

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษากระแสรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
A STUDY OF LEAKAGE CURRENT IN INDUCTION MOTOR



T104267



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 104267  
วัน,เดือน,ปี..... 30 ต.ค. 2552

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

การศึกษากระแสรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

A STUDY OF LEAKAGE CURRENT IN INDUCTION MOTOR



โดย

นาย พัทธ ปานดอนลาน

นางสาว วรณวิสาข์ คำเกิด

นาย วัชนิกร ชันกสิกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต ล้ำยอง

อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากระแสรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ

- 
1. นายพัชระ ปานดอนลาน
  2. นางสาววรรณวิสาข์ คำเกิด
  3. นายวัชนิกร ชั่นกสิกรรม

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( รองศาสตราจารย์ พิเชิต ล้ายอง )

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( อาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษากระแสรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

นาย พัทธระ ปานดอนลาน

นางสาว วรณวิสาข์ คำเกิด

นายวัชนิกร ชันกสิกรรม

รองศาสตราจารย์ พิเชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

การใช้งานอินเวอร์เตอร์ในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบันเป็นแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์เพื่อปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลความถี่สูงในระบบ การทำงานของอินเวอร์เตอร์มีผลต่อลักษณะของกระแสรั่วไหลดังนี้คือ ค่า  $dv/dt$  ของแรงดันด้านออกที่สูง ทำให้ขนาดค่ายอดของกระแสรั่วไหลมีค่าสูงขึ้น และการเพิ่มความถี่การสวิตช์ทำให้ผลรวมของกระแสรั่วไหลมากขึ้นตามจำนวนครั้งของการสวิตช์ เมื่อพิจารณาจากวงรอบการไหลของกระแสรั่วไหลที่ผ่านกราวด์กลับเข้าสู่ระบบจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระแสรั่วไหลลงกราวด์นี้ ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่นๆ ที่ต่อร่วมอยู่ในระบบไฟฟ้าเดียวกันได้เช่น ตัวตรวจจับกระแสรั่วไหล (Earth Leakage Current Breaker) เกิดการตัดตอน สัญญาณจากตัวตรวจรู้ในระบบถูกรบกวนกระแสรั่วไหลโดยส่วนใหญ่จะไหลผ่านค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งความจุไฟฟ้าสเตรย์ที่อยู่ระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์ ซึ่งมีผลต่อกระแสมากที่สุดและมีความสัมพันธ์กับความถี่ที่สูงขึ้น ปริญญาโทนี้ได้ศึกษาการเกิดกระแสรั่วไหลที่เกิดจากค่าความต้านทานฉนวนที่เปลี่ยนแปลงลดลงจามค่าความถี่ที่สูงขึ้น รวมถึงวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของกระแสรั่วไหลด้วยการใช้สัญญาณรูปไซน์เพื่อศึกษาวงจรสมมูลภายในมอเตอร์ระหว่างขดลวดกับโครงของมอเตอร์ แล้วทำการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดของกระแสรั่วไหลผ่านวงจรสมมูลดังกล่าว

**A STUDY OF LEAKAGE CURRENT IN INDUCTION MOTOR**

Patchara Pandonlan

Wanvisa Kamgerd

Watchanikhon Khankasigam

Assoc.Prof. Pichit Lumyong

Advisor

Piampoom Sarikprueck

Advisor

2008

**ABSTRACT**

At present time, using the PWM inverter in an industry for an adjustable induction motor with 3 phase leads to the problem of high frequency leakage current. When the inverter operates, it affects the character of leakage current; at the high  $dv/dt$  of output voltage, it makes the amplitude of leakage current become higher and increasing switching-frequency makes the sum total of leakage current rise following with the times of switching. After considering the loop flows of leakage current which flows past the ground and return to the system, it is obvious that the leakage current will affect other equipments which are connected with the same system as well, for example, Earth Leakage Current Breaker will be cut and the sensor signal of the system will be disturbed. Most of the leakage current will flow past stray capacitors, especially the ones that are at the input terminal of the stator coil. The part of stray capacitors which are easily affected will be the ones that occur between the stator coil and the frame that is the most affect and it has relation with the rise frequency. This thesis is to study the leakage current that cause by the resistance of the insulation for decrease variation following the increase frequency. Include analyze the characteristics of leakage current by using the sine signal for studying the internal equivalent circuit between coil and frame of the motor. Then, there will be the characteristic analysis of the causes of leakage current from the equivalent circuit

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการนัฐศึกษาซึ่งต่อความกรุณาที่ รศ. พิชิต ล้ายอง และ อาจารย์เปี่ยมภูมิ สฤกพฤษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ และผู้จัดทำต้องขอขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ EMRL ที่คอยเอาใจใส่ คอยถามไถ่ตลอดเวลา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอพระคุณบิดา มารดาและผู้มีพระคุณทั้งหลายที่คอยส่งเสียเงินทองและคอยเป็นกำลังใจ ให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	3
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ผลกระทบของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ต่อระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.2 กระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำนำด้วยอินเวอร์เตอร์และวิธีการลดทอน.....	13
2.3 พฤติกรรมการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์.....	15
2.4 พฤติกรรมและการไหลของกระแสไหลรวมภายในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	20
บทที่ 3. การออกแบบวงจรและการทดลอง.....	23
3.1 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณสวิตช์.....	23
3.1.1 วงจรควบคุม.....	23
3.1.2 วงจรกำลัง.....	30
3.2 การออกแบบรูปแบบการทดลอง.....	32

บทที่ 4. ผลการทดลอง.....	37
4.1 ผลการทดลองการสร้างสัญญาณสวิตช์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม.....	37
4.2 ผลการทดลองเพื่อศึกษากระแสรั่วไหล.....	40
บทที่ 5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 บทสรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะ.....	67
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ.....	67
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 เส้นทางของกระแสรั่วไหลที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตช์แรงดัน.....	1
1.2 กระแสไหลลงกราวด์ผ่านแปรง.....	2
2.1 ผลกระทบที่เกิดจากการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	7
2.2 แบบจำลองของสายเคเบิลในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์.....	8
2.3 ผลกระทบจากแรงดันโหมตปกติในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM.....	9
2.4 ตำแหน่งการวัดแรงดันโหมตร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ด้านนอก ของอินเวอร์เตอร์.....	10
2.5 กระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM.....	12
2.6 ความจุไฟฟ้าสเตรย์ภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	13
2.7 การติดตั้งวงจรกรองที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์.....	14
2.8 ลักษณะการสวิตช์กับแรงดันโหมตปกติและโหมต ร่วมที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์.....	16
2.9 ลักษณะของแรงดันโหมตปกติที่ด้านนอกของอินเวอร์ เตอร์ซึ่งพิจารณาจากแรงดันระหว่างสายและแรงดันเฟส.....	17
2.10 ลักษณะแรงดันโหมตร่วมที่ด้านนอกของอินเวอร์เตอร์ ( $v_{cm}$ ) ที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz.....	18
2.11 ลักษณะแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการมอดูเลตแบบ PWM ใน 1 คาบการสวิตช์.....	19
2.12 แรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่การสวิตช์ 5kHz.....	20
2.13 ทางเดินของกระแสรั่วไหลภายในระบบปรับความเร็ว รอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทั่วไป.....	21
2.14 ทางเดินของกระแสรั่วไหลภายในระบบปรับความเร็วรอบ มอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้เบตเตอร์เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง.....	22
3.1 บล็อกการทำงานของวงจรควบคุม.....	24

3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่ใช้ในปริภูมิพาณิชย์.....	25
3.3 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับขั้ว.....	25
3.4 วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณ.....	26
3.5 วงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรรีบสัญญาณด้านลบ วงจรเพื่อเวลา (Dead Time Circuit).....	26
3.6 วงจรการทดลองของ Dead Time.....	27
3.7 วงจรขับสวิตช์.....	28
3.8 ลักษณะการต่อวงจรขับ.....	29
3.9 วงจรจ่ายไฟตรงของวงจรควบคุม.....	30
3.10 วงจรจ่ายไฟตรงของวงจรขับเคลื่อน.....	30
3.11 การต่อตัวต้านทานเข้ากับไอจีบีที.....	31
3.12 วงจรจ่ายแรงดันด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์.....	31
3.12 วงจรการทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดันกระแสตรง.....	32
3.13 รูปแบบการต่อวงจรการทดลอง.....	33
3.14 วงจรการทดสอบความถี่สูงของฉนวนมอเตอร์ ผ่านชุดสวิตช์แรงดันแบบสี่เหลี่ยม.....	35
4.1 สัญญาณไซน์ 3 เฟส ที่ความถี่ 1 kHz.....	37
4.2 สัญญาณไซน์ 3 เฟส ที่ความถี่ 20 kHz.....	37
4.3 สัญญาณสี่เหลี่ยม 3 เฟส ที่ความถี่ 1 kHz.....	38
4.4 สัญญาณสี่เหลี่ยม 3 เฟส ที่ความถี่ 20 kHz.....	38
4.5 ค่าเพื่อเวลา 5.56 $\mu$ S ที่ความถี่ 1 kHz.....	39
4.6 ค่าเพื่อเวลา 5.22 $\mu$ s ที่ความถี่ 10 kHz.....	39
4.7 ลักษณะแรงดันไลน์ที่ความถี่สวิตช์ 5 kHz.....	40
4.8 ลักษณะแรงดันไลน์ที่ความถี่สวิตช์ 10 kHz.....	40
4.9 ลักษณะการต่อวงจรทดลองการหาค่าความต้านทานกระแสตรง.....	41
4.10 การวัดแรงดันบ็อนเข้าและแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน.....	42
4.11 ผลการหาค่าความต้านทานของมอเตอร์ฟิสิกส์ต่าง ๆ.....	44
4.12 ลักษณะการต่อวงจรเพื่อหาค่า Insulation Impedance ที่ความถี่ต่าง ๆ.....	44
4.13 ตัวอย่างรูปคลื่นที่วัดได้จากสโคปที่ความถี่ 30 kHz ของมอเตอร์ฟิสิกส์ 3 hp.....	45
4.14 การวัดค่าความต่างเฟส ของรูปคลื่น.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.15 เปรียบเทียบกระแสที่ไหลผ่านค่าตัวต้านทาน R และ $X_c$ พิกัดแรงดัน 220 $V_{rms}$ .....	52
4.16 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impedance (R,Xc) ที่ความถี่ต่างๆ.....	54
4.17 วงจรสมมูลย์ของฉนวนระหว่างขดลวดมอเตอร์กับตัวถังมอเตอร์.....	55
4.18 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ ( $R_f$ ) ของมอเตอร์พิกัดต่างๆ.....	56
4.19 วงจรการทดสอบความถี่สูงของฉนวนมอเตอร์ ผ่านชุดสวิตช์แรงดันแบบสี่เหลี่ยม.....	57
4.20 วงจรสมมูลย์เมื่อต่อตัวต้านทานภายนอก.....	58
4.21 ตัวอย่างลักษณะรูปกราฟที่ได้จากการวัด เมื่อป้อนสัญญาณแบบพัลส์สี่เหลี่ยม 1 เฟส.....	58
4.22 ลักษณะของกระแสรั่วไหลผ่านตัวเก็บประจุ เทียบกับแรงดันที่ความถี่สวิตช์ 5 kHz .....	59
4.23 ลักษณะของกระแสรั่วไหลผ่านตัวเก็บประจุ ที่ความถี่สวิตช์ 5 kHz แบบสามเฟส.....	60
4.24 การวัดค่าคงที่เวลาเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้า.....	61
4.25 ลักษณะค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานภายในมอเตอร์.....	64
4.26 วงจรสมมูลย์ของฉนวนแบบสามเฟสภายในมอเตอร์.....	65
4.27 กระแสรั่วไหลผ่านตัวต้านทาน 5K เมื่อป้อนแรงดันแบบ 1 เฟส ที่ความถี่ 5k.....	65
4.28 กระแสรั่วไหลผ่านตัวต้านทาน 5K เมื่อป้อนแรงดันแบบ 3 เฟสที่ความถี่ 5k.....	66
4.29 กระแสรั่วไหลผ่านตัวต้านทาน 1 K เมื่อป้อนแรงดันแบบ 1 เฟสที่ความถี่ 20 k.....	67
4.30 กระแสรั่วไหลผ่านตัวต้านทาน 1 K เมื่อป้อนแรงดันแบบ 3 เฟสที่ความถี่ 20 k.....	67
5.1 วงจรสมมูลย์ของฉนวนมอเตอร์ระหว่างขดลวดกับตัวถังมอเตอร์.....	68

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแสดงแผนการดำเนินการ.....	5
2.1 ลักษณะแรงดันต้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จาก การเปลี่ยนสถานะการณีสวิตช์.....	19
3.1 ตัวอย่างตารางหาค่าความต้านทานของฉนวนมอเตอร์.....	33
3.2 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าความต้านทานฉนวน.....	34
3.3 ตัวอย่างตารางผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรง ดันสี่เหลี่ยมแบบป้อนสัญญาณ 1 เฟส.....	36
3.4 ตัวอย่างตารางผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรง ดันสี่เหลี่ยมแบบป้อนสัญญาณ 3 เฟส.....	36
4.1 ค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์ ที่วัดได้ของมอเตอร์ 3 เฟส พิกัด 1 HP .....	42
4.2 ค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์ ที่วัดได้ของมอเตอร์ 3 เฟส พิกัด 3 HP .....	43
4.3 ค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์ ที่วัดได้ของมอเตอร์ 3 เฟส พิกัด 5 HP .....	43
4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความ ถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ พิกัด 1 hp พิกัดแรงดัน 180 V <sub>rms</sub> .....	47
4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความ ถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ พิกัด 1 hp พิกัดแรงดัน 220 V <sub>rms</sub> .....	48
4.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความ ถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ พิกัด 3 hp พิกัดแรงดัน 180 V <sub>rms</sub> .....	48
4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความ ถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ พิกัด 3 hp พิกัดแรงดัน 220 V <sub>rms</sub> .....	49
4.8 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความ ถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ พิกัด 5 hp พิกัดแรงดัน 180 V <sub>rms</sub> .....	49
4.9 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความ ถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ พิกัด 5 hp พิกัดแรงดัน 220 V <sub>rms</sub> .....	50
4.10 ตารางสรุปค่าความจุไฟฟ้าของมอเตอร์ที่พิกัดต่าง ๆ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 ค่าความต้านทานที่ ( $R_f$ ) เปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่พิกัด มอเตอร์ขนาดต่าง ๆ .....	56
4.12 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยม ที่เวลาที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์พิกัด 3 เฟส 1 HP .....	62
4.13 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยม ที่เวลาที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์พิกัด 3 เฟส 3 HP .....	62
4.14 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยม ที่เวลาที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์พิกัด 3 เฟส 5 HP .....	63
4.15 การเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าระหว่างป้อน สัญญาณไซน์เทียบกับวิธีป้อนสัญญาณพัลส์แบบสี่เหลี่ยม .....	63
4.16 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยม แบบสามเฟสที่เวลาที่ ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์พิกัด 3 เฟส 1 HP .....	64



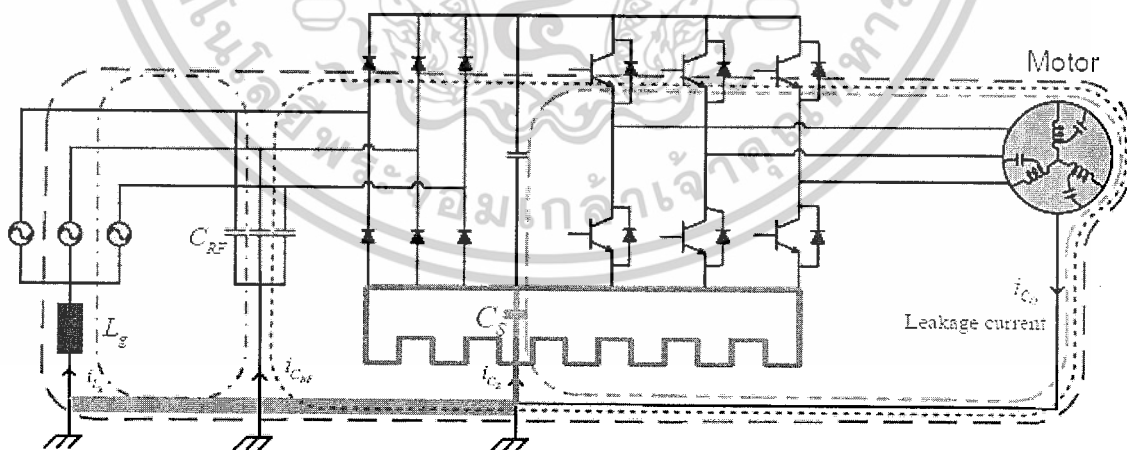
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

เนื่องจากปัจจุบันนี้มีการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ร่วมกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ (Inverter Drive) ในโรงงานอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไป Inverter เหล่านี้จะใช้เทคนิคในการสวิตช์แรงดันแบบ PWM ที่ใช้ความถี่อ้างอิง (Carrier Frequency) ในการขับเคลื่อนสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีค่าและจะมีผลของฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลเสียกับตัวมอเตอร์ ส่วนหนึ่งคือเกิดกระแสรั่วไหลลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ระหว่างขดลวดและเฟรมของมอเตอร์

การพัฒนาอินเวอร์เตอร์ให้สามารถเพิ่มความถี่การสวิตช์ได้สูงขึ้นเพื่อประโยชน์ในเชิงฮาร์มอนิกส์ของสัญญาณแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ทั้งนี้แรงดันที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีรูปคลื่นแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน (dv/dt) สูง อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูงนี้ประกอบกับองค์ประกอบปรสิต (parasitic element) ภายในสายไฟและมอเตอร์ ได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ (stray capacitance) และค่าความเหนี่ยวนำสเตรย์ (stray inductance) เป็นเหตุปัจจัยในการกระตุ้นให้เกิดองค์ประกอบของกระแสและแรงดันความถี่สูงซึ่งทำให้เกิดปัญหาการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าความถี่สูงที่มอเตอร์ในที่สุดนอกเหนือไปจากผลกระทบที่เกิดจากกระแสรั่วไหลแล้วองค์ประกอบของกระแสและแรงดันที่ความถี่สูงนี้ยังสามารถทำให้เกิดความเสียหายแก่มอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ได้อีกด้วย

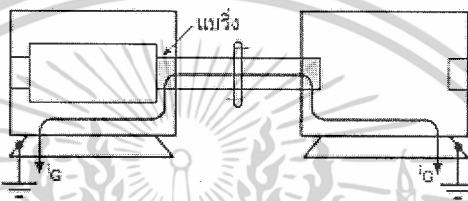


ภาพที่ 1.1 เส้นทางของกระแสรั่วไหลที่เกิดจากอุปกรณ์สวิตช์แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสรั่วไหลของมอเตอร์นี้ก็จะสร้างความเสียหายให้กับมอเตอร์ในรูปแบบต่าง ๆ ที่เห็นชัดก็มีเช่น

1. สร้างสัญญาณรบกวนการทำงานของตัวตรวจจับความเร็วรอบ ส่งผลให้ระบบควบคุมทำงานผิดพลาด
2. ถ้ากระแสไหลผ่านแบร็ริงของมอเตอร์ก็จะทำให้แบร็ริงของมอเตอร์เสียหายเร็วขึ้น และถ้าผ่านแบร็ริงของ มอเตอร์ลงเฟลาและไปผ่านแบร็ริงของไหลดลงกราวด์ แบร็ริงของไหลดก็จะเสียหายไปด้วย



ภาพที่ 1.2 กระแสไหลลงกราวด์ผ่านแบร็ริง

3. กระแสที่ไหลผ่านลงดินเหล่านี้จะเต็มไปด้วยกระแสฮาร์โมนิกซึ่งหากจุดบกพร่องของมอเตอร์อยู่ห่างจากหม้อแปลงเป็นระยะทางพอสมควรซึ่งหมายถึงว่ากราวด์บริเวณนั้นมักไม่เป็นศูนย์จริง แต่มักมีอิมพีแดนซ์ของกราวด์อยู่ค่าหนึ่ง เมื่อกระแสฮาร์โมนิกไหลผ่านอิมพีแดนซ์นั้นก็ทำให้เกิดแรงดัน ขึ้นที่กราวด์ของมอเตอร์และทำให้กราวด์บริเวณนั้นถูกยกขึ้นด้วยแรงดันดังกล่าวและเนื่องจากกระแสเป็นกระแสที่เต็มไปด้วยฮาร์โมนิก ทำให้แรงดัน ที่กราวด์ของมอเตอร์เป็นแรงดัน ที่เต็มไปด้วยฮาร์โมนิก เมื่อเป็นเช่นนั้น หากอุปกรณ์ไฟฟ้าใดต่อกราวด์เข้ากับบริเวณนั้น อุปกรณ์ไฟฟ้านั้นก็จะรับเอาฮาร์โมนิกผ่านกราวด์นั้นไปด้วย
4. หากมีกระแสรั่วไหลลงกราวด์มากเกินไปในกรณีที่โรงงานหนึ่งใช้งานมอเตอร์หลายตัวและใช้จุดกราวด์ร่วมกัน อาจทำให้ระบบป้องกันลงดิน (Ground Protection) ทำงานได้ ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายต่อกระบวนการผลิตได้
5. ทำให้อุปกรณ์ขั้วมอเตอร์ต้องรับภาระหนักขึ้นเนื่องจากต้องจ่ายให้กับกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น

การศึกษาถึงสาเหตุของการเกิดกระแสรั่วไหลจึงต้องเริ่มต้นที่การศึกษาถึงลักษณะการเกิดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่ายในแบบสัญญาณปกติ (รูปไซน์) ที่ส่งผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ภายในรวมถึงลักษณะวงจรสมมูลย์ของฉนวนระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์ด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาลักษณะของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจาก Inverter ที่มีกาสวิตช์แรงดันแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม
2. เพื่อศึกษาการทดสอบหาค่า Insulation impedance of induction motor
3. เพื่อศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์และสร้างแรงจ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ใช้การสวิตช์แบบสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 1 kHz – 20 kHz
4. เพื่อศึกษาลักษณะของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์โดยใช้แหล่งจ่ายที่สร้างขึ้น
5. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะของรูปคลื่นที่ความถี่ต่างๆ และสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลเพื่อยืนยันผลได้
6. เพื่อศึกษาวิธีการแก้ปัญหาหรืออธิบายแนวทางในการแก้ปัญหาได้

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาวิธีทดสอบหาค่า Insulation impedance of induction motor
2. ศึกษาลักษณะของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นจาก Inverter
3. ศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์
4. สร้างแรงจ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบที่ใช้การสวิตช์แบบสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 1 kHz – 20 kHz จ่ายให้กับขดลวดมอเตอร์
5. ทำการทดสอบจนจบของมอเตอร์
6. ทดสอบและเก็บข้อมูลที่ได้ที่ความถี่ต่างๆ
8. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาผลกระทบของแรงดันที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ที่มีต่อฉนวนระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์
2. ทดสอบหาค่า Insulation Impedance ของฉนวนโดยการป้อนสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ต่างๆ กับมอเตอร์พิกัด 1,3 และ 5 แรงม้า ตามลำดับ
3. นำผลที่ได้มาวิเคราะห์และดูลักษณะแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของฉนวนระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์ แล้ววิเคราะห์เพื่อหาวงจรสมมูล
4. ทดสอบถูกต้องของวงจรสมมูลที่ได้ โดยการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าทดสอบโดยให้มีการสวิตช์รูปคลื่นแรงดันแบบสี่เหลี่ยมที่สามารถปรับความถี่สวิตช์ได้ตั้งแต่ 1k -20k Hz แล้วป้อนแรงดันให้กับมอเตอร์ ที่มีการสวิตช์แบบสี่เหลี่ยมจากวงจรที่สร้างแล้วทำการวัดลักษณะของกระแส Leakage ที่เกิดขึ้น
5. นำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบแล้ววิเคราะห์ผลของข้อมูล
6. สรุปและนำเสนอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	June 2008				July 2008				August 2008				September 2008				October 2008				November 2008				December 2008				January 2009				February 2009			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. ศึกษาการทำงานของ Inverter ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ				→																																
2. ออกแบบสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงให้กับมอเตอร์ที่ทดสอบ				→																																
3. รวบรวมข้อมูลและซื้ออุปกรณ์รวมถึงสร้างอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้				→																																
4. ทดสอบการทำงานรวมถึงการแก้ไขให้สมบูรณ์				→																																
5. ศึกษาการทดสอบหาค่า Insulation Impedance ของมอเตอร์ และทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม				→																																
6. ทำการทดสอบฉนวนมอเตอร์ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงที่สร้างขึ้น และเก็บข้อมูล				→																																
7. วิเคราะห์ข้อมูล				→																																
8. สรุปผลและจัดพิมพ์รายงาน				→																																

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงแผนการดำเนินการ

→ เวลาตามแผน

-----> เวลาที่ใช้จริง

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. เกิดความเข้าใจถึงปัญหาที่เกิดจากกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับตัวมอเตอร์
2. ได้รู้ถึงแหล่งที่มาของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นและสามารถอธิบายในรูปแบบของวงจรสมมูลได้
3. ได้รู้ถึงหลักการการทำงานและการสร้างอินเวอร์เตอร์
4. สามารถวิเคราะห์รูปแบบการเกิดกระแสรั่วไหลเบื้องต้นได้

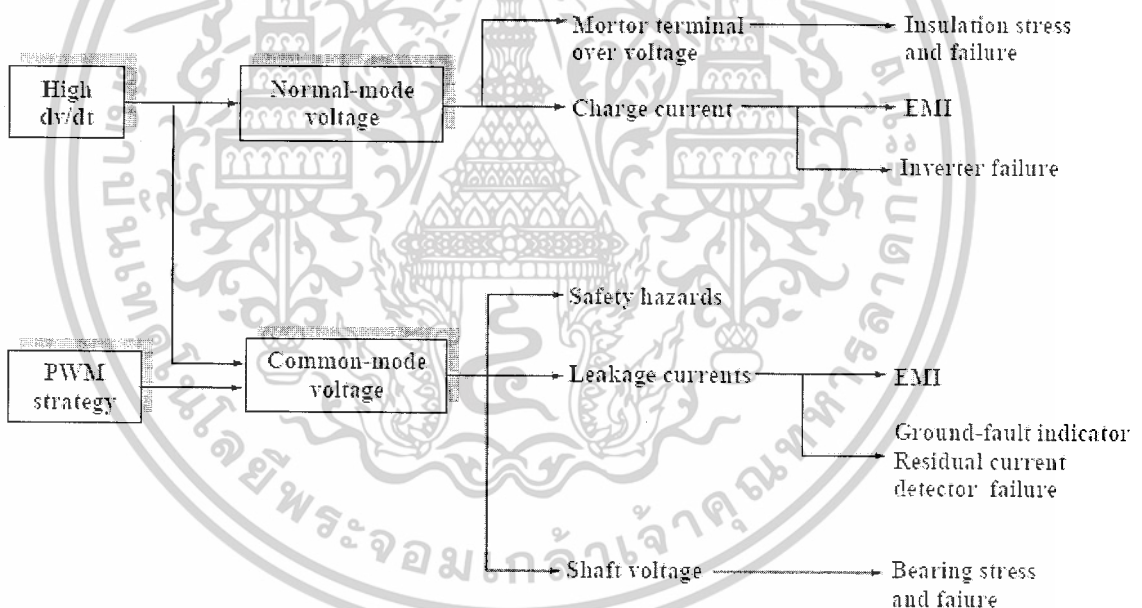


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ผลกระทบของแรงดันต้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่มีการมอดูเลตแบบปรับความกว้างพัลส์ต่อระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในระบบที่มีการใช้อินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อปรับความเร็วรอบ จะสามารถแบ่งแรงดันต้านออกของอินเวอร์เตอร์ได้เป็นสองโหมด ได้แก่แรงดันโหมดปกติ (normal-mode voltage) และแรงดันโหมดร่วม (common mode voltage) แผนภาพในภาพที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่เกิดจากแรงดันแต่ละโหมด ซึ่งเราจะอธิบายถึงลักษณะของแต่ละปัญหาที่เกิดขึ้นดังนี้



ภาพที่ 2.1 ผลกระทบที่เกิดจากการมอดูเลตความกว้างพัลส์ในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

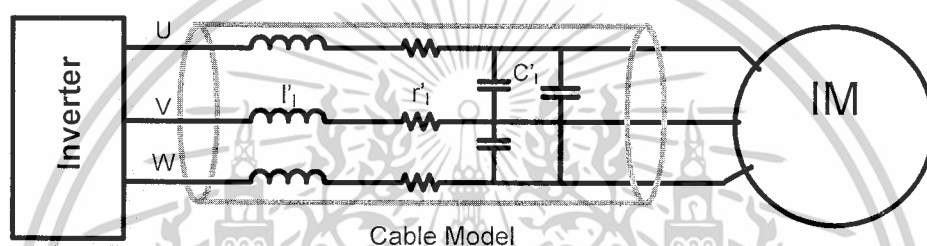
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 ผลกระทบที่เกิดจากแรงดันโหมดปกติ (Normal Mode Voltage Effect)

แรงดันโหมดปกติของอินเวอร์เตอร์คือแรงดันระหว่างสายที่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ คือ

- 1) องค์ประกอบแรงดันหลักมูล (0-50 Hz) ซึ่งใช้สำหรับปรับความเร็วของมอเตอร์
- 2) องค์ประกอบแรงดันที่ความถี่การสวิตช์
- 3) องค์ประกอบแรงดันความถี่สูง (เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันแบบขั้น) ซึ่ง

ผลกระทบจากแรงดันโหมดปกติจะเกิดจากองค์ประกอบนี้ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบปริสิต  $L_1$ ,  $C_1$  ของสายไฟดังแสดงในภาพที่ 1.2 เราสามารถอธิบายผลกระทบจากแรงดันโหมดปกติดังนี้



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองของสายเคเบิลในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์

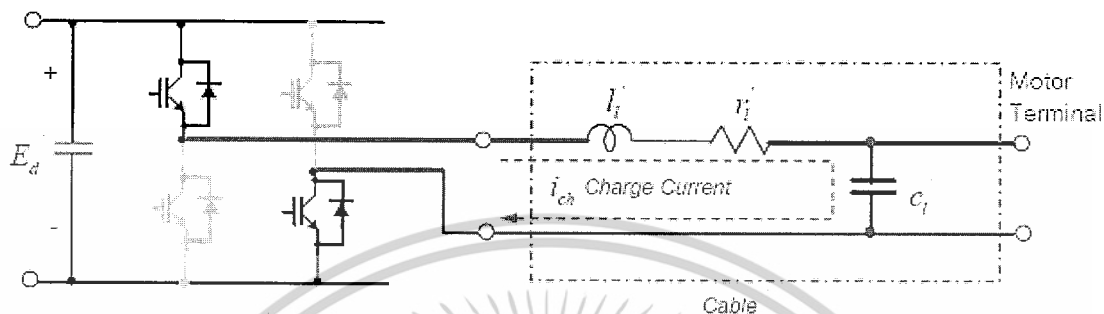
#### ก.) การเกิดแรงดันเกินที่ปลายขั้วของมอเตอร์ (Over Voltage at Motor Terminal)

แรงดันเกินที่ปลายขั้วมอเตอร์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้สายเคเบิลยาว (>30m) ที่ด้านออกของมอเตอร์ [5]-[8] เนื่องจากองค์ประกอบปริสิตของสายเคเบิลจะมีวงจรสมมูลเป็นแบบ LC ดังภาพที่ 2.2 เมื่อได้รับการกระตุ้นจากแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์เกิดเป็นองค์ประกอบแรงดันความถี่สูงจะทำให้เกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่น (reflected wave) ในสายเคเบิล และทำให้ผลตอบสนองชั่วครู่ของแรงดันที่ปลายขั้วของมอเตอร์มีขนาดสูง โดยอาจเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่าได้ในกรณีที่ใช้สายเคเบิลที่ยาวมากๆ (>100m) ยังผลให้ฉนวนของมอเตอร์ได้รับความเค้นมากขึ้นและเสื่อมสภาพได้ก่อนเวลาอันควร

#### ข.) กระแสซาร์จระหว่างสาย (Charge Current)

แรงดันโหมดปกติที่มีค่า  $dv/dt$  สูงทำให้เกิดกระแสซาร์จผ่านค่าตัวเก็บประจุปริสิตที่เชื่อมร่วมระหว่างสาย ( $C_1$ ) และเกิดเป็นวงรอบกระแสดังแสดงในภาพที่ 2.3 ส่วนใหญ่กระแสซาร์จระหว่างสายจะมีความถี่สูงและเป็นสาเหตุให้เกิด EMI ที่รบกวนการทำงานของอินเวอร์เตอร์เอง [1] แต่หากสายเคเบิลที่ต่ออยู่ระหว่างอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์มีความยาวมากๆหรือมีการต่อขนานกันอยู่หลายชุดสำหรับกรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์หนึ่งตัวขับเคลื่อนมอเตอร์หลายตัวและค่าตัวเก็บประจุ

เชื่อมร่วมระหว่างสายจะมีค่าสูงมากจนเกิดกระแสชาร์จประจุขนาดใหญ่ และทำให้อินเวอร์เตอร์เสียหายได้ในที่สุด



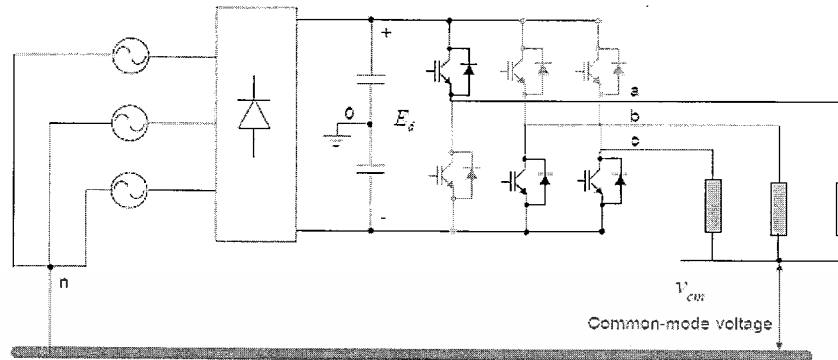
ภาพที่ 2.3 ผลกระทบจากแรงดันโหมตปกติในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM

### 2.1.2 ผลกระทบที่เกิดจากแรงดันโหมตร่วม (Common mode Voltage Effect)

แรงดันโหมตร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ 3 เฟสด้วยอินเวอร์เตอร์จะเกิดจากแรงดันลำดับศูนย์ (Zero Sequence Voltage) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งสามารถแบ่งองค์ประกอบได้เป็น 3 ประเภทคือ

- 1) องค์ประกอบความถี่ต่ำของแรงดันลำดับศูนย์ (150 Hz) ที่เกิดจากระลอกคลื่นที่แรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ [1]
- 2) องค์ประกอบของแรงดันฮาร์มอนิกที่มีความถี่  $3k$  เท่า ขององค์ประกอบหลักมูลที่แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์
- 3) องค์ประกอบแรงดันที่ความถี่การสวิตช์และไซด์แบนด์ (sideband) ซึ่งรวมถึงความถี่สูงที่เกิดจากการทำงานของสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ โดยรูปคลื่นแรงดันจะมีลักษณะแบบขั้นบันไดที่เปลี่ยนแปลงตามรูปแบบของการสวิตช์ องค์ประกอบของแรงดันลำดับศูนย์ที่ความถี่สูงนี้มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นองค์ประกอบปรสิตในระบบและทำให้เกิดผลกระทบต่างๆ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 ตำแหน่งการวัดแรงดันโหมตรงร่วมในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

### ก) ความปลอดภัย (Safety hazard)

ส่วนหนึ่งของแรงดันโหมตรงร่วมจะตกคร่อมอยู่ที่โครงของมอเตอร์ ทำให้เกิดความต่างศักย์เมื่อเทียบกับกราวด์ของระบบ หากไม่มีการต่อโครงเหล็กของมอเตอร์ลงกราวด์ จะทำให้เกิดอันตรายได้เมื่อสัมผัสผู้สฎกโครงของมอเตอร์โดยมาตรฐานของกระแสรั่วไหล โดยค่ามาตรฐานของกระแสรั่วไหล ตาม Information Technology Equipment (I.T.E.) กำหนดไว้ดังนี้

กระแสรั่วเป็นกระแสที่ไหลจากUnitผ่านตัวนำสู่household ground กระแสรั่วสามารถที่จะไหลผ่านเข้าสู่ตัวบุคคลได้ถ้าไม่มีความรอบครอบพอในการต่อลงกราวด์

กระแสรั่ว 3 mA ไหลผ่าน จะทำให้เกิดการช็อคที่ไม่รุนแรงและเกิดการบาดเจ็บที่ไม่รุนแรง 8mA จะทำให้การทำงานของหัวใจผิดปกติและในที่สุดก็จะเสียชีวิตได้

Class I Equipment : อุปกรณ์ที่ป้องกันการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า(electric shock)ควรจะมีฉนวนและมีการป้องกันโดยการต่อลงกราวด์

Class II Equipment : แม้ว่าความจริงแล้วจะไม่มีการป้องกันโดยการต่อลงกราวด์ของอุปกรณ์ แต่การป้องกันให้เกิดการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า(electric shock)ลดลงได้ โดยการกำหนด 2 ชั้น หรือการเพิ่มความทนทานของฉนวนให้มากขึ้น

Class III Equipment : อุปกรณ์ที่ป้องกันsupply source จากวงจร SELV และจะไม่ก่อให้เกิดแรงดันที่เป็นอันตราย

PATIENT AUXILIARY CURRENT : กระแสที่ไหลผิดปกติจะเกิดระหว่างส่วนของ applied part และส่วนที่ไม่ได้ตั้งใจจะให้เกิด ตัวอย่างเช่น การแอส bias ของ amplifier หรือกระแสที่ใช้เข็มพีแดนซ์ plethysmography

PATIENT LEAKAGE CURRENT : กระแสที่ไหลจากส่วนของ applied part โดยตรงลงสู่กราวด์ หรือไหลจาก F-type ซึ่งเป็นส่วนของ applied part สู่กราวด์ จุดเริ่มต้นของกระแสที่ไม่ได้ตั้งใจให้เกิด เกิดจากแรงดันภายนอกของแหล่งจ่าย

### Requirement

จาก Information Technology Equipment (I.T.E)

Classification ค่าสูงสุดของกระแสรั่ว 0.75(handhold equipment)

Class I 3.5mA (all other)

Class II 0.25mA

### For Medical Equipment (สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์)

กระแส	สภาวะปกติ	สภาวะที่เกิด fault
กระแสรั่วที่กราวด์	0.5mA	1mA

นอกจากนี้แล้วกระแสรั่ว medical ที่ถูกอ้างถึงยังมีกระแสรั่วอื่นๆใน IEC 601-1 ซึ่งจะเป็นกระแสที่ Patient, กระแส patient auxiliary และกระแสรั่วที่enclose (เราจะไม่พูดถึงหัวข้อนี้ เพราะจะไม่ใช้ใน power supplies)

### For Class I Equipment

ชนิดของอุปกรณ์ ค่าสูงสุดของกระแสรั่ว

Portable Unit 0.5mA

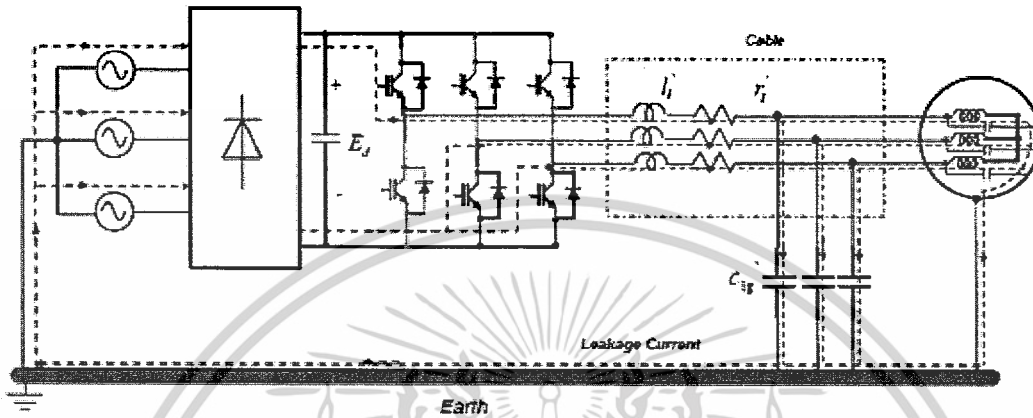
Stationary Unit 0.75mA

### ข) กระแสรั่วไหล (Leakage current)

ในกรณีที่มีการต่อโครงของมอเตอร์ลงกราวด์เพื่อป้องกันอันตรายจากการสัมผัสถูกโครงของมอเตอร์ องค์ประกอบความถี่สูงของแรงดันโหมตรงร่วมสามารถทำให้เกิดกระแสโหมตรงร่วม (common-mode current) หรือกระแสรั่วไหลลงกราวด์ผ่านค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ของมอเตอร์ และสายเคเบิลดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยกระแสรั่วไหลนี้จะเกิดขึ้นตามจังหวะการสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ ทั้งนี้กระแสดังกล่าวอาจมีค่าสูงสุดถึง 10 % ของกระแสพิคต์มอเตอร์ การทำงานของอินเวอร์เตอร์มีผลต่อลักษณะของกระแสรั่วไหลดังนี้คือ ค่า dv/dt ของแรงดันด้านออกที่สูง ทำให้อายุขัยของกระแสรั่วไหลมีค่าสูงขึ้น และการเพิ่มความถี่การสวิตซ์ทำให้ผลรวมของกระแสรั่วไหลมากขึ้นตามจำนวนครั้งของการสวิตซ์ เมื่อพิจารณาจากวงจรการไหลของกระแสรั่วไหลที่ผ่านกราวด์กลับเข้าสู่ระบบจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระแสรั่วไหลลงกราวด์นี้สามารถทำให้เกิด EMI และส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่นๆ ที่ต่อรวมอยู่ในระบบไฟฟ้าเดียวกันได้เช่น ตัวตรวจจับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

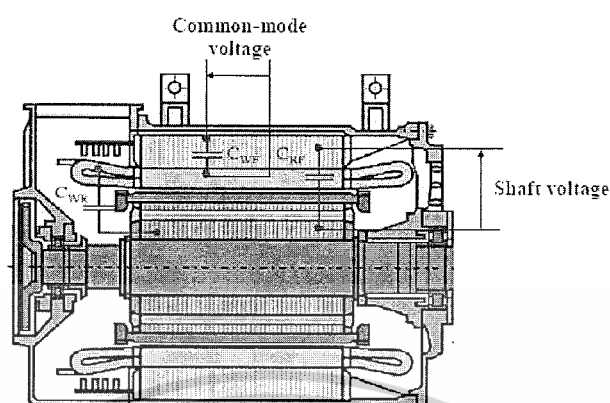
รั่วไหล (Earth Leakage Current Breaker) เกิดการตัดตอน สัญญาณจากตัวตรวจรู้ในระบบถูกรบกวน เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 กระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM

#### ค) แรงดันเพลลา (Shaft voltage)

แรงดันเพลลามอเตอร์คือแรงดันระหว่างเพลลาของโรเตอร์ (rotor) เทียบกับโครงของมอเตอร์ (ซึ่งต่ออยู่กับกราวด์) เกิดจากโครงสร้างของมอเตอร์ที่มีทั้งความจุไฟฟ้าสแตตริคระหว่างขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) กับโครงเหล็ก, ระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์ และค่าความจุที่เกิดในช่องอากาศ (air gap) ระหว่างโรเตอร์กับโครงเหล็กดังแสดงในภาพที่ 2.6 เมื่อแรงดันโหมคร่วมเกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์เทียบกับกราวด์ ทำให้มีแรงดันที่เป็นสัดส่วนกับแรงดันโหมคร่วมตกคร่อมที่เพลลา ผลกระทบที่ตามมาคือตัวรองลื่น (bearing) ที่เพลลาจะได้รับความเค้นจากแรงดันดังกล่าวและในกรณีที่แรงดันที่เพลลามอเตอร์มีค่าเยอะมากกว่าแรงดันเสียหายฉนวน (breakdown) ของฉนวน (3 – 30 V) ความเป็นฉนวนของสารหล่อลื่นในตัวรองลื่นจะเกิดการเสียหายฉนวนฉนวนยังผลให้เกิดกระแสความถี่สูงไหลผ่านตัวรองลื่น (bearing current) และทำให้ตัวรองลื่นได้รับความเสียหาย [4] และ [9]



$C_{WS}$  Capacitance between stator winding and frame

$C_{WR}$  Capacitance between stator winding and rotor shaft

$C_{RF}$  Capacitance between rotor shaft and frame

ภาพที่ 2.6 ความจุไฟฟ้าสเตรย์ภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โดยสรุปแล้วจากที่กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์นี้ จะเกิดขึ้นจากสาเหตุ 2 ประการคือ

- 1) กระแสรั่วไหลที่ถูกกระตุ้นจากแรงดันโหมตรงรวม
- 2) กระแสรั่วระหว่างสายที่เกิดจากแรงดันโหมตปกติ

และเมื่อเปรียบเทียบวงรอบระหว่างกระแสทั้ง 2 ประเภทนี้จากภาพที่ 2.3 และ 2.5 จะเห็นได้ว่าวงรอบของกระแสรั่วไหลจะมีอาณาบริเวณที่กว้างกว่าวงรอบของกระแสรั่วระหว่างสายที่จำกัดทางเดินอยู่ระหว่างสายเคเบิลเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ กระแสรั่วไหลภายในมอเตอร์จึงมากกว่ากระแสรั่วระหว่างสาย และปริยญาณิพนธ์นี้จะศึกษาลักษณะของกระแสรั่วไหลที่เกิดจากฉนวนมอเตอร์รวมถึงวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากกระแสรั่วไหลนี้

## 2.2 กระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์และวิธีการลดทอน

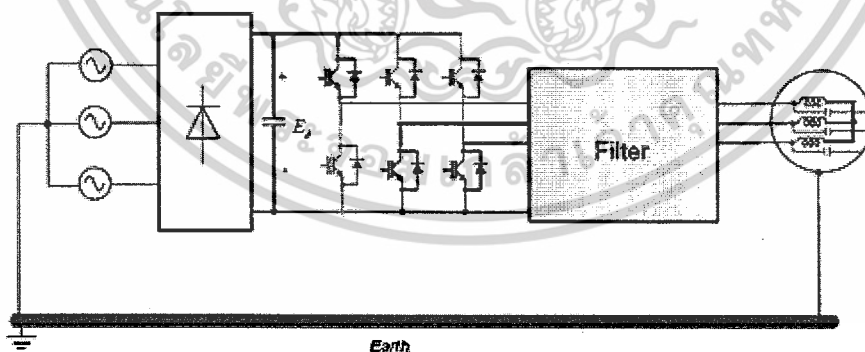
การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อนมีรูปแบบที่สามารถศึกษาได้โดย การศึกษาพฤติกรรมของกระแสไฟนั้นจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ เพื่อที่จะทำนายหรือคาดคะเนการเกิดปรากฏการดังกล่าวและเป็นสามารถนำไปประยุกต์เกี่ยวกับการลดทอนลงได้

### 2.2.1 พฤติกรรมของกระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อน

ในการลดทอนกระแสรั่วไหล เราจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมของกระแสรั่วไหลว่ามีเส้นทางการไหลในระบบอย่างไร ทั้งนี้รูปลักษณะของการต่อสายกราวด์จะมีผลต่อเส้นทางการไหลของกระแสรั่วไหลด้วย AKagi [2] และ Mutoh [10] ได้พิจารณาโดยละเอียดถึงกระแสรั่วไหลที่ไหลระหว่างตัวระบายความร้อนของอินเวอร์เตอร์และกราวด์ของระบบ Kempski [11] อาศัยผลการทดลองในการพิจารณาถึงกระแสรั่วไหลระหว่างสายเคเบิลทั้ง 3 เฟสกับสายกราวด์ที่เชื่อมต่อกันระหว่างมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ ลักษณะสมบัติทางพลวัตก็เป็นประเด็นหนึ่งที่สำคัญสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของกระแสรั่วไหล ซึ่งเราสามารถอธิบายด้วยวงจรมมูล Ogasawara [12] เสนอแบบจำลองความถี่สูงแบบก้อน (Lump) สำหรับกระแสรั่วไหลด้วยวงจรมมูลเรโซแนนซ์อนุกรม

### 2.2.2 การลดทอนกระแสรั่วไหลด้วยวงจรกรองที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

การลดทอนกระแสรั่วไหลที่นำเสนอในงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา [1]-[2], [6]-[8] และ [12]-[25] จะอาศัยการติดตั้งวงจรกรองไว้ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ดังภาพที่ 2.7 โดยในที่นี้เราจะพิจารณาการติดตั้งวงจรกรองทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์เนื่องจากวงจรกรองด้านออกนอกจากจะสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องกระแสรั่วไหลที่เป็นวัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยนี้แล้วยังสามารถพัฒนาแนวทางการออกแบบให้เกิดการลดทอนขนาดของแรงดันโหมคร่วมที่ขั้วมอเตอร์ได้ด้วย โดยเราสามารถจำแนกวงจรกรองออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ 1) วงจรกรองแบบพาสซีฟ และ 2) วงจรกรองแบบแอกทีฟ



ภาพที่ 2.7 การติดตั้งวงจรกรองที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก) passive filter

บทความ [10],[12] และ [15] เสนอวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ใช้เพียงตัวเหนี่ยวนำร่วม (common-mode inductor) ซึ่งย่านความถี่ของการลดทอนกระแสรั่วไหลของวิธีนี้จะแปรตามค่าตัวเหนี่ยวนำร่วม ในขณะที่บทความ [2], [5], [6], [8], [13], [16], [22] และ [26] นำเสนอวงจรกรองที่ใช้ทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุร่วมกัน (LC filter) เพื่อให้ตัวเหนี่ยวนำร่วมที่ใช้มีค่าเล็กลงและยังคงมีย่านความถี่ของการกรองเท่ากับแบบที่ใช้เพียงตัวเหนี่ยวนำร่วมได้อย่างไรก็ตามอุปสรรคที่สำคัญอันหนึ่งในการประยุกต์ใช้วงจรกรองพาสซีฟข้างต้นก็คือการขาดแนวทางการออกแบบที่ชัดเจนสำหรับวงจรกรอง

### ข) active filter

วงจรกรองแบบพาสซีฟข้างต้นมีข้อเสียคือวงจรกรองมักมีขนาดใหญ่ และที่สำคัญคือการเกิดปัญหาเรโซแนนซ์ในระบบ เพื่อแก้ข้อจำกัดของวงจรกรองแบบพาสซีฟจึงได้มีการเสนอวงจรกรองแบบแอกทีฟ Son [20-21] และ Takahashi [23] เสนอวงจรกรองแอกทีฟชนิดขนานที่สร้างกระแสมาชดเชยกระแสรั่วไหล ในขณะที่ Ogasawara [17] และ Yanshu [25] นำเสนอวงจรกรองแอกทีฟชนิดอนุกรมที่สร้างแรงดันชดเชยแรงดันโหมคร่วม เพื่อกีดกันการไหลของกระแสรั่วไหล อย่างไรก็ตามวงจรกรองแบบแอกทีฟมีลักษณะสมบัติการกรองที่ย่านความถี่สูงไม่ดีเนื่องจากแบนด์วิดท์ที่จำกัดของสวิตช์กำลัง

อย่างไรก็ตามในปริยญาณิพนธ์เล่มนี้จะเสนอเฉพาะวิธีการลดทอนแบบพาสซีฟที่ใช้เพียงตัวเหนี่ยวนำร่วม (common-mode inductor) เท่านั้นเนื่องจากระยะเวลาในการศึกษามีอย่างจำกัด และการศึกษาวงจรกรองพาสซีฟนี้เพื่อให้เห็นแนวทางในการวิเคราะห์การลดทอนกระแสรั่วไหลในเบื้องต้นได้

## 2.3 พฤติกรรมการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์

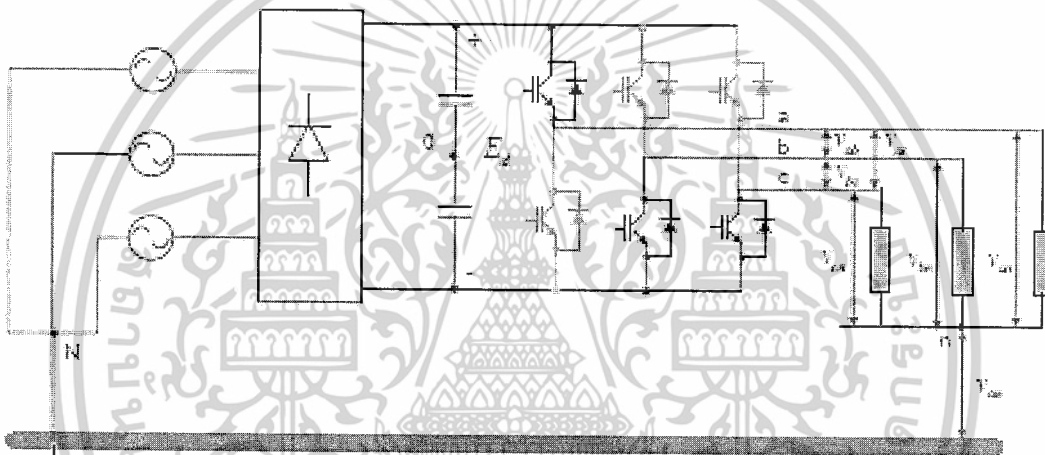
จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษาการกระแสรั่วไหล ที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาพฤติกรรมของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในระบบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงประเด็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของกระแสรั่วไหลคือ

- 1) ลักษณะแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปลักษณะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์กับแรงดันโหมคปกติและแรงดันโหมคร่วมซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสรั่วไหล

2) พฤติกรรมการเกิดและทิศทางการไหลของกระแสรั่วไหลภายในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์ 3 เฟสซึ่งขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อเชิงความจุ (Capacitive Coupling) และองค์ประกอบภายในระบบ

3) การพิจารณาวงจรสมมูลของส่วนต่าง ๆ ในระบบ ซึ่งจะนำไปสู่การแทนระบบด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายที่ทำให้สามารถคำนวณและวิเคราะห์ผลของกระแสรั่วไหลโดยรวมได้ง่ายขึ้น

### 2.3.1 ลักษณะแรงดันต้านออกของอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 2.8 ลักษณะการสวิตช์กับแรงดันโหมตปกติและโหมตรวมที่ต้านออกของอินเวอร์เตอร์

แรงดันต้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่จ่ายให้กับมอเตอร์นั้นจะได้อาจมาจากการตัดต่อแรงดันบัสไฟตรงด้วยสวิตช์กำลัง ทำให้ได้ลักษณะของรูปคลื่นที่แรงดันต้านออกเป็นชบวนพัลส์ที่เปลี่ยนแปลงค่าตามจังหวะการสวิตช์ ภาพที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงแรงดันแบบโหมตรวม ( $V_{cm}$ ) และแรงดันโหมตปกติ ซึ่งอธิบายได้ว่าแรงดันโหมตปกติเป็นแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างสายคือ  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$  และเป็นผลต่างของแรงดันเฟสคือ

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad (2.1)$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad (2.2)$$

และ 
$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งลักษณะของแรงดันระหว่างสายและแรงดันเฟสจะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์แสดงได้ดังภาพที่ 2.9 เมื่อ  $a, b$  และ  $c$  แทนสัญญาณขับนำสวิตช์แต่ละเฟส

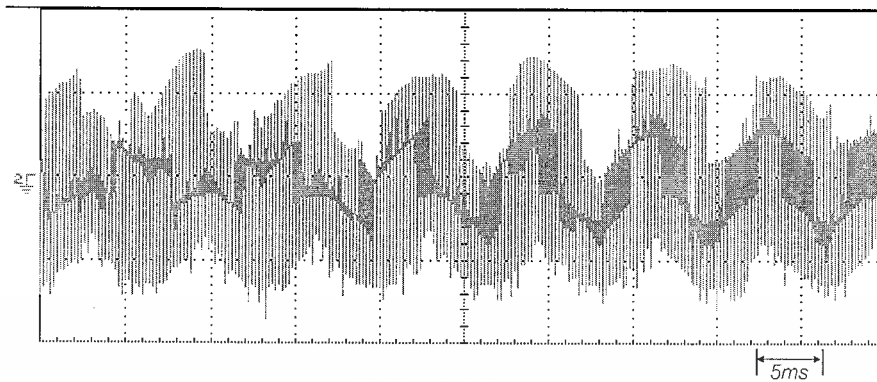


ภาพที่ 2.9 ลักษณะของแรงดันโหมดปกติที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งพิจารณาจากแรงดันระหว่างสายและแรงดันเฟส

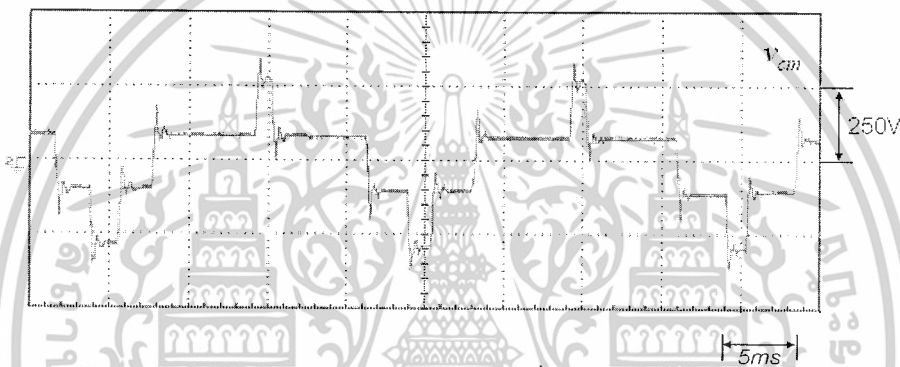
ส่วนแรงดันแบบโหมดร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ซึ่งได้กล่าวในบทที่ 1 ว่าเกิดจากแรงดันลำดับศูนย์ จะเป็นค่าแรงดันระหว่างจุดนิวทรัล  $n$  ของโหลดที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เทียบกับกราวด์ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 และมีลักษณะรูปคลื่นดังแสดงเป็นตัวอย่างในภาพที่ 2.10 Rendusara [8] ได้แสดงการคำนวณหาค่าแรงดันโหมดร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ดังในสมการที่ (2.4)

$$V_{cm} = \frac{v_{ao} + v_{bo} + v_{co}}{3} - v_{on} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สเกลเวลาของความถี่หลักมูล



(ข) สเกลเวลาของความถี่การสวิตช์

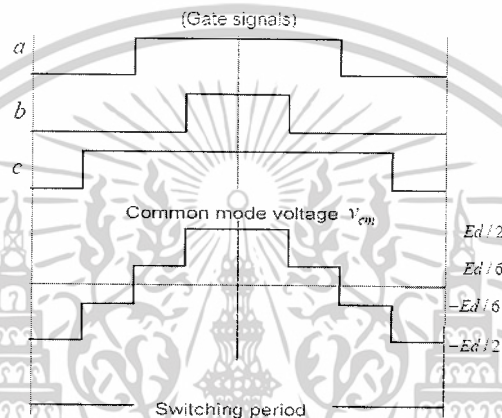
ภาพที่ 2.10 ลักษณะแรงดันโหมตร่วมที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $v_{cm}$ ) ที่ความถี่การสวิตช์ 5 kHz

จะเห็นได้ว่าแรงดันโหมตร่วมในสมการที่ (2.1) จะประกอบด้วยแรงดัน 2 ส่วนซึ่งเราสามารถอธิบายลักษณะสมบัติของแรงดันแต่ละส่วนได้ดังนี้

1)  $v_{on}$  คือองค์ประกอบความถี่ต่ำของแรงดันโหมตร่วม (150Hz) ซึ่งสะท้อนมาจากระลอกคลื่นของแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ที่เกิดจากการทำงานของวงจรกระแสต้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ ทั้งนี้เราสามารถสังเกตองค์ประกอบของแรงดันโหมตร่วมดังกล่าวได้อย่างชัดเจนดังที่ได้แสดงในภาพที่ 2.10 (ก)

2) สำหรับเทอม  $\frac{v_{ao} + v_{bo} + v_{co}}{3}$  เป็นแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วย องค์ประกอบของแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 3n เท่า (Triple Harmonics) ขององค์ประกอบหลักมูลที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ และองค์ประกอบแรงดันที่ความถี่

การสวิตช์และไซด์แบนด์ ซึ่งครอบคลุมถึงองค์ประกอบความถี่สูงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแบบ  
 ชั้ันบันไดเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์กำลังของอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในภาพที่ 2.10 (ข)  
 ลักษณะของแรงดันโหมตร่วมส่วนนี้มีความสัมพันธ์กับสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ดังการ  
 แสดงตัวอย่างในภาพที่ 2.11 ซึ่งแสดงอย่างชัดเจนว่าความถี่หลักของแรงดันโหมตร่วมส่วนนี้จะตรง  
 กับความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ และตารางที่ 2.1 สรุปผลเปรียบเทียบให้เห็นถึงแรงดันโหมต  
 ปกติและแรงดันโหมตร่วมที่สถานะการสวิตช์ต่างๆ



ภาพที่ 2.11 ลักษณะแรงดันโหมตร่วมที่เกิดจากการมอดูเลตแบบ PWM ใน 1 คาบการสวิตช์

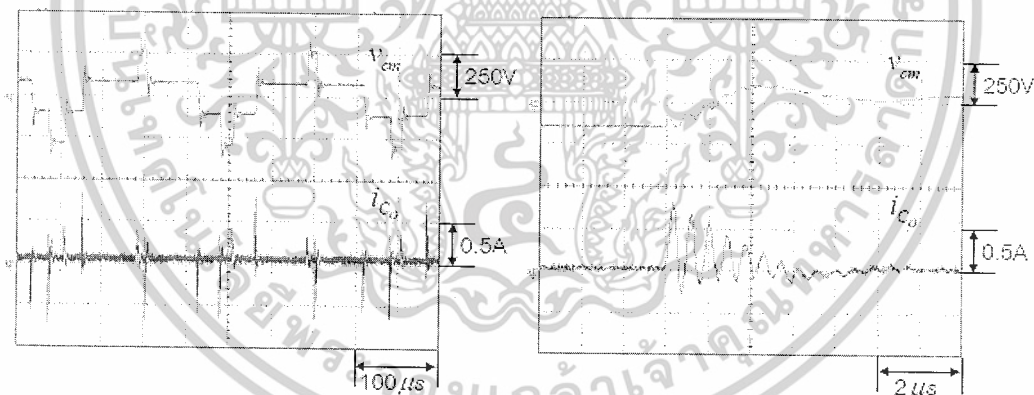
ตารางที่ 2.1 ลักษณะแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์

Voltage Vector	สถานะการสวิตช์			แรงดันโหมตปกติ						แรงดันโหมตร่วม
	a	b	c	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{cm}$
V0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-E_d/2$
V1	1	0	0	$E_d$	0	$-E_d$	$2E_d/3$	$-E_d/3$	$-E_d/3$	$-E_d/6$
V2	1	1	0	0	$E_d$	$-E_d$	$E_d/3$	$E_d/3$	$-2E_d/3$	$E_d/6$
V3	0	1	0	$-E_d$	$E_d$	0	$-E_d/3$	$2E_d/3$	$-E_d/3$	$-E_d/6$
V4	0	1	1	$-E_d$	0	$E_d$	$-2E_d/3$	$E_d/3$	$E_d/3$	$E_d/6$
V5	0	0	1	0	$-E_d$	$E_d$	$-E_d/3$	$-E_d/3$	$2E_d/3$	$-E_d/6$
V6	1	0	1	$E_d$	$-E_d$	0	$E_d/3$	$-2E_d/3$	$E_d/3$	$E_d/6$
V7	1	1	1	0	0	0	0	0	0	$E_d/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 พฤติกรรมและการไหลของกระแสไหลของกระแสไหลร่วมภายในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กลไกการเกิดกระแสรั่วไหลในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันโหมตร่วมที่ตกคร่อมที่ค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ระหว่างขดลวดและโครงเหล็กของมอเตอร์ จึงเกิดการเก็บและคายประจุกลายเป็นกระแสรั่วไหลจากค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ลงสู่กราวด์ อาจกล่าวได้ว่า การต่อโครงของมอเตอร์ลงกราวด์สำหรับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์โดยทั่วไป เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการ ช็อกทางไฟฟ้า (electric shock) จากการสัมผัสถูกตัวโครงเหล็กของมอเตอร์นั้น ทำให้เกิดวงจรทางเดินของกระแสรั่วไหลได้ ภาพที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันโหมตร่วมซึ่งวัดจากจุดนิวทรัลของขดลวดสเตเตอร์เทียบกับโครงมอเตอร์ ( $v_{cm}$ ) และกระแสรั่วไหลที่ไหลในสายตัวนำที่ต่อโครงเหล็กลงกราวด์ ( $i_{co}$ ) ที่ความถี่การสวิตช์ ( $f_{sw}$ ) ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 5 kHz โดยภาพที่ 2.12(ก) แสดงให้เห็นว่ากระแสรั่วไหลจะเกิดขึ้นตามจังหวะการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดของแรงดันโหมตร่วม และภาพที่ 2.12(ข) แสดงผลตอบสนองของกระแสรั่วไหลที่สังเกตได้ว่าจะมีความถี่อยู่ที่ประมาณ 2 MHz เมื่อพิจารณาจากสเปกตรัมของแรงดันโหมตร่วม ( $v_{cm}$ ) และกระแสรั่วไหล ( $i_{co}$ )



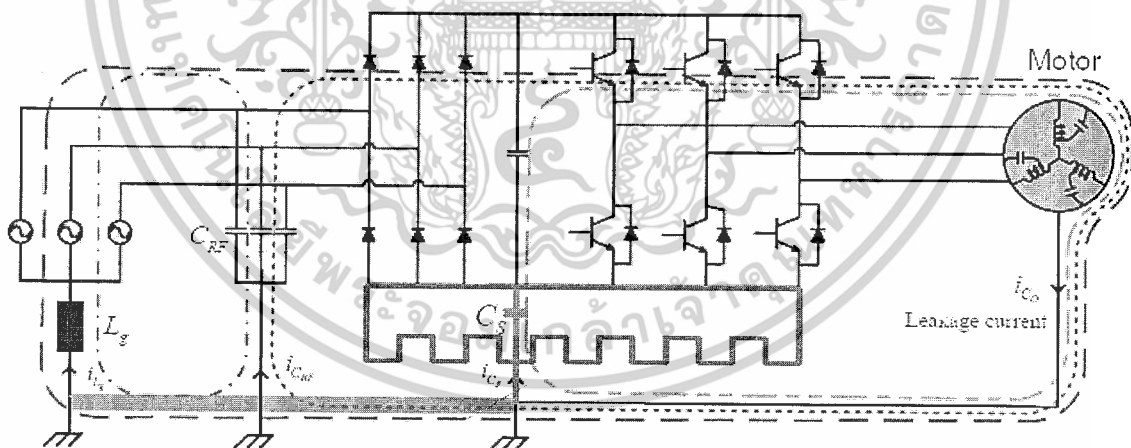
(ก) สเกลเวลาของความถี่การสวิตช์

(ข) ภาพขยายทางแกนเวลา

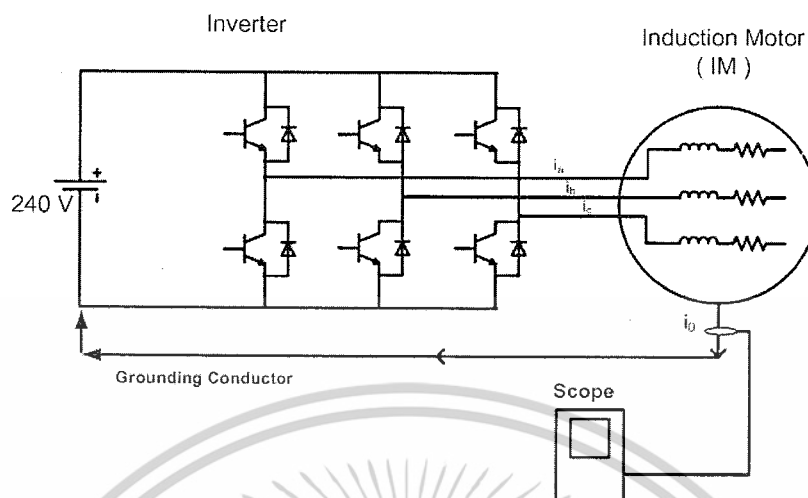
ภาพที่ 2.12 แรงดันโหมตร่วมและกระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่การสวิตช์ 5kHz

กระแสรั่วไหลนี้จะมีทิศทางการไหลผ่านจุดต่าง ๆ ในวงจรได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อเชิงความจุ (capacitive coupling) ภายในระบบ รวมถึงลักษณะของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ภายในระบบ ดังเช่นบทความของ Mutoh [10] และ Akagi [26] ที่เสนอให้เห็นว่า นอกจากวงจร

ของกระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ของมอเตอร์ลกราวด์และกลับเข้าสู่ระบบทางแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสและอินเวอร์เตอร์ตามลำดับแล้ว การเชื่อมต่อเชิงความจุระหว่างอุปกรณ์สวิตช์กำลังและตัวระบายความร้อนก็สามารถทำให้เกิดทางไหลของกระแสรั่วไหลได้เมื่อมีการต่อตัวระบายความร้อนของอินเวอร์เตอร์ลกราวด์ ( $C_g$ ) โดยจะเกิดเป็นวงรอบของกระแสรั่วไหลจากมอเตอร์ลกราวด์และกลับเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ผ่านทาง การเชื่อมต่อเชิงความจุระหว่างอุปกรณ์สวิตช์กำลังและตัวระบายความร้อน และนอกจากนี้ยังเกิดวงรอบกระแสรั่วไหลอีกจำนวนหนึ่งไหลวนจากแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสผ่านการเชื่อมต่อเชิงความจุระหว่างอุปกรณ์สวิตช์กำลังและตัวระบายความร้อนลงสู่กราวด์ด้วย ในขณะที่ Kempski [11] ศึกษากระแสรั่วไหลระหว่างสายเคเบิลและสายกราวด์ จากผลการทดลองที่แสดงให้เห็นถึงนัยสำคัญของการเชื่อมต่อเชิงความจุระหว่างสายเคเบิลและสายกราวด์เมื่อมีการใช้สายเคเบิลแบบหลายแกน (multi-core) ที่รวมถึงสายกราวด์ทั้งนี้จะมีการแบ่งการไหลของกระแสรั่วไหลระหว่างการเชื่อมต่อเชิงความจุในตำแหน่งต่าง ๆ ของสาย และเมื่อวัดกระแสรั่วไหลที่ต้นทางและปลายทางของสายจะได้ขนาดกระแสที่ปลายทางมากกว่าที่ต้นทางตามลักษณะการกระจายของการเชื่อมต่อเชิงความจุสำหรับระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ทดลองในปริณญาณิพนธ์นี้ มีโครงสร้างดังภาพที่ 2.13 โดยมีการลดผลจากการเชื่อมต่อเชิงความจุระหว่างสายเคเบิลและสายกราวด์ระหว่างอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์ด้วยโดยให้ความยาวของสายมีค่าน้อยที่สุด



ภาพที่ 2.13 ทางเดินของกระแสรั่วไหลภายในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบทั่วไป



ภาพที่ 2.14 ทางเดินของกระแสไหลภายในระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้  
 แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบวงจรและการทดลอง

การออกแบบในปริภูมิพหุคูณจะมีด้วยกันสองส่วนคือการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณสวิตช์และการออกแบบรูปแบบการทดลอง

#### 3.1 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณสวิตช์

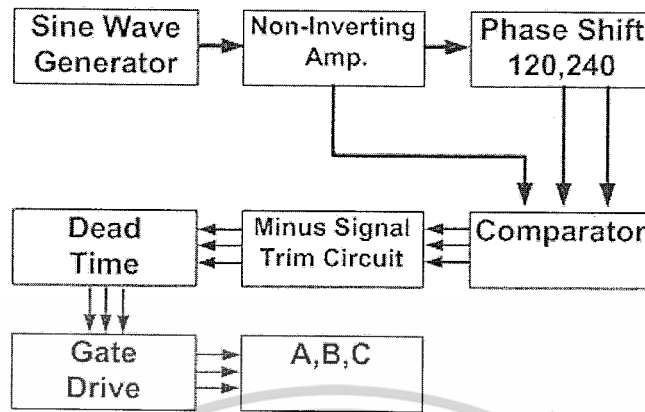
วงที่ใช้ในการทดสอบนี้จะเป็นวงจรที่มีลักษณะเดียวกับวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้หลักการสวิตช์แบบสี่เหลี่ยมที่สามารถปรับความถี่ในการสวิตช์ได้เนื่องจากมีรูปแบบการสวิตช์ที่แน่นอนและสามารถนำไปวิเคราะห์การทำงานในรูปแบบต่างได้ง่ายเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาเบื้องต้นโดยภาพรวมแล้วจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ วงจรควบคุมและวงจรถัก

##### 3.1.1 วงจรควบคุม

ส่วนของวงจรถักจะประกอบไปด้วยวงจรถักๆ คือ

- วงจรสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ปรับค่าได้ตั้งแต่ 1-20 kHz
- วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้ว
- วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณ
- วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ
- วงจรขลิบสัญญาณด้านลบ
- วงจรเฟื่อเวลา
- วงจรขับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์
- วงจรจ่ายไฟตรงให้กับวงจรถักและวงจรถัก

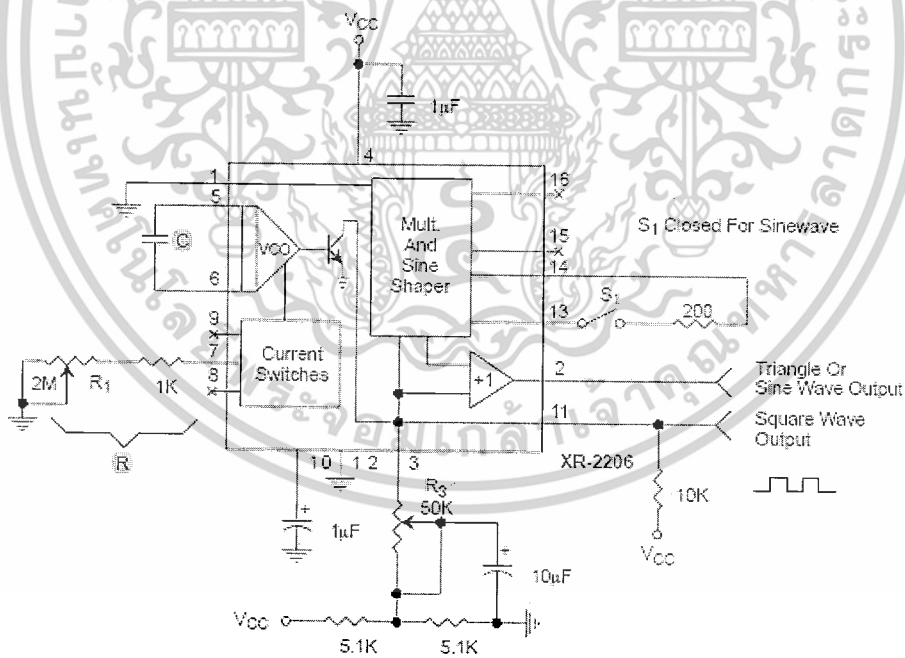
โดยวงจรถักๆ เหล่านี้จะทำงานต่อเนื่องกันไปตามลำดับ ซึ่งการออกแบบต้องการให้สัญญาณที่ได้สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ตามต้องการ โดยอาศัยหลักการทำงานของวงจรถักต่างๆ ที่กล่าวไว้ ดังแสดงภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 บล็อกการทำงานของวงจรควบคุม

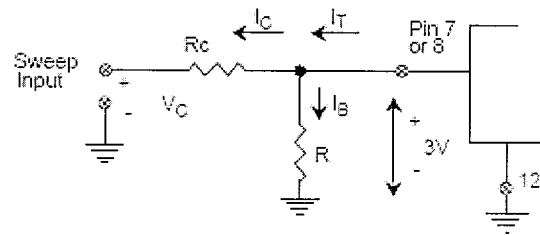
วงจรถ้าเนิดสัญญาณไซน์ (Sine Wave Generator)

ในการออกแบบนี้จะใช้ไอซีกำเนิดสัญญาณไซน์เบอร์ XR2006 โดยวงจรสามารถปรับค่าความถี่ได้ตั้งแต่ 1 - 20 kHz โดยลักษณะของวงจรแสดงดังภาพที่ 3.2



(ก) วงจรถ้าเนิดสัญญาณไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) วงจรการเปลี่ยนแปลงความถี่สัญญาณไซน์

ภาพที่ 3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่ใช้ในปริมาตรวิทยุ

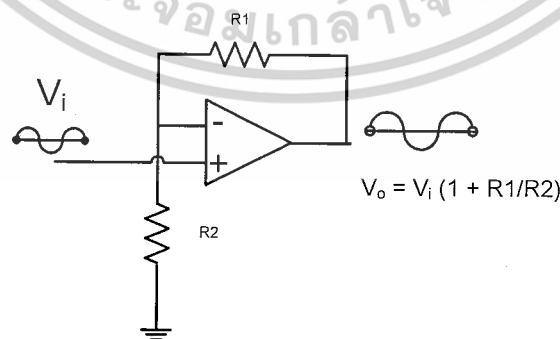
จากภาพที่ 3.2 ข. การปรับความถี่ของสัญญาณไซน์ทำได้โดยการปรับแรงดันที่จุด Sweep Input ค่าความถี่ที่ได้จะเปลี่ยนแปลง ความถี่ของสัญญาณไซน์ที่ต้องการอยู่ในช่วง 1-20 kHz ดังนั้นความถี่สูงสุดที่ต้องการคือ 20 kHz ซึ่งตัวกำหนดความถี่สูงสุดก็คือความต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C ตามสมการ (3.1)

$$f_0 = \frac{1}{RC} \text{ Hz} \quad (3.1)$$

ในที่นี้เลือกตัวเก็บประจุที่มีค่า 10 nF แล้วเลือกตัวต้านทานปรับค่าได้ 100k ก็จะได้สัญญาณตามต้องการ

### วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับขั้ว (Non-Inverting Amplifier)

แรงดันของสัญญาณที่ได้มีค่าที่ไม่สูงมากดังนั้นจึงต้องทำการยกระดับสัญญาณขึ้นสองเท่าโดยใช้ Op amp จะได้วงจรดังภาพที่ 3.3

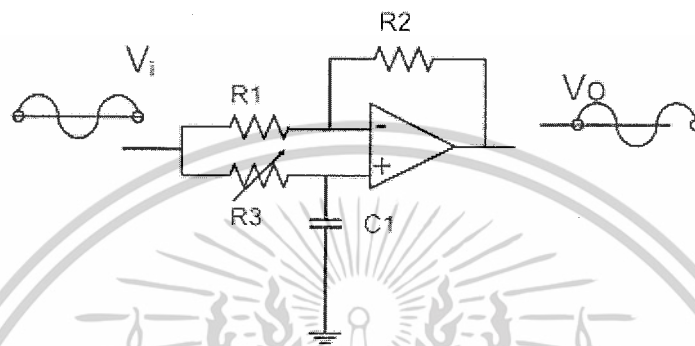


ภาพที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วงจรเลื่อนเฟส (Phase Shift)

การขับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต้องทำให้แรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดอีกชุดหนึ่งมีเฟสต่างกัน 120 และ 240 องศา ทั้งนี้เพื่อเป้าหมายที่ให้กระแสเข้าในแต่ละขดเป็นห่างกันเป็นสามเฟสดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณ

มุมเฟสที่ต้องการเลื่อนสัญญาณออกไปเท่าใดเป็นตามสมการ 3.2

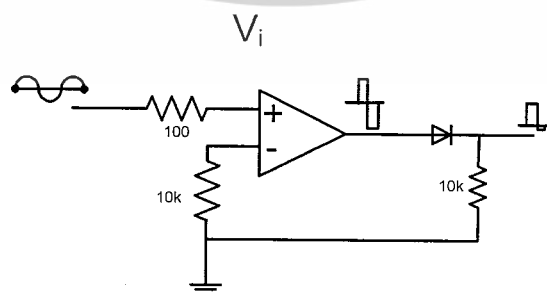
$$\theta = 2 \tan^{-1} 2\pi R_3 C_1 \quad (3.2)$$

โดย

$$R1=R2$$

### วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ(Comparator) และวงจรขริบสัญญาณต้านลบ

เมื่อได้สัญญาณทั้งสามแล้วก็จะนำมาเข้าสู่ในส่วนวงจรเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งพัลส์ที่เราสร้างต้องการให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างของพัลส์เท่ากัน จึงนำสัญญาณที่ได้มาเปรียบเทียบกับแรงดันศูนย์ เพื่อให้ค่าเป็นสัญญาณที่เหลี่ยมแล้วผ่านวงจรขริบรูปคลื่นต้านลบ ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 วงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรขริบสัญญาณต้านลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

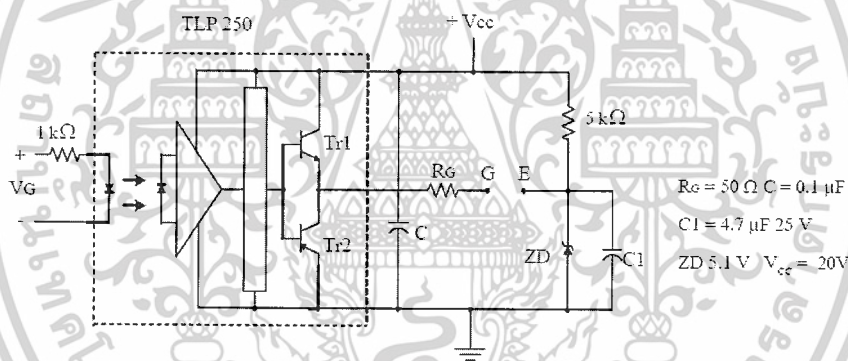


### วงจรขับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ( IGBT Drive Circuit )

IGBT Drive เป็นส่วนที่ขยายสัญญาณเพื่อที่จะไปควบคุมการ ON-OFF ของ MOSFET ประกอบด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

Optocouple มีหน้าที่ Isolator ไฟแรงสูงกับไฟแรงต่ำ โดยใช้แสงเป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงระบบโดยใช้แสงที่ได้ไปขับในส่วนของ Current boost เพื่อขยายกระแสให้มากขึ้น โดยในวงจรจะใช้เบอร์ TLP250

IGBT IRG4PH40KD (  $I = 21 \text{ A}$  ,  $V = 1200$  ) มีหน้าที่ เป็นตัวปิด-เปิด ซึ่งตัว IRG4PH40KD จะให้กระแสสูง และมีความเร็วสูงในการปิดเปิดซึ่งในการ ปิด-เปิด ของ IGBT โดยอาศัยสัญญาณจาก deadtime ที่จะต้องทำให้ Invert สัญญาณ และ shift สัญญาณ จึงจะทำให้ IGBT ไม่ปิด-เปิดพร้อมกัน



ภาพที่ 3.7 วงจรขับสวิตช์

วงจรขับที่ใช้ในปริภูมิงานนี้จะใช้ไอซี TLP250 เป็นไอซีที่แยกส่วนของสัญญาณขับกับส่วนที่ใช้ขับสวิตช์สามารถทำงานที่ความถี่สูงสุด 25 KHz ดังวงจรในภาพที่ 3.8 ในส่วนของสัญญาณขับจะรับสัญญาณขนาด 5 V มาจากวงจรเป็นเวลาต่อผ่านตัวต้านทานขนาด 1 k $\Omega$  เพื่อจำกัดกระแสเข้า TLP250 ในส่วนที่ใช้ขับสวิตช์จะต่อแหล่งจ่ายแรงดันภายนอกขนาด +20 V ผ่านขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Tr1 ที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Tr1 จะต่อตัวต้านทานขนาด 50  $\Omega$  เข้ากับขาเกตของไอจีบีที เพื่อกำหนดช่วงเวลาต่อวงจร (Turn on time) และช่วงเวลาตัดวงจร (Turn off time) ของไอจีบีที และต่อซีเนอร์ไดโอดเข้าที่ขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีทีเพื่อสร้างแรงดัน -5 V ในช่วงตัดวงจรของสวิตช์เพื่อช่วยให้สวิตช์หยุดทำงานเร็วขึ้น

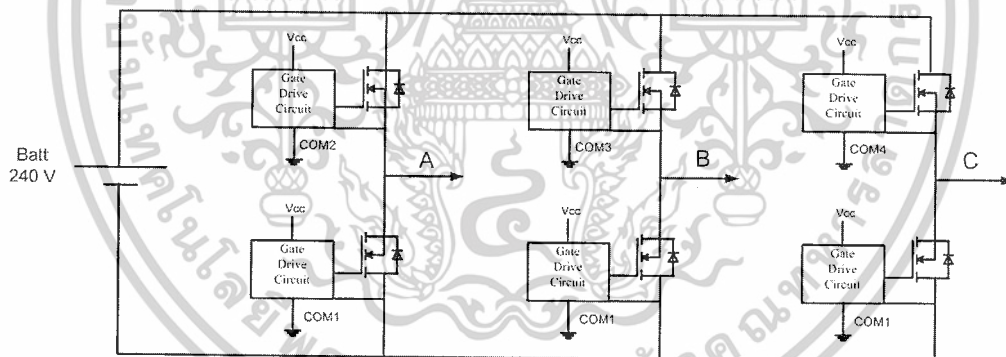
เมื่อได้รับสัญญาณขับทรานซิสเตอร์ Tr1 จะต่อวงจรเพื่อจ่ายแรงดันเข้าขาเกตกับขาอีมิเตอร์ของไอจีบีทีโดยแรงดันตกคร่อมขาเกตและอีมิเตอร์จะเป็น

$$V_{GE} = V_{CC} - V_Z \quad (3.4)$$

เมื่อไม่มีสัญญาณขับสวิทช์ทรานซิสเตอร์ Tr2 จะต่อวงจรทำให้แรงดันตกคร่อมขาเกตและอีมิเตอร์มีค่าเท่ากับ

$$V_{GE} = -V_Z \quad (3.5)$$

ในปริภูมิพนธ์นี้จะใช้ TLP250 จำนวน 6 ตัว สำหรับขับสวิทช์ ไอจีบีที ดังภาพที่ 3.8 จากภาพจะพบว่าแหล่งจ่ายแรงดันของสวิทช์สามตัวด้านบนจะมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่แยกกันเพื่อป้องกันหากเกิดการช็อตจะได้ไม่ส่งผลต่อวงจรควบคุม ส่วนแหล่งจ่ายไฟของสวิทช์สามตัวด้านล่างจะให้แหล่งจ่ายไฟเดียวกัน ดังนั้นจะต้องมีการแยกกราวด์ออกเป็นสี่วงจรแหล่งจ่ายไฟโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า

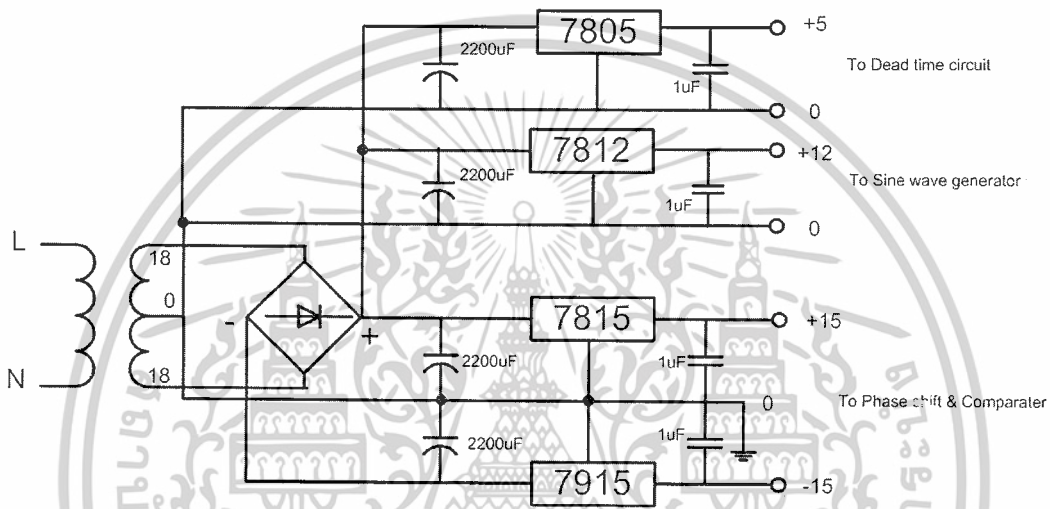


ภาพที่ 3.8 ลักษณะการต่อวงจรขับ

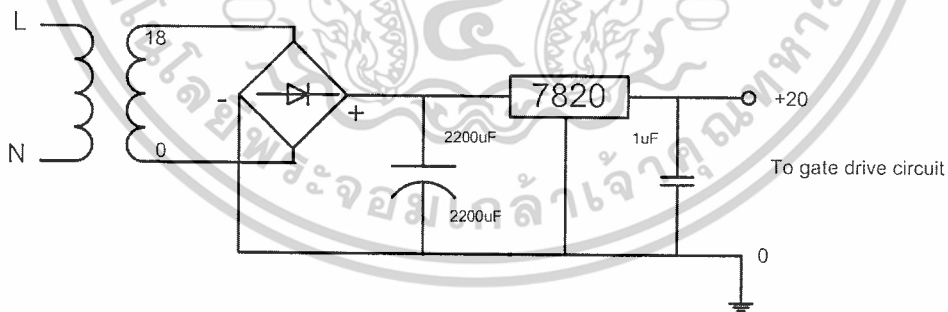
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรจ่ายไฟตรงให้กับวงจรควบคุมและวงจรขับ

ส่วนของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง ซึ่งจะต้องจ่ายไฟให้กับ วงจรสร้างสัญญาณไซน์ วงจรขยายแรงดัน วงจรเลื่อนเฟส วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและวงจรเมื่อเวลาจะใช้หม้อแปลงลูกเดียวกันโดยใช่วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ แล้วใช้ไอซีรักษาระดับแรงดันตามต้องการดังภาพที่ 3.9 ส่วนวงจรจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรขับเกต ซึ่งจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟ 4 ชุด ซึ่งแยกออกจากกัน เพื่อจ่ายให้กับวงจรขับเกตทั้ง 6 วงจร ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.9 วงจรจ่ายไฟตรงของวงจรควบคุม

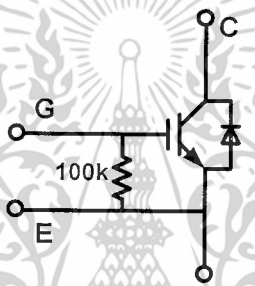


ภาพที่ 3.10 วงจรจ่ายไฟตรงของวงจรขับเกต

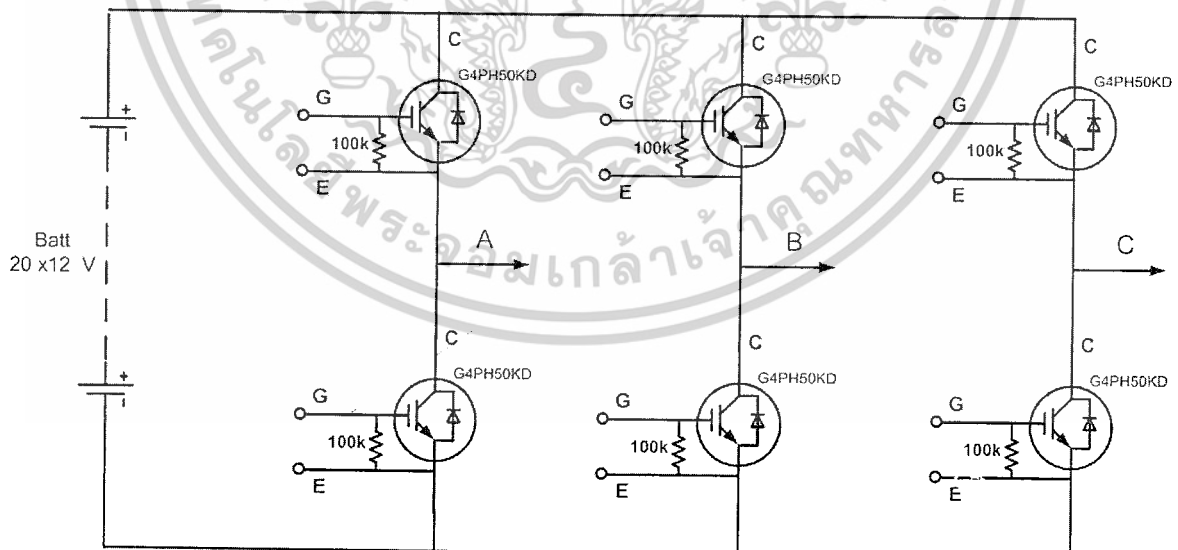
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 วงจรกำลัง

วงจรกำลังที่ใช้จะเป็นลักษณะเดียวกับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส วงจรที่ใช้ในปริณญาณินพนธ์นี้จะเป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ความถี่ 1 kHz – 20 kHz ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ 6 ตัว แบ่งเป็น 3 กิ่ง (Branch) โดยแต่ละกิ่งประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัวที่ทำงานไม่พร้อมกันเพื่อป้องกันการเกิดลัดวงจร ในที่นี้จะใช้ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT) ของ IRF รุ่น G4PH50KD เป็นสวิตช์โดยต่อความต้านทาน 100 k คร่อมขาเกตกับขาอีมีตเตอร์เพื่อป้องกันการทำงานของสวิตช์หากยังไม่ได้รับสัญญาณขับเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุแฝงที่คร่อมขาเกตกับขาอีมีตเตอร์ ดังภาพที่ 3.11 โดยแหล่งจ่ายแรงดันกันตรงจะใช้จากแบตเตอรี่ 12 โวลต์ 20 ตัวต่ออนุกรมกันเพื่อให้การให้การแยกกราวด์ของระบบแยกกันอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 3.11 การต่อตัวต้านทานเข้ากับไอจีบีที



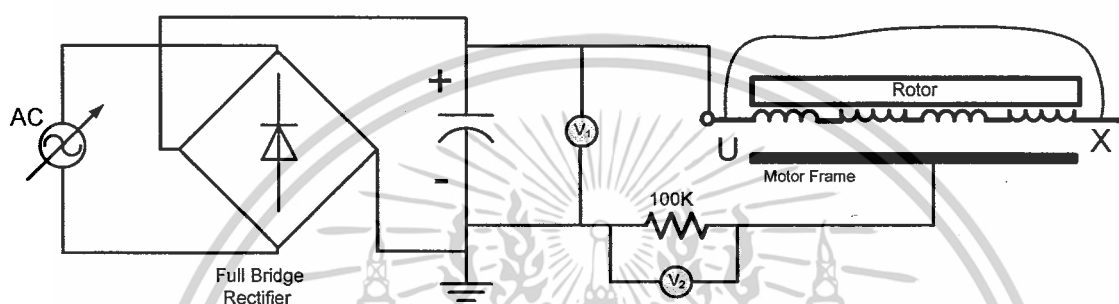
ภาพที่ 3.12 วงจรจ่ายแรงดันด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบรูปแบบการทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดกระแสรั่วไหลเกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้า เหนียวนำจะประกอบด้วยกรทดลองในสามตอนด้วยกันคือ

ตอนที่ 1. การทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานต่อแรงดันกระแสตรง ระหว่างขดลวดกับตัวถังของมอเตอร์ ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 วงจรการทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดันกระแสตรง

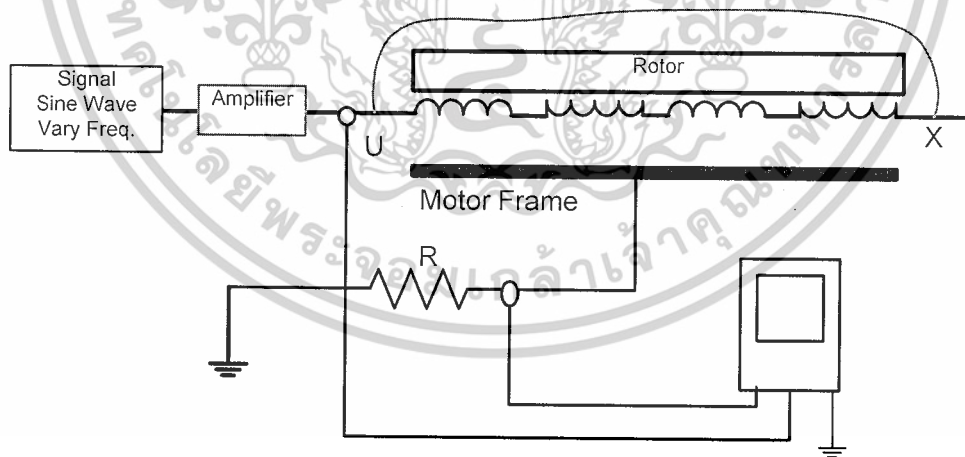
โดยวงจรจะสร้างแรงดันกระแสตรงโดยการรับแรงดันกระแสสลับจาก Variac ซึ่งเป็นตัวกำหนดพิกัดแรงดัน ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มรูปคลื่น จากนั้นก็เข้าตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันให้เรียบขึ้น โดยจะมีโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันกระแสตรงเพื่อกำหนดพิกัดแรงดันป้อนเข้าตามที่ออกแบบไว้ จากภาพที่ 3.12 จะเห็นว่าลักษณะการป้อนแรงดันเข้าสู่ขดลวดมอเตอร์จะมีการต่อกันระหว่างปลายขดทั้งสองด้าน ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการให้แรงดันตลอดทั้งขดมีค่าเท่ากัน จากนั้นวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับตัวถังของมอเตอร์ โดยวัดค่าแรงดันที่ผ่านตัวต้านทานภายนอกแล้วนำกลับไปคำนวณ ค่าและแแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานภายนอกที่ทราบค่าดังนั้นก็สามารณนำค่ากระแสที่ได้ เพื่อไปหาค่าความต้านทานระหว่าง ขดลวดกับตัวถังของมอเตอร์ได้

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือ เพื่อเป็นการวัดหาค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับตัวถังของมอเตอร์ ซึ่งการใช้แรงดันกระแสตรงเพราะต้องการทราบถึงค่าความต้านทานจริงภายในมอเตอร์ ( $R_{dc}$ ) เมื่อไม่มีผลของความถี่ ซึ่งโดยปกติจะต้องมีค่าที่สูงมาก โดยการทดลองนี้จะทดลองที่แรงดันต่าง ๆ แล้วดูแนวโน้มเพื่อหาค่าเฉลี่ยไว้เป็นค่าความต้านทานอ้างอิงในมอเตอร์ตัวนั้นๆ โดยได้ทำออกแบบตารางไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างตารางหาค่าความต้านทานของฉนวนมอเตอร์

V (V)	R ภายนอก	$V_{100k}$ (mV)	$I_{100k}$ ( $V_{100k} / R$ ) ( $\mu A$ )	$R_{dc}$ ( $V / I_{100k}$ ) ( $G\Omega$ )
50	100k			
100	100k			
150	100k			
200	100k			
250	100k			
			Average	

ตอนที่ 2. การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนต่อแรงดันรูปไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ เนื่องจากสมมติฐานที่ว่าปริมาณของกระแสที่ไหลจากมอเตอร์จะขึ้นกับค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลของกระแสที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเกิดจากค่าความต้านทานของฉนวนที่ลดลงซึ่งการลดลงของความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับตัวถังของมอเตอร์ จะเป็นรูปแบบใดก็จะต้องทำการทดสอบและนำผลที่ได้มาวิเคราะห์แล้วสร้างแบบจำลองตามผลการทดลองที่ได้ โดยมีวงจรการทดลองดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 รูปแบบการต่อวงจรการทดลอง

จากภาพจะเห็นว่า มีลักษณะรูปแบบการต่อวงจรการทดลองจะป้อนด้วยการแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ผ่านตัวขยายแรงดันเข้าสู่ขดลวดของมอเตอร์แล้ววัดลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ คลื่นแรงดันป้อนเข้าเทียบกับแรงดันที่ผ่านตัวต้านทานภายนอกซึ่งเสมือนเป็นการไหลของ กระแสที่ตนเอง โดยการทดสอบจะทำการทดสอบที่ 2 แรงดันคือ  $180 V_{rms}$  และ  $220 V_{rms}$  เพื่อดูผลของ แรงดันที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ภายในด้วย ซึ่งได้ออกแบบตารางบันทึกผลการทดลองตัวตารางที่ 3.2

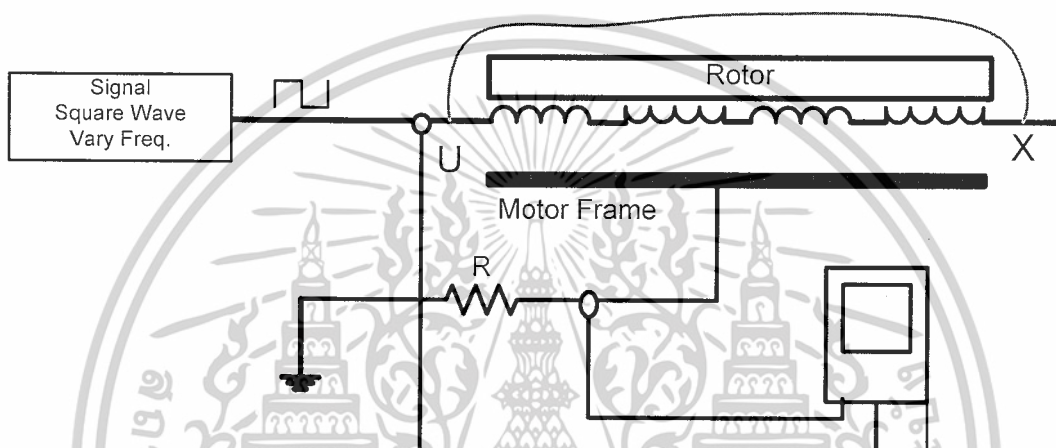
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าความต้านทานฉนวน

Fre.(Hz)	$I_L(A)$	$I_R(A)$	$I_C(A)$	Phase(°)	R( $\Omega$ )	$X_C(\Omega)$	Zc( $\Omega$ )	C(F)
50								
100								
300								
500								
1k								
3k								
5k								
10k								
15k								
20k								
25k								
30k								
Average								

จากผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อดูแนวโน้มของค่าองค์ประกอบอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งดูได้จากการสร้างกราฟของมอเตอร์แต่ละตัวประกอบกัน แล้ววิเคราะห์ผลที่สร้างวงจรมุมที่ได้จากการทดลอง

### ตอนที่ 3 การทดสอบความถี่สูงของฉนวนมอเตอร์ผ่านชุดสวิตช์แรงดันแบบสี่เหลี่ยม

การทดสอบนี้จะป้อนแรงดันรูปพัลส์แบบสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 kHz ถึง 20 kHz เพื่อดูลักษณะของกระแสรั่วไหลผ่านตัวถังมอเตอร์ ที่ความถี่ต่างๆ เพื่อทดสอบและยืนยันผลลักษณะวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่คาดไว้ ลักษณะวงจรการทดลองดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 วงจรการทดสอบความถี่สูงของฉนวนมอเตอร์ผ่านชุดสวิตช์แรงดันแบบสี่เหลี่ยม

จากภาพจะเห็นว่าลักษณะของวงจรจะคล้ายกับการทดสอบการหาค่าความต้านทานฉนวน เพียงแต่เปลี่ยนเฉพาะแรงจ่ายแรงดันเท่านั้น ซึ่งแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ในการสวิตช์แรงดันนั้นจะเป็นจากแบตเตอรี่ซึ่งจะช่วยกำจัดสัญญาณในระบบการวัด ซึ่งการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในมอเตอร์ โดยการวัดจากการดิซชาร์จของประจุไฟฟ้าภายในผ่านตัวต้านทานภายนอก ซึ่งทำให้เกิดค่าคงที่ทางเวลาเกิดขึ้น และสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าภายในได้และจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่หาได้จากจากการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองตอนที่ 3 แสดงดังตารางที่ 3.3

จากการทดลองจะเห็นว่าได้ทำการป้อนแรงดันแบบเฟสเดียว เพื่อศึกษาถึงผลของความถี่แบบสามเฟสที่มีต่อค่ากระแสรั่วไหล จึงได้ทำการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันแบบสามเฟสที่มีมุมห่างกัน  $120^\circ$  ทางไฟฟ้าแล้ววัดความถี่ของกระแสรั่วไหลและค่าความจุไฟฟ้าว่าเป็นอย่างไร ดังตารางการทดลองที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างตารางผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อน  
แรงดันสี่เหลี่ยมแบบป้อนสัญญาณ 1 เฟส

F (Hz)	$V_0$ (V)	$0.368V_0$ (V)	$\tau$ (us)	R (k $\Omega$ )	C (nF)
1k					
3k					
5k					
10k					
15k					
20k					
				Average	

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างตารางผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดัน  
สี่เหลี่ยมแบบป้อนสัญญาณ 3 เฟส

F (Hz)	$V_0$ (V)	$0.368V_0$ (V)	$\tau$ (us)	R (k $\Omega$ )	C (nF)
1k					
3k					
5k					
10k					
15k					
20k					
				Average	

ซึ่งผลการทดลองทั้งในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณสวิตช์และการทดลองทั้ง 3 ตอน  
จะแสดงในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

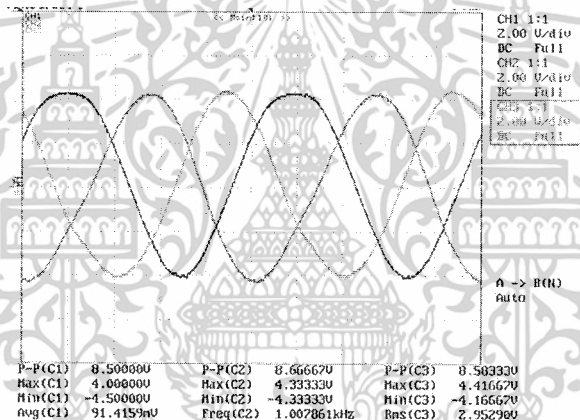
### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองการสร้างสัญญาณสวิตช์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

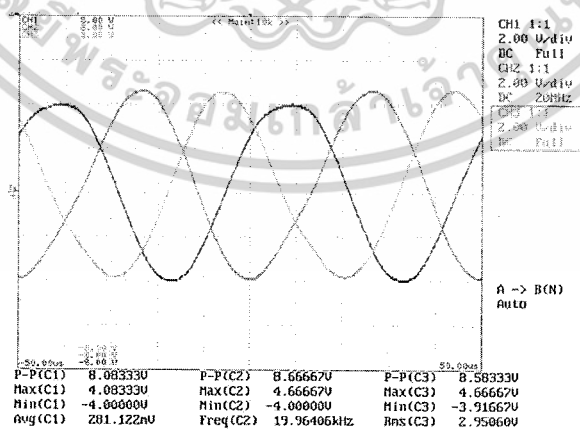
จากส่วนประกอบต่างๆ ของวงจรคือ

- วงจรสร้างสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ปรับค่าได้ตั้งแต่ 1-20 kHz
- วงจรขยายแรงดันแบบไม่กลับขั้ว
- วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณ

จากการทดลองจะได้รูปของสัญญาณไซน์ 3 เฟสดังภาพที่ 4.1 ซึ่งเป็นไปตามที่  
ออกแบบไว้



ภาพที่ 4.1 สัญญาณไซน์ 3 เฟส ที่ความถี่ 1 kHz



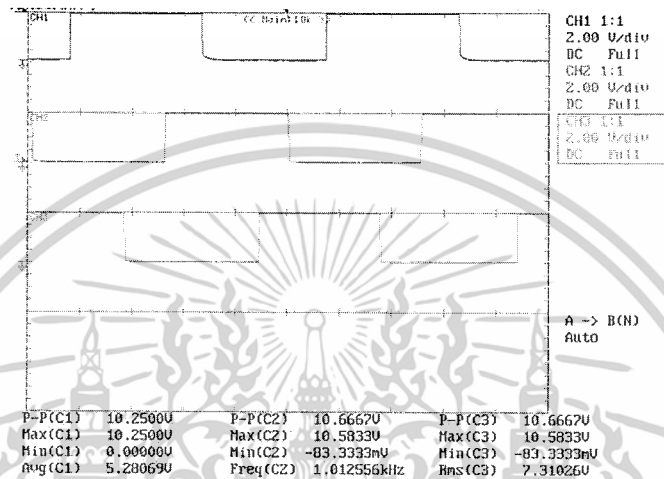
ภาพที่ 4.2 สัญญาณไซน์ 3 เฟส ที่ความถี่ 20 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

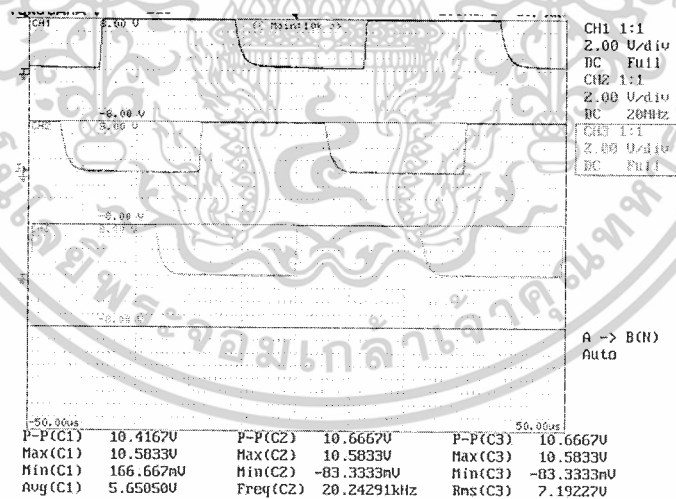
จากลักษณะของสัญญาณไซน์ดังกล่าวที่ได้จะนำมาเข้าสู่วงจรจริงดังนี้

- วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ
- วงจรขลิบสัญญาณด้านลบ

จะได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.2 ซึ่งเป็นไปตามลักษณะที่ได้ออกแบบไว้



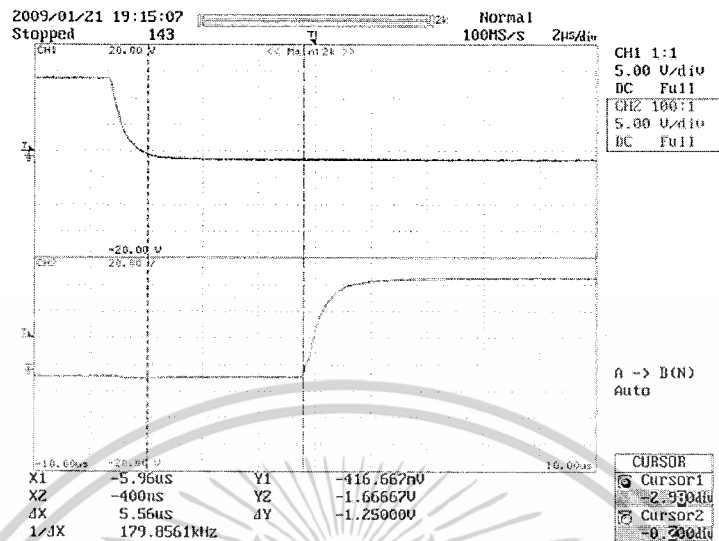
ภาพที่ 4.3 สัญญาณสี่เหลี่ยม 3 เฟส ที่ความถี่ 1 kHz



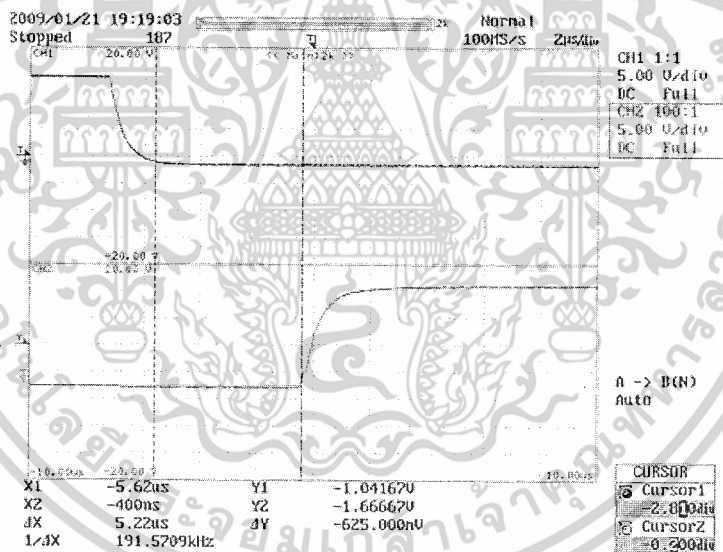
ภาพที่ 4.4 สัญญาณสี่เหลี่ยม 3 เฟส ที่ความถี่ 20 kHz

จากสัญญาณที่ได้จะนำมาเข้าสู่วงจรเพื่อเวลาเพื่อสร้างสัญญาณที่ตรงข้ามกันและมีค่าเพื่อเวลาเพื่อป้องกันการนำกระแสพร้อมกันของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีค่าประมาณ 5 us ตามที่ได้ออกแบบไว้ดังภาพที่ 4.5 และ ภาพที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



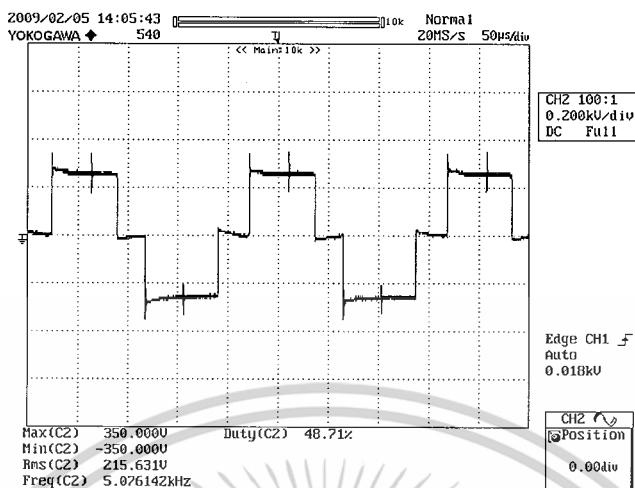
ภาพที่ 4.5 ค่าเพื่อเวลา 5.56 uS ที่ความถี่ 1 kHz



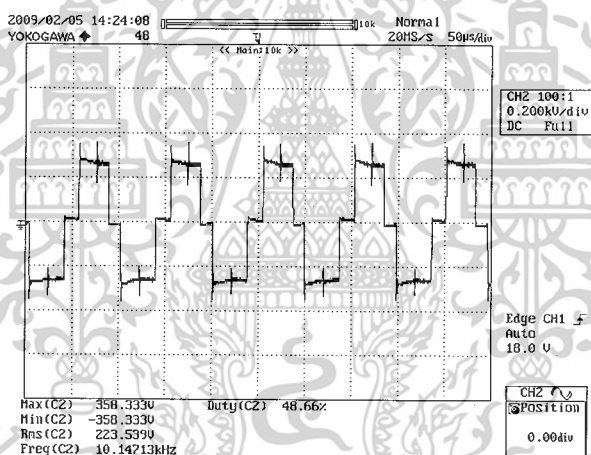
ภาพที่ 4.6 ค่าเพื่อเวลา 5.22 us ที่ความถี่ 10 kHz

จากนั้นนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่วงจรขับสวิตซ์อิเล็คทรอนิกส์แบบ 3 เฟสเพื่อนำไปขับสวิตซ์อิเล็คทรอนิกส์ (IGBT) เพื่อสร้างสัญญาณแรงดันรูปสี่เหลี่ยมแบบสามเฟสตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังภาพที่ 4.7 และ 4.8 แสดงลักษณะแรงดันโวลท์ระหว่างสองเฟสที่เกิดจากการสวิตซ์ที่ความถี่ 5 kHz และ 10 kHz ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 ลักษณะแรงดันโวลต์ที่ความถี่สวิตซ์ 5 kHz



ภาพที่ 4.8 ลักษณะแรงดันโวลต์ที่ความถี่สวิตซ์ 10 kHz

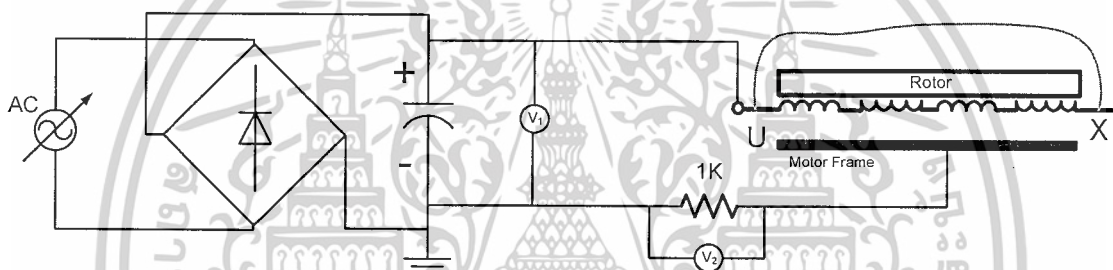
#### 4.2 ผลการทดลองเพื่อศึกษากระแสรั่วไหล

ตามที่ได้ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการเกิดของกระแสรั่วไหลและพฤติกรรมของค่าองประกอบของค่าความต้านทานฉนวนแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ซึ่งแต่ละส่วนมีผลการทดลองและการอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

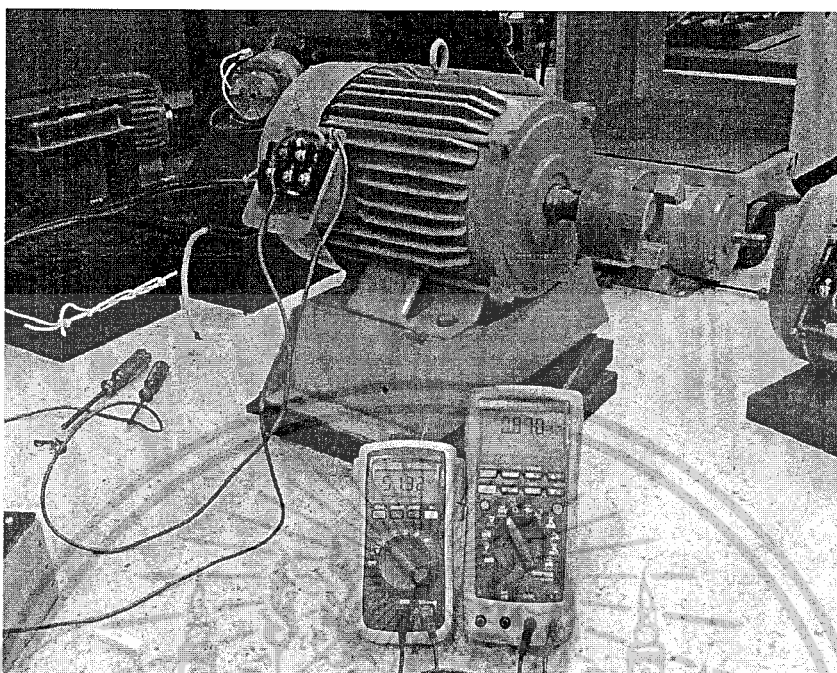
ตอนที่ 1. การทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานต่อแรงดันกระแสตรง ระหว่างขดลวดกับตัวถังของมอเตอร์

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือ เพื่อเป็นการวัดหาค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับตัวถังของมอเตอร์ ซึ่งการใช้แรงดันกระแสตรงเพราะต้องการทราบถึงค่าความต้านทานจริงภายในมอเตอร์ ( $R_{dc}$ ) เมื่อไม่มีผลของความถี่ ซึ่งโดยปกติจะต้องมีค่าที่สูงมาก โดยการทดลองนี้จะทดลองที่แรงดันต่าง ๆ แล้วดูแนวโน้มเพื่อหาค่าเฉลี่ยไว้เป็นค่าความต้านทานอ้างอิงในมอเตอร์ตัวนั้นๆ ดังภาพที่ 4.9 แสดงการต่อวงจรทดลอง



ภาพที่ 4.9 ลักษณะการต่อวงจรทดลองการหาค่าความต้านทานกระแสตรง

จากรูปวงจรการทดลองเมื่อทำการป้อนแรงดันแบบกระแสตรงโดยทำการป้อนที่ค่าแรงดันต่าง ๆ แล้วทำการวัดค่ากระแสผ่านตัวต้านทานขนาด 1k โดยวัดเป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยมัลติมิเตอร์แบบวัดแรงดันระดับมิลลิโวลต์ได้ ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 การวัดแรงดันป้อนเข้าและแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน

ผลของการวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ได้ที่แรงดันป้อนเข้าค่าต่างๆ แสดง  
ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์  
ที่วัดได้ของมอเตอร์ 3 เฟส พิกัด 1 HP

V (V)	R ภายนอก	V ตกคร่อม R (mV)	I ผ่าน R ( $\mu$ A)	$R_{dc}$ ( $G\Omega$ )
50	100k	0.5450	0.5450	9.174
100	100k	1.198	1.198	8.347
150	100k	1.817	1.817	8.255
200	100k	2.563	2.563	7.803
250	100k	3.443	3.443	7.261
Average				8.168

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

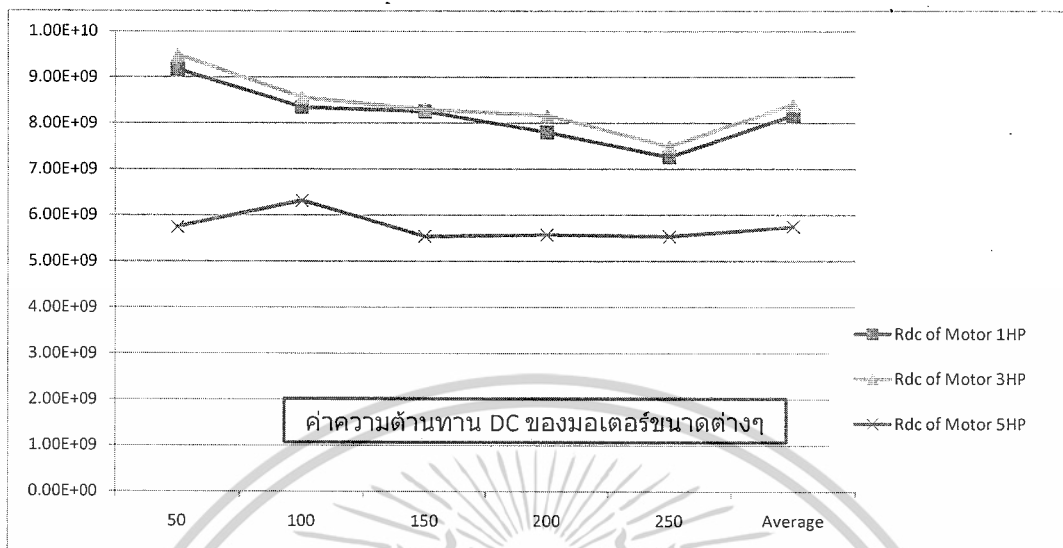
ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์  
ที่วัดได้ของมอเตอร์ 3 เฟส พิกัด 3 HP

V (V)	R ภายนอก	V ตกคร่อม R (mV)	I ผ่าน R (uA)	$R_{dc}$ ( $G\Omega$ )
50	100k	0.5270	0.5270	9.488
100	100k	1.168	1.168	8.562
150	100k	1.808	1.808	8.296
200	100k	2.449	2.449	8.167
250	100k	3.336	3.336	7.494
Average				8.401

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์  
ที่วัดได้ของมอเตอร์ 3 เฟส พิกัด 5 HP

V (V)	R ภายนอก	V ตกคร่อม R (mV)	I ผ่าน R (uA)	$R_{dc}$ ( $G\Omega$ )
50	100k	0.870	0.870	5.747
100	100k	1.583	1.583	6.317
150	100k	2.709	2.709	5.537
200	100k	3.588	3.588	5.574
250	100k	4.517	4.517	5.535
Average				5.742

จากการวัดค่าทั้งหมดสามารถแสดงผลการวัดได้ดังกราฟภาพที่ 4.11 ด้านล่าง

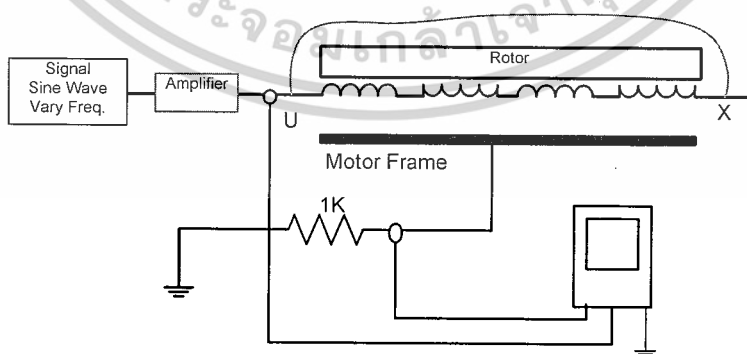


ภาพที่ 4.11 ผลการหาค่าความต้านทานของมอเตอร์พิกัดต่าง ๆ

จากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์ ( $R_{dc}$ ) จะมีค่าที่สูงมากและเป็นค่าความต้านทานที่ไม่มีผลของความถี่

ตอนที่ 2. การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนต่อแรงดันรูปไซน์ที่ความถี่ต่างๆ

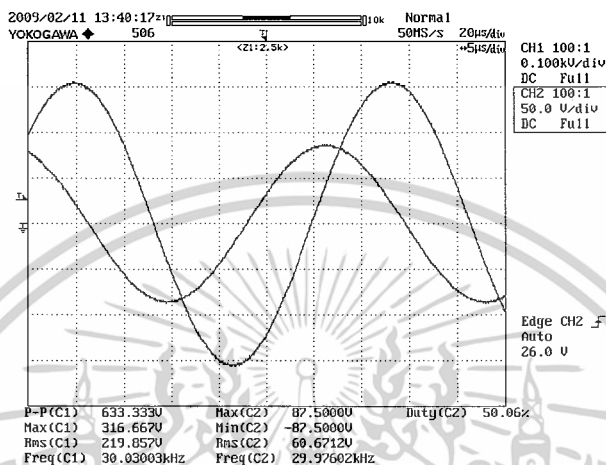
การทดสอบหาค่า Insulations Impedance of Induction Motor ในปริณญาณิพนธ์นี้ จะทำการทดสอบมอเตอร์หาค่าฉนวนมอเตอร์ 3 เฟส พิกัด 1 hp, 3 hp และ 5 hp อย่างละตัวเพื่อดูถึงแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้โดยค่าที่ได้จะช่วยให้การวิเคราะห์ผลของฉนวนมอเตอร์ที่ความถี่สูงได้ รูปแบบการต่อวงจรเป็นดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ลักษณะการต่อวงจรเพื่อหาค่า Insulation Impedance ที่ความถี่ต่างๆ

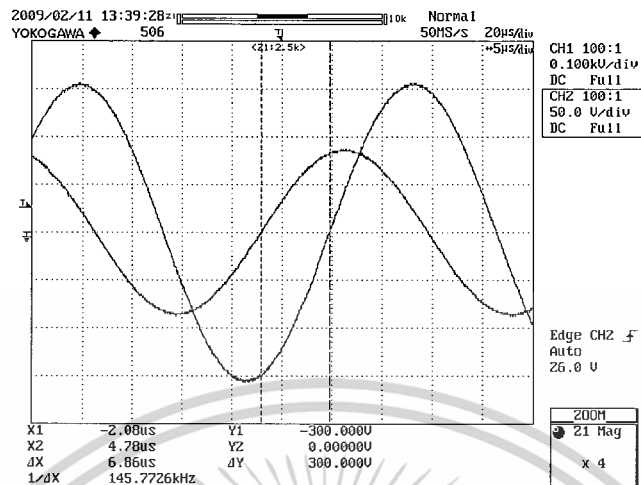
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างลักษณะรูปคลื่นที่วัดได้มีลักษณะดังรูปที่ 2 โดย channel 1 คือลักษณะแรงดันที่ได้จากเฟรมมอเตอร์ผ่านตัวต้านทาน 1k และ channel 2 คือลักษณะแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดของมอเตอร์



ภาพที่ 4.13 ตัวอย่างรูปคลื่นที่วัดได้จากสโคปที่ความถี่ 30 kHz ของมอเตอร์ที่กััด 3 hp

จากลักษณะรูปคลื่นที่ได้จะเป็นว่าลักษณะรูปคลื่นกระแส (c1) จะนำหน้าแรงดัน (ch2) อยู่ประมาณ 90 องศาเนื่องจากมีความเป็นค่าความจุไฟฟ้ามาก แต่เมื่อทำการวัดแล้วจะเห็นได้ว่ามุมที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า 90 องศาอยู่เล็กน้อยทำให้สังเกตเห็นได้ว่า ลักษณะของค่า Impedance จะมีผลของค่าความต้านทานอยู่ด้วยซึ่งสามารถทำการวัดและคำนวณค่า Impedance ( $R + jX_c$ ) ได้โดยวัดค่าความต่างเฟสดังภาพที่ 4.14 โดยคิดค่า Impedance ที่เกิดจากการขนานกันของ R และ  $jX_c$



ภาพที่ 4.14 การวัดค่าความต่างเฟส ของรูปคลื่น

ข้อมูลต่างๆ สามารถคำนวณหาค่า Impedance ของมอเตอร์จากตัวอย่างข้างต้นได้

ดังนี้

1. หาค่า กระแสที่ไหลจากเฟรมมอเตอร์ ( $i_L$ )

$$\text{จาก } i_L = \frac{V_R}{R_{\text{ext}}} = \frac{60.67 \times 10^{-3}}{1000} = 60.67 \text{ mA}$$

2. หามุม  $\theta$

$$\text{จาก } \Delta x = 6.86 \mu\text{.}$$

$$\text{ดังนั้น } \theta = \frac{360 \times 6.86 \times 10^{-6}}{(1/20000)} = 74.088^\circ$$

3. หาค่ากระแสที่ไหลผ่านค่าความต้านทาน R และ  $X_c$

$$\text{จาก } i_R = i_L \cos \theta = 60.67 \times 10^{-3} \times \cos 74.088^\circ = 16.633 \text{ mA}$$

$$i_c = i_L \sin \theta = 60.67 \times 10^{-3} \times \sin 74.088^\circ = 58.345 \text{ mA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หา R และ  $X_c$ 

$$\text{จาก } R = \frac{V_{\text{rms}}}{i_R} = \frac{220}{16.633 \times 10^{-3}} = 13.226 \text{ k}\Omega$$

$$X_c = \frac{V_{\text{rms}}}{i_c} = \frac{220}{58.345 \times 10^{-3}} = 3.77 \text{ k}\Omega$$

## 5. หาค่า C

$$\text{จาก } X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f_c}$$

$$\therefore C = \frac{1}{2\pi f_c X_c} = \frac{1}{2\pi \times 30000 \times 3.77 \times 10^3} = 1.407 \text{ nF}$$

จากการทดลองหาค่า Impedance ที่ความถี่ต่างๆ ของมอเตอร์ที่พิกัดกำลังต่างๆ โดยใช้หลักการเดียวกันได้ค่าดังตารางด้านล่าง โดยทำการทดสอบที่แรงดัน 2 ระดับคือ 180 V<sub>rms</sub> และ 220 V<sub>rms</sub> เพื่อดูผลกระทบของระดับแรงดันร่วมด้วย

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความถี่ต่างๆ ของมอเตอร์ พิกัด 1 hp พิกัดแรงดัน 180 V<sub>rms</sub>

Fre. (Hz)	$i_L$ (A)	$i_R$ (A)	$i_c$ (A)	Phase (°)	R (Ω)	$X_c$ (Ω)	Zc (Ω)	C (nF)
50	43.000u	135.088n	43.000u	89.82	1.332G	4.186M	4.173M	0.760
100	141.297u	1.243u	141.292u	89.50	144.823M	1.274M	1.263M	1.249
300	427.340u	7.920u	427.267u	88.94	22.726M	421.283k	413.615k	1.259
500	709.900u	13.381u	709.774u	88.92	13.452M	253.602k	248.910k	1.255
1k	1.416m	26.689u	1.416m	88.92	6.744M	127.141k	124.789k	1.252
3k	4.270m	107.306u	4.269m	88.56	1.677M	42.168k	41.134k	1.258
5k	7.220m	362.764u	7.211m	87.12	496.190K	24.962k	23.767k	1.275
10k	14.940m	844.387u	14.916m	86.76	213.172K	12.067k	11.421k	1.319
15k	23.170m	2.195m	23.066m	84.56	82.005K	7.804k	7.126k	1.360
20k	31.690m	5.821m	31.151m	79.42	30.924K	5.778k	4.869k	1.377
25k	39.670m	9.684m	38.470m	75.87	18.587K	4.679k	3.738k	1.361
30k	47.700m	14.797m	45.347m	71.93	12.165K	3.969k	2.993k	1.337
Average								1.305

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์

พิกัด 1 hp พิกัดแรงดัน 220 V<sub>rms</sub>

Fre. (Hz)	$I_L$ (A)	$I_R$ (A)	$I_c$ (A)	Phase (°)	R (Ω)	$X_c$ (Ω)	Zc (Ω)	C (nF)
50	63.4500U	398.665n	63.449u	89.64	551.841M	3.467M	3.446M	0.918
100	178.5800U	1.010u	178.577u	89.68	217.856M	1.232M	1.225M	1.292
300	514.5450U	3.233u	514.535u	89.64	68.049M	427.571k	424.901k	1.241
500	863.8200U	13.568u	863.713u	89.10	16.214M	254.714k	250.775k	1.250
1k	1.7320m	34.822u	1.732m	88.85	6.318M	127.046k	124.542k	1.253
3k	5.1200m	109.369u	5.119m	88.78	2.012M	42.979k	42.079k	1.234
5k	8.7960m	331.523u	8.790m	87.84	663.604k	25.029k	24.119k	1.272
10k	18.400m	1.086m	18.368m	86.62	202.558k	11.977k	11.309k	1.329
15k	28.430m	2.773m	28.294m	84.40	79.328k	7.775k	7.081k	1.365
20k	38.480m	6.592m	37.911m	80.14	33.374k	5.803k	4.943k	1.371
25k	48.360m	11.806m	46.897m	75.87	18.635k	4.691k	3.748k	1.357
30k	58.470m	18.452m	55.482m	71.60	11.923k	3.965k	2.976k	1.338
Average								1.301

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์

พิกัด 3 hp พิกัดแรงดัน 180 V<sub>rms</sub>

Fre. (Hz)	$I_L$ (A)	$I_R$ (A)	$I_c$ (A)	Phase (°)	R (Ω)	$X_c$ (Ω)	Zc (Ω)	C (nF)
50	44.500u	139.801n	44.500u	89.820	1.288G	4.045M	4.032M	0.787
100	153.500u	964.463n	153.497u	89.640	186.632M	1.173M	1.165M	1.357
300	389.435u	8.686u	389.338u	88.722	20.724M	462.323k	452.234k	1.148
500	754.866u	15.176u	754.713u	88.848	11.860M	238.501k	233.800k	1.335
1k	1.516m	30.479u	1.516m	88.848	5.906M	118.758k	116.417k	1.340
3k	4.560m	118.890u	4.558m	88.506	1.514M	39.487k	38.483k	1.344
5k	7.740m	213.953u	7.737m	88.416	841.307k	23.265k	22.639k	1.368
10k	15.970m	942.671u	15.942m	86.616	190.947k	11.291k	10.660k	1.410
15k	24.480m	2.319m	24.370m	84.564	77.617k	7.386k	6.744k	1.437
20k	33.250m	4.250m	32.977m	82.656	42.351k	5.458k	4.835k	1.458
25k	41.770m	9.879m	40.585m	76.320	18.221k	4.435k	3.567k	1.435
30k	49.870m	12.948m	48.160m	74.952	13.902k	3.738k	2.946k	1.419
Average								1.369

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์

พิกัด 3 hp พิกัดแรงดัน 220 V<sub>rms</sub>

Fre. (Hz)	$I_L$ (A)	$I_R$ (A)	$I_c$ (A)	Phase ( $^{\circ}$ )	R ( $\Omega$ )	$X_c$ ( $\Omega$ )	Zc ( $\Omega$ )	C (nF)
50	54.200u	170.274n	54.200u	89.82	1.292G	4.059M	4.046M	0.784
100	187.715u	471.779n	187.714u	89.856	466.320M	1.172M	1.169M	1.358
300	534.500u	9.101u	534.423u	89.0244	24.174M	411.659k	404.767k	1.289
500	924.049u	24.382u	923.727u	88.488	9.023M	238.166k	232.041k	1.337
1k	1.851u	38.377u	1.851m	88.812	5.733M	118.880k	116.465k	1.339
3k	5.570u	160.965u	5.568m	88.344	1.367M	39.514k	38.404k	1.343
5k	9.420m	260.392u	9.416m	88.416	844.879k	23.363k	22.735k	1.362
10k	19.670m	1.408m	19.620m	85.896	156.281k	11.213k	10.463k	1.419
15k	30.230m	2.864m	30.094m	84.564	76.821k	7.310k	6.675k	1.451
20k	40.610m	6.454m	40.094m	80.856	34.090k	5.487k	4.726k	1.450
25k	51.000m	11.438m	49.701m	77.040	19.234k	4.426k	3.598k	1.438
30k	60.670m	16.633m	58.345m	74.088	13.226k	3.771k	2.934k	1.407
Average								1.384

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความถี่ต่าง ๆ ของ

มอเตอร์ พิกัด 5 hp พิกัดแรงดัน 180 V<sub>rms</sub>

Fre. (Hz)	$I_L$ (A)	$I_R$ (A)	$I_c$ (A)	Phase ( $^{\circ}$ )	R ( $\Omega$ )	$X_c$ ( $\Omega$ )	Zc ( $\Omega$ )	C (nF)
50	43.000u	135.088n	43.000U	89.820	1.332G	4.186M	4.173M	0.7604
100	92.350u	580.248n	92.348U	89.640	310.212M	1.949M	1.937M	0.816
300	289.700u	6.734u	289.622U	88.668	26.729M	621.500k	607.378k	0.854
500	1.021m	32.700u	1.020m	88.164	5.505M	176.449k	170.968k	1.804
1k	2.036m	97.187u	2.034m	87.264	1.852M	88.510k	84.473k	1.798
3k	5.941m	380.862u	5.929m	86.324	472.613k	30.360k	28.528k	1.747
5k	9.878m	744.078U	9.850m	85.680	241.910k	18.274k	16.991k	1.742
10k	19.388m	2.430m	19.235m	82.800	74.075k	9.358k	8.308k	1.701
15k	28.514m	5.255m	28.026m	79.380	34.253k	6.423k	5.409k	1.652
20k	38.980m	8.742m	37.987m	77.040	20.590k	4.738k	3.852k	1.679
25k	48.186m	12.532m	46.528m	74.925	14.363k	3.869k	3.048k	1.646
30k	56.670m	18.390m	53.603m	71.064	9.788k	3.358k	2.500k	1.580
Average								1.705

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ต่างที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ พิกัด 5 hp พิกัดแรงดัน 220 V<sub>rms</sub>

Fre. (Hz)	$I_L$ (A)	$I_R$ (A)	$I_c$ (A)	Phase ( $^{\circ}$ )	R ( $\Omega$ )	$X_c$ ( $\Omega$ )	Zc ( $\Omega$ )	C (nF)
50	48.900u	307.246n	48.899U	89.640	716.039M	4.499M	4.471M	0.708
100	112.100u	1.409u	112.091u	89.280	156.178M	1.963M	1.938M	0.811
300	355.200U	6.249u	355.145u	88.992	35.207M	619.465k	608.754k	0.856
500	1.245m	59.449u	1.244m	87.264	3.701M	176.849k	168.783k	1.800
1k	2.439m	116.423u	2.436m	87.264	1.890M	90.304k	86.185k	1.762
3k	7.256m	455.608u	7.242m	86.400	482.871k	30.380k	28.581k	1.746
5k	12.020m	980.719u	11.980m	85.320	224.325k	18.364k	16.974k	1.733
10k	23.638m	3.110m	23.433m	82.440	70.741k	9.389k	8.289k	1.695
15k	35.989m	6.966m	35.308m	78.840	31.584k	6.231k	5.204k	1.703
20k	47.469m	10.936m	46.192m	76.680	20.116k	4.763k	3.851k	1.671
25k	55.028m	14.312m	53.134m	74.925	15.372k	4.140k	3.262k	1.538
30k	69.2725m	22.480m	65.524m	71.064	9.787k	3.358k	2.500k	1.580
							Average	1.692

จากตารางสามารถเขียนสรุปค่าความจุไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ตารางสรุปค่าความจุไฟฟ้าของมอเตอร์ที่พิกัดต่าง ๆ

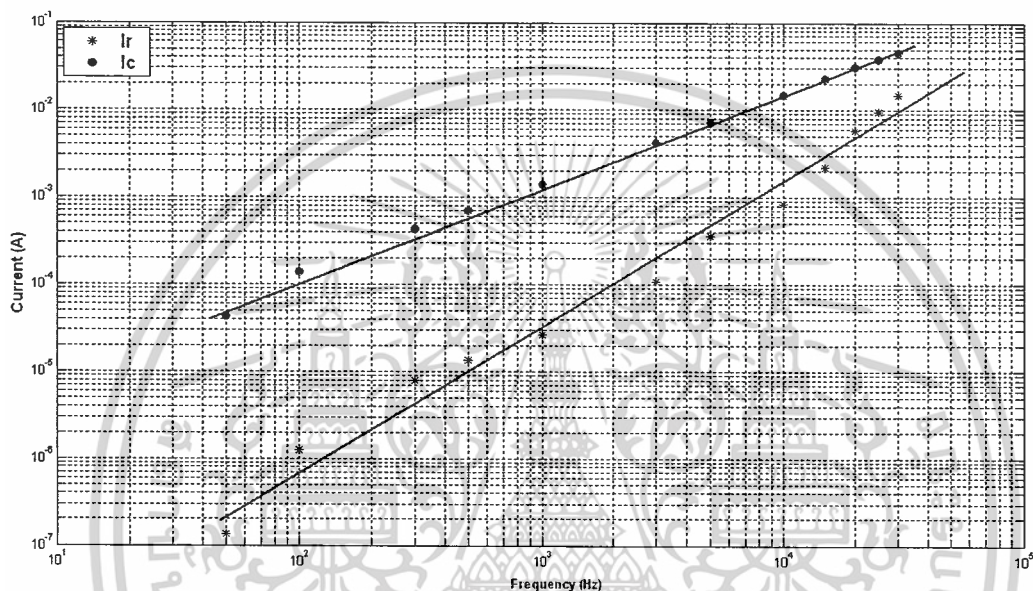
พิกัดมอเตอร์	ค่าความจุไฟฟ้า (nF)		Error (%)	เฉลี่ย
	180 V <sub>rms</sub>	220 V <sub>rms</sub>		
1 HP	1.305	1.301	0.31	1.303 nF
3 HP	1.369	1.384	1.08	1.377 nF
5 HP	1.705	1.692	2.20	1.700 nF

จากตารางจะเห็นว่าพิกัดแรงดันที่ต่างกันจะไม่มีผลต่อค่าความถี่ ซึ่งในการวิเคราะห์ค่าต่างจะใช้แรงดันที่พิกัด 220 โวลต์เป็นหลัก

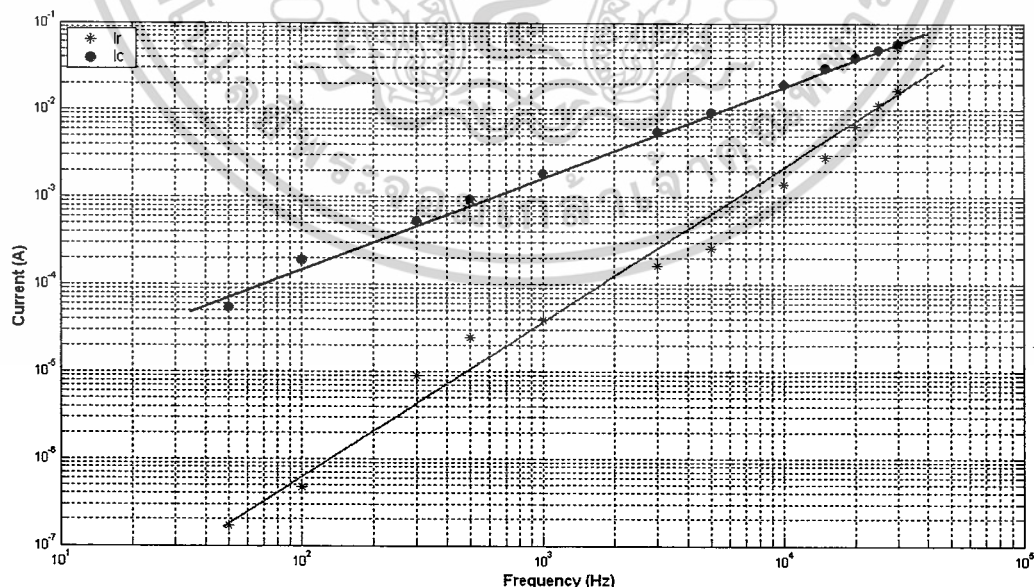
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การวิเคราะห์ผลของความถี่ต่อค่ากระแสรั่วไหล

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อดูค่าแนวโน้มของค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นดังภาพกราฟที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ของแรงดันป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้นปริมาณกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นก็มีแนวโน้มที่มากขึ้นเช่นกัน และอาจมีค่าเท่ากับที่ความถี่เรโซแนนซ์ค่าหนึ่ง

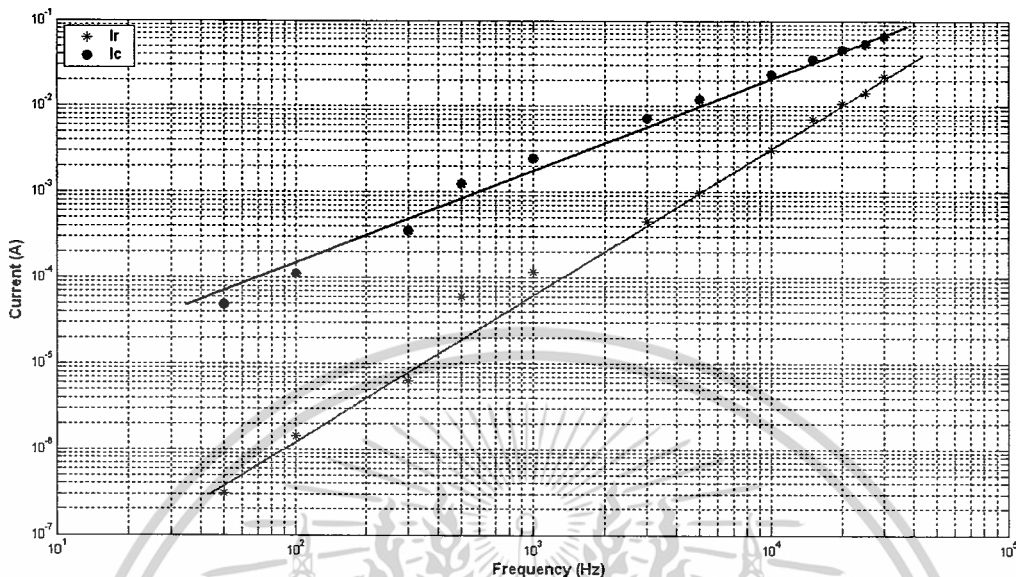


ก.ขนาดพิกัดมอเตอร์ 3 เฟส 1 แรงม้า



ข.ขนาดพิกัดมอเตอร์ 3 เฟส 3 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค.ขนาดพิกัดมอเตอร์ 3 เฟส 5 แรงม้า

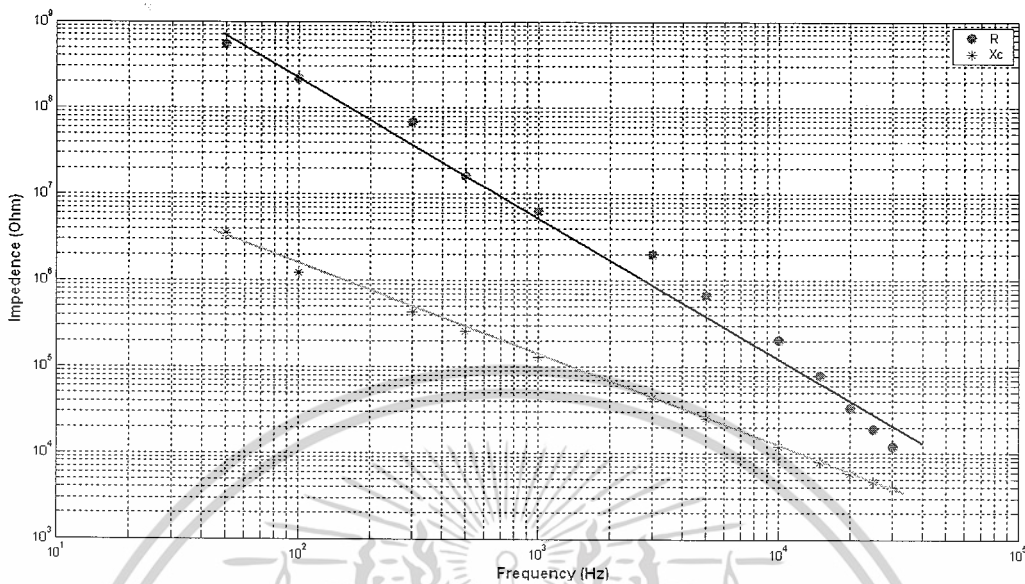
ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบกระแสที่ไหลผ่านค่าตัวต้านทาน

R และ  $X_c$  พิกัดแรงดัน 220  $V_{rms}$

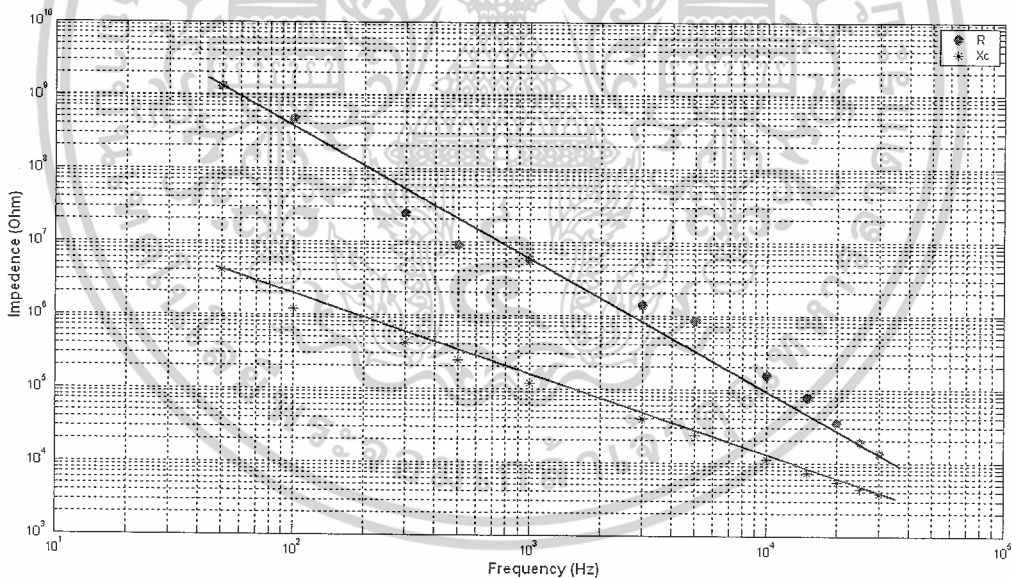
ปริมาณกระแสรั่วไหลที่ผ่านตัวต้านทาน  $X_c$  จะมีค่าสูงกว่า R ที่ความถี่เดียวกันเนื่องจากค่าความต้านทานที่น้อยกว่าและมีแนวโน้มที่ค่าความต้านทั้งสองจะมีค่าเท่ากันที่ความถี่สูงซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้เราสามารถวิเคราะห์ได้โดยดูค่า Insulations Impedance ที่เปลี่ยนไปที่ความถี่สูงซึ่งจากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าค่า Impedance ( $Z_c$ ) มีค่าลดลง เนื่องจากผลของ  $X_c$  ที่มีค่าลดลงตามสมการที่ 4.1

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4.1)$$

ผลของการลดลงของค่า Impedance ของฉนวนมอเตอร์นั้นจะส่งผลให้ปริมาณกระแสมีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้มีผลต่อการทำงานของระบบป้องกันสายดิน ผลของค่าที่มีต่อค่า Impedance ( $Z_c$ ) ซึ่งแสดงระหว่างค่า R และ  $X_c$  แสดงดังภาพที่ 4.16

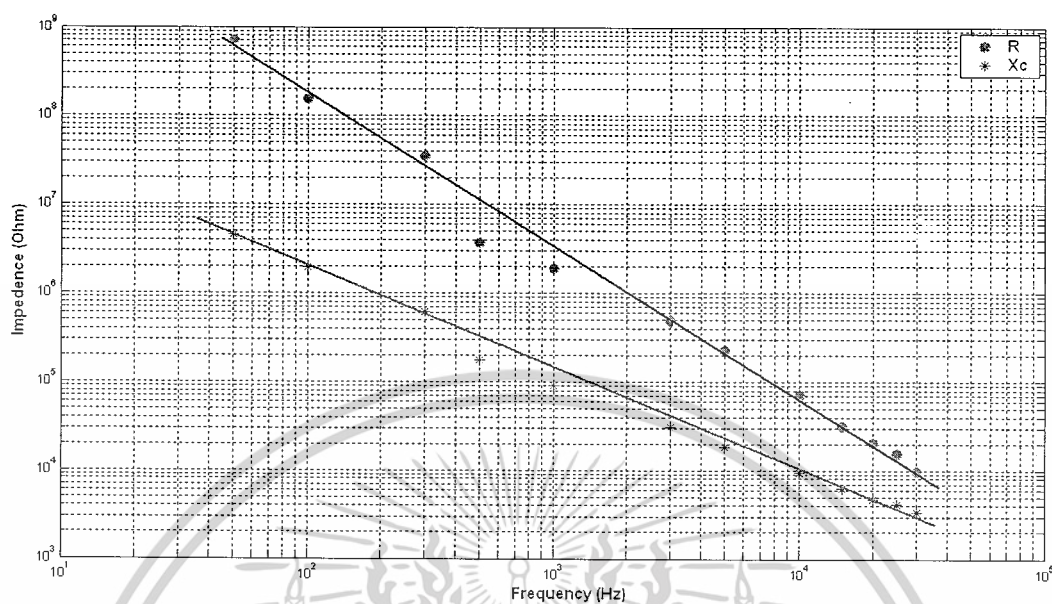


ก.ขนาดพิกัดมอเตอร์ 3 เฟส 1 แรงม้า



ข.ขนาดพิกัดมอเตอร์ 3 เฟส 3 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

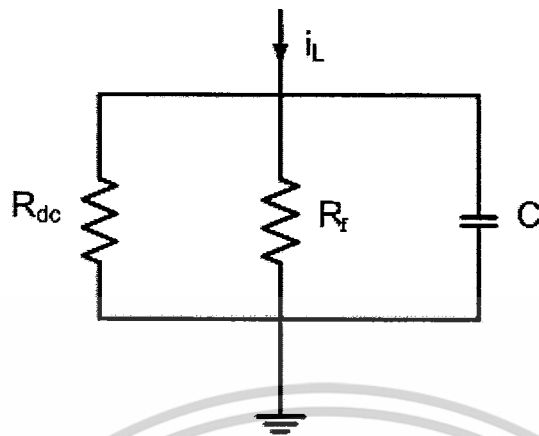


ค.ขนาดพิกัดมอเตอร์ 3 เฟส 5 แรมมา

ภาพที่ 4.16 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Impedance (R,Xc) ที่ความถี่ต่างๆ

จากภาพที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่สูงขึ้นไปค่า R และ  $X_c$  จะมีค่าลดลงตามความถี่ ซึ่งส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่าน Impedance ของฉนวนระหว่างอากาศและตัวถังของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะค่าความต้านทาน R เพื่อเป็นการยืนยันผลว่าความถี่มีผลต่อการทดลองของ R ภายในมอเตอร์ ดังที่ได้ทำการทดสอบจากการป้อนแรงดันกระแสตรงจะเห็นว่าเมื่อไม่มีผลของความถี่มาเกี่ยวข้องค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์จะมีค่าสูงมาก ( $>5 \text{ G}\Omega$ ) แต่เมื่อมีผลของความถี่เข้ามาเกี่ยวข้องค่า Impedance ของมอเตอร์จะมีค่าลดลงตามค่าความถี่ที่สูงขึ้น

จากข้อมูลที่ได้เมื่อนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ของฉนวน เมื่อดูจากความสัมพันธ์ของผลการทดลองที่ได้จะพบว่าวงจรสมมูลย์นั้นจะเป็นดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 วงจรสมมูลย์ของฉนวนระหว่างขดลวดมอเตอร์กับตัวถังมอเตอร์

จากวงจรจะประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน 2 ตัว คือค่าความต้านทาน กระแสตรง ( $R_{dc}$ ) และค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่  $R_f$  และค่าความจุไฟฟ้า (C) ซึ่งค่าความต้านทานที่คำนวณได้จะเป็นค่าความต้านทานที่เกิดจากการขนานกันระหว่างค่า  $R_{dc}$  และ  $R_f$  และสามารถคำนวณหาค่าความต้านทาน  $R_f$  ได้จากสมการที่ 4.2

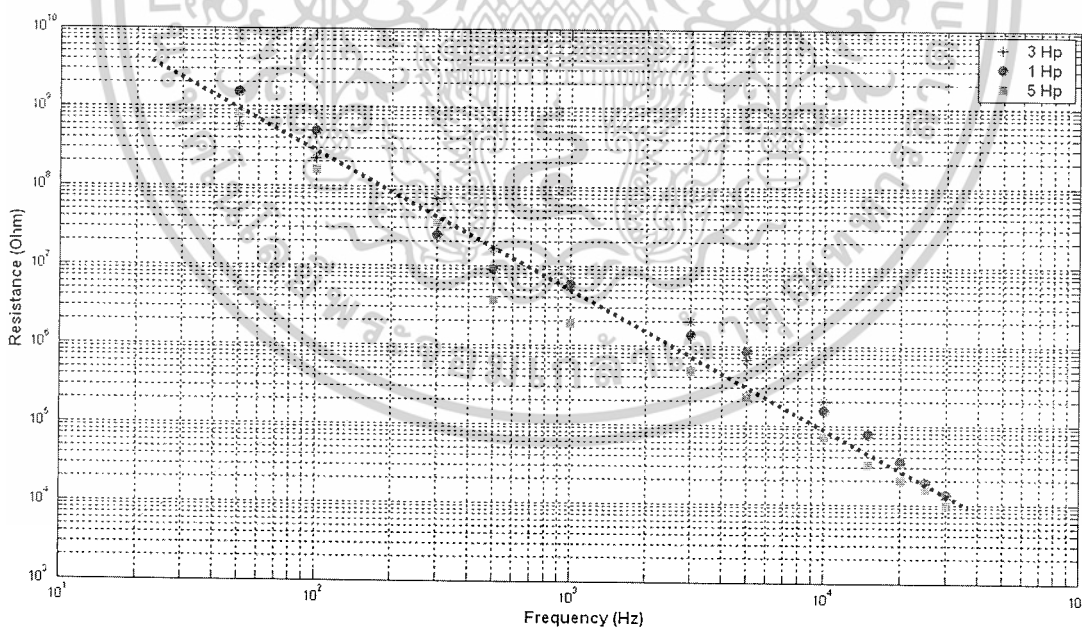
$$R_f = \frac{R_m R_{dc}}{R_{dc} - R_m} \quad (4.2)$$

โดยที่  $R_m$  คือค่าความต้านทานที่วัดได้ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ซึ่งจากการคำนวณสามารถดูได้จากตาราง 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าความต้านทานที่ ( $R_f$ ) เปลี่ยนแปลงตามความถี่ที่พิกัดมอเตอร์ขนาดต่าง ๆ

Frequency (Hz)	$R_f$ ของมอเตอร์ 1 Hp (k $\Omega$ )	$R_f$ ของมอเตอร์ 3 Hp (k $\Omega$ )	$R_f$ ของมอเตอร์ 5 Hp (k $\Omega$ )
50	591,815.1	1,526,891.7	818,092.6
100	223,82.5	493,729.3	160,545.8
300	68,620.6	24,243.7	35,424.7
500	16,246.5	9,032.7	3,703.0
1k	6,322.8	5,736.5	1,890.3
3k	2,012.0	1,366.9	482.9
5k	663.7	845.0	224.3
10k	202.6	156.3	70.7
15k	79.3	76.8	31.6
20k	33.4	34.1	20.1
25k	18.6	19.2	15.4
30k	11.9	13.2	9.8

ซึ่งสามารถเขียนกราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ได้ดังนี้



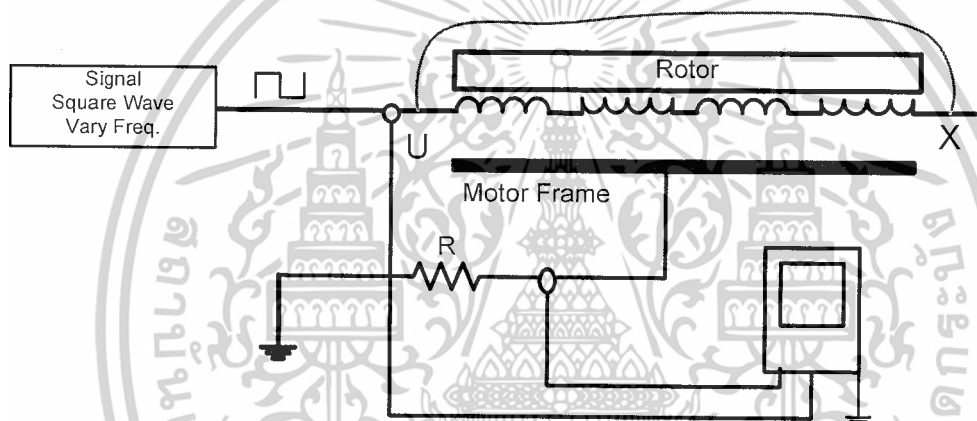
ภาพที่ 4.18 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ ( $R_f$ ) ของมอเตอร์พิกัดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นว่าแนวโน้มของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งจะส่งผลต่อค่าความต้านทานรวมของระบบ และสามารถพิสูจน์ได้ถึงผลของค่าความจุไฟฟ้าจากการทดลองตอนที่ 3

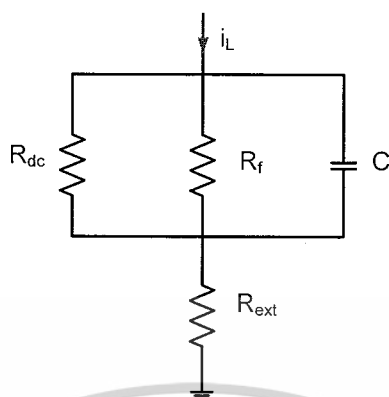
**ตอนที่ 3** การทดสอบความถี่สูงของฉนวนมอเตอร์ผ่านชุดสวิตช์แรงดันแบบสี่เหลี่ยม

การทดสอบนี้จะป้อนแรงดันรูปพัลส์แบบสี่เหลี่ยมที่ความถี่สูงตั้งแต่ 1 kHz ถึง 20 kHz เพื่อดูลักษณะของกระแสรั่วไหลผ่านตัวถังมอเตอร์ ที่ความถี่ต่างๆ เพื่อทดสอบและยืนยันผลลักษณะวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่คาดไว้ ลักษณะวงจรการทดลองดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 วงจรการทดสอบความถี่สูงของฉนวนมอเตอร์ผ่านชุดสวิตช์แรงดันแบบสี่เหลี่ยม

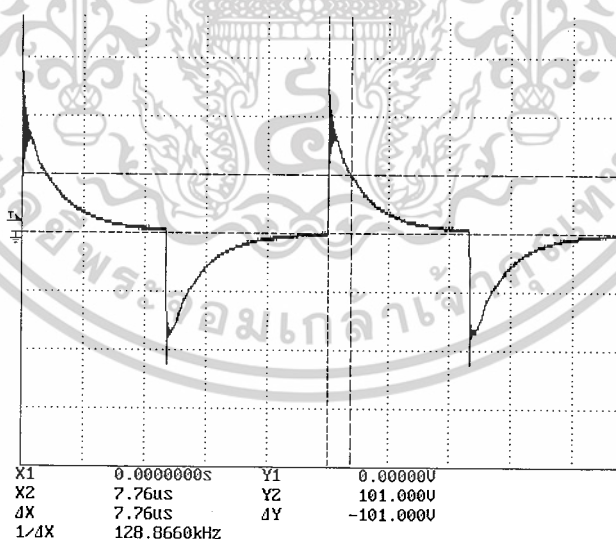
จากลักษณะวงจรสมมูลที่ได้ดังกล่าวเมื่อนำตัวต้านทานมาต่อเพิ่มเข้าไป จะทำให้ได้ลักษณะวงจรดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 วงจรสมมูลเมื่อต่อตัวต้านทานภายนอก

จากวงจรดังกล่าวหากวงจรสมมูลที่คิดไว้เป็นความจริงลักษณะของกราฟที่ได้จะต้องเกิดจากการดิซชาร์จค่าความจุไฟฟ้าภายในมอเตอร์จากตัวต้านทานภายนอกซึ่งทำให้เกิดค่าคงที่ทางเวลาในการดิซชาร์จขึ้นทำให้เราสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าแบบการป้อนสัญญาณไซน์

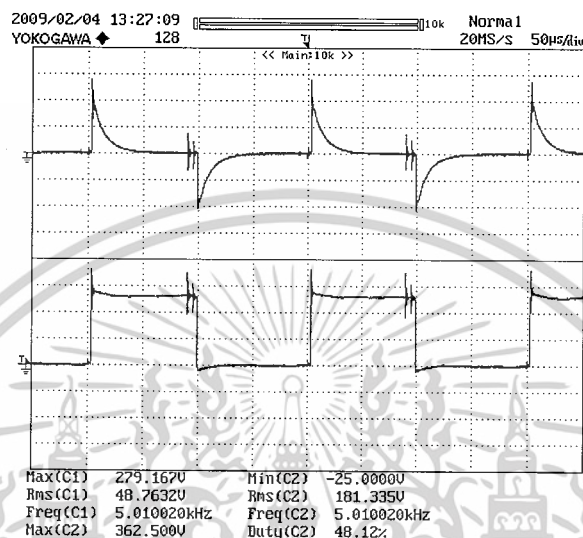
ลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะของวงจรสมมูลที่วิเคราะห์ได้คือมีลักษณะเป็นวงจรตัวต้านทานต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของกราฟที่มีค่าคงที่เวลาที่เกิดจากการดิซชาร์จของตัวเก็บประจุภายในผ่านตัวต้านทานภายนอก ดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 ตัวอย่างลักษณะรูปกราฟที่ได้จากการวัด  
เมื่อป้อนสัญญาณแบบพัลส์สี่เหลี่ยม 1 เฟส

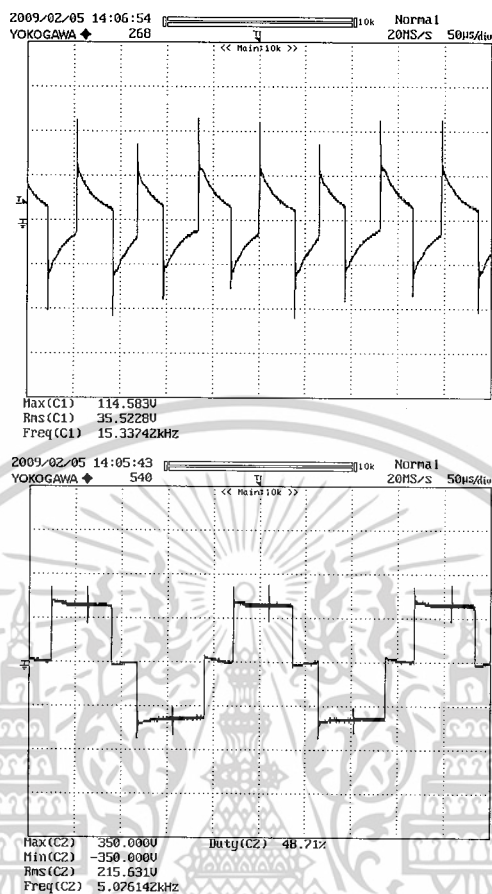
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลของลักษณะกระแสรีโวลท์ไหลที่ผ่านตัวต้านทานแรงดันมาเปรียบเทียบกับลักษณะของสัญญาณแรงดันจะเห็นว่าทุกครั้งที่เกิดการสวิตช์ของสัญญาณก็จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านความจุไฟฟ้ามากขึ้นตามค่าความถี่ของการสวิตช์นั้นๆ ดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 ลักษณะของกระแสรีโวลท์ไหลผ่านตัวเก็บประจุ  
เทียบกับแรงดันที่ความถี่สวิตช์ 5 kHz

แต่เมื่อทำการป้อนด้วยสัญญาณแบบสามเฟสจะพบว่าค่าความถี่ของกระแสรีโวลท์จะเพิ่มขึ้นเป็นสามเท่าของเฟสเดียวดังภาพที่ 4.23 แต่ค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้ยังมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมที่ตั้งแสดงการคำนวณไว้ด้านล่าง



ภาพที่ 4.23 ลักษณะของกระแสรั่วไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ความถี่สวิตซ์ 5 kHz แบบสามเฟส

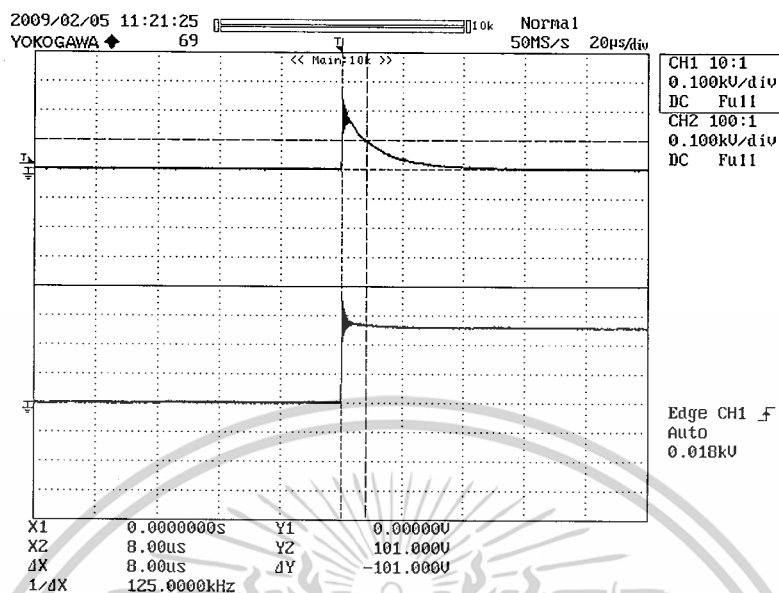
การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจากการป้อนด้วยแรงดันแบบสี่เหลี่ยม

จากผลที่ได้สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าภายในมอเตอร์ได้จากการวัดว่าคงที่เวลาจากสมการที่ 4.3

$$\tau = RC \quad (4.3)$$

เมื่อที่เวลา  $\tau$  จากกราฟหาค่าจากจุดตัดกราฟที่แรงดัน  $V_0 0.368$  แสดงดังภาพที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.24 การวัดค่าคงที่เวลาเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.19 สามารถหาค่าคงที่เวลาที่

$$V_0 0.368 = 275 \times 0.368 = 101V$$

เมื่อ  $R = 10 \text{ k}$  วัดค่าคงที่เวลาจากกราฟได้  $8 \text{ us}$  ดังนั้น

$$C = \frac{8 \times 10^{-6}}{10 \times 10^3} = 0.8 \text{ nF}$$

จากการหาค่าความจุไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ แบบสัญญาณ 1 เฟส เพื่อหาค่าความจุฯ ฟัดต่อเฟสซึ่งผลการคำนวณค่าต่างๆ สามารถดูได้จากตารางของมอเตอร์ที่ขนาดพิกัดต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่หาได้จากวิธีป้อนสัญญาณไซน์ แต่ก็มีค่าผิดพลาดอยู่บ้างซึ่งอาจขึ้นกับองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยม  
ที่เวลาที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์พิกัด 3 เฟส 1 HP

F (Hz)	$V_0$ (V)	$0.368V_0$ (V)	$\tau$ (us)	R (ohm)	C (nF)
1k	31.350	11.537	5.530	5k	1.106
3k	31.250	11.500	5.860	5k	1.172
5k	30.200	11.114	5.250	5k	1.050
7k	31.340	11.533	5.980	5k	1.196
10k	30.850	11.353	5.380	5k	1.076
13k	31.330	11.529	5.480	5k	1.096
15k	30.34	11.165	5.450	5k	1.090
20k	30.55	11.242	5.780	5k	1.156
Average					1.119

ตารางที่ 4.13 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยม  
ที่เวลาที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์พิกัด 3 เฟส 3 HP

F (Hz)	$V_0$ (V)	$0.368V_0$ (V)	$\tau$ (us)	R (ohm)	C (nF)
1k	31.250	11.500	5.730	5k	1.146
3k	31.670	11.655	5.660	5k	1.132
5k	30.830	11.345	5.450	5k	1.090
7k	31.250	11.500	5.580	5k	1.116
10k	31.250	11.500	5.580	5k	1.116
13k	31.250	11.500	5.580	5k	1.116
15k	30.830	11.345	5.60	5k	1.128
20k	300	11.040	5.470	5k	1.094
Average					1.117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยม  
ที่เวลาที่มีความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์ฟัด 3 เฟส 5 HP

F (Hz)	$V_0$ (V)	$0.368V_0$ (V)	$\tau$ (us)	R (ohm)	C (nF)
1k	33.100	12.181	6.330	5k	1.266
3k	33.330	12.265	6.330	5k	1.266
5k	33.330	12.265	6.330	5k	1.266
7k	33.330	12.265	6.430	5k	1.286
10k	32.910	12.111	6.660	5k	1.332
13k	32.500	11.960	6.660	5k	1.332
15k	31.660	11.651	6.860	5k	1.372
20k	30.00	11.040	6.860	5k	1.372
Average					1.312

เมื่อนำผลของการหาค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากวิธีการป้อนสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับผลการหาค่าความจุไฟฟ้าแบบวิธีป้อนสัญญาณแบบพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณไซน์ แล้วเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าระหว่างป้อนสัญญาณไซน์เทียบกับวิธีป้อน  
สัญญาณพัลส์แบบสี่เหลี่ยม

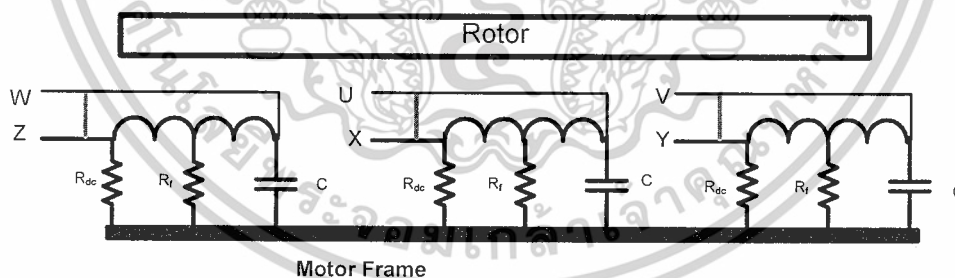
ฟัดมอเตอร์	วิธีจ่ายแรงดันไซน์	วิธีป้อนรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	เฉลี่ย	% Error
1 HP	1.303 nF	1.119 nF	1.211 nF	14.12%
3 HP	1.377 nF	1.117 nF	1.247 nF	18.88%
5 HP	1.700 nF	1.312 nF	1.506 nF	22.82%

จากนั้นทำการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันแบบสามเฟสของมอเตอร์ฟัด 1 แรงม้า แล้วคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าต่อเฟสของตัววิธีเดียวกันได้ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยมแบบสามเฟสที่เวลาที่ความถี่ต่าง ๆ ของมอเตอร์พิกัด 3 เฟส 1 HP

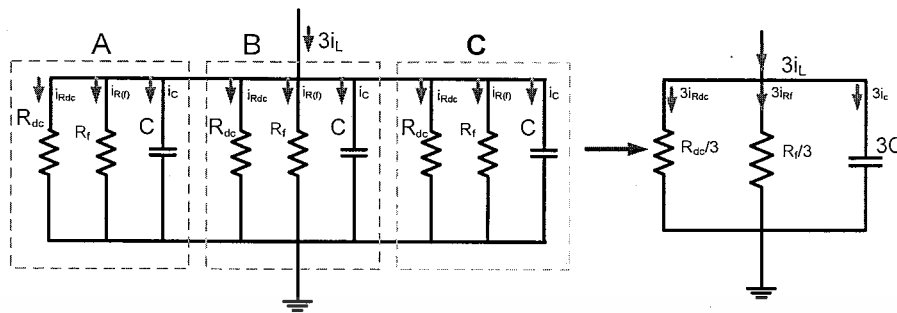
F (kHz)	$V_o$ (V)	$\tau$ (us)	R (k $\Omega$ )	C (nF)	per-phase (nF)
1	77.446	26.56	10	2.656	0.885
3	67.935	28.540	10	2.854	0.951
5	57.065	27.870	10	2.787	0.929
7	55.707	27.870	10	2.787	0.929
10	65.218	5.985	2	2.993	0.998
13	65.217	5.885	2	2.943	0.881
15	65.217	5.735	2	2.868	0.981
20	63.859	2.995	1	2.995	0.998
Average					0.994

ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบแบบการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยมแบบสามเฟสจากการทดสอบจะเห็นว่ามีความเป็นสามเท่าของ 1 เฟส ซึ่งก็เกิดจากการต่อขนานกันของค่าความจุไฟฟ้าภายในมอเตอร์ดังภาพที่ 4.25 เมื่อพิกัดแรงดันที่ป้อนเข้าเท่ากันสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลของฉนวนแบบสามเฟสภายในมอเตอร์ได้ดังภาพที่ 4.26



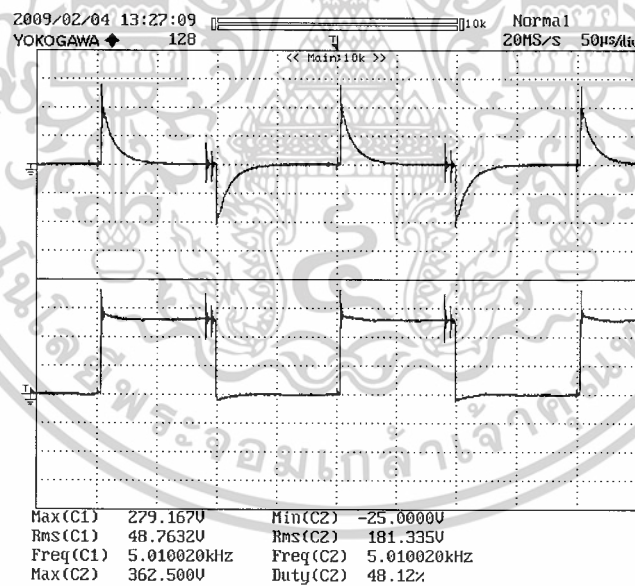
ภาพที่ 4.25 ลักษณะค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานภายในมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



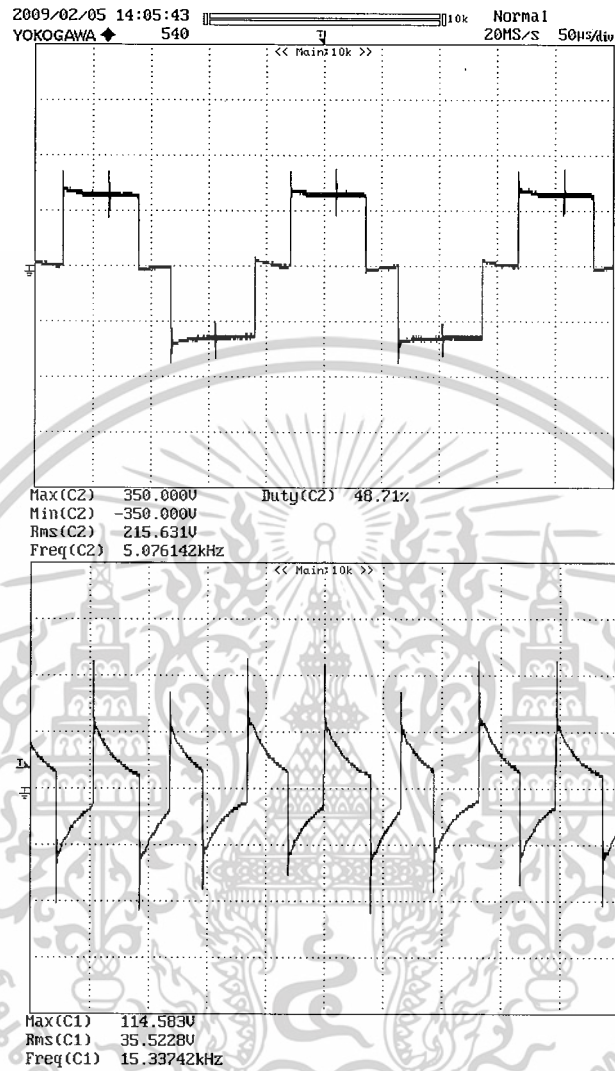
ภาพที่ 4.26 วงจรสมมูลของฉนวนแบบสามเฟสภายในมอเตอร์

จากวงจรสมมูลของฉนวนแบบสามเฟสดังภาพที่ 4.25 เมื่อยุบรวมค่า Impedance ต่าง ๆ เข้าด้วยกันแล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนแรงดันแบบสามเฟสจะทำให้ปริมาณของกระแสรั่วไหลโดยรวมเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพตัวอย่างด้านล่างเมื่อเปรียบเทียบแบบ 1 เฟส กับ 3 เฟส ที่ความ 5 kHz และ 20 kHz



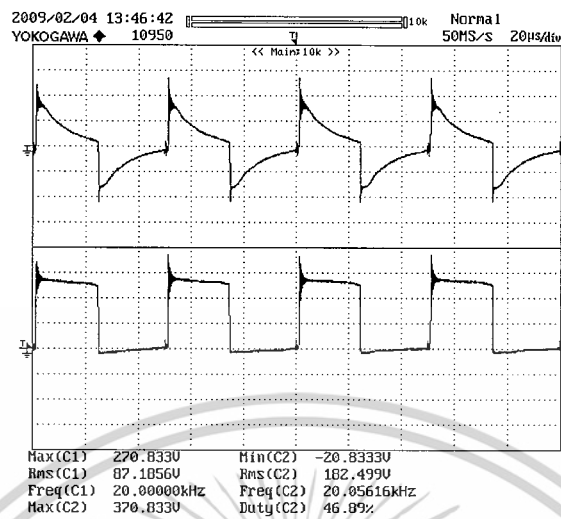
ภาพที่ 4.27 กระแสรั่วไหลผ่านตัวต้านทาน 5K เมื่อป้อนแรงดันแบบ 1 เฟส ที่ความถี่ 5k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

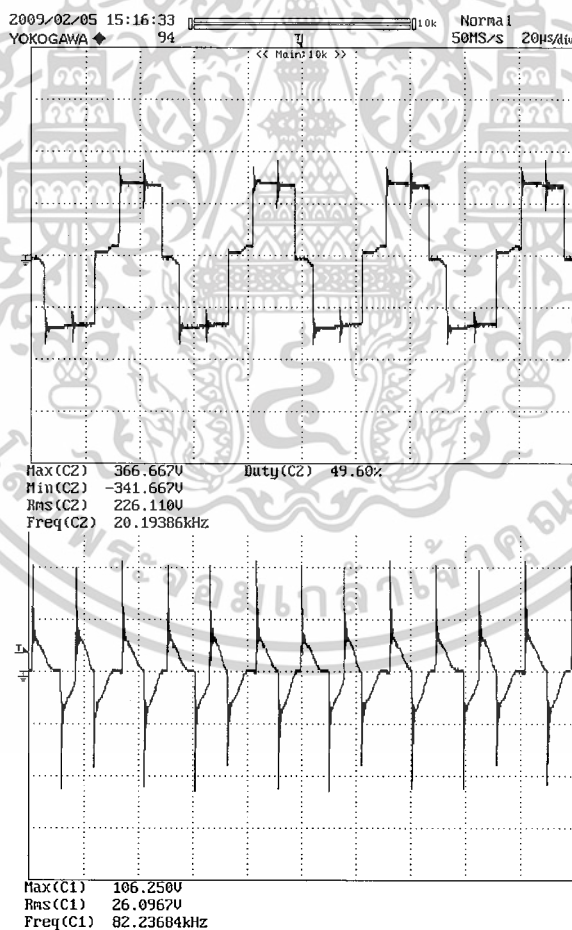


ภาพที่ 4.28 กระแสรั่วไหลผ่านตัวต้านทาน 5K เมื่อป้อนแรงดันแบบ 3 เฟสที่มีความถี่ 5k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.29 กระแสรั่วไหลผ่านตัวต้านทาน 1 K เมื่อป้อนแรงดันแบบ 1 เฟสที่มีความถี่ 20 k



ภาพที่ 4.30 กระแสรั่วไหลผ่านตัวต้านทาน 1 K เมื่อป้อนแรงดันแบบ 3 เฟสที่มีความถี่ 20 k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

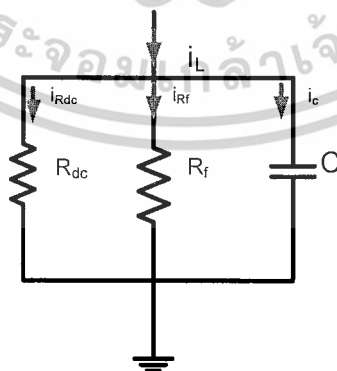
#### 5.1 บทสรุปผลการทดลอง

งานปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาลักษณะการเกิดกระแสรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ศึกษาถึงพฤติกรรมของฉนวนระหว่างขดลวดตัวนำกับตัวถังมอเตอร์ การหาค่า Insulation Impedance ของฉนวน การสร้างแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบแบบ 3 เฟส ที่สามารถปรับค่าความถี่สวิตช์ได้และมีการสวิตช์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมรวมไปถึงผลกระทบที่เกิดจากการป้อนแรงดันแบบสวิตช์จากแหล่งจ่ายที่สร้างขึ้น และสามารถสรุปประเด็นสำคัญในปริญญานิพนธ์ได้ดังนี้

1. การสร้างแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส ที่มีการสวิตช์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จากที่ได้ทำการออกแบบพบวงจรว่าสามารถทำงานได้ดี และสามารถเปลี่ยนค่าความถี่ได้จากกรับปรับค่าความต้านทานและวงจรเลื่อนเฟสก็สามารถทำงานได้ดีที่ความถี่ 1 kHz - 20 kHz

2. การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดันกระแสตรง ( $R_{dc}$ ) พบว่าจะมีค่าสูงมาก ( $< 5 \text{ G}\Omega$ ) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ว่าจะไม่เกิดผลต่อค่ากระแสรั่วไหลระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์ในสภาวะแรงกระแสตรงเนื่องจากมีค่าความต้านทานที่สูงและไม่เกิดผลของความถี่เข้ามาเกี่ยวข้อง

3. การทดสอบหาค่า Insulation Impedance ระหว่างขดลวดกับตัวถังมอเตอร์จากการป้อนแรงดันรูปไซน์ที่ความถี่ต่างๆ จากการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นทำให้สามารถสร้างวงจรมูลย์ของฉนวนได้ดังภาพที่ 5.1 ซึ่งประกอบไปด้วย ความต้านทานกระแสตรง ( $R_{dc}$ ) ความต้านทานกระแสสลับ  $R_f$  และค่าความจุไฟฟ้า (C)



ภาพที่ 5.1 วงจรมูลย์ของฉนวนมอเตอร์ระหว่างขดลวดกับตัวถังมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลของค่ากระแสรั่วไหลที่มากขึ้น เกิดจากความถี่ที่สูงขึ้นของแรงดันจากแหล่งจ่ายซึ่งจะส่งผลต่อ Insulation Impedance คือ  $R_f$  และ  $X_c$  โดยเฉพาะค่าความต้านทานกระแสสลับ ( $R_f$ ) ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากซึ่งจะส่งผลต่อ สมบัติความเป็นฉนวนโดยรวมระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์ ทำให้การรั่วไหลของกระแสเพิ่มสูงขึ้น และทำให้เกิดค่าความสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กทริกขึ้น (Dielectric Loss) เนื่องจากอัตราการรั่วไหลของกระแสมีค่ามากกว่าอัตราการลดลงของค่าความต้านทานโดยรวม ( $R_{dc} // R_f$ )

5. เมื่อทดสอบด้วยการป้อนแรงดันแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ลักษณะของกระแสรั่วไหล จะมีพฤติกรรมที่เกิดการรั่วไหลตามลักษณะการเปลี่ยนระดับแรงดันขณะสวิตช์ (ความถี่ของการสวิตช์แรงดัน) และจะมีค่าความถี่สูงขึ้นเมื่อเกิดการสวิตช์แบบ 3 เฟส

6. การเลือกความถี่สวิตช์ของระบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Inverter) เพื่อใช้งานควรคำนึงถึงปริมาณกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นด้วยเพราะจะส่งผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ที่ต่อร่วมกัน

## 5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะ

1. การใช้งานแหล่งจ่ายแรงดันแบบรูปสี่เหลี่ยมที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ ในการใช้งานแต่ละครั้งต้องปรับค่าต่าง ๆ เองทั้งหมด ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยาก จึงควรใช้ Microcontroller เข้ามาช่วยควบคุม

2. เนื่องจากสัญญาณที่วัดเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูงและอาจเกิดการรบกวนของสัญญาณภายนอกได้ง่าย จึงควรทดลองในช่วงที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความถี่สูง (Inverter) ทำงานอยู่

3. ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้อาจมีค่าผิดพลาดอยู่บ้างเนื่องจากผลของอุปกรณ์และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ความยาวสาย ค่าความเหนี่ยวนำในอุปกรณ์ต่างๆ

## 5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ

- เมื่อศึกษาและทราบถึงลักษณะการเกิดกระแสรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแล้ว สิ่งที่ต้องศึกษาต่อไปคือ การพัฒนาหารูปแบบของสมการการเกิด ที่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาวงจรลดกระแสดังกล่าวหรือการเลือกใช้งานของระบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีความถี่สวิตช์ไม่เกินค่าที่ฉนวนระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์มีค่าต่ำเกินไป

## บรรณานุกรม

- [1] Skibinski, G.L.; Kerkman, R.J. and Schlegel, D., "EMI emissions of modern PWM AC drives," **IEEE IAS. Magazine.**, Vol. 5, No.6, 1999, pp. 47-80.
- [2] Akagi, H. and Doumoto, T., "An approach to eliminating high-frequency shaft voltage and ground leakage current from an inverter-driven motor," **IEEE Trans. Ind. Appl.** Vol. 40, No. 4, 2004, pp. 1162-1169.
- [3] Chen, S.; Lipo, T. A. and Fitzgerald, D., "Modeling of motor bearing currents in PWM inverter drives," **IEEE Trans. Ind. Appl.** Vol. 32, No. 6, 1996, pp. 1365-1370.
- [4] Kempski, A.; Strzelecki, R.; Smolenski, R. and Fedyczak, Z., "Bearing current path and pulse rate in PWM-inverter-fed induction," **Conf. Rec. of IEEE-PESC.** Vol. 4, 2001, pp. 2025–2030.
- [5] Hanigovszki, N.; Poulsen, J. and Blaabjerg, F., "A novel output filter topology to reduce motor overvoltage," **Conf. Rec. of IEEE-IAS.** Vol. 1, 2003, pp. 445–451.
- [6] Kim, L.-H.; Yun, H.-K.; Won, C.-Y.; Kim, Y.-R. and Choi, G.-S., "Output filter design for conducted EMI reduction of PWM inverter-fed induction motor system," **Conf. Rec. of IEEE-PEDS.** Vol. 1, 2001, pp. 252-258.
- [7] Rendusara, D. and Enjeti, P., "New inverter output filter configuration reduces common mode and differential mode dv/dt at the motor terminals in PWM drive systems," **Conf. Rec. of IEEE-PESC.**, Vol. 2, 1997, pp. 1269–1275.
- [8] Von Jouanne, A.; and Enjeti, P., "Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motor leads in ASD applications," **IEEE Trans. Ind. Appl.**, Vol.33, No. 5, 1997, pp. 1138-1145.
- [9] Naik, R.; Nondahl, T. A.; Melfi, M. J.; Schiferl, R. and Wang, J. -S., "Circuit model for shaft voltage prediction in induction motors fed by PWM-based AC drives," **IEEE Trans. Ind. Appl.**, Vol. 39, No. 5, 2003, pp. 1294-1299.
- [10] Mutoh, N.; Ogata, M.; Kayhan, G. and Harashima, F., "Controlling methods of EMI noises generated in motor drive systems," **Conf. Rec. of IEEE-PESC.**, Vol.3, 2002, pp. 1531–1536.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Kempinski, A.; Smolenski, R.; and Strzelecki, R., "Common mode current paths and their modeling in PWM inverter-fed drives," **Conf. Rec. of IEEE-PESC**, Vol. 3, 2002, pp. 1551–1556.
- [12] Ogasawara, S. and Akagi, H., "Modeling and damping of high frequency leakage currents in PWM inverter-fed ac motor drive system," **IEEE Trans. Ind. Appl.** Vol.32, No.5, 1996, pp. 1105-1114.
- [13] Akagi, H.; Hasegawa, H. and Doumoto, T., "Design and performance of a passive EMI filter for use with a voltage-source PWM inverter having sinusoidal output voltage and zero common-mode voltage," **IEEE Trans. Power Electronic** , Vol.19, No. 4,2004, pp. 1069-1076.
- [14] Kempinski, A.; Smolenski, R.; Kot, E. and Fedyczak, Z., "Active and passive series compensation of common mode voltage in adjustable speed drive system," **Conf. Rec. of IEEE-IAS**.Vol. 4,2004,pp. 2665-2671.
- [15] Mei, C.; Balda, J.C.; Waite, W.P. and Carr, K., "Analyzing common-mode chokes for induction motor drives," **Conf. Rec. of IEEE-PESC**, Vol.3,2002,pp. 1557–1562.
- [16] Murai, Y.; Kubota, T. and Kawase, Y., "Leakage current reduction for a high-frequency carrier inverter feeding an induction motor," **IEEE Trans. Ind. Appl**,Vol.28, No. 4 ,1992,pp. 858-863.
- [17] Ogasawara, S.; Ayano, H. and Akagi, H., "An active circuit for cancellation of common-mode voltage generated by a PWM inverter," **IEEE Trans. Power Electronic**,Vol. 13, No. 5, 1998, pp. 835-841.
- [18] Ogasawara, S. and Akagi, H., "Suppression of common-mode voltage in a PWM rectifier/inverter system," **Conf. Rec. of IEEE-IAS**,Vol. 3 ,2001,pp. 2015-2021.
- [19] Ratnayake, K.R.M.N. and Murai, Y., "Study of leakage current reduction techniques and their suitability for three level high power inverter applications," **Conf. Rec. of IEEE-PESC**,Vol. 2 ,1998, pp. 1456-1462.
- [20] Son, Y. -C. and Sul, S. -K., "Conducted EMI in PWM inverter for household electric appliance," **Conf. Rec. of IEEE-IAS**. Vol.4,2001,pp. 2441-2447.
- [21] Son, Y. -C. and Sul, S. -K., "A new active common-mode EMI filter for PWM inverter," **IEEE Trans. Power Electronic**, Vol. 18, No. 6 ,2003,pp. 1309-1314.

- [22] Steinke, J. K., "Use of an LC filter to achieve a motor-friendly performance of the PWM voltage source inverter," **IEEE Trans. Energy Conversion**, Vol. 14, No. 3, 1999, pp. 649-654.
- [23] Takahashi, I.; Ogata, A.; Kanazawa, H. and Hiruma, A., "Active EMI filter for switching noise of high frequency inverters," **Conf. Rec. of IEEE PCC-Nagaoka**, 1997, pp. 331-334.
- [24] Xiyu, C.; Bin, Y. and Yu, G., "The engineering design and optimisation of inverter output RLC filter in AC motor drive system," **Conf. Rec. of IEEE-IECON**, Vol. 1, 2002, pp. 175-180.
- [25] Yanshu, J.; Dianguo, X. and Xiyu, C., "Analysis and design of a feed-forward-type active filter to eliminate common-mode voltage generated by a PWM inverter," **Conf. Rec. of IEEE-IECON**, Vol. 1, 2002, pp. 771-775.
- [26] Akagi, H. and Doumoto, T., "A passive EMI filter for preventing high-frequency leakage current from flowing through the inverter heat sink of an adjustable speed motor drive system," **Conf. Rec. of IEEE-IA**, Vol. 3, 2004, pp. 2003-2009.
- [27] Boglietti, A. and Carpaneto, E., "Induction motor high frequency model," **Conf. Rec. of IEEE-IAS**, Vol. 3, 1999, pp. 1551-1558.
- [28] Shen, W.; Wang, F. and Boroyevich, D., "Conducted EMI characteristic and its implications to filter design in 3-phase diode front-end converters," **Conf. Rec. of IEEE-IAS**, Vol. 3, 2004, pp. 1840-1846.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

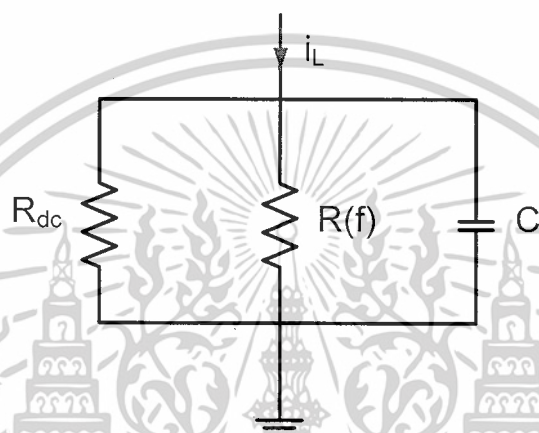


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## สมการวิเคราะห์หาค่าความต้านทานกระแสสลับ

จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความต้านทานกระแสสลับ ( $R_f$ ) จงจรสมมูลย์ตามภาพ ผ.1



ภาพที่ ผ. 1 จงจรสมมูลย์ระหว่างขดลวดและฉนวนมอเตอร์

จากภาพวงจรสมมูลย์จะประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน 2 ค่าคือ  $R_{dc}$  และ  $R_f$  ซึ่งค่าความต้านทานรวม ( $R_m$ ) คือค่าที่วัดได้ ซึ่งเกิดจากการขนานกันระหว่าง  $R_{dc}$  และ  $R_f$  ซึ่ง  $R_{dc}$  เป็นค่าคงที่ และสามารถหาค่าความต้านทาน  $R_f$  ได้ดังนี้

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_{dc}} + \frac{1}{R_f}$$

$$R_m = \frac{R_{dc}R_f}{R_{dc} + R_f}$$

$$R_{dc}R_f = R_m(R_{dc} + R_f)$$

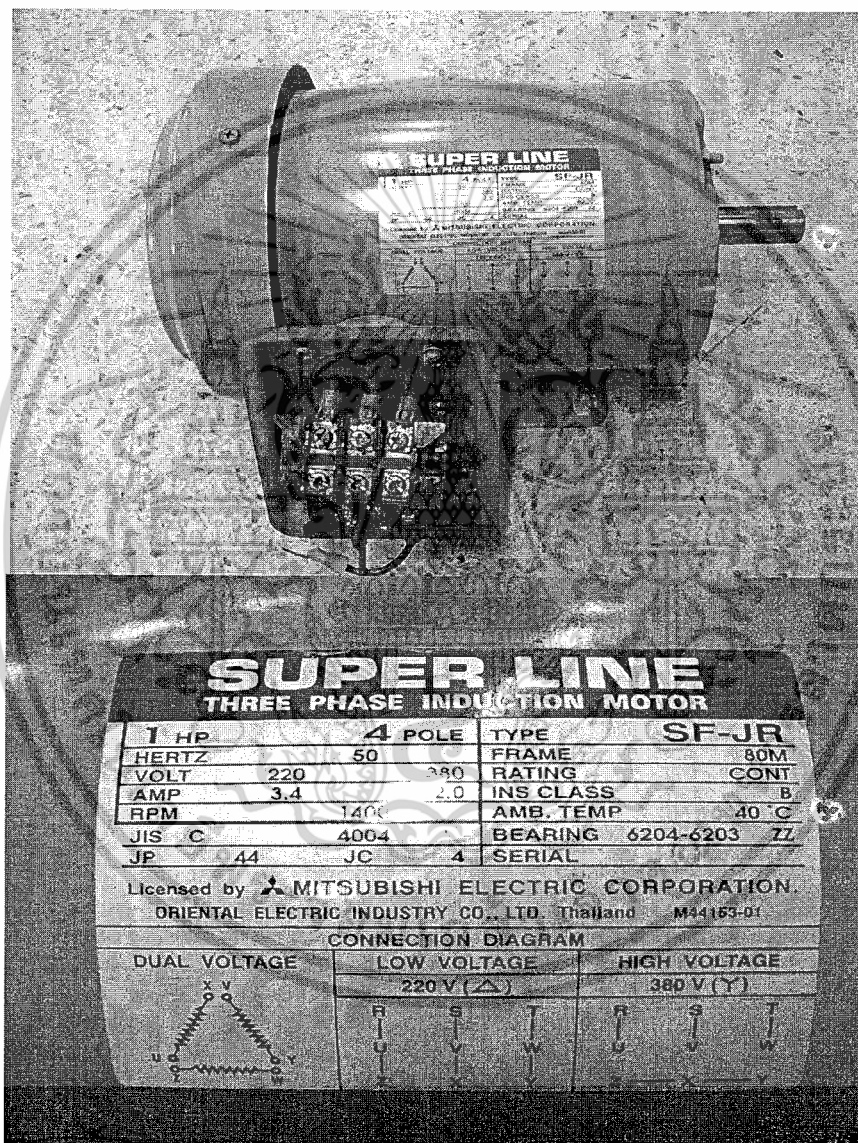
$$R_f(R_{dc} - R_m) = R_mR_{dc}$$

$$\therefore R_f = \frac{R_mR_{dc}}{R_{dc} - R_m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

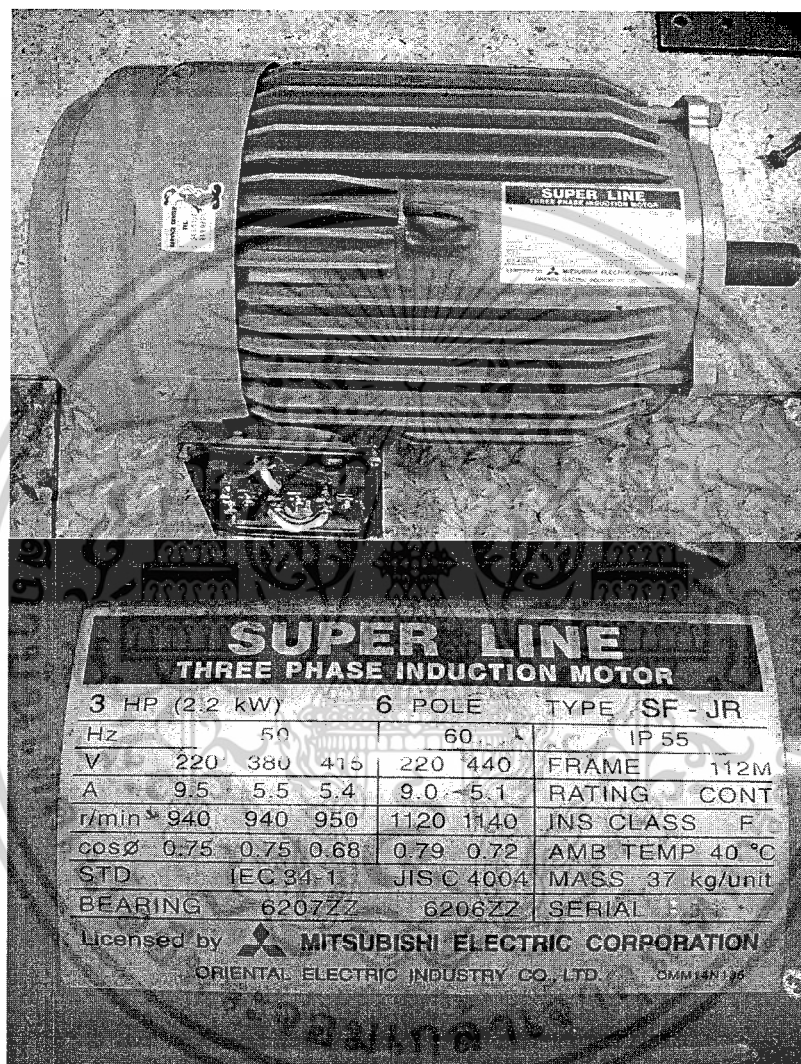
ภาคผนวก ข.

ข้อมูลอุปกรณ์



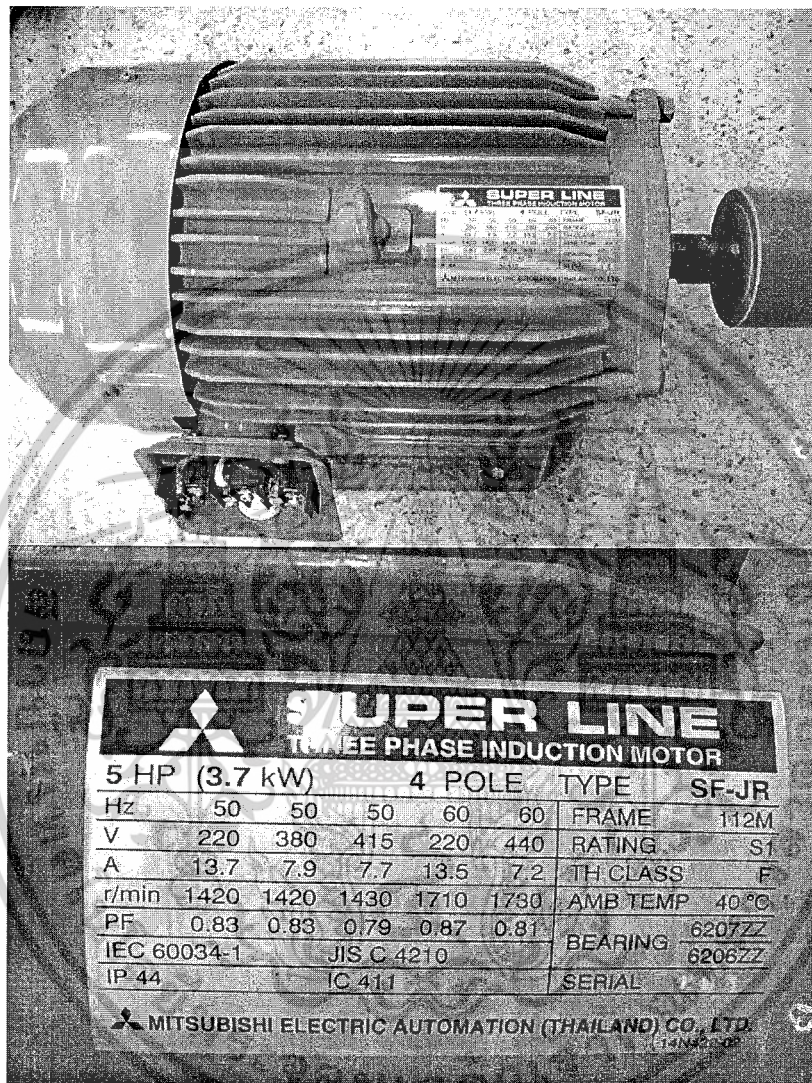
ภาพที่ ผ. 2 มอเตอร์ 1 Hp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



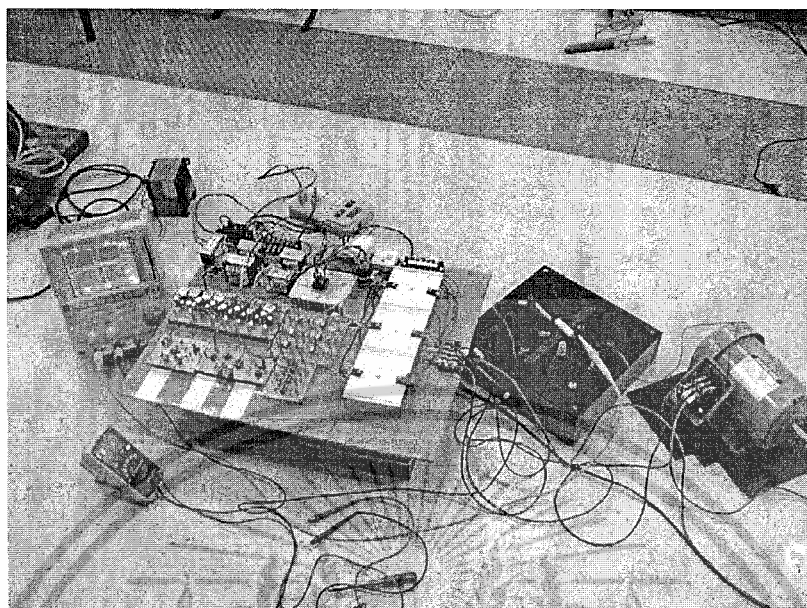
ภาพที่ ผ. 2 มอเตอร์ 3 Hp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

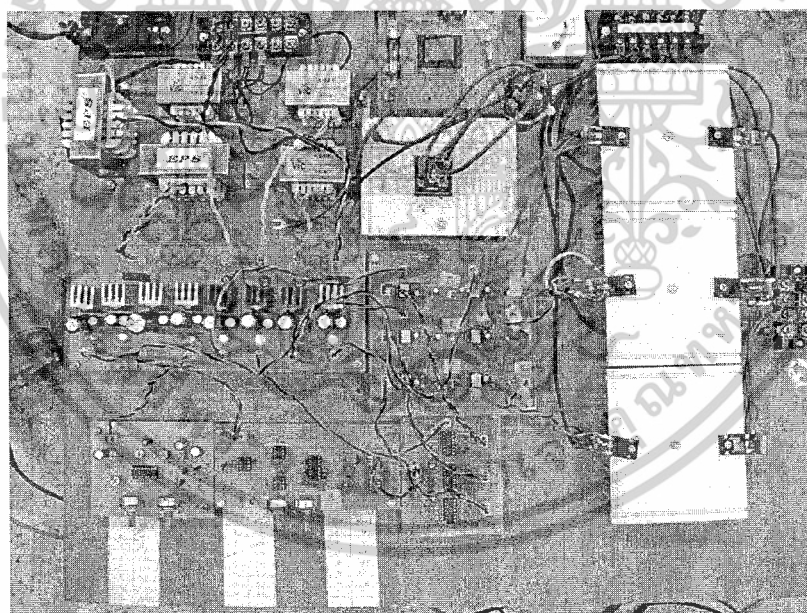


ภาพที่ ผ. 2 มอเตอร์ 5 Hp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ผ.3 การต่อวงจรทดลองการป้อนด้วยสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม



ภาพที่ ผ.4 วงจรสวิตช์แรงดันสัญญาณแบบรูปสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## FEATURES

- Low-Sine Wave Distortion, 0.5%, Typical
- Excellent Temperature Stability, 20ppm/°C, Typ.
- Wide Sweep Range, 2000:1, Typical
- Low-Supply Sensitivity, 0.01%V, Typ.
- Linear Amplitude Modulation
- TTL Compatible FSK Controls
- Wide Supply Range, 10V to 26V
- Adjustable Duty Cycle, 1% TO 99%

## APPLICATIONS

- Waveform Generation
- Sweep Generation
- AM/FM Generation
- V/F Conversion
- FSK Generation
- Phase-Locked Loops (VCO)

## GENERAL DESCRIPTION

The XR-2206 is a monolithic function generator integrated circuit capable of producing high quality sine, square, triangle, ramp, and pulse waveforms of high-stability and accuracy. The output waveforms can be both amplitude and frequency modulated by an external voltage. Frequency of operation can be selected externally over a range of 0.01Hz to more than 1MHz.

The circuit is ideally suited for communications, instrumentation, and function generator applications requiring sinusoidal tone, AM, FM, or FSK generation. It has a typical drift specification of 20ppm/°C. The oscillator frequency can be linearly swept over a 2000:1 frequency range with an external control voltage, while maintaining low distortion.

## ORDERING INFORMATION

Part No.	Package	Operating Temperature Range
XR-2206M	16 Lead 300 Mil CDIP	-55°C to +125°C
XR-2206P	16 Lead 300 Mil PDIP	-40°C to +85°C
XR-2206CP	16 Lead 300 Mil PDIP	0°C to +70°C
XR-2206D	16 Lead 300 Mil JEDEC SOIC	0°C to +70°C

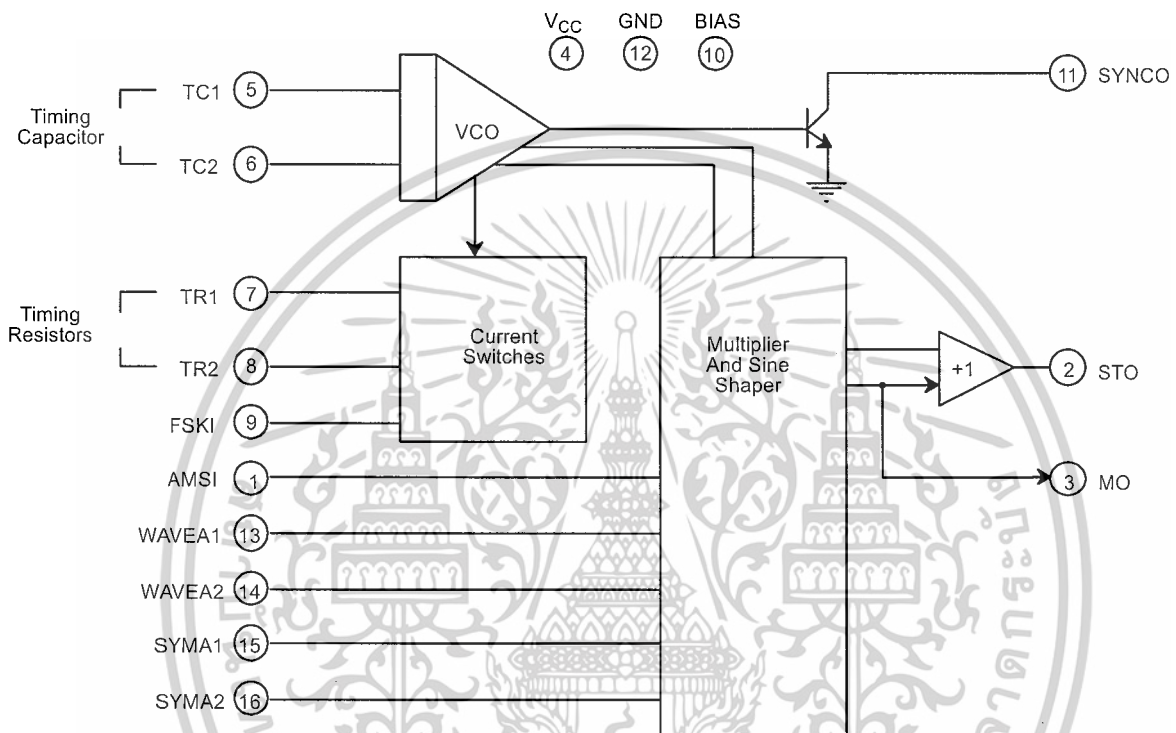
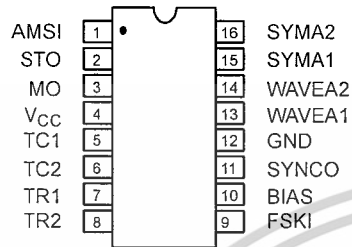
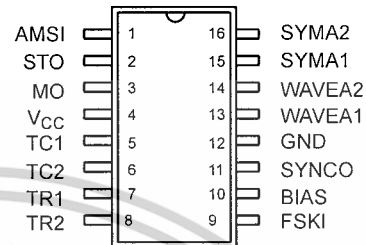


Figure 1. XR-2206 Block Diagram



16 Lead PDIP, CDIP (0.300")



16 Lead SOIC (Jedec, 0.300")

## PIN DESCRIPTION

Pin #	Symbol	Type	Description
1	AMSI	I	Amplitude Modulating Signal Input.
2	STO	O	Sine or Triangle Wave Output.
3	MO	O	Multiplier Output.
4	V <sub>CC</sub>		Positive Power Supply.
5	TC1	I	Timing Capacitor Input.
6	TC2	I	Timing Capacitor Input.
7	TR1	O	Timing Resistor 1 Output.
8	TR2	O	Timing Resistor 2 Output.
9	FSKI	I	Frequency Shift Keying Input.
10	BIAS	O	Internal Voltage Reference.
11	SYNCO	O	Sync Output. This output is a open collector and needs a pull up resistor to V <sub>CC</sub> .
12	GND		Ground pin.
13	WAVEA1	I	Wave Form Adjust Input 1.
14	WAVEA2	I	Wave Form Adjust Input 2.
15	SYMA1	I	Wave Symetry Adjust 1.
16	SYMA2	I	Wave Symetry Adjust 2.

## DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Test Conditions: Test Circuit of *Figure 2*  $V_{CC} = 12V$ ,  $T_A = 25^\circ C$ ,  $C = 0.01\mu F$ ,  $R_1 = 100k\Omega$ ,  $R_2 = 10k\Omega$ ,  $R_3 = 25k\Omega$   
 Unless Otherwise Specified.  $S_1$  open for triangle, closed for sine wave.

Parameters	XR-2206M/P			XR-2206CP/D			Units	Conditions
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
<b>General Characteristics</b>								
Single Supply Voltage	<b>10</b>		<b>26</b>	10		26	V	
Split-Supply Voltage	<b><math>\pm 5</math></b>		<b><math>\pm 13</math></b>	$\pm 5$		$\pm 13$	V	
Supply Current		12	<b>17</b>		14	20	mA	$R_1 \geq 10k\Omega$
<b>Oscillator Section</b>								
Max. Operating Frequency	<b>0.5</b>	1		0.5	1		MHz	$C = 1000pF$ , $R_1 = 1k\Omega$
Lowest Practical Frequency		0.01			0.01		Hz	$C = 50\mu F$ , $R_1 = 2M\Omega$
Frequency Accuracy		$\pm 1$	<b><math>\pm 4</math></b>		$\pm 2$		% of $f_o$	$f_o = 1/R_1C$
Temperature Stability Frequency		$\pm 10$	<b><math>\pm 50</math></b>		$\pm 20$		ppm/ $^\circ C$	$0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ $R_1 = R_2 = 20k\Omega$
Sine Wave Amplitude Stability <sup>2</sup>		4800			4800		ppm/ $^\circ C$	
Supply Sensitivity		0.01	<b>0.1</b>		0.01		%/V	$V_{LOW} = 10V$ , $V_{HIGH} = 20V$ , $R_1 = R_2 = 20k\Omega$
Sweep Range	1000:1	2000:1			2000:1		$f_H = f_L$	$f_H @ R_1 = 1k\Omega$ $f_L @ R_1 = 2M\Omega$
<b>Sweep Linearity</b>								
10:1 Sweep		2			2		%	$f_L = 1kHz$ , $f_H = 10kHz$
1000:1 Sweep		8			8		%	$f_L = 100Hz$ , $f_H = 100kHz$
FM Distortion		0.1			0.1		%	$\pm 10\%$ Deviation
<b>Recommended Timing Components</b>								
Timing Capacitor: C	<b>0.001</b>		100	0.001		100	$\mu F$	<i>Figure 5</i>
Timing Resistors: $R_1$ & $R_2$	<b>1</b>		2000	1		2000	k $\Omega$	
<b>Triangle Sine Wave Output<sup>1</sup></b>								
Triangle Amplitude		160			160		mV/k $\Omega$	<i>Figure 2</i> , $S_1$ Open
Sine Wave Amplitude	<b>40</b>	60	80		60		mV/k $\Omega$	<i>Figure 2</i> , $S_1$ Closed
Max. Output Swing		6			6		V <sub>p-p</sub>	
Output Impedance		600			600		$\Omega$	
Triangle Linearity		1			1		%	
Amplitude Stability		0.5			0.5		dB	For 1000:1 Sweep
<b>Sine Wave Distortion</b>								
Without Adjustment		2.5			2.5		%	$R_1 = 30k\Omega$
With Adjustment		0.4	<b>1.0</b>		0.5	1.5	%	See <i>Figure 7</i> and <i>Figure 8</i>

### Notes

<sup>1</sup> Output amplitude is directly proportional to the resistance,  $R_3$ , on Pin 3. See *Figure 3*.

<sup>2</sup> For maximum amplitude stability,  $R_3$  should be a positive temperature coefficient resistor.

**Bold face parameters** are covered by production test and guaranteed over operating temperature range.

## DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (CONT'D)

Parameters	XR-2206M/P			XR-2206CP/D			Units	Conditions
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
<b>Amplitude Modulation</b>								
Input Impedance	50	100		50	100		k $\Omega$	
Modulation Range		100			100		%	
Carrier Suppression		55			55		dB	
Linearity		2			2		%	For 95% modulation
<b>Square-Wave Output</b>								
Amplitude		12			12		Vp-p	Measured at Pin 11.
Rise Time		250			250		ns	$C_L = 10\text{pF}$
Fall Time		50			50		ns	$C_L = 10\text{pF}$
Saturation Voltage		0.2	<b>0.4</b>		0.2	0.6	V	$I_L = 2\text{mA}$
Leakage Current		0.1	<b>20</b>		0.1	100	$\mu\text{A}$	$V_{CC} = 26\text{V}$
FSK Keying Level (Pin 9)	0.8	1.4	<b>2.4</b>	0.8	1.4	2.4	V	See section on circuit controls
Reference Bypass Voltage	2.9	3.1	<b>3.3</b>	2.5	3	3.5	V	Measured at Pin 10.

### Notes

<sup>1</sup> Output amplitude is directly proportional to the resistance,  $R_3$ , on Pin 3. See Figure 3.

<sup>2</sup> For maximum amplitude stability,  $R_3$  should be a positive temperature coefficient resistor.

**Bold face parameters** are covered by production test and guaranteed over operating temperature range.

Specifications are subject to change without notice

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Power Supply	26V	Total Timing Current	6mA
Power Dissipation	750mW	Storage Temperature	-65°C to +150°C
Derate Above 25°C	5mW/°C		

## SYSTEM DESCRIPTION

The XR-2206 is comprised of four functional blocks; a voltage-controlled oscillator (VCO), an analog multiplier and sine-shaper; a unity gain buffer amplifier; and a set of current switches.

The VCO produces an output frequency proportional to an input current, which is set by a resistor from the timing

terminals to ground. With two timing pins, two discrete output frequencies can be independently produced for FSK generation applications by using the FSK input control pin. This input controls the current switches which select one of the timing resistor currents, and routes it to the VCO.

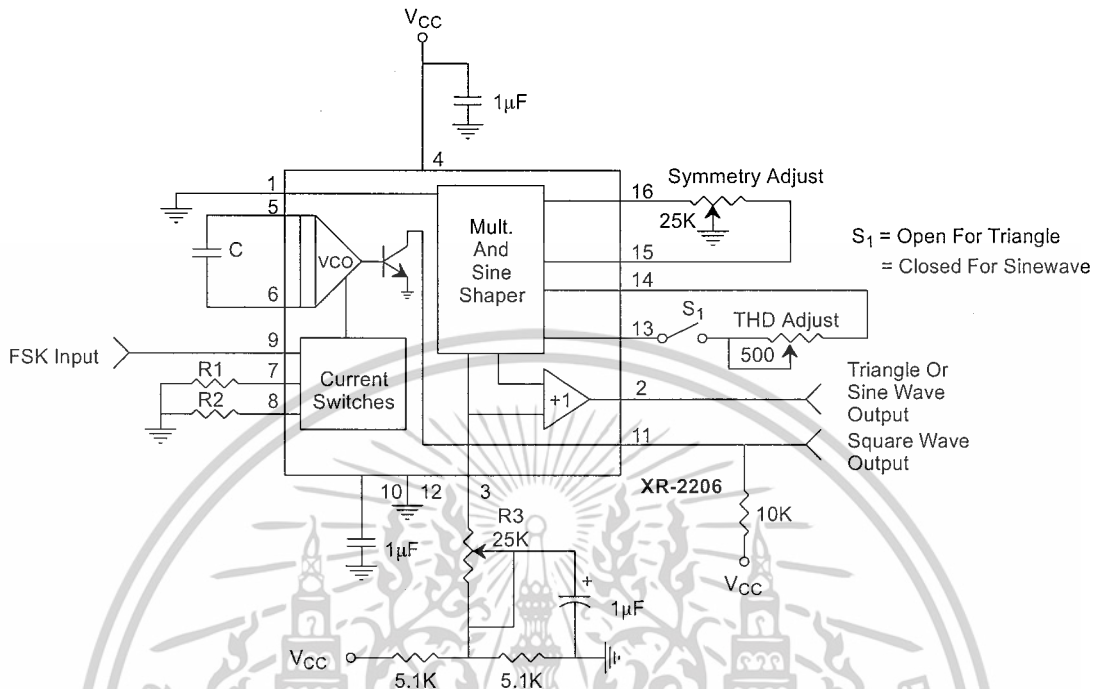


Figure 2. Basic Test Circuit

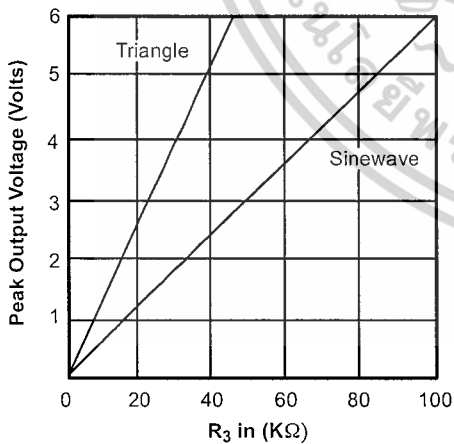


Figure 3. Output Amplitude as a Function of the Resistor, R3, at Pin 3

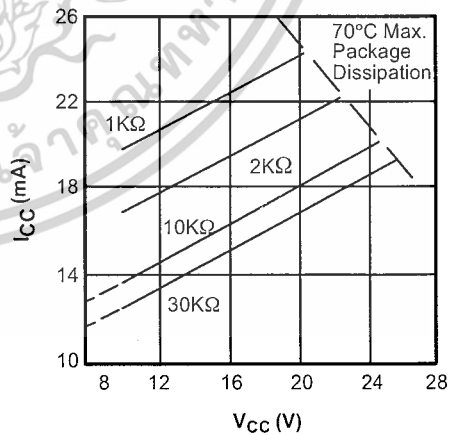


Figure 4. Supply Current vs Supply Voltage, Timing, R

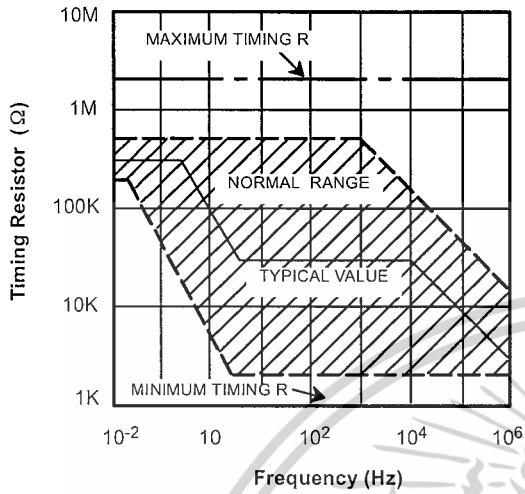


Figure 5. R versus Oscillation Frequency.

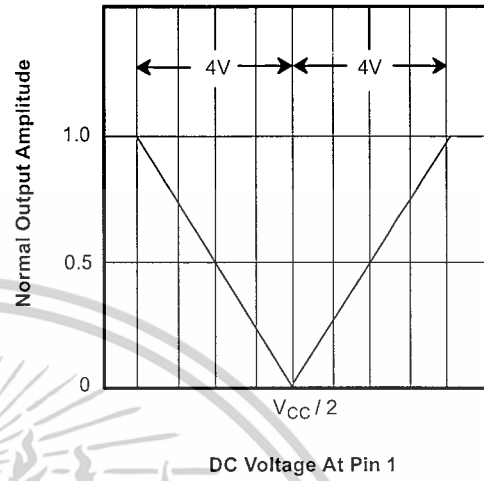


Figure 6. Normalized Output Amplitude versus DC Bias at AM Input (Pin 1)

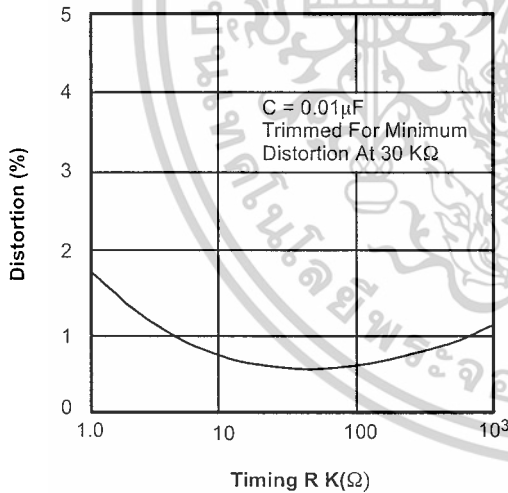


Figure 7. Trimmed Distortion versus Timing Resistor.

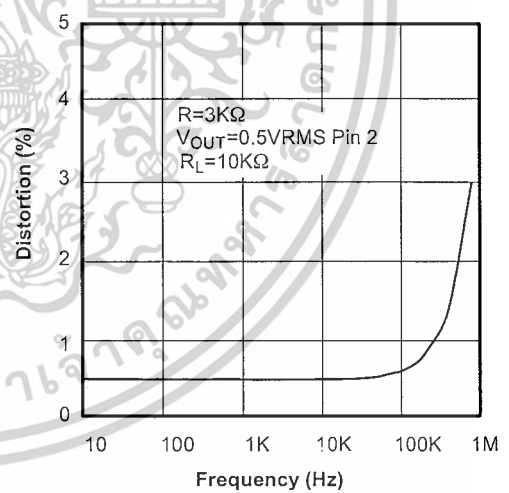


Figure 8. Sine Wave Distortion versus Operating Frequency with Timing Capacitors Varied.

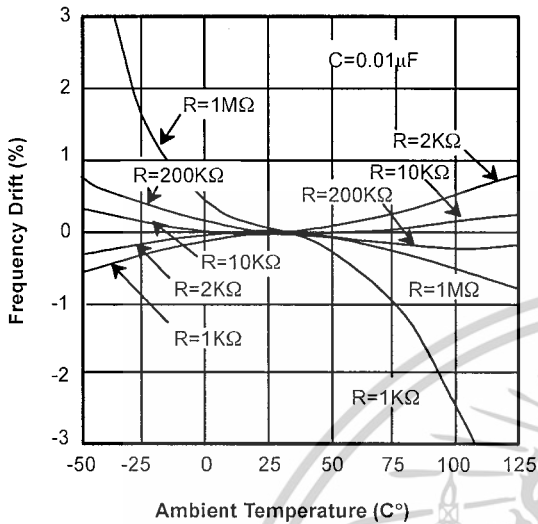


Figure 9. Frequency Drift versus Temperature.

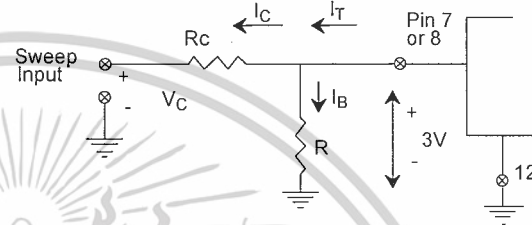


Figure 10. Circuit Connection for Frequency Sweep.

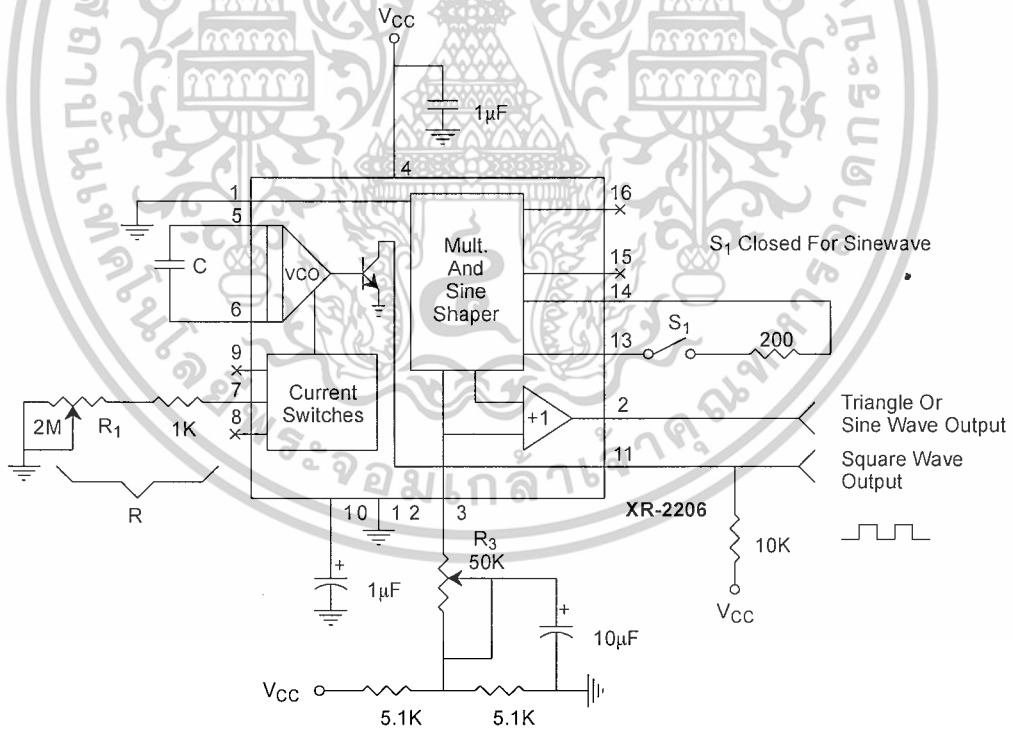


Figure 11. Circuit for Sine Wave Generation without External Adjustment. (See Figure 3 for Choice of R<sub>3</sub>)

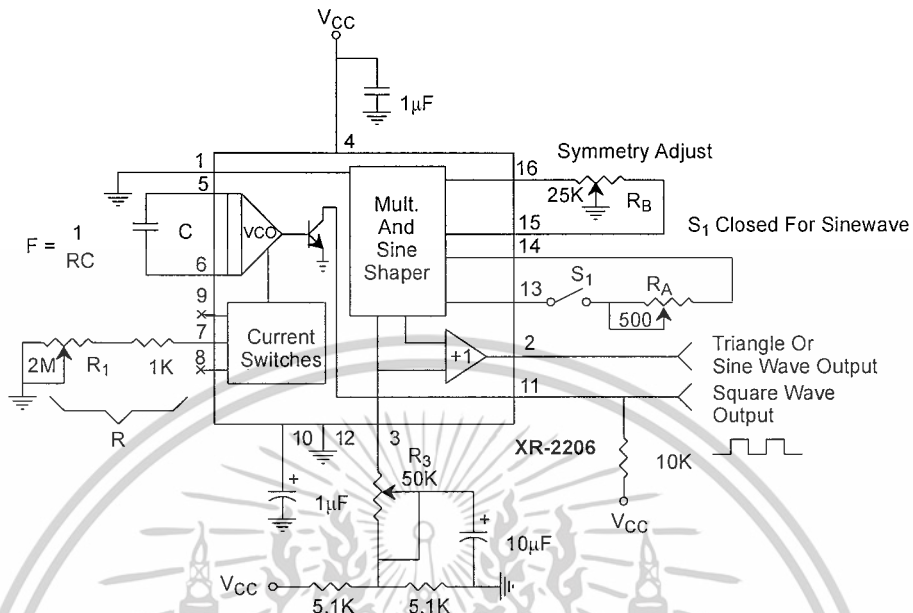


Figure 12. Circuit for Sine Wave Generation with Minimum Harmonic Distortion. (R<sub>3</sub> Determines Output Swing - See Figure 3)

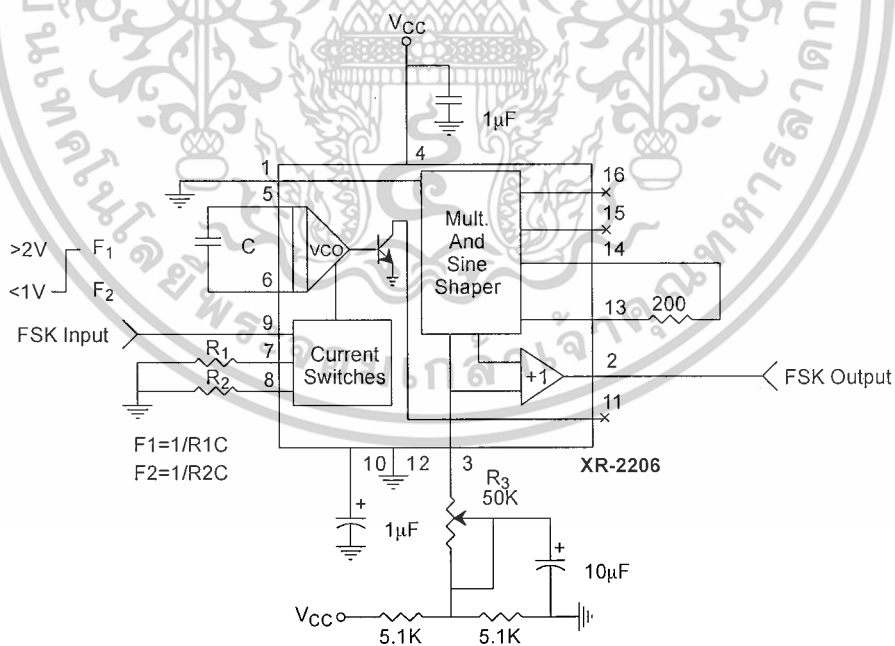


Figure 13. Sinusoidal FSK Generator

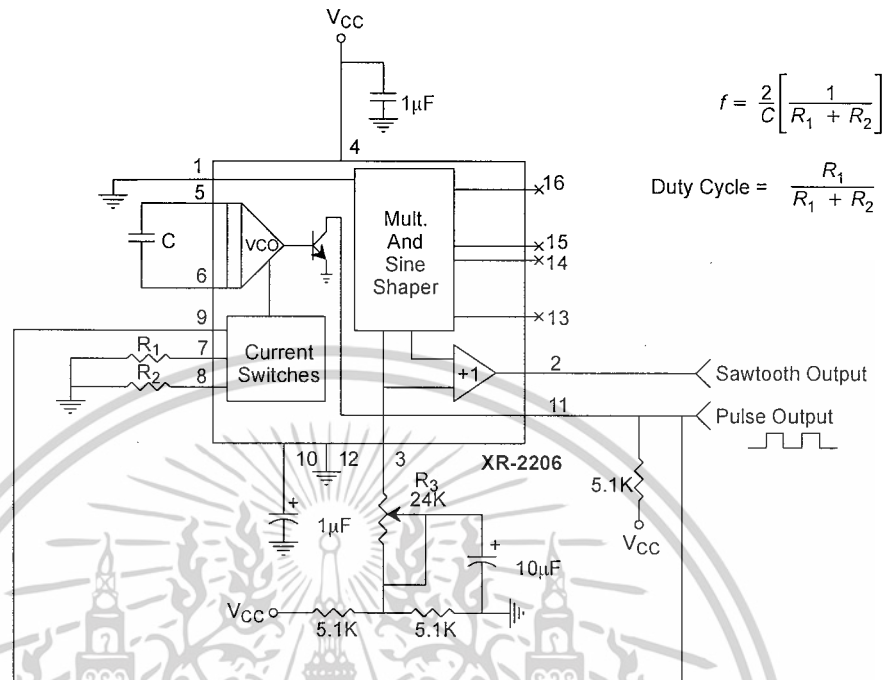


Figure 14. Circuit for Pulse and Ramp Generation.

## Frequency-Shift Keying

The XR-2206 can be operated with two separate timing resistors,  $R_1$  and  $R_2$ , connected to the timing Pin 7 and 8, respectively, as shown in *Figure 13*. Depending on the polarity of the logic signal at Pin 9, either one or the other of these timing resistors is activated. If Pin 9 is open-circuited or connected to a bias voltage  $\geq 2V$ , only  $R_1$  is activated. Similarly, if the voltage level at Pin 9 is  $\leq 1V$ , only  $R_2$  is activated. Thus, the output frequency can be keyed between two levels,  $f_1$  and  $f_2$ , as:

$$f_1 = 1/R_1C \text{ and } f_2 = 1/R_2C$$

For split-supply operation, the keying voltage at Pin 9 is referenced to  $V^-$ .

## Output DC Level Control

The dc level at the output (Pin 2) is approximately the same as the dc bias at Pin 3. In *Figure 11*, *Figure 12* and *Figure 13*, Pin 3 is biased midway between  $V^+$  and ground, to give an output dc level of  $\approx V^+/2$ .

## APPLICATIONS INFORMATION

### Sine Wave Generation

#### Without External Adjustment

*Figure 11* shows the circuit connection for generating a sinusoidal output from the XR-2206. The potentiometer,  $R_1$  at Pin 7, provides the desired frequency tuning. The maximum output swing is greater than  $V^+/2$ , and the typical distortion (THD) is  $< 2.5\%$ . If lower sine wave distortion is desired, additional adjustments can be provided as described in the following section.

The circuit of *Figure 11* can be converted to split-supply operation, simply by replacing all ground connections with  $V^-$ . For split-supply operation,  $R_3$  can be directly connected to ground.

**With External Adjustment:**

The harmonic content of sinusoidal output can be reduced to -0.5% by additional adjustments as shown in *Figure 12*. The potentiometer,  $R_A$ , adjusts the sine-shaping resistor, and  $R_B$  provides the fine adjustment for the waveform symmetry. The adjustment procedure is as follows:

1. Set  $R_B$  at midpoint and adjust  $R_A$  for minimum distortion.
2. With  $R_A$  set as above, adjust  $R_B$  to further reduce distortion.

**Triangle Wave Generation**

The circuits of *Figure 11* and *Figure 12* can be converted to triangle wave generation, by simply open-circuiting Pin 13 and 14 (i.e.,  $S_1$  open). Amplitude of the triangle is approximately twice the sine wave output.

**FSK Generation**

*Figure 13* shows the circuit connection for sinusoidal FSK signal operation. Mark and space frequencies can be independently adjusted by the choice of timing resistors,  $R_1$  and  $R_2$ ; the output is phase-continuous during transitions. The keying signal is applied to Pin 9. The circuit can be converted to split-supply operation by simply replacing ground with  $V^-$ .

**Pulse and Ramp Generation**

*Figure 14* shows the circuit for pulse and ramp waveform generation. In this mode of operation, the FSK keying terminal (Pin 9) is shorted to the square-wave output (Pin 11), and the circuit automatically frequency-shift keys itself between two separate frequencies during the positive-going and negative-going output waveforms. The pulse width and duty cycle can be adjusted from 1% to 99% by the choice of  $R_1$  and  $R_2$ . The values of  $R_1$  and  $R_2$  should be in the range of 1k $\Omega$  to 2M $\Omega$ .

**PRINCIPLES OF OPERATION**

**Description of Controls**

**Frequency of Operation:**

The frequency of oscillation,  $f_0$ , is determined by the external timing capacitor,  $C$ , across Pin 5 and 6, and by the timing resistor,  $R$ , connected to either Pin 7 or 8. The frequency is given as:

$$f_0 = \frac{1}{RC} \text{ Hz}$$

and can be adjusted by varying either  $R$  or  $C$ . The recommended values of  $R$ , for a given frequency range, as shown in *Figure 5*. Temperature stability is optimum for  $4k\Omega < R < 200k\Omega$ . Recommended values of  $C$  are from 1000pF to 100 $\mu$ F.

**Frequency Sweep and Modulation:**

Frequency of oscillation is proportional to the total timing current,  $I_T$ , drawn from Pin 7 or 8:

$$f = \frac{320I_T(mA)}{C(\mu F)} \text{ Hz}$$

Timing terminals (Pin 7 or 8) are low-impedance points, and are internally biased at +3V, with respect to Pin 12. Frequency varies linearly with  $I_T$ , over a wide range of current values, from 1 $\mu$ A to 3mA. The frequency can be controlled by applying a control voltage,  $V_C$ , to the activated timing pin as shown in *Figure 10*. The frequency of oscillation is related to  $V_C$  as:

$$f = \frac{1}{RC} \left( 1 + \frac{R}{R_c} \left( 1 - \frac{V_c}{3} \right) \right) \text{ Hz}$$

where  $V_C$  is in volts. The voltage-to-frequency conversion gain,  $K$ , is given as:

$$K = \partial f / \partial V_c = - \frac{0.32}{R_c C} \text{ Hz/V}$$

**CAUTION:** For safety operation of the circuit,  $I_T$  should be limited to  $\leq 3mA$ .

### Output Amplitude:

Maximum output amplitude is inversely proportional to the external resistor,  $R_3$ , connected to Pin 3 (see Figure 3). For sine wave output, amplitude is approximately 60mV peak per k $\Omega$  of  $R_3$ ; for triangle, the peak amplitude is approximately 160mV peak per k $\Omega$  of  $R_3$ . Thus, for example,  $R_3 = 50k\Omega$  would produce approximately 13V sinusoidal output amplitude.

### Amplitude Modulation:

Output amplitude can be modulated by applying a dc bias and a modulating signal to Pin 1. The internal impedance

at Pin 1 is approximately 100k $\Omega$ . Output amplitude varies linearly with the applied voltage at Pin 1, for values of dc bias at this pin, within 14 volts of  $V_{CC}/2$  as shown in Figure 6. As this bias level approaches  $V_{CC}/2$ , the phase of the output signal is reversed, and the amplitude goes through zero. This property is suitable for phase-shift keying and suppressed-carrier AM generation. Total dynamic range of amplitude modulation is approximately 55dB.

**CAUTION:** AM control must be used in conjunction with a well-regulated supply, since the output amplitude now becomes a function of  $V_{CC}$ .

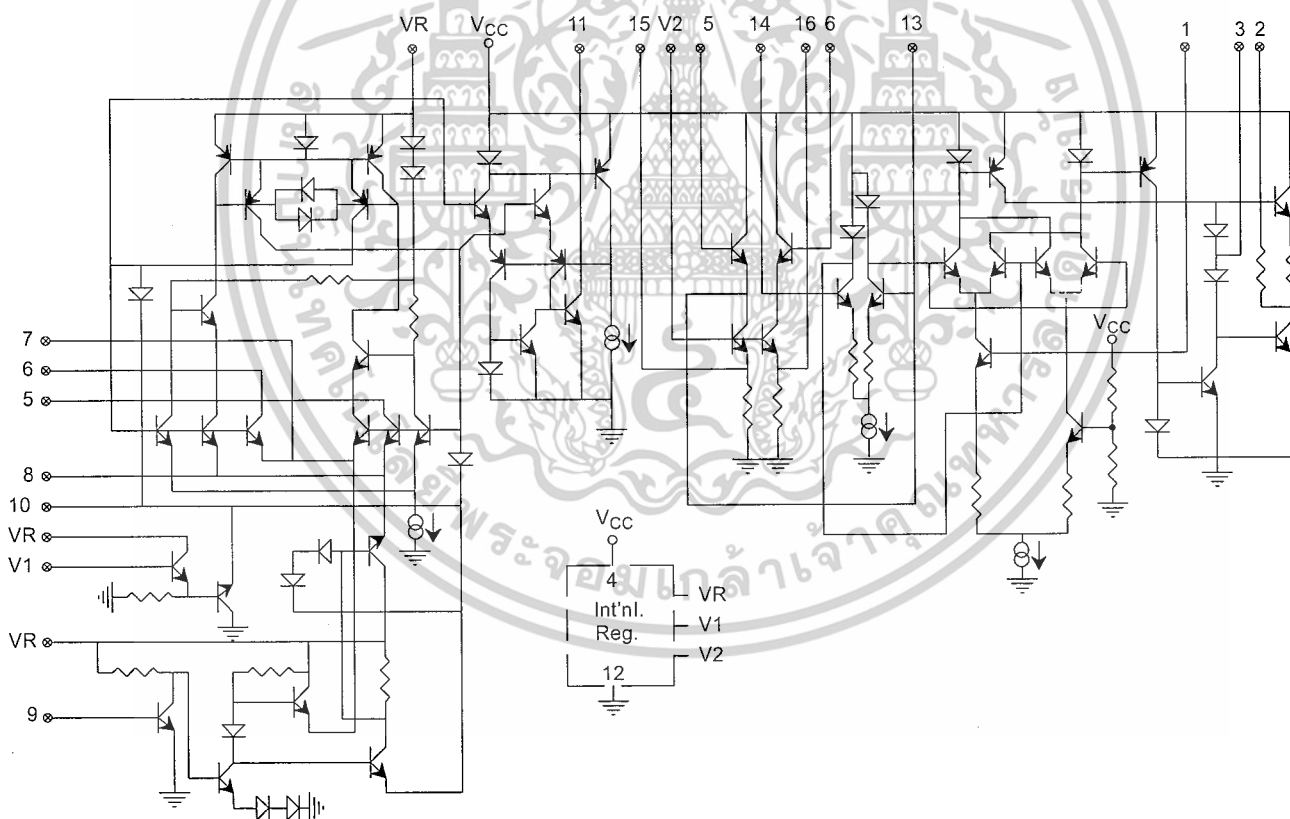
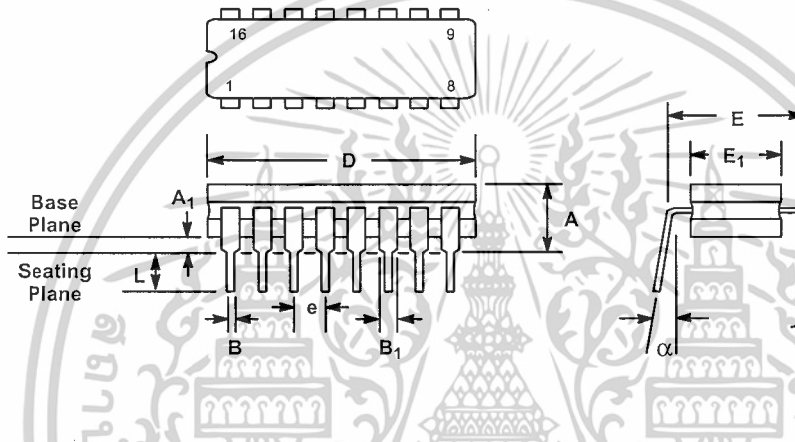


Figure 15. Equivalent Schematic Diagram

**16 LEAD CERAMIC DUAL-IN-LINE  
(300 MIL CDIP)**

Rev. 1.00

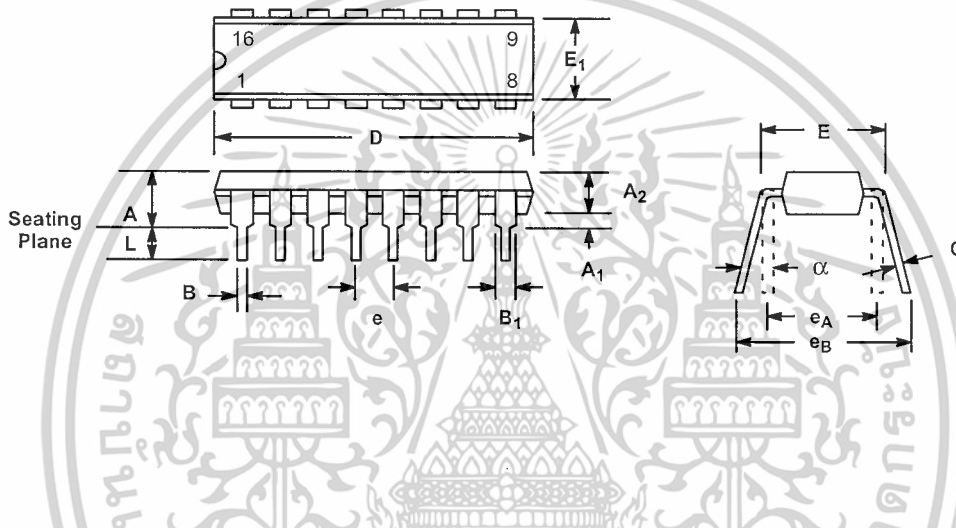


SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.100	0.200	2.54	5.08
A <sub>1</sub>	0.015	0.060	0.38	1.52
B	0.014	0.026	0.36	0.66
B <sub>1</sub>	0.045	0.065	1.14	1.65
c	0.008	0.018	0.20	0.46
D	0.740	0.840	18.80	21.34
E <sub>1</sub>	0.250	0.310	6.35	7.87
E	0.300 BSC		7.62 BSC	
e	0.100 BSC		2.54 BSC	
L	0.125	0.200	3.18	5.08
α	0°	15°	0°	15°

Note: The control dimension is the inch column

## 16 LEAD PLASTIC DUAL-IN-LINE (300 MIL PDIP)

Rev. 1.00

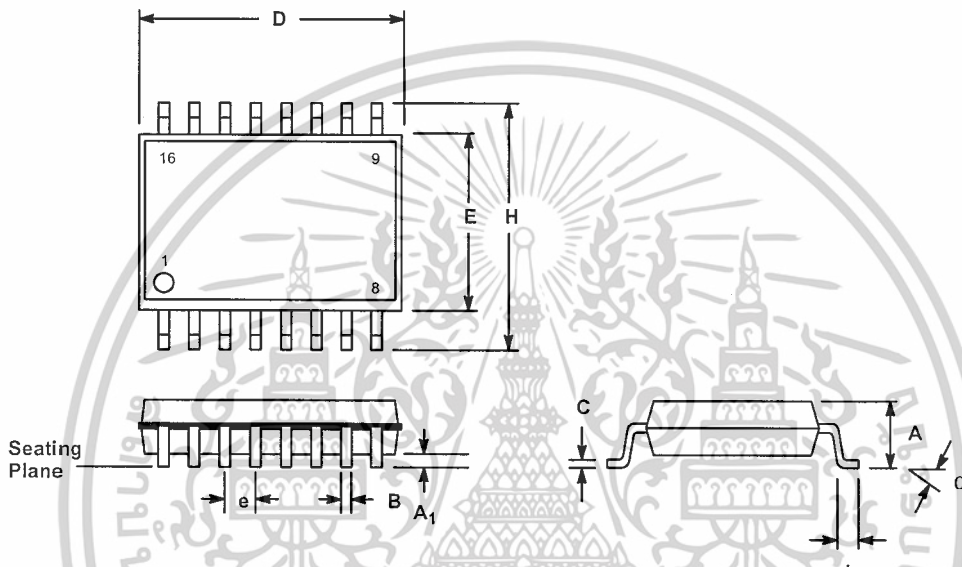


SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.145	0.210	3.68	5.33
A <sub>1</sub>	0.015	0.070	0.38	1.78
A <sub>2</sub>	0.115	0.195	2.92	4.95
B	0.014	0.024	0.36	0.56
B <sub>1</sub>	0.030	0.070	0.76	1.78
C	0.008	0.014	0.20	0.38
D	0.745	0.840	18.92	21.34
E	0.300	0.325	7.62	8.26
E <sub>1</sub>	0.240	0.280	6.10	7.11
e	0.100 BSC		2.54 BSC	
e <sub>A</sub>	0.300 BSC		7.62 BSC	
e <sub>B</sub>	0.310	0.430	7.87	10.92
L	0.115	0.160	2.92	4.06
α	0°	15°	0°	15°

Note: The control dimension is the inch column

**16 LEAD SMALL OUTLINE  
(300 MIL JEDEC SOIC)**

Rev. 1.00



SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.093	0.104	2.35	2.65
A <sub>1</sub>	0.004	0.012	0.10	0.30
B	0.013	0.020	0.33	0.51
C	0.009	0.013	0.23	0.32
D	0.398	0.413	10.10	10.50
E	0.291	0.299	7.40	7.60
e	0.050 BSC		1.27 BSC	
H	0.394	0.419	10.00	10.65
L	0.016	0.050	0.40	1.27
α	0°	8°	0°	8°

Note: The control dimension is the millimeter column



## NOTICE

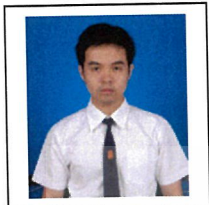
EXAR Corporation reserves the right to make changes to the products contained in this publication in order to improve design, performance or reliability. EXAR Corporation assumes no responsibility for the use of any circuits described herein, conveys no license under any patent or other right, and makes no representation that the circuits are free of patent infringement. Charts and schedules contained here in are only for illustration purposes and may vary depending upon a user's specific application. While the information in this publication has been carefully checked, no responsibility, however, is assumed for inaccuracies.

EXAR Corporation does not recommend the use of any of its products in life support applications where the failure or malfunction of the product can reasonably be expected to cause failure of the life support system or to significantly affect its safety or effectiveness. Products are not authorized for use in such applications unless EXAR Corporation receives, in writing, assurances to its satisfaction that: (a) the risk of injury or damage has been minimized; (b) the user assumes all such risks; (c) potential liability of EXAR Corporation is adequately protected under the circumstances.

Copyright 1972 EXAR Corporation  
Datasheet June 1997

Reproduction, in part or whole, without the prior written consent of EXAR Corporation is prohibited.

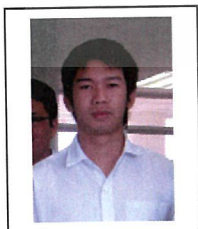
## ประวัติผู้เขียน



นาย พัชนะ ปานดอนลาน เกิดวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2529  
สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนไทรโยคมนตรีกาญจน-  
วิทยา จังหวัดกาญจนบุรี ในปี พ.ศ. 2547 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548



นางสาว วรณวิสาข์ คำเกิด เกิดวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529  
สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเบญจมราชูทิศราชบุรี  
จังหวัดราชบุรี ในปี พ.ศ. 2547 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548



นาย วัชนิกร ชันกสิกรรม เกิดวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2529  
สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนครสวรรค์วิทยาลัย  
จังหวัดนครสวรรค์ ในปี พ.ศ. 2547 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้