

การศึกษากระแสรั่วลงกราวด์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
เมื่อป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์

A Study of Ground Current of Induction Motor Fed by Inverter



T119428

โดย

นาย ธนะศักดิ์ กรุงกาญจน

นาย ธนาคม จรัสแสงสกุล

นาย นนทปัทมา นิยมพงษ์

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 119428

วัน,เดือน,ปี. - 7.S.A. 2554

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

การศึกษากระแสรั่วลงกราวด์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
เมื่อป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์

A Study of Ground Current of Induction Motor Fed by Inverter



โดย

นาย ธนะศักดิ์ กรุงกาญจนา

นาย ธนาคม จรัสแสงสกุล

นาย นนท์ปัญญา นิยมพงษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากระแสรั่วลงกราวด์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
เมื่อป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์

ผู้จัดทำ

1. นาย ชนะศักดิ์ กรุงกาญจนา
2. นาย ธนาคม จรัสแสงสกุล
3. นาย นนทปัทมา นิยมพงษ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษากระแสรั่วลงกราวด์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์

นาย ธนะศักดิ์ กรุงกาญจน

นาย ธนาคม จรัสแสงสกุล

นาย นนทปัญญา นิยมพงษ์

รองศาสตราจารย์ พิเชิต ลำยอง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้เสนอผลการศึกษาถึงการรั่วไหลของกระแสรั่วไหลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยใช้การออกแบบสัญญาณรูปคลื่นต่างๆ ความถี่สูง และทดลองขับสัญญาณแต่ละตัวเพื่อดูว่ามีผลต่อกระแสรั่วไหลลงกราวด์มากน้อยเพียงใด สัญญาณนั้นได้แก่สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์, สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และเพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับตัวถังของมอเตอร์ และวิเคราะห์ลักษณะการเกิดของกระแสรั่วไหลผ่านวงจรสมมูลดังกล่าว และผลการศึกษาทดลองพบว่า วงจรสมมูลของฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำประกอบด้วยพารามิเตอร์ของตัวต้านทานขนานกับค่าตัวเก็บประจุ จากวงจรสมมูลนี้เองทำให้สามารถคำนวณค่ากระแสรั่วไหลลงกราวด์ได้

A Study of Ground Current of Induction Motor Fed by Inverter

Tanasak Grungkanjana

Thanakhom Charatsaengsakun

Nonpiya Niyompong

Assoc.Prof. Pichit Lumyong Advisor

2010

Abstract

This thesis proposes A Study of Ground Current of Induction Motor Fed by Inverter. Signal design using various high-frequency waveforms and signals for each test drive to see how they affect the leakage current to ground. Signals include sine wave voltage source, Square wave voltage source and DC voltage source. We study the characteristics of leakage current for find parameter of insulation equivalent circuit of induction motor between the stator windings and the frame of the motor. The result showed that insulation equivalent circuit of induction motor contains the parameters of resistors in parallel with the capacitor that can calculate leakage current.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณ รศ.พิชิต ล้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลา ให้คำแนะนำในวิชาความรู้และการทำงาน รวมทั้งความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือ วัสดุต่าง ๆ ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ซึ่งโครงการนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้หากปราศจากท่าน

นอกจากนั้นผู้จัดทำยังต้องขอขอบคุณพี่วิชากร วิเชษฐพิทยาพงษ์ รุ่นพี่ปริญญาโท และเพื่อน ๆ ห้องปฏิบัติการ EMRL ที่คอยถามไถ่ ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ให้กับ ผู้จัดทำโครงการในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่คอยเป็นกำลังใจ และช่วยเหลือ ทางด้านค่าใช้จ่ายต่าง ๆ จนผู้จัดทำเรียนจบในครั้งนี้



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000	4
2.1.1 องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากวงจรสมมูล	4
2.1.2 Insulation resistance – general theory	5
2.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวน.....	7
2.2.1 ความต้านทานของฉนวน	7
2.2.2 เพอร์มิตติวิตี (permittivity)	8
2.2.3 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก	10
2.2.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก.....	12
2.3 หม้อแปลงสวิตชิง.....	12
2.3.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตชิง.....	12
2.3.2 แกนเฟอร์ไรต์และการเลือกใช้.....	14
2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขดไฟโพรมารีและขดเซคันดารีของหม้อแปลงสวิตชิง	24
2.3.4 การพันขดลวดทองแดงและการกำหนดขนาดของขดลวด	26
2.3.5 อุณหภูมิของหม้อแปลงสวิตชิง	33

บทที่ 3 การออกแบบวงจรและการทดลอง	34
3.1 การออกแบบวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	34
3.2 การออกแบบแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง	36
3.3 การออกแบบแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ความถี่สูง	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง	43
4.1 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	43
4.2 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง	45
4.3 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ความถี่สูง	50
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	56
5.1 บทสรุปผลการทดลอง	56
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะ	57
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ	57
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก	61
ประวัติผู้เขียน	73

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 กระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM.....	1
2.1 วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000.....	4
2.2 คุณลักษณะของกระแสตรงที่ถูกวัดได้	6
2.3 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีเป็นสุญญากาศ ϵ_0 และ ϵ	8
2.4 วงจรสมมูลของไดโวล็กตริก	9
2.5 มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ	11
2.6 แสดงส่วนประกอบหลักของหม้อแปลงสวิตชิง (ก) และการพันขดลวดทองแดง อาบนํ้ายาบนบอบบิ้น (ข).....	12
2.7 แสดงตัวอย่างและขนาดมาตรฐานของบอบบิ้นสำหรับแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE, EC และ ETD (ที่มา: Ferroxcube)	13
2.8 แสดงตัวอย่างขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE,EI และ ETD	15
2.9 แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของแกนเฟอร์ไรต์ที่เป็นเนื้อสารชนิด 3C8 และ 3C6A	16
2.10 แสดงลักษณะที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสซึ่งจะมีลักษณะสมมาตรของกราฟ ซีกบนและซีกล่าง ปกติผู้ผลิตจะให้กราฟในซีกบนมาเท่านั้น ดังในภาพที่ 2.9	16
2.11 แสดงการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ของเนื้อสารชนิด 3C8(ก) และ 3C6A(ข)	17
2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับความถี่	18
2.13 แสดงค่ากำลังงานที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่างๆ เมื่อใช้กับฮัลฟ บริดจ์ และฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์	20
2.14 แสดงการกำหนดช่องอากาศคั่น l_g ที่แกนกลาง(ก) และการคั่นช่องอากาศ l_g ระหว่างคู่ประกบของแกนเฟอร์ไรต์(ข)	21
2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $LI^2_{p(PK)}$ กับระยะห่างช่องอากาศคั่นสำหรับแกน แบบ ETD	23
2.16 แสดงความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง	25
2.17 แสดงลักษณะของการเกิดกระแสไหลวน	26
2.18 แสดงอัตราส่วนความต้านทานที่กระแสสลับ ต่อความต้านทานที่กระแสตรงของ ลวดทองแดงต่อความถี่ ที่ลวดทองแดงขนาดต่างๆ	29
2.19 แสดงลักษณะของการเกิดฟลักซ์รั่ว ภายในหม้อแปลงสวิตชิง	30
2.20 แสดงลักษณะของฟลักซ์รั่ว และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์รั่ว B_x ที่ตำแหน่งต่างๆ	30
2.21 แสดงผลของลวดทองแดงที่วางอยู่ในฟลักซ์รั่ว ทำให้มีกระแสไหลวนเกิดขึ้น ที่ผิวด้านบนและด้านล่างของลวดทองแดง และทำให้ความหนาแน่นกระแสที่ผิวด้านบน มีค่ามากกว่าผิวด้านล่าง	31
2.22 แสดงการเปรียบเทียบลวดทองแดงที่พันเรียงกันให้เป็นลักษณะของแผ่นทองแดง เพื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนในแต่ละชั้น	31

2.23 แสดงค่า F_R ซึ่งขึ้นกับจำนวนชั้นใน 1 พอร์ชัน	32
3.1 วงจรการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	34
3.2 วงจรการทดสอบแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง	36
3.3 ตัวอย่างรูปคลื่นที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง	37
3.4 วงจรการทดสอบแรงดันไฟฟ้าไซน์ความถี่สูง	38
3.5 characteristic curves ของ Mosfet (2SK1540)	40
3.6 characteristic curves ของ Mosfet (2SK1540)	41
3.7 ตัวอย่างรูปคลื่นที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าด้วยรูปคลื่นไซน์ความถี่สูง	41
4.1 ลักษณะการต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	43
4.2 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วย แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	44
4.3 กราฟค่าความต้านทานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	45
4.4 ลักษณะการต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่าเก็บประจุของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ	45
4.5 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานภายนอก ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง	46
4.6 ลักษณะของกระแสรั่วไหลผ่านตัวเก็บประจุเทียบกับ แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ ความถี่สวิตช์ 10kHz	46
4.7 ลักษณะรูปกราฟที่ได้จากการวัดเมื่อป้อนสัญญาณ ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่ความถี่ 10kHz	47
4.8 ลักษณะของกระแสรั่วไหลผ่านตัวเก็บประจุเทียบกับ แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า ที่ความถี่สวิตช์ 50kHz	47
4.9 ลักษณะรูปกราฟที่ได้จากการวัดเมื่อป้อนสัญญาณ ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่ความถี่ 50kHz	48
4.10 กราฟค่าความจุไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้า รูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่ความถี่ต่างๆ	49
4.11 ลักษณะการต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่าฉนวนของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ	50
4.12 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานภายนอก ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ความถี่สูง	50
4.13 ลักษณะของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานเทียบกับ แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ความถี่ 10kHz	51
4.14 ลักษณะรูปกราฟที่ได้จากการวัดเมื่อป้อนสัญญาณ ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ที่ความถี่ 10kHz	51
4.15 ลักษณะของกระแสรั่วไหลผ่านความต้านทานเทียบกับ แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ความถี่ 50kHz	52

4.16 ลักษณะรูปภาพที่ได้จากการวัดเมื่อป้อนสัญญาณ ด้วยแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 50kHz	52
4.17 กราฟค่าความค่าต้านทานของฉนวนมอเตอร์เมื่อทดสอบ ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์	55
5.1 วงจรสมมูลย์ของฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับตัวถังมอเตอร์	57



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ.....	3
2.1 แสดงขนาดมาตรฐาน AWG และข้อมูลอื่นๆ ของลวดทองแดงอาบน้ำยา	4
3.1 ตัวอย่างตารางหาค่าความต้านทานของฉนวนมอเตอร์.....	35
3.2 ตัวอย่างตารางผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยมความถี่สูง	38
3.3 ตัวอย่างตารางผลการหาค่าความต้านทานฉนวนด้วยแรงดันไซน์ความถี่สูง	42
4.1 ค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์	44
4.2 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่ความถี่ต่างๆ	49
4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความถี่ต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	55

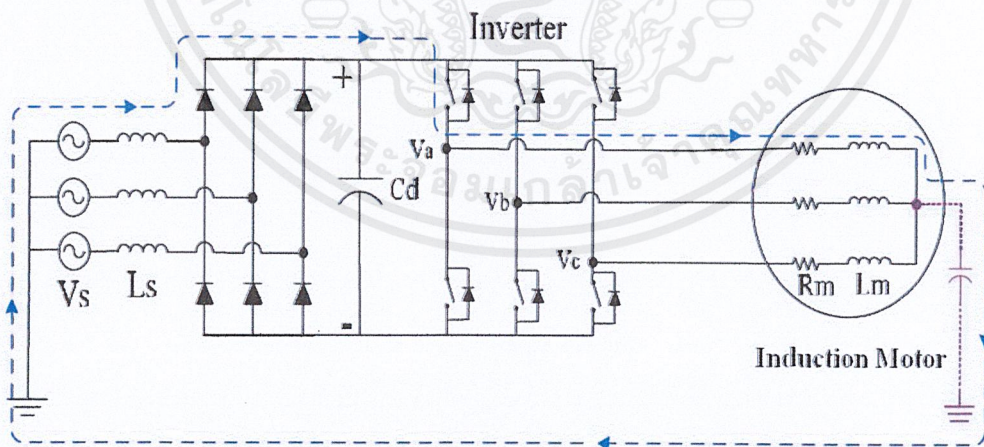
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบันนี้มีการใช้มอเตอร์ (Induction Motor) ร่วมกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ (Inverter Drive) ในโรงงานอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไป Inverter เหล่านี้จะใช้เทคนิคในการสวิตช์แรงดันแบบ PWM (Pulse-Width Modulation) ที่ใช้ความถี่อ้าอิง (Carrier Frequency) ในการขับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีค่าและจะมีผลของฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นซึ่งจะส่งผลกระทบต่อตัวมอเตอร์ ส่วนหนึ่งคือเกิดกระแสรั่วไหลลงดินผ่านอิมพีแดนซ์ระหว่างขดลวดและเฟรมของมอเตอร์และอาจไหลกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายอย่างตัว Inverter เอง ซึ่งจะทำให้ Inverter เกิดการทำงานที่ผิดพลาด รวมถึงเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน

ดังนั้น เพื่อที่จะทราบถึงค่ากระแสรั่วไหลลงกราวด์ว่ามีมากน้อยเพียงใด ที่ความถี่เท่าใด จึงจำเป็นต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเสียก่อน ในบทความนี้จึงนำเสนอถึงวงจรสมมูลของฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบหาค่าจากการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ารูปคลื่นต่างๆ ตามรูปที่ 1 จะสังเกตได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ R_{dc} จะสามารถหาได้จากการทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง พารามิเตอร์ R_f หาได้จากการทดสอบด้วยแรงดันรูปคลื่นไซน์ซึ่งจะลดลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น และค่า C จะสามารถหาได้จากค่า Time Constant ของแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 1.1 กระแสรั่วไหลในระบบขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) สร้างแหล่งจ่ายสัญญาณรูปคลื่นต่างๆ เพื่อศึกษาการทดสอบหาค่า Insulation impedance of induction motor
- 2) เพื่อศึกษาลักษณะของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์โดยใช้แหล่งจ่ายที่สร้างขึ้น
- 3) เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะของรูปคลื่นที่ความถี่ต่างๆ และสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลเพื่อยืนยันผลได้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1) ศึกษาที่มาของกระแสรั่วลงกราวด์เมื่อป้อนด้วยอินเวอร์เตอร์
- 2) สร้างแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงสำหรับทดสอบฉนวนในมอเตอร์
- 3) สร้างแหล่งจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ 10 – 50 kHz
- 4) สร้างแหล่งจ่ายแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10 - 50 kHz
- 5) หาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของฉนวนของมอเตอร์ไฟฟ้า

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

ขั้นตอนที่ 1 : ทำการศึกษาหาข้อมูลวงจรสมมูลของฉนวนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ขั้นตอนที่ 2 : ศึกษาหาวิธีการสร้างแหล่งจ่ายสัญญาณรูปคลื่นต่าง ๆ

ขั้นตอนที่ 3 : ออกแบบวงจรที่ใช้ในการสร้างแหล่งจ่าย

ขั้นตอนที่ 4 : สร้างแหล่งจ่ายตามที่ได้ออกแบบไว้

ขั้นตอนที่ 5 : ทดสอบแหล่งจ่ายที่สร้างขึ้น และทำการปรับปรุงวงจร

ขั้นตอนที่ 6 : นำแหล่งจ่ายที่สร้างมาทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของฉนวนของมอเตอร์ไฟฟ้า

เหนี่ยวนำ

ขั้นตอนที่ 7 : วิเคราะห์วงจรสมมูลของฉนวนจากค่าที่ได้จากการทดลอง

ขั้นตอนที่ 8 : สรุปและวิจารณ์ผลรวมทั้งเสนอแนวทางในการพัฒนาต่อ

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินงาน	เดือน							
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
1. ศึกษาวงจรสมมูลของฉนวนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	←→							
2. ศึกษาการสร้างแหล่งจ่ายไฟ		←→						
3. จำลองการสร้างแหล่งจ่ายไฟชนิดต่างๆ ด้วยโปรแกรม Proteus			←→					
4. สร้างแหล่งจ่ายกระแสตรง ปรับค่าได้			←→					
5. ทดสอบแหล่งจ่ายกระแสตรงปรับค่าได้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ				←→				
6. สร้างแหล่งจ่าย Square Wave ความถี่สูง ปรับค่าได้					←→			
7. สร้างแหล่งจ่าย Sine Wave ความถี่สูง ปรับค่าได้					←→			
8. ทดสอบหาวจรสมมูลของฉนวนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ด้วยแหล่งจ่ายที่สร้าง						←→		
9. เก็บผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล							←→	
10. สรุปผลงานวิจัย								←→

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

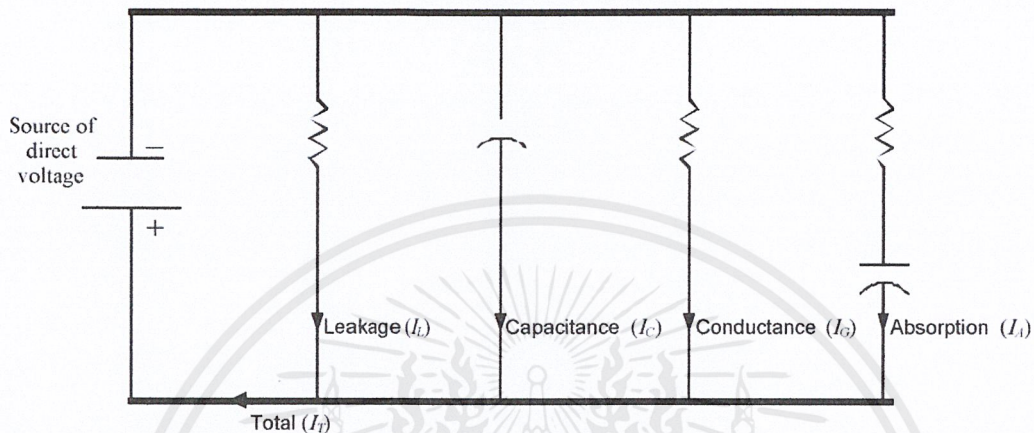
- 1) ทำให้เข้าใจถึงปัญหาที่เกิดจากกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์
- 2) ได้ทราบถึงที่มาของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ และสามารถอธิบายในรูปแบบของวงจรสมมูลได้
- 3) ได้รู้ถึงหลักการทำงานและการสร้างอินเวอร์เตอร์
- 4) สามารถวิเคราะห์รูปแบบของกระแสรั่วไหลเบื้องต้นได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000

วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000 จะมีลักษณะดังนี้



ภาพที่ 2.1 วงจรสมมูลของฉนวนตามมาตรฐาน IEEE 43-2000

2.1.1 องค์ประกอบของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากวงจรสมมูล

- Absorption (polarization) current (I_A) : เป็นกระแสที่เกิดจากการ polarizing ในระดับโมเลกุลและอิเล็กตรอนดริฟท์ซึ่งสลายตัวไปตามเวลาจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าในอัตราที่ลดลง โดยเปรียบเทียบที่ค่าเริ่มต้นสูง ๆ จนถึงค่าที่เข้าใกล้ศูนย์ และยังขึ้นอยู่กับชนิดและสภาพของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมในระบบฉนวน

- Conduction current (I_G) : กระแสที่มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลา ซึ่งผ่านฉนวนจำนวนมากจากการาวด์ไปยังตัวนำแรงดันสูง และยังขึ้นอยู่กับชนิดและสภาพของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมในระบบฉนวน

- Electro endosmosis effect เป็นปรากฏการณ์ที่พบได้บ่อยในขดลวดที่เก่า , เมื่อมีความชื้น , ความแตกต่างระหว่างความต้านทานของฉนวนอาจหาได้จากการทดสอบชั่วคราวแบบ reverse ซึ่งเป็นปกติสำหรับขดลวดที่เก่าและเปื่อยขึ้น ที่แท่งตัวนำลงกราวด์จะถูกเชื่อมต่อกับขดลวดและแรงดันต้านลงกราวด์ ซึ่งจะมีค่าความต้านทานฉนวนจากการต่อกลับชั่วคราวมากกว่าปกติ

- insulation resistance (IR_i) ความสามารถของฉนวนทางไฟฟ้าของขดลวดเพื่อต้านทานกระแสตรง ผลหารของการป้อนแรงดันตรงชั่วพลกับกระแสระหว่างฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ณ 40°C เมื่อเกิดขึ้น ณ เวลา t จากการเริ่มต้นของการป้อนแรงดันปกติที่ 1

นาที่ และ 10 นาที่ อย่างไรก็ตามค่าอื่นก็สามารถใช้ได้ ค่า 1-10 จะเป็นนาที่ แต่ค่าของ 15 หรือมากกว่าจะถือเป็นวินาที

- geometric capacitive current (I_C) : การเปรียบเทียบกระแสที่มีขนาดสูงและช่วงเวลาสั้น ๆ จะมีค่าลดลงเป็น exponential เมื่อเวลาที่ป้อนแรงดันเปลี่ยนแปลงและขึ้นอยู่กับความต้านทานภายนอกของเครื่องมือวัด และค่า geometric capacitive current

- polarization index ($P.I.$) ค่าการเปลี่ยนแปลงของ IR ตามเวลา ผลหารของ IR ที่เวลา (t_2) กับ IR (t_1) ถ้าไม่ได้รับวิธีให้สมมติเป็นที่ 10 นาที่และ 1 นาที่ ตามลำดับ $PI_{10/1 \text{ min}}$ 1-10 เป็นนาที่ ถ้า 15 หรือมากกว่าเป็นวินาที เช่น $PI_{60/15} = IR_{t_{60s}}/IR_{t_{15}}$

- surface leakage current condition (I_L) เป็นค่ากระแสรั่วไหลที่ผิว ค่ากระแสคงที่กับเวลาจะเกิดขึ้นบ่อยที่ผิว ณ จุด end turned ของ stator winding หรือระหว่างตัวนำกับ body rotor ใน rotor winding ขนาดของกระแสรั่วที่ผิวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและจำนวนของชนิดตัวนำ เช่น ความชื้นหรือสิ่งที่ทำให้พื้นผิวบนฉนวนสกปรก

2.1.2 Insulation resistance - general theory

ค่าความต้านทานของฉนวนของ rotating machine เป็นตัวแปร ของชนิดและเงื่อนไขของวัสดุฉนวน โดยทั่วไปแล้วความต้านทานของฉนวนจะแตกต่างกันไปตามความหนาของฉนวนและพื้นผิวตัวนำ

2.1.2.1 ส่วนประกอบของ DC current ที่ถูกวัด

โดยนิยาม IR คือผลหารของแรงดันต่อกระแสลัพท์ ที่เงื่อนไขเวลา ผลรวมของกระแส I_t เกิดจาก 4 กระแสรวมกัน ดังนี้คือ surface leakage (I_L), geometric capacitance (I_C), conductance (I_G), and absorption (I_A).

วงจรมูลของกระแสต่าง ๆ ในการทดสอบ IR ดังรูปที่ 2.1

I_C จะไม่มีผลกับการวัด เพราะจะหายไปตั้งแต่แรกที่ 1 นาที่

I_A หรือ polarization current เปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลง กระแสกับเวลาจะสัมพันธ์กับสมการที่ 2.1 ถ้า plot ใน log-log graph จะได้เส้นตรง

$$I_A = Kt^{-n} \quad (2.1)$$

K คือ ฟังก์ชันของระบบฉนวนและแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

t คือ เวลาในการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

n คือ ฟังก์ชันของระบบฉนวน

I_A ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกอ้างถึง polarization วัสดุฉนวนตัวเพราะโมเลกุลของสารอินทรีย์ เช่น epoxy ,polyester ,asphalt ซึ่งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมของสนามไฟฟ้าตรง เพราะโมเลกุลเหล่านี้ต้องมีความดึงดูดกับแรงดึงดูดของแต่ละโมเลกุล มัน

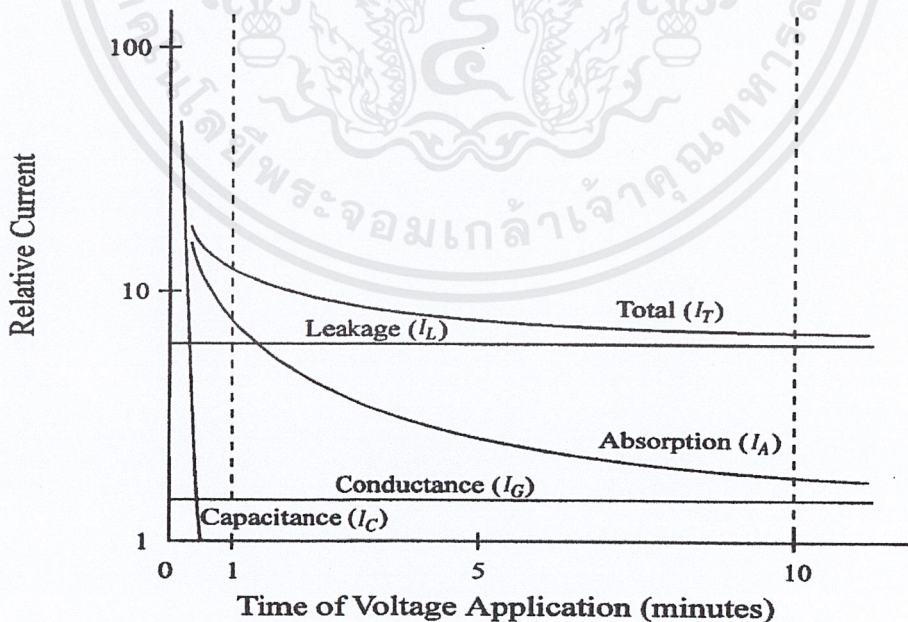
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีผลอย่างสม่ำเสมอไม่ก็หน้าที่ภายหลังของสนามไฟฟ้าสำหรับโมเลกุลเพื่อปรับสภาพอีกครั้ง (reoriented) และดังนั้นสำหรับพลังงานไฟฟ้าไรเซนกันกระแสที่ถูกจ่ายจะลดลงเกือบเป็น 0 ส่วนที่ 2 ของ I_A คือ ส่วนที่ล่องลอยที่น้อยของอิเล็กตรอนและไอออนผ่านตลอดวัสดุสารอินทรีย์นั้น อิเล็กตรอนและไอออนเหล่านี้ลอยจนกระทั่งมันกลายเป็น trapped ที่ผิวไมก้า ในระบบฉนวนของ machine IR ระหว่าง 30 วินาทีถึงไม่กี่นาทีจะถูกตัดสินใจอย่างแรกด้วย I_A เพราะ I_A เป็นลักษณะของวัสดุฉนวน และอุณหภูมิของ winding I_A จะไม่ดีและเร็วในผู้ผลิตระบบฉนวน ตั้งแต่ 1970 (จะเป็น polyester thermosetting หรือ epoxy bonded) ค่าของ n จากสมการ 2.1 จะแตกต่างจาก thermosetting ที่เก่ากว่า (asphalt หรือ shellac bonded) มันไม่สำคัญที่ว่าวัสดุฉนวนสมัยใหม่จะดีกว่าเพราะ I_A ต่ำกว่า และ IR สูง เช่น polyethylene ไม่มี I_A เพราะขอบเขตของความร้อนมันจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ใน machine หมุน

I_G เป็นค่าคงที่ในเวลา ถ้า I_L สูง เช่น IR ต่ำเกิดเพราะความชื้นหรือสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

2.1.2.2 คุณลักษณะของกระแสตรงที่ถูกวัดได้ (characteristic of the measured direct current)

การเปรียบเทียบการเปลี่ยน IR หรือกระแสรวมในระหว่างการทดสอบแรงดันสูงอาจมีประโยชน์ในการประเมินความสะอาดและความแห้งของขดลวด ถ้าขดลวดสกปรกหรือเปียก I_t จะคงที่ตามเวลาโดยประมาณเพราะ I_L/I_G จะมากกว่า I_A มาก ๆ ถ้าขดลวดสะอาดและแห้ง I_t จะลดลงตามเวลาเพราะ I_t จะขึ้นอยู่กับ I_A (เช่น การ polarization) ดังรูปที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 คุณลักษณะของกระแสตรงที่ถูกวัดได้

2.2 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของฉนวน

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติและคุณภาพของไดอิเล็กตริกมี 4 ประการ คือ

1. ความต้านทาน
2. เพอร์มิตติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
3. แฟกเตอร์หลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก
4. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

2.2.1 ความต้านทานของฉนวน

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้วจะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้นถ้าหากได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สารฉนวนนั้นมีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแสแต่มีค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั่นแสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไม่สูงเป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนี้มีคุณภาพการฉนวนที่ดี

เมื่อฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโทรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานพอจะมีกระแสไหลผ่านฉนวนนั้นแต่น้อย เรียกว่ากระแสรั่ว หรือกระแสคั่ง กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนที่แบ่งออกเป็นสองทาง คือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อในฉนวน เนื่องจากฉนวนมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่บ้าง ดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวนเนื่องจากผิวฉนวนมีสภาพนำ เนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนและความชื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้เองการวัดความต้านทานของฉนวนจึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (surface resistance)

ค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริกอาจคำนวณหรือวัดได้เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานจำเพาะ ρ ความยาว l พื้นที่หน้าตัด A ของไดอิเล็กตริก เช่น ในกรณีแผ่นไดอิเล็กตริกระหว่างแผ่นระนาบคาปาซิเตอร์ ความต้านทานของฉนวนจะหาได้จาก

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

ส่วนในกรณีของไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์แบบทรงกระบอกซ้อน ความต้านทานของฉนวนหาได้จาก

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho dx}{2\pi l x} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.3)$$

เมื่อ x คือ รัศมีใดๆ วัดจากแกนและ dx ความหนาส่วนย่อยของฉนวน
 r_1 และ r_2 คือ รัศมีของตัวนำในและตัวนำนอกตามลำดับ
 l คือ ความยาว

2.2.2 เปรอ์มิตติวิตี (permittivity)

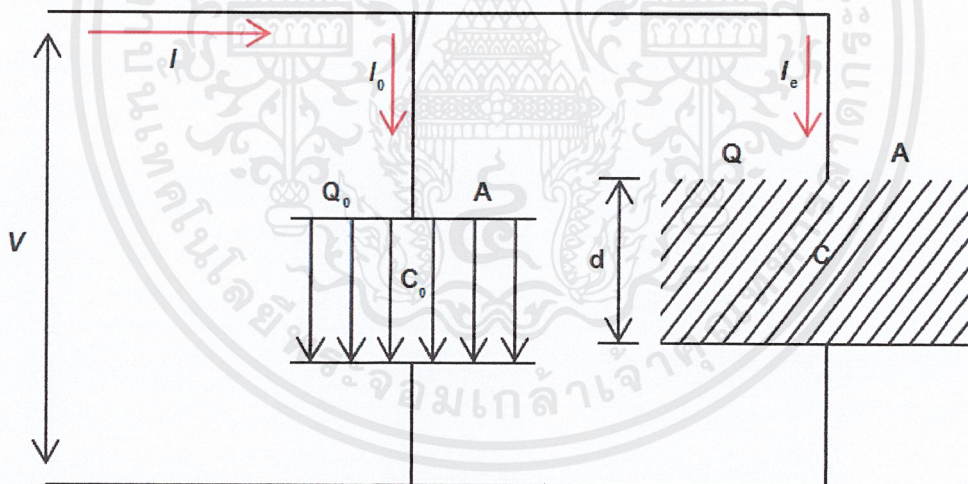
เปอ์มิตติวิตีบางทีก็เรียกว่า ค่าคงตัวของไดอิเล็กตริก (dielectric constant : ϵ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ไม่มีมิติและเป็นตัวชี้บอกลักษณะของไดอิเล็กตริกหรือสารฉนวนไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความสามารถของการสร้างคาแปซิแตนซ์ หรือกล่าวง่าย ๆ ϵ ก็คือค่าตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคาแปซิแตนซ์จะเพิ่มขึ้นกี่เท่าของคาแปซิเตอร์สุญญากาศ เมื่อใส่ไดอิเล็กตริกเปอ์มิตติวิตี ϵ เข้าไปแทนที่ นั่นคือ

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.4)$$

ปกติเปอ์มิตติวิตี ϵ จะแสดงเป็นความสัมพันธ์ ϵ_r เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศหรือความว่างเปล่า ϵ_0

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.5)$$

โดยที่ $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



ภาพที่ 2.3 ค่าเก็บประจุระหว่างแผ่นระนาบที่มีค่าเปอ์มิตติวิตีเป็นสุญญากาศ ϵ_0 และ ϵ

และจากความสัมพันธ์ของคาแปซิแตนซ์ $C = \frac{Q}{V}$ จะได้ค่าคาแปซิแตนซ์ของสุญญากาศ

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.6)$$

ถ้าใส่ไดโวลีเก็คตริกที่มีสารอื่น (ฉนวนเหลว ฉนวนแข็ง ฉนวนก๊าซ) เข้าไปแทนที่
สูญญากาศระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด จะพบว่าถึงแม้ว่าแรงดันที่ป้อนมีค่าคงที่ก็ตาม แต่กระแสใน
วงจรจะมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าค่าคาปาซิแตนซ์เพิ่มขึ้นสูง ความหนาแน่นของประจุบนอิเล็กโทรด
เพิ่มขึ้น และอาจเนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนไหลผ่านไดโวลีเก็คตริกมากขึ้น

แต่ค่าคาปาซิเตอร์สูญญากาศที่มีค่าคาปาซิแตนซ์ C_0 กระแสที่ไหลผ่านจะเป็น

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad \text{หรือ} \quad \bar{i} = j\omega C_0 \bar{V} \quad (2.7)$$

เครื่องหมาย j แสดงให้เห็นเด่นชัดว่ากระแสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา ส่วนคาปา
ซิเตอร์ที่มีสารไดโวลีเก็คตริก ค่าคาปาซิแตนซ์ C จะไม่เท่ากับ C_0 และยิ่งกว่านั้นจะสังเกตเห็นว่า
ในทางปฏิบัติเฟสเซอร์ระหว่างแรงดันกับกระแสมีมุมน้อยกว่า 90 องศาเพราะมีพลังงานสูญเสีย
เปล่าในลักษณะความต้านทาน นั่นแสดงว่าคาปาซิแตนซ์เป็นคอมเพล็กซ์ คือ มีค่าจริงและค่า
จินตภาพ ซึ่งรวมอยู่ในรูปของเปอร์มิตติวิตี คือ

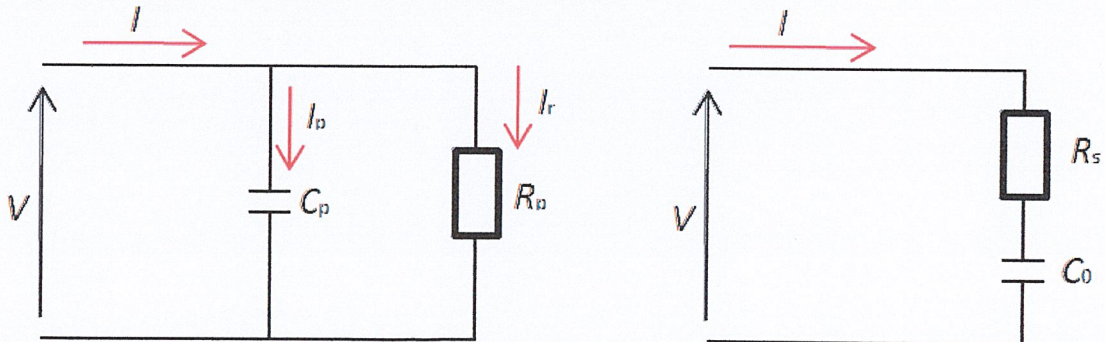
$$\bar{C} = \bar{\epsilon}_r C_0 \quad (2.8)$$

โดยที่ $\bar{\epsilon}_r = \epsilon' - j\epsilon''$

ฉะนั้นกระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์

$$\begin{aligned} \bar{I} &= j\omega \bar{C} \bar{V} \\ \bar{I} &= j\omega (\epsilon' - j\epsilon'') C_0 \bar{V} \\ \bar{I} &= j\omega \epsilon' C_0 \bar{V} + \omega \epsilon'' C_0 \bar{V} \end{aligned} \quad (2.9)$$

เทอมแรกขวามือของสมการ $\bar{I}$ ก็คือ กระแสคาปาซิแตนซ์ I_C และเทอมหลังคือกระแส
พลังงานสูญเสียเปล่า I_r คือ $\bar{I} = I_C + I_r$
ไดโวลีเก็คตริกมีพลังงานสูญเสียเปล่า และสามารถเก็บประจุไว้ในคาปาซิเตอร์ จึงอาจเขียนแทนด้วย
วงจรสมมูลดังรูป ก) เป็นวงจรขนาน รูป ข) เป็นวงจรอันดับ



ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลของไดโวลีเก็คตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขนาน

$$\begin{aligned}C_p &= \varepsilon' C_0 \\R_p &= 1 / (\omega \varepsilon'' C_0) \\tg &= \frac{1}{\omega R_p C_p} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\end{aligned}\quad (2.10)$$

วงจรอันดับ

$$\begin{aligned}C_s &= \frac{|\varepsilon_r|^2}{\varepsilon'} C_0 = \varepsilon' \{1 + (tg \cdot \delta)^2\} C_0 \\R_s &= \frac{\varepsilon''}{\omega |\varepsilon_r|^2 C_0} \\tg \cdot \delta &= \omega R_s C_s = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\end{aligned}\quad (2.11)$$

มุม δ นี้เรียกว่ามุมพลังงานสูญเสียเปล่า (loss angle)

จากสมการ C_p และ C_s จะเห็นได้ว่า ค่าคาบแปซิแตนซ์ของคาบแปซิเตอร์ที่มีสารไดอิเล็กตริกขึ้นอยู่กับการวงจรสมมูลย์ ในกรณีที่พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำ คือ $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$ หรือ $tg \cdot \delta \ll 1$ ค่าคาบแปซิแตนซ์ทั้งสองจะเท่ากัน คือ $C_p = C_s$ และจะได้

$$\overline{\varepsilon_r} \rightarrow \varepsilon_r = \varepsilon' \quad (2.12)$$

นั่นคือ ε' จะเป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric const) ε_r ที่ใช้กันค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ε_r นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยทั่วไปจำนวนที่มีใช้ทั่วไปถ้าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ε_r จะเพิ่มสูงขึ้น

2.2.3 แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริก

พลังงานสูญเสียเปล่าไดอิเล็กตริกอาจแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกที่ความต้านทานไม่ถึงค่าอนันต์ และอีกส่วนหนึ่งเป็นพลังงานสูญเสียเปล่าเนื่องจากโพลาไรเซชันของไดอิเล็กตริก จัดเป็นพลังงานสูญเสียเปล่าทางไฟฟ้า

ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์กับคาบแปซิเตอร์ที่สมบูรณ์ กระแสไหลผ่านคาบแปซิเตอร์จะมีเฟสหน้าหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา

ถ้าให้

$$\begin{aligned} V &= V_m \sin \omega t \\ I &= \omega C V_m \cos \omega t \\ I &= \omega C V \end{aligned} \quad (2.13)$$

เมื่อ V เป็น ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ป้อน

ในทางปฏิบัติกระแสที่ไหลในคาปาซิเตอร์จะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา ดังภาพ ที่ 2.5 θ เป็นมุมเฟสของคาปาซิเตอร์ ดังนั้น $PF = \cos \theta$ หรืออีกอย่างหนึ่งคือ $\sin \delta$ ฉะนั้น กำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์ไม่สมบูรณ์ คือ $VI \cos \theta$ หรือ $VI \sin \delta$

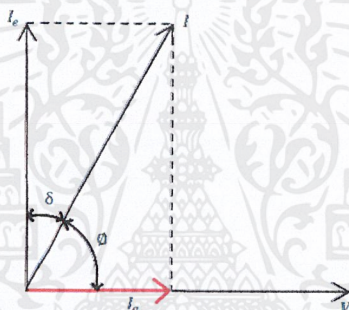
เมื่อ δ มีค่าน้อยๆ $VI \sin \delta = VI \tan \delta$

โดยที่

$$\delta = 90^\circ - \theta$$

δ = มุมพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

$tg \cdot \delta$ = แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก



ภาพที่ 2.5 มุมเฟสกระแสในตัวเก็บประจุ

$$tg \cdot \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{V / R_p}{\omega C_p R_p} \quad (2.14)$$

ฉะนั้นพลังงานสูญเสีย

$$P_d = \frac{V^2}{R} = V^2 \omega C_p tg \delta \quad (2.15)$$

หรือ

$$P'_d = E^2 \omega \epsilon \cdot tg \delta \quad (2.16)$$

เมื่อ P'_d = พลังงานสูญเสียต่อปริมาตร (Watt)

E = ความเครียดสนามไฟฟ้า (V/cm^2)

ถ้า C = ค่าเก็บประจุไฟฟ้า (Farad)

V = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (V)

จะได้ P_d = ค่ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก (Watt)

2.2.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

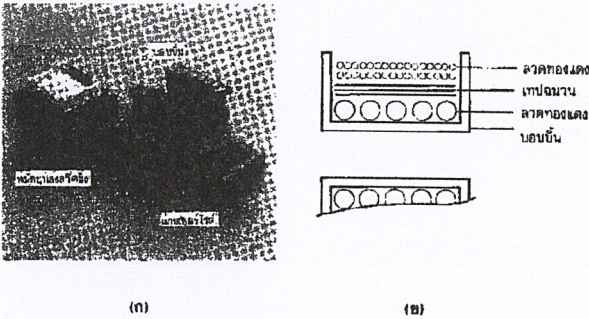
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวน (Dielectric strength) ซึ่งเป็นตัวชี้บอกให้ทราบว่าได้อิเล็กตริกสามารถทนต่อแรงดันได้มากหรือน้อยเพียงใด กำหนดด้วยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่จะทำให้ไดอิเล็กตริกเบรกดาวน์ หากได้โดยป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกิดเบรกดาวน์ ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่มีโครงสร้างทางเคมีและฟิสิกส์ต่างกัน สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึกจะเกิดเบรกดาวน์ตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นว่าร่องรอยของการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนจะไม่เป็นเส้นตรง โดยปกติไดอิเล็กตริกแข็งจะทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ได้สูงกว่าไดอิเล็กตริกเหลวการเบรกดาวน์ในฉนวนเหลวสภาพการฉนวนจะกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากเบรกดาวน์ผ่านไปแล้ว แต่ในฉนวนแข็งเกิดเบรกดาวน์แล้วสภาพการฉนวนจะเสียไป ใช้งานเพื่อการฉนวนอีกไม่ได้ อย่างไรก็ตามฉนวนเหลวหรือฉนวนแข็งก็ดีอาจมีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำถ้าหากมีสิ่งเจือ

2.3 หม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิง (Switching Transformer) จัดเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย ผู้ออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายจึงจำเป็นต้องศึกษารูปแบบที่เป็นไปได้ในลักษณะต่างๆของหม้อแปลงสวิตชิง ความเหมาะสมในการใช้งาน การคำนวณขนาดแกนเฟอร์ไรต์และขนาดลวดทองแดง รวมทั้งการกำหนดความปลอดภัยทางไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัยและลดกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงสวิตชิงขณะทำงาน ดังจะได้กล่าวไว้โดยละเอียดในบทนี้

2.3.1 ส่วนประกอบของหม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิงมีหน้าที่หลักในการลดทอนแรงดันไฟตรงที่อินพุตของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งอาจมีค่าสูงได้ถึง 310 โวลต์ ให้มีค่าลดลงเป็นแรงดันไฟค่าต่ำที่เอาต์พุต และทำให้เกิดการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันอินพุตแรงดันเอาต์พุตที่ได้ เพื่อป้องกันอันตรายจากการถูกไฟฟ้าดูด ส่วนประกอบที่สำคัญของหม้อแปลงสวิตชิงแสดงไว้ในภาพที่ 2.6 โดยมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบหลักของหม้อแปลงสวิตชิง (ก) และการพันขดลวดทองแดง อาน้ำยาบอบบิ้น (ข)

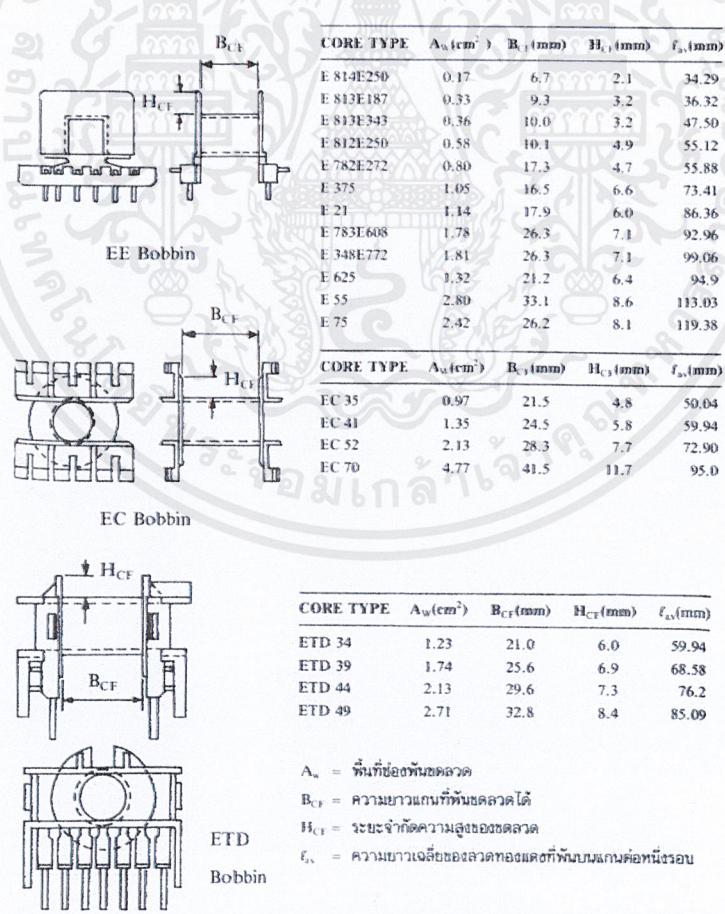
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนแกนอากาศมาก เฟอร์ไรต์มีค่าจุดอิ่มตัวฟลักซ์แม่เหล็กค่อนข้างสูงประมาณในช่วง 3,000 ถึง 4,000 เกาส์ และเกิดการสูญเสียในตัวมันต่ำที่ความถี่สูงๆ ดังนั้นหม้อแปลงสวิตชิงจึงนิยมใช้แกนเป็นเฟอร์ไรต์มากที่สุด เฟอร์ไรต์ที่นำมาใช้ทำแกนของหม้อแปลงสวิตชิงจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการใช้งานและมาตรฐานในการออกแบบ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

บอบบิ้น (Bobbin)

บอบบิ้นหรือแบบรองพัน ปกติจะทำจากพลาสติกชนิดทนความร้อนได้สูงและไม่ติดไฟ บอบบิ้นจะช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้น และป้องกันปัญหาการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับแกนเฟอร์ไรต์ได้ บอบบิ้นจะมีขนาดมาตรฐานตามมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์ ตัวอย่างขนาดของบอบบิ้นดูได้จากภาพที่ 2.7 บอบบิ้นส่วนใหญ่จะถูกออกแบบให้มาหาฟักลวดทองแดง เพื่อความสะดวกในการพันขดลวดและบัดกรีติดกับแผ่น PCB



ภาพที่ 2.7 แสดงตัวอย่างและขนาดมาตรฐานของบอบบิ้นสำหรับแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE, EC และ ETD (ที่มา: Ferroxcube)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดทองแดงอาบนํ้ายา (Enamelled Copper Wire)

การพันขดลวดทั้งไพรมารีและเซคันดารีของหม้อแปลงสวิตซ์ที่กำลังไม่สูงมากนัก ปกติจะใช้ลวดทองแดงอาบนํ้ายาพันบนแกนของบอบบิ้นเพื่อให้ได้จำนวนรอบที่ต้องการ ขนาดของขดลวดที่จะใช้พันนั้น ขึ้นอยู่กับค่ากระแสสูงสุดที่ผ่านขดลวด ความถี่และผลข้างเคียงอื่นๆซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

เทปฉนวน (Insulation Tape)

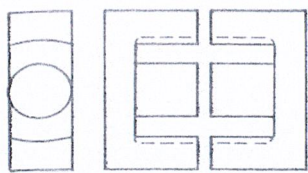
เทปฉนวนใช้พันสำหรับเป็นตัวรองระหว่างชั้นของขดลวดในหม้อแปลงสวิตซ์ และมีหน้าสำคัญในการแยกส่วนทางไฟฟ้าระหว่างขดไพรมารีและขดเซคันดารีด้วยวัสดุที่ใช้ทำเทปฉนวนอาจเป็นพวกลายไมลาร์ (Mylar) หรือโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05-0.1 มิลลิเมตร การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบและค่าความปลอดภัยที่ต้องการจากหม้อแปลงสวิตซ์เป็นหลัก

2.3.2 แกนเฟอร์ไรต์และการเลือกใช้

2.3.2.1 ลักษณะและขนาดมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์

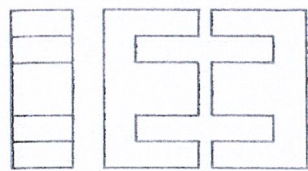
แกนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงสวิตซ์โดยทั่วไป จะถูกผลิตออกมาที่ขนาดและรูปทรงต่างๆ ตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น แกนแบบ EI, EE, ETD หรือแกนแบบ POT เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะของคู่ประกบ เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับบอบบิ้น การประกบแกนเฟอร์ไรต์บนบอบบิ้นจะทำให้ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้ ตัวอย่างขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบต่างๆแสดงไว้ในภาพที่ 2.8

แกนแบบ POT นั้นจะใช้กับหม้อแปลงสวิตซ์ที่ไม่ต้องการกำลังสูง(ไม่เกิน125วัตต์) และในงานที่ต้องการสัญญาณรบกวน EMI/RFI ต่ำ เนื่องจากลักษณะรูปทรงของมันสามารถป้องกันการแพร่กระจายของสัญญาณรบกวนได้ดี แต่แกนแบบ POT มีช่องสำหรับให้ขดลวดลอดออกมาภายนอกได้ค่อนข้างเล็ก จึงเป็นอุปสรรคในการพันลวดทองแดงขนาดใหญ่เมื่อหม้อแปลงต้องการกำลังสูงๆแกนที่นิยมใช้กันมากสำหรับหม้อแปลงสวิตซ์ที่ต้องการกำลังงานสูง จะเป็นแกนแบบ EI, EE และ ETD เนื่องจากสามารถพันขดลวดรอบแกนบนบอบบิ้นได้สะดวก แกนในกลุ่มนี้จะมีขนาดต่างๆให้เลือกใช้งานได้เป็นจำนวนมาก โดยสามารถให้กำลังงานได้ตั้งแต่ 5 วัตต์ ไปจนถึง 10 กิโลวัตต์ อย่างไรก็ตามสัญญาณรบกวน EMI/RFI ที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่าแกนแบบ POT ยังมีแกนเฟอร์ไรต์ในแบบอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้งานได้อีก เช่น แกนแบบ RM, PQ และ LP แต่มักไม่ค่อยพบเห็นตามท้องตลาดทั่วไป และไม่ค่อยเป็นที่นิยมจึงจะไม่ขอกล่าวถึง



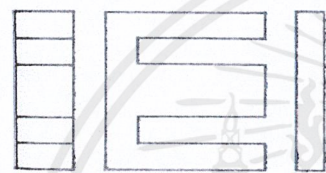
ETD

CORE TYPE	A_c (cm ²)	A_w (cm ²)	V_c (cm ³)	ℓ_c (mm)
ETD 34	0.971	1.220	7.64	78.6
ETD 39	1.250	1.740	11.50	92.2
ETD 44	1.740	2.130	18.00	103.0
ETD 49	2.110	2.710	24.20	114.0



EE

CORE TYPE	A_c (cm ²)	A_w (cm ²)	V_c (cm ³)	ℓ_c (mm)
EE 20/20/5	0.31	0.35	1.34	43.0
EE 30/30/7	0.59	0.78	4.00	66.9
EE 42/42/15	1.82	1.78	17.6	97.0
EE 42/42/20	2.36	1.78	23.1	97.4
EE 42/54/20	2.36	2.40	28.8	122.0
EE 42/66/20	2.36	3.40	34.5	143.0
EE 55/55/21	3.54	2.50	43.7	123.0
EE 55/55/25	4.20	2.50	52.0	123.0
EE 65/66/27	5.32	3.93	78.2	147.0



EI

CORE TYPE	A_c (cm ²)	A_w (cm ²)	V_c (cm ³)	ℓ_c (mm)
EI 19	0.24	0.517	0.950	39.6
EI 22/19	0.41	0.44	1.630	39.3
EI 25/19	0.42	0.819	2.02	48.6
EI 28/20	0.85	0.725	4.11	48.4
EI 30/26	1.11	0.791	6.45	58.1
EI 35/29	1.21	1.36	8.18	67.6
EI 40/35	1.48	1.08	11.3	76.9
EI 50/42	2.30	1.7	21.8	94.8
EI 60/44	2.48	2.94	27.2	109.7

- A_c = ขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเฟอร์ไรต์
- A_w = ขนาดพื้นที่ช่องหน้าต่างของขดลวด
- V_c = ปริมาตรของแกนเฟอร์ไรต์
- ℓ_c = ระยะทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์

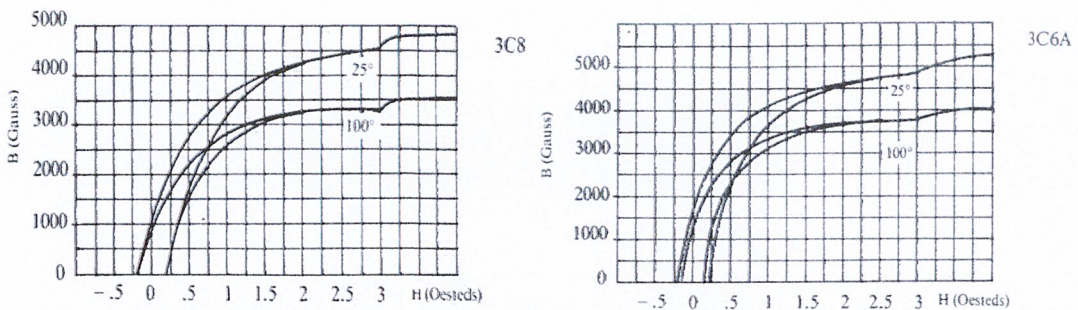
ภาพที่ 2.8 แสดงตัวอย่างขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE,EI และ ETD

2.3.2.2 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์

ชนิดของเนื้อสารแกนเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกัน จะให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์แตกต่างกันด้วยถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการก็ตาม ในแผ่นข้อมูลเนื้อสารที่ให้กับแกนเฟอร์ไรต์นั้น จะต้องมียาวละเอียดคุณสมบัติเนื้อสารแสดงไว้เสมอ ข้อมูลสำคัญที่ควรทำความเข้าใจและศึกษาไว้ก็คือเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis curve) และค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)

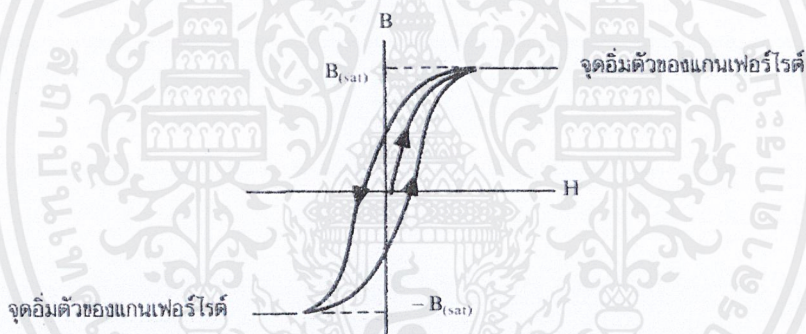
เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis curve)

เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันบนแกนในภาพที่ 2.9 จะแสดงลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิสของเนื้อสารชนิด 3C8 และ 3C6A ตามลำดับ ซึ่งผลิตโดยผู้ผลิตคือ FERROXCUBE จากรูปจะเห็นว่า ค่าความหนาแน่นฟลักซ์



ภาพที่ 2.9 แสดงเส้นโค้งฮิสเตอร์ซิสของแกนเฟอร์ไรต์ที่เป็นเนื้อสารชนิด 3C8 และ 3C6A

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก H มีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่งซึ่งค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก H ก็ตามจากจุดดังกล่าว เราจะเรียกว่าแกนเริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation) โดยปกติผู้ผลิตจะแสดงกราฟของเส้นโค้งฮิสเตอร์ซิสเพียงครั้งเดียว เนื่องจากอีกครั้งหนึ่งของเส้นโค้งฮิสเตอร์ซิสจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ เพียงแต่จะมีลักษณะกลับทิศกันเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.10



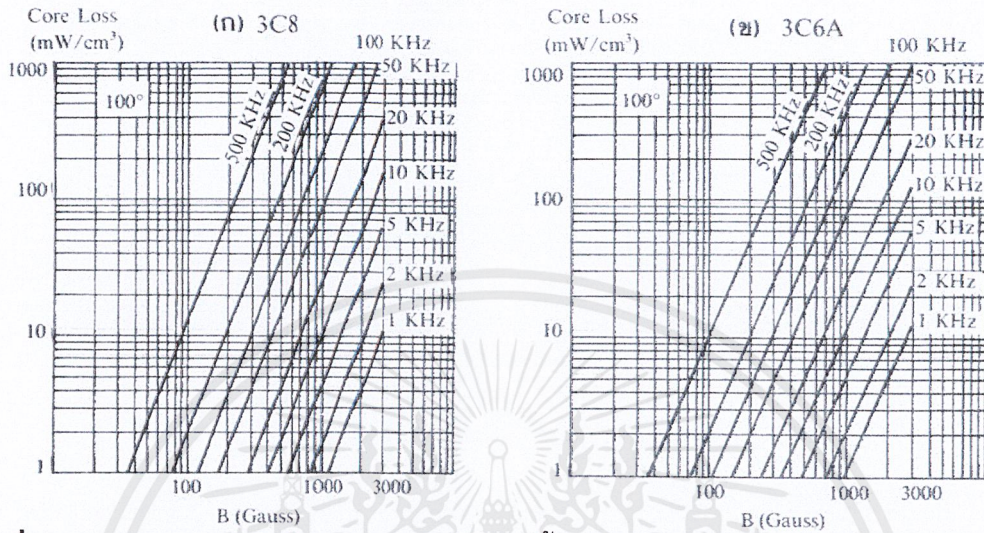
ภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะที่สมบูรณ์ของเส้นโค้งฮิสเตอร์ซิสซึ่งจะมีลักษณะสมมาตรของกราฟซิกบนและซิกล่าง ปกติผู้ผลิตจะให้กราฟในซิกบนมาเท่านั้น ดังในภาพที่ 2.9

การใช้งานแกนเฟอร์ไรต์ในหม้อแปลงสวิตชิงจะต้องระวังไม่ทำให้แกนเฟอร์ไรต์เกิดการอิ่มตัวขึ้นได้ ดังนั้นโดยทั่วไปในการออกแบบหม้อแปลงสวิตชิง จึงควรกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนขณะทำงาน มีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดก่อนอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ เพื่อความปลอดภัย

ค่าการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)

การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์จะทำให้แกนเฟอร์ไรต์ร้อน ซึ่งมีสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ การสูญเสียที่เกิดจากลักษณะฮิสเตอร์ซิสของแกน (Hysteresis Loss) และการสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนภายในแกนเฟอร์ไรต์ (Eddy Current Loss) ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ การสูญเสียจากการเกิดกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่มีขนาด

ไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นการสูญเสียที่ก่อให้เกิดความร้อนในแกนอาจพิจารณาได้จากการสูญเสียทางฮิสเตอร์ซิสเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างกราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์แสดงไว้ในภาพที่ 2.11(ก) และ 2.11(ข) ปกติค่ากำลังสูญเสียจะถูกระบุไว้เป็นมิลลิวัตต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตร (mW/cm^3) และมีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ความถี่การใช้งาน รวมถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์



ภาพที่ 2.11 แสดงการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ของเนื้อสารชนิด 3C8(ก) และ 3C6A(ข)

2.3.2.3 การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง

ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแกนของหม้อแปลง จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีและขนาดของแกน จากกฎของฟาราเดย์จะได้ว่า

$$\Delta B = \frac{V_t \cdot t}{N_p \cdot A_e} \times 10^8 \quad (2.17)$$

เมื่อ ΔB คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกน (Gauss)

V คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมขดไพรี (V)

N_p คือ ค่าจำนวนรอบของขดไพรมารี (turn)

A_e คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกน (cm^2)

t คือ ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น (s)

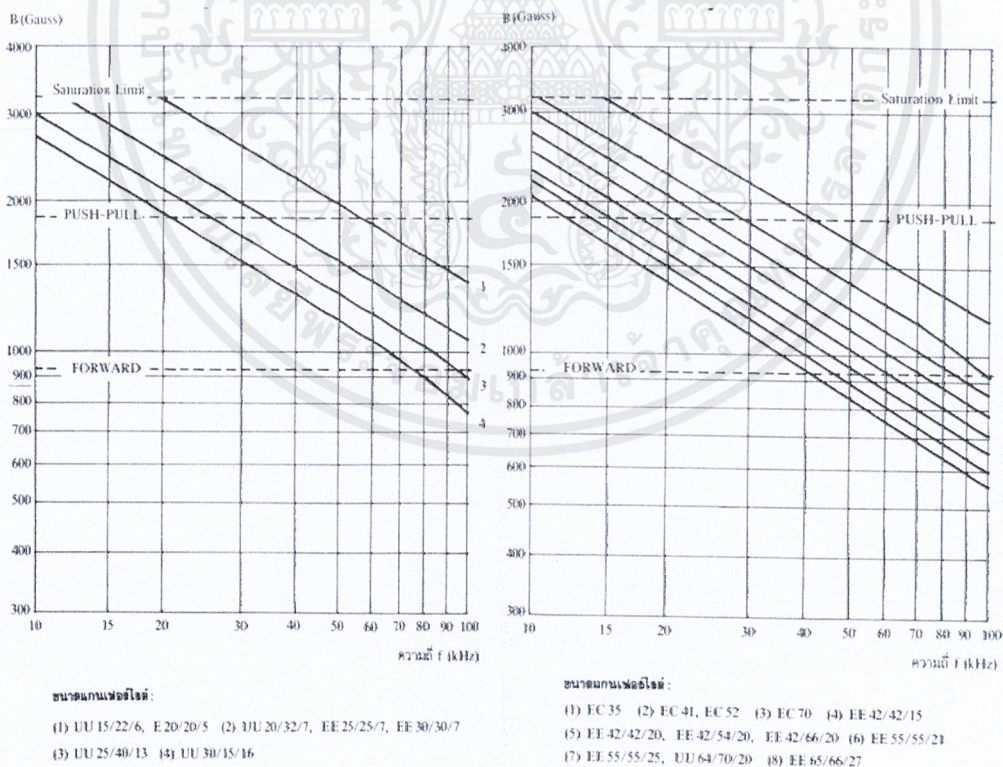
จะเห็นได้ว่ายิ่งจำนวนรอบของขดลวดไพรมารีมีค่าน้อยลง ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะยิ่งมีค่ามาก ซึ่งการลดจำนวนรอบของขดไพรมารีลงจะทำให้สามารถใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นได้ และสามารถทนกระแสได้สูง ทำให้หม้อแปลงให้กำลังได้สูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม หากค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว จะทำให้แรงดันตกคร่อมขดไฟรมามีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แรงดันอินพุตจะไปตกคร่อมที่เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ขณะที่กำลังนำกระแสสูงๆ แทน ทำให้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์พังเสียหายได้ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในแกนสูงอีกด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงขณะทำงาน จึงมีข้อที่ควรคำนึงถึง 2 ประการ คือ

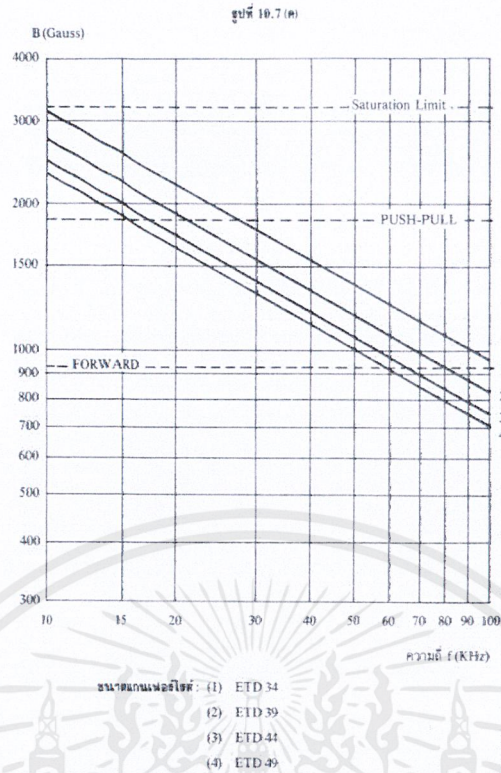
1. แกนเฟอร์ไรต์ต้องไม่เกิดอิ่มตัวขณะทำงาน
2. ที่ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกนขณะทำงานจะต้องเกิดการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่ำที่สุด

ในภาพที่ 2.12 (ก),(ข) เป็นกราฟแสดงค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เหมาะสมของแกนเฟอร์ไรต์ซึ่งแนะนำไว้โดย L.M. Bracke¹ ใช้สำหรับพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์และฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดและมีค่าการสูญเสียน้อยที่สุดด้วย การใช้กราฟนี้เพื่อกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในขั้นตอนสำหรับการออกแบบหม้อแปลงสวิตชิง ซึ่งจะให้เกิดความสะดักและรวดเร็วขึ้นมาก

หมายเหตุ การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ΔB ให้กำหนดเป็น 2 เท่าของค่าที่อ่านได้จากกราฟ ($2 \times \Delta B$) และค่า ΔB ไม่ควรกำหนดเกินเส้นประในกราฟ ซึ่งแสดงขีดจำกัดของ ΔB สำหรับคอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ 2.12 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับความถี่



ภาพที่ 2.12 (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับความถี่

2.3.2.4 การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

การใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับหม้อแปลงสวิตชิง จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น ส่วนการใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเล็กเกินไป ขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์จะร้อน กำลังงานสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่างๆ พิจารณาได้จากขนาดหน้าตัดของแกน (A_c) และ ขนาดช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบิ้น (A_w) โดยอาจคำนวณได้จากสมการต่างๆ ดังต่อไปนี้

สำหรับแกนที่ใช้กับหม้อแปลงของฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

$$P = \frac{0.5 \Delta B_{\max} \cdot f \cdot A_c \cdot A_w}{D} \times 10^{-3} \quad (2.18)$$

สำหรับแกนที่ใช้กับหม้อแปลงของพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์

$$P = \frac{\Delta B_{\max} \cdot f \cdot A_c \cdot A_w}{D} \times 10^{-3} \quad (2.19)$$

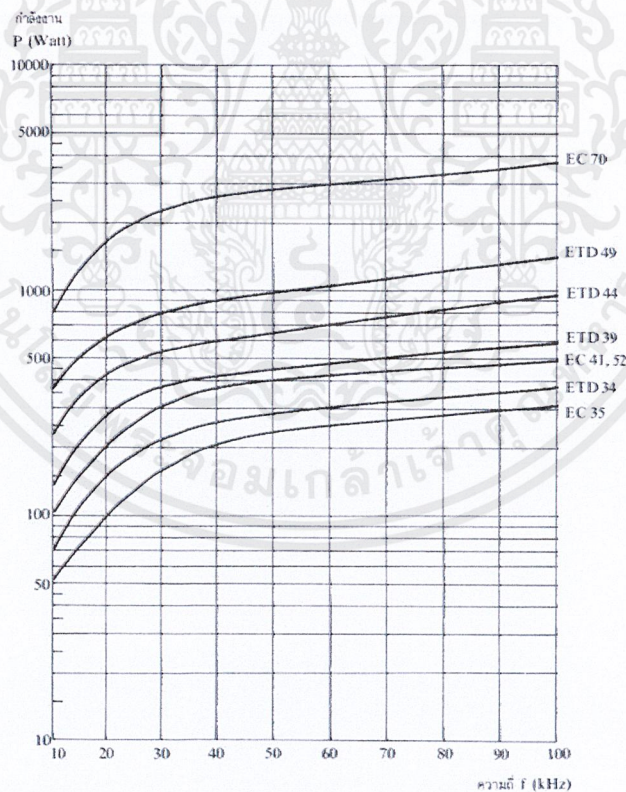
สำหรับแกนที่ใช้กับหม้อแปลงของฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

$$P = \frac{1.4 \Delta B_{\max} \cdot f \cdot A_c \cdot A_w}{D} \times 10^{-3} \quad (2.20)$$

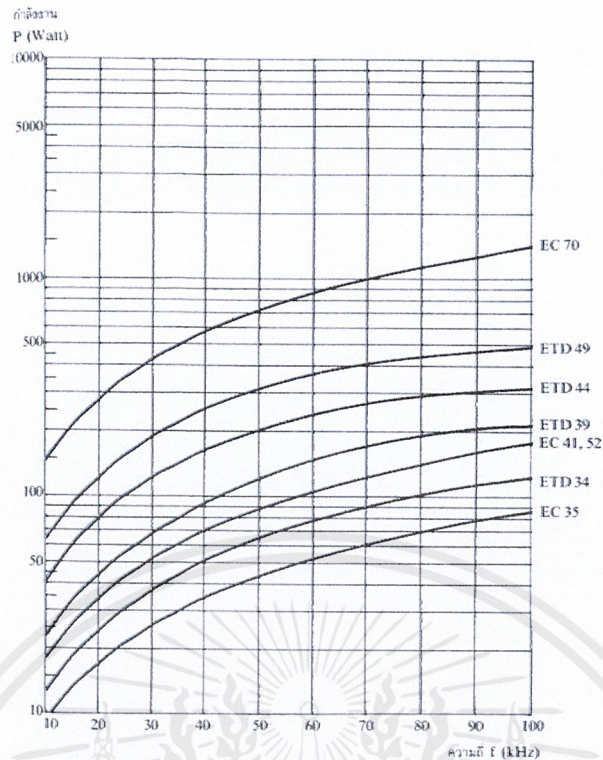
- โดยที่ $\Delta B_{\max}$ = ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์ (Gauss)
 f = ค่าความถี่การทำงานของแกนเฟอร์ไรต์ (Hz)
 A_e = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์ (cm^2)
 A_w = พื้นที่ช่องสำหรับพันขดลวดของบอบปิ่น (cm^2)
 D = ค่าความหนาแน่นกระแสในขดไฟรมารี (Cmil/A)
 P = กำลังงานสูงสุดที่ได้จากแกนเฟอร์ไรต์ (Watt)

ค่าของ $\Delta B_{\max}$ ที่เหมาะสมหาได้จากภาพที่ 2.13 ส่วนค่าของ A_e และ A_w เป็นขนาดมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้ โดยดูได้จากข้อมูลจากผู้ผลิตที่ให้มา กับแกนเฟอร์ไรต์ ค่าของ D กำหนดได้จากขนาดของลวดทองแดงที่ใช้พัน ซึ่งจะได้กล่าวละเอียดในหัวข้อถัดไป

ภาพที่ 2.13 แสดงค่ากำลังที่เหมาะสมสำหรับแกนขนาดต่างๆ ในการใช้งานที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (2.18), (2.19) และ (2.20) โดยกำหนดค่าความหนาแน่นกระแส D ไว้ที่ 500 เซอร์คิวลาร์มิลต่อหนึ่งแอมป์



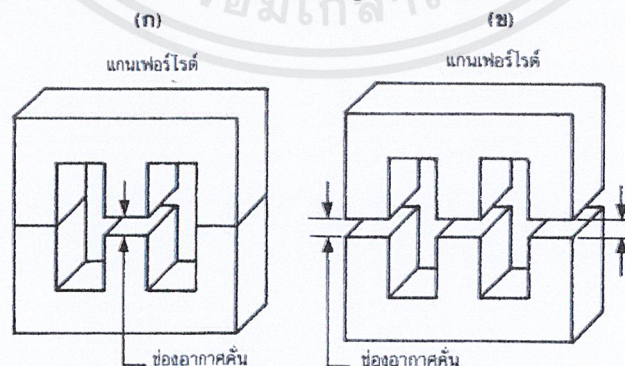
ภาพที่ 2.13(ก) แสดงค่ากำลังที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่างๆ เมื่อใช้กับฮัลฟบริดจ์และฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



ภาพที่ 2.13(ข) แสดงค่ากำลังงานที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่างๆ เมื่อใช้กับฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์

2.3.2.5 ช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็กในแกนเฟอร์ไรต์ (Air Gap)

การกำหนดช่องอากาศคั่นทางเดินแม่เหล็ก (Air Gap) ในแกนเฟอร์ไรต์ เป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่ใช้ป้องกันการอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ และช่วยให้การสะสมพลังงานของขดลวดในหม้อแปลงสวิตชิ่งมีค่ามากขึ้นได้ด้วย อย่างไรก็ตาม ช่องอากาศคั่นในแกนเฟอร์ไรต์จะทำให้เกิดการแพร่กระจายสัญญาณ ระบาย EMI ออกมา และอาจรบกวนอุปกรณ์ภายนอกได้เช่นกัน สำหรับแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE, EI, ETD หรือแบบ POT สามารถกำหนดลักษณะของช่องอากาศคั่นในแกนได้ 2 ลักษณะ ดังภาพที่ 2.14(ก) และ 2.14(ข) คือการกำหนดช่องอากาศคั่นที่แกนกลางอย่างเดียว และการคั่นแกนด้วยช่องอากาศระหว่างคู่ประกอบ



ภาพที่ 2.14 แสดงการกำหนดช่องอากาศคั่น l_g ที่แกนกลาง(ก) และการคั่นช่องอากาศ l_g ระหว่างคู่ประกอบของแกนเฟอร์ไรต์(ข)

การค้นแกนด้วยช่องอากาศระหว่างคู่ประภสามารถทำได้ง่ายกว่าการค้นช่องอากาศที่แกนกลาง ซึ่งทำได้โดยการใช้แผ่นฉนวนที่มีความหนาเป็นครึ่งหนึ่งของระยะช่องอากาศคันที่ต้องการ นำมาคันระหว่างแกนนอกของคู่ประภ ส่วนการกำหนดช่องอากาศคันที่แกนกลางต้องสั่งโดยตรงจากผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรต์หรือขัดแกนกลางออกเองเพื่อให้ได้ระยะช่องอากาศคันตามต้องการ

มีข้อสังเกตคือ การค้นช่องอากาศระหว่างคู่ประภ ความหนาแน่นของแผ่นฉนวนคันที่ใช้จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของระยะช่องอากาศคันที่ต้องการเท่านั้น เนื่องจากช่องอากาศที่เกิดขึ้นจะคันทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กถึงสองครั้งในแกน ดังนั้น ระยะช่องอากาศคันที่ได้จึงเป็นผลรวมของระยะช่องอากาศที่เกิดขึ้นทั้งหมด

การกำหนดให้มีช่องอากาศคันแกนเฟอร์ไรต์นั้น มีความจำเป็นมากสำหรับหม้อแปลงของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์และเอาต์พุตโซคที่ใช้แกนเฟอร์ไรต์ ดังจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3.2.6 แกนเฟอร์ไรต์สำหรับหม้อแปลงฟลายแบคและเอาต์พุตโซค

หม้อแปลงสวิตชิงสำหรับฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์และตัวเอาต์พุตโซค จะทำงานในลักษณะที่ต้องเก็บสะสมพลังงานไว้ก่อน แล้วจึงถ่ายเทพลังงานออกไป จึงอาจกล่าวได้ว่า กำลังที่ได้จากหม้อแปลงจะมาจากค่าพลังงานที่หม้อแปลงสามารถสะสมไว้ได้นั่นเอง ในช่วงที่มีการสะสมพลังงานของหม้อแปลงหรือเอาต์พุตโซค พลังงานที่ถูกสะสมไว้จะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2} LI^2$ ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมกับขนาดของแกนเฟอร์ไรต์สามารถหาได้จาก

$$LI_{p(pk)}^2 = \frac{\Delta B_{(max)}^2 \cdot l_g \cdot A_e}{0.4\pi} \times 10^{-8} \quad (2.21)$$

โดยที่ l_g คือ ระยะห่างช่องอากาศคันแกนเฟอร์ไรต์ (cm)
 A_e คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดแกนเฟอร์ไรต์ (cm²)
 $\Delta B_{(max)}$ คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดในแกน (Gauss)
 L คือ ค่าความเหนี่ยวนำขดไพรมารีของหม้อแปลงหรือค่าความเหนี่ยวนำของเอาต์พุตโซค (H)
 $I_{p(pk)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ผ่าน L (A)

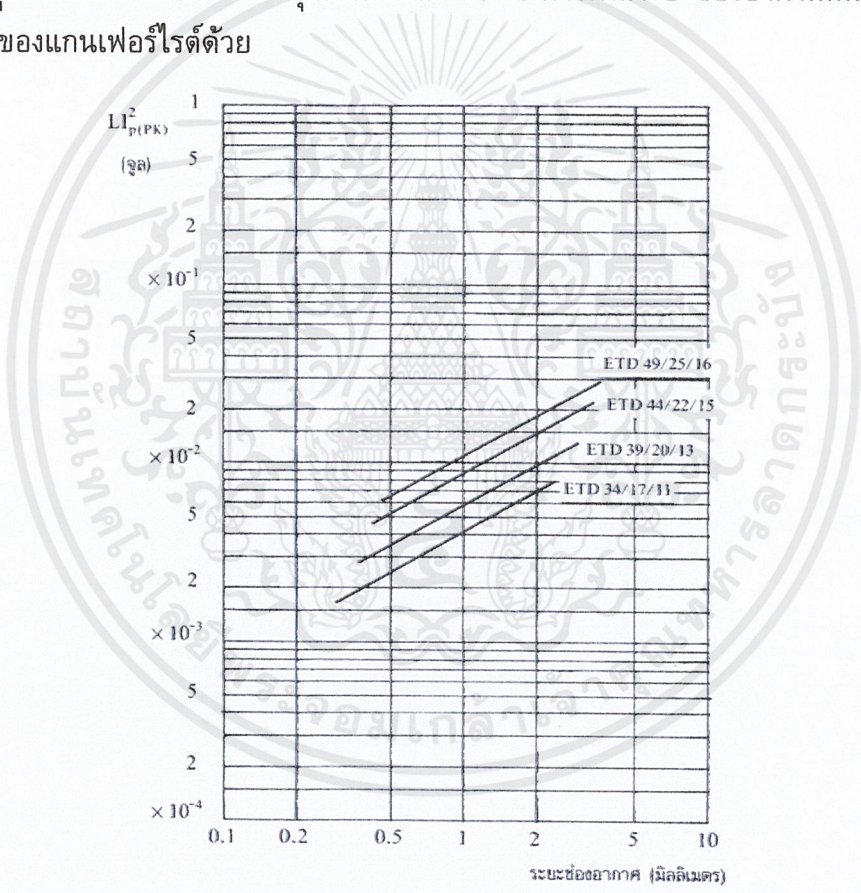
ค่าของ $\Delta B_{(max)}$ โดยทั่วไปจะกำหนดไว้เป็นครึ่งหนึ่งของค่าอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์ ($B_{(sat)}/2$) จากสมการ 2.21 จะเห็นได้ว่า เราสามารถเพิ่มค่าพลังงานสะสม (หรือเพิ่มกำลังของหม้อแปลง) ได้โดยการเพิ่มระยะช่องอากาศคัน l_g หรือโดยการเพิ่มขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ให้ใหญ่ขึ้น (A_e เพิ่มขึ้น) ในทางปฏิบัติการเพิ่มระยะช่องอากาศคันจะเป็นที่นิยมใช้มากกว่า เพราะต้องการให้หม้อแปลงสวิตชิงและเอาต์พุตโซคมีขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตาม แกนเฟอร์ไรต์ที่ขนาดหนึ่งๆ ระยะของช่องอากาศคั่นสูงสุดจะถูกจำกัดด้วยค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดเพราะจำนวนรอบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจำนวนรอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะช่องอากาศที่เพิ่มขึ้นดังสมการ

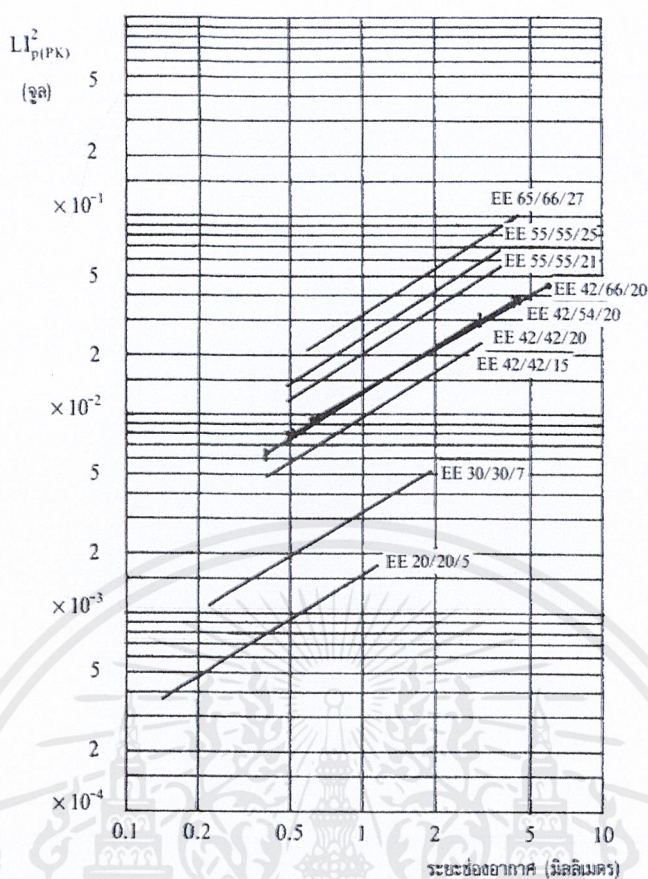
$$N = \frac{\Delta B_{(max)} \cdot I_g}{0.4\pi I_{p(pk)}} \tag{2.22}$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดไฟรมารี่ของหม้อแปลงหรือเอาต์พุตโซ็ค

เนื่องจากระยะพันบนบอบบิ้นมีค่าจำกัดและอาจมีเนื้อที่ไม่พอสำหรับจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการสูญเสียที่เกิดในลวดทองแดงจะมีมากขึ้น ซึ่งจะทำให้หม้อแปลงหรือเอาต์พุตโซ็คร้อน ผู้ออกแบบจึงต้องพิจารณาจุดที่เหมาะสมระหว่างการเพิ่มระยะช่องอากาศคั่นหรือการเพิ่มขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ด้วย



ภาพที่ 2.15 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $L_{p(pk)}^2$ กับระยะห่างช่องอากาศคั่นสำหรับแกนแบบ ETD



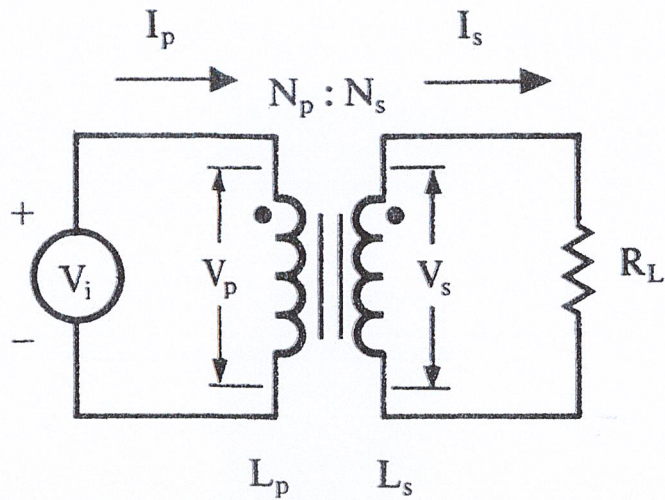
ภาพที่ 2.15 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $LI_{p(PK)}^2$ กับระยะห่างช่องอากาศคั่นสำหรับแกนแบบ EE

ภาพที่ 2.15(ก) และ (ข) แสดงค่าสูงสุดของ $LI_{p(PK)}^2$ กับระยะห่างช่องอากาศคั่นที่เหมาะสมที่ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์ต่างๆ สำหรับแกนแบบ ETD และ EE ตามลำดับ และมีข้อสังเกตคือ ที่ค่า $LI_{p(PK)}^2$ ค่าหนึ่งๆ อาจมีแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมได้หลายขนาด โดยมีระยะห่างช่องอากาศคั่นที่แตกต่างกัน กรณีนี้การพิจารณาเลือกขนาดของแกนเฟอร์ไรต์จะขึ้นอยู่กับ การสูญเสียในขดลวด การเผื่อค่าความปลอดภัยทางไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายเป็นหลัก

2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขดไพรมารีและขดเซคันดารีของหม้อแปลงสวิตชิง

หม้อแปลงสวิตชิงซึ่งมีความสัมพันธ์ของขดไพรมารีและขดเซคันดารีเป็นไปตามทฤษฎีหม้อแปลงทั่วไปผลของจำนวนรอบและค่าของแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรจากภาพที่ 2.16 จะเป็นดังนี้

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.23)$$



ภาพที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์พื้นฐานของหม้อแปลง

และ

$$\frac{N_p}{N_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \quad (2.24)$$

- เมื่อ
- N_p คือ จำนวนรอบของขดไพรมารี
 - N_s คือ จำนวนรอบของขดเซคันดารี
 - V_p คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดไพรมารี
 - V_s คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดเซคันดารี
 - L_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดไพรมารี
 - L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดเซคันดารี
 - I_p คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านขดไพรมารี
 - I_s คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านขดเซคันดารี

มีข้อสังเกตคือ แรงดันไฟฟ้า V_p เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดไพรมารีซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนของหม้อแปลงเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านขดไพรมารี ไม่ใช่ค่าแรงดันอินพุต V_i โดย V_p จะมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$V_p = N_p \cdot A_e \left(\frac{dB}{dt} \right) \times 10^{-8} \quad 10.9 \quad (2.25)$$

และค่า V_p ที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า V_i แต่ถ้าวแกนเฟอร์ไรต์เกิดการอิ่มตัว อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก $\left(\frac{dB}{dt} \right)$ จะมีค่าน้อยหรือมากหรือมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันตก

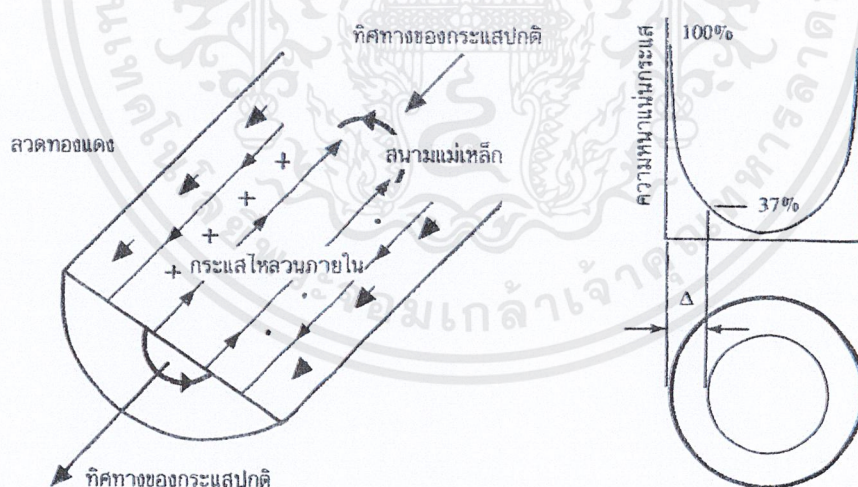
คร่อม V_p จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนการลัดวงจร และจะมีผลต่อการทำงานของหม้อแปลง และวงจรที่เกี่ยวข้องด้วย

2.3.4 การพันขดลวดทองแดงและการกำหนดขนาดของขดลวด

ปกติการพันขดลวดในหม้อแปลงสวิตช์จะใช้ขดลวดทองแดงอาบน้ำยา (enameled copper wire) เป็นตัวพัน ในขณะที่หม้อแปลงทำงาน สำหรับหม้อแปลงสวิตช์ซึ่ง กระแสสลับที่ไหลผ่านขดลวดนั้น จะมีความถี่สูง ที่ความถี่สูงๆนี้ ขดลวดทองแดงจะนำกระแสได้เพียงที่ผิว ซึ่งมีผลทำให้พื้นที่หน้าตัดในการนำกระแสของขดลวดลดลง การสูญเสียในขดลวดจะมีมากขึ้น รวมทั้งการเรียงซ้อนกันของขดลวดก็มีผลทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในขดลวดได้เช่นเดียวกัน กำลังงานที่สูญเสียเหล่านี้ จะทำให้ขดลวดร้อน ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงทำงาน การกำหนดขนาดและวิธีการพันขดลวดทองแดง จึงต้องทำอย่างเหมาะสม เพื่อลดการสูญเสียในขดลวดทองแดง ให้มีค่าน้อยที่สุด

2.3.4.1 ผลจากการนำกระแสแค่เพียงที่ผิวของลวดทองแดง (Skin Effect)

ลวดทองแดง เมื่อมีกระแสสลับไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กไหลวน ที่ภายในและรอบๆตัวมัน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวน (eddy current) ขึ้นภายในตัวลวดทองแดงอีกทอดหนึ่ง การไหลของกระแสไหลวนนี้ จะทำให้กระแสปกติไหลได้เฉพาะที่ผิวของลวดทองแดง ดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 แสดงลักษณะของการเกิดกระแสไหลวน

ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดมาตรฐาน AWG และข้อมูลอื่นๆ ของลวดทองแดงอบน้ำยา

เบอร์ AWG (B. & S.)	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง (d)		ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเมื่อ รวมฉนวน (d _n)	พื้นที่หน้าตัด ปกติ	ค่าความต้าน ทานที่ 100°C	ระยะเชิงข ยิตต่ำสุด
	inch	mm	mm	mm ²	(R ₁₀₀) Ω/m	(t _{min}) mm
44	0,00198	0,0503	0,06604	0,00199	11,180	0,071
43	0,00222	0,0564	0,07366	0,00250	8,899	0,079
42	0,00249	0,0633	0,08128	0,00314	7,073	0,087
41	0,00280	0,0711	0,09144	0,00397	5,594	0,098
40	0,00314	0,0798	0,1041	0,00500	4,448	0,111
39	0,00353	0,0897	0,1143	0,00631	3,519	0,122
38	0,00397	0,1008	0,1295	0,00799	2,783	0,138
37	0,00445	0,1130	0,1448	0,01003	2,215	0,154
36	0,00500	0,1270	0,1626	0,0127	1,754	0,172
35	0,0056	0,1422	0,1778	0,0159	1,398	0,188
34	0,0063	0,1600	0,1981	0,0201	1,105	0,209
33	0,0071	0,1803	0,2235	0,0255	0,8700	0,236
32	0,0080	0,2032	0,2489	0,0324	0,6853	0,261
31	0,0089	0,2261	0,2743	0,0401	0,5537	0,287
30	0,0100	0,2540	0,3048	0,0507	0,4386	0,319
29	0,0113	0,2870	0,3404	0,0647	0,3435	0,356
28	0,0126	0,3200	0,3759	0,0804	0,2762	0,393
27	0,0142	0,3607	0,4191	0,1022	0,2175	0,438
26	0,0159	0,4039	0,4699	0,128	0,1735	0,491
25	0,0179	0,4547	0,5232	0,162	0,1369	0,547
24	0,0201	0,5105	0,5817	0,205	0,10860	0,608
23	0,0226	0,5740	0,6502	0,259	0,08586	0,679
22	0,0253	0,6426	0,7214	0,324	0,06852	0,754
21	0,0285	0,7239	0,8052	0,412	0,05399	0,841
20	0,0320	0,8128	0,8966	0,519	0,04283	0,937
19	0,0359	0,9119	1,003	0,653	0,03403	1,048
18	0,0403	1,024	1,118	0,823	0,02700	1,168
17	0,0453	1,151	1,247	1,040	0,02137	1,303
16	0,0508	1,290	1,389	1,308	0,01699	1,452
15	0,0571	1,450	1,557	1,652	0,01345	1,627
14	0,0641	1,628	1,737	2,082	0,010670	1,815
13	0,0720	1,829	1,943	2,627	0,008460	2,030
12	0,0808	2,052	2,172	3,308	0,006717	2,270
11	0,0907	2,304	2,431	4,168	0,005331	2,540
10	0,1019	2,588	2,720	5,261	0,004224	2,842

ปริมาณของกระแสปกติ จะยังคงมีค่าเท่าเดิม แต่ความหนาแน่นของกระแสในลวดทองแดง ที่ใกล้ผิว จะมีค่าสูง เพราะกระแสด้านใหญ่ไหลได้เฉพาะที่ผิวเท่านั้น การไหลของกระแสไหลวน จะเป็นการจำกัดพื้นที่นำกระแสของลวดทองแดงและมีผลเหมือนพื้นที่นำกระแสของลวดทองแดง ลดลงจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของมัน

จากผิวของลวดทองแดงลึกลงไปในเนื้อลวดทองแดงจนถึงจุดที่ค่าความหนาแน่นของกระแสมีค่าลดลงเหลือเพียง 37% ของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวนั้น เราจะเรียกกระแสนี้ว่า เป็น ความหนาผิวนำกระแสของลวดทองแดง (Skin depth) ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.17 ความหนาของผิวนำกระแสนี้ มีค่าขึ้นกับความถี่ และสำหรับลวดทองแดงที่ 100°C ความหนาของผิวนำกระแสจะมีค่า

$$\Delta = \sqrt{\frac{5.62}{f}} \quad (\text{mm}) \quad (2.26)$$

เมื่อ Δ คือ ความหนาผิวนำกระแส (mm)

f คือ ความถี่ของกระแส (kHz)

2.3.4.2 อัตราส่วนระหว่างความต้านทานที่กระแสสลับต่อความต้านทานที่กระแสตรงของลวดทองแดง (F_R)

เนื่องจากความต้านทานของลวดทองแดงนั้นขึ้นกับค่าพื้นที่หน้าตัดนำกระแสของมัน และที่กระแสสลับพื้นที่หน้าตัดนำกระแสของลวดทองแดงจะลดลง เพราะกระแสไหลได้เฉพาะที่ผิวนำกระแส ดังนั้น ความต้านทานที่กระแสสลับของลวดทองแดง จึงมีค่ามากกว่าเมื่อมันนำกระแสตรง อัตราส่วนระหว่างความต้านทานของลวดทองแดงที่กระแสสลับ ต่อความต้านทานของมันที่กระแสตรง หรือ F_R (Resistance Factor) อาจหาได้จาก

$$F_R = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \frac{(d/2\Delta)^2}{(d/2\Delta)^2 - (d/2\Delta - 1)^2} \quad (2.27)$$

เมื่อ R_{ac} คือ ค่าความต้านทานของลวดทองแดงที่กระแสสลับ (Ω)

R_{dc} คือ ค่าความต้านทานของลวดทองแดงที่กระแสตรง (Ω)

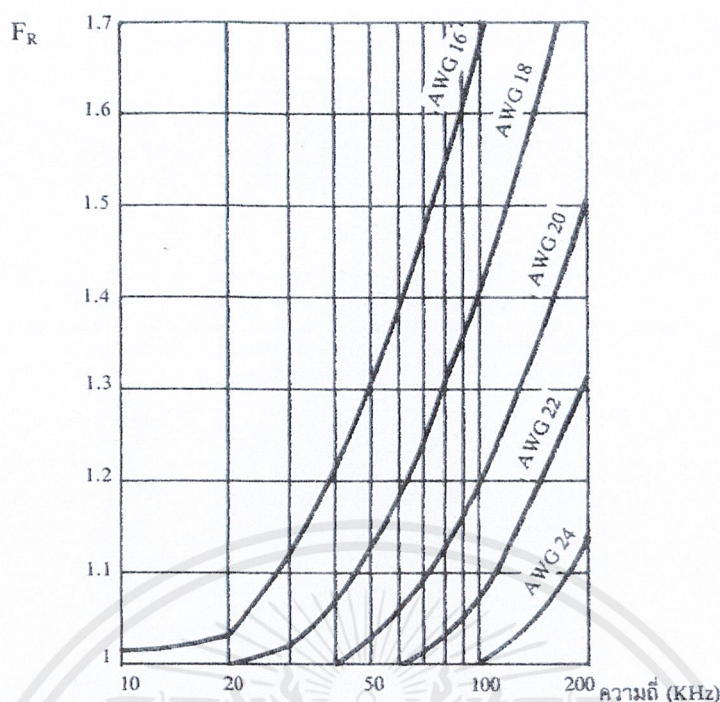
d คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดง (mm)

Δ คือ ความหนาผิวนำกระแส (mm)

ในทางปฏิบัติ ค่า F_R อาจหาได้จากการประมาณค่า โดย สมการ

$$F_R \cong \frac{1}{4} \left(\frac{d}{\Delta} + 1 \right) \quad \text{ถ้า} \quad \frac{d}{\Delta} \geq 5 \quad (2.28)$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า F_R ของลวดทองแดง เบอร์ AWG22 กับลวดทองแดง เบอร์ AWG18 ที่ความถี่ 100kHz ตามภาพที่ 2.18 จะได้ว่า ที่ 100kHz ค่าความต้านทานที่กระแสสลับ ของลวดทองแดงเบอร์ AWG18 เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานที่กระแสตรงของมัน จะมีค่ามากกว่าลวดทองแดงเบอร์ AWG22 ขณะเดียวกัน ที่ความถี่เท่ากับ 20kHz จะไม่มีผลต่อความต้านทานของลวดทองแดง



ภาพที่ 2.18 แสดงอัตราส่วนความต้านทานที่กระแสลบ ต่อความต้านทานที่กระแสดตรงของ ลวดทองแดงต่อความถี่ ที่ลวดทองแดงขนาดต่างๆ

ความหมายของค่าอัตราส่วน F_R ไม่ได้แสดงว่า ค่าความต้านทานของลวดทองแดงที่ กระแสสลบ จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขนาดของลวดทองแดงมากขึ้น โดยความเป็นจริงแล้ว ค่าความ ต้านทานของลวดทองแดงที่กระแสลบ จะมีค่าลดลง เมื่อขนาดของลวดทองแดงใหญ่ขึ้น แต่ เนื่องจากค่าความต้านทานที่กระแสดตรง มีค่าลดลงมากกว่า เมื่อขนาดของลวดทองแดงใหญ่ขึ้น ดังนั้น ค่าอัตราส่วน F_R จึงมีค่ามากขึ้น การใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ จึงไม่เกิดประโยชน์ใดๆที่ ความถี่สูงๆ เพราะเกิดการสูญเสียมากกว่า เนื่องจากค่าความต้านทานที่กระแสลบของมัน ขณะที่กระแสลบ

ค่าอัตราส่วน F_R จึงมีประโยชน์มากในการเลือกขนาดของลวดทองแดง การกำหนด ขนาดของลวดทองแดง และวิธีการพันขดลวดที่ให้ค่า F_R น้อยที่สุด จะทำให้เกิดความสูญเสียที่ เกิดขึ้นในลวดทองแดงมีค่าน้อยที่สุดด้วยเช่นกัน

2.3.4.3 ผลจากการเรียงซ้อนกันของขดลวด (Proximity Effect)

ปกติค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์ จะมีค่าสูงมาก แกนจะจับฟลักซ์ แม่เหล็กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดในหม้อแปลง ให้วิ่งอยู่ในแกนเฟอร์ไรต์เท่านั้น แต่ โดยความเป็นจริงแล้ว ยังมีฟลักซ์บางส่วน วิ่งออกจากแกนตัดผ่านขดลวดได้ ฟลักซ์เหล่านี้ เรียกว่า ฟลักซ์รั่ว (Leakage Flux) ฟลักซ์รั่วไม่ได้เกิดจากคุณภาพที่ไม่ดีของวัสดุที่ใช้ทำแกน เฟอร์ไรต์ แต่เป็นผลที่เกิดจากการพันขดลวดโดยตรง ดังจะได้กล่าวต่อไป

ภาพที่ 2.19 แสดงภาพตัดขวางชั้นของลวดทองแดงในหม้อแปลง และเส้นวงฟลักซ์ แม่เหล็กบางส่วน ที่เกิดขึ้นขณะกระแสไหลผ่านขดลวด การหักล้างกันของฟลักซ์แม่เหล็ก

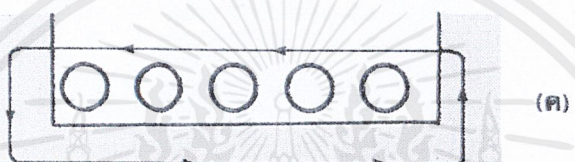
ระหว่างลวด จะทำให้เกิดเส้นฟลักซ์ขนานไปกับชั้นของขดลวด ดังภาพที่ 2.21(ข) เมื่อเส้นฟลักซ์ตัดแกนเฟอร์ไรต์ แกนจะบังคับให้ฟลักซ์วิ่งอยู่ในแกน เนื่องจากค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนมีค่าสูงมาก ดังภาพที่ 2.21(ค) และเส้นแรงฟลักซ์ที่เกิดจากชั้นของขดลวดทองแดงหลายๆชั้น ก็จะเป็นดังภาพที่ 2.20 ซึ่งเป็นฟลักซ์รั่วนั่นเอง



(ก)



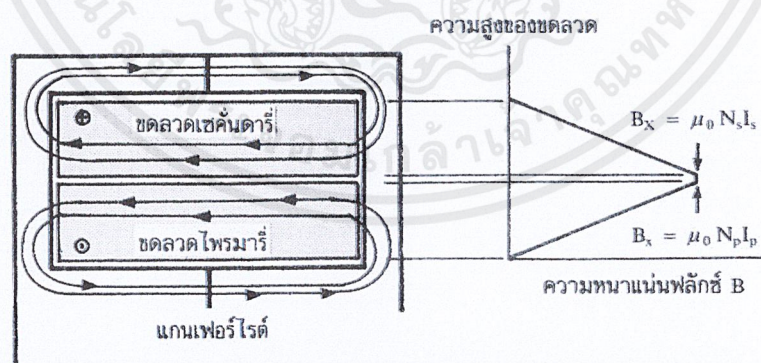
(ข)



(ค)

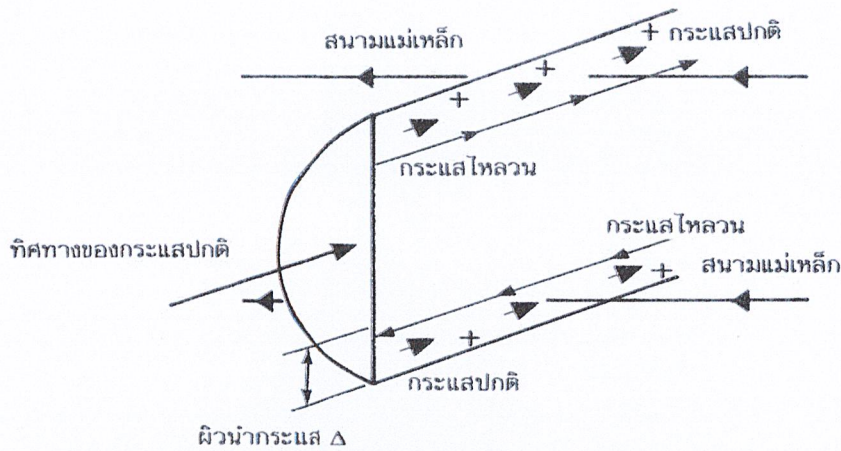
ภาพที่ 2.19 แสดงลักษณะของการเกิดฟลักซ์รั่ว ภายในหม้อแปลงสวิตชิง

ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์รั่ว B_x จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นของลวดทองแดงเพิ่มขึ้น จากภาพที่ 2.20 จะเห็นได้ว่า B_x มีค่าสูงสุด ที่ระยะชั้นสูงสุดของลวดทองแดงจากแกนและมีค่าลดลงตามลำดับ ฟลักซ์รั่ววางตัวขนานกับชั้นของลวดทองแดง โดยตัดผ่านและตั้งฉากกับเส้นลวดทองแดงในชั้น ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นในลวดทองแดง



ภาพที่ 2.20 แสดงลักษณะของฟลักซ์รั่ว และค่าความหนาแน่นของฟลักซ์รั่ว B_x ที่ตำแหน่งต่างๆ

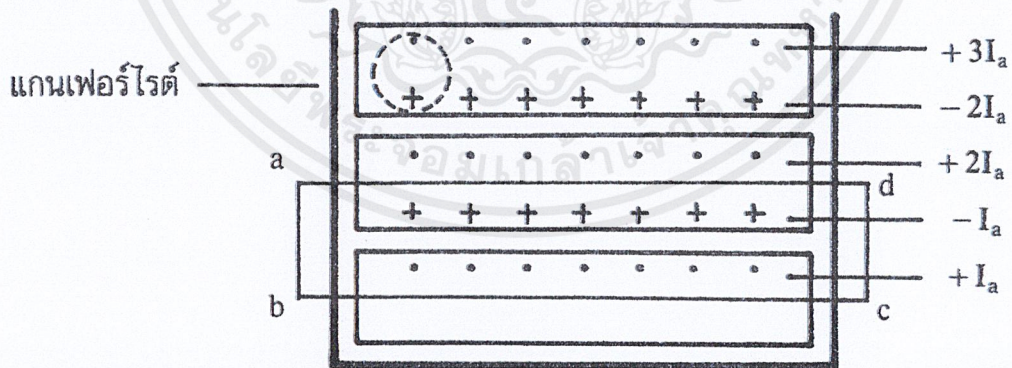
ในหม้อแปลงสวิตชิง โดย B_x จะมีค่ามากที่สุด ที่ระยะชั้นสูงสุดของขดลวดทองแดง เนื่องจากมีฟลักซ์รั่วเกิดขึ้น ขดลวดทองแดงในหม้อแปลงจึงอยู่ในลักษณะเช่นเดียวกับการนำขดลวดไปวางในสนามแม่เหล็ก และจะเกิดกระแสไหลวนไหลที่บริเวณผิวหน้ากระแสของขดลวด ที่สัมผัสกับสนามแม่เหล็ก ดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 แสดงผลของลวดทองแดงที่วางอยู่ในฟลักซ์รั่ว ทำให้มีกระแสไหลวนเกิดขึ้นที่ผิวด้านบนและด้านล่างของลวดทองแดง และทำให้ความหนาแน่นกระแสที่ผิวด้านบนมีค่ามากกว่าผิวด้านล่าง

ยิ่งการซ้อนกันของขดลวดมีจำนวนชั้นมากขึ้น จะยิ่งมีผลทำให้ความหนาแน่นของกระแสไหลวนมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งจะพิจารณาได้ดังต่อไปนี้ จากภาพที่ 2.22 เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจเราจึงกำหนดให้ขดลวดทองแดงที่เรียงกันอยู่ในแต่ละชั้นเปรียบเหมือนแผ่นทองแดงพันอยู่รอบแกนของหม้อแปลงแทนขดลวด แผ่นทองแดงนี้จึงวางอยู่ในฟลักซ์รั่ว

พิจารณาแผ่นทองแดงที่ชั้นแรก ที่ติดกับแกน ฟลักซ์รั่วจะตัดผ่านผิวด้านบนและทำให้เกิดกระแสไหลวนไหลที่ผิวนำกระแสของแผ่นทองแดง สำหรับผิวด้านล่างที่ติดกับแกนจะไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กตัดผ่านผิวเนื่องจากอยู่ติดกับแกนดังนั้น กระแสไหลวนจะไหลเฉพาะที่ผิวด้านบนเท่านั้น

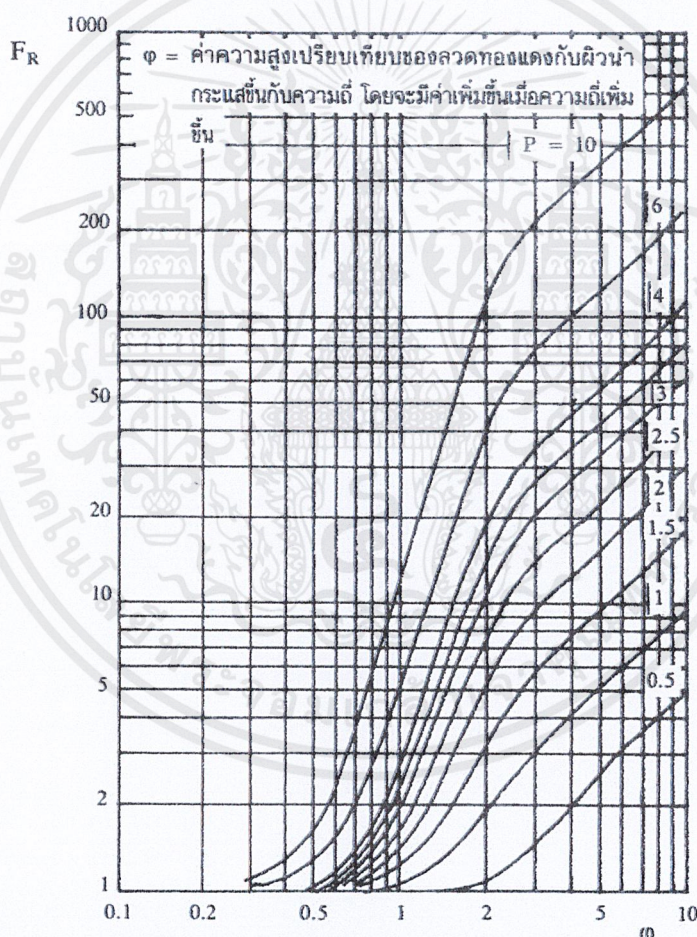


ภาพที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบลวดทองแดงที่พันเรียงกันให้เป็นลักษณะของแผ่นทองแดง เพื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนในแต่ละชั้น

ถ้าสมมติให้ค่ากระแสที่ผิวด้านบนของแผ่นทองแดงในชั้นแรกนี้มีค่าเท่ากับ $+I_a$ และเมื่อพิจารณาแผ่นทองแดงในชั้นที่ 2 ผลของฟลักซ์รั่วจะทำให้กระแสไหลวนเกิดขึ้นที่ผิวนำกระแสด้านบนและด้านล่าง สำหรับที่เนื้อกลางของแผ่นทองแดงจะไม่มีกระแสไหลวน เนื่องจาก

สนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น ผลรวมของสนามแม่เหล็กตามทาง ($\oint H dl$) รอบวง abcd จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ และผลรวมของกระแสภายในวงรอบ abcd จะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย ตามกฎของแอมแปร์ เนื่องจากค่ากระแสที่ผิวบนของแผ่นทองแดงชั้นแรกกับชั้นที่สองหักล้างกัน ดังนั้นค่ากระแสจึงจะมีค่าเท่ากับศูนย์แต่กระแสที่ไหลจริงในแต่ละชั้นมีค่าเท่ากัน ค่ากระแสที่ไหลที่ผิวบนในแผ่นทองแดงชั้นที่สองต้องมีค่าเท่ากับ $+2I$ ในทำนองเดียวกัน ค่ากระแสชั้นอื่นๆจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้น

จะเห็นได้ว่า การซ้อนกันของขดลวดทองแดงจะทำให้การสูญเสียในขดลวดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าความหนาแน่นที่มากขึ้นในแต่ละชั้น ภาพที่ 2.23 แสดงการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน F_R เนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนชั้นของขดลวดทองแดงในหม้อแปลง จะเห็นได้ว่าที่ความถี่สูงๆ การเพิ่มจำนวนชั้นให้มากขึ้น จะยิ่งเพิ่มค่าของ F_R ให้มากขึ้นตามไปด้วย และจะเกิดการสูญเสียในลวดทองแดงสูงขึ้น



ภาพที่ 2.23 แสดงค่า F_R ซึ่งขึ้นกับจำนวนชั้นใน 1 พอร์ชั้น

2.3.5 อุณหภูมิของหม้อแปลงสวิตชิง

การออกแบบหม้อแปลงสวิตชิง จะถือได้ว่าประสบความสำเร็จ ถ้าหากจ่ายกำลังให้ โหลดสูงสุดแล้วหม้อแปลงไม่ร้อน (อุณหภูมิของหม้อแปลงสวิตชิงขณะทำงานไม่ควรเกิน 80°C) หม้อแปลงจะร้อนเนื่องจาก มีกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงสูง ซึ่งจะเกิดจากกำลังงานสูญเสีย ภายใน ขดลวดทองแดงของหม้อแปลงและการสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ อุณหภูมิของหม้อแปลง ที่เพิ่มขึ้นขณะทำงานเนื่องจากการสูญเสียในหม้อแปลง อาจคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta T = \frac{23.5(P_w + P_c)}{\sqrt{A_c \cdot A_w}} \tag{2.29}$$

- เมื่อ ΔT คืออุณหภูมิหม้อแปลงที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้อง (°C)
- P_w คือ กำลังสูญเสียภายในขดลวดทองแดง(Watt)
- P_c คือ กำลังสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Watt)
- A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์(cm²)
- A_w คือ ขนาดช่องพันขดลวดของบอบบิ้น (cm²)

เพื่อให้ไม่ให้อุณหภูมิของหม้อแปลงมีค่าสูงเกินไป และเพื่อเป็นข้อพิจารณา ในการเลือก ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์กับการเลือกขนาดและวิธีการพันขดลวดทองแดงที่เหมาะสม การ กำหนดค่ากำลังงานสูญเสียสูงสุดในหม้อแปลงจึงควรทำเป็นอันดับแรกในการออกแบบหม้อ แปลงสวิตชิง

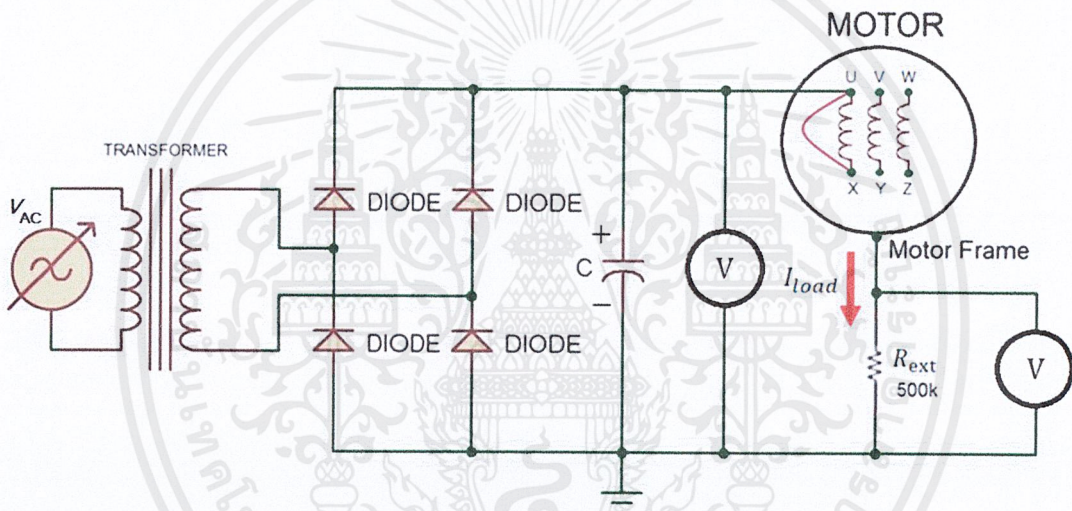
บทที่ 3

การออกแบบวงจรและการทดลอง

การทดสอบความต้านทานฉนวน (Insulation Resistance Test)

เพื่อศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ของฉนวนในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุของฉนวนซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการวัดเพื่อตรวจสอบความเป็ฉนวนในระยะยาว ในการทดสอบจะใช้วิธีวัดค่าความเป็ฉนวนระหว่างขดลวดกับโครงมอเตอร์เทียบกราวด์ (Motor Frame) โดยการทดสอบจะแบ่งเป็น 3 วิธีในการทดสอบ

3.1 การออกแบบวงจรแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Direct voltage test)



ภาพที่ 3.1 วงจรการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากวงจรจะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยเริ่มจากการสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก Variac ซึ่งเป็นตัวกำหนดพิคตแรงดันไฟฟ้า เนื่องจาก Variac ที่ใช้อยู่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้แค่ประมาณ V_{AC} (230V) จึงต้องต่อหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) เพื่อขยายแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น จากนั้นต่อผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มรูปคลื่น และต่อเข้ากับตัวเก็บประจุเพื่อกรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบขึ้น โดยจะมีโวลต์มิเตอร์วัดกระแสตรงไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อกำหนดพิคตแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าตามระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ จากภาพที่ 3.1 จะสังเกตเห็นว่าการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ขดลวดมอเตอร์จะมีการต่อกันระหว่างปลายขดทั้งสองด้าน เพื่อต้องการให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากันตลอดทั้งขด จากนั้นวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับตัวถังของมอเตอร์ (Motor Frame) โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทานภายนอก (R_{ext}) แล้วนำ

กลับไปคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานภายนอก (I_{load}) แล้วนำกระแสไฟฟ้าที่ได้นั้นสามารถนำไปหาค่าความต้านทานระหว่างขดลวดกับตัวถังของมอเตอร์ (R_{DC}) ได้ ซึ่งโดยปกติแล้วความต้านทานจริงภายในของมอเตอร์ (R_{DC}) จะต้องมีค่าสูงมาก

สูตรการคำนวณ

$$V_{ext} = I_{load} \times R_{ext}$$

(3.1)

$$V_{DC} = I_{load} \times (R_{DC} + R_{ext})$$

(3.2)

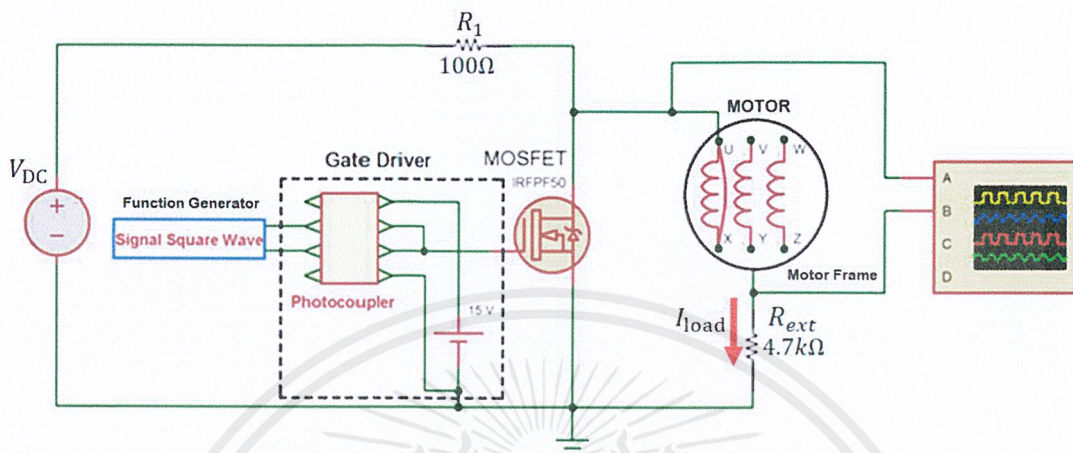
$$R_{DC} = \frac{V_{DC} - (I_{load} \times R_{ext})}{I_{load}}$$

(3.3)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างตารางหาค่าความต้านทานของฉนวนมอเตอร์

V_{DC} (V)	R_{ext} (k Ω)	V_R (mV)	I_R (nA)	R_{DC} (G Ω)
100				
200				
300				
400				
500				
Average				

3.2 การออกแบบแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง (Square wave high frequency test)



ภาพที่ 3.2 วงจรการทดสอบแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง

จากวงจรจะสร้างแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูงโดยเริ่มจากสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมความถี่สูงซึ่งในปริยฐานิพนธ์นี้จะใช้ (Function Generator) เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณจากนั้นต่อเข้ากับ Optocouple (TLP250) ซึ่งมีหน้าที่ Isolator ไฟแรงสูงกับไฟแรงต่ำโดยใช้แสงเป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงระบบและยังเป็นไอซีที่สามารถขับสวิตช์ของ Power Mosfet (IRFP50) ได้อีกด้วย เมื่อป้อนแรงดันกระแสตรงเข้าที่ขา เทรน(Drain) และขา ซอล(Source) ผ่าน Mosfet จนทำให้เกิดสวิตช์เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่สามารถปรับความถี่ได้จาก Function Generator จากภาพจะเห็นว่าลักษณะของวงจรจะคล้ายกับการทดสอบการหาค่าความต้านทานของฉนวน เพียงแต่เปลี่ยนเฉพาะแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในมอเตอร์ โดยการวัดการดิซชาร์จของประจุไฟฟ้าภายในผ่านตัวต้านทานภายนอก ซึ่งทำให้เกิดค่าคงที่ทางเวลาเกิดขึ้นและสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าภายในได้

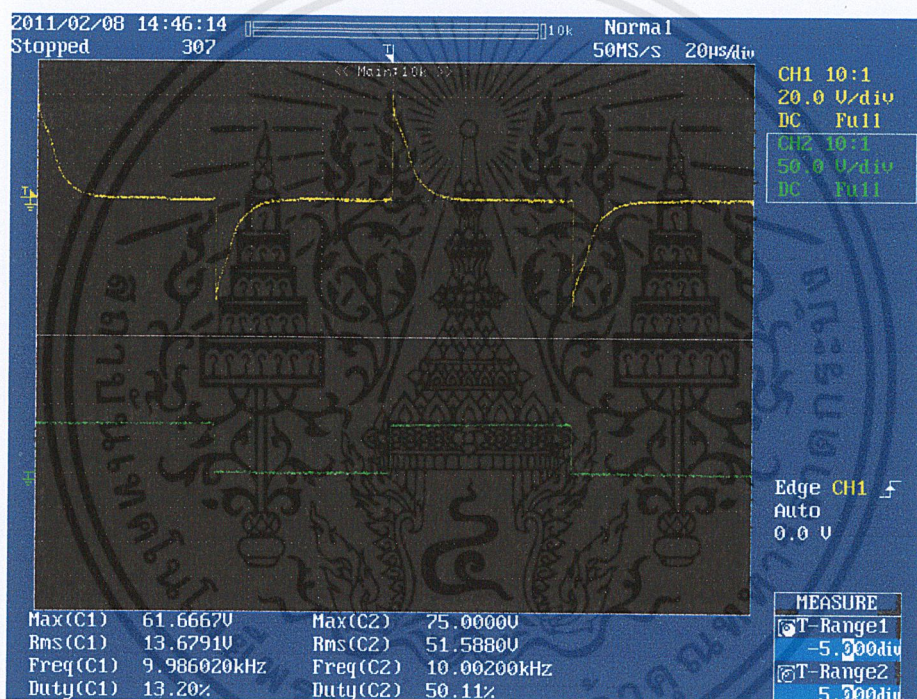
การทำการคายประจุของ C ผ่าน R เมื่อเวลาผ่านไปจะเท่ากับผลคูณ RC ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นหน่วยหน่วยเวลา (วินาที) แต่ในทางทฤษฎีแรงดันจากการดิซชาร์จ คือ $1-e^{-t/RC}$ ซึ่งไม่มีทางดิซชาร์จประจุได้หมด ถ้านำค่าเวลาที่ประจุคายหมดมาคำนวณ (infinite) ก็ไม่สามารถนำมาคำนวณได้ ดังนั้นจึงใช้ค่า $1/e$ ประมาณ 37% มาคำนวณ

สูตรการคำนวณ

$$V_{(ที่37\%)} = 0.37 \times V_o \quad (3.4)$$

$$\tau = RC \quad (3.5)$$

$$C = \frac{\tau}{R} \quad (3.6)$$



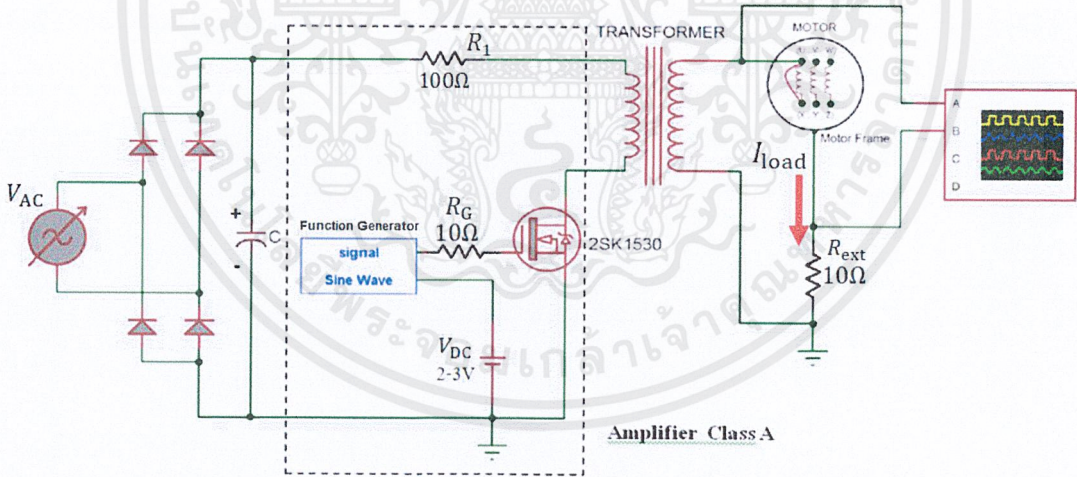
ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างรูปคลื่นที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง

การทดสอบนี้จะป้อนแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 10kHz ถึง 50kHz เพื่อดูลักษณะของการดิซชาร์จของประจุไฟฟ้าภายในผ่านตัวต้านทานภายนอกเทียบกับแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ป้อนเข้ามาที่ความถี่ต่างๆ เพื่อทดสอบและยืนยันผลของลักษณะวงจรสมมูลของมอเตอร์

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างตารางผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันสี่เหลี่ยมความถี่สูง

f (kHz)	V_o (V)	$0.37V_o$ (V)	τ (μ s)	R k Ω	C nF
10					
20					
30					
40					
50					
Average					

3.3 การออกแบบแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ความถี่สูง
(Sine wave high frequency test)



ภาพที่ 3.4 วงจรการทดสอบแรงดันไฟฟ้าไซน์ความถี่สูง

จากวงจรจะสร้างแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ความถี่สูงโดยเริ่มจากสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณ ไซน์ความถี่สูงซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้จะใช้ (Fucntion Generator) เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณจากนั้น

ต่อเข้ากับ Amplifier Class A โดยการยกระดับแรงดันของ Signal Sine Wave ด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงทำให้แรงดันไฟฟ้าเป็นลักษณะ Signal Sine Wave ซ้ำอยู่บนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้ว จึงป้อนเข้าขาเกน (Gain) ของ Mosfet (2SK1540) ซึ่งส่งผลให้ Mosfet ทำงานอยู่ในย่านที่เรียกว่า Active region ซึ่งมันจะทำงานในลักษณะเกือบจะเชิงเส้น ซึ่งจะต้องมีการคำนวณจาก **characteristic curves** ของ Mosfet หรือ IGBT เพื่อหาจุดทำงานที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถทำการขยายสัญญาณได้ดีและมีความเพี้ยนน้อยที่สุด แต่โดยปกติแล้ววงจรขยายสัญญาณในคลาส A มักจะมีกำลังเอาต์พุตไม่มากนัก ทั้งนี้เพราะมีการใช้อุปกรณ์เพียงตัวเดียวเพื่อทำการขยายสัญญาณ ทั้งซีกบวกและลบ แต่ที่สำคัญคือวงจรขยายในคลาส A จะมีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด

เนื่องจากวงจรขยายสัญญาณในคลาส A มีกำลังเอาต์พุตที่ไม่มากจึงต้องต่อหม้อแปลง ความถี่สูงโดยใช้แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite core) เพื่อช่วยในการขยายสัญญาณอีกทีหนึ่งและยังช่วยในการกรองฮาร์โมนิกส์บางส่วนได้จึงมีผลทำให้สัญญาณมีความเป็น Sine wave มากขึ้นด้วย

สูตรการคำนวณ

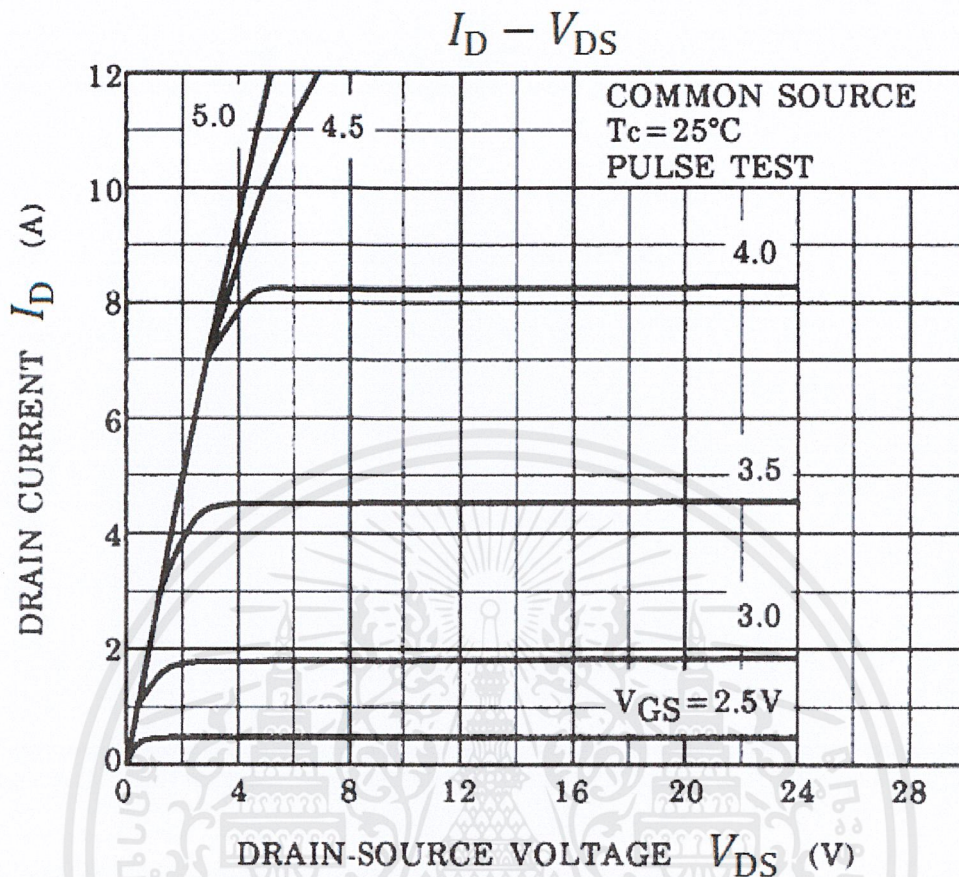
$$I_{load} = \frac{V_{ext}}{R_{ext}} \tag{3.7}$$

$$\theta = \frac{360 \times \Delta X}{1/f} \tag{3.8}$$

$$I_R = I_{load} \times \cos\theta \tag{3.9}$$

$$R_m = \frac{V_{rms}}{I_R} \tag{3.10}$$

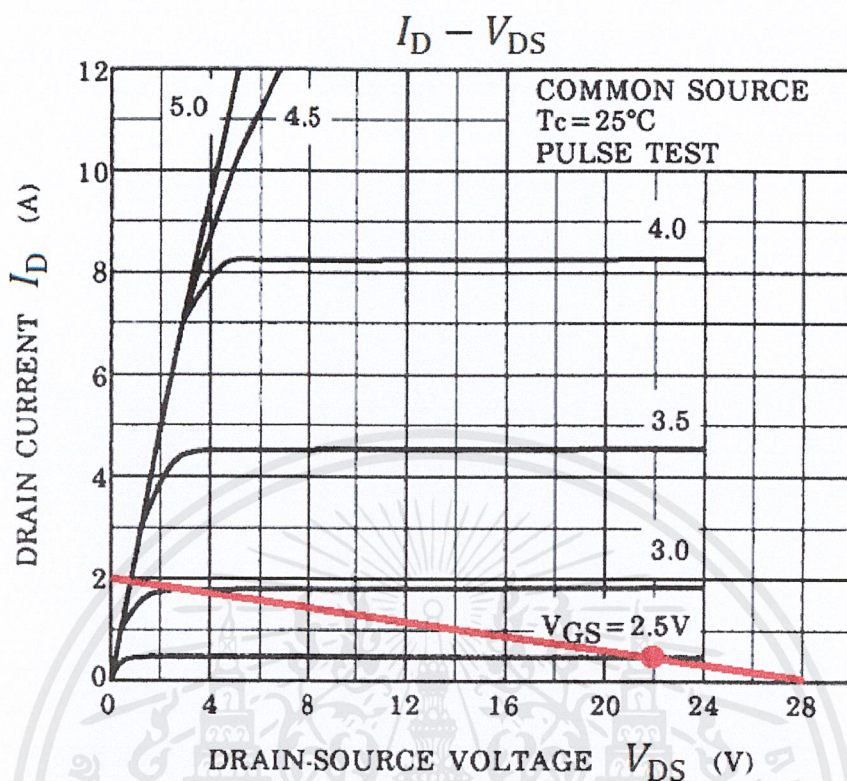
$$R_f = \frac{R_m \times R_{dc}}{R_{dc} - R_m} \tag{3.11}$$



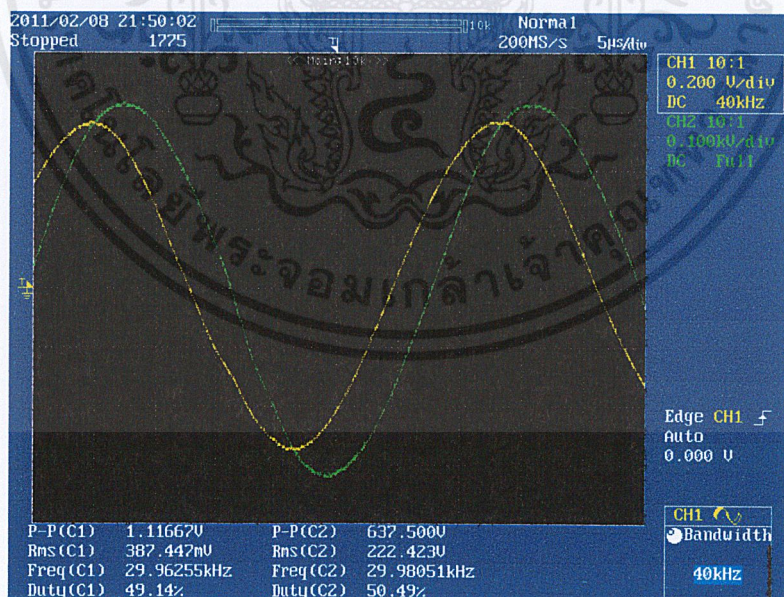
ภาพที่ 3.5 characteristic curves ของ Mosfet (2SK1540)

จากกราฟสามารถหาค่าหนดค่ากระแสเดรน (I_D) ได้โดยใช้ค่าความต้านทาน (R_1) ซึ่งทำหน้าที่ลิมิตกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า Mosfet จากนั้นยกแรงดันไฟฟ้าด้วยการป้อนแรงดันกระแสตรงเข้าไปที่ขาเกนของ Mosfet เพื่อควบคุมแรงดัน V_{GS} เพื่อหาจุดทำงานที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถทำการขยายสัญญาณได้ดีและมีความเพี้ยนน้อยสุด

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_1} \quad (3.12)$$



ภาพที่ 3.6 characteristic curves ของ Mosfet (2SK1540)



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างรูปคลื่นที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าด้วยรูปคลื่นไซน์ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบนี้จะป้อนแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ 10kHz ถึง 50kHz เพื่อดูลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานภายนอกเทียบกับแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่ป้อนเข้ามาที่ความถี่ต่างๆ เพื่อทดสอบและยืนยันผลของลักษณะวงจรสมมูลของมอเตอร์

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างตารางผลการหาค่าความต้านทานฉนวนด้วยแรงดันไซน์ความถี่สูง

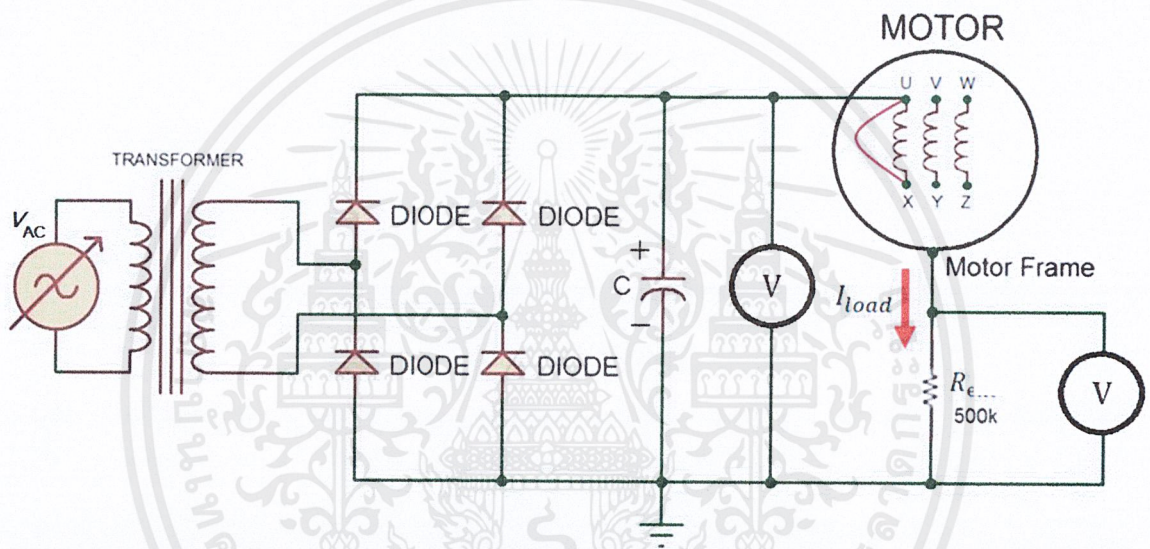
f (kHz)	I_{load} (mA)	I_R (A)	θ (°)	R_m (k Ω)	R_f (k Ω)
10					
20					
30					
40					
50					

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Direct voltage test)

วัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือ เพื่อเป็นการวัดหาค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขดลวดกับตัวถังมอเตอร์ ซึ่งการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพราะจะทำให้ทราบถึงค่าความต้านทานจริงภายในมอเตอร์ (R_{DC}) เมื่อไม่มีผลของความถี่ซึ่งโดยปกติความต้านทานจะต้องมีค่าสูงมาก โดยการทดลองนี้จะทดลองที่แรงดันต่างๆ แล้วดูแนวโน้มเพื่อหาค่าเฉลี่ยไว้เป็นค่าความต้านทานอ้างอิงในมอเตอร์ตัวนั้นๆ



ภาพที่ 4.1 ลักษณะการต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปวงจรการทดลองเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยทำการป้อนที่ค่าแรงดันต่างๆแล้วทำการหาค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานขนาด $500k\Omega$ โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยมัลติมิเตอร์แบบวัดระดับมิลลิโวลต์ได้ ดังภาพที่ 4.2

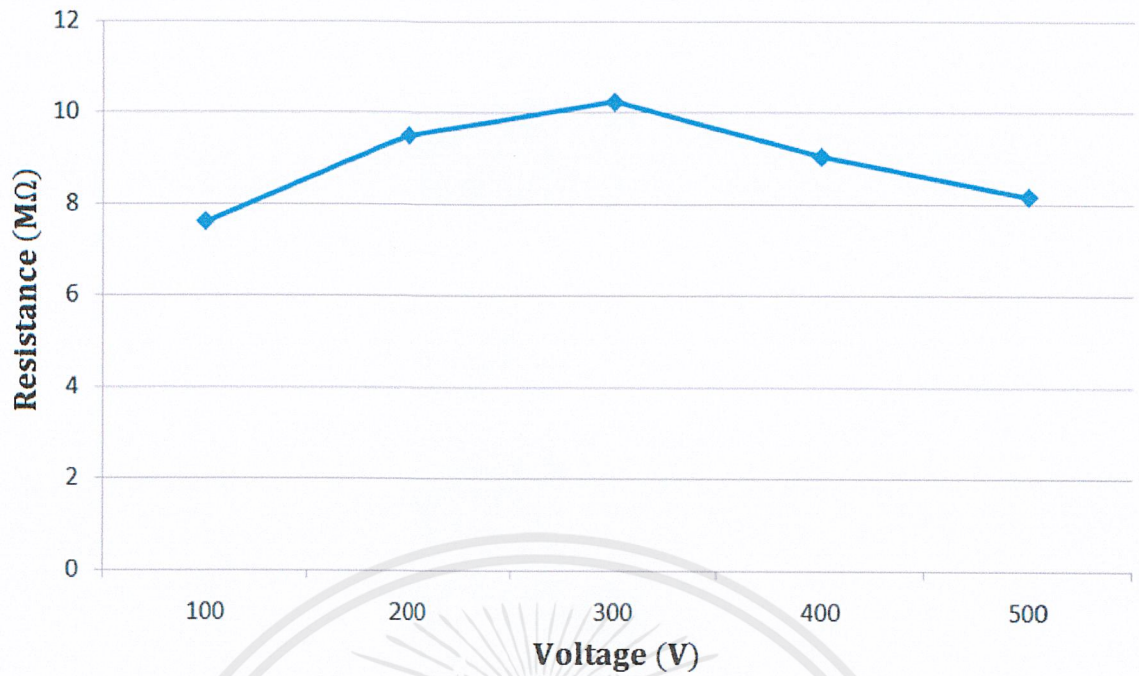


ภาพที่ 4.2 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ผลของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่แรงดันป้อนเข้าด้วยค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

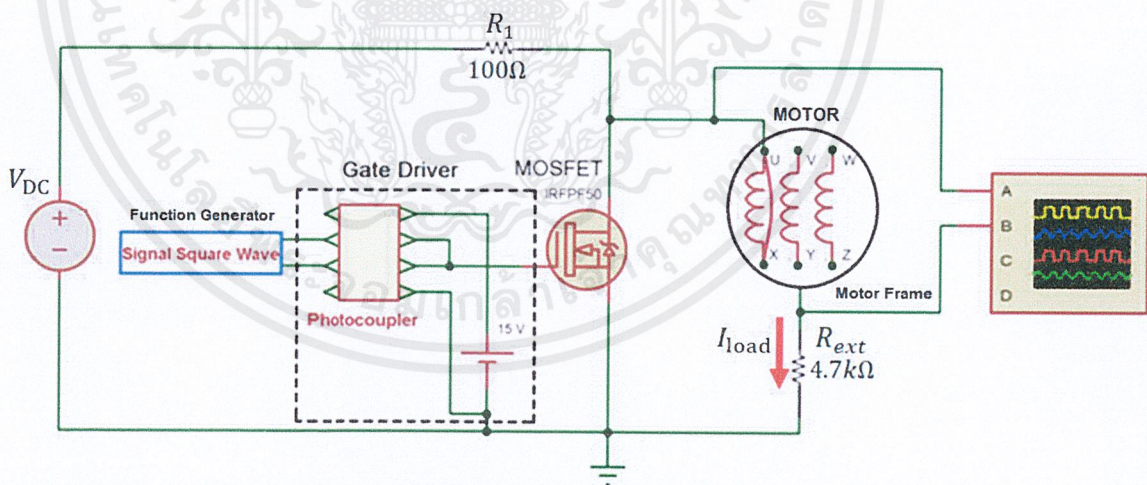
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานระหว่างขดลวดและตัวถังมอเตอร์

V (V)	R_{ext} (k Ω)	V_R (mV)	I_R (nA)	R_{dc} (G Ω)
100	500	6.573	13.146	7.606
200	500	10.524	21.048	9.502
300	500	14.641	29.282	10.245
400	500	22.133	44.266	9.036
500	500	30.642	61.284	8.158
Average				8.909



ภาพที่ 4.3 กราฟค่าความต้านทานของมอเตอร์ที่ป้อนเข้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

4.2 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง (Square wave high frequency test)



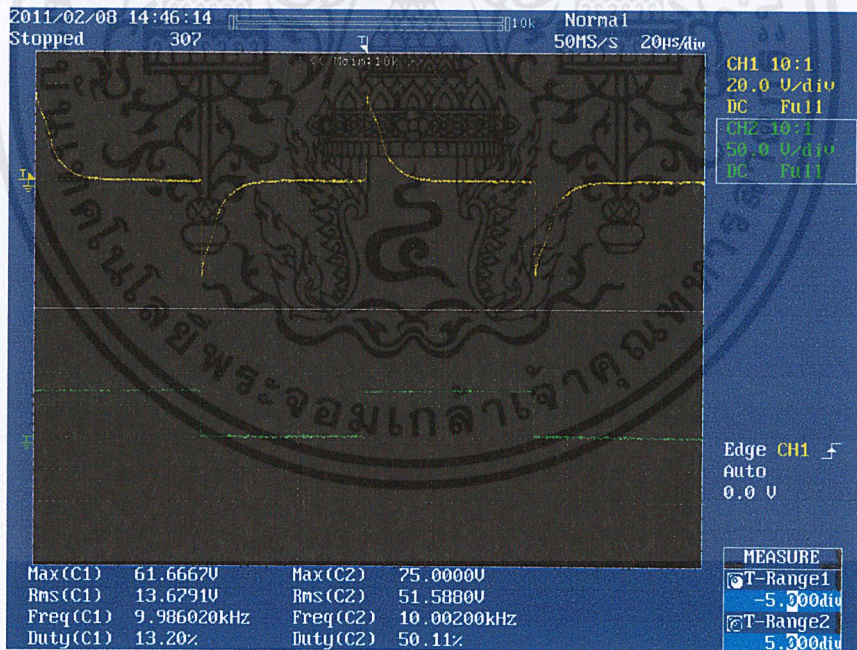
ภาพที่ 4.4 ลักษณะการต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่าเก็บประจุของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



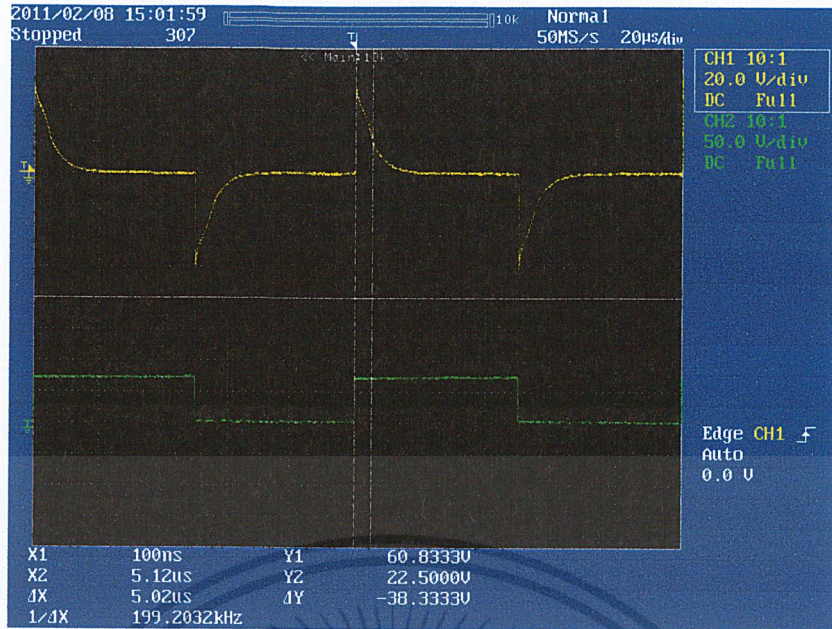
วงจรทดสอบแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

ภาพที่ 4.5 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานภายนอก ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง

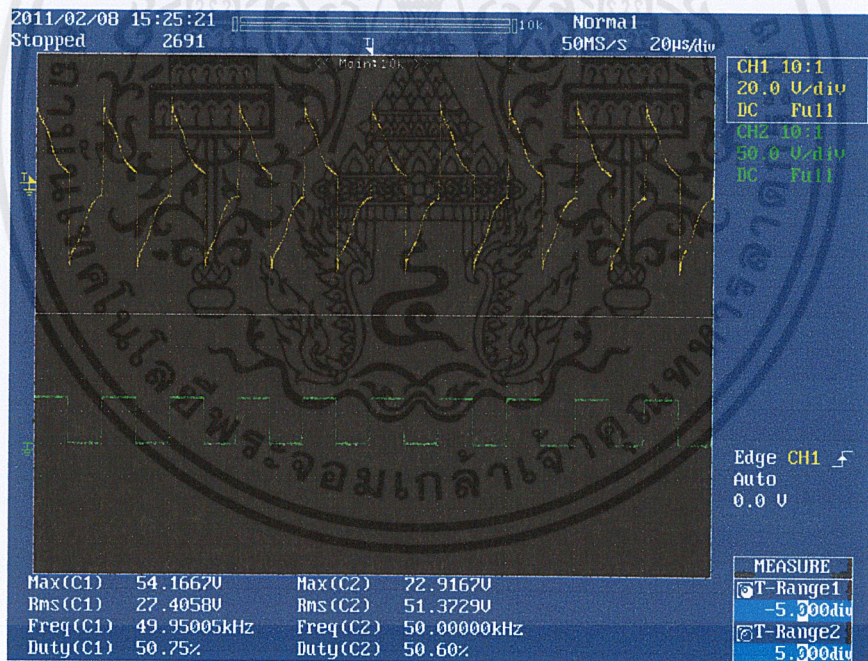


ภาพที่ 4.6 ลักษณะของกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุเทียบกับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ความถี่สวิตช์ 10kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

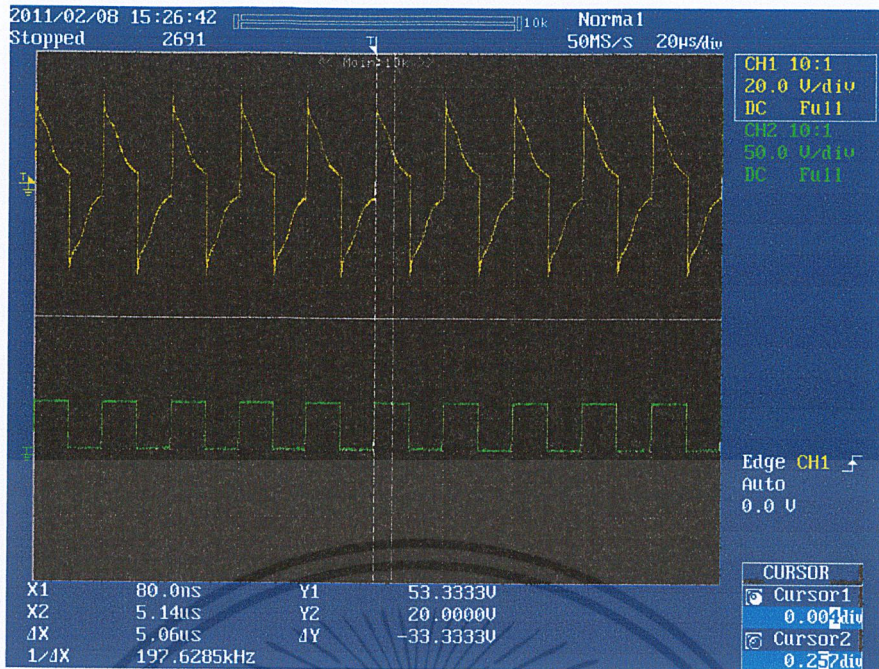


ภาพที่ 4.7 ลักษณะรูปกราฟที่ได้จากการวัดเมื่อป้อนสัญญาณ
ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 10kHz



ภาพที่ 4.8 ลักษณะของกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุเทียบกับ
แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ความถี่สวิทซ์ 50kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 ลักษณะรูปกราฟที่ได้จากการวัดเมื่อป้อนสัญญาณ
ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 50kHz

การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจากการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม
จากผลที่ได้สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าภายในมอเตอรืได้จากการวัดค่าคงที่เวลาจาก
สมการที่ 3.5

$$\tau = RC$$

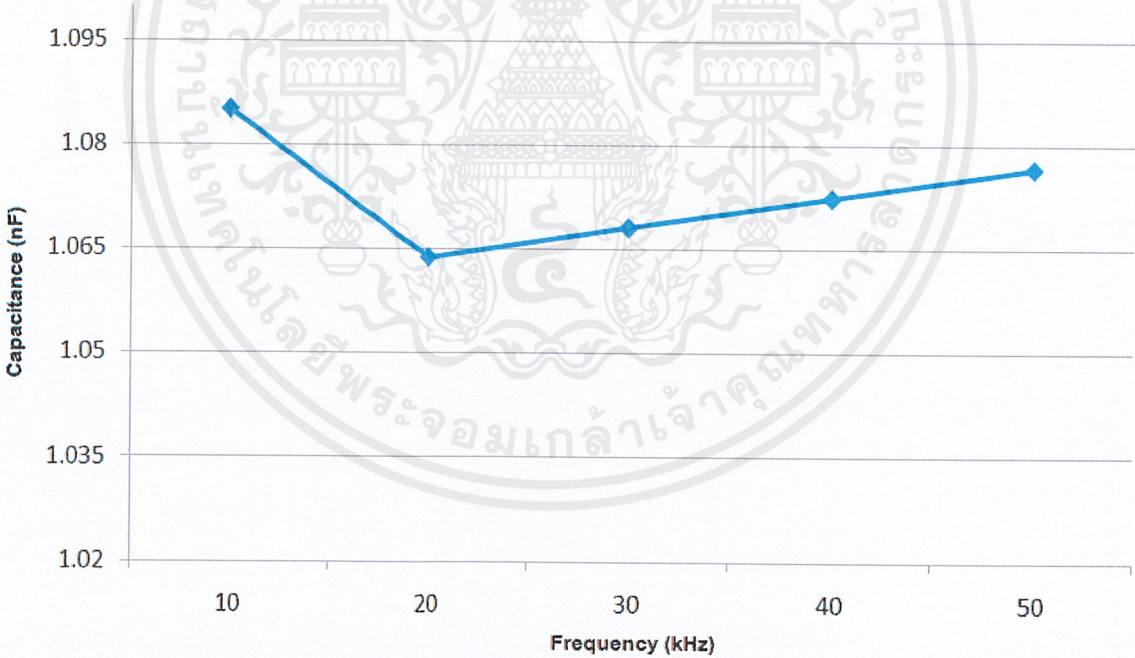
เมื่อ $R = 4.7k$ วัดค่าคงที่เวลาจากกราฟได้ $5.1 \mu s$ ดังนั้น

$$C = \frac{5.1 \times 10^{-6}}{4.7 \times 10^3} = 1.085106 \text{ nF}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

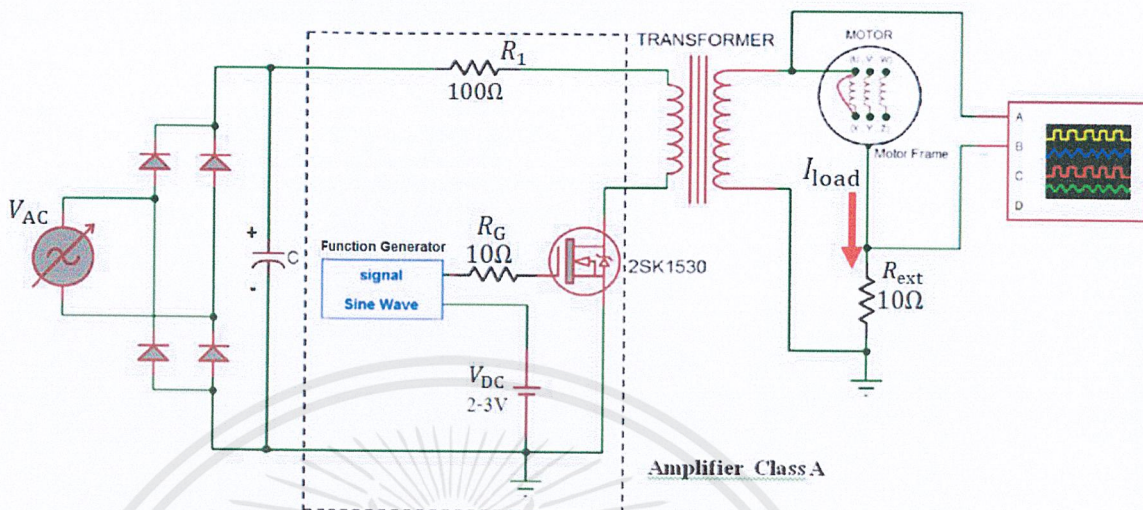
ตารางที่ 4.2 ผลการหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ต่างๆ

f (kHz)	V_o (V)	$0.37V_o$ (V)	τ (μs)	R k Ω	C nF
10	61.667	22.817	5.10	4.7	1.085106
20	60.000	22.200	5.00	4.7	1.063830
30	59.167	21.891	5.02	4.7	1.068085
40	58.333	21.583	5.04	4.7	1.072340
50	54.167	20.042	5.06	4.7	1.076596
Average					1.073191



ภาพที่ 4.10 กราฟค่าความจุไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ต่างๆ

4.3 การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ความถี่สูง (Sine wave high frequency test)

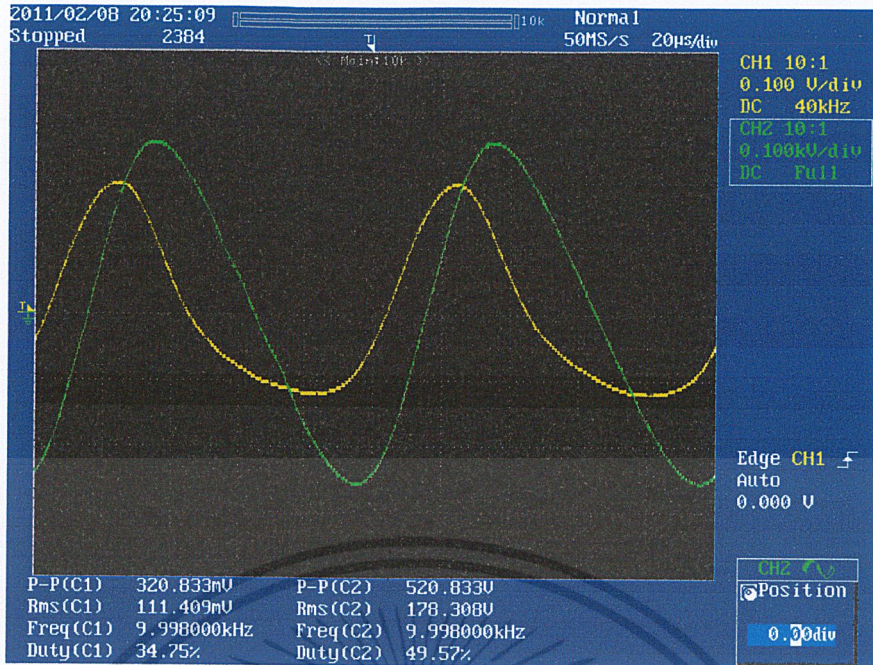


ภาพที่ 4.11 ลักษณะการต่อวงจรทดลองเพื่อหาค่าฉนวนของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

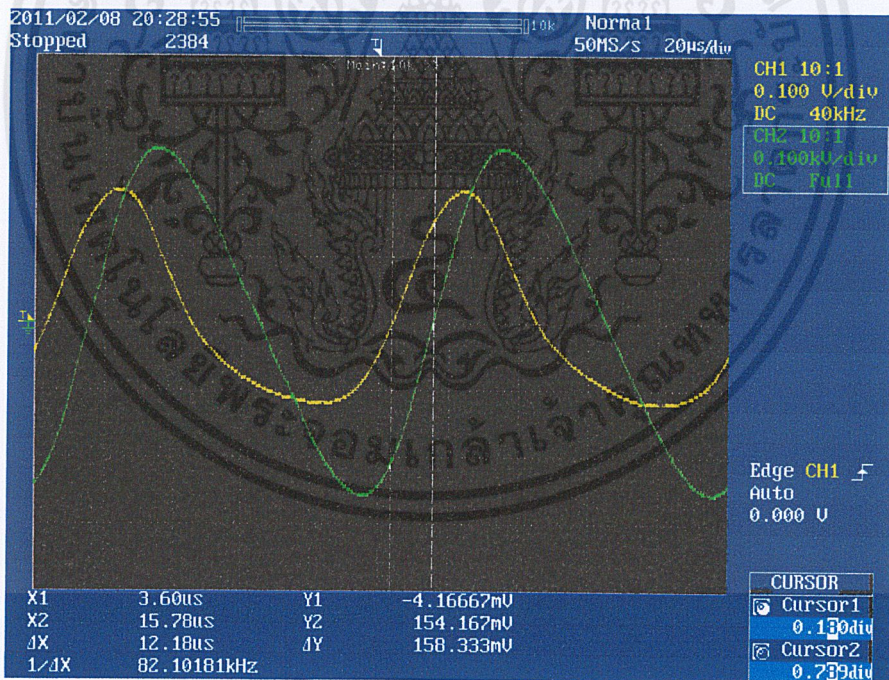


ภาพที่ 4.12 การวัดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานภายนอกด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

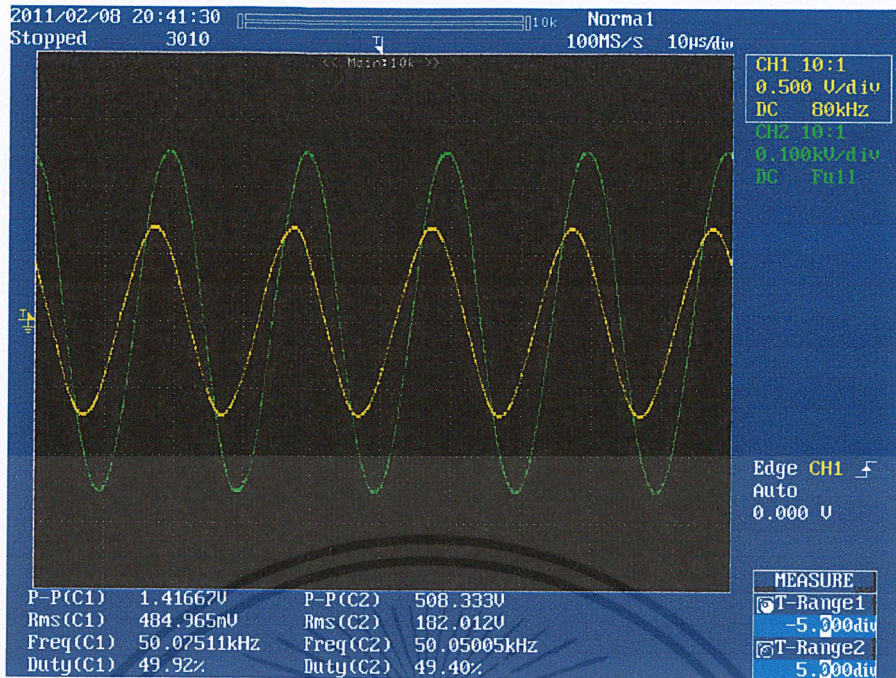


ภาพที่ 4.13 ลักษณะของกระแสไหลผ่านความต้านทานเทียบกับ
แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ความถี่ 10kHz

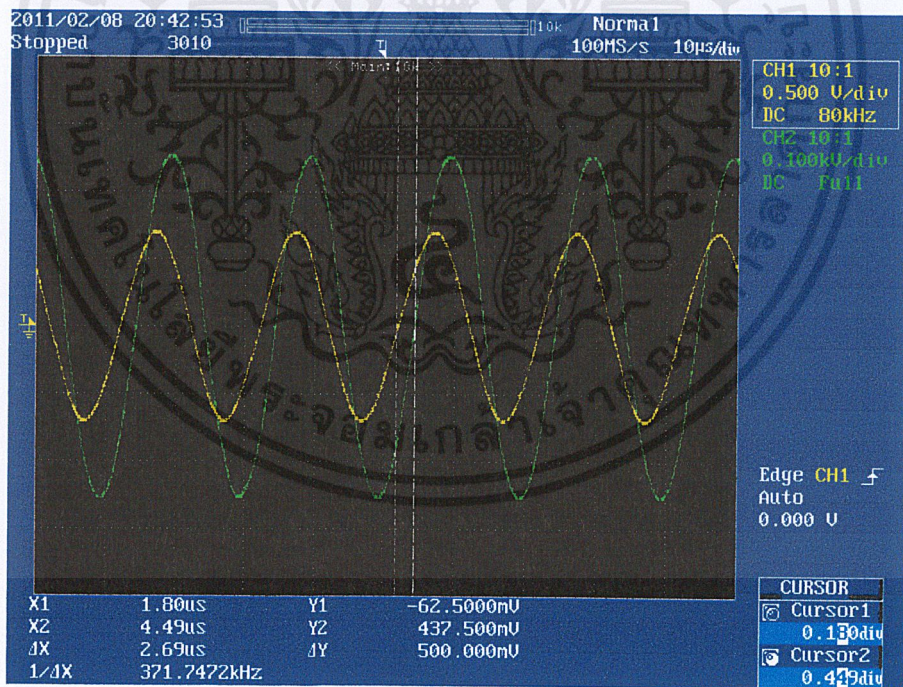


ภาพที่ 4.14 ลักษณะรูปกราฟที่ได้จากการวัดเมื่อป้อนสัญญาณ
ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ 10kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 ลักษณะของกระแสไหลผ่านความต้านทานเทียบกับ
แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าที่ความถี่ 50kHz



ภาพที่ 4.16 ลักษณะรูปกราฟที่ได้จากการวัดเมื่อป้อนสัญญาณ
ด้วยแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ 50kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะรูปคลื่นที่วัดได้มีลักษณะดังรูป โดย Channel 1 คือลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเฟรมมอเตอร์ผ่านตัวต้านทาน $10\ \Omega$ (C_1) และ Channel 2 คือลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (C_2)

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (C_1) จะนำหน้าแรงดันไฟฟ้า (C_2) อยู่เนื่องจากว่ามีค่าความเป็นค่าความจุไฟฟ้ามก แต่เมื่อทำการวัดแล้วจะเห็นได้ว่ามุมที่ได้จะมีค่าน้อยกว่า 90 องศาอยู่เล็กน้อยจึงทำให้สังเกตได้ว่า ลักษณะของค่าความต้านทานจะมีผลต่อความถี่ได้ป้อนเข้าขดลวดของมอเตอร์

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความต้านทานที่ได้จากการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 10kHz

1. หาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลจากเฟรมมอเตอร์ (I_{load})

จากสมการที่ 3.7

$$I_{load} = \frac{V_{ext}}{R_{ext}} = \frac{111.409 \times 10^{-3}}{10} = 11.1409\text{ mA}$$

2. หามุม θ

ระยะที่ต่างเฟส

$$\Delta X = 12.18\ \mu s$$

จากสมการที่ 3.8

$$\theta = \frac{360 \times \Delta X}{1/f}$$

จะได้

$$\theta = \frac{360 \times 12.18 \times 10^{-6}}{1/10000} = 43.848^\circ$$

3.หาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านค่าความต้านทาน R
จากสมการที่ 3.9

$$I_R = I_{\text{load}} \times \cos \theta$$

$$I_R = 11.1409 \times \cos 43.848^\circ$$

$$I_R = 8.0346 \text{ mA}$$

4.หาค่า R_m
จากสมการที่ 3.10

$$R_m = \frac{V_{\text{rms}}}{I_R}$$

$$R_m = \frac{180}{8.0346 \times 10^{-3}}$$

$$R_m = 22.403 \text{ k}\Omega$$

5.หาค่า R_f
จากสมการที่ 3.11

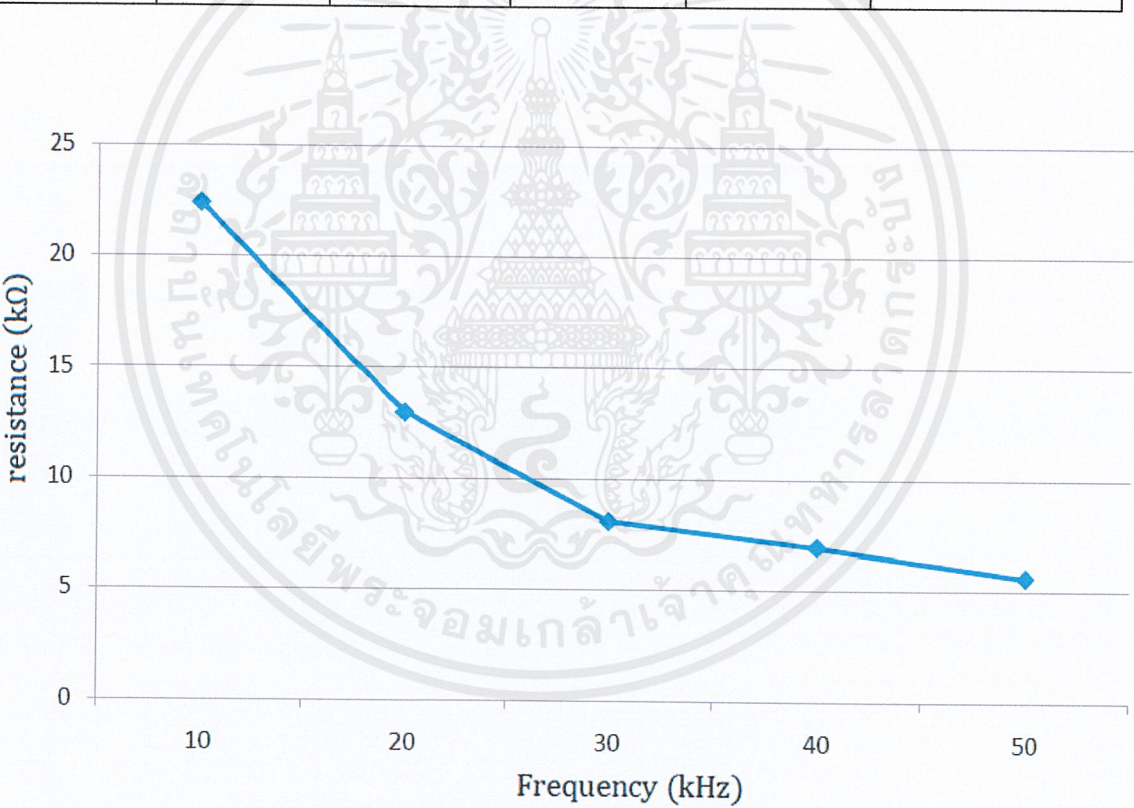
$$R_f = \frac{R_m \times R_{\text{dc}}}{R_{\text{dc}} - R_m}$$

เนื่องจากค่า R_{dc} มีค่าประมาณ ($< 7 \text{ G}\Omega$) ซึ่งมากกว่า R_m เยอะมากทำให้การคำนวณหาค่า

R_f จากสมการที่ 3.11 มีค่าเท่ากับค่า R_m

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดลองและการคำนวณที่ความถี่ต่างๆ
ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

f (kHz)	I_L (mA)	I_R (A)	θ ($^{\circ}$)	R_m (k Ω)	R_f (k Ω)
10	11.141	8.03466	43.848	22.403	22.403
20	14.502	13.85285	17.208	12.994	12.994
30	25.565	22.25020	29.502	8.090	8.090
40	40.381	25.81794	50.256	6.972	6.972
50	48.497	32.18577	48.42	5.593	5.593



ภาพที่ 4.17 กราฟค่าความต้านทานของฉนวนมอเตอร์เมื่อทดสอบ
ด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผลการทดลอง

การศึกษากระแสรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำของปริญาณพนธ์เล่มนี้ ทำให้ทราบถึงพารามิเตอร์ของฉนวนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดตัวนำกับตัวถังมอเตอร์ โดยการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทดสอบ 3 แหล่งจ่ายโดยแบ่งเป็น

1) การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (R_{DC}) จะพบว่ามีความต้านทานสูง ($<7G\Omega$) ซึ่งเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้มากขึ้นเรื่อยๆ (100V-500V) พบว่าค่าความต้านทาน (R_{DC}) มีค่าสูงมากจึงเปรียบเสมือนได้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไม่มีผลต่อค่ากระแสรั่วไหล

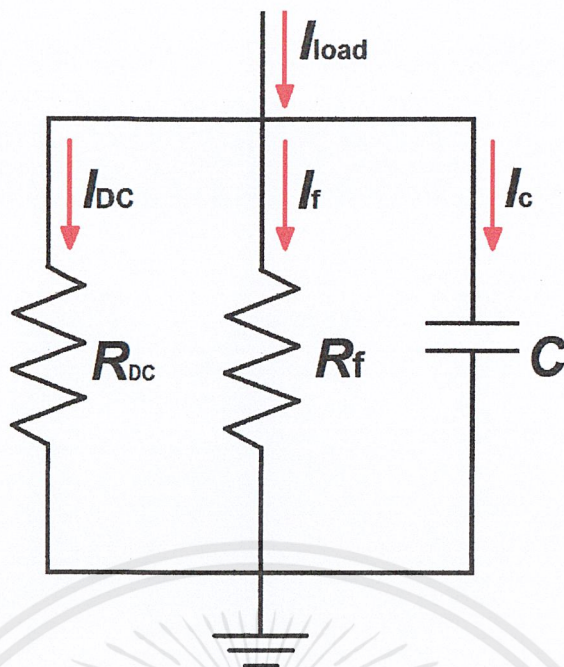
2) การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูง

การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่สูงเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าเก็บประจุของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (C) เมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นเรื่อยๆ (10-50 kHz) พบว่าค่าเก็บประจุของมอเตอร์ไฟฟ้ายังคงมีค่าเท่าเดิมซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ($\tau = RC$)

3) การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ความถี่สูง

การทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ที่ความถี่ต่างๆ จากการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นทำให้สามารถทราบว่าค่าฉนวนความต้านทานกระแสสลับ (R_f) จะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มความถี่ขึ้นซึ่งการที่ค่าฉนวนของความต้านทานกระแสสลับลดลงจะส่งผลให้กระแสรั่วไหลกระแสสลับมากขึ้น (I_f) และยังทำให้เกิดค่าความสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss) ด้วย เนื่องจากอัตราการรั่วไหลของกระแสมีค่ามากกว่าอัตราการลดลงของค่าความต้านทานโดยรวม (R_{DC}/R_f)

จากการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจาก 3 แหล่งจ่ายการทดสอบทำให้สามารถสร้างวงจรสมมูลย์ของฉนวนได้ดังภาพที่ 5.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วย ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรง (R_{DC}) ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (R_f) และค่าความจุไฟฟ้า (C)



ภาพที่ 5.1 วงจรสมมูลย์ของฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้าระหว่างขดลวดกับตัวถังมอเตอร์

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการตรวจสอบอุปกรณ์และเครื่องมือวัดก่อนการทดสอบเสมอ เพื่อป้องกันการวัดที่ผิดพลาด
- 2) การสร้างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ปรับค่าความถี่ได้นั้นมีความยุ่งยากในการปรับและความไม่แม่นยำของค่าความถี่จึงควรใช้ Microcontroller เข้ามาช่วยในการปรับค่าความถี่
- 3) ไม่ควรทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของฉนวนในขณะที่มีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ หรืออุปกรณ์ความถี่สูง เนื่องจากอาจส่งสัญญาณรบกวนทำให้บันทึกผลผิดพลาดได้
- 4) จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนั้น มีการทดสอบที่น้อยครั้งเกินไป อีกทั้งยังมีปัญหาที่ยังต้องแก้ไขอีกมาก จึงไม่ควรนำปริญาณิพนธ์เล่มนี้ไปทำเป็นเอกสารอ้างอิง

5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ

เมื่อศึกษากระแสรั่วไหลในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและสามารถสร้างวงจรสมมูลย์ของฉนวนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้แล้ว สิ่งที่ควรศึกษาต่ออาจศึกษาโดยการหารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของวงจรสมมูลย์จากผลกระทบต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความร้อน ความชื้น ความเครียด และเวลาการใช้งานมอเตอร์ เพื่อที่จะสามารถทราบถึงผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำและอาจใช้

สถิติในการวิเคราะห์ผลของข้อมูลต่างๆ ซึ่งอาจทำให้สามารถทำนายอายุการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำการทดสอบได้

นอกจากนี้เพื่อให้ทราบถึงผลการทดสอบที่แน่นอนจึงควรทำการทดสอบมอเตอร์หลาย ๆ ตัว และที่พิกัดต่าง ๆ เพื่อดูแนวโน้มที่เกิดขึ้นว่าเหมือนกันหรือแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด รวมถึงการทดสอบที่ควรเพิ่มเข้ามาเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ การทดสอบแบบ coil-coil หรือ coil-ground เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] 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 system," **Conf. Rec. of IEEE-PESC**, Vol.2 ,1997, pp. 1269-1275.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Naik, R.; Nondahl, T. A.; Melfi, M. J.; Schiferk, 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Kempski, 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.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Murai, Y.; Kubata, 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.
- [14] 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.
- [15] Von jouanne, A.; and Enjeti, P., "Design considerations for an inverter output filter to mitigate the effects of long motors leads in ASD applications," *IEEE Trans Ind.Appl.*, Vol.33, No.5 ,1997, pp. 1138-1145.
- [16] Boglietti, A. and Carpaneto, E., "Induction motor high frequency model." *Conf. Rec. of IEEE-IAS*, Vol.3 ,1999, pp. 1551-1558



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2SK1530

High-Power Amplifier Application

Unit: mm

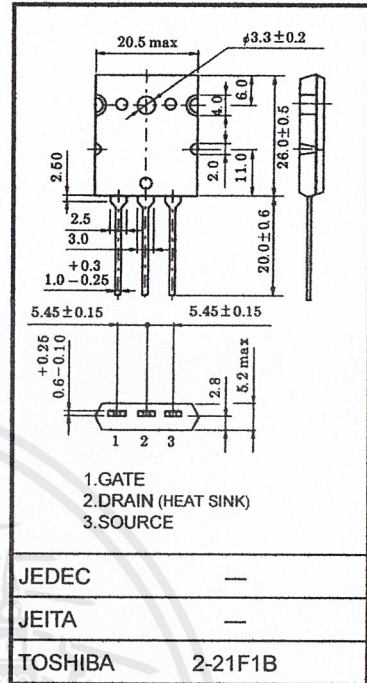
- High breakdown voltage : $V_{DS} = 200\text{ V}$
- High forward transfer admittance : $|Y_{fs}| = 5.0\text{ S (typ.)}$
- Complementary to 2SJ201

Absolute Maximum Ratings ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

Characteristics	Symbol	Rating	Unit
Drain-source voltage	V_{DS}	200	V
Gate-source voltage	V_{GS}	± 20	V
Drain current (Note 1)	I_D	12	A
Drain power dissipation ($T_c = 25^\circ\text{C}$)	P_D	150	W
Channel temperature	T_{ch}	150	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range	T_{stg}	-55 to 150	$^\circ\text{C}$

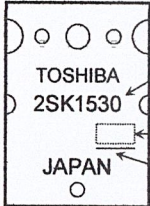
Note: Using continuously under heavy loads (e.g. the application of high temperature/current/voltage and the significant change in temperature, etc.) may cause this product to decrease in the reliability significantly even if the operating conditions (i.e. operating temperature/current/voltage, etc.) are within the absolute maximum ratings. Please design the appropriate reliability upon reviewing the Toshiba Semiconductor Reliability Handbook ("Handling Precautions"/"Derating Concept and Methods") and individual reliability data (i.e. reliability test report and estimated failure rate, etc.).

Note 1: Ensure that the channel temperature does not exceed 150°C .



Weight: 9.75 g (typ.)

Marking



Part No. (or abbreviation code)

Lot No.

Note 2

Note 2: A line under a Lot No. identifies the indication of product Labels.

Not underlined: $[[Pb]]/INCLUDES > MCV$

Underlined: $[[G]]/RoHS COMPATIBLE$ or $[[G]]/RoHS [[Pb]]$

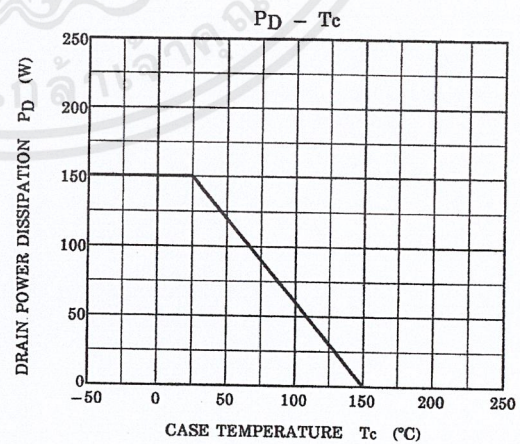
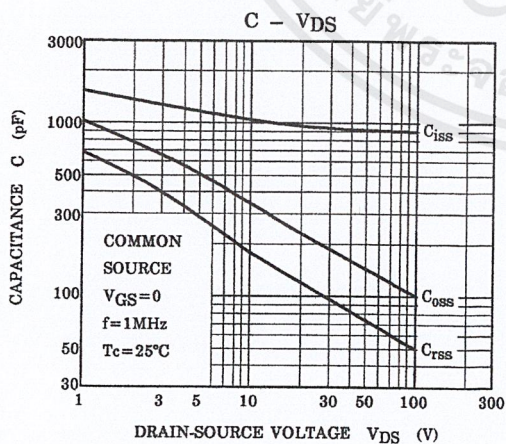
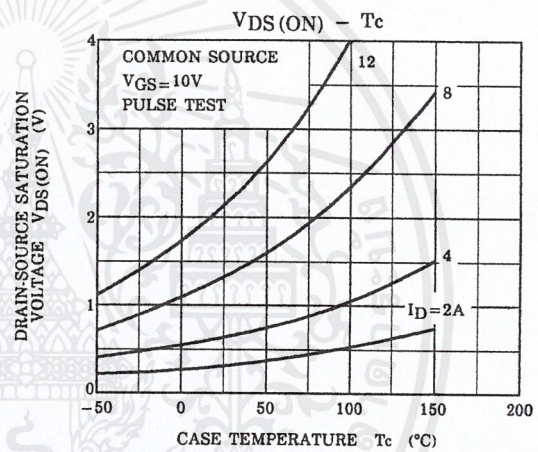
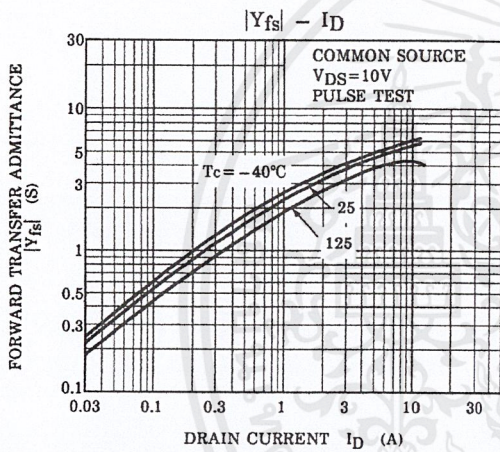
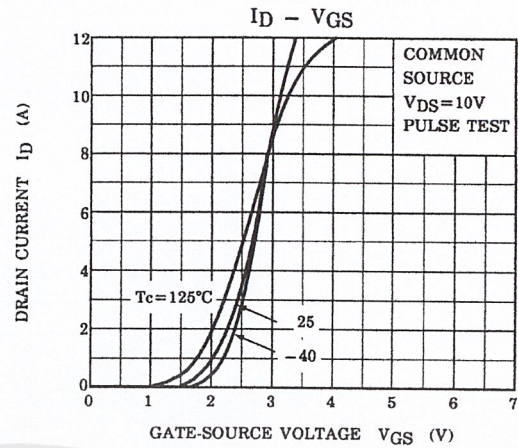
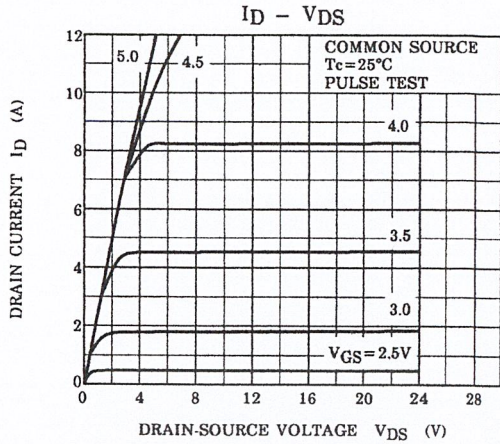
Please contact your TOSHIBA sales representative for details as to environmental matters such as the RoHS compatibility of Product. The RoHS is the Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.

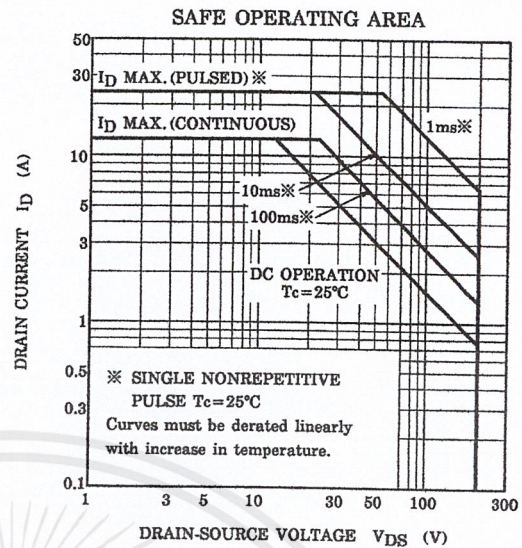
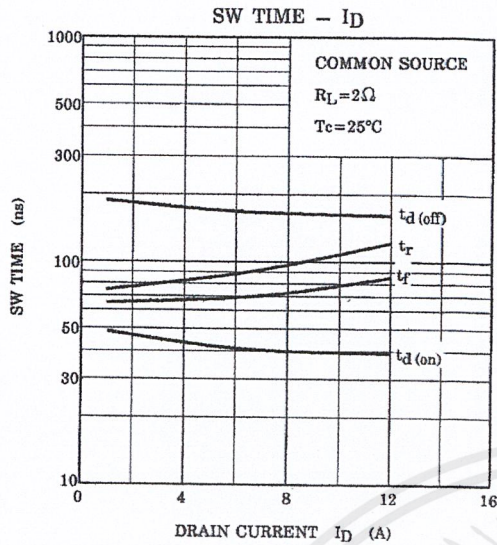
Electrical Characteristics ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

Characteristics	Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Drain cut-off current	I_{DSS}	$V_{DS} = 200\text{ V}, V_{GS} = 0$	—	—	1.0	mA
Gate leakage current	I_{GSS}	$V_{DS} = 0\text{ V}, V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	—	—	± 0.5	μA
Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DS}$	$I_D = 10\text{ mA}, V_{GS} = 0$	200	—	—	V
Drain-source saturation voltage	$V_{DS(ON)}$	$I_D = 8\text{ A}, V_{GS} = 10\text{ V}$	—	2.5	5.0	V
Gate-source cut-off voltage (Note 3)	$V_{GS(OFF)}$	$V_{DS} = 10\text{ V}, I_D = 0.1\text{ A}$	0.8	—	2.8	V
Forward transfer admittance	$ Y_{fs} $	$V_{DS} = 10\text{ V}, I_D = 5\text{ A}$	—	5.0	—	S
Input capacitance	C_{iss}	$V_{DS} = 30\text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1\text{ MHz}$	—	900	—	pF
Output capacitance	C_{oss}	$V_{DS} = 30\text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1\text{ MHz}$	—	180	—	
Reverse transfer capacitance	C_{rss}	$V_{DS} = 30\text{ V}, V_{GS} = 0, f = 1\text{ MHz}$	—	100	—	

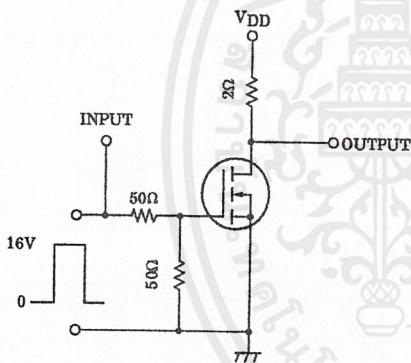
Note 3: $V_{GS(OFF)}$ Classification 0: 0.8 to 1.6 Y: 1.4 to 2.8

This transistor is an electrostatic-sensitive device.
Please handle with caution.

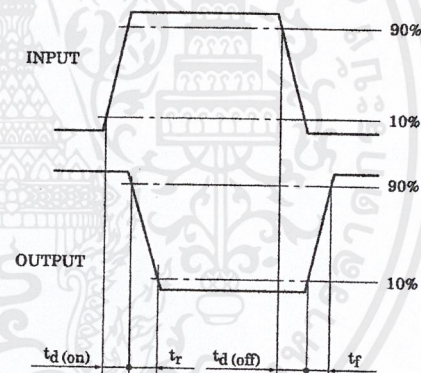




Switching Time Test Circuit



Waveforms



RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

- Toshiba Corporation, and its subsidiaries and affiliates (collectively "TOSHIBA"), reserve the right to make changes to the information in this document, and related hardware, software and systems (collectively "Product") without notice.
- This document and any information herein may not be reproduced without prior written permission from TOSHIBA. Even with TOSHIBA's written permission, reproduction is permissible only if reproduction is without alteration/omission.
- Though TOSHIBA works continually to improve Product's quality and reliability, Product can malfunction or fail. Customers are responsible for complying with safety standards and for providing adequate designs and safeguards for their hardware, software and systems which minimize risk and avoid situations in which a malfunction or failure of Product could cause loss of human life, bodily injury or damage to property, including data loss or corruption. Before customers use the Product, create designs including the Product, or incorporate the Product into their own applications, customers must also refer to and comply with (a) the latest versions of all relevant TOSHIBA information, including without limitation, this document, the specifications, the data sheets and application notes for Product and the precautions and conditions set forth in the "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" and (b) the instructions for the application with which the Product will be used with or for. Customers are solely responsible for all aspects of their own product design or applications, including but not limited to (a) determining the appropriateness of the use of this Product in such design or applications; (b) evaluating and determining the applicability of any information contained in this document, or in charts, diagrams, programs, algorithms, sample application circuits, or any other referenced documents; and (c) validating all operating parameters for such designs and applications. **TOSHIBA ASSUMES NO LIABILITY FOR CUSTOMERS' PRODUCT DESIGN OR APPLICATIONS.**
- Product is intended for use in general electronics applications (e.g., computers, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robots and home electronics appliances) or for specific applications as expressly stated in this document. Product is neither intended nor warranted for use in equipment or systems that require extraordinarily high levels of quality and/or reliability and/or a malfunction or failure of which may cause loss of human life, bodily injury, serious property damage or serious public impact ("Unintended Use"). Unintended Use includes, without limitation, equipment used in nuclear facilities, equipment used in the aerospace industry, medical equipment, equipment used for automobiles, trains, ships and other transportation, traffic signaling equipment, equipment used to control combustions or explosions, safety devices, elevators and escalators, devices related to electric power, and equipment used in finance-related fields. Do not use Product for Unintended Use unless specifically permitted in this document.
- Do not disassemble, analyze, reverse-engineer, alter, modify, translate or copy Product, whether in whole or in part.
- Product shall not be used for or incorporated into any products or systems whose manufacture, use, or sale is prohibited under any applicable laws or regulations.
- The information contained herein is presented only as guidance for Product use. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringement of patents or any other intellectual property rights of third parties that may result from the use of Product. No license to any intellectual property right is granted by this document, whether express or implied, by estoppel or otherwise.
- **ABSENT A WRITTEN SIGNED AGREEMENT, EXCEPT AS PROVIDED IN THE RELEVANT TERMS AND CONDITIONS OF SALE FOR PRODUCT, AND TO THE MAXIMUM EXTENT ALLOWABLE BY LAW, TOSHIBA (1) ASSUMES NO LIABILITY WHATSOEVER, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, INDIRECT, CONSEQUENTIAL, SPECIAL, OR INCIDENTAL DAMAGES OR LOSS, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, LOSS OF PROFITS, LOSS OF OPPORTUNITIES, BUSINESS INTERRUPTION AND LOSS OF DATA, AND (2) DISCLAIMS ANY AND ALL EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AND CONDITIONS RELATED TO SALE, USE OF PRODUCT, OR INFORMATION, INCLUDING WARRANTIES OR CONDITIONS OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ACCURACY OF INFORMATION, OR NONINFRINGEMENT.**
- Do not use or otherwise make available Product or related software or technology for any military purposes, including without limitation, for the design, development, use, stockpiling or manufacturing of nuclear, chemical, or biological weapons or missile technology products (mass destruction weapons). Product and related software and technology may be controlled under the Japanese Foreign Exchange and Foreign Trade Law and the U.S. Export Administration Regulations. Export and re-export of Product or related software or technology are strictly prohibited except in compliance with all applicable export laws and regulations.
- Please contact your TOSHIBA sales representative for details as to environmental matters such as the RoHS compatibility of Product. Please use Product in compliance with all applicable laws and regulations that regulate the inclusion or use of controlled substances, including without limitation, the EU RoHS Directive. TOSHIBA assumes no liability for damages or losses occurring as a result of noncompliance with applicable laws and regulations.

TLP250

Transistor Inverter
Inverter For Air Conditionor
IGBT Gate Drive
Power MOS FET Gate Drive

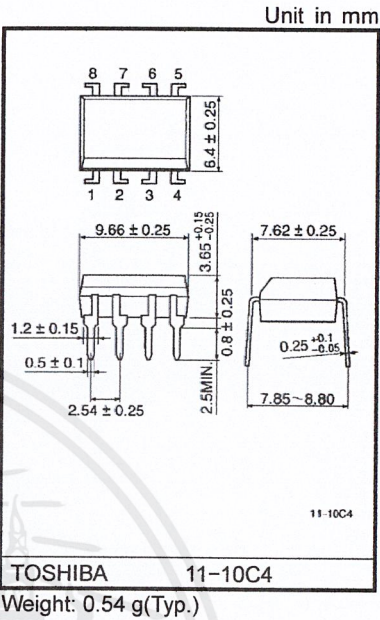
The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
This unit is 8-lead DIP package.
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\sim35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option(D4)
VDE Approved : DIN EN60747-5-2
Maximum Operating Insulation Voltage : 890V_{PK}
Highest Permissible Over Voltage : 4000V_{PK}

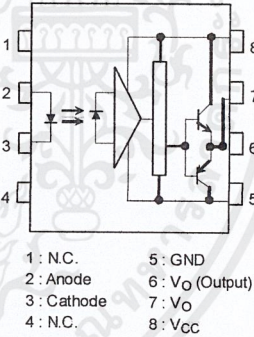
(Note):When a EN60747-5-2 approved type is needed,
Please designate "Option(D4)"

Truth Table

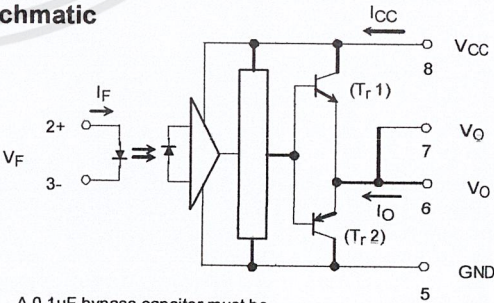
		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On



Pin Configuration (top view)



Schematic



A 0.1μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit
LED	Forward current	IF	20	mA
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	ΔIF / ΔTa	−0.36	mA / °C
	Peak transient forward current (Note 1)	IFPT	1	A
	Reverse voltage	VR	5	V
	Junction temperature	TJ	125	°C
Detector	"H" peak output current (PW ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	IOPH	−1.5	A
	"L" peak output current (PW ≤ 2.5μs, f ≤ 15kHz) (Note 2)	IOLP	+1.5	A
	Output voltage	VO	35	V
			24	
	Supply voltage	VCC	35	V
			24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔVO / ΔTa	−0.73	V / °C
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	ΔVCC / ΔTa	−0.73	V / °C
	Junction temperature	TJ	125	°C
Operating frequency (Note 3)		f	25	kHz
Operating temperature range		Topr	−20~85	°C
Storage temperature range		Tstg	−55~125	°C
Lead soldering temperature (10 s)		Tsol	260	°C
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 4)		BVS	2500	Vrms

- Note 1: Pulse width $P_W \leq 1\mu s$, 300pps
- Note 2: Exporenential wavefom
- Note 3: Exporenential wavefom, $I_{OPH} \leq -1.0A (\leq 2.5\mu s)$, $I_{OPL} \leq +1.0A (\leq 2.5\mu s)$
- Note 4: Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.
- Note 5: A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching proparty. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
Input current, on (Note6)	IF(ON)	7	8	10	mA
Input voltage, off	VF(OFF)	0	—	0.8	V
Supply voltage	VCC	15	—	30 20	V
Peak output current	IOPH/IOLP	—	—	±0.5	A
Operating temperature	Topr	−20	25	70 85	°C

Note 6: Input signal rise time(fall time)<0.5μs.

Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Cir-cuit	Test Condition		Min	Typ.*	Max	Unit
Input forward voltage		VF	—	IF = 10 mA , Ta = 25°C		—	1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage		ΔVF / ΔTa	—	IF = 10 mA		—	-2.0	—	mV / °C
Input reverse current		IR	—	VR = 5V, Ta = 25°C		—	—	10	μA
Input capacitance		CT	—	V = 0 , f = 1MHz , Ta = 25°C		—	45	250	pF
Output current	"H" level	IOPH	1	VCC = 30V (*1)	IF = 10 mA V8-6 = 4V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	IOPL	2		IF = 0 V6-5 = 2.5V	0.5	2	—	
Output voltage	"H" level	VOH	3	VCC1 = +15V, VEE1 = -15V RL = 200Ω, IF = 5mA		11	12.8	—	V
	"L" level	VOL	4	VCC1 = +15V, VEE1 = -15V RL = 200Ω, VF = 0.8V		—	-14.2	-12.5	
Supply current	"H" level	ICCH	—	VCC = 30V, IF = 10mA Ta = 25°C		—	7	—	mA
				VCC = 30V, IF = 10mA		—	—	11	
	"L" level	ICCL	—	VCC = 30V, IF = 0mA Ta = 25°C		—	7.5	—	
				VCC = 30V, IF = 0mA		—	—	11	
Threshold input current	"Output L→H"	IFLH	—	VCC1 = +15V, VEE1 = -15V RL = 200Ω, VO > 0V		—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	VFHL	—	VCC1 = +15V, VEE1 = -15V RL = 200Ω, VO < 0V		0.8	—	—	V
Supply voltage		VCC	—			10	—	35	V
Capacitance (input-output)		CS	—	VS = 0 , f = 1MHz Ta = 25°C		—	1.0	2.0	pF
Resistance(input-output)		RS	—	VS = 500V , Ta = 25°C R.H. ≤ 60%		1×10 ¹²	10 ¹⁴	—	Ω

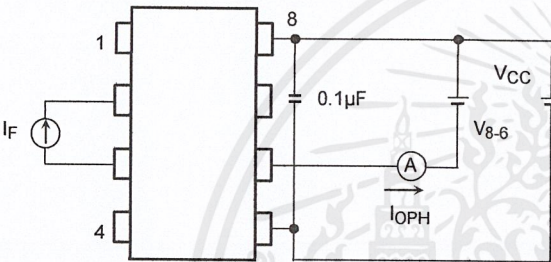
* All typical values are at Ta = 25°C (*1): Duration of IO time ≤ 50μs

Switching Characteristics (Ta = -20~70°C , unless otherwise specified)

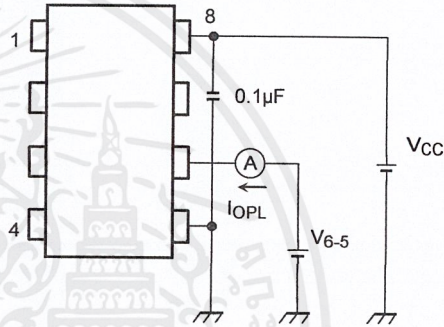
Characteristic		Symbol	Test Cir-cuit	Test Condition	Min	Typ.*	Max	Unit
Propagation delay time	L→H	t_{pLH}	5	$I_F = 8\text{mA}$ $V_{CC1} = +15\text{V}$, $V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$	—	0.15	0.5	μs
	H→L	t_{pHL}			—	0.15	0.5	
Output rise time		t_r			—	—	—	
Output fall time		t_f			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output		C_{MH}	6	$V_{CM} = 600\text{V}$, $I_F = 8\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$	-5000	—	—	$\text{V} / \mu\text{s}$
Common mode transient immunity at low level output		C_{ML}		$V_{CM} = 600\text{V}$, $I_F = 0\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$	5000	—	—	$\text{V} / \mu\text{s}$

All typical values are at Ta = 25°C

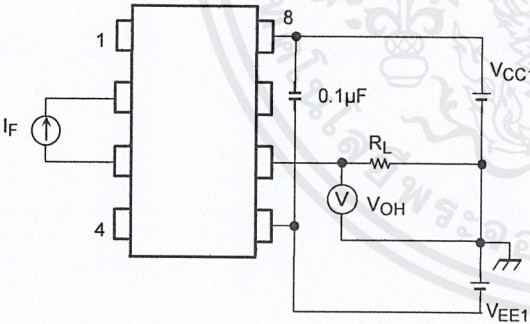
Test Circuit 1 : IOPH



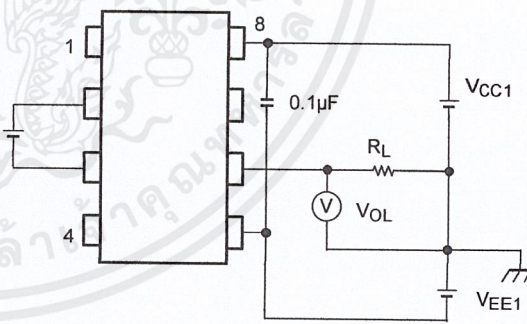
Test Circuit 2 : IOPL



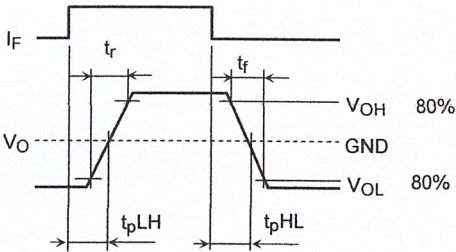
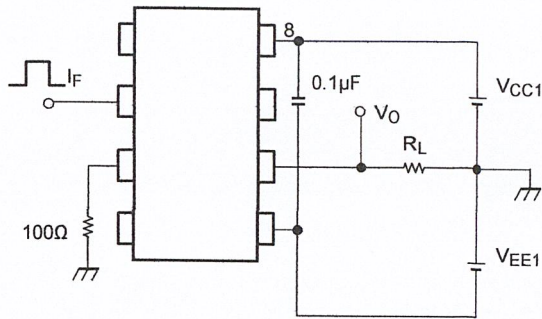
Test Circuit 3 : VOH



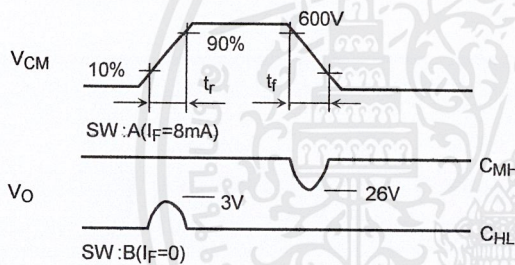
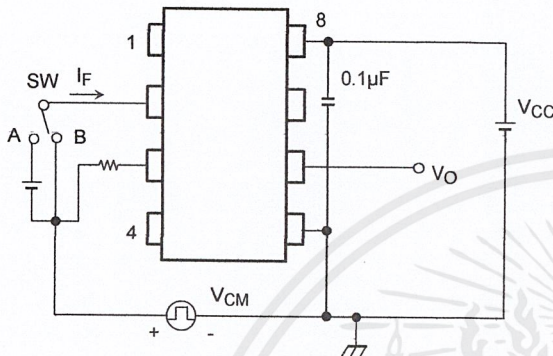
Test Circuit 4 : VOL



Test Circuit 5: t_{pLH} , t_{pHL} , t_r , t_f

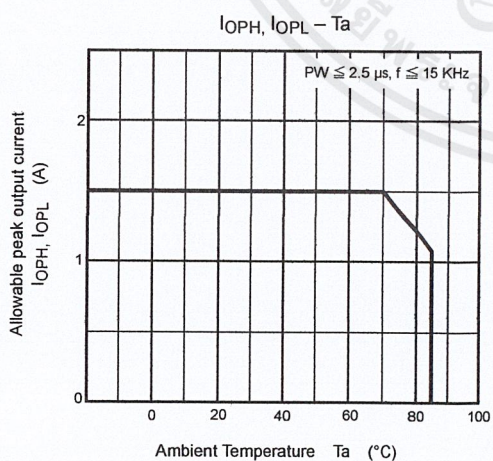
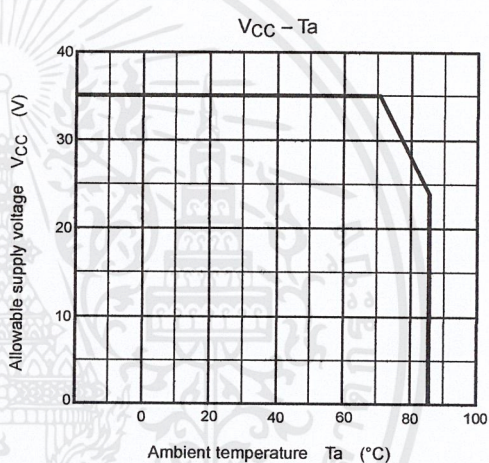
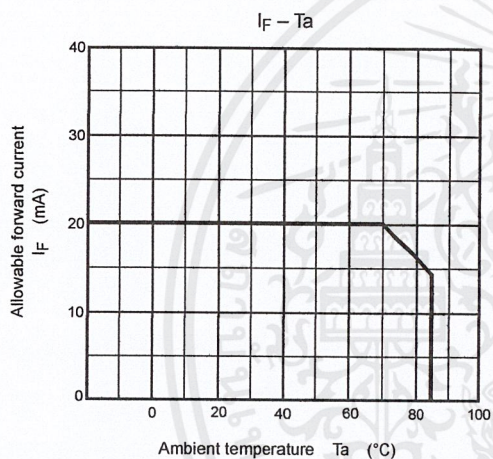
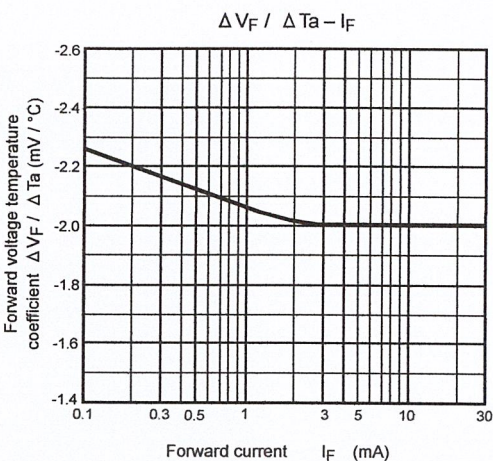
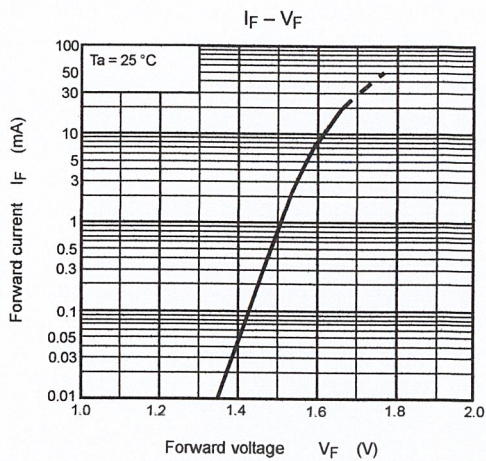


Test Circuit 6: C_{MH} , C_{ML}



$$C_{ML} = \frac{480 \text{ (V)}}{t_r \text{ (}\mu\text{s)}}$$
$$C_{MH} = \frac{480 \text{ (V)}}{t_f \text{ (}\mu\text{s)}}$$

$C_{ML}(C_{MH})$ is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.



RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

20070701-EN

- The information contained herein is subject to change without notice.
- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc.
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The products described in this document shall not be used or embedded to any downstream products of which manufacture, use and/or sale are prohibited under any applicable laws and regulations.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringements of patents or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patents or other rights of TOSHIBA or the third parties.
- GaAs(Gallium Arsenide) is used in this product. The dust or vapor is harmful to the human body. Do not break, cut, crush or dissolve chemically.
- Please contact your sales representative for product-by-product details in this document regarding RoHS compatibility. Please use these products in this document in compliance with all applicable laws and regulations that regulate the inclusion or use of controlled substances. Toshiba assumes no liability for damage or losses occurring as a result of noncompliance with applicable laws and regulations.

ประวัติผู้เขียน



นาย ธนะศักดิ์ กรุงกาญจน์ เกิดวันที่ ๒๑ กรกฎาคม พ.ศ.๒๕๓๒
การศึกษา

จบการศึกษามัธยมศึกษา โรงเรียนนวมินทราชินูทิศเตรียม
อุดมศึกษาพัฒนาการ

ศึกษาปริญญาตรีที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไฟฟ้ากำลัง



นาย ธนาคม จรัสแสงสกุล เกิดวันที่ ๒๒ กรกฎาคม พ.ศ.๒๕๓๒
การศึกษา

จบการศึกษามัธยมศึกษา โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย
ศึกษาปริญญาตรีที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไฟฟ้ากำลัง



นาย นนทปฎิยา นิยมพงษ์ เกิดวันที่ ๑๐ พฤษภาคม พ.ศ.๒๕๓๒
การศึกษา

จบการศึกษามัธยมศึกษา โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ
เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า

ศึกษาปริญญาตรีที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาไฟฟ้ากำลัง