บทที่ 3

การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

การพัฒนาแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง โดยเน้นใช้วัสดุอุปกรณ์ในประเทศเป็นหลักและใช้เทคนิคที่ง่ายให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่ต่ำที่ใช้อยู่เดิมและมีขนาดเล็กกว่า การออกแบบมีขั้นตอนดังนี้

3.1 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

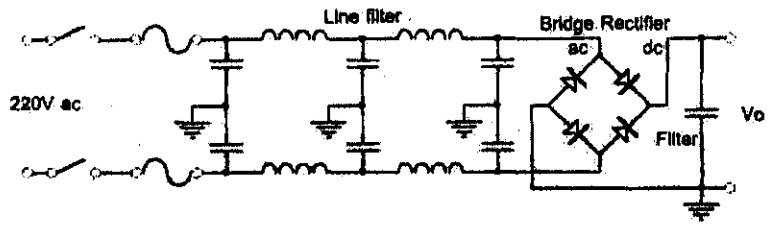
ข้อมูลพิกัดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ศักดาไฟฟ้าทางด้านทางเข้า	=	300	V
ศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออก	=	100	kV
กระแสไฟฟ้าทางด้านทางออก	=	0.025	A

ขั้นตอนการออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิงสำหรับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์สามารถแบ่งเป็นส่วนหลักๆ ได้ดังนี้

3.1.1 วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดัน

วงจรเรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ด้านทางเข้าของวงจรใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวนไว้เพื่อป้องกันสิ่งรบกวนจากระบบจ่ายไฟฟ้าและป้องกันสิ่งรบกวนที่เกิดจากกระบวนการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ออกไปรบกวนภายนอก ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรพื้นฐานของวงจรเรียงกระแสและกรองแรงดัน

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการออกแบบวงจรเรียงกระแสและกรองแรงดันมีดังต่อไปนี้

ศักดาไฟฟ้าทางด้านทางเข้า	=	300	V
ศักดาไฟฟ้าทางด้านทางออก	=	50,000	V
กระแสไฟฟ้าทางด้านทางออก	=	0.025	A
ความถี่จากไฟฟ้ากระแสสลับ	=	50	Hz

ก. การออกแบบวงจรเรียงกระแส

จากข้อมูลข้างต้น สามารถเลือกอุปกรณ์ที่ใช้สร้างวงจรเรียงกระแสได้โดยต้องหากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ทางด้านทางเข้าของวงจร ดังสมการ

กระแสไฟฟ้าด้านทางเข้า $$I_i = \frac{V_o \times I_o}{V_i} \qquad (3.1)$$

จาก $V_i = 300\ V$ $V_o = 50{,}000\ V$ และ $I_o = 0.025\ A$

ดังนั้น กระแสไฟฟ้าด้านทางเข้า $$I_i = \frac{50{,}000 \times 0.025}{300} \approx 4.17\ A$$

จากการคำนวณจะต้องใช้ไดโอดเรียงกระแสที่ทนศักดาไฟฟ้ากลับทางได้ไม่ต่ำกว่า $300V$ และกระแสไบอัสตรงไม่ต่ำกว่า $4.2\,A$ แต่ในการใช้งานจริงควรเผื่อค่าความปลอดภัยไว้

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มรูปคลื่น (Full Wave Rectifier) ที่ทนศักดาไฟฟ้าได้ 600 V และทนกระแสได้ 8 A

ข. การออกแบบวงจรกรองแรงดัน

จากสมการ สามารถหาขนาดความจุของคาปาซิเตอร์ได้

$$C = \frac{\omega C R_L}{2\pi f\left(\frac{V_{C(DC)}}{I_O}\right)} \qquad (3.2)$$

จากวงจรจะกำหนดให้ค่า Ripple ประมาณ 1% ดังนั้น จากกราฟรูปที่ 2.21 สามารถหาค่า $\omega C R_L$ ได้ประมาณ 45 ถึง 80 เลือกค่า $\omega C R_L$ เท่ากับ 80

ดังนั้น ค่าความจุของคาปาซิเตอร์เท่ากับ $C = \frac{80}{2\times\pi\times 50\left(\frac{300}{4.2}\right)} \approx 3{,}565\ \mu F$

จากการคำนวณจะได้ค่าความจุของคาปาซิเตอร์ประมาณ 3,565 μF และต้องทนศักดาไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 300 V สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้คาปาซิเตอร์ที่มีความจุ 4,700 μF และทนศักดาไฟฟ้าได้ 450 V ในทางทฤษฎีต้องเผื่อความสามารถในการทนศักดาไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์ไว้สองเท่า คือ ต้องทนศักดาไฟฟ้าประมาณ 600 V แต่ในทางปฏิบัตินั้นราคาของคาปาซิเตอร์ที่มีค่าความจุสูงและทนศักดาไฟฟ้าได้สูงมีราคาแพง

3.1.2 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ โดยเลือกใช้เพาเวอร์มอสเฟตในการทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิตช์ เนื่องจากมอสเฟตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับการทำงานแบบสวิตชิง ซึ่งตอบ

สนองความถี่สูงได้ดี อีกทั้งยังง่ายต่อการควบคุมการทำงาน กล่าวคือ มอสเฟตทำงานด้วยการขับศักดาไฟฟ้าที่วงจรเกต ซึ่งจะต่างจากทรานซิสเตอร์ที่ต้องการทั้งศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขับวงจรเบสค่อนข้างสูงในการจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานแบบสวิตช์เมื่อเทียบราคากับ IGBT ก็มีราคาประหยัดกว่าในขณะนี้

อุปกรณ์สวิตช์เพาเวอร์มอสเฟตที่ใช้ในวงจรนี้เลือกมอสเฟตเบอร์ IRFPG50 ซึ่งมีความสามารถทนศักดาไฟฟ้าได้สูงสุด $1{,}000\,V$ ทนกระแสไฟฟ้าสูงสุด $6.1\,A$ และเหมาะสำหรับวงจรสวิตชิงความถี่สูง เป็นมอสเฟตที่หาได้ง่าย มีรายละเอียดในภาคผนวก ข. สำหรับการใช้งานจริงจำเป็นต้องทำการต่อขนานมอสเฟตเพื่อแบ่งการรับภาระของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตและกำลังไฟฟ้าของมอสเฟต ซึ่งมอสเฟตแต่ละตัวมีความสามารถในการทนกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ $100\,W$ และกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นประมาณ $1{,}562.5\,W$ โดยจะต้องต่อขนานมอสเฟตจำนวน $\frac{1{,}562.5}{100} = 15.625 \approx 16$ ตัว

3.1.3 การออกแบบวงจรควบคุม

วงจรควบคุมศักดาไฟฟ้าทางออกให้คงที่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงนี้จัดการทำงานแบบการปรับความกว้างพัลส์ โดยเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรควบคุม ควรเลือกอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ก. เป็น IC PWM ที่นิยมใช้และหาได้ง่ายตามท้องตลาด

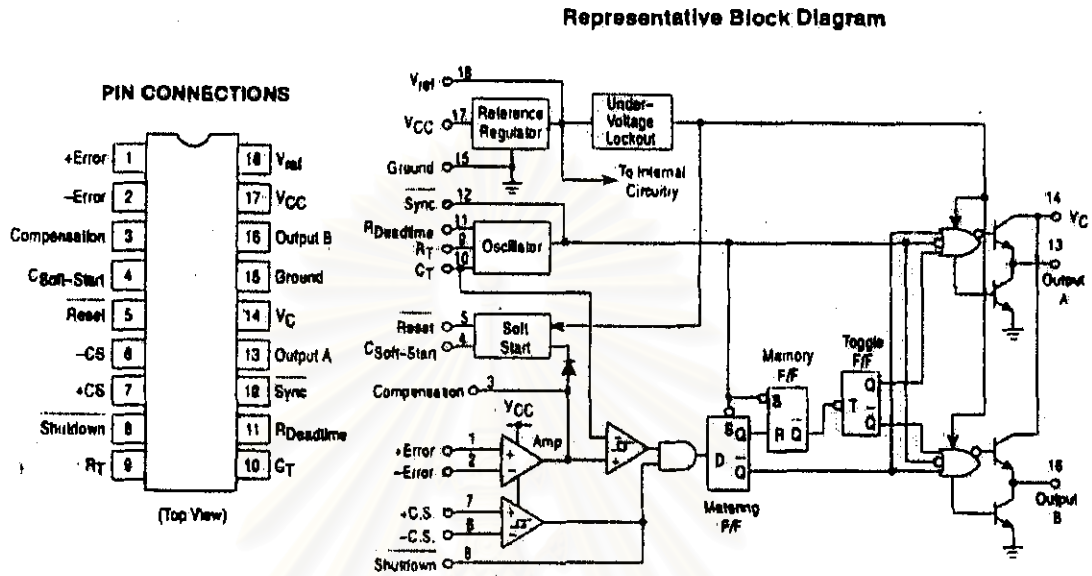
ข. สามารถสร้างและปรับความถี่ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ได้เหมาะสม

ค. สามารถปรับเปลี่ยนกว้างของสัญญาณที่ใช้ในการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อควบคุมศักดาไฟฟ้าทางออก

ง. มีฟังก์ชันในการตรวจสอบและป้องกันความเสียหายของวงจร เช่น ฟังก์ชันตรวจจับระดับของศักดาไฟฟ้าและฟังก์ชันการ Shutdown เป็นต้น

จากข้อมูลดังกล่าวจึงเลือกใช้ IC ที่เป็น PWM ของ Motorola เบอร์ SG3526 ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ ตรงตามที่ต้องการ โดยที่ IC SG3526 ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้าตั้งแต่ $8.0\,V$ ถึง $35\,V$ มีศักดาไฟฟ้าอ้างอิง $5.0\,V$ สามารถสร้างความถี่ได้ตั้งแต่ 1.0 Hz ถึง 400 kHz มีฟังก์ชันการ

Shutdown และฟังก์ชันการ Reset เป็นต้น (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ข.) มีแผนการทำงานดังรูปที่ 3.2

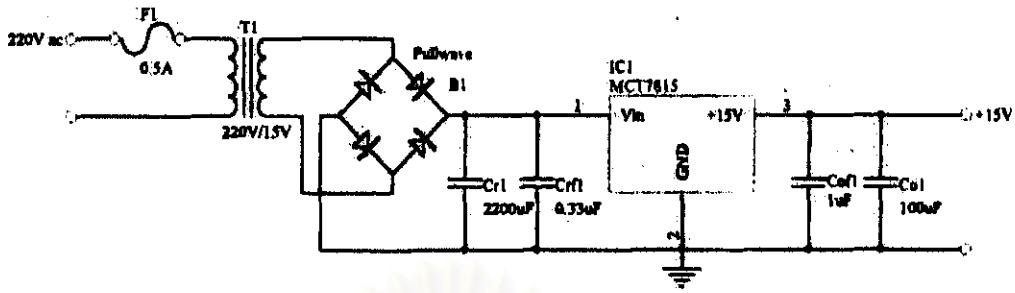


รูปที่ 3.2 IC SG3526

การออกแบบวงจรควบคุม PWM

ในงานวิจัยนี้ใช้ความถี่ในการสวิตช์ที่ 6 kHz ส่วนศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขาเกตของ MOSFET เท่ากับ $7.5V$ (ศักดาไฟฟ้าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง $6V$ ถึง $14V$ การออกแบบวงจร PWM ด้วย IC SG3526 ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญหลักๆ ดังนี้

ก. แหล่งจ่ายไฟฟ้าของ IC SG3526 ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 8.0 V ถึง 35 V โดยจะต้องจัดแหล่งจ่ายไฟป้อนเข้าที่ขา 17 (V_{CC}) และกราวนด์ของ SG3526 ที่ขา 15 สำหรับขาที่ 14 (V_C) คือ ขาคอลเลคเตอร์เปิดวงจรของทรานซิสเตอร์สองชุดที่จัดแบบคอมพลีเมนตารีทางด้านทางออกของ SG3526 โดยสามารถรับศักดาไฟฟ้าทำงานระหว่าง 4.5 V ถึง 35 V การจ่ายไฟฟ้าที่ขา 14 จึงสามารถทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองชุดทำงานและมีสัญญาณด้านทางออกมาที่ขา 13 (Output A) และขา 16 (Output B) ในที่นี้ได้เลือกจ่ายไฟฟ้าเพื่อการทำงานของ IC เท่ากับ 15 V ด้วยการใช้ IC ควบคุมศักดาไฟฟ้าสำเร็จรูป (3-Terminal Regulator) เบอร์ MCT7815 โดยรูปแบบของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับ IC SG3526

ข. ส่วนที่กำเนิดความถี่ จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าขาที่ 9, 10 และขาที่ 11 เป็นขา RC Timing ทำหน้าที่กำเนิดความถี่โดยสามารถเลือกค่าความจุของคาปาซิเตอร์และค่าความต้านทานได้ดังกราฟในภาคผนวก ข. ในงานวิจัยนี้เลือกค่าความจุของคาปาซิเตอร์ (C_T) ที่ 0.01 μF และใช้อุปกรณ์ความต้านทาน(R_T) แบบปรับค่าได้แบบ Volume 100 $k\Omega$ เพื่อทำให้สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในช่วง 2-60 kHz

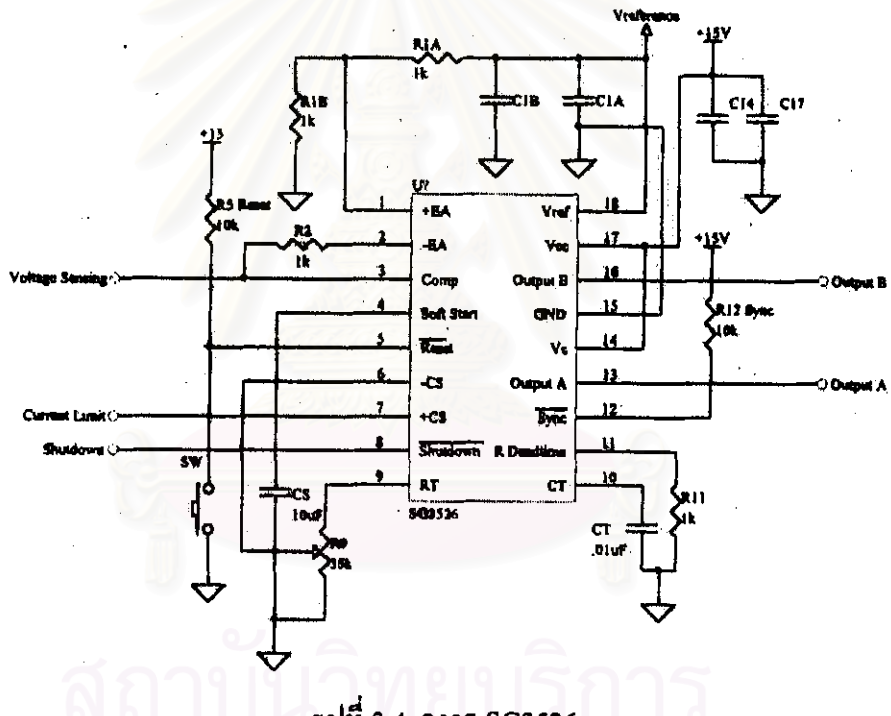
ค. Reset Mode ควบคุมที่ขา 5 ของ SG3526 การ Reset สามารถทำได้โดยควบคุมให้สัญญาณที่เข้าขาที่ 5 มีสถานะเป็นศูนย์ นั่นก็คือการต่อลงกราวนด์นั่นเอง เมื่อสัญญาณที่เข้าที่ขา 5 เป็นศูนย์ ภายในวงจร SG3526 จะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ภายใน IC ซึ่งหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ด้านทางออกหยุดการทำงาน

ง. Shutdown Mode ควบคุมที่ขา 8 ของ SG3526 การ Shutdown จะมีหลักการทำงานเหมือนกันกับการ Reset คือ การทำให้สถานะของขาที่ 8 เป็นศูนย์ วงจรภายใน SG3526 จะสั่งให้ทรานซิสเตอร์มีทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ด้านทางออกหยุดการทำงานเช่นกัน โดยขา Shutdown สามารถต่อร่วมกับวงจรที่ใช้ตรวจจับระดับศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าและสามารถทำการ Shutdown ได้โดยอัตโนมัติ

จ. Error Amplifier Connections ควบคุมที่ขา 1 (+Error) และขาที่ 2 (-Error) เป็นวงจรป้องกันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำเป็นวงจร Voltage Sensing ซึ่งสัญญาณที่ได้จะทำหน้าที่ควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ทางด้านทางออกและควบคุมการขับวงจรสวิตช์เพื่อแปรเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าของวงจรอินเวอร์เตอร์

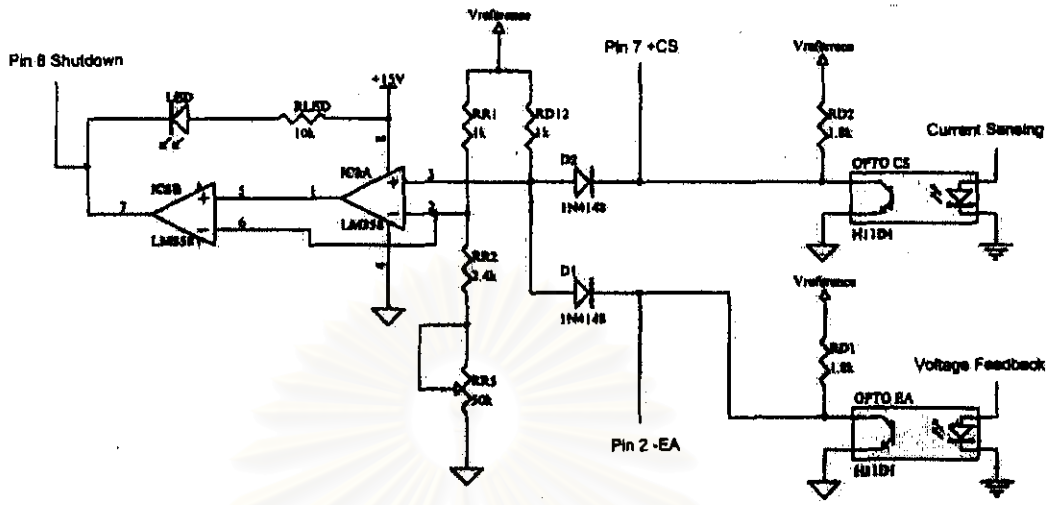
ฉ. Foldback Current Limiting ควบคุมที่ขา 6 (-CS) และขาที่ 7 (+CS) เป็นวงจรป้องกันที่มีโครงสร้างเหมือนกับ Error Amplifier Connections นำไปใช้ในการจำกัดกระแสไฟฟ้าสัญญาณที่ได้จะทำหน้าที่ควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ด้านทางออก

จากการจัดรูปแบบการทำงานของ IC SG3526 ดังกล่าวทำให้ระบบมีความสามารถในการป้องกันการทำงานผิดพลาดในวงจรตรวจความผิดปกติของศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มีฟังก์ชันการ Reset การ Shutdown และการแยกระบบกราวนด์ด้วยการขับสัญญาณผ่านอุปกรณ์แสง (OPTO) ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจร SG3526

สำหรับการตรวจความผิดปกติของศักดาไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ออกแบบใช้ IC OPAMP เบอร์ IC LM358 ทำหน้าที่เสมือน OR Gate เพื่อทำการตรวจจับสัญญาณของ Current Sensing และ Voltage Feedback ซึ่งถ้าหากสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งที่ตรวจจับมีความปกติเกิดขึ้นก็จะทำการส่งสัญญาณไปที่ขา 8 ของ IC SG3526 เพื่อทำการ Shutdown กล่าวคือ ถ้ามีสัญญาณเป็นศูนย์จากขาของ OPTO CS หรือ OPTO EA ใดเข้ามา อันเนื่องมาจากกระแสไหลเกินหรือศักดาไฟฟ้าด้านทางออกสูงเกินไป สัญญาณที่ส่งเข้ามาจากของ OPTO ใดๆ จะทำให้สัญญาณที่ส่งออกจากขา 7 ของ LM358 เป็นศูนย์ตามเพื่อทำการ Shutdown การทำงานของ IC SG3526



รูปที่ 3.5 วงจร OR-GATE สำหรับการ Shutdown

3.1.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิง

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิง มีขั้นตอนการออกแบบดังต่อไปนี้

ก. พิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Rating)

ในงานวิจัยนี้ ทำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดดังต่อไปนี้

1. ศักดาไฟฟ้าด้านทางเข้า	300	*V*
2. ศักดาไฟฟ้าด้านทางออก	50,000	*V*
3. กระแสไฟฟ้าด้านทางเข้า	4.2	*A*
4. กระแสไฟฟ้าด้านทางออก	0.025	*A*
5. กำลังไฟฟ้า	1,250	*W*
6. ความถี่ในการใช้งาน	6	*kHz*

7. รูปแบบในการทำงานเป็นแบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ในทางปฏิบัตินั้น วงจรไฟฟ้าแบบสวิตชิงจะมีประสิทธิภาพระหว่าง 68% ถึง 90% สำหรับงานวิจัยนี้ประเมินประสิทธิภาพที่ 80% ดังนั้น สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้งานจริงได้ดังนี้

จากสมการประสิทธิภาพ $$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \qquad (3.3)$$

จาก $\eta = 80\%$ และ $P_{out} = 1,250W$ สามารถหากำลังไฟฟ้าทางด้านทางเข้าใหม่ได้ ดังสมการ

กำลังไฟฟ้าทางด้านทางเข้า $$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \times 100\% \qquad (3.4)$$

ดังนั้น สามารถหากำลังไฟฟ้าด้านทางเข้า

$$P_{in} = \frac{1,250}{80} \times 100\% = 1,562.5\ W$$

และสามารถหากระแสไฟฟ้าทางด้านทางเข้าได้ดังสมการ

จากสมการกำลังไฟฟ้า $$P_{in} = P_{out} \qquad (3.5)$$

หรือ $$V_i I_i = V_o I_i \qquad (3.6)$$

จากสมการข้างต้นสามารถหากระแสไฟฟ้าทางด้านทางเข้า

$$I_i = \frac{P_o}{V_i} \qquad (3.7)$$

จาก $V_i = 300\ V$ และ $P_{out} = 1,562.5\ W$ สามารถหากระแสทางด้านทางเข้าได้ดังสมการ

กระแสทางด้านทางเข้า $I_i = \frac{1,562.5}{300} \approx 5.21\ A$

ข. การเลือกขนาดและชนิดของแกนหม้อแปลงไฟฟ้า (Core Selection)

ขนาดของแกนหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิงหาได้ดังสมการ

$$A_p = A_e A_w = \frac{0.68 \times P \times D \times 10^8}{f \times B_{max}} \qquad (3.8)$$

แทนค่า $P_{out} = 1{,}562.5\ W$, $D =$ 400 circular mil per amp, $f =$ 40 kHz และ $B_{max} =$ 2400 G ลงในสมการที่ 3.8 จะได้

$$\text{ขนาดของหม้อแปลง} = \frac{0.68 \times 1{,}562.5 \times 400 \times 10^8}{40 \times 10^3 \times 2400} = 442.71 \times 10^3\ cm^4$$

เลือกแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE80/76 มีค่า $A_e = 3.77\ cm^2$ และ $A_w = 14.80\ cm^2$ สามารถหา $A_e A_w = 3.77 \times 14.80 = 55.796\ cm^4$ จากทฤษฎีต้องเผื่อพื้นที่ของแกนหม้อแปลงไฟฟ้า คือ $A_e A_w$ ใหม่ $= 2 \times 55.796 = 111.592\ cm^4$ ดังนั้น ไม่สามารถใช้แกนเฟอร์ไรต์แบบ EE80/76 ตามปกติได้จึงต้องต่อแกนเพิ่ม

ค. หาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิ

สามารถหาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิได้ดังสมการ

$$N_P = \left(\frac{V_P \times \tau_m \times 10^3}{A_e \times B_{max}} \right) \qquad (3.9)$$

แทนค่า $V_P = 300\ V$, $\tau_m = 10\ \mu s$, $A_e = 377\ mm^2$, $\Delta B_m = 2400$ G ลงในสมการที่ 3.9 สามารถหาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิได้ดังสมการ

$$N_P = \left(\frac{300 \times 10 \times 10^3}{377 \times 240} \right) = 33.16 \text{ รอบ} \qquad \text{ดังนั้น } N_P = 34 \text{ รอบ}$$

ง. หาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิ

หาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิหาได้ดังสมการ

$$N_S = \frac{N_P \times V_S}{V_P} \qquad (3.10)$$

แทนค่า $N_P = 34$ รอบ, $V_S = 50{,}000\ V$ และ $V_P = 300\ V$ ลงในสมการที่ 3.10 สามารถหาจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิได้ ดังสมการ

$$N_S = \frac{34 \times 50{,}000}{300} = 5{,}666.67 \text{ รอบ} \quad \text{ดังนั้น } N_S = 5{,}666 \text{ รอบ}$$

จ. ขนาดของขดลวดตัวนำ

สามารถหาขนาดของขดลวดตัวนำได้จากสมการดังนี้

$$d_{wire} = I \times D \text{ circular mil} \qquad (3.11)$$

ขนาดขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิ

จาก $I_P = 5.2\ A$ แทนค่าลงในสมการจะได้

$$d_{wire} = 5.2 \times 400 = 2{,}080 \text{ circular mil}$$

เปิดตารางเทียบเบอร์ขนาดของขดลวดตัวนำในภาคผนวก ข. พบว่า d_{wire} จากการคำนวณมีค่าอยู่ระหว่างขดลวดตัวนำเบอร์ AWG 16 มีค่า d_{wire} = 2,583 circular mil และ AWG 17 มีค่า d_{wire} = 2,048 circular mil เลือกใช้ AWG 16 เพราะมีค่า d_{wire} มากกว่าค่า d_{wire} ที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้น ขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิมีขนาดเท่ากับ AWG 16

ขนาดขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิ

จาก $I_S = 0.025\ A$ แทนค่าลงในสมการจะได้

$$d_{wire} = 0.025 \times 400 = 10 \text{ circular mil}$$

จากตารางเทียบเบอร์ขนาดของขดลวดตัวนำในภาคผนวก ข. พบว่า d_{wire} จากการคำนวณมีค่าอยู่ระหว่างขดลวดตัวนำเบอร์ AWG 40 มีค่า d_{wire} = 9.9 circular mil และ AWG 39 มีค่า d_{wire} = 12.5 circular mil เลือกใช้ AWG 39 เพราะมีค่า d_{wire} มากกว่าค่า d_{wire} ที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้น ขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิมีขนาดเท่ากับ AWG 39

แต่จากการทดลองไม่สามารถใช้ขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิขนาด AWG 39 ได้ เนื่องจากขณะทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิจะมีอุณหภูมิสูงมากจนทำให้เกิดการอาร์คระหว่างขดลวดตัวนำ เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากขดลวดตัวนำทำให้ความเป็นฉนวนสูญเสียไป ดังนั้น จึงเปลี่ยนไปใช้ขดลวดตัวนำขนาด AWG 30 ซึ่งทำให้มีขนาดของขดลวดตัวนำเพิ่มขึ้นประมาณ 30% อุณหภูมิของขดลวดตัวนำขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานอยู่ในระดับปกติ

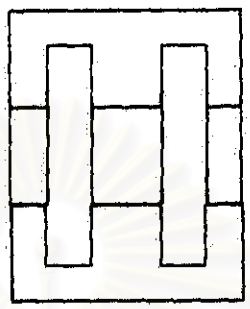
ฉ. การพันขดลวดตัวนำและการฉนวน

การออกแบบวิธีการพันขดลวดตัวนำและการฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิงจะต้องพิจารณาถึงการนำไปใช้งานและความปลอดภัยในการใช้งานหลักและเนื่องจากแกนหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ EE80/76 ที่มีจำหน่ายไม่มีบอบบินมาให้ จึงต้องทำการสร้างบอบบินขึ้น

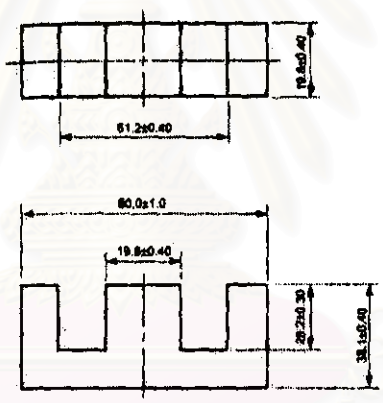
ฉ.1 การออกแบบและสร้างบอบบิน

การออกแบบบอบบินสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าศักดาสูงให้เหมาะสมกับการพันขดลวดตัวนำจะต้องคำนึงถึงขนาดของศักดาไฟฟ้าเป็นหลัก ในขณะเดียวกันขนาดของแกนตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าก็มีความจำเป็นในการออกแบบและสร้างบอบบิน เพื่อให้ได้ขนาดของบอบบินที่พอเหมาะกับแกนตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้เลือกแกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาด

พื้นที่ในการพันขดลวดมากที่สุดและมีจำหน่ายในประเทศ คือ แกนเฟอร์ไรต์แบบ EE80/76 ซึ่งขนาดของแกนตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟอร์ไรต์แบบ EE80/76 มีขนาดดังนี้



รูปที่ 3.6 ขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE80/76

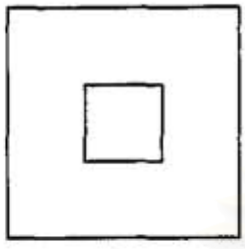


รูปที่ 3.7 การเพิ่มเนื้อที่การพันขดลวดด้วยการต่อความยาวของแกนตัวนำ

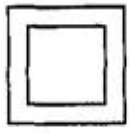
เนื่องจากไม่สามารถพันขดลวดตัวนำได้ทั้งหมดจากตามที่คำนวณลงในขนาดของแกนตัวนำปกติ จึงจำเป็นต้องทำการต่อแกนตัวนำเพิ่มอีกหนึ่งส่วน เพื่อทำให้มีเนื้อที่ในการพันขดลวดตัวนำเพิ่มขึ้น แต่ในทางปฏิบัติก็ไม่สามารถพันขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิได้ทั้งหมด เนื่องจากความหนาของฉนวนที่หาได้ ซึ่งสามารถพันขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิได้เพียง 5,000 รอบเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 3.6

ส่วนของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิจะต้องแยกห่างจากขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิ เพื่อป้องกันการอาร์คระหว่างขดลวดทั้งสอง ผนังของบอบบินจะใช้แผ่นไฟเบอร์ซึ่งมีค่า

ความเป็นฉนวนสูง (รายละเอียดดังภาคผนวก ข.) มาเจาะช่องและตัดทำเป็นผนัง ส่วนตัวแกนบอบบินจะใช้พลาสติกใสหนามาตัดและเจาะช่อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

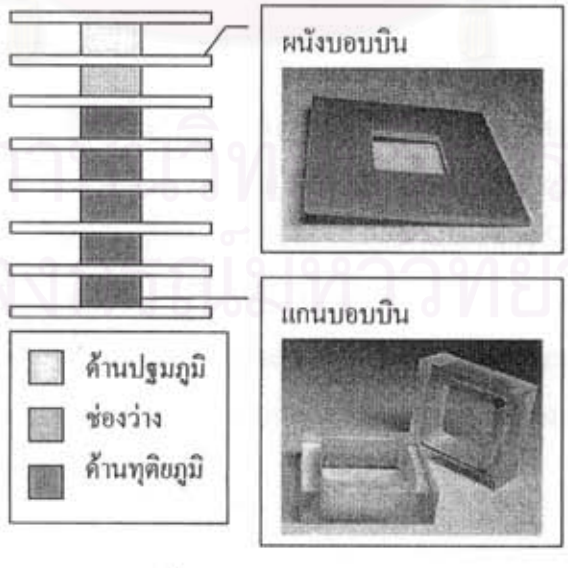


ผนังของบอบบิน ทำมาจากแผ่นไฟเบอร์หนา 2 มิลลิเมตร ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้าง 6 เซนติเมตรและมีความยาว 6 เซนติเมตร ส่วนช่องด้านในตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 2 เซนติเมตร



แกนของบอบบิน ทำจากพลาสติกประเภท Acrylic ใสหนา 1 เซนติเมตร โดยตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้าง 3 เซนติเมตร และมีความยาว 3 เซนติเมตร ส่วนช่องด้านในตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความกว้าง 2 เซนติเมตร และมีความยาว 2 เซนติเมตร

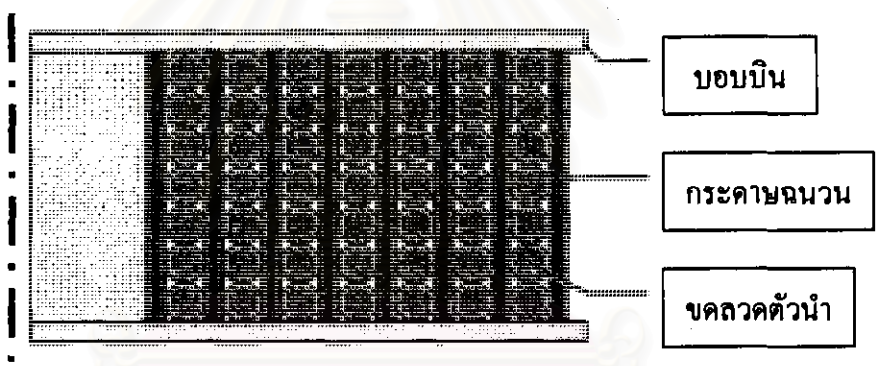
การทำบอบบินหนึ่งชุดจะต้องการแกนของบอบบินไว้จำนวน 7 แกนและผนังของบอบบินไว้จำนวน 8 แผ่น และประกอบกันตามดังรูปที่ 3.8 ซึ่งเมื่อนำแกนมาประกอบส่วนของบอบบินที่มีขดลวดตัวนำพันอยู่ก็จะถูกจัดเรียงโดยรูปแบบของแกน ทำให้สามารถถอดออกมาตรวจสอบหรือซ่อมแซมได้เป็นส่วนๆ



รูปที่ 3.8 แสดงแบบของบอบบิน

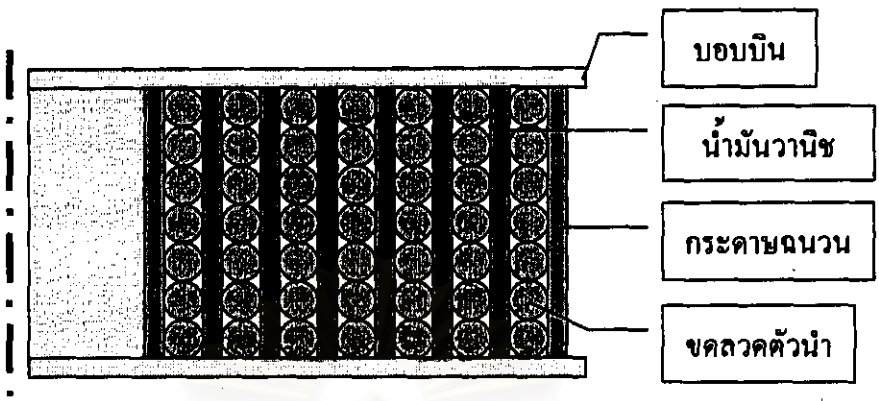
ฉ.2 การพันขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิ

จากจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิเท่ากับ 34 รอบ ใช้ขดลวดตัวนำเบอร์ AWG 16 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0531 นิ้ว หรือประมาณ 0.135 เซนติเมตร บอบบินมีขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ∴ สามารถพันขดลวดตัวนำได้เท่ากับ $\frac{1}{0.135} \approx 7$ รอบต่อชั้นและสามารถพันขดลวดตัวนำทั้งหมดเท่ากับ $\frac{34}{7} = 4.8 = 5$ ชั้น แต่ละชั้นที่พันขดลวดตัวนำจะพันทับด้วยกระดาษฉนวนซึ่งมีความหนาเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 0.01 เซนติเมตร จำนวน 7 ชั้น ช่องว่างในการพันขดลวดตัวนำมีประมาณ 1.5 เซนติเมตร รวมความสูงของขดลวดตัวนำและเทปฉนวนเท่ากับ $(5 \times 0.135) + (7 \times 0.01) = 0.745$ เซนติเมตร ซึ่งพอสำหรับการพันขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิและฉนวนทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงรูปตัดขวางของบอบบินที่พันขดลวดตัวนำ

ในทางปฏิบัตินั้นการพันขดลวดตัวนำหนึ่งชั้นแล้วพันด้วยกระดาษฉนวนในแต่ละชั้น จะไม่สามารถพันขดลวดตัวนำได้ครบตามจำนวนรอบที่ได้คำนวณมา จึงจำเป็นต้องลดกระดาษฉนวนที่พันรองในแต่ละชั้นของขดลวดตัวนำลง เหลือเพียงพันด้วยกระดาษฉนวนสองชั้น คือ ชั้นแรกที่รองระหว่างบอบบินกับขดลวดตัวนำชั้นแรก ส่วนชั้นต่อๆ ไปจะอาศัยฉนวนของขดลวดตัวนำเอง ซึ่งตามปกติโดยทั่วไปจะทนแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 600 โวลต์และจะพันกระดาษฉนวนอีกครั้งในชั้นสุดท้าย โดยในแต่ละชั้นเองก็จะเพิ่มความเป็นฉนวนด้วยการทาน้ำมันวานิช ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงรูปตัดขวางของบอบบินที่พันขดลวดตัวนำในทางปฏิบัติ

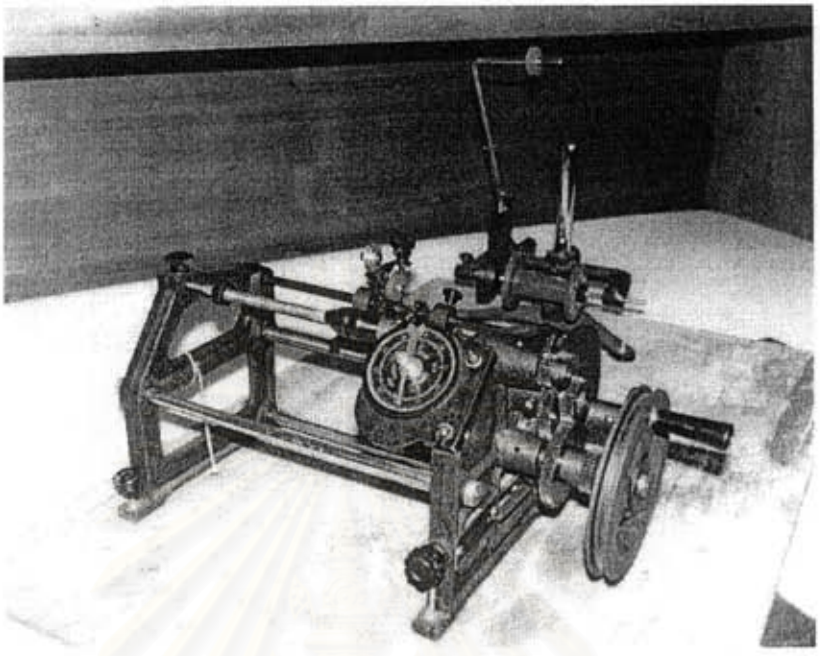
ฉ.3 การพันขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิ

จากจำนวนรอบของขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิเท่ากับ 5,000 รอบ บอบบินที่ออกแบบมาให้สามารถพันขดลวดตัวนำออกเป็น 5 ชุด โดยแต่ละชุดจะพันขดลวดตัวนำจำนวน 1,000 รอบ ใช้ขดลวดตัวนำเบอร์ AWG 30 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0113 นิ้ว หรือประมาณ 0.029 เซนติเมตร บอบบินมีขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ∴ สามารถพันขดลวดตัวนำได้เท่ากับ $\frac{1}{0.029} \approx 34$ รอบต่อชั้น และสามารถพันขดลวดตัวนำทั้งหมดเท่ากับ $\frac{1000}{34} = 29$ ชั้น แต่ละชั้นที่พันขดลวดตัวนำจะพันทับด้วยกระดาษฉนวนซึ่งมีความหนาเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 0.01 เซนติเมตร จำนวน 31 ชั้น ช่องว่างของบอบบินในการพันขดลวดตัวนำมีประมาณ 1.7 เซนติเมตร สามารถรวมความสูงของขดลวดตัวนำและเทปฉนวนเท่ากับ $(29 \times 0.029) + (29 \times 0.01) = 1.131$ เซนติเมตร ซึ่งพอสำหรับการพันขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิและฉนวนทั้งหมด

ช. ขั้นตอนการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

1. ก่อนการพันขดลวดตัวนำ ควรตรวจสอบความเรียบร้อยของบอบบินและขดลวดตัวนำทุกครั้ง ไม่ควรนำขดลวดตัวนำที่ชำรุด เช่น ถลอก มาทำการพัน

2. พันขดลวดตัวนำลงบนบอบบินตามที่ออกแบบไว้โดยใช้เครื่องพันขดลวด ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งการพันขดลวดตัวนำแต่ละรอบและแต่ละชั้นควรเรียงชิดติดกันและแน่นพอประมาณ



รูปที่ 3.11 เครื่องพันขดลวด

3. การพันเทปฉนวนควรพันให้ครอบคลุมทั่วขดลวดตัวนำและตามจำนวนชั้นที่ได้ออกแบบไว้ งานวิจัยนี้ได้ทาน้ำมันวานิชสองถึงสามครั้ง โดยทาน้ำมันวานิชบางๆ ที่ขดลวดแต่ละชั้นรอจนแห้งแล้วจึงพันด้วยกระดาษฉนวนหนึ่งชั้น

4. นำขดลวดตัวนำที่พันเสร็จแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง (อุณหภูมิและเวลาในการอบของน้ำมันวานิชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ควรดูจากข้อมูลของน้ำมันวานิชที่ใช้ สำหรับรายละเอียดของน้ำมันวานิชที่ใช้ แสดงดังภาคผนวก ข.)

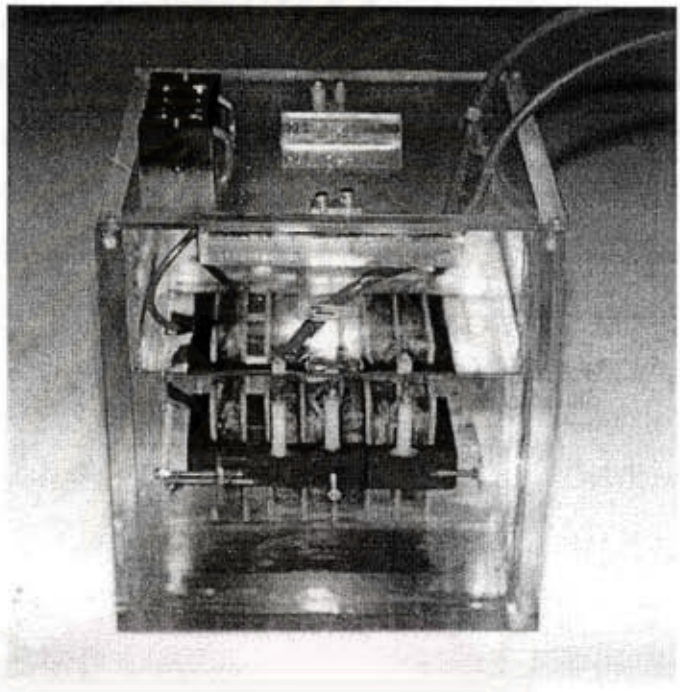
5. นำขดลวดแต่ละชุดมาประกอบกันเป็นบอบบินและนำแกนเฟอร์ไรต์มาใส่เข้ากับบอบบิ้น ใช้วัสดุที่เป็นฉนวนยึดแกนเฟอร์ไรต์ให้ประกบกันสนิท

6. ต่อสายไฟฟ้าศักดาต่ำเข้ากับขดลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิ ต่อขดลวดตัวนำของแต่ละชุดทางด้านทุติยภูมิแบบอนุกรมเข้าด้วยกันและต่อสายไฟฟ้าศักดาสูงเข้ากับขดลวดตัวนำทางด้านทุติยภูมิ

7. สร้างกล่องพลาสติกใสสำหรับใส่หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิง โดยใช้น้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นฉนวน เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้มีพิกัดสูง ก่อนนำหม้อแปลงแช่ในน้ำมันหม้อแปลง ควรนำน้ำมันหม้อแปลงไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 60°C ถึง 70°C เพื่อไล่ความชื้นประมาณ 1 ถึง 2 ชั่วโมง ตามข้อมูลของน้ำมันหม้อแปลงแต่ละชนิด เมื่ออบเสร็จแล้วควรนำไปเข้าเครื่องสุญญากาศเพื่อดูดอากาศและความชื้นที่อาจปนมากับน้ำมันหม้อแปลงออก

8. หม้อแปลงไฟฟ้าที่จะแช่น้ำมันต้องมีความสะอาด เพราะหากมีสิ่งที่ปนเปื้อนอยู่ เวลาที่ใช้งานหม้อแปลงสิ่งที่ปนเปื้อนอยู่เหล่านี้อาจทำความเสียหายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าได้

9. เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าแช่น้ำมันแล้วควรนำเข้าเครื่องสุญญากาศ เพื่อดูดอากาศที่อยู่ในหม้อแปลงไฟฟ้าออกให้หมดเพื่อให้น้ำมันได้เข้าไปแทนที่ก่อนการใช้งาน หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิงใช้น้ำมันเป็นฉนวนที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูป 3.12



รูปที่ 3.12 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสวิตชิงขนาด 50 กิโลโวลต์

ในส่วนของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงแบบสวิตชิงขนาด 100 kV ซึ่งประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสและกรองแรงดัน วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเรียงกระแสไฟฟ้าด้านทางออกแบบทวีศักดาไฟฟ้าสองเท่า วงจรควบคุมแบบ PWM ทั้งวงจร รวมทั้งแผ่นพิมพ์วงจร (PCB) แสดงในภาคผนวก ก. ตามลำดับ