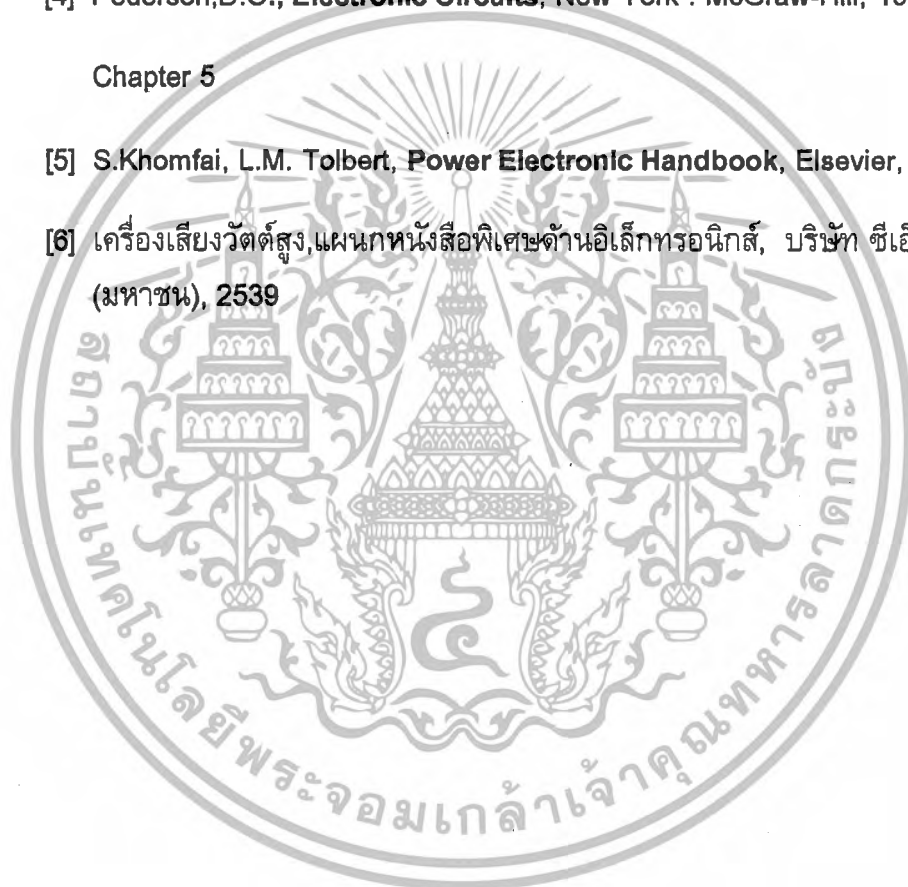
การเพิ่มแรงดัน DC-link และการเปลี่ยนอุปกรณ์ของวงจรขยายให้ทนกระแสและแรงดันสูงขึ้น จะทำให้พิกัดของเครื่องสูงขึ้นด้วย

โครงการวิจัยนี้ เป็นการสร้างเครื่องจำลองแหล่งจ่ายพลังงานเพียงเฟสเดียวสามารถพัฒนาให้เป็นแหล่งจ่ายกำลังงาน 3 เฟสได้



## บรรณานุกรม

- [1] Charles Alexander and Matthew Sadiku, **Fundamentals Of Electric Circuits**,  
McGraw – Hill Third Edition 2007
- [2] D.V. Bugg, **Electronics : Circuits, Amplifiers and Gates**, Second Edition 2006
- [3] Peter Staric and Erik Margan, **Wideband Amplifiers** 2007
- [4] Pederson,D.O., **Electronic Circuits**, New York : McGraw-Hill, 1965, (Prelimed.),  
Chapter 5
- [5] S.Khomfai, L.M. Tolbert, **Power Electronic Handbook**, Elsevier, 2006
- [6] เครื่องเสียงวัดต้วสูง,แผนกหนังสือพิเศษด้านอิเล็กทรอนิกส์, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด  
(มหาชน), 2539





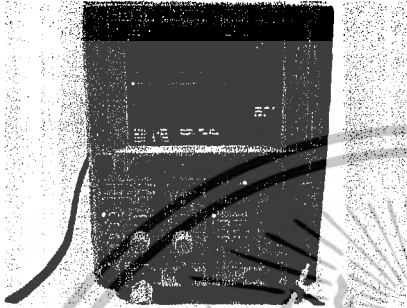
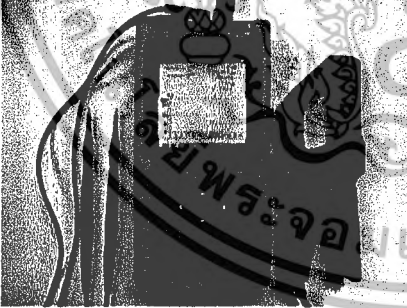
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.



## เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

	<p><b>DIGITAL OSCILLOSCOPE DL1620</b> <b>(YOKOGAWA)</b></p> <p>Analog input channels : 2 channels</p> <p>Maximum Sampling Rate : 200 MS/s</p> <p>Bandwidth : 200 MHz</p> <p>Maximum memory length : 8 MW/ch</p>
	<p><b>POWER QUALITY ANALYZER 43B (FLUKE)</b></p> <p>Voltage rating : 600 Vrms, CAT III</p> <p>Current input range : 1A - 500A AC rms</p> <p>Input impedance : 1 M<math>\Omega</math>, 20 pF</p> <p>Frequency range : 51Hz – 10kHz</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก. (ต่อ)

## เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

	<p><b>MULTIMETER 973A (HEWLETT PACKARD)</b></p> <p>The 3 1/2 digit display (with 0.1% basic dc accuracy)</p> <p>Frequency range : 20 kHz</p> <p>Accuracy : 0.1% for dc, 0.7% for ac, 0.2% for ohms, 1.2% for capacitance</p>
	<p><b>DIFFERENTIAL PROBE DP 25 (CHAUVIN ARNOUX)</b></p> <p>Differential input voltage : 1000 Vrms</p> <p>Common mode voltage : 600 Vrms</p> <p>Accuracy : <math>\pm</math> 2%</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**MICROCHIP**

**PIC18F2331/2431/4331/4431  
Data Sheet**

28/40/44-Pin Enhanced  
Flash Microcontrollers  
with nanoWatt Technology,  
High Performance PWM and A/D



# MICROCHIP PIC18F2331/2431/4331/4431

## 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with nanoWatt Technology, High Performance PWM and A/D

### 14-bit Power Control PWM Module:

- Up to 4 channels with complementary outputs
- Edge- or center-aligned operation
- Flexible dead-band generator
- Hardware fault protection inputs
- Simultaneous update of duty cycle and period:
  - Flexible special event trigger output

### Motion Feedback Module:

- Three independent input capture channels:
  - Flexible operating modes for period and pulse width measurement
  - Special Hall Sensor interface module
  - Special event trigger output to other modules
- Quadrature Encoder Interface:
  - 2 phase inputs and one index input from encoder
  - High and low position tracking with direction status and change of direction interrupt
  - Velocity measurement

### High-Speed, 200 Ksps 10-bit A/D Converter:

- Up to 9 channels
- Simultaneous two-channel sampling
- Sequential sampling: 1, 2 or 4 selected channels
- Auto-conversion capability
- 4-word FIFO with selectable interrupt frequency
- Selectable external conversion triggers
- Programmable acquisition time

### Flexible Oscillator Structure:

- Four crystal modes up to 40 MHz
- Two external clock modes up to 40 MHz
- Internal oscillator block:
  - 8 user selectable frequencies: 31 kHz to 8 MHz
  - OSCTUNE can compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor:
  - Allows for safe shutdown of device if clock fails

### Power-Managed Modes:

- Run CPU on, peripherals on
- Idle CPU off, peripherals on
- Sleep CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8  $\mu$ A typical
- Sleep current down to 0.1  $\mu$ A typical
- Timer1 oscillator, 1.8  $\mu$ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer (WDT), 2.1  $\mu$ A typical
- Two-Speed oscillator start-up

### Peripheral Highlights:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- Two Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
  - Capture is 16-bit, max. resolution 6.25 ns ( $T_{CY}/16$ )
  - Compare is 16-bit, max. resolution 100 ns ( $T_{CY}$ )
  - PWM output: PWM resolution is 1 to 10 bits
- Enhanced USART module:
  - Supports RS-485, RS-232 and LIN 1.2
  - Auto-Wake-up on Start bit
  - Auto-Baud detect
- RS-232 operation using internal oscillator block (no external crystal required)

### Special Microcontroller Features:

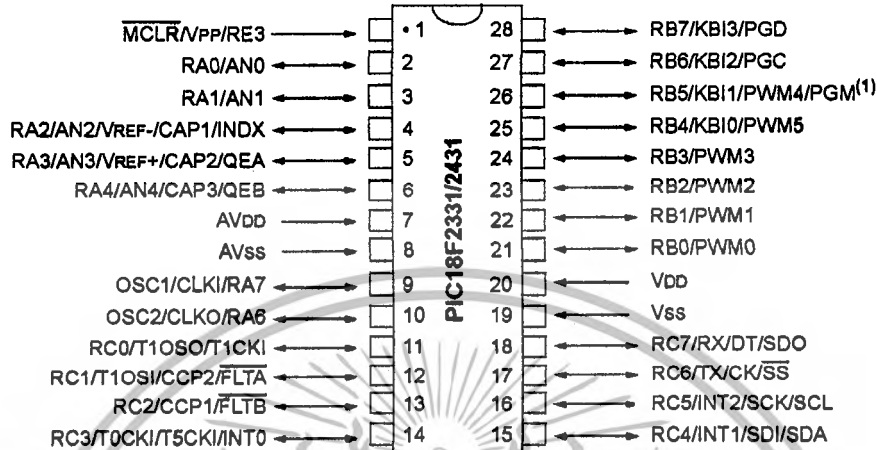
- 100,000 erase/write cycle enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle data EEPROM memory typical
- Flash/data EEPROM retention: 100 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 X 8 Single-cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
  - Programmable period from 41 ms to 131s
- Single-supply In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
  - Drives PWM outputs safely when debugging

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP	SSP		EUSART	Quadrature Encoder	14-bit PWM (ch)	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)				SPI	Slave I <sup>2</sup> C™				
PIC18F2331	8192	4096	768	256	24	5	2	Y	Y	Y	Y	6	1/3
PIC18F2431	16384	8192	768	256	24	5	2	Y	Y	Y	Y	6	1/3
PIC18F4331	8192	4096	768	256	36	9	2	Y	Y	Y	Y	8	1/3
PIC18F4431	16384	8192	768	256	36	9	2	Y	Y	Y	Y	8	1/3

# PIC18F2331/2431/4331/4431

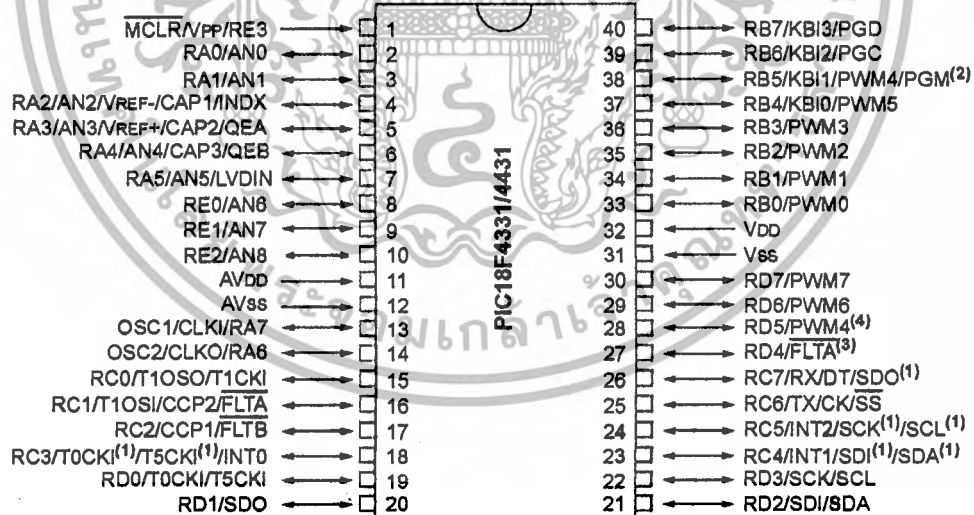
## Pin Diagrams

### 28-Pin SDIP, SOIC



Note 1: Low-voltage programming must be enabled.

### 40-Pin PDIP



Note 1: RC3 is the alternate pin for T0CKI/T5CKI; RC4 is the alternate pin for SDI/SDA; RC5 is the alternate pin for SCK/SCL.

2: Low-voltage programming must be enabled.

3: RD4 is the alternate pin for FLTA.

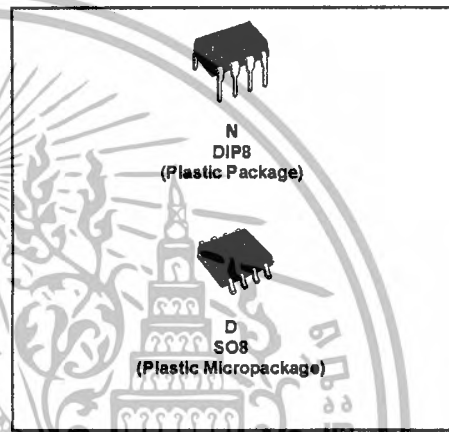
4: RD5 is the alternate pin for PWM4.



## TL072 TL072A - TL072B

### LOW NOISE J-FET DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO  $V_{CC}^+$ ) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- LOW NOISE  $e_n = 15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  (typ)
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- LOW HARMONIC DISTORTION : 0.01% (typ)
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE :  $16\text{V}/\mu\text{s}$  (typ)

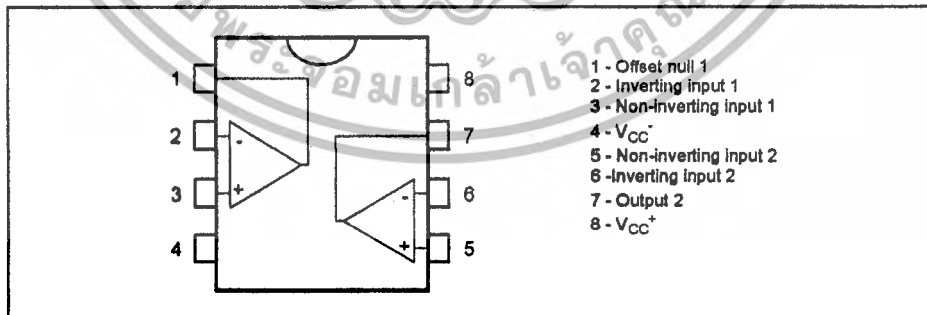


#### DESCRIPTION

The TL072, TL072A and TL072B are high speed J-FET input dual 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 current, and low offset voltage temperature coefficient.

#### PIN CONNECTIONS (top view)

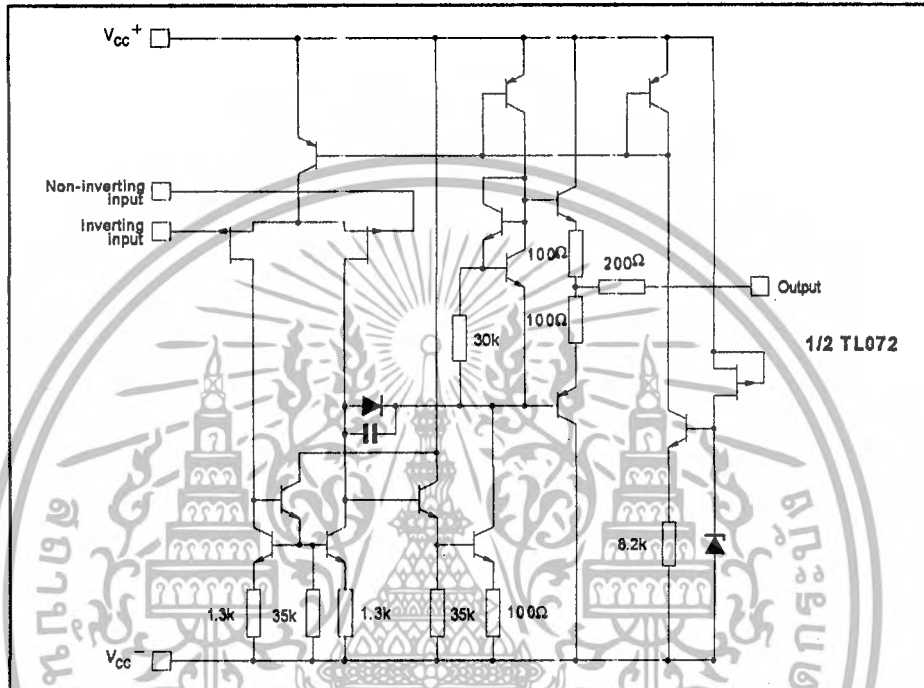


March 2001

1/10

## TL072 - TL072A - TL072B

### SCHEMATIC DIAGRAM



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	TL072M, AM, BM	TL072I, AI, BI	TL072C, AC, BC	Unit
$V_{CC}$	Supply voltage - note <sup>1)</sup>		$\pm 18$		V
$V_i$	Input Voltage - note <sup>2)</sup>		$\pm 15$		V
$V_{id}$	Differential Input Voltage - note <sup>3)</sup>		$\pm 30$		V
$P_{tot}$	Power Dissipation		680		mW
	Output Short-circuit Duration - note <sup>4)</sup>		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

- 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  $V_{CC}^-$ .
- The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
- Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
- 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.

## TL072 - TL072A - TL072B

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

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

Symbol	Parameter	TL072I,M,AC,AI,AM,BC,BI,BM			TL072C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
$V_{io}$	Input Offset Voltage ( $R_S = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		3 3 1	10 6 3 13 7 5		3	10	mV
$DV_{io}$	Input Offset Voltage Drift		10			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		5	100 10	pA nA
$I_{ib}$	Input Bias Current - note 1 $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	200 20		20	200 20	pA nA
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain ( $R_L = 2k\Omega$ , $V_o = \pm 10V$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	80 25	200		25 15	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_S = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	80 80	86		70 70	86		dB
$I_{CC}$	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.4	2.5 2.5		1.4	2.5 2.5	mA
$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range	$\pm 11$	+15 -12		$\pm 11$	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_S = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	80 80	86		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	10 10	40	60 60	mA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10 12 10 12	12 13.5 2k $\Omega$ 10k $\Omega$		10 12 10 12		V
SR	Slew Rate ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 10V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity gain		8	16		8	16	V/ $\mu s$
$t_r$	Rise Time ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity gain			0.1		0.1		$\mu s$
$K_{ov}$	Overshoot ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity gain			10		10		%
GBP	Gain Bandwidth Product ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 10mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , $f = 100kHz$		2.5	4		2.5	4	MHz
$R_i$	Input Resistance			$10^{12}$			$10^{12}$	$\Omega$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TL072 - TL072A - TL072B

Symbol	Parameter	TL072I,M,AC,AI,AM, BC,BI,BM			TL072C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
THD	Total Harmonic Distortion ( $T_{amb} = +25^{\circ}\text{C}$ ) $f = 1\text{kHz}$ , $R_L = 2\text{k}\Omega$ , $C_L = 100\text{pF}$ , $A_v = 20\text{dB}$ , $V_o = 2V_{pp}$		0.01			0.01		%
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage $R_S = 100\Omega$ , $f = 1\text{kHz}$		15			15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
$\phi_m$	Phase Margin		45			46		degree
$V_{o1}/V_{o2}$	Channel separation $A_v = 100$		120			120		dB

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



# MPSA42, MPSA43

MPSA42 is a Preferred Device

## High Voltage Transistors

NPN Silicon



ON Semiconductor™

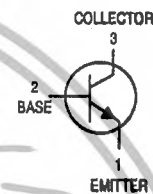
<http://onsemi.com>

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CE0}$	200	Vdc
		300	
Collector-Base Voltage	$V_{CB0}$	200	Vdc
		300	
Emitter-Base Voltage	$V_{EB0}$	6.0	Vdc
Collector Current - Continuous	$I_C$	500	mA <sub>dc</sub>
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	625	mW
		5.0	mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	1.5	Watts
		12	mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C}/\text{mW}$
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C}/\text{mW}$



### MARKING DIAGRAM



MPSA4x = Specific Device Code  
 x = 2 or 3  
 Y = Year  
 W = Work Week

### ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
MPSA42	TO-92	5000 Units/Box
MPSA42RLRA	TO-92	2000/Tape & Reel
MPSA42RLRE	TO-92	2000/Tape & Reel
MPSA42RLRF	TO-92	5000 Units/Box
MPSA42RLRM	TO-92	2000/Ammo Pack
MPSA42RLRP	TO-92	2000/Ammo Pack
MPSA43	TO-92	5000 Units/Box
MPSA43RLRA	TO-92	2000/Tape & Reel

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

## MPSA42, MPSA43

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic		Symbol	Min	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Collector-Emitter Breakdown Voltage (Note 1.) ( $I_C = 1.0\text{ mAdc}$ , $I_B = 0$ )	MPSA42 MPSA43	$V_{(BR)CEO}$	300 200	-- --	Vdc
Collector-Base Breakdown Voltage ( $I_C = 100\ \mu\text{Adc}$ , $I_E = 0$ )	MPSA42 MPSA43	$V_{(BR)CBO}$	300 200	-- --	Vdc
Emitter-Base Breakdown Voltage ( $I_E = 100\ \mu\text{Adc}$ , $I_C = 0$ )		$V_{(BR)EBO}$	6.0	--	Vdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CB} = 200\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ ) ( $V_{CB} = 160\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ )	MPSA42 MPSA43	$I_{CBO}$	-- --	0.1 0.1	$\mu\text{Adc}$
Emitter Cutoff Current ( $V_{EB} = 6.0\text{ Vdc}$ , $I_C = 0$ ) ( $V_{EB} = 4.0\text{ Vdc}$ , $I_C = 0$ )	MPSA42 MPSA43	$I_{EBO}$	-- --	0.1 0.1	$\mu\text{Adc}$
<b>ON CHARACTERISTICS (Note 1.)</b>					
DC Current Gain ( $I_C = 1.0\text{ mAdc}$ , $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 10\text{ mAdc}$ , $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 30\text{ mAdc}$ , $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$ )		$h_{FE}$	25 40 40	-- -- --	--
Collector-Emitter Saturation Voltage ( $I_C = 20\text{ mAdc}$ , $I_B = 2.0\text{ mAdc}$ )	MPSA42 MPSA43	$V_{CE(sat)}$	-- --	0.5 0.4	Vdc
Base-Emitter Saturation Voltage ( $I_C = 20\text{ mAdc}$ , $I_B = 2.0\text{ mAdc}$ )		$V_{BE(sat)}$	--	0.9	Vdc
<b>SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS</b>					
Current-Gain - Bandwidth Product ( $I_C = 10\text{ mAdc}$ , $V_{CE} = 20\text{ Vdc}$ , $f = 100\text{ MHz}$ )		$f_T$	50	--	MHz
Collector-Base Capacitance ( $V_{CB} = 20\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ , $f = 1.0\text{ MHz}$ )	MPSA42 MPSA43	$C_{cb}$	-- --	3.0 4.0	pF

1. Pulse Test: Pulse Width  $\leq 300\ \mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2\%$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MPSA42, MPSA43

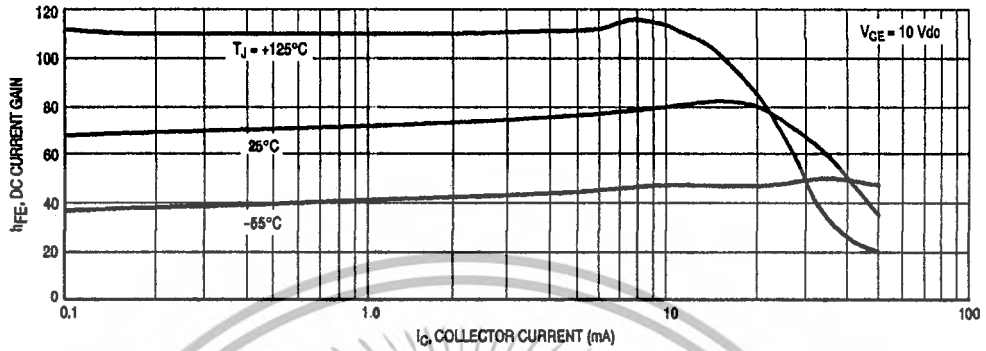


Figure 1. DC Current Gain

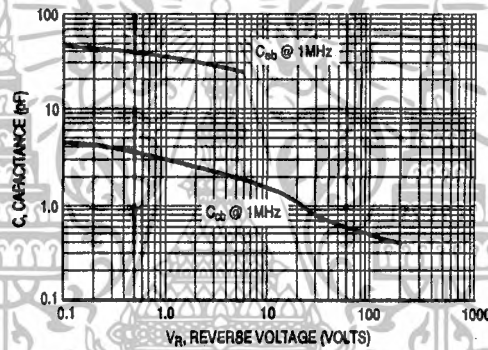


Figure 2. Capacitance

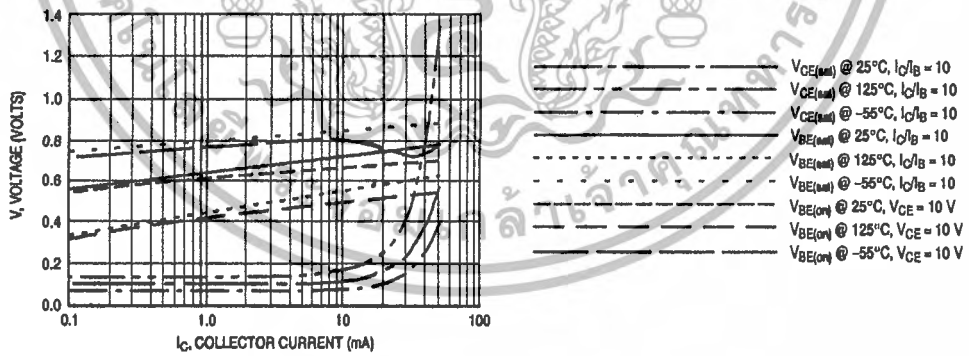


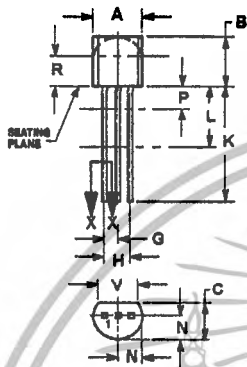
Figure 3. "ON" Voltages

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MPSA42, MPSA43**

**PACKAGE DIMENSIONS**

**TO-92  
TO-226AA  
CASE 29-11  
ISSUE AL**



- NOTES:**
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1992.
  2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
  3. CONTOUR OF PACKAGE BEYOND DIMENSION R IS UNCONTROLLED.
  4. LEAD DIMENSION IS UNCONTROLLED IN P AND BEYOND DIMENSION K MINIMUM.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.175	0.205	4.45	5.20
B	0.170	0.210	4.32	5.33
C	0.125	0.185	3.18	4.70
D	0.019	0.021	0.487	0.533
G	0.045	0.055	1.15	1.39
H	0.025	0.105	0.64	2.68
J	0.015	0.060	0.38	1.52
K	0.250	---	6.35	---
L	0.250	---	6.35	---
N	0.080	0.105	2.04	2.68
P	---	0.100	---	2.54
R	0.115	---	2.92	---
V	0.125	---	3.18	---

- STYLE 1:**  
PIN 1. EMITTER  
2. BASE  
3. COLLECTOR
- STYLE 1C:**  
PIN 1. EMITTER  
2. COLLECTOR  
3. BASE

ON Semiconductor and are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

**PUBLICATION ORDERING INFORMATION**

**Literature Fulfillment:**  
Literature Distribution Center for ON Semiconductor  
P.O. Box 5183, Denver, Colorado 80217 USA  
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3880 Toll Free USA/Canada  
Fax: 303-675-2178 or 800-344-3887 Toll Free USA/Canada  
Email: ONlit@hibbertco.com

**N. American Technical Support:** 800-282-9855 Toll Free USA/Canada

**JAPAN:** ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center  
4-32-1 Nishi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo, Japan 141-0031  
Phone: 81-3-6740-2700  
Email: r14525@onsemi.com

**ON Semiconductor Website:** <http://onsemi.com>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

**MPSA42/D**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MPSA92, MPSA93**

MPSA92 is a Preferred Device

**High Voltage Transistors**

PNP Silicon



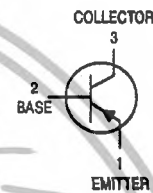
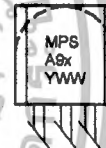
ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>**MAXIMUM RATINGS**

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	-200 -300	Vdc
Collector-Base Voltage	$V_{CBO}$	-200 -300	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EBO}$	-5.0	Vdc
Collector Current - Continuous	$I_C$	-500	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	625 5.0	mW mW/°C
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	1.5 12	W mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	°C

**THERMAL CHARACTERISTICS**

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	83.3	°C/W

STYLE 1  
MPSA92, MPSA93**MARKING DIAGRAM**TO-92  
CASE 29  
STYLES 1, 14

MPSA9 = Specific Device Code  
 x = 2 or 3  
 Y = Year  
 W = Work Week

**ORDERING INFORMATION**

Device	Package	Shipping
MPSA92	TO-92	5000 Units/Box
MPSA92RLRA	TO-92	2000/Tape & Reel
MPSA92RLRE	TO-92	2000/Tape & Reel
MPSA92RLRM	TO-92	2000/Ammo Pack
MPSA92RLRP	TO-92	2000/Ammo Pack
MPSA93	TO-92	5000 Units/Box
MPSA93RLRA	TO-92	2000/Tape & Reel
MPSA93RLRM	TO-92	2000/Ammo Pack

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MPSA92, MPSA93

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit	
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Collector-Emitter Breakdown Voltage (Note 1) ( $I_C = -1.0\text{ mAdc}$ , $I_B = 0$ )	MPSA92 MPSA93	$V_{(BR)CEO}$	-300 -200	- -	Vdc
Collector-Base Breakdown Voltage ( $I_C = -100\ \mu\text{A}$ , $I_E = 0$ )	MPSA92 MPSA93	$V_{(BR)CBO}$	-300 -200	- -	Vdc
Emitter-Base Breakdown Voltage ( $I_E = -100\ \mu\text{A}$ , $I_C = 0$ )		$V_{(BR)EBO}$	-5.0	-	Vdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CB} = -200\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ ) ( $V_{CB} = -180\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ )	MPSA92 MPSA93	$I_{CBO}$	- -	-0.25 -0.25	$\mu\text{A}$
Emitter Cutoff Current ( $V_{EB} = -3.0\text{ Vdc}$ , $I_C = 0$ )		$I_{EBO}$	-	-0.1	$\mu\text{A}$
<b>ON CHARACTERISTICS (Note 1)</b>					
DC Current Gain ( $I_C = -1.0\text{ mAdc}$ , $V_{CE} = -10\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = -10\text{ mAdc}$ , $V_{CE} = -10\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = -30\text{ mAdc}$ , $V_{CE} = -10\text{ Vdc}$ )	All Types All Types MPSA92 MPSA93	$h_{FE}$	25 40 25 25	- - - -	-
Collector-Emitter Saturation Voltage ( $I_C = -20\text{ mAdc}$ , $I_B = -2.0\text{ mAdc}$ )	MPSA92 MPSA93	$V_{CE(sat)}$	- -	-0.5 -0.4	Vdc
Base-Emitter Saturation Voltage ( $I_C = -20\text{ mAdc}$ , $I_B = -2.0\text{ mAdc}$ )		$V_{BE(sat)}$	-	-0.9	Vdc
<b>SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS</b>					
Current-Gain - Bandwidth Product ( $I_C = -10\text{ mAdc}$ , $V_{CE} = -20\text{ Vdc}$ , $f = 100\text{ MHz}$ )		$f_T$	50	-	MHz
Collector-Base Capacitance ( $V_{CB} = -20\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ , $f = 1.0\text{ MHz}$ )	MPSA92 MPSA93	$C_{cb}$	- -	6.0 8.0	pF

1. Pulse Test: Pulse Width  $\leq 300\ \mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2\%$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MPSA92, MPSA93

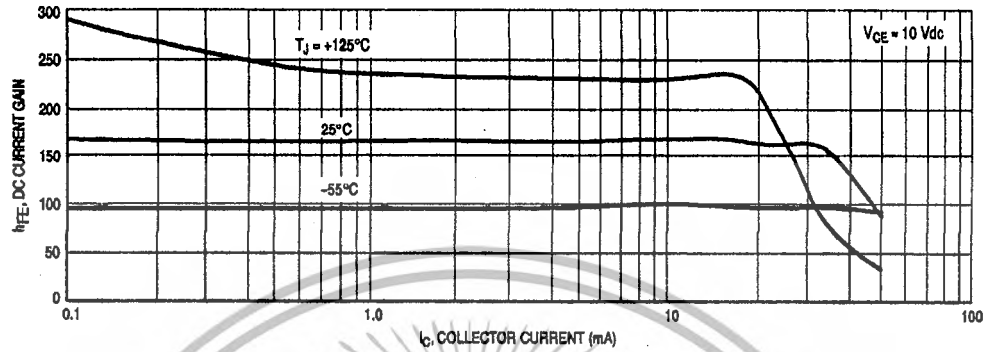


Figure 1. DC Current Gain

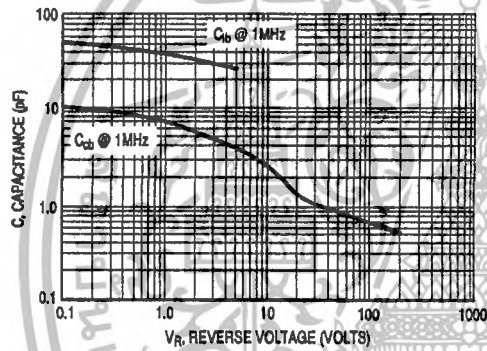


Figure 2. Capacitance

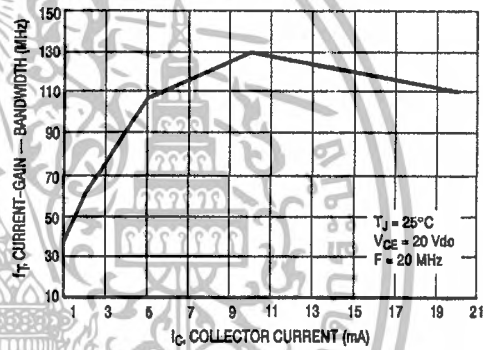


Figure 3. Current-Gain - Bandwidth

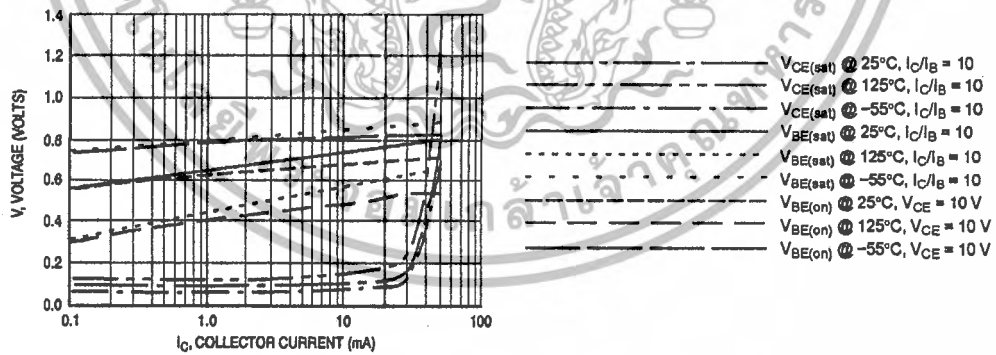


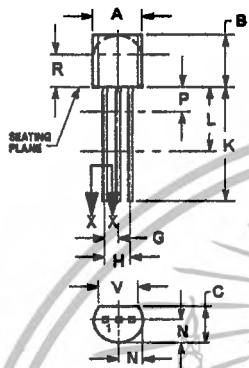
Figure 4. "ON" Voltages

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MPSA92, MPSA93

PACKAGE DIMENSIONS

TO-92  
TO-226AA  
CASE 29-11  
ISSUE AL



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
  2. CONTROLLING DIMENSION INCH.
  3. CONTOUR OF PACKAGE BEYOND DIMENSION R IS UNCONTROLLED.
  4. LEAD DIMENSION IS UNCONTROLLED IN P AND BEYOND DIMENSION K MINIMUM.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.175	0.205	4.45	5.20
B	0.170	0.210	4.32	5.33
C	0.124	0.188	3.18	4.79
D	0.018	0.021	0.467	0.533
E	0.045	0.055	1.15	1.39
H	0.095	0.105	2.42	2.68
J	0.015	0.020	0.39	0.50
K	0.500	---	12.70	---
L	0.250	---	6.35	---
N	0.080	0.105	2.04	2.68
P	---	0.100	---	2.54
R	0.115	---	2.93	---
V	0.185	---	4.69	---

- STYLE 1:  
PIN 1: EMITTER  
2. BASE  
3. COLLECTOR
- STYLE 14:  
PIN 1: EMITTER  
2. COLLECTOR  
3. BASE

ON Semiconductor and are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

Literature Fulfillment:  
Literature Distribution Center for ON Semiconductor  
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA  
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3880 Toll Free USA/Canada  
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3887 Toll Free USA/Canada  
Email: [orderlit@onsemi.com](mailto:orderlit@onsemi.com)

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free USA/Canada

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center  
2-9-1 Kamimeguro, Meguro-ku, Tokyo, Japan 163-0051  
Phone: 81-3-5773-3850

ON Semiconductor Website: <http://onsemi.com>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

MPSA92/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ON Semiconductor®



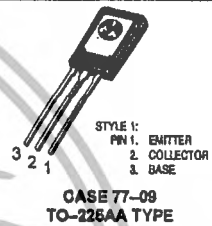
## Plastic Medium Power NPN Silicon Transistor

... useful for high-voltage general purpose applications.

- Suitable for Transformerless, Line-Operated Equipment
- Thermopad Construction Provides High Power Dissipation Rating for High Reliability

**MJE340**

0.6 AMPERE  
POWER TRANSISTOR  
NPN SILICON  
300 VOLTS  
20 WATTS



### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CE0}$	300	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EB}$	3.0	Vdc
Collector Current — Continuous	$I_C$	500	mA dc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	20 0.18	Watts W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$\theta_{JC}$	6.25	$^\circ\text{C/W}$

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>				
Collector-Emitter Sustaining Voltage ( $I_C = 1.0 \text{ mA dc}, I_E = 0$ )	$V_{CE0(sus)}$	300	—	Vdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CB} = 300 \text{ Vdc}, I_E = 0$ )	$I_{CBO}$	—	100	$\mu\text{A dc}$
Emitter Cutoff Current ( $V_{EB} = 3.0 \text{ Vdc}, I_C = 0$ )	$I_{EBO}$	—	100	$\mu\text{A dc}$
<b>ON CHARACTERISTICS</b>				
DC Current Gain ( $I_C = 50 \text{ mA dc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$ )	$h_{FE}$	30	240	—

MJE340

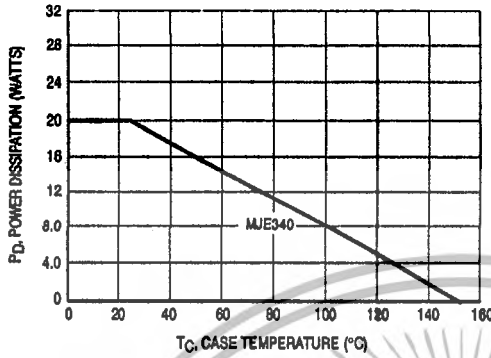


Figure 1. Power Temperature Derating

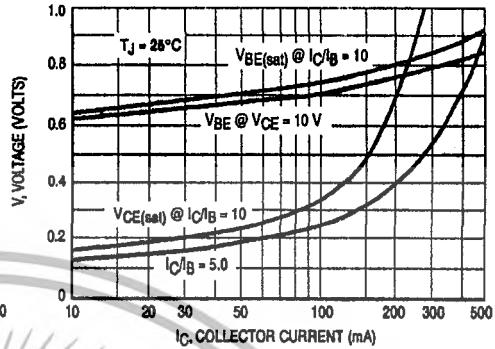


Figure 2. "On" Voltages

ACTIVE-REGION SAFE OPERATING AREA

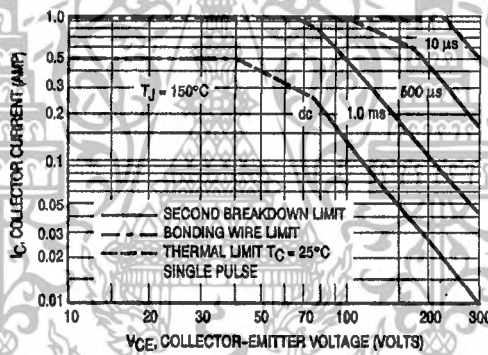


Figure 3. MJE340

There are two limitations on the power handling ability of a transistor; average junction temperature and second breakdown. Safe operating area curves indicate  $I_C - V_{CE}$  limits of the transistor that must be observed for reliable operation; i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than the curves indicate.

The data of Figure 3 is based on  $T_{J(pk)} = 150^\circ\text{C}$ ;  $T_C$  is variable depending on conditions. Second breakdown pulse limits are valid for duty cycles to 10% provided  $T_{J(pk)} \leq 150^\circ\text{C}$ . At high case temperatures, thermal limitations will reduce the power that can be handled to values less than the limitations imposed by second breakdown.

## MJE340

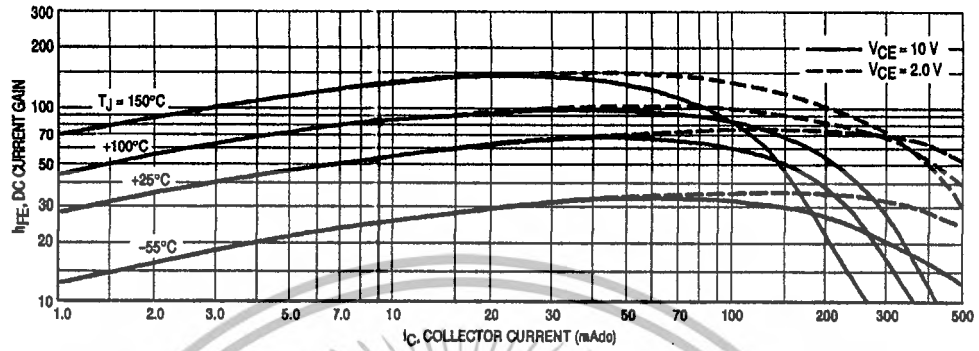


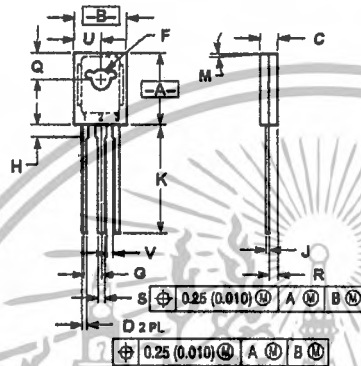
Figure 4. DC Current Gain



MJE340

PACKAGE DIMENSIONS

TO-225AA  
CASE 77-09  
ISSUE W



NOTES:  
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.2M, 1983.  
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.421	0.433	10.80	11.04
B	0.298	0.305	7.50	7.74
C	0.008	0.105	2.42	2.66
D	0.020	0.029	0.51	0.66
F	0.114	0.130	2.93	3.30
Q	0.001 BSC	---	2.38 BSC	---
H	0.060	0.092	1.27	2.41
J	0.071	0.078	0.39	0.63
K	0.671	0.693	14.81	16.93
M	---	---	---	---
Q	0.148	0.158	3.78	4.01
R	0.044	0.045	1.15	1.65
S	0.020	0.026	0.64	0.66
U	0.148	0.158	3.78	3.93
V	0.020	---	1.02	---

STYLE 1:  
PIN 1. EMITTER  
2. COLLECTOR  
3. BASE

ON Semiconductor and are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

Literature Fulfillment  
Literature Distribution Center for ON Semiconductor  
P.O. Box 5183, Denver, Colorado 80217 USA  
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada  
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada  
Email: ONlit@hibbertco.com

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center  
4-32-1 Nishi-Gotanda, Shingawa-ku, Tokyo, Japan 141-0031  
Phone: 81-3-5740-2700  
Email: r14625@onsemi.com

ON Semiconductor Website: <http://onsemi.com>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

N. American Technical Support 800-282-9855 Toll Free USA/Canada

MJE340/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ON Semiconductor®



## Plastic Medium Power PNP Silicon Transistor

... designed for use in line-operated applications such as low power, line-operated series pass and switching regulators requiring PNP capability.

- High Collector-Emitter Sustaining Voltage —  
 $V_{CEO(sus)} = 300 \text{ Vdc @ } I_C = 1.0 \text{ mAdc}$
- Excellent DC Current Gain —  
 $h_{FE} = 30\text{--}240 @ I_C = 50 \text{ mAdc}$
- Plastic Thermopad Package

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	300	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EB}$	3.0	Vdc
Collector Current — Continuous	$I_C$	500	mAdc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	20 0.16	Watts W/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to +150	°C

### THERMAL CHARACTERISTICS

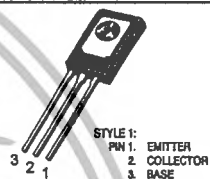
Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$\theta_{JC}$	6.25	°C/W

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>				
Collector-Emitter Sustaining Voltage ( $I_C = 1.0 \text{ mAdc}, I_B = 0$ )	$V_{CEO(sus)}$	300	—	Vdc
Collector Cutoff Current ( $V_{CB} = 300 \text{ Vdc}, I_E = 0$ )	$I_{CBO}$	—	100	$\mu\text{A}$
Emitter Cutoff Current ( $V_{EB} = 3.0 \text{ Vdc}, I_C = 0$ )	$I_{EBO}$	—	100	$\mu\text{A}$
<b>ON CHARACTERISTICS</b>				
DC Current Gain ( $I_C = 50 \text{ mAdc}, V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$ )	$h_{FE}$	30	240	—

## MJE350

0.5 AMPERE  
POWER TRANSISTOR  
PNP SILICON  
300 VOLTS  
20 WATTS



CASE 77-09  
TO-225AA TYPE

MJE350

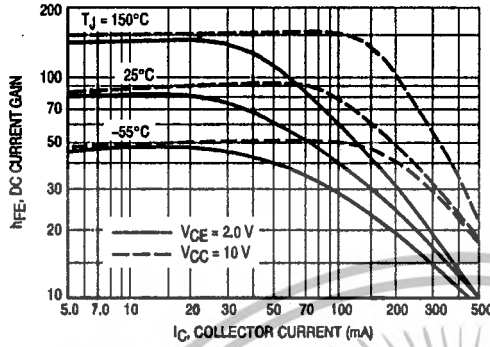


Figure 1. DC Current Gain

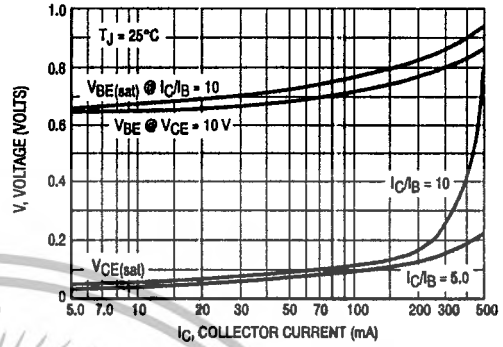


Figure 2. "On" Voltages

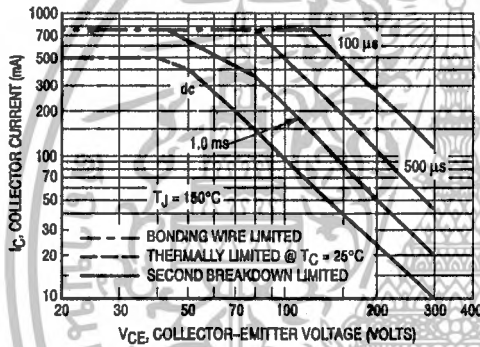


Figure 3. Active-Region Safe Operating Area

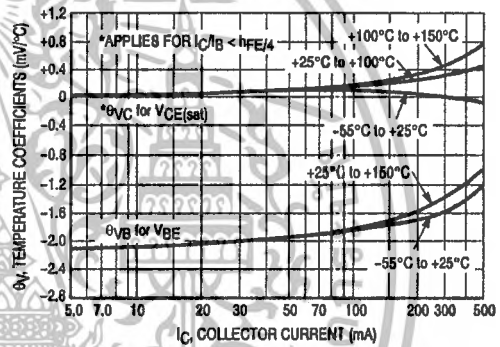


Figure 4. Temperature Coefficients

There are two limitations on the power handling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown. Safe operating area curves indicate  $I_C - V_{CE}$  limits of the transistor that must be observed for reliable operation; i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than the curves indicate.

The data of Figure 3 is based on  $T_{J(pk)} = 150^\circ\text{C}$ ;  $T_C$  is variable depending on conditions. Second breakdown pulse limits are valid for duty cycles to 10% provided  $T_{J(pk)} \leq 150^\circ\text{C}$ . At high case temperatures, thermal limitations will reduce the power that can be handled to values less than the limitations imposed by second breakdown.

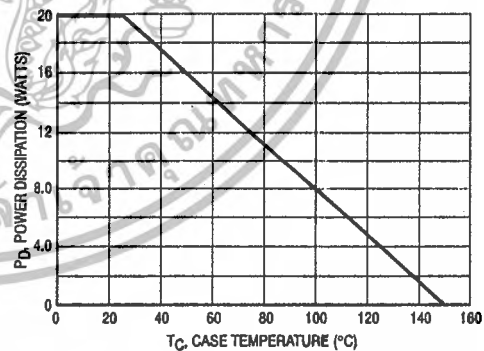
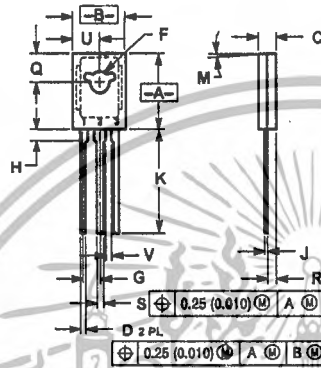


Figure 5. Power Derating

MJE350

PACKAGE DIMENSIONS

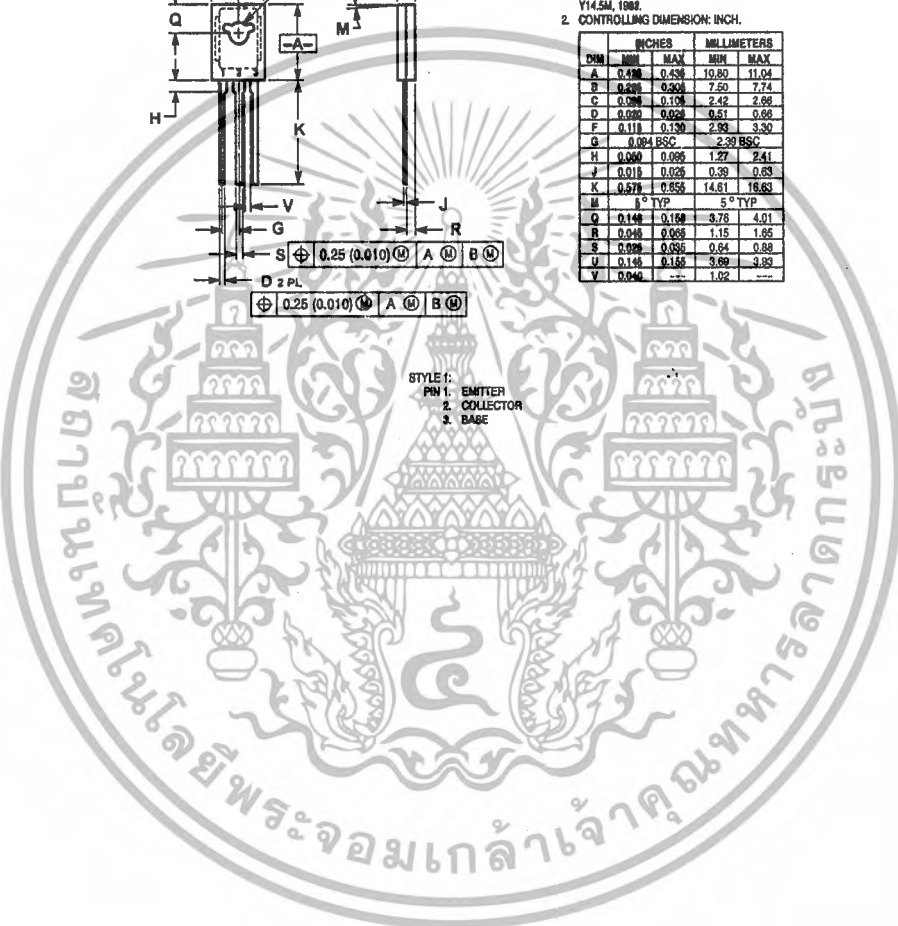
TO-225  
CASE 77-09  
ISSUE W



NOTES:  
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.  
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.490	0.500	12.50	12.70
B	0.020	0.024	0.51	0.61
C	0.008	0.010	0.20	0.25
D	0.020	0.024	0.51	0.61
F	0.110	0.130	2.79	3.30
G	0.004 BSC		0.10 BSC	
H	0.000	0.005	0.00	0.13
J	0.010	0.020	0.25	0.51
K	0.010	0.020	0.25	0.51
M	S TYP		S TYP	
O	0.140	0.150	3.55	3.81
R	0.040	0.050	1.02	1.27
S	0.020	0.030	0.51	0.76
U	0.140	0.150	3.55	3.81
V	0.040	---	1.02	---


STYLE 1:  
PIN 1: EMITTER  
2: COLLECTOR  
3: BASE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MJE350



ON Semiconductor and  are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

#### PUBLICATION ORDERING INFORMATION

##### Literature Fulfillment

Literature Distribution Center for ON Semiconductor  
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA  
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada  
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada  
Email: [ONM@hibbertco.com](mailto:ONM@hibbertco.com)

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free USA/Canada

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center  
4-32-1 Nishi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo, Japan 141-0031  
Phone: 81-3-5740-2700  
Email: [r14525@onsemi.com](mailto:r14525@onsemi.com)

ON Semiconductor Website: <http://onsemi.com>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

MJE350/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TOSHIBA****2SC5200**

TOSHIBA TRANSISTOR SILICON NPN TRIPLE DIFFUSED TYPE

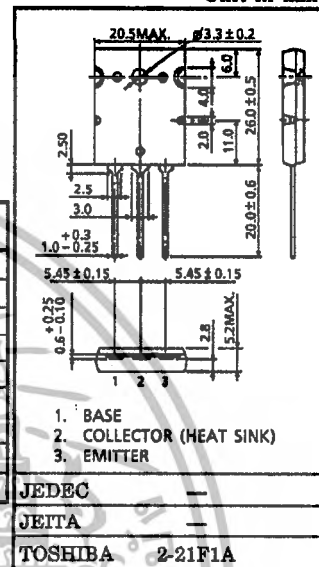
**2SC5200**

## POWER AMPLIFIER APPLICATIONS

- Complementary to 2SA1943
- Recommended for 100W High Fidelity Audio Frequency Amplifier Output Stage.

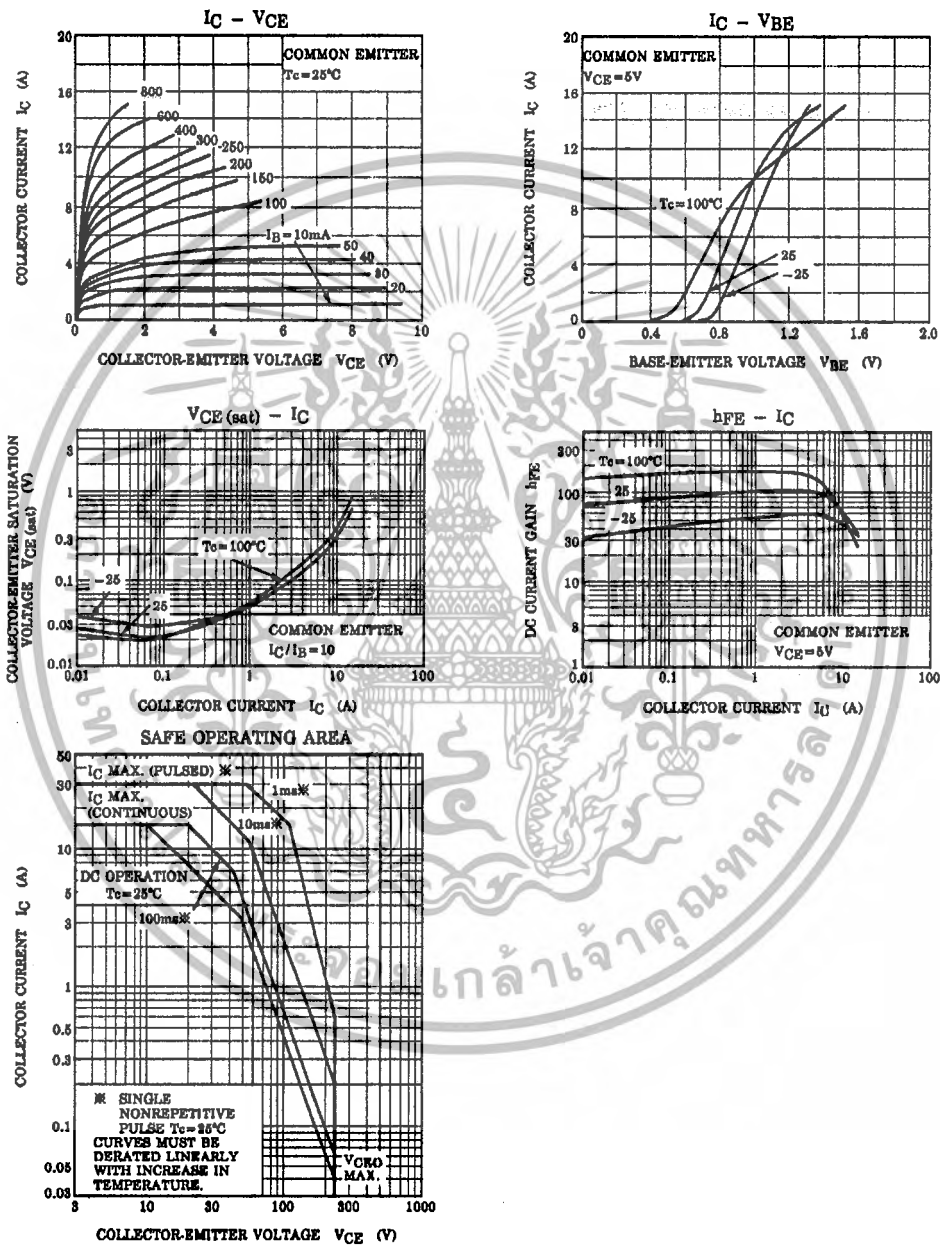
MAXIMUM RATINGS ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ )

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
Collector-Base Voltage	$V_{CB0}$	230	V
Collector-Emitter Voltage	$V_{CE0}$	230	V
Emitter-Base Voltage	$V_{EB0}$	5	V
Collector Current	$I_C$	15	A
Base Current	$I_B$	1.5	A
Collector Power Dissipation ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ )	$P_C$	150	W
Junction Temperature	$T_j$	150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-55~150	$^\circ\text{C}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ )

CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITION	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Collector Cut-off Current	$I_{CBO}$	$V_{CB} = 230\text{V}, I_B = 0$	—	—	5.0	$\mu\text{A}$
Emitter Cut-off Current	$I_{EBO}$	$V_{EB} = 5\text{V}, I_C = 0$	—	—	5.0	$\mu\text{A}$
Collector-Emitter Breakdown Voltage	$V_{(BR)CE0}$	$I_C = 50\text{mA}, I_B = 0$	230	—	—	V
DC Current Gain	$h_{FE(1)}$ (Note)	$V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 1\text{A}$	55	—	160	
	$h_{FE(2)}$	$V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 7\text{A}$	35	60	—	
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 8\text{A}, I_B = 0.8\text{A}$	—	0.40	3.0	V
Base-Emitter Voltage	$V_{BE}$	$V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 7\text{A}$	—	1.0	1.5	V
Transition Frequency	$f_T$	$V_{CE} = 5\text{V}, I_C = 1\text{A}$	—	80	—	MHz
Collector Output Capacitance	$C_{ob}$	$V_{CB} = 10\text{V}, I_B = 0, f = 1\text{MHz}$	—	200	—	pF

(Note) :  $h_{FE(1)}$  Classification R : 55~110, O : 80~160



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TOSHIBA****2SC5200****RESTRICTIONS ON PRODUCT USE**

000707EAA

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property. In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TOSHIBA****2SA1943**

TOSHIBA TRANSISTOR SILICON PNP TRIPLE DIFFUSED TYPE

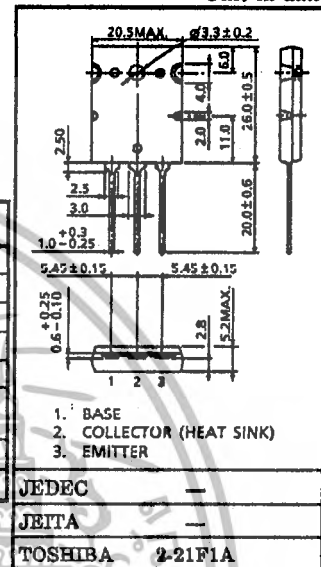
**2SA1943**

## POWER AMPLIFIER APPLICATIONS

- Complementary to 2SC5200
- Recommended for 100 W High Fidelity Audio Frequency Amplifier Output Stage.

MAXIMUM RATINGS (T<sub>c</sub> = 25°C)

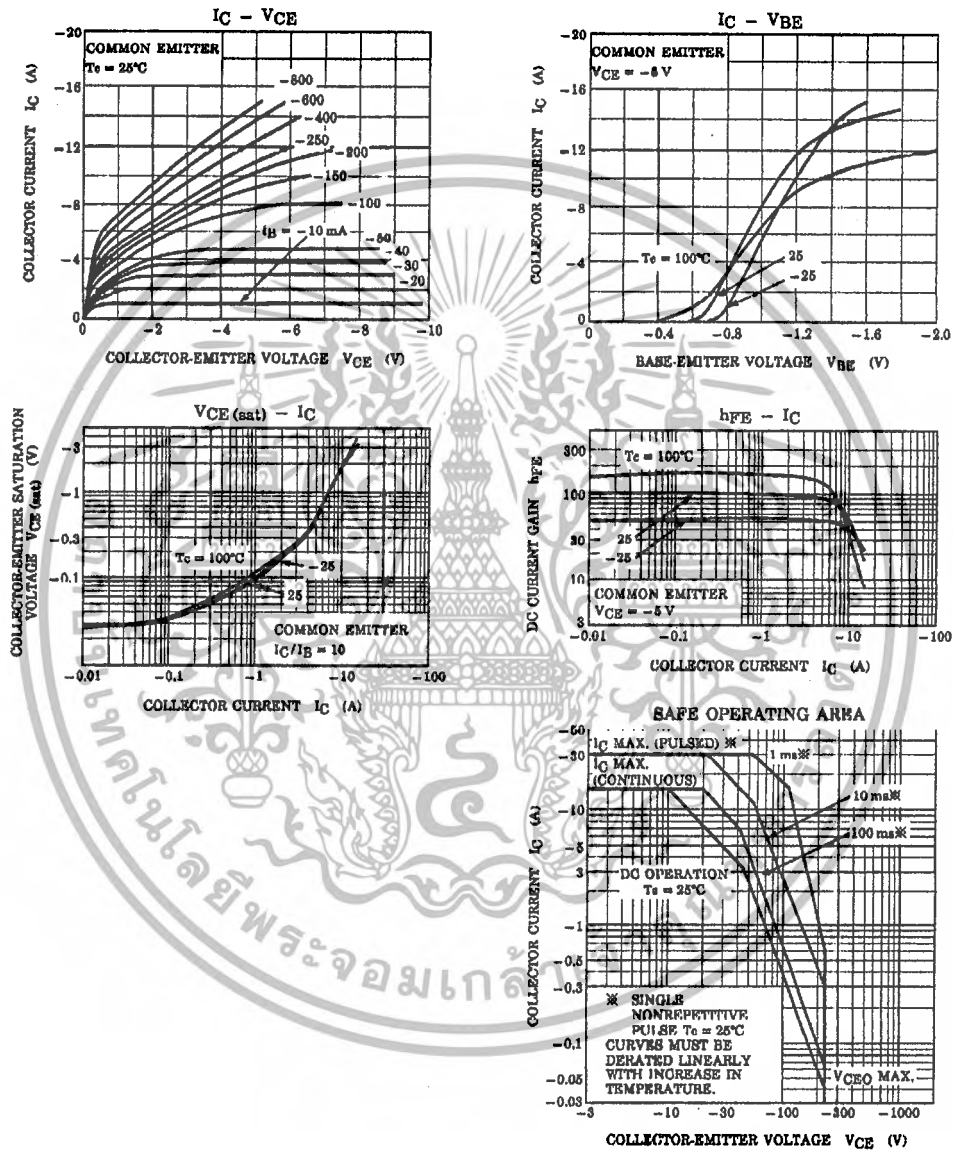
CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT
Collector-Base Voltage	V <sub>CB0</sub>	-230	V
Collector-Emitter Voltage	V <sub>CE0</sub>	-230	V
Emitter-Base Voltage	V <sub>EB0</sub>	-5	V
Collector Current	I <sub>C</sub>	-15	A
Base Current	I <sub>B</sub>	-1.5	A
Collector Power Dissipation (T <sub>c</sub> = 25°C)	P <sub>C</sub>	150	W
Junction Temperature	T <sub>j</sub>	150	°C
Storage Temperature Range	T <sub>stg</sub>	-55~150	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T<sub>c</sub> = 25°C)

Weight : 9.75 g (Typ.)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITION	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Collector Cut-off Current	I <sub>CBO</sub>	V <sub>CB</sub> = -230 V, I <sub>E</sub> = 0	—	—	-5.0	μA
Emitter Cut-off Current	I <sub>EBO</sub>	V <sub>EB</sub> = -5 V, I <sub>C</sub> = 0	—	—	-5.0	μA
Collector-Emitter Breakdown Voltage	V <sub>(BR)CEO</sub>	I <sub>C</sub> = -50 mA, I <sub>B</sub> = 0	-230	—	—	V
DC Current Gain	h <sub>FE</sub> (1) (Note)	V <sub>CE</sub> = -5 V, I <sub>C</sub> = -1 A	55	—	160	
	h <sub>FE</sub> (2)	V <sub>CE</sub> = -5 V, I <sub>C</sub> = -7 A	85	60	—	
Collector-Emitter Saturation Voltage	V <sub>CE(sat)</sub>	I <sub>C</sub> = -8 A, I <sub>B</sub> = -0.8 A	—	-1.5	-3.0	V
Base-Emitter Voltage	V <sub>BE</sub>	V <sub>CE</sub> = -5 V, I <sub>C</sub> = -7 A	—	-1.0	-1.5	V
Transition Frequency	f <sub>T</sub>	V <sub>CE</sub> = -5 V, I <sub>C</sub> = -1 A	—	30	—	MHz
Collector Output Capacitance	C <sub>ob</sub>	V <sub>CB</sub> = -10 V, I <sub>E</sub> = 0, f = 1 MHz	—	360	—	pF

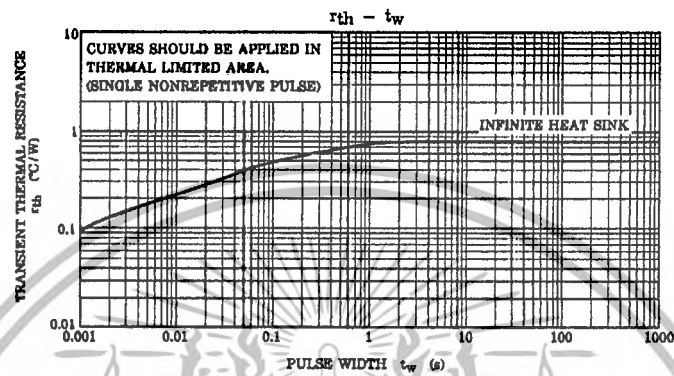
(Note) : h<sub>FE</sub> (1) Classification R : 55~110, O : 80~160



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA

2SA1943



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TOSHIBA****2SA1943****RESTRICTIONS ON PRODUCT USE**

000707EAA

- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property. In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA CORPORATION for any infringements of intellectual property or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any intellectual property or other rights of TOSHIBA CORPORATION or others.
- The information contained herein is subject to change without notice.

## ประวัติผู้เขียน



นายจิรวิช จิตถวิล เกิดวันที่ 8 ตุลาคม 2530 ที่จังหวัดอุบลราชธานี จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก ร.ร.เบ็ญจมะมหาราช จังหวัดอุบลราชธานี จบปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร



นายฐานา เมฆอรุณกมล เกิดวันที่ 6 มีนาคม 2531 ที่จังหวัด พิษณุโลก จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก ร.ร.จุฬารัตน์ ราชวิทยาลัยจังหวัดพิษณุโลก จบปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชา ไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร



นายชัชพล จิระมณี เกิดวันที่ 13 กรกฎาคม 2530 ที่จังหวัด สมุทรปราการ จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก ร.ร.สตรี สมุทรปราการจังหวัดสมุทรปราการ จบปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

# เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง Simulator and Programmable Power Supply for Power Electronics Equipment Validation

รัชพล จิรโมที จีรวิช จิตถวิล ฐาปนา เมฆอรุณภมล  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

## บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า และสร้างเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานแบบโปรแกรมได้ เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันกำลังสูงในการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ผลิตขึ้นก่อนนำไปติดตั้งจริงในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น อินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยทำการเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณแรงดันขนาดเล็กจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่างๆ ตามทฤษฎีคุณภาพกำลังไฟฟ้า เช่น การเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ แล้วนำสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์มาขยายผ่านวงจรรขยายเชิงเส้นกำลังสูงคลาสเอบี ให้สัญญาณไฟฟ้ามี่ขนาดพิกัดกำลังสูงสุดประมาณ 3 kW ที่แรงดันพิกัดเท่ากับ 311V<sub>p</sub> หรือ 220V<sub>rms</sub> ซึ่งจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทดสอบอุปกรณ์ได้จริงได้ในทางปฏิบัติ โดยไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายกำลังงานของจริงติดตั้งในห้องวิจัย

**คำสำคัญ :** เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้, เครื่องขยายคลาสเอบี

## Abstract

The design and implementation paradigm of simulator and programmable power supply for power electronics equipment validation are presented in this paper. A power electronics equipment, such as hybrid inverter, multilevel inverter and multilevel dc/dc converter will be tested before applied in micro grid system. Equipment test signal will be generated by microcontroller, and then these signals are amplified by using power amplifier class AB rated 3KW for magnifying signals. Finally this simulator and programmable power supply can be utilized to validate power electronics equipment instead of the real renewable energy resources.

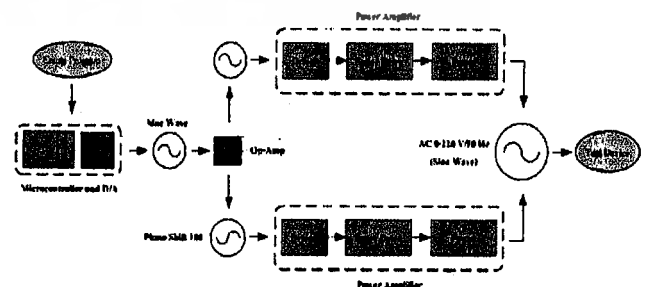
**Keywords :** Programmable Power Supply, Power Amplifier Class AB

## 1. บทนำ

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็ก หมายถึง การเชื่อมต่อระหว่างกลุ่มผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กกับกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ไม่ไกลจากกันมากนัก เป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นส่วนใหญ่ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และกังหันลม ซึ่งการที่จะนำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ ไปเชื่อมโยงเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กนั้น จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังนั้นจึงต้องมีการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้มีประสิทธิภาพสูงและสามารถติดตั้งใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนของจริงนั้น มีค่าไม่สม่ำเสมอสูงขึ้น อยู่กับการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมทำให้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า ซึ่งเราไม่สามารถทำการทดสอบได้ทุกสภาวะในห้องวิจัย อีกทั้งยังมีราคาแพงและไม่สะดวกที่จะทำการติดตั้งในห้องวิจัย ด้วยเหตุนี้การสร้างเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในห้องวิจัย

โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ ดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนการกำเนิดสัญญาณและส่วนการขยายสัญญาณ

เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้นี้ เป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ ที่เหมาะสมสำหรับการใช้ทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ทำให้เทคโนโลยีด้านการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังก้าวไปอีกขั้น กล่าวคือสามารถทดสอบได้ละเอียด สะดวก รวดเร็วและประหยัดมากขึ้น อีกทั้งอัตราการขยายตัวและพัฒนาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นไปได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานเครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คุณภาพกำลังไฟฟ้า (การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ)

ในการให้คำจำกัดความของปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ ตามมาตรฐาน IEC Standard และ IEEE Standard ได้ให้ความหมายของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะไว้ดังนี้

IEC Standard ได้ให้ความหมายไว้ว่า แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ คือ ปรากฏการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจากระดับปกติอย่างทันทีทันใด และคืนกลับสู่สภาวะปกติภายในระยะเวลา 0.5 cycle ถึงประมาณ 2-3 วินาที โดยระดับแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ

IEEE Standard ได้ให้ความหมายไว้ว่า แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 p.u. จากระดับแรงดัน RMS ปกติ ตามประเภทของแรงดันไฟฟ้าตก ดังนี้

- ทันทีทันใด (Instantaneous) : 0.5-30 cycles
- ชั่วขณะ (Momentary) : 30 cycles + 3 sec
- ชั่วคราว (Temporary) : 3 sec-1 min

### 2.2 วงจรกำเนิดสัญญาณ

การคำนวณฟังก์ชัน  $Sin ()$  ตามสมการที่ 1 เก็บค่าไว้ในรูปแบบของตาราง (Lookup Table) จำนวน 180 ค่า

$$y = 128 + m_n 128 \sin \left( 2P \times \frac{\pi}{180} \right) \quad (1)$$

โดยที่ P คือ การแบ่งช่วงของรูปคลื่นไซน์ (0-2 $\pi$ ) เป็น 180 จุด  
 $m_n$  คือ ค่าแอมพลิจูดของรูปคลื่นไซน์

### 2.3 วงจรขยายเชิงเส้น

#### 2.3.1 วงจรขยายเชิงเส้นคลาสเอ

วงจขยายคลาสเอ คือ วงจขยายสัญญาณที่มีจุดการทำงาน (Q-Operation) อยู่กึ่งกลางเส้น AC Load line เป็นผลทำให้มีการไบอัสทรานซิสเตอร์ตลอดไซเคิลของสัญญาณขาเข้า ไม่ว่าจะมีสัญญาณขาเข้าหรือไม่ ทำให้ได้สัญญาณขาออกที่มีความผิดเพี้ยนจากสัญญาณขาเข้า น้อยมาก แต่มีข้อเสีย คือ ทรานซิสเตอร์จะทำงานอยู่ตลอดเวลาจึงทำให้เกิดความร้อนสูง จึงมีประสิทธิภาพต่ำ

#### 2.3.2 วงจขยายเชิงเส้นคลาสบี

วงจขยายคลาสบี มีจุดการทำงาน (Q-Operation) อยู่ที่จุดศูนย์ (cut off) การไบอัสทรานซิสเตอร์เพียงครึ่งไซเคิลของสัญญาณขาเข้า จึงต้องใช้ทรานซิสเตอร์สองตัว (NPN, PNP) ทำการไบอัสตัวละครึ่งไซเคิล การไบอัสแบบนี้เรียกว่า Push Pull Complementary ทำให้มีประสิทธิภาพสูง เพราะไม่เกิดการสูญเสียขณะไม่มีสัญญาณขาเข้า แต่มีข้อเสีย คือ ช่วงที่ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว สลับกันทำงานระหว่างด้านบวกและด้านลบจะเกิดการผิดเพี้ยนช่วงรอยต่อของสัญญาณหรือที่เรียกว่า Cross over distortion

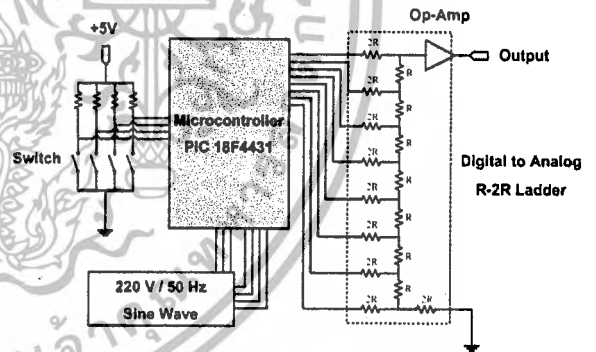
### 2.3.3 วงจขยายเชิงเส้นคลาสเอบี

วงจขยายคลาสเอบี กำหนดให้มีจุดทำงาน (Q-Operation) ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองให้อยู่ระหว่าง อยู่เหนือจุด Cut-off ขึ้นไปบนเส้น AC Load line เล็กน้อย การไบอัสจะอยู่ในช่วงระหว่างครึ่งไซเคิลถึงเต็มไซเคิล ทรานซิสเตอร์จะนำกระแสเล็กน้อยขณะไม่มีสัญญาณขาเข้า โดยทำให้เกิดความผิดเพี้ยนช่วงรอยต่อ (Cross over distortion) กล่าวได้ว่าวงจขยายคลาสเอบี คือ วงจขยายที่นำเอาข้อดีของวงจขยายคลาสเอและวงจขยายคลาสบีมารวมกัน ทำให้มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำเหมือนคลาสเอและมีประสิทธิภาพสูงเหมือนคลาสบี

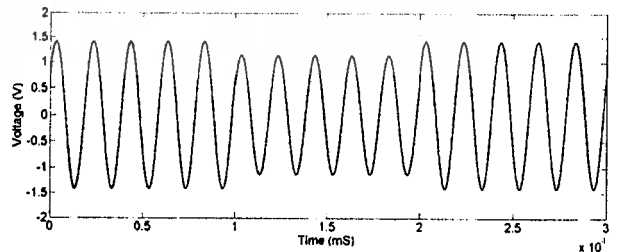
## 3. การออกแบบและการจำลองโดยคอมพิวเตอร์

### 3.1 ส่วนการกำเนิดสัญญาณ

เขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ตามสมการที่ 1 ต่อผ่านวงจรมแปลงผันสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (Digital to Analog Converter) ชนิด R-2R Ladder ขนาด 8 บิตได้เป็นสัญญาณที่มีลักษณะรูปคลื่นไซน์ปกติที่มีแอมพลิจูดประมาณ 1V<sub>rms</sub> ความถี่ที่ 50 Hz สามารถโปรแกรมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันตามทฤษฎีของคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้ เช่น การเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag) ส่วนออปแอมป์ (Op-Amp) ทำหน้าที่ควบคุมระดับความแรงของสัญญาณและกลับเฟสของสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ก่อนเข้าวงจขยายซึ่งเป็นส่วนถัดไป



รูปที่ 2 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์กำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 3 การจำลองสัญญาณ จากไมโครคอนโทรลเลอร์

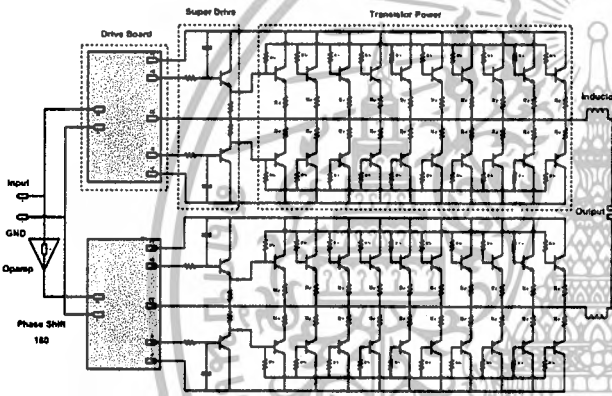
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ส่วนการขยายสัญญาณ

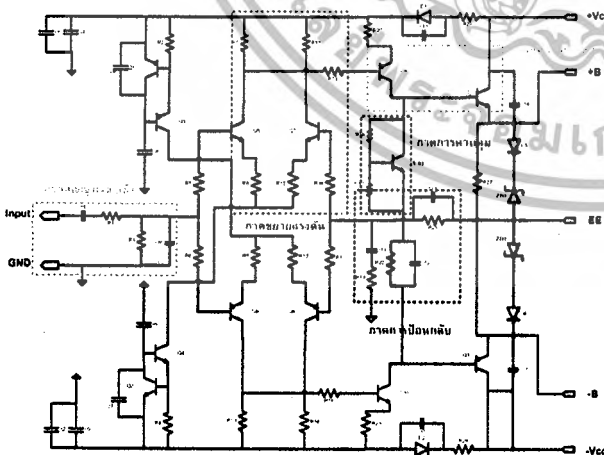
ส่วนการขยายสัญญาณ เพิ่มขนาดของสัญญาณแรงดันจากไมโครคอนโทรลเลอร์ให้สูงขึ้นเพื่อสำหรับใช้ในทดสอบจริงกับอุปกรณ์ในการออกแบบจะใช้วงจขยายชนิดที่เป็นแบบเชิงเส้นคลาสเอบี (Class AB power amplifier) เพราะมีคุณภาพของสัญญาณที่ดี กล่าวคือ มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้านขาออกต่อสัญญาณด้านขาเข้าน้อยมากและมีประสิทธิภาพสูงถึง 78.5% ตามทฤษฎี

เนื่องจากต้องการแรงดันด้านขาออก  $311V_p$  ( $220V_{rms}$ ) จึงออกแบบให้ใช้วงจขยายแบบเชิงเส้นคลาสเอบีจำนวน 2 วงจร ทำการขับสัญญาณแรงดันกลับเฟสกัน 180 องศา ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันคร่อมแต่ละวงจไม่สูงมากนัก วงจขยายสัญญาณเชิงเส้นกำลังสูงคลาสเอบีแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 4-5

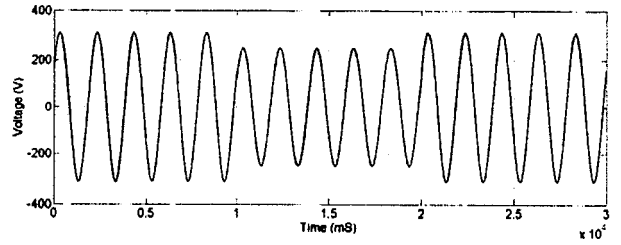
1. ส่วนการขับสัญญาณ (Drive)
2. ส่วนการขับสัญญาณสูงยิ่ง (Super drive)
3. ส่วนการขยายกำลัง (Power output)



รูปที่ 4 วงจขยายสัญญาณกำลังสูงคลาสเอบี 2 วงจร



รูปที่ 5 วงจรขับสัญญาณ (Drive Board)



รูปที่ 6 การจำลองสัญญาณ ที่ผ่านวงจขยายเชิงเส้นคลาสเอบี

### 4.ผลการทดสอบชิ้นงานจริง

ประกอบชิ้นงานแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน ตั้งโครงพื้นฐานในรูปที่ 1 จะได้เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้

ทำทดสอบวงจกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่เกิดแรงดันตกช่วงระยะเวลาไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า สัญญาณมีแรงดันปกติ  $1.45V_p$  และเมื่อสัญญาณเกิดแรงดันตกช่วงมีแรงดัน  $1.15V_p$  ผลต่างของแรงดันประมาณ  $0.3V_p$  คิดเป็น 20 % ของแรงดันปกติ

ทำการทดสอบวงจขยายเชิงเส้นคลาสเอบี ใช้สัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณขาเข้า เมื่อผ่านวงจขยายแล้วได้สัญญาณขาออกดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า สัญญาณที่ได้มีลักษณะเหมือนกับสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่มีพิกัดแรงดันเพิ่มขึ้น คือ มีแรงดันปกติที่  $311V_p$  และเมื่อสัญญาณเกิดแรงดันตกช่วงมีแรงดัน  $248V_p$  ผลต่างแรงดันประมาณ  $63V_p$  คิดเป็น 20% ของแรงดันปกติ

ทำการทดสอบเมื่อเครื่องต้นแบบขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW จะเห็นได้ว่า สัญญาณแรงดันตกลงเหลือ  $216.62V_{rms}$  และได้สัญญาณกระแส  $4.05A$  ดังรูปที่ 9

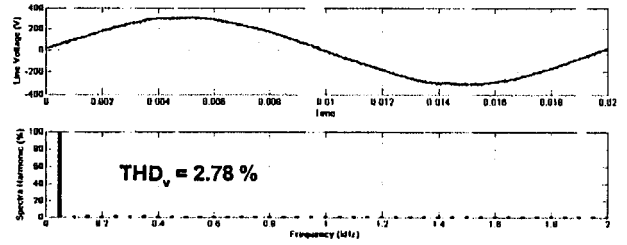
ทำการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องขณะทำการขับภาระทางไฟฟ้าที่ 1 kW ตามสมการที่ 2 ได้ค่าประสิทธิภาพประมาณดังนี้

$$\begin{aligned}
 EFF &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (2) \\
 &= \frac{(216.62)(4.05)}{(240)(4.28)} \times 100 \% \\
 &= 85.4 \%
 \end{aligned}$$

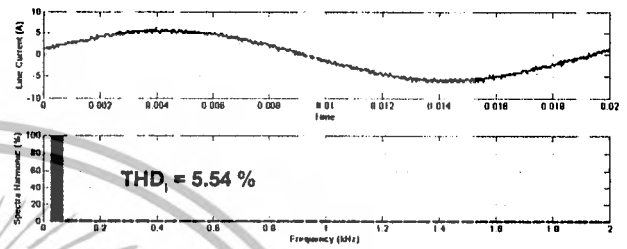
ทำการคำนวณค่าความผิดเพี้ยนของเครื่อง โดยเก็บข้อมูลผลการทดสอบจาก Oscilloscope มาทำการคำนวณในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จะได้ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไซน์ (Total Harmonic Distortion: THD<sub>v</sub>) เท่ากับ 2.78% ดังรูปที่ 10 และได้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไซน์ (Total Harmonic Distortion: THD<sub>i</sub>) เท่ากับ 5.45% ดังรูปที่ 11

ทำการคำนวณ %Voltage Regulation ขณะเครื่องขับภาระทางไฟฟ้า 1kW ได้ตามสมการที่ 3 ดังนี้

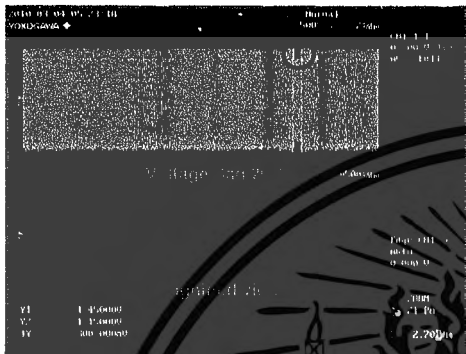
$$\begin{aligned} \% (V_{\text{Regulation}}) &= \frac{V(\text{no load}) - V(\text{full load})}{V(\text{no load})} \times 100 \quad (3) \\ &= \frac{220.22 - 216.622}{220.22} \times 100\% \\ &= 1.633\% \end{aligned}$$



รูปที่ 10 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดัน ขณะขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW



รูปที่ 11 ค่าความผิดเพี้ยนของกระแส ขณะขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW



รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 8 สัญญาณแรงดันที่ผ่านวงจรมายาเซิงเส้นกลาสเอบี



รูปที่ 9 สัญญาณแรงดันและกระแสขณะขับภาระทางไฟฟ้า 1 kW

## 5.สรุป

เครื่องจำลองแหล่งจ่ายกำลังงานโปรแกรมได้ มีความเหมาะสมในการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในห้องวิจัย โดยสามารถโปรแกรมลักษณะแรงดันรูปแบบต่างๆ ได้ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนขยายสัญญาณมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่น้อยมาก ทำให้มีความน่าเชื่อถือของแรงดันทดสอบสูง มีราคาถูกและสะดวกในการติดตั้งใช้งาน

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุน จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการ IRPUS ทางคณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Charles Alexander and Matthew Sadiku, *Fundamentals Of Electric Circuits*, McGraw – Hill Third Edition 2007
- [2] D.V. Bugg, *Electronics: Circuits, Amplifiers and Gates*, Second Edition 2006
- [3] Peter Staric and Erik Margan, *Wideband Amplifiers* 2007
- [4] Pederson, D.O., *Electronic Circuits*, New York : McGraw-Hill, 1965, (Prolimed.) , Chapter 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จี้รวิษั จิตถวิล , ฐาปนา เมฆอรุณกมล , รัชพล จิรโมฬี  
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)

- สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สามารถโปรแกรมได้ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
- ออกแบบและสร้างเครื่องขยายกำลังสูง
- เพื่อนำไปทดสอบจริง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้
- เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีใหม่ ที่จะเข้ามาในอนาคต เช่น เครื่องจำลองสัญญาณ (Opal-RT)

