

บทที่ 3

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1 Versus Apparent Power, P_t [1]

โดยทั่วไปกำลังงานเอาต์พุต, P_o คือสิ่งที่ผู้ใช้งานสนใจที่สุด แต่สำหรับผู้ออกแบบแล้ว Versus Apparent Power, P_t คือสิ่งที่สำคัญกว่าและใช้กำหนดกับของหม้อแปลง เพื่อให้เกิดความสะดวกในการคำนวณสมมุติให้ Window Area, W_a ของหม้อแปลงมีเพียง 2 ขดลวด คือ ขดปฐมภูมิ และทุติยภูมิ เราจะประมาณว่า W_a จะถูกกำหนดโดยสัดส่วนการใช้กำลังงานของขดลวด โดยใช้สมการความหนาแน่นกระแส J ซึ่งขดลวดปฐมภูมิจะรับกำลังงานอินพุตและทุติยภูมิจะส่งผ่านกำลังงานเอาต์พุตให้กับโหลด ดังนั้นกำลังงานของหม้อแปลงที่ใช้ในการออกแบบจะใช้ทั้งกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต

$$P_t = P_{in} + P_o \quad W \quad (3.1)$$

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} \quad W \quad (3.2)$$

จำนวนรอบปฐมภูมิสามารถคำนวณโดยใช้กฎของ Faraday

$$N_p = \frac{V_p(10^4)}{A_c B_{ac} f K_f} \text{ turn} \quad (3.3)$$

พื้นที่ขดลวดของหม้อแปลงจะใช้ประโยชน์ได้เต็มที่เมื่อ

$$K_u W_a = N_p A_{wp} + N_s A_{ws} \quad (3.4)$$

จากนิยามของ พื้นที่หน้าตัดสาย(Wire Area) คือ

$$A_w = \frac{I}{J} \text{ cm}^2 \quad (3.5)$$

จัดรูปสมการใหม่เป็น

$$K_u W_a = N_p \left(\frac{I_p}{J} \right) + N_s \left(\frac{I_s}{J} \right) \quad (3.6)$$

จะได้สมการแทนกฎของ Faraday คือ

$$K_u W_a = \frac{V_p(10^4)}{A_c B_{ac} f K_f} \left(\frac{I_p}{J} \right) + \frac{V_s(10^4)}{A_c B_{ac} f K_f} \left(\frac{I_s}{J} \right) \quad (3.7)$$

จัดรูปสมการใหม่

$$W_a A_c = \frac{[(V_p I_p) + (V_s I_s)](10^4)}{B_{ac} f J K_f K_u} \text{cm}^4 \quad (3.8)$$

กำลังงานเอาต์พุต คือ

$$P_o = V_s I_s \text{ W} \quad (3.9)$$

กำลังงานอินพุต คือ

$$P_{in} = V_p I_p \text{ W} \quad (3.10)$$

เมื่อ

$$P_t = P_{in} + P_o \text{ W} \quad (3.11)$$

แทน P_t ในสมการ

$$W_a A_c = \frac{P_t(10^4)}{B_{ac} f J K_f K_u} \text{cm}^4 \quad (3.12)$$

จากนิยาม A_p คือ

$$A_p = W_a A_c \text{cm}^4 \quad (3.13)$$

จะได้

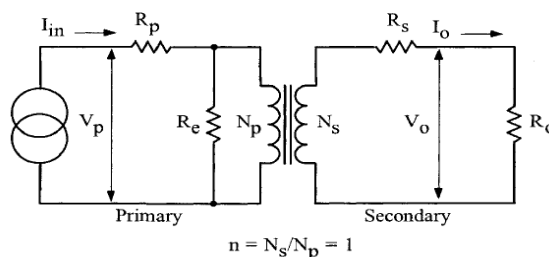
$$A_p = \frac{P_t(10^4)}{B_{ac} f J K_f K_u} \text{cm}^4 \quad (3.14)$$

ผู้ออกแบบควรจะให้ความสนใจกับ P_t และความสามารถในการจัดการกับกำลังงานของแกนและขดลวด ค่า P_t อาจจะเปลี่ยนตามการใช้งาน จะมีค่าประมาณ 2 ถึง 2.282 เท่าของกำลังงานอินพุต ขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรที่ใช้กับหม้อแปลง หากการเรียงกระแสมีการขัดจังหวะจากวงจรจะมีผลให้ค่า RMS มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ขนาดของหม้อแปลงไม่ได้พิจารณาจากโพลต์เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เพราะความแตกต่างของการสูญเสียในขดลวดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของ Waveform

3.2 Voltage Regulation

หม้อแปลงขนาดเล็กโดยทั่วไปจะพิจารณาจากการจำกัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือดูจากการควบคุมแรงดัน เราประมาณให้ขนาดและน้ำหนักให้มันน้อยที่สุด ในภาพที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึง Circuit Diagram ของหม้อแปลงที่มีขดลวดทุกขดมีหนึ่งขด

$\alpha = \text{Regulation}(\%)$



ภาพที่ 3.1 Transformer Circuit Diagram.

เมื่อประมาณให้หม้อแปลงมีขนาดและน้ำหนักน้อยที่สุดความจุไฟฟ้าที่กระจายในขดลวด
 ทดขุมสามารถละทิ้งไปได้ เพราะความถี่และแรงดันทางด้านขดขุมไม่ได้มากเกินไปกว่าค่าที่
 ยอมรับได้มาก ยิ่งกว่านั้นรูปทรงของขดลวดก็ถูกออกแบบให้จำกัดการรั่วไหลของเส้นแรง ให้อยู่ใน
 ระดับเพียงพอที่จะละทิ้งไปได้ ภายใต้สภาวะการทำงาน

Voltage Regulation ของหม้อแปลงคำนวณได้จาก

$$\alpha = \frac{V_o(N.L.) - V_o(F.L.)}{V_o(F.L.)} (100) \quad \% \quad (3.15)$$

$$\text{หรือ} \quad \alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} (100) \quad \% \quad (3.16)$$

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างKg กับ Voltage Regulation

ถึงแม้ว่าส่วนใหญ่หม้อแปลงจะถูกออกแบบเพื่อให้มีอุณหภูมิการทำงานที่ต้องการเรายังสามารถออกแบบเพื่อให้มี Voltage Regulation ที่ต้องการได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ของ α และ Kg ดังสมการ

$$\alpha = \frac{P_t}{2K_g K_e} \% \quad (3.17)$$

ค่าคงที่ Kg พิจารณาจากรูปทรงของแกน ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$K_g = \frac{W_a A_c^2 K_u}{MLT} \text{ cm}^5 \quad (3.18)$$

ค่าคงที่ Ke พิจารณาจากสภาวะการทำงานในทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$K_e = 0.145 K_f^2 f^2 B_m^2 (10^{-4}) \quad (3.19)$$

| | | |
|-------|------------|---------------------------|
| เมื่อ | f | = ความถี่ |
| | B_m | = Flux Density |
| | K_f | = Waveform Coefficient |
| | โดยเท่ากับ | 4.0 เมื่อเป็น Square Wave |
| | | 4.44 เมื่อเป็น Sine Wave |

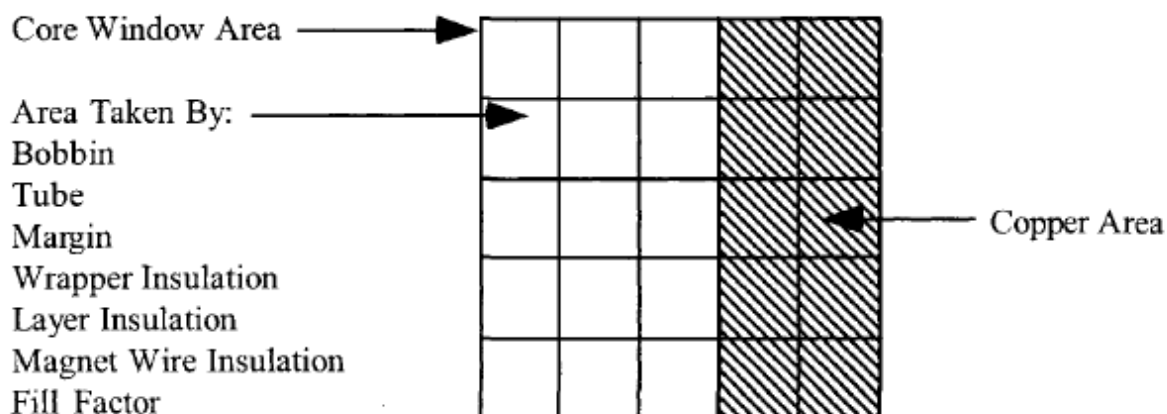
จากสมการข้างบนจะเห็นว่า Flux Density ความถี่ที่ใช้งาน และรูปแบบของคลื่นนั้นมีผลกับขนาดของหม้อแปลง

3.4 แฟกเตอร์ของพื้นที่ช่องว่างการพันขดลวด (Window utilization factor, K_u)

ในแกนแม่เหล็กแต่ละชนิดมีช่องว่างสำหรับการพันขดลวด ในการออกแบบหม้อแปลงหรือตัวเหนี่ยวนำจะต้องคำนึงถึงค่าแฟกเตอร์ของช่องว่างที่จะบรรจุลวดตัวนำลงไปให้พอดีกับช่องว่างในแกนเหล็กแต่ละชนิด ซึ่งสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงมีดังต่อไปนี้

- 1) ฉนวนของลวดตัวนำ (Wire Insulation)
- 2) การจัดวางลวดตัวนำ (Wire Lay)
- 3) พื้นที่ของบ็อบบิ้น (Bobbin)
- 4) ความต้องการของชั้นฉนวน หรือฉนวนระหว่างชั้นตัวนำ

ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อกัน โดยตรงกับค่า K_u โดยปกติเราให้กำหนดให้ค่า $K_u = 0.4$ ดังที่แสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 Window Area ที่ถูกพัน โดยลวดตัวนำ

แฟกเตอร์ K_u โดยทั่วไปคำนวณได้จากพื้นที่ S_1, S_2, S_3 และ S_4

$$K_u = S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4$$

(3.20)

โดยที่ $S_1 = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำ} + \text{ฉนวน}}$

$$S_2 = \frac{(\text{จำนวนรอบ})(\text{พื้นที่หน้าตัดสายตัวนำหนึ่งรอบ})}{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้งานได้}} \approx 0.6$$

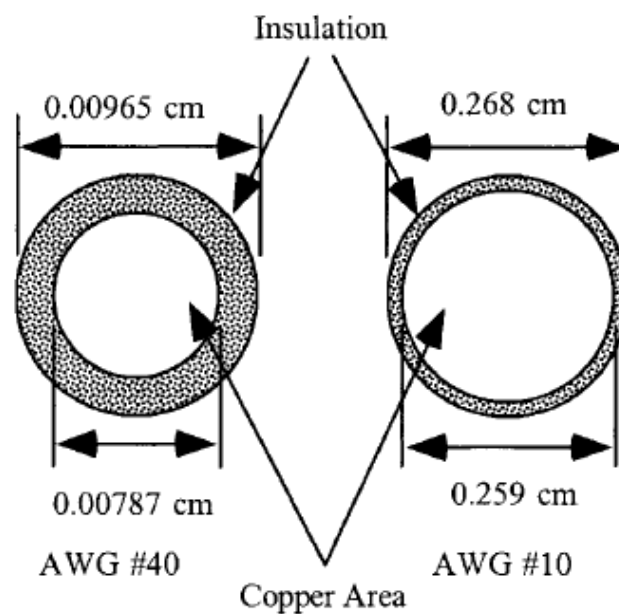
$$S_3 = \frac{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้ได้}}{\text{พื้นที่ช่องว่างทั้งหมด}} \approx 0.75$$

$$S_4 = \frac{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้ได้}}{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้ได้} + \text{พื้นที่ฉนวน}} \approx 1$$

3.4.1 S_1 Wire Insulation

ในการออกแบบหม้อแปลงไม่ว่ากระแสสูงหรือกระแสต่ำอัตราส่วนของพื้นที่ตัวนำ (Ratio Of Conductor Area) ทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.941 ถึง 0.673 ขึ้นอยู่กับขนาดของลวดตัวนำ ดังในภาพที่ 3.3 ความหนาของฉนวนทำให้ตัวนำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากเกินความเป็นจริง แสดงให้เห็นว่าฉนวนมีผลกับขนาดพื้นที่ทั้งหมดของลวดตัวนำ

หากเราดูในภาพที่ 3.3 นั้น จะใช้สายตีเกลียวเพื่อลดผลของ Skin Effect จะทำให้เกิดผลกระทบที่สำคัญกับค่า Window Utilization factor, K_u ค่าของ S_1 ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของลวดตัวนำ แต่ขึ้นอยู่กับจำนวนของลวดตัวนำ ในตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของลวดตัวนำ กับฉนวนในการใช้งานแต่ละประเภท เมื่อเราออกแบบหม้อแปลงกระแสต่ำควรอย่างยิ่งที่จะนำค่าอัตราส่วนนี้มาประเมินค่า S_1 เพราะหากฉนวนหนาขึ้นพื้นที่หน้าตัดตัวนำก็จะมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 3.3 เปรียบเทียบขนาดฉนวนของลวดตัวนำแต่ละขนาด

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของอัตราส่วนถ่วงต่อขนาดตัวนำ

| Magnetic Wire Data (Nominal) | | | | | |
|------------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| Size AWG | Bare Area (cm ²) | Ratio Bare/Single | Ratio Bare/Heavy | Ratio Bare/Triple | Ratio Bare/Quad |
| 10 | 0.1019 | 0.961 | 0.930 | 0.910 | 0.880 |
| 15 | 0.0571 | 0.939 | 0.899 | 0.867 | 0.826 |
| 20 | 0.0320 | 0.917 | 0.855 | 0.812 | 0.756 |
| 25 | 0.0179 | 0.878 | 0.793 | 0.733 | 0.662 |
| 30 | 0.0100 | 0.842 | 0.743 | 0.661 | 0.574 |
| 35 | 0.0056 | 0.815 | 0.698 | 0.588 | 0.502 |
| 40 | 0.0031 | 0.784 | 0.665 | 0.544 | 0.474 |

3.4.2 S₂ Fill Factor

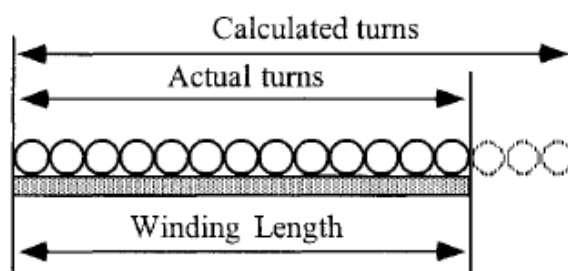
S₂ คือ เฟคเตอร์ของการวางลวดตัวนำ หรือ ชั้นของลวดตัวนำ สำหรับพื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้งานได้ เมื่อขดลวดมีจำนวนรอบมากๆทำให้มีความหนาแน่นของการเรียงตัวของลวดตัวนำสูงในการพันเราจะวางเรียงตัวนำใน Bobin ได้น้อยกว่าที่คำนวณประมาณ 10 – 15% ขึ้นอยู่กับเครื่องมือและทักษะในการพัน ดังที่ภาพที่ 3.4 ชั้นวางลวดตัวนำขึ้นอยู่กับ ความตึงของลวดตัวนำและคุณภาพของลวดตัวนำ เช่น ความต่อเนื่องของเส้นผ่านศูนย์กลางสายและเทคนิคการพันสาย ซึ่งขึ้นอยู่กับทักษะของผู้พันสาย เฟคเตอร์ของการวางลวดตัวนำมีความสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงตามขนาดของสายในพื้นที่การวางสายดังแสดงให้เห็นในตาราง 3.2 และ 3.3 โดยตารางได้แสดงถึงด้านนอกของเส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำประเภทใช้งานหนักตั้งแต่เบอร์ 10 - 44 AWG

ตารางที่ 3.2 ตารางเฟคเตอร์การวางสาย

| Wire Lay Factor For Layer Wound Coils | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| AWG | Insulated Wire OD (inch) | Insulated Wire OD (cm) | Wire Lay Factor |
| 10 to 25 | 0.1051 - 0.0199 | 0.2670 - 0.0505 | 0.90 |
| 26 to 30 | 0.0178 - 0.0116 | 0.0452 - 0.0294 | 0.89 |
| 31 to 35 | 0.0105 - 0.0067 | 0.0267 - 0.0170 | 0.88 |
| 36 to 38 | 0.0060 - 0.0049 | 0.0152 - 0.0124 | 0.87 |
| 39 to 40 | 0.0043 - 0.0038 | 0.0109 - 0.0096 | 0.86 |
| 41 to 44 | 0.0034 - 0.0025 | 0.00863 - 0.00635 | 0.85 |
| Heavy film magnetic wire. | | | |

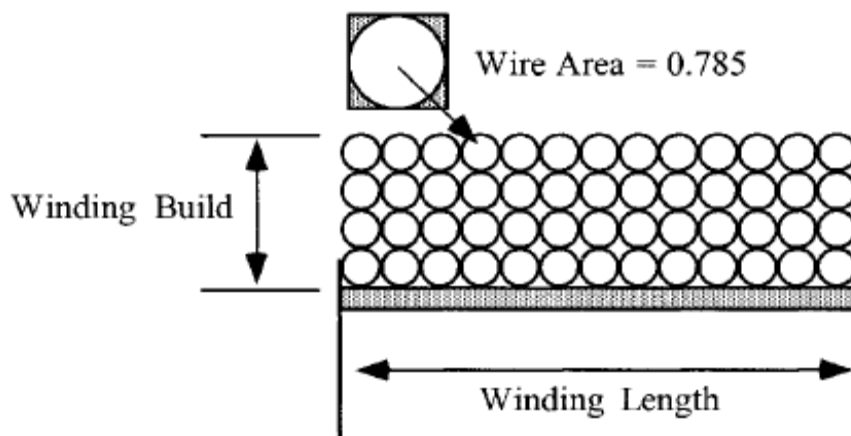
ตารางที่ 3.3 ตารางเฟคเตอร์เมื่อการวางสายไม่เป็นระเบียบ

| Wire Lay Factor For Random Wound Coils | | | |
|----------------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| AWG | Insulated Wire OD (inch) | Insulated Wire OD (cm) | Wire Lay Factor |
| 10 to 22 | 0.1051 - 0.0276 | 0.267 - 0.0701 | 0.90 |
| 23 to 39 | 0.0623 - 0.0109 | 0.0249 - 0.0043 | 0.85 |
| 40 to 44 | 0.0038 - 0.0025 | 0.0096 - 0.00635 | 0.75 |
| Heavy film magnet wire. | | | |



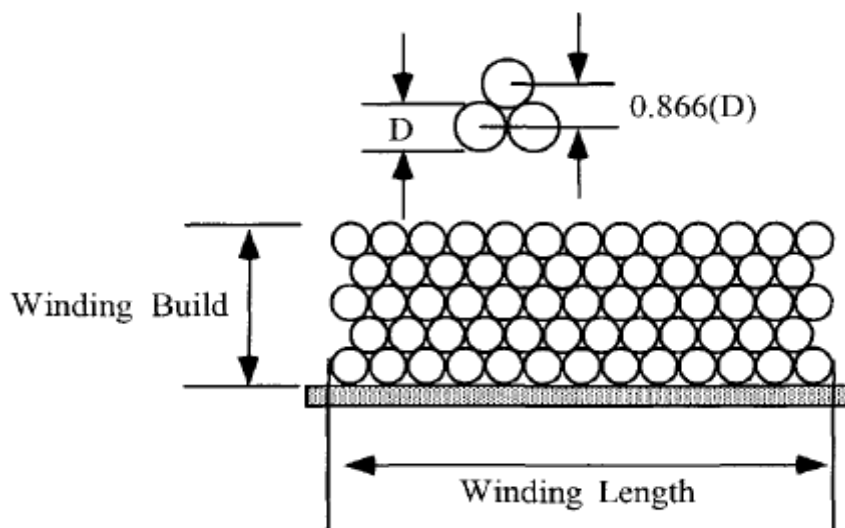
ภาพที่ 3.4 ความยาวของการวางสายที่สามารถทำได้ต่อพื้นที่การวาง

การวางสายในอุดมคติ 2 แบบคือการวางสายแบบสี่เหลี่ยม(Square)ดังแสดงใน ภาพที่ 3.5 และการวางสายแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal)ดังแสดงในภาพที่ 3.6การวางสายที่ง่ายที่สุดคือวางให้เสมอกันรอบต่อรอบและวางชั้นต่อชั้นดังในรูปที่ 3.5การวางสายแบบสี่เหลี่ยม(Square)ทางทฤษฎีให้ใช้ค่าแฟคเตอร์เท่ากับ0.785



ภาพที่ 3.5 การวางสายแบบสี่เหลี่ยม (Square) แฟคเตอร์= 0.785

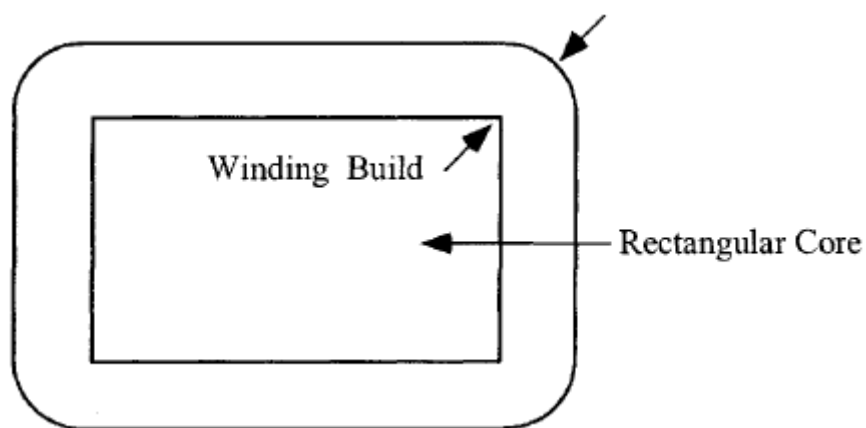
ตามที่ปรากฏจะดีกว่าหากใช้การวางสายแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal)ดังแสดงในภาพที่3.6 เปรียบเทียบการวางสายแบบสี่เหลี่ยม(Square)ดังแสดงใน ภาพที่ 3.5 ในการวางสายแบบสี่เหลี่ยมนี้ ความเป็นจริงเราไม่สามารถวางสายซ้อนทับด้านบนของกันและกันชั้นต่อชั้นได้อย่างสม่ำเสมอเหมือนการวางสายแบบสี่เหลี่ยมในอุดมคติ เพราะจะมีร่องของสายชั้นที่ต่ำกว่าเมื่อเราพันในชั้นต่อไป ในการพันแบบหกเหลี่ยมนี้สายจะมีความแน่นมากที่สุดการวางสายแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal)จะมีค่าทางทฤษฎีที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.9072การวางสายแบบสี่เหลี่ยม(Square) ที่ใช้ค่า 0.785 เป็นไปไม่ได้ที่จะพันได้สำเร็จโดยไม่มีชั้นฉนวนกันแต่ละชั้นของการพัน ฉนวนที่เพิ่มเข้ามาจะลดค่าแฟคเตอร์การวางสายลง และหากใช้การวางสายแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal) ที่ใช้ค่า 0.907 ก็เป็นเรื่องยากเพราะการพันการวางสายแบบหกเหลี่ยม(Hexagonal) ด้วยมีอนั้น จะเกิดผลในการพันตามมาดังนี้ ในชั้นแรกการพันจะสามารถพันได้อย่างเรียบร้อยในชั้นที่สองความยากในการพันจะเกิดขึ้นและชั้นที่สาม,สี่และชั้นต่อไปจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของขดลวดเกิดขึ้น วิธีการพันแบบนี้จึงเหมาะกับงานที่มีจำนวนรอบน้อยๆ หากงานมีจำนวนรอบมากๆอาจทำให้ขดลวดที่พันเสร็จไม่เป็นระเบียบเรียบร้อยได้



ภาพที่ 3.6 การวางสายแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) เฟลคเตอร์= 0.907

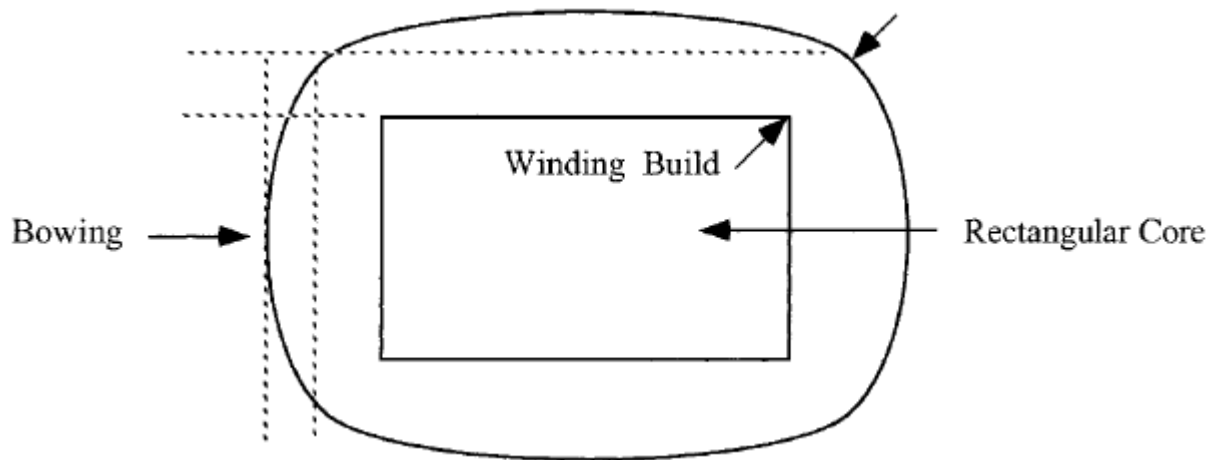
การพันขดลวดในอุดมคติของ Bobbin ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ในการพันขดลวดบน Bobbin ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ความสูงของชั้นขดลวดต้องไม่ออกนอกขอบเขตของ Bobbin ไม่นับออกมาหรือสูงจนเกิดความโค้ง (Bowling) ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ความโค้งของขดลวดขึ้นอยู่กับสัดส่วนของขดลวดและความสูงของขดลวด โดยปกติที่ใช้งานอยู่จริงควรลดการพันขดลวดลง 15 ถึง 20% หรือ 0.85X ของการพันปกติ จะทำให้ผลของความโค้งของขดลวด (Bowling) จะไม่สำคัญอีกต่อไป

สุดท้ายเมื่อการเปรียบเทียบการวางสายแบบสี่เหลี่ยม(Square) โดยใช้แผ่นจนวนวางแต่ละชั้นกับแบบการวางสายแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) และพันบิดเบี้ยวไม่เป็นระเบียบ ทั้งสองแบบดูเหมือนว่าจะมีค่าเฟคเตอร์การวางสายอยู่ที่ประมาณ 0.61 ตัวอย่างเช่น เมื่อเราออกแบบเราต้องมี Bobbin ที่เหมาะสม มีขนาดสายและจำนวนรอบการพันที่เหมาะสม นี่คือน่าสนใจที่นำไปที่เกิดขึ้นในการออกแบบ

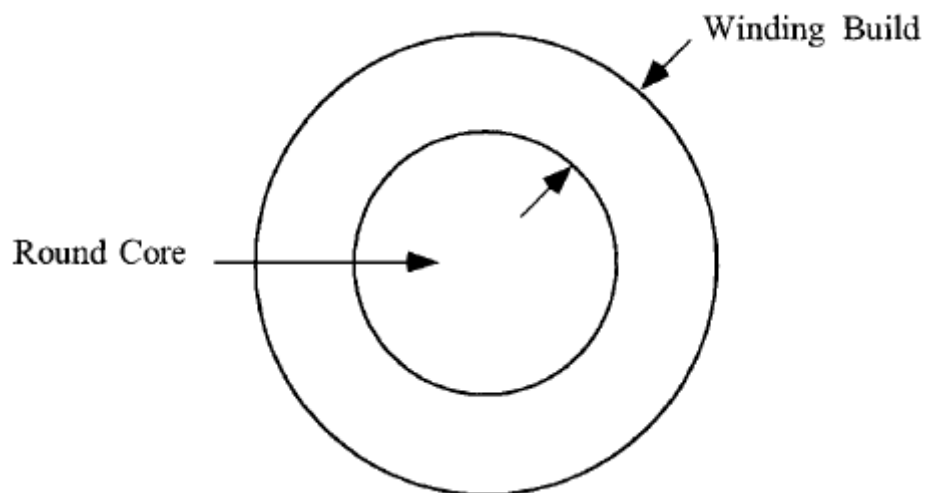


ภาพที่ 3.7 ขดลวดอุดมคติใน Bobbin ทรงสี่เหลี่ยม

การทำให้ลดของความโค้ง (Bowling) ให้ลดลงต่ำสุดนั้น Bobbinแบบทรงกลม ดังแสดงในภาพที่ 3.9 จะเหมาะกับการออกแบบที่สุด เพราะBobbinแบบทรงกลม จะให้แรงดึงที่สม่ำเสมอทั้ง 360 องศา รอบๆBobbin ทั้งสำหรับชั้นที่เหมือนกันและชั้นที่ไม่เป็นระเบียบ และประโยชน์อื่นของการใช้Bobbinแบบทรงกลมคือลดการรั่วไหลการเหนียวนำ ที่มาจากผลของ ความโค้ง (Bowling) ที่เกิดจากการพันขดลวด



ภาพที่ 3.8 ความโค้ง (Bowling) ของขดลวด ในหม้อแปลง

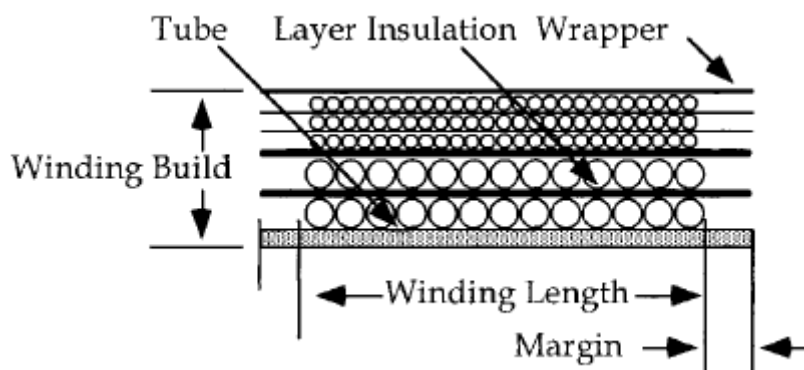


ภาพที่ 3.9 Round Bobbin

3.4.3 S_3 Effective Window

Effective Window, S_3 เป็นตัวกำหนดขนาดพื้นที่ว่างของ Window ที่ถูกใช้ในการพันขดลวด ซึ่งพื้นที่ที่เกิดจากการพันขดลวดสำหรับผู้ออกแบบนั้น ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าของ Bobbin หรือ Tube ในการออกแบบชั้นของขดลวดนั้น หากใช้ Tube จำเป็นต้องใช้พื้นที่ขอบ (Margin) ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Margin นั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามขนาดของสาย ดังเช่นในตาราง 3.4 หากเราดูในภาพที่ 3.10 และตาราง 3.4 จะเห็นได้ว่า Margin ลดพื้นที่ของ Window ใด้อย่างไร เมื่อสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นโดยใช้เทคนิคการพัน ความหนาของ

ชั้นฉนวนที่วางบนชั้นขดลวดต้องเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ซึ่งความหนาของฉนวนที่เราจะใช้นั้นต้องดูตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสาย ดังแสดงในตารางที่ 4.5



ภาพที่ 3.10 Transformer Winding with Margins

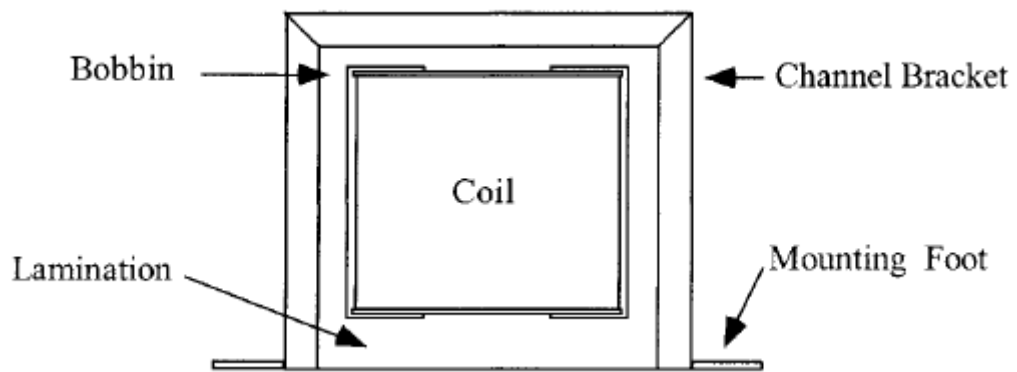
ตารางที่ 3.4 ระยะขอบของขดลวด

| Winding Margins Versus AWG | | |
|----------------------------|--------|-------|
| AWG | Margin | |
| | cm | inch |
| 10-15 | 0.635 | 0.25 |
| 16-18 | 0.475 | 0.187 |
| 19-21 | 0.396 | 0.156 |
| 22-31 | 0.318 | 0.125 |
| 32-37 | 0.236 | 0.093 |
| 38-up | 0.157 | 0.062 |

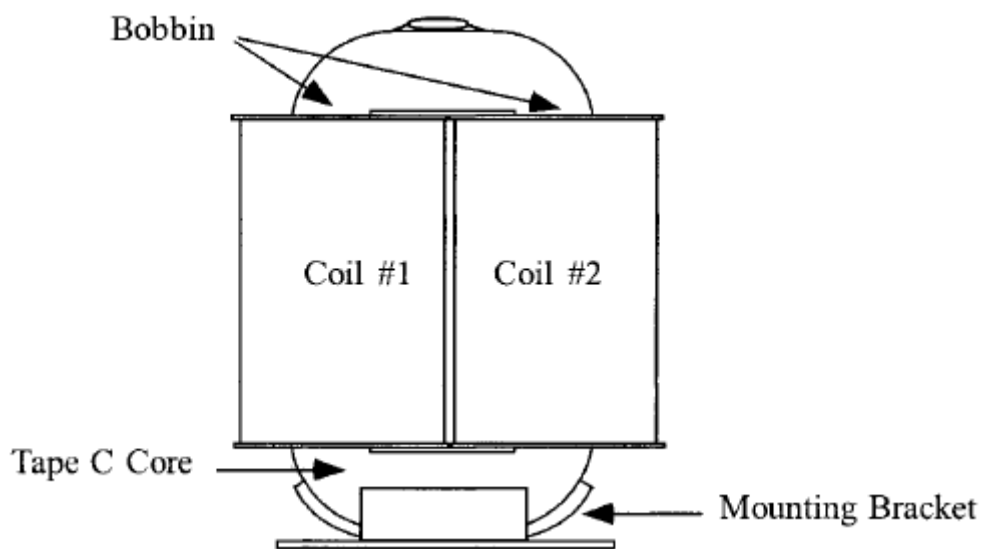
ตารางที่ 3.5 ความหนาของชั้นฉนวน

| Layer Insulation Thickness | | |
|----------------------------|----------------------|---------|
| AWG | Insulation Thickness | |
| | cm | inch |
| 10 - 16 | 0.02540 | 0.01000 |
| 17 - 19 | 0.01780 | 0.00700 |
| 20 - 21 | 0.01270 | 0.00500 |
| 22 - 23 | 0.00760 | 0.00300 |
| 24 - 27 | 0.00510 | 0.00200 |
| 28 - 33 | 0.00381 | 0.00150 |
| 34 - 41 | 0.00254 | 0.00100 |
| 42 - 46 | 0.00127 | 0.00050 |

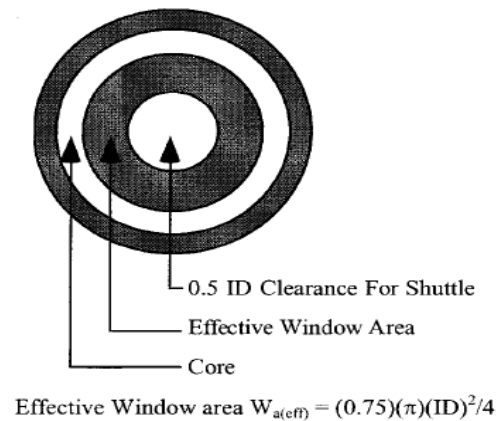
ในการออกแบบ หม้อแปลง Bobbin เดี่ยว ดังแสดงในภาพที่ 3.11 พิจารณาให้ใช้ค่า Effective Area, W_a ระหว่าง 0.835 ถึง 0.929 สำหรับแกน Laminate และ 0.55 ถึง 0.75 สำหรับแกน Ferrites และในการออกแบบ หม้อแปลงแบบ Bobbin คู่ ดังแสดงในภาพที่ 3.12 พิจารณาให้ใช้ค่า Effective Area, W_a ระหว่าง 0.687 ถึง 0.873 สำหรับแกนแบบแท่ง C มีข้อแตกต่างเล็กน้อยในแกน Toroid ในเทอม S_3 จะเป็นตัวกำหนดว่ามีพื้นที่ของ Window ที่สามารถพันขดลวดได้จริงอยู่เท่าไร ในการพันบนแกน Toroid นั้น จะต้องมีช่องว่างให้กระสวย (Shuttle) สามารถผ่านไปมาได้ หากครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสำรองไว้ให้กระสวย (Shuttle) จะมีค่า 75% ของ Window Area, W_a หลังจากการออกแบบที่ผ่านๆ มาค่าที่ดีที่สุดซึ่งก็คือค่า $S_3 = 0.75$ และแกน Toroid ก็จัดอยู่ในหมวดหมู่ข้างต้นเช่นกัน



ภาพที่ 3.11 โครงสร้างหม้อแปลงแบบ Single Bobbin



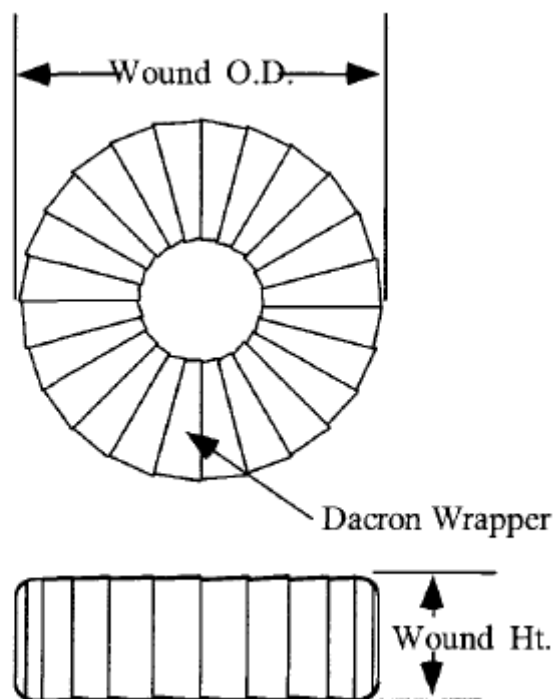
ภาพที่ 3.12 โครงสร้างหม้อแปลงแบบ Dual Bobbin



ภาพที่ 3.13 Effective Winding Area ของแกน Toroidal

3.4.4 S_4 , Insulation Factor

Insulation Factor, S_4 เป็นตัวกำหนดว่าพื้นที่ว่างของ Window ที่จะถูกใช้งานโดยแผ่นฉนวน หากหม้อแปลงไฟฟ้ามีขดลวด Secondary มากกว่า 1 ขด ค่า S_4 ควรจะลดลงขดละ 5 ถึง 10% ของค่าเดิม เพราะพื้นที่ของฉนวนที่เพิ่มขึ้นมา Insulation Factor, S_4 จะไม่ถูกเอาไปคิดคำนวณดังในภาพที่ 3.13 ค่า Insulation Factor, S_4 จะถูกกำหนดให้เป็น 1.0 ซึ่งค่า Insulation Factor, S_4 จะมีอิทธิพลกับค่า Window Utilization Factor, K_u เป็นอย่างสูงเพราะแผ่นฉนวนที่ถูกสร้างขึ้นบนแกน Toroid ดังแสดงในภาพที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าฉนวนที่อยู่ด้านในจะทับกันดีกว่าด้านนอกเพื่อให้เห็นตัวอย่างในภาพที่ 3.14 ถ้าใช้เทปฉนวนกว้าง 1.27 cm (1/2") เมื่อพันจะทับกันอยู่ 0.32 cm (1/8") บนเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก ความหนาของการทับกันจะอยู่ที่ 4 เท่าของความหนาเทป เราควรจะจดผลรวมเหล่านั้นซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของแกน Toroid และความต้องการของเทปในการออกแบบองค์ประกอบของแกน Toroid จะใช้ค่า 0.5ID (เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน) ซึ่งจะเหลือพอให้กระสวยสามารถผ่านไปมาได้



ภาพที่ 3.14 Wrapped Toroid.

สรุป

ในตอนเริ่มต้นบท ค่าโดยประมาณที่ดีที่สุดของ Window utilization Factor, $K_u = 0.4$

$$\text{โดยที่ } S_1 = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำ} + \text{ฉนวน}} \approx 0.855, \#20 \text{ AWG}$$

$$S_2 = \frac{(\text{จำนวนรอบ})(\text{พื้นที่หน้าตัดสายตัวนำหนึ่งรอบ})}{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้งานได้}} \approx 0.61$$

$$S_3 = \frac{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้ได้}}{\text{พื้นที่ช่องว่างทั้งหมด}} \approx 0.75$$

$$S_4 = \frac{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้ได้}}{\text{พื้นที่ช่องว่างที่สามารถใช้ได้} + \text{พื้นที่ฉนวน}} \approx 1$$

$$K_u = S_1 S_2 S_3 S_4$$

$$K_u = (0.855)(0.61)(0.75)(1.0) = 0.391 \approx 0.4$$

$K_u = 0.4$ เป็นค่าที่ได้รับความนิยมอย่างมากและถูกใช้มากที่สุดในการออกแบบ ซึ่ง Window Utilization Factor, K_u เป็นค่าที่สำคัญมากในการออกแบบ

3.5 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการใช้ Core Geometry, K_g

วิธีการคูณพื้นที่ หรือ Area product (A_p) สามารถใช้ได้กับข้อมูลพื้นฐานของแกนที่ได้มาจากผู้ผลิตต่างๆ แต่มีความแม่นยำน้อยกว่าวิธี Core Geometry จึงเป็นวิธีที่แนะนำในการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหา Apparent Power, P_t จากสมการ

$$P_t = P_o \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right) \text{ W} \quad (3.21)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่า K_e , electrical coefficient จากสมการ

$$K_e = 0.145(K_f^2)(f^2)(B_m^2)(10^{-4}) \quad (3.22)$$

โดยที่ K_f = Waveform Coefficient (4 = Square Wave, 4.44 = Sine Wave)

B_m = ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Tesla, T)

f = ความถี่ (Hz)

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า K_g , Core Geometry Coefficient จากค่า P_t และ K_e ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่

ผ่านมา

$$K_g = \frac{P_t}{2K_e \alpha} \text{ cm}^5 \quad (3.23)$$

โดยที่ α = % Regulation

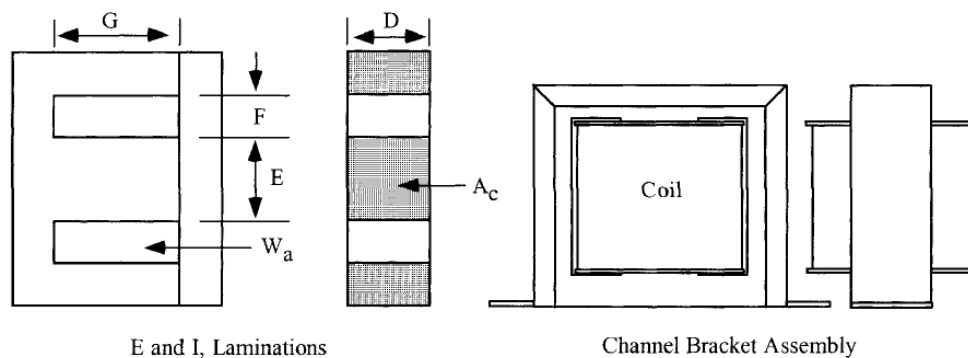
ขั้นตอนที่ 4 เลือกขนาดแกนเหล็กจากค่า K_g

ตาราง 3.6 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการออกแบบ

| EI, Laminations, (Tempel) 14 mil | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|-----------|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Part No. | W_{icu} grams | W_{ife} grams | MLT cm | MPL cm | W_a | A_c cm ² | W_a cm ² | A_p cm ⁴ | K_g cm ⁵ | A_t cm ² |
| | | | | | A_c | | | | | |
| EI-375 | 36.1 | 47.2 | 6.7 | 7.3 | 1.754 | 0.862 | 1.512 | 1.303 | 0.067 | 46.2 |
| EI-021 | 47.6 | 94.3 | 8.2 | 8.3 | 1.075 | 1.523 | 1.638 | 2.510 | 0.188 | 62.1 |
| EI-625 | 63.5 | 170.0 | 9.5 | 9.5 | 0.418 | 2.394 | 1.890 | 4.525 | 0.459 | 83.2 |
| EI-750 | 108.8 | 296.0 | 11.2 | 11.4 | 0.790 | 3.448 | 2.723 | 9.384 | 1.153 | 120.0 |
| EI-875 | 171.0 | 457.0 | 13.0 | 13.3 | 0.789 | 4.693 | 3.705 | 17.384 | 2.513 | 163.0 |
| EI-100 | 254.0 | 676.0 | 14.8 | 15.2 | 0.790 | 6.129 | 4.839 | 29.656 | 4.927 | 212.9 |
| EI-112 | 360.0 | 976.0 | 16.5 | 17.2 | 0.789 | 7.757 | 6.124 | 47.504 | 8.920 | 269.4 |
| EI-125 | 492.0 | 1343.0 | 18.3 | 19.1 | 0.789 | 9.577 | 7.560 | 72.404 | 15.162 | 333.0 |
| EI-138 | 653.0 | 1786.0 | 20.1 | 21.0 | 0.789 | 11.588 | 9.148 | 106.006 | 24.492 | 403.0 |
| EI-150 | 853.0 | 2334.0 | 22.0 | 22.9 | 0.789 | 13.790 | 10.887 | 150.136 | 37.579 | 479.0 |
| EI-175 | 1348.0 | 3711.0 | 25.6 | 26.7 | 0.789 | 18.770 | 14.818 | 278.145 | 81.656 | 652.0 |
| EI-225 | 2844.0 | 7976.0 | 32.7 | 34.3 | 0.789 | 31.028 | 24.496 | 760.064 | 288.936 | 1078.0 |

ตาราง 3.7 Dimensional Data

| EI, Laminations, (Tempel) 14 mil | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Part No. | D cm | E cm | F cm | G cm | Part No. | D cm | E cm | F cm | G cm |
| EI-375 | 0.953 | 0.953 | 0.794 | 1.905 | EI-112 | 2.857 | 2.857 | 1.429 | 4.286 |
| EI-021 | 1.270 | 1.270 | 0.794 | 2.064 | EI-125 | 3.175 | 3.175 | 1.588 | 4.763 |
| EI-625 | 1.588 | 1.588 | 0.794 | 2.381 | EI-138 | 3.493 | 3.493 | 1.746 | 5.239 |
| EI-750 | 1.905 | 1.905 | 0.953 | 2.857 | EI-150 | 3.810 | 3.810 | 1.905 | 5.715 |
| EI-875 | 2.223 | 2.223 | 1.111 | 3.333 | EI-175 | 4.445 | 4.445 | 2.223 | 6.668 |
| EI-100 | 2.540 | 2.540 | 1.270 | 3.810 | EI-225 | 5.715 | 5.715 | 2.858 | 8.573 |



ภาพที่ 3.15 EI Lamination Outline.

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณจำนวนรอบทางฝั่ง Primary, N_p จากกฎของ Faraday

$$N_p = \frac{V_{in}(10^4)}{K_f B_{ac} f A_c} \quad \text{turns} \quad (3.23)$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาความหนาแน่นของกระแส (Current Density), J จากสมการ

$$J = \frac{P_t(10^4)}{K_f K_u B_{ac} f A_p} \quad \text{A/cm}^2 \quad (3.24)$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหากระแสด้านอินพุท, I_{in} จากสมการ

$$I_{in} = \frac{P_o}{V_{in} \eta} \quad \text{A} \quad (3.25)$$

โดยที่ η = ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่า $A_{wp(B)}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Primary จากสมการ

$$A_{wp(B)} = \frac{I_{in}}{J} \text{cm}^2 \quad (3.26)$$

ขั้นตอนที่ 9 เลือกขนาดลวดตัวนำที่จะใช้พื้นที่ Primary จากค่า $A_{wp(B)}$ ที่คำนวณได้จากตารางสาย

ตาราง 3.8 ตัวอย่าง ข้อมูลตารางสาย AWG

| Wire Table | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------------|----------|--------------------------------------|------------------|----------|----------|-------|-----------|--------|-------------------|--------|-----------------|
| AWG | Bare Area | | Resistance $\mu\Omega/cm$ 20°C | Heavy Synthetics | | | | | | | | |
| | | | | Area | | Diameter | | Turns-Per | | Turns-Per | | Weight gm/cm |
| | $cm^2(10^{-3})$ | cir-mil | $cm^2(10^{-3})$ | cir-mil | cm | Inch | cm | Inch | cm^2 | Inch ² | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 10 | 52.6100 | 10384.00 | 32.7 | 55.9000 | 11046.00 | 0.2670 | 0.105 | 3.9 | 10 | 11 | 69 | 0.46800 |
| 11 | 41.6800 | 8226.00 | 41.4 | 44.5000 | 8798.00 | 0.2380 | 0.094 | 4.4 | 11 | 13 | 90 | 0.37500 |
| 12 | 33.0800 | 6529.00 | 52.1 | 35.6400 | 7022.00 | 0.2130 | 0.084 | 4.9 | 12 | 17 | 108 | 0.29770 |
| 13 | 26.2600 | 5184.00 | 65.6 | 28.3600 | 5610.00 | 0.1900 | 0.075 | 5.5 | 13 | 21 | 136 | 0.23670 |
| 14 | 20.8200 | 4109.00 | 82.8 | 22.9500 | 4556.00 | 0.1710 | 0.068 | 6.0 | 15 | 26 | 169 | 0.18790 |
| 15 | 16.5100 | 3260.00 | 104.3 | 18.3700 | 3624.00 | 0.1530 | 0.060 | 6.8 | 17 | 33 | 211 | 0.14920 |
| 16 | 13.0700 | 2581.00 | 131.8 | 14.7300 | 2905.00 | 0.1370 | 0.054 | 7.3 | 19 | 41 | 263 | 0.11840 |
| 17 | 10.3900 | 2052.00 | 165.8 | 11.6800 | 2323.00 | 0.1220 | 0.048 | 8.2 | 21 | 51 | 331 | 0.09430 |
| 18 | 8.2280 | 1624.00 | 209.5 | 9.3260 | 1857.00 | 0.1090 | 0.043 | 9.1 | 23 | 64 | 415 | 0.07474 |
| 19 | 6.5310 | 1289.00 | 263.9 | 7.5390 | 1490.00 | 0.0980 | 0.039 | 10.2 | 26 | 80 | 515 | 0.05940 |
| 20 | 5.1880 | 1024.00 | 332.3 | 6.0650 | 1197.00 | 0.0879 | 0.035 | 11.4 | 29 | 99 | 638 | 0.04726 |
| 21 | 4.1160 | 812.30 | 418.9 | 4.8370 | 954.80 | 0.0785 | 0.031 | 12.8 | 32 | 124 | 800 | 0.03757 |
| 22 | 3.2430 | 640.10 | 531.4 | 3.8570 | 761.70 | 0.0701 | 0.028 | 14.3 | 36 | 156 | 1003 | 0.02965 |
| 23 | 2.5880 | 510.80 | 666.0 | 3.1350 | 620.00 | 0.0632 | 0.025 | 15.8 | 40 | 191 | 1234 | 0.02372 |
| 24 | 2.0470 | 404.00 | 842.1 | 2.5140 | 497.30 | 0.0566 | 0.022 | 17.6 | 45 | 239 | 1539 | 0.01884 |
| 25 | 1.6230 | 320.40 | 1062.0 | 2.0020 | 396.00 | 0.0505 | 0.020 | 19.8 | 50 | 300 | 1933 | 0.01498 |
| 26 | 1.2800 | 252.80 | 1345.0 | 1.6030 | 316.80 | 0.0452 | 0.018 | 22.1 | 56 | 374 | 2414 | 0.01185 |
| 27 | 1.0210 | 201.60 | 1687.0 | 1.3130 | 259.20 | 0.0409 | 0.016 | 24.4 | 62 | 457 | 2947 | 0.00945 |
| 28 | 0.8046 | 158.80 | 2142.0 | 1.0515 | 207.30 | 0.0366 | 0.014 | 27.3 | 69 | 571 | 3680 | 0.00747 |
| 29 | 0.6470 | 127.70 | 2664.0 | 0.8548 | 169.00 | 0.0330 | 0.013 | 30.3 | 77 | 702 | 4527 | 0.00602 |
| 30 | 0.5067 | 100.00 | 3402.0 | 0.6785 | 134.50 | 0.0294 | 0.012 | 33.9 | 86 | 884 | 5703 | 0.00472 |
| 31 | 0.4013 | 79.21 | 4294.0 | 0.5596 | 110.20 | 0.0267 | 0.011 | 37.5 | 95 | 1072 | 6914 | 0.00372 |
| 32 | 0.3242 | 64.00 | 5315.0 | 0.4559 | 90.25 | 0.0241 | 0.010 | 41.5 | 105 | 1316 | 8488 | 0.00305 |
| 33 | 0.2554 | 50.41 | 6748.0 | 0.3662 | 72.25 | 0.0216 | 0.009 | 46.3 | 118 | 1638 | 10565 | 0.00241 |
| 34 | 0.2011 | 39.69 | 8572.0 | 0.2863 | 56.25 | 0.0191 | 0.008 | 52.5 | 133 | 2095 | 13512 | 0.00189 |
| 35 | 0.1589 | 31.36 | 10849.0 | 0.2268 | 44.89 | 0.0170 | 0.007 | 58.8 | 149 | 2645 | 17060 | 0.00150 |
| 36 | 0.1266 | 25.00 | 13608.0 | 0.1813 | 36.00 | 0.0152 | 0.006 | 62.5 | 167 | 3309 | 21343 | 0.00119 |
| 37 | 0.1026 | 20.25 | 16801.0 | 0.1538 | 30.25 | 0.0140 | 0.006 | 71.6 | 182 | 3901 | 25161 | 0.00098 |
| 38 | 0.0811 | 16.00 | 21266.0 | 0.1207 | 24.01 | 0.0124 | 0.005 | 80.4 | 204 | 4971 | 32062 | 0.00077 |
| 39 | 0.0621 | 12.25 | 27775.0 | 0.0932 | 18.49 | 0.0109 | 0.004 | 91.6 | 233 | 6437 | 41518 | 0.00059 |
| 40 | 0.0487 | 9.61 | 35400.0 | 0.0723 | 14.44 | 0.0096 | 0.004 | 103.6 | 263 | 8298 | 53522 | 0.00046 |
| 41 | 0.0397 | 7.84 | 43405.0 | 0.0584 | 11.56 | 0.0086 | 0.003 | 115.7 | 294 | 10273 | 66260 | 0.00038 |
| 42 | 0.0317 | 6.25 | 54429.0 | 0.0456 | 9.00 | 0.0076 | 0.003 | 131.2 | 333 | 13163 | 84901 | 0.00030 |
| 43 | 0.0245 | 4.84 | 70308.0 | 0.0368 | 7.29 | 0.0069 | 0.003 | 145.8 | 370 | 16291 | 105076 | 0.00023 |
| 44 | 0.0202 | 4.00 | 85072.0 | 0.0316 | 6.25 | 0.0064 | 0.003 | 157.4 | 400 | 18957 | 122272 | 0.00020 |

ขั้นตอนที่ 10 คำนวณหาความต้านทานขดลวด Primary, R_p จากสมการ

$$R_p = MLT(N_p)\left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right)(10)^{-6} \quad \Omega \quad (3.27)$$

ขั้นตอนที่ 11 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวด Primary จากสมการ

$$P_p = I_p^2 R_p \quad W \quad (3.28)$$

ขั้นตอนที่ 12 คำนวณจำนวนรอบทางฝั่ง Secondary, N_s จากสมการ

$$N_s = \frac{N_p V_s}{V_{in}} \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \quad \text{turns} \quad (3.29)$$

ขั้นตอนที่ 13 คำนวณหาค่า $A_{ws(B)}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Secondary จากสมการ

$$A_{ws(B)} = \frac{I_o}{J} \text{cm}^2 \quad (3.30)$$

ขั้นตอนที่ 14 เลือกขนาดลวดตัวนำที่จะใช้พันขด Secondary จากค่า $A_{ws(B)}$ ที่คำนวณได้จากตารางสาย

ขั้นตอนที่ 15 คำนวณหาความต้านทานขดลวด Secondary, R_s จากสมการ

$$R_s = MLT(N_s)\left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right)(10)^{-6} \quad \Omega \quad (3.31)$$

ขั้นตอนที่ 16 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวด Secondary จากสมการ

$$P_s = I_o^2 R_s \quad W \quad (3.32)$$

ขั้นตอนที่ 17 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากลวดตัวนำ, P_{cu}

$$P_{cu} = P_p + P_s \quad W \quad (3.33)$$

ขั้นตอนที่ 18 คำนวณหาค่า %Regulation, α

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} (100) \quad \% \quad (3.34)$$

ขั้นตอนที่ 19 คำนวณหาค่าวัตต์ต่อกิโลกรัม, W/K จากสมการ

$$W/K = kf^m B_{ac}^n \quad (3.35)$$

โดยที่

ค่าคงที่ K, m, n = จะมีค่าขึ้นอยู่กับวัสดุที่ของแกนเหล็กใช้ดังตาราง

ตารางที่ 3.9 ตารางค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณ การสูญเสียในแกน

| Core Loss Equation Factors | | | | | |
|----------------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| Iron Alloy | | | | | |
| Material | Thickness mil's | Frequency Range | Coefficient k | Coefficient (m) | Coefficient (n) |
| 50/50 Ni-Fe | 1.00 | | 0.0028100 | 1.210 | 1.380 |
| | 2.00 | | 0.0005590 | 1.410 | 1.270 |
| | 4.00 | | 0.0006180 | 1.480 | 1.440 |
| Supremendur | 2.00 | 400 Hz | 0.0236000 | 1.050 | 1.300 |
| | 4.00 | | 0.0056400 | 1.270 | 1.360 |
| Permalloy 80 | 1.00 | | 0.0000774 | 1.500 | 1.800 |
| | 2.00 | | 0.0001650 | 1.410 | 1.770 |
| | 4.00 | | 0.0002410 | 1.540 | 1.990 |
| Supermalloy | 1.00 | | 0.0002460 | 1.350 | 1.910 |
| | 2.00 | | 0.0001790 | 1.480 | 2.150 |
| | 4.00 | | 0.0000936 | 1.660 | 2.060 |
| Silicon | 1.00 | | 0.0593000 | 0.993 | 1.740 |
| | 2.00 | | 0.0059700 | 1.260 | 1.730 |
| | 4.00 | | 0.0035700 | 1.320 | 1.710 |
| | 12.00 | | 0.0014900 | 1.550 | 1.870 |
| | 14.00 | | 0.0005570 | 1.680 | 1.860 |
| | 24 M27 non-or | | 50-60 Hz | 0.0386000 | 1.000 |

ขั้นตอนที่ 20 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก, P_{fe} จากสมการ

$$P_{fe} = \left(\frac{W}{K}\right) (W_{tfe})(10^{-3}) \quad W \quad (3.36)$$

โดยที่ ค่า W_{tfe} = Iron Weight, [Kg] โดยสามารถดูได้จากตารางข้อมูลของแกนเหล็ก

ตารางที่ 3.10 ตารางข้อมูลการออกแบบของแกน EI

| EI, Laminations, (Tempel) 14 mil | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|-----------|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Part No. | W_{tCu} grams | W_{tFe} grams | MLT cm | MPL cm | W_a | A_c cm ² | W_a cm ² | A_p cm ⁴ | K_g cm ⁵ | A_t cm ² |
| | | | | | A_c | | | | | |
| EI-375 | 36.1 | 47.2 | 6.7 | 7.3 | 1.754 | 0.862 | 1.512 | 1.303 | 0.067 | 46.2 |
| EI-021 | 47.6 | 94.3 | 8.2 | 8.3 | 1.075 | 1.523 | 1.638 | 2.510 | 0.188 | 62.1 |
| EI-625 | 63.5 | 170.0 | 9.5 | 9.5 | 0.418 | 2.394 | 1.890 | 4.525 | 0.459 | 83.2 |
| EI-750 | 108.8 | 296.0 | 11.2 | 11.4 | 0.790 | 3.448 | 2.723 | 9.384 | 1.153 | 120.0 |
| EI-875 | 171.0 | 457.0 | 13.0 | 13.3 | 0.789 | 4.693 | 3.705 | 17.384 | 2.513 | 163.0 |
| EI-100 | 254.0 | 676.0 | 14.8 | 15.2 | 0.790 | 6.129 | 4.839 | 29.656 | 4.927 | 212.9 |
| EI-112 | 360.0 | 976.0 | 16.5 | 17.2 | 0.789 | 7.757 | 6.124 | 47.504 | 8.920 | 269.4 |
| EI-125 | 492.0 | 1343.0 | 18.3 | 19.1 | 0.789 | 9.577 | 7.560 | 72.404 | 15.162 | 333.0 |
| EI-138 | 653.0 | 1786.0 | 20.1 | 21.0 | 0.789 | 11.588 | 9.148 | 106.006 | 24.492 | 403.0 |
| EI-150 | 853.0 | 2334.0 | 22.0 | 22.9 | 0.789 | 13.790 | 10.887 | 150.136 | 37.579 | 479.0 |
| EI-175 | 1348.0 | 3711.0 | 25.6 | 26.7 | 0.789 | 18.770 | 14.818 | 278.145 | 81.656 | 652.0 |
| EI-225 | 2844.0 | 7976.0 | 32.7 | 34.3 | 0.789 | 31.028 | 24.496 | 760.064 | 288.936 | 1078.0 |

ขั้นตอนที่ 21 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมด P_{Σ}

$$P_{\Sigma} = P_{Cu} + P_{fe}, \quad W \quad (3.36)$$

ขั้นตอนที่ 22 คำนวณหาค่า K_u , Window Utilization Constant จากสมการ

$$K_u = K_{up} + K_{us} \quad (3.37)$$

$$K_{up} = \frac{N_p A_{wp(B)}}{W_a} \quad (3.38)$$

$$K_{us} = \frac{N_s A_{ws(B)}}{W_a} \quad (3.39)$$

โดยที่

N_p = จำนวนรอบของขดลวดฝั่ง Primary

N_s = จำนวนรอบของขดลวดฝั่ง Secondary

$W_{wp(B)}$ = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดฝั่ง Primary

$W_{ws(B)}$ = ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดฝั่ง Secondary

W_a = Window area

3.6 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยวิธีการใช้ Core Geometry, K_g

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหา Apparent Power, P_t จากสมการ

$$P_t = P_o \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right) \quad W$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่า K_e , Electrical Coefficient จากสมการ

$$K_e = 2.86(f^2)(B_m^2)(10^{-4}) \quad (3.40)$$

โดยที่ B_m = ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Tesla, T)

f = ความถี่ (Hz)

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า K_g , Core Geometry Coefficient จากค่า P_t และ K_e ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่

ผ่านมา

$$K_g = \frac{P_t}{2K_e\alpha} \text{ cm}^5$$

โดยที่ α = % Regulation

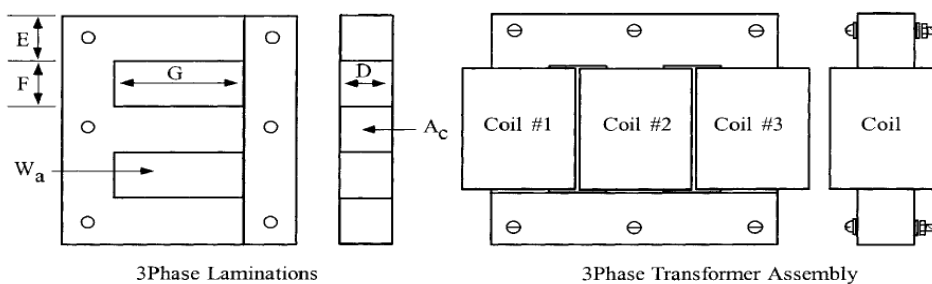
ขั้นตอนที่ 4 เลือกขนาดแกนเหล็กจากค่า K_g

ตาราง 3.11 ตัวอย่างข้อมูลของแกน 3 เฟส

| 3Phase, Standard Laminations, Thomas & Skinner 14 mil | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Part No. | W_{tcu} grams | W_{tfe} grams | MLT cm | W_a | A_c cm ² | W_a cm ² | A_p cm ⁴ | K_g cm ⁵ | A_t cm ² |
| | | | | $2A_c$ | | | | | |
| 0.250EI | 57 | 54 | 4.3 | 3.251 | 0.383 | 2.49 | 1.43 | 0.051 | 53 |
| 0.375EI | 134 | 154 | 6.2 | 2.339 | 0.862 | 4.03 | 5.21 | 0.289 | 102 |
| 0.500EI | 242 | 324 | 8.2 | 1.810 | 1.532 | 5.54 | 12.74 | 0.955 | 159 |
| 0.562EI | 403 | 421 | 8.8 | 2.213 | 1.936 | 8.57 | 24.88 | 2.187 | 207 |
| 0.625EI | 600 | 706 | 10.1 | 2.334 | 2.394 | 11.18 | 40.13 | 3.816 | 275 |
| 0.875EI | 1255 | 1743 | 13.9 | 1.809 | 4.693 | 16.98 | 119.53 | 16.187 | 487 |
| 1.000EI | 2594 | 2751 | 16.7 | 2.368 | 6.129 | 29.03 | 266.91 | 39.067 | 730 |
| 1.200EI | 2178 | 3546 | 17.6 | 1.316 | 8.826 | 23.23 | 307.48 | 61.727 | 725 |
| 1.500EI | 4266 | 6957 | 22.0 | 1.316 | 13.790 | 36.29 | 750.68 | 187.898 | 1132 |
| 1.800EI | 7326 | 12017 | 26.3 | 1.316 | 19.858 | 52.26 | 1556.61 | 470.453 | 1630 |
| 2.400EI | 17230 | 28634 | 34.8 | 1.316 | 35.303 | 92.90 | 4919.66 | 1997.995 | 2899 |
| 3.600EI | 58144 | 96805 | 52.2 | 1.316 | 79.432 | 209.03 | 24905.75 | 15174.600 | 6522 |

ตาราง 3.12 Dimensional Data

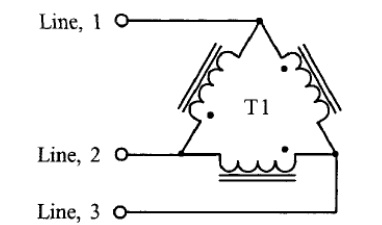
| 3Phase, Standard Laminations, Thomas & Skinner 14 mil | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|--------|
| Part No. | D cm | E cm | F cm | G cm | Part No. | D cm | E cm | F cm | G cm |
| 0.250EI | 0.635 | 0.635 | 0.871 | 2.858 | 1.000EI | 2.540 | 2.540 | 3.810 | 7.620 |
| 0.375EI | 0.953 | 0.953 | 1.270 | 3.175 | 1.200EI | 3.048 | 3.048 | 3.048 | 7.620 |
| 0.500EI | 1.270 | 1.270 | 1.588 | 3.493 | 1.500EI | 3.810 | 3.810 | 3.810 | 9.525 |
| 0.562EI | 1.427 | 1.427 | 1.588 | 5.398 | 1.800EI | 4.572 | 4.572 | 4.572 | 11.430 |
| 0.625EI | 1.588 | 1.588 | 1.984 | 5.634 | 2.400EI | 6.096 | 6.096 | 6.096 | 15.240 |
| 0.875EI | 2.223 | 2.223 | 2.779 | 6.111 | 3.600EI | 9.144 | 9.144 | 9.144 | 22.860 |



ภาพที่ 3.16 EI Lamination Outline.

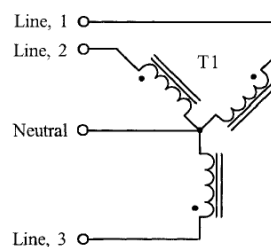
ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาแรงดันที่เฟสของขดลวดปฐมภูมิ

แบบ Delta $V_{\text{phase,p}} = V_{\text{in}} \quad V$ (3.41)



ภาพที่ 3.17 การต่อขดลวดแบบ Delta

แบบ Star $V_{\text{phase,p}} = \frac{V_{\text{in}}}{\sqrt{3}} \quad V$ (3.42)



ภาพที่ 3.18 การต่อขดลวดแบบ Star หรือ Y

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาแรงดันที่เฟสของขดลวดทุติยภูมิ

แบบ Delta $V_{\text{phase,s}} = V_{\text{out}} \quad V$ (3.43)

แบบ Star $V_{\text{phase,s}} = \frac{V_{\text{in}}}{\sqrt{3}} \quad V$ (3.44)

ขั้นตอนที่ 7 จำนวนจํานวนรอบทางฝั่ง Primary, N_p จากกฎของ Faraday

$$N_p = \frac{V_{\text{phase,p}}(10^4)}{4.44B_{\text{ac}}fA_c} \text{ turns} \quad (3.45)$$

ขั้นตอนที่ 8 จำนวนกระแสในlineทางฝั่ง Primary, $I_{L-L,p}$ จากสมการ

$$I_{L-L,p} = \frac{P_{\text{out}}}{\sqrt{3}(V_{\text{in}})(\eta)} \text{ A} \quad (3.46)$$

โดยที่ η = ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ขั้นตอนที่ 9 จำนวนกระแสในphaseทางฝั่ง primary, $I_{\text{phase,p}}$ จากสมการ

$$\text{แบบ Star} \quad I_{\text{phase,p}} = I_{L-L,p} \text{ A} \quad (3.47)$$

$$\text{แบบ Delta} \quad I_{\text{phase,p}} = \frac{I_{L-L,p}}{\sqrt{3}} \text{ A} \quad (3.48)$$

ขั้นตอนที่ 10 จำนวนหาค่า $A_{\text{wp(B)}}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Primary ในหม้อแปลง

จะต่างจาก 3 เฟส คือค่า $W_a/4$ และ $K_{\text{up}}=0.2$ จากสมการ

$$A_{\text{wp(B)}} = \left(\frac{K_{\text{u}}W_a}{4N_p} \right) \text{ cm}^2 \quad (3.49)$$

ขั้นตอนที่ 11 เลือกขนาดลวดตัวนำที่จะใช้พันขด Primary จากค่า $A_{\text{ws(B)}}$ ที่คำนวณได้จากตารางสาย

ขั้นตอนที่ 12 จำนวนหาความต้านทานขดลวด Primary, R_p จากสมการ

$$R_p = \text{MLT}(N_p) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) (10)^{-6} \Omega$$

ขั้นตอนที่ 13 จำนวนหาค่าพลังงานสูญเสียในขดลวด Primary จากสมการ

$$P_p = I_{\text{phase,p}}^2 R_p \text{ W} \quad (3.50)$$

ขั้นตอนที่ 14 จำนวนจํานวนรอบทางฝั่ง Secondary, N_s จากสมการ

$$N_s = \frac{N_p V_{\text{phase,s}}}{V_{\text{phase,p}}} \left(1 + \frac{\alpha}{100} \right) \text{ turns} \quad (3.51)$$

ขั้นตอนที่ 15 คำนวณหาค่า $A_{ws(B)}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Secondary จากสมการ

$$A_{ws(B)} = \left(\frac{K_u W_a}{4N_s} \right) \text{cm}^2 \quad (3.52)$$

ขั้นตอนที่ 16 เลือกขนาดลวดตัวนำที่จะใช้พันขด Secondary จากค่า $A_{ws(B)}$ ที่คำนวณได้จากตารางสาย

ขั้นตอนที่ 17 คำนวณหาความต้านทานขดลวด Secondary, R_s จากสมการ

$$R_s = MLT(N_s) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) (10)^{-6} \quad \Omega$$

ขั้นตอนที่ 18 คำนวณกระแสใน line ทางฝั่ง Secondary, $I_{L-L,p}$ จากสมการ

$$I_{L-L,s} = \frac{P_{out}}{\sqrt{3}(V_{out})} \quad A \quad (3.53)$$

โดยที่ η = ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ขั้นตอนที่ 19 คำนวณกระแสใน phase ทางฝั่ง Primary, $I_{phase,p}$ จากสมการ

$$\text{แบบ Star} \quad I_{phase,s} = I_{L-L,s} \quad A \quad (3.54)$$

$$\text{แบบ Delta} \quad I_{phase,s} = \frac{I_{L-L,s}}{\sqrt{3}} \quad A \quad (3.55)$$

ขั้นตอนที่ 20 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวด Secondary จากสมการ

$$P_s = I_{phase,s}^2 R_s \quad W \quad (3.56)$$

ขั้นตอนที่ 21 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากลวดตัวนำ P_{cu}

$$P_{cu} = P_p + P_s \quad W$$

ขั้นตอนที่ 22 คำนวณหาค่า %Regulation, α

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} (100) \quad \%$$

ขั้นตอนที่ 23 คำนวณหาค่าวัตต์ต่อกิโลกรัม W/K จากสมการ

$$W/K = kf^m B_{ac}^n$$

โดยที่

ค่าคงที่ K, m, n = จะมีค่าขึ้นอยู่กับวัสดุที่ของแกนเหล็กใช้จากตาราง 3.8

ขั้นตอนที่ 24 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก P_{fe} จากสมการ

$$P_{fe} = \left(\frac{W}{K}\right) (W_{tfe})(10^{-3}) \quad W$$

โดยที่ ค่า W_{tfe} = Iron Weight, [Kg] โดยสามารถดูได้จากตัวอย่างได้จากตาราง 3.10

ขั้นตอนที่ 25 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมด P_{Σ}

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe} \quad W$$

ขั้นตอนที่ 26 คำนวณหาค่า K_u , Window Utilization Constant จากสมการ

$$K_u = K_{up} + K_{us}$$

$$K_u = \frac{4N_p A_{wp}(B)}{W_a} + \frac{4N_s A_{ws}(B)}{W_a}$$

3.7 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีการใช้ Core Geometry, K_g

| | | |
|----------------------------------|---|-------------|
| Input voltage, V_{in} | = | 220 volts |
| Output voltage, V_o | = | 220 volts |
| Output power, P_o | = | 500 watts |
| Frequency, f | = | 50 Hz |
| Efficiency, η | = | 95% |
| Regulation, α | = | 5% |
| Operating flux density, B_{ac} | = | 1.5 tesla |
| Core Material | = | Silicon M6X |
| Window utilization, K_u | = | 0.4 |

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหา Apparent Power, P_t จากสมการ

$$P_t = P_o \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right)$$

$$= 500 \left(\frac{1}{0.95} + 1 \right)$$

$$P_t = 1026.32 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่า K_e , Electrical Coefficient จากสมการ

$$K_e = 0.145(K_f^2)(f^2)(B_m^2)(10^{-4})$$

$$= 0.145(4.44)^2(50)^2(1.5)^2(10^{-4})$$

$$K_e = 1.61$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า K_g , Core Geometry Coefficient จากค่า P_t และ K_c ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ผ่านมา

$$K_g = \frac{P_t}{2K_c\alpha}$$

$$= \frac{1026.32}{2(1.61)(5)}$$

$$K_g = 63.83 \text{ cm}^5$$

ขั้นตอนที่ 4 เลือกขนาดแกนเหล็กจากค่า K_g

| | |
|-------------------------|------------------------|
| เลือกใช้แกนเบอร์ | EI-132.2/60 |
| Iron Weight, W_{fe} | 8.620 kilograms |
| Copper Weight, W_{cu} | 2.819 kilograms |
| Mean Length Turn, MLT | 28.85 cm |
| Iron Area, A_c | 26.64 cm ² |
| Window Area, W_a | 14.79 cm ² |
| Area Product, A_p | 393.88cm ⁴ |
| Core Geometry, K_g | 145.46 cm ⁵ |

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณจำนวนรอบทางฝั่ง Primary, N_p จากกฎของ Faraday

$$N_p = \frac{V_{in}(10^4)}{K_f B_{ac} f A_c}$$

$$N_p = \frac{220 (10^4)}{(4.44)(1.5)(50)(26.64)}$$

$$N_p = 247.99 \approx 248 \text{ turns}$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาความหนาแน่นของกระแส (Current Density), J จากสมการ

$$J = \frac{P_t(10^4)}{K_f K_u B_{ac} f A_p}$$

$$= \frac{1026.32(10^4)}{(4.44)(0.4)(1.5)(50)(393.88)}$$

$$J = 195.62 \quad \text{A/cm}^2$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหากระแสด้านอินพุท, I_{in} จากสมการ

$$I_{in} = \frac{P_o}{V_{in} \eta}$$

$$I_{in} = \frac{500}{(220)(0.95)}$$

$$I_{in} = 2.39 \text{ A}$$

โดยที่ η = ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่า $A_{wp(B)}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Primary จากสมการ

$$A_{wp(B)} = \frac{I_{in}}{J}$$

$$A_{wp(B)} = \frac{2.39}{195.62}$$

$$A_{wp(B)} = 12.21(10^{-3}) \text{ cm}^2$$

ขั้นตอนที่ 9 เลือกขนาดลวดตัวนำที่จะใช้พันขด Primary จากค่า $A_{wp(B)}$ ที่คำนวณได้จากตารางสาย

| | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| เลือกใช้เบอร์ | AWG#16 |
| $A_{wB} =$ | 13.07, [10^{-3} cm^2] |
| $A_w =$ | 14.73, [10^{-3} cm^2] |
| $\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} =$ | 131.81 $\mu\Omega/\text{cm}$ |

ขั้นตอนที่ 10 กำหนดหาความต้านทานขดลวด Primary, R_p จากสมการ

$$R_p = \text{MLT}(N_p) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) (10)^{-6}$$

$$R_p = 28.85(248)(131.81)(10)^{-6}$$

$$R_p = 0.943 \ \Omega$$

ขั้นตอนที่ 11 กำหนดหาค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวด Primary จากสมการ

$$P_p = I_p^2 R_p$$

$$P_p = (2.39)^2 (0.943)$$

$$P_p = 5.40 \ \text{W}$$

ขั้นตอนที่ 12 กำหนดจำนวนรอบทางฝั่ง Secondary, N_s จากสมการ

$$N_s = \frac{N_p V_s}{V_{in}} \left(1 + \frac{\alpha}{100} \right)$$

$$N_s = \frac{(248)(220)}{(220)} \left(1 + \frac{5}{100} \right)$$

$$N_s = 261 \ \text{turns}$$

ขั้นตอนที่ 13 คำนวณหาค่า $A_{ws(B)}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Secondary จากสมการ

$$I_o = \frac{P_o}{V_o}$$

$$I_o = \frac{500}{220}$$

$$I_o = 2.27 \text{ A}$$

$$A_{ws(B)} = \frac{I_o}{J}$$

$$A_{ws(B)} = \frac{2.27}{195.62}$$

$$A_{ws(B)} = 11.62 \times (10)^{-3} \text{ cm}^2$$

ขั้นตอนที่ 14 เลือกขนาดลวดตัวนำจะใช้พื้นที่ Secondary จากค่า $A_{ws(B)}$ ที่คำนวณได้จากตารางสาย

| | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| เลือกใช้เบอร์ | AWG#17 |
| $A_{wB} =$ | 10.39, $[10^{-3} \text{ cm}^2]$ |
| $A_w =$ | 11.68, $[10^{-3} \text{ cm}^2]$ |
| $\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} =$ | 165.80 $\mu\Omega/\text{cm}$ |

ขั้นตอนที่ 15 คำนวณหาความต้านทานขดลวด Secondary, R_s จากสมการ

$$R_s = MLT(N_s) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) (10)^{-6}$$

$$R_s = 28.85(261)(165.80)(10)^{-6}$$

$$R_s = 1.249 \text{ } \Omega$$

ขั้นตอนที่ 16 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวด Secondary จากสมการ

$$P_s = I_o^2 R_s$$

$$P_s = (2.27)^2 (1.249)$$

$$P_s = 6.45 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 17 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากลวดตัวนำ, P_{cu}

$$P_{cu} = P_p + P_s$$

$$P_{cu} = 5.40 + 6.45$$

$$P_{cu} = 11.85 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 18 คำนวณหาค่า %Regulation, α

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} (100)$$

$$\alpha = \frac{11.85}{500} (100)$$

$$\alpha = 2.37 \%$$

ขั้นตอนที่ 19 คำนวณหาค่าวัตต์ต่อกิโลกรัม, W/K จากสมการ

$$W/K = kf^m B_{ac}^n$$

$$W/K = (0.386)(50)^1 (1.6)^{2.092}$$

$$W/K = 4.508 \text{ Watts/kg}$$

โดยที่

ค่าคงที่ $K, m, n =$ จะมีค่าขึ้นอยู่กับวัสดุที่ของแกนเหล็กใช้ดังตาราง

ตารางที่ 3.12 ค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณกำลังงานสูญเสียในแกน

| Core Loss Equation Factors | | | | | |
|----------------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| Iron Alloy | | | | | |
| Material | Thickness mil's | Frequency Range | Coefficient k | Coefficient (m) | Coefficient (n) |
| 50/50 Ni-Fe | 1.00 | | 0.0028100 | 1.210 | 1.380 |
| | 2.00 | | 0.0005590 | 1.410 | 1.270 |
| | 4.00 | | 0.0006180 | 1.480 | 1.440 |
| Supermendur | 2.00 | 400 Hz | 0.0236000 | 1.050 | 1.300 |
| | 4.00 | | 0.0056400 | 1.270 | 1.360 |
| Permalloy 80 | 1.00 | | 0.0000774 | 1.500 | 1.800 |
| | 2.00 | | 0.0001650 | 1.410 | 1.770 |
| | 4.00 | | 0.0002410 | 1.540 | 1.990 |
| Supermalloy | 1.00 | | 0.0002460 | 1.350 | 1.910 |
| | 2.00 | | 0.0001790 | 1.480 | 2.150 |
| | 4.00 | | 0.0000936 | 1.660 | 2.060 |
| Silicon | 1.00 | | 0.0593000 | 0.993 | 1.740 |
| | 2.00 | | 0.0059700 | 1.260 | 1.730 |
| | 4.00 | | 0.0035700 | 1.320 | 1.710 |
| | 12.00 | | 0.0014900 | 1.550 | 1.870 |
| | 14.00 | | 0.0005570 | 1.680 | 1.860 |
| | 24 M27 non-or | | 50-60 Hz | 0.0386000 | 1.000 |

ขั้นตอนที่ 20 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก P_{fe} จากสมการ

$$P_{fe} = \left(\frac{W}{K}\right) (W_{tfe})(10^{-3}) \quad W$$

โดยที่ ค่า W_{tfe} = Iron Weight, [Kg] โดยสามารถดูได้จากตารางข้อมูลของแกนเหล็ก

$$P_{fe} = (4.508)(8620)(10^{-3}) \quad W$$

$$P_{fe} = 38.85 \quad W$$

ขั้นตอนที่ 21 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมด P_{Σ}

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe}$$

$$P_{\Sigma} = 11.85 + 38.85$$

$$P_{\Sigma} = 50.7 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 22 คำนวณหาค่า K_u , Window Utilization Constant จากสมการ

$$K_u = K_{up} + K_{us}$$

$$K_{up} = \frac{N_p A_{wp(B)}}{W_a}$$

$$K_{up} = \frac{(248)(13.07(10^{-3}))}{(14.79)}$$

$$K_{up} = 0.219$$

$$K_{us} = \frac{N_s A_{ws(B)}}{W_a}$$

$$K_{us} = \frac{(261)(10.39(10^{-3}))}{(14.79)}$$

$$K_{us} = 0.183$$

$$K_u = 0.219 + 0.183$$

$$K_u = 0.403$$

3.8 ตัวอย่างการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ด้วยวิธีการใช้ Core Geometry, K_g

ข้อมูลหม้อแปลงที่ต้องการออกแบบ

| | |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| แรงดันอินพุต V_{in} | 400 V _{L-L} |
| แรงดันเอาต์พุต V_{out} | 190.52V _{L-L} , 110 V _{L-N} |
| กำลังงานเอาต์พุต | 1000 VA |
| การต่อขดลวด อินพุต/เอาต์พุต | Delta/Star |
| ประสิทธิภาพ η | 95% |
| Regulation, α | 5% |
| Flux Density, B_{ac} | 1.4 Tesla |
| Magnetic Material | Silicon M6X |
| Window Utilization $K_u = (K_{up} + K_{us})$ | 0.4 |

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดหา Apparent Power, P_t จากสมการ

$$P_t = P_o \left(\frac{1}{\eta} + 1 \right)$$

$$P_t = 1000 \left(\frac{1}{0.95} + 1 \right)$$

$$P_t = 2052.63 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดหาค่า K_e , Electrical Coefficient จากสมการ

$$K_e = 2.86(f^2)(B_m^2)(10^{-4}) \quad (3.40)$$

$$K_e = 2.86(50^2)(1.4^2)(10^{-4})$$

$$K_e = 1.4014$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า K_g , Core g Geometry Coefficient จากค่า P_t และ K_c ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ผ่านมา

$$K_g = \frac{P_t}{2K_c\alpha}$$

$$K_g = \frac{2052.63}{2 \times 1.4014 \times 5}$$

$$K_g = 146.47 \text{ cm}^5$$

ขั้นตอนที่ 4 เลือกขนาดแกนเหล็กจากค่า K_g

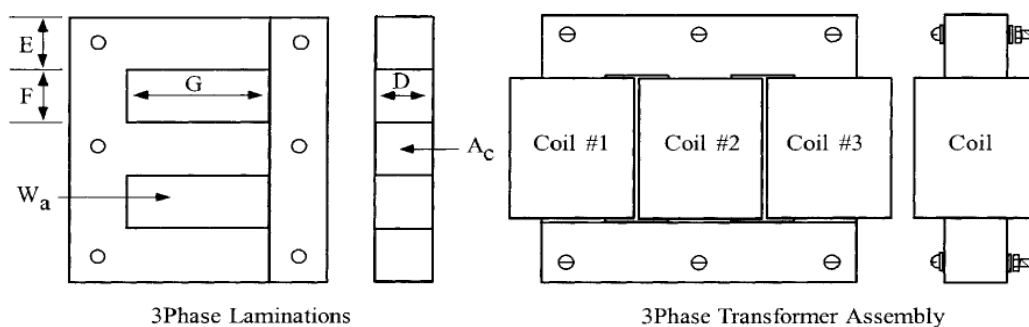
ตารางที่ 3.10 ตัวอย่างข้อมูลของแกน 3 เฟส

| 3Phase, Standard Laminations, Thomas & Skinner 14 mil | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Part No. | W_{icu} grams | W_{tfe} grams | MLT cm | W_a | A_c cm ² | W_a cm ² | A_p cm ⁴ | K_g cm ⁵ | A_t cm ² |
| | | | | $2A_c$ | | | | | |
| 0.250EI | 57 | 54 | 4.3 | 3.251 | 0.383 | 2.49 | 1.43 | 0.051 | 53 |
| 0.375EI | 134 | 154 | 6.2 | 2.339 | 0.862 | 4.03 | 5.21 | 0.289 | 102 |
| 0.500EI | 242 | 324 | 8.2 | 1.810 | 1.532 | 5.54 | 12.74 | 0.955 | 159 |
| 0.562EI | 403 | 421 | 8.8 | 2.213 | 1.936 | 8.57 | 24.88 | 2.187 | 207 |
| 0.625EI | 600 | 706 | 10.1 | 2.334 | 2.394 | 11.18 | 40.13 | 3.816 | 275 |
| 0.875EI | 1255 | 1743 | 13.9 | 1.809 | 4.693 | 16.98 | 119.53 | 16.187 | 487 |
| 1.000EI | 2594 | 2751 | 16.7 | 2.368 | 6.129 | 29.03 | 266.91 | 39.067 | 730 |
| 1.200EI | 2178 | 3546 | 17.6 | 1.316 | 8.826 | 23.23 | 307.48 | 61.727 | 725 |
| 1.500EI | 4266 | 6957 | 22.0 | 1.316 | 13.790 | 36.29 | 750.68 | 187.898 | 1132 |
| 1.800EI | 7326 | 12017 | 26.3 | 1.316 | 19.858 | 52.26 | 1556.61 | 470.453 | 1630 |
| 2.400EI | 17230 | 28634 | 34.8 | 1.316 | 35.303 | 92.90 | 4919.66 | 1997.995 | 2899 |
| 3.600EI | 58144 | 96805 | 52.2 | 1.316 | 79.432 | 209.03 | 24905.75 | 15174.600 | 6522 |

| | |
|------------------------|-------------------------|
| เลือกใช้แกนเบอร์ | 1.500EI |
| Iron weight, W_{tfe} | 6.957 kilograms |
| Mean length turn, MLT | 22.0 cm |
| Iron area, A_c | 13.79 cm ² |
| Window area, W_a | 36.29 cm ² |
| Area product, A_p | 750.68cm ⁴ |
| Core geometry, K_g | 187.898 cm ⁵ |
| Surface area, A_t | 1132 cm ² |

ตารางที่ 3.11 Dimensional Data

| 3Phase, Standard Laminations, Thomas & Skinner 14 mil | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|--------|
| Part No. | D cm | E cm | F cm | G cm | Part No. | D cm | E cm | F cm | G cm |
| 0.250EI | 0.635 | 0.635 | 0.871 | 2.858 | 1.000EI | 2.540 | 2.540 | 3.810 | 7.620 |
| 0.375EI | 0.953 | 0.953 | 1.270 | 3.175 | 1.200EI | 3.048 | 3.048 | 3.048 | 7.620 |
| 0.500EI | 1.270 | 1.270 | 1.588 | 3.493 | 1.500EI | 3.810 | 3.810 | 3.810 | 9.525 |
| 0.562EI | 1.427 | 1.427 | 1.588 | 5.398 | 1.800EI | 4.572 | 4.572 | 4.572 | 11.430 |
| 0.625EI | 1.588 | 1.588 | 1.984 | 5.634 | 2.400EI | 6.096 | 6.096 | 6.096 | 15.240 |
| 0.875EI | 2.223 | 2.223 | 2.779 | 6.111 | 3.600EI | 9.144 | 9.144 | 9.144 | 22.860 |

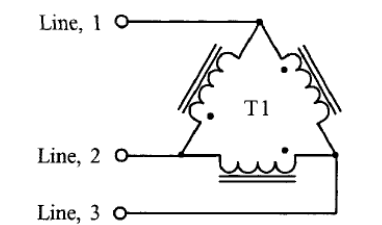


ภาพที่ 3.19 EI Lamination Outline.

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดหาแรงดันที่เฟสของขดลวดปฐมภูมิ

$$V_{\text{phase,p}} = V_{\text{in}} \quad V \quad (3.41)$$

$$V_{\text{phase,p}} = 400 \text{ V}$$

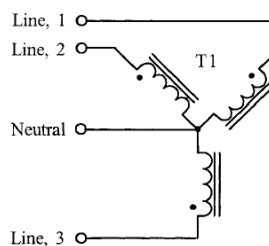


ภาพที่ 3.20 การต่อขดลวดแบบ Delta

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาแรงดันที่เฟสของขดลวดทุติยภูมิ

$$V_{\text{phase,s}} = \frac{V_{\text{in}}}{\sqrt{3}} \quad \text{V} \quad (3.44)$$

$$V_{\text{phase,s}} = 110 \quad \text{V}$$



ภาพที่ 3.21 การต่อขดลวดแบบ Star หรือ Y

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณจำนวนรอบทางฝั่ง Primary, N_p จากกฎของ Faraday

$$N_p = \frac{V_{\text{phase,p}}(10^4)}{4.44B_{\text{ac}}fA_c} \quad (3.45)$$

$$N_p = \frac{400(10^4)}{4.44(1.4)(50)(13.79)}$$

$$N_p = 933.29 \approx 934 \text{ turns}$$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณกระแสใน line ทางฝั่ง Primary, $I_{L-L,p}$ จากสมการ

$$I_{L-L,p} = \frac{P_{\text{out}}}{\sqrt{3}(V_{\text{in}})(\eta)} \quad (3.46)$$

$$I_{L-L,p} = \frac{1000}{\sqrt{3}(400)(0.95)}$$

$$I_{L-L,p} = 1.519 \text{ A}$$

โดยที่ η = ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณกระแสใน phase ทางฝั่ง Primary, $I_{\text{phase,p}}$ จากสมการ

$$I_{\text{phase,p}} = \frac{I_{L-L,p}}{\sqrt{3}} \quad (3.48)$$

$$I_{\text{phase,p}} = \frac{1.519}{\sqrt{3}}$$

$$I_{\text{phase,p}} = 0.877 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 10 คำนวณหาค่า $A_{\text{wp(B)}}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Primary ในหม้อแปลง

จะต่างจาก 3 เฟส คือค่า $W_a/4$ และ $K_{\text{up}}=0.2$ จากสมการ

$$A_{\text{wp(B)}} = \left(\frac{K_u W_a}{4N_p} \right) \quad (3.49)$$

$$A_{\text{wp(B)}} = \left(\frac{0.2 \times 36.29}{4 \times 934} \right)$$

$$A_{\text{wp(B)}} = 0.00194 \text{ cm}^2$$

ขั้นตอนที่ 11 เลือกขนาดลวดตัวนำที่จะใช้พันขด Primary จากค่า $A_{\text{ws(B)}}$ ที่คำนวณได้จากตารางสาย

| | |
|---------------------------------|------------------------------|
| เลือกใช้เบอร์ | AWG#24 |
| $A_{\text{wb}} =$ | 0.002047, [cm ²] |
| $A_w =$ | 0.002514, [cm ²] |
| $\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} =$ | 842.1 $\mu\Omega/\text{cm}$ |

ขั้นตอนที่ 12 คำนวณหาความต้านทานขดลวด Primary, R_p จากสมการ

$$R_p = MLT(N_p) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) (10)^{-6}$$

$$R_p = 22(934)(842.1)(10)^{-6}$$

$$R_p = 17.3034 \text{ } \Omega$$

ขั้นตอนที่ 13 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวด Primary จากสมการ

$$P_p = I_{\text{phase,p}}^2 R_p \quad (3.50)$$

$$P_p = 0.877 \times 17.3034$$

$$P_p = 13.308 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 14 คำนวณจำนวนรอบทางฝั่ง Secondary, N_s จากสมการ

$$N_s = \frac{N_p V_{\text{phase,s}}}{V_{\text{phase,p}}} \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \quad (3.51)$$

$$N_s = \frac{934 \times 110}{400} \left(1 + \frac{5}{100}\right)$$

$$N_s = 269.69 \approx 270 \text{ turns}$$

ขั้นตอนที่ 15 คำนวณหาค่า $A_{\text{ws(B)}}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Secondary จากสมการ

$$A_{\text{ws(B)}} = \left(\frac{K_u W_a}{4 N_s}\right) \quad (3.52)$$

$$A_{\text{ws(B)}} = \left(\frac{0.2 \times 36.29}{4 \times 270}\right)$$

$$A_{\text{ws(B)}} = 0.00672 \text{ cm}^2$$

ขั้นตอนที่ 16 เลือกขนาดลวดตัวนำที่จะใช้พันขด Secondary จากค่า $A_{\text{ws(B)}}$ ที่คำนวณได้จากตาราง

สาย

| เลือกไซเบอร์ | AWG#18 |
|---------------------------------|------------------------------|
| $A_{\text{wB}} =$ | 0.008228, [cm ²] |
| $A_{\text{w}} =$ | 0.009326, [cm ²] |
| $\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} =$ | 209.5 $\mu\Omega/\text{cm}$ |

ขั้นตอนที่ 17 คำนวณหาความต้านทานขดลวด Secondary, R_s จากสมการ

$$R_s = MLT(N_s)\left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right)(10)^{-6}$$

$$R_p = 22(270)(209.5)(10)^{-6}$$

$$R_p = 1.2444 \Omega$$

ขั้นตอนที่ 18 คำนวณกระแสใน line ทางฝั่ง Secondary, $I_{L-L,p}$ จากสมการ

$$I_{L-L,s} = \frac{P_{\text{out}}}{\sqrt{3}(V_{\text{out}})} \quad (3.53)$$

$$I_{L-L,s} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 190.52}$$

$$I_{L-L,s} = 3.03 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 19 คำนวณกระแสใน Phase ทางฝั่ง Primary, $I_{\text{phase,p}}$ จากสมการ

$$I_{\text{phase,s}} = I_{L-L,s} \text{ A} \quad (3.54)$$

$$I_{\text{phase,s}} = 3.03 \text{ A}$$

ขั้นตอนที่ 20 คำนวณหา กำลังงานสูญเสียในขดลวด Secondary จากสมการ

$$P_s = I_{\text{phase,s}}^2 R_s \quad (3.56)$$

$$P_s = 3.03 \times 1.2444$$

$$P_s = 11.425 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 21 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากโหลดตัวนำ P_{cu}

$$P_{cu} = P_p + P_s$$

$$P_{cu} = 13.308 + 11.425$$

$$P_{cu} = 24.733 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 22 คำนวณหาค่า %Regulation, α

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} (100)$$

$$\alpha = \frac{24.733}{1000} (100)$$

$$\alpha = 2.473 \%$$

ขั้นตอนที่ 23 คำนวณหาค่าวัตต์ต่อกิโลกรัม, W/K จากสมการ

$$W/K = kf^m B_{ac}^n$$

โดยที่

ค่าคงที่ K, m, n = จะมีค่าขึ้นอยู่กับวัสดุที่ของแกนเลือกใช้จากตาราง 3.8

$$W/K = kf^m B_{ac}^n$$

$$W/K = 0.000557 \times 50^{1.68} \times 1.4^{1.86}$$

$$W/K = 0.745$$

ขั้นตอนที่ 24 คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก P_{fe} จากสมการ

$$P_{fe} = \left(\frac{W}{K}\right) (W_{tfe})(10^{-3})W$$

โดยที่ ค่า W_{tfe} = Iron Weight, [Kg] โดยสามารถดูได้จากตัวอย่างได้จากตาราง 3.10

$$P_{fe} = (0.745)(6957)(10^{-3})$$

$$P_{fe} = 5.18 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 25 คำนวณค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมด P_{Σ}

$$P_{\Sigma} = P_{cu} + P_{fe}$$

$$P_{\Sigma} = 24.733 + 5.18$$

$$P_{\Sigma} = 29.913 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 26 คำนวณหาค่า K_u , Window Utilization Constant จากสมการ

$$K_u = K_{up} + K_{us}$$

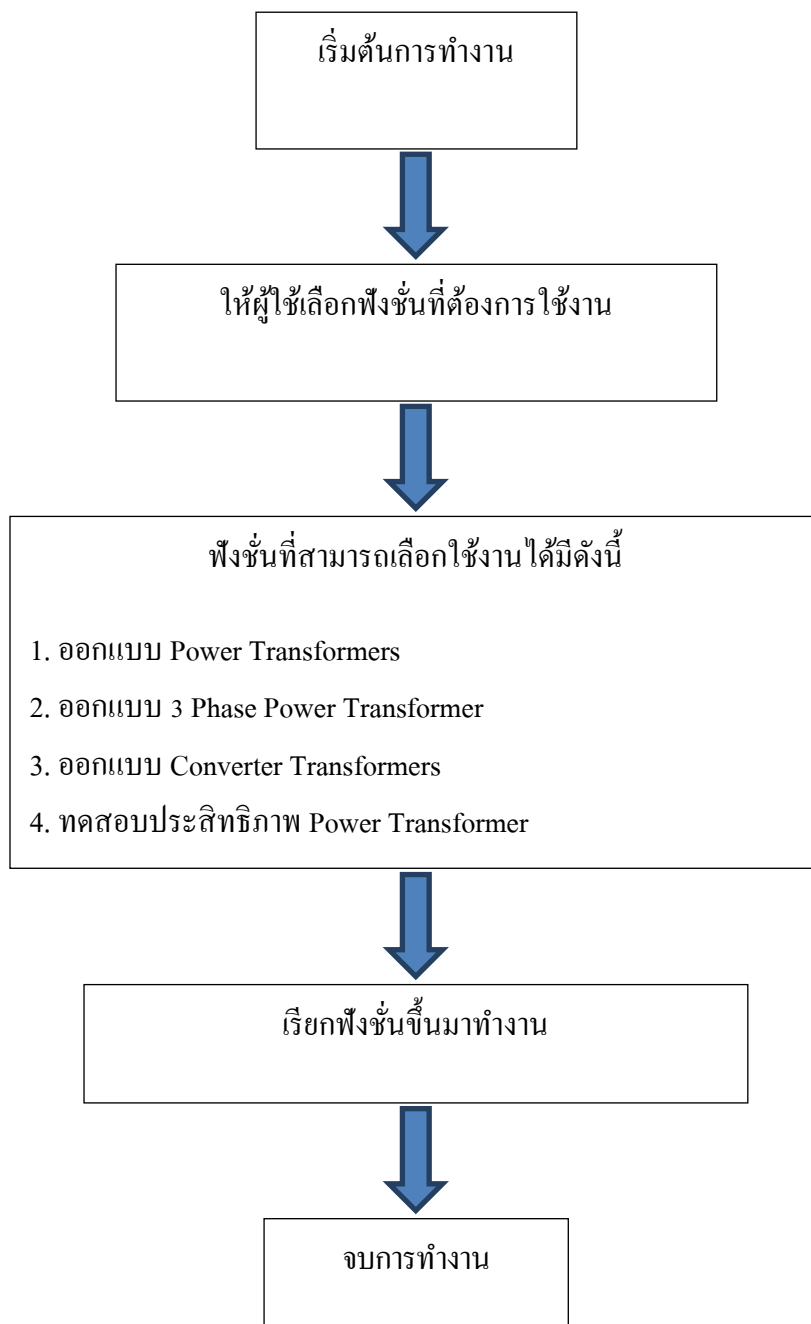
$$K_u = \frac{4N_p A_{wp(B)}}{W_a} + \frac{4N_s A_{ws(B)}}{W_a}$$

$$K_u = \frac{4 \times 934 \times 0.002047}{36.29} + \frac{4 \times 270 \times 0.00672}{36.29}$$

$$K_u = 0.21 + 0.19$$

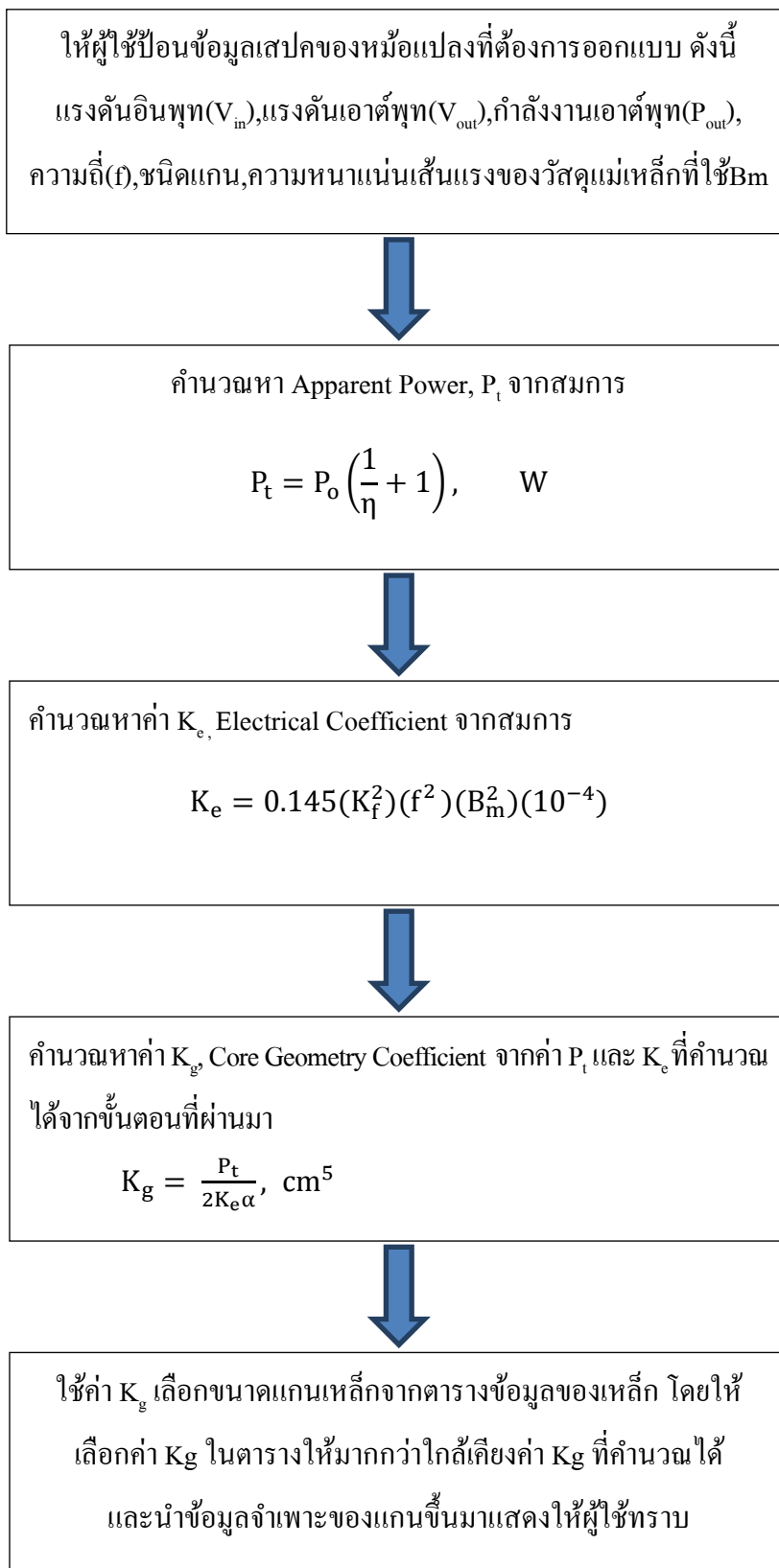
$$K_u = 0.4$$

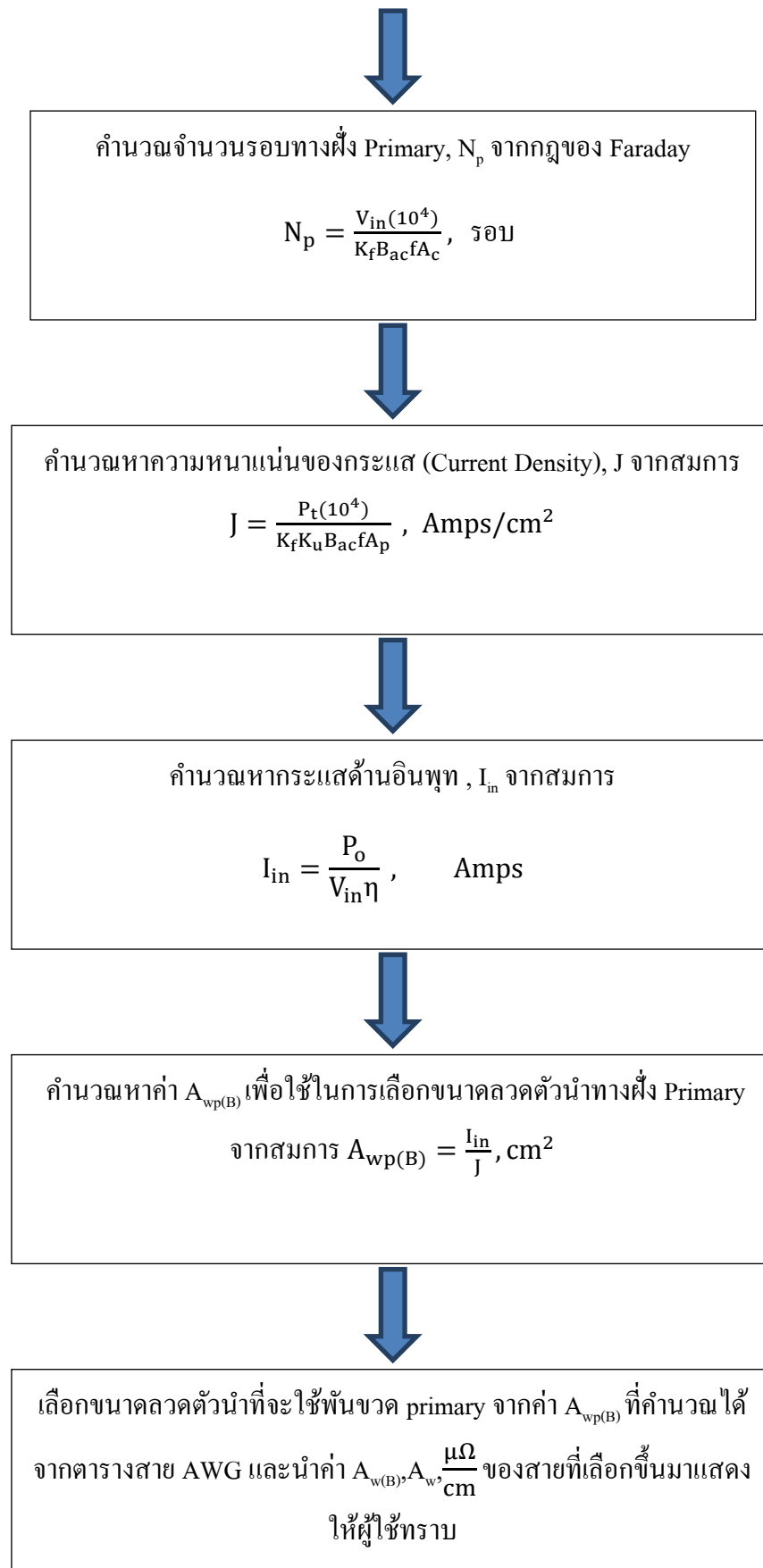
3.9 ลำดับการทำงานของโปรแกรมออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพที่ 3.22 ลำดับการทำงานของโปรแกรมออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

3.9.1 ลำดับการทำงานของฟุ้งชั้นออกแบบ Power Transformers







คำนวณหาความต้านทานขดลวด Primary, R_p จากสมการ

$$R_p = MLT(N_p)\left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right)(10)^{-6}, \Omega$$



คำนวณหาความต้านทานขดลวด Primary, R_p จากสมการ

$$R_p = MLT(N_p)\left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}}\right)(10)^{-6}, \Omega$$



คำนวณหากำลังงานสูญเสียในขดลวด Primary จากสมการ

$$P_p = I_p^2 R_p, W$$



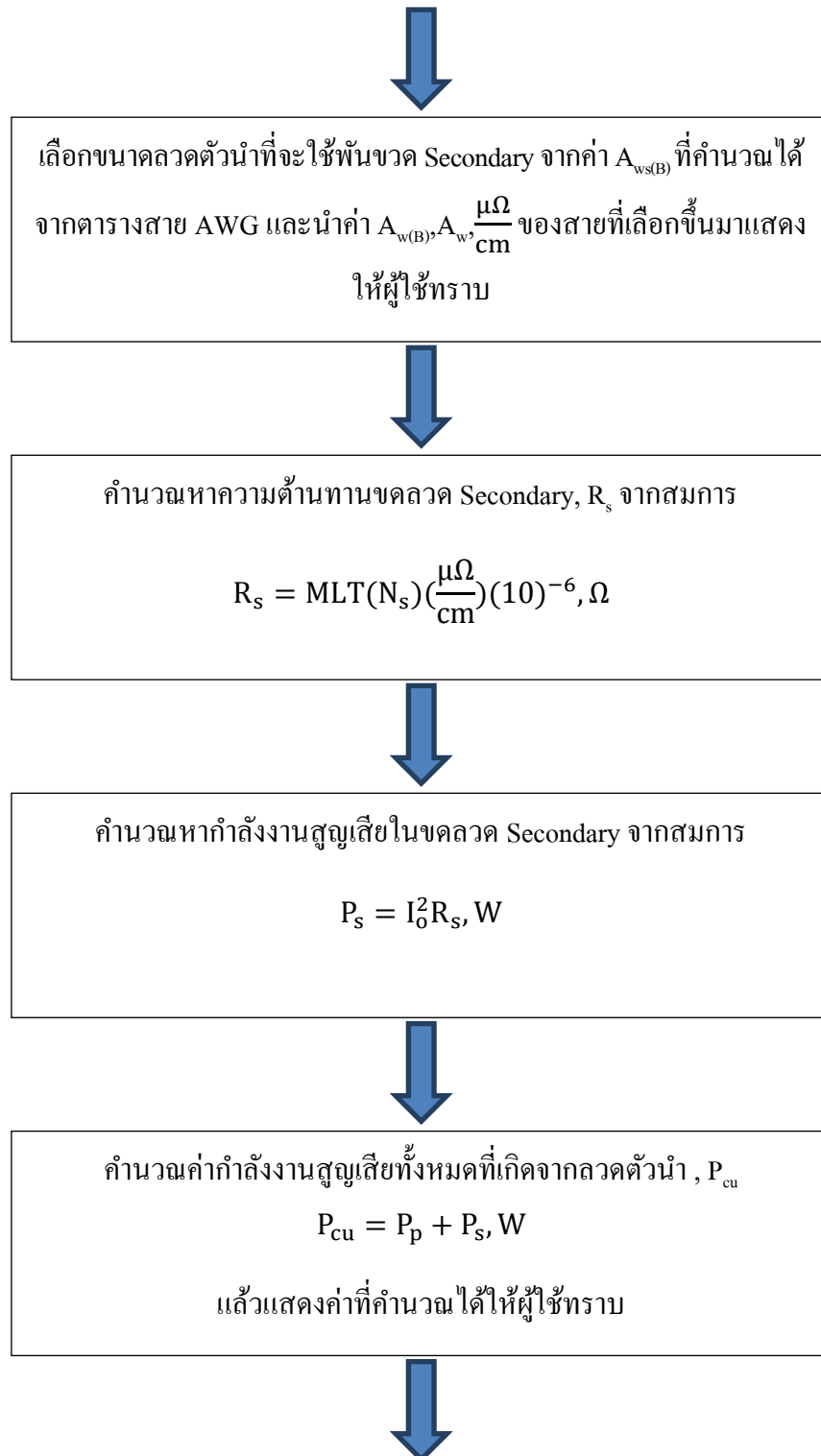
คำนวณจำนวนรอบทางฝั่ง Secondary, N_s จากสมการ

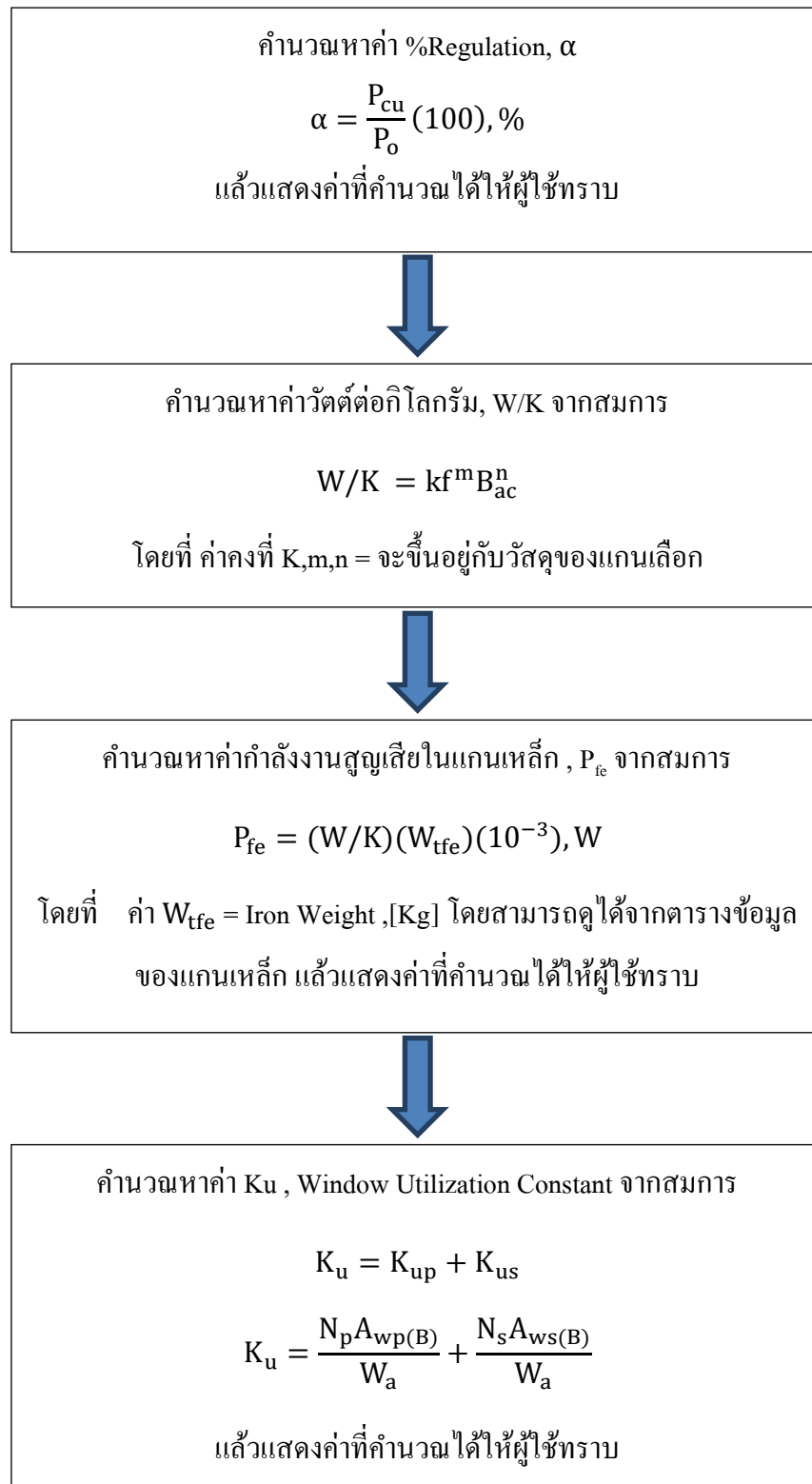
$$N_s \frac{N_p V_s}{V_{in}} \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right), \text{ รอบ}$$



คำนวณหาค่า $A_{ws(B)}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Secondary

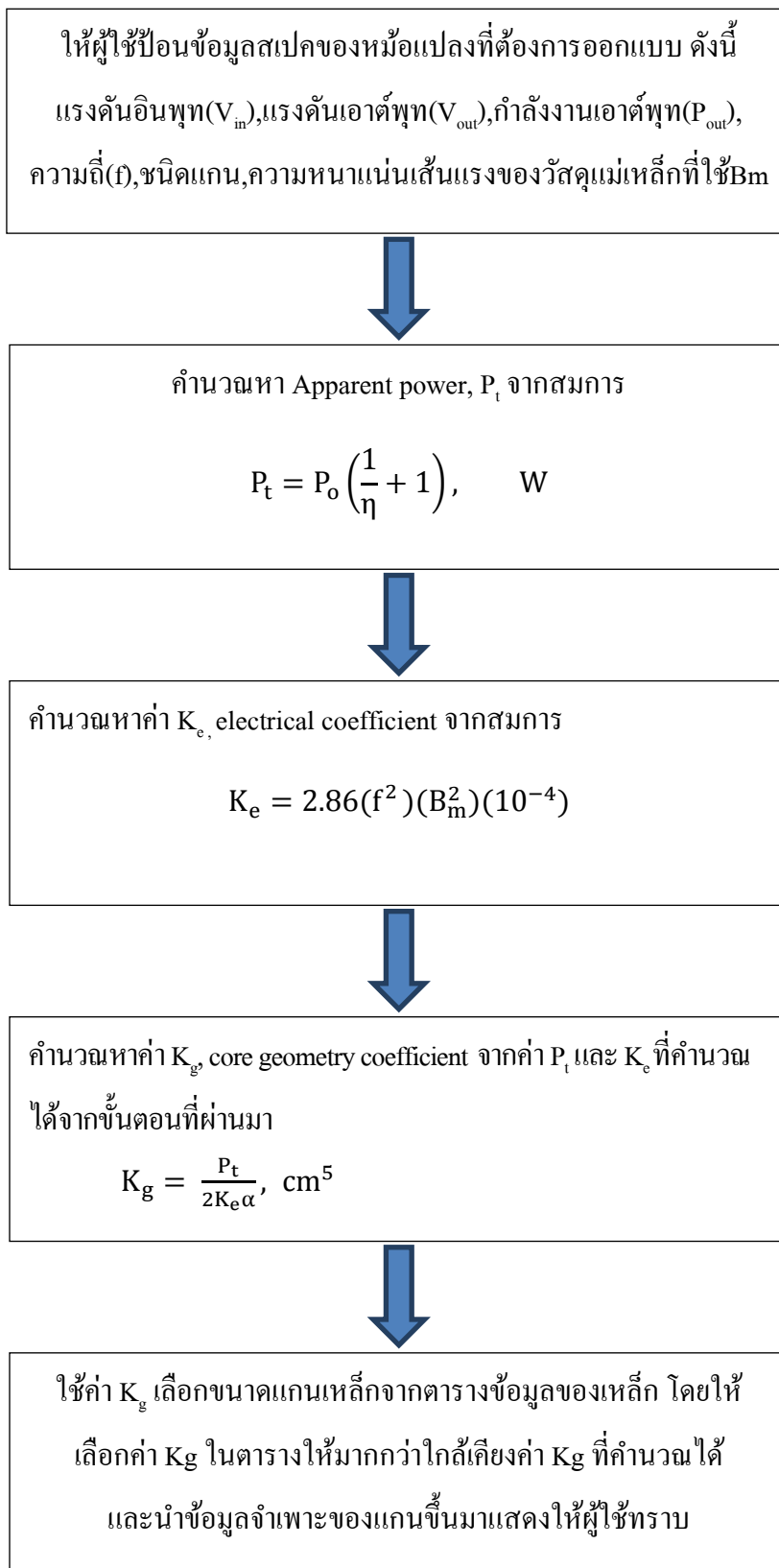
จากสมการ $A_{ws(B)} = \frac{I_o}{J}, \text{ cm}^2$





ภาพที่ 3.23 ลำดับการทำงานของฟังก์ชันออกแบบ Power Transformers

3.9.2 ลำดับการทำงานของฟังก์ชันออกแบบ 3 Phase Power Transformer



↓

คำนวณหาแรงดันที่เฟสของขดลวดปฐมภูมิ

$$V_{\text{phase,p}} = V_{\text{in}}, [\text{Volts}] \quad \text{เมื่อต่อขดลวดแบบ Delta}$$

$$V_{\text{phase,p}} = \frac{V_{\text{in}}}{\sqrt{3}}, [\text{Volts}] \quad \text{เมื่อต่อขดลวดแบบ Star}$$

↓

คำนวณหาแรงดันที่เฟสของขดลวดทุติยภูมิ

$$V_{\text{phase,s}} = V_{\text{out}}, [\text{Volts}] \quad \text{เมื่อต่อขดลวดแบบ Delta}$$

$$V_{\text{phase,s}} = \frac{V_{\text{out}}}{\sqrt{3}}, [\text{Volts}] \quad \text{เมื่อต่อขดลวดแบบ Star}$$

↓

คำนวณจำนวนรอบทางฝั่ง primary, N_p จากกฎของ Faraday

$$N_p = \frac{V_{\text{phase,p}}(10^4)}{4.44B_{\text{ac}}fA_c}, \text{ รอบ}$$

แล้วแสดงค่าที่คำนวณได้ให้ผู้ใช้ทราบ

↓

คำนวณกระแสใน line ทางฝั่ง primary, $I_{L-L,p}$ จากสมการ

$$I_{L-L,p} = \frac{P_{\text{out}}}{\sqrt{3}(V_{\text{in}})(\eta)}, \text{ Amps}$$



คำนวณกระแสใน phase ทางฝั่ง primary, $I_{\text{phase,p}}$ จากสมการ

$$I_{\text{phase,p}} = I_{L-L,p}, \text{ amps} \quad \text{เมื่อต่อขดลวดแบบ Star}$$

$$I_{\text{phase,p}} = \frac{I_{L-L,p}}{\sqrt{3}}, \text{ amps} \quad \text{เมื่อต่อขดลวดแบบ Delta}$$

คำนวณหาค่า $A_{\text{wp(B)}}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง primary
ในหม้อแปลงจะต่างจาก 3 เฟส คือค่า $W_a/4$ และ $K_{\text{up}}=0.2$ จากสมการ

$$A_{\text{wp(B)}} = \left(\frac{K_u W_a}{4 N_p} \right), [\text{cm}^2]$$

เลือกขนาดลวดตัวนำที่จะใช้พันขด primary จากค่า $A_{\text{wp(B)}}$ ที่คำนวณได้
จากตารางสาย AWG และนำค่า $A_{\text{w(B)}}, A_{\text{w}}, \frac{\mu\Omega}{\text{cm}}$ ของสายที่เลือกขึ้นมาแสดง
ให้ผู้ใช้ทราบ

คำนวณหาความต้านทานขดลวด primary, R_p จากสมการ

$$R_p = \text{MLT}(N_p) \left(\frac{\mu\Omega}{\text{cm}} \right) (10)^{-6}, \Omega$$

คำนวณหากำลังงานสูญเสียในขดลวด primary จากสมการ

$$P_p = I_{\text{phase,p}}^2 R_p, W$$



คำนวณจำนวนรอบทางฝั่ง secondary, N_s จากสมการ

$$N_s = \frac{N_p V_{\text{phase,s}}}{V_{\text{phase,p}}} \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right), \text{รอบ}$$

แล้วแสดงค่าที่คำนวณได้ให้ผู้ใช้ทราบ



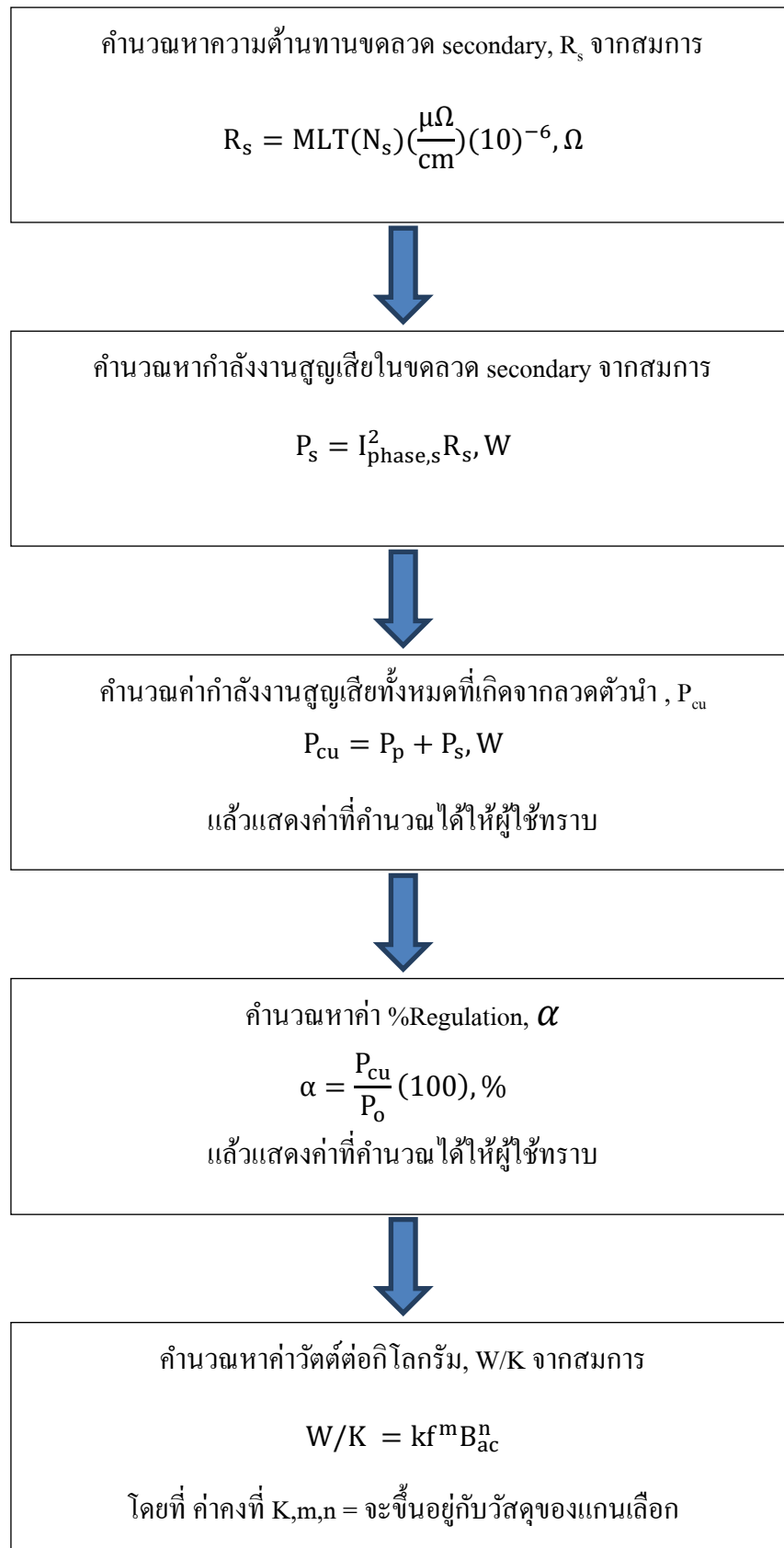
คำนวณหาค่า $A_{ws(B)}$ เพื่อใช้ในการเลือกขนาดลวดตัวนำทางฝั่ง Secondary ในหม้อแปลงจะต่างจาก 3 เฟส คือค่า $W_a/4$ และ $K_{up}=0.2$ จากสมการ

$$\text{จากสมการ } A_{ws(B)} = \left(\frac{K_u W_a}{4 N_s}\right), [\text{cm}^2]$$



เลือกขนาดลวดตัวนำที่จะใช้พื้นที่ secondary จากค่า $A_{ws(B)}$ ที่คำนวณได้ จากตารางสาย AWG และนำค่า $A_{w(B)}, A_w, \frac{\mu\Omega}{\text{cm}}$ ของสายที่เลือกขึ้นมาแสดงให้ผู้ใช้ทราบ







คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก, P_{fe} จากสมการ

$$P_{fe} = (W/K)(W_{tfe})(10^{-3}), W$$

โดยที่ ค่า W_{tfe} = Iron weight, [Kg] โดยสามารถดูได้จากตารางข้อมูล
ของแกนเหล็ก แล้วแสดงค่าที่คำนวณได้ให้ผู้ใช้ทราบ



คำนวณหาค่า K_u , Window Utilization constant จากสมการ

$$K_u = K_{up} + K_{us}$$

$$K_u = \frac{N_p A_{wp(B)}}{W_a} + \frac{N_s A_{ws(B)}}{W_a}$$

แล้วแสดงค่าที่คำนวณได้ให้ผู้ใช้ทราบ

ภาพที่ 3.24 ลำดับการทำงานของฟังก์ชันออกแบบ 3 Phase Power Transformer