

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

Development of Design Optimization for Economic Inductors



โดย ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยจาก

RCH
TK
7872
.I 63

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2541

เลขหน้ 54365

เลขทะเบียน 40395

วัน, เดือน, ปี 14 มิ.ย. 2544

11105690

สงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
หากผู้ใช้เอกสารฉบับนี้ต้องการตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการวิจัย

การพัฒนาการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

Development of Design Optimization for Economic Inductors

เจ้าของโครงการวิจัย นายชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

ผู้เข้าร่วมโครงการวิจัย นายพิชิต ถ้ายอง

ผู้ช่วยนักวิจัย นายต่อพงศ์ ยวงพานิช

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยจาก
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการออปติไมเซชันเชิงตัวเลขแบบมีเงื่อนไข เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้ได้คุณสมบัติต่าง ๆ ตามความต้องการเช่น ค่าน้ำหนักรวม ค่าสูญเสียรวม หรือราคาวัสดุรวม ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ผู้ออกแบบจะต้องพิจารณาให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในโครงการวิจัยนี้ได้เลือกปัญหาในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกนเหล็กรูปโออิ้อจำนวน 3 ปัญหาเพื่อทำการวิจัย ได้แก่ การออกแบบให้มีย่านน้ำหนักรวมน้อยสุด การออกแบบให้มีย่านค่าสูญเสียรวมน้อยสุด และการออกแบบให้มีย่านราคาวัสดุรวมต่ำสุด และสร้างต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจำนวน 6 ชุด เพื่อทำการทดสอบผลการออกแบบ จากการวิจัยพบว่ามิชชั่นได้เปรียบอย่างเห็นได้ชัดในการใช้วิธีการออกแบบออปติไมเซชันเชิงตัวเลขคือผลลัพธ์ที่ได้สามารถช่วยให้ผู้ออกแบบได้โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่ต้องการ โดยไม่ต้องเสียเวลาไปกับการใช้วิธีลองผิดลองถูก

Abstract

The purpose of this research project is to utilise constrained numerical optimization techniques for solving the optimum design of inductors. Since inductors represent one of the major ingredients constituting a power processing system, it is important to optimize the inductor design when a given design quantity is desirable; for example total weight or total loss or total cost. Three EI-cored inductor design problems chosen to be investigated are the minimum total weight design, minimum total loss design and minimum total cost design and six prototype EI-cored inductors obtained from the design were constructed and tested. There is a significant advantage to be gained by the use of numerical optimization technique. The optimum solution can assist the designer to get an optimum configuration of inductors without going through a trial and error process.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วิธีการออปติไมเซชันแบบมีเงื่อนไข	
2.1 สมการพื้นฐานของวิธีการออปติไมเซชันแบบมีเงื่อนไข	4
2.2 วิธีการ sequential unconstrained minimization technique (SUMT)	5
บทที่ 3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่เหมาะสม	
3.1 โครงสร้างแกนหลักแบบแกน EI ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	7
3.2 โครงสร้างขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	8
3.3 สมการการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่เหมาะสม	9
3.4 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีน้ำหนักรวมน้อยที่สุด	10
3.5 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีค่าสูญเสียทางไฟฟ้ารวมน้อยที่สุด	10
3.6 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีราคาวัสดุรวมต่ำที่สุด	10
3.7 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมการออกแบบ	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดสอบต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

4.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับผลจากการทดสอบต้นแบบ	13
4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบต้นแบบที่ได้จากโปรแกรมและจากวิธี Area Product ..	15
4.2.1 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 42 mH, 5 A แบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุด และแบบ Area Product	15
4.2.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 68 mH, 5 A แบบค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุด และแบบ Area Product	16
4.3 การเปรียบเทียบผลการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	18

บทที่ 5 บทสรุป

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก

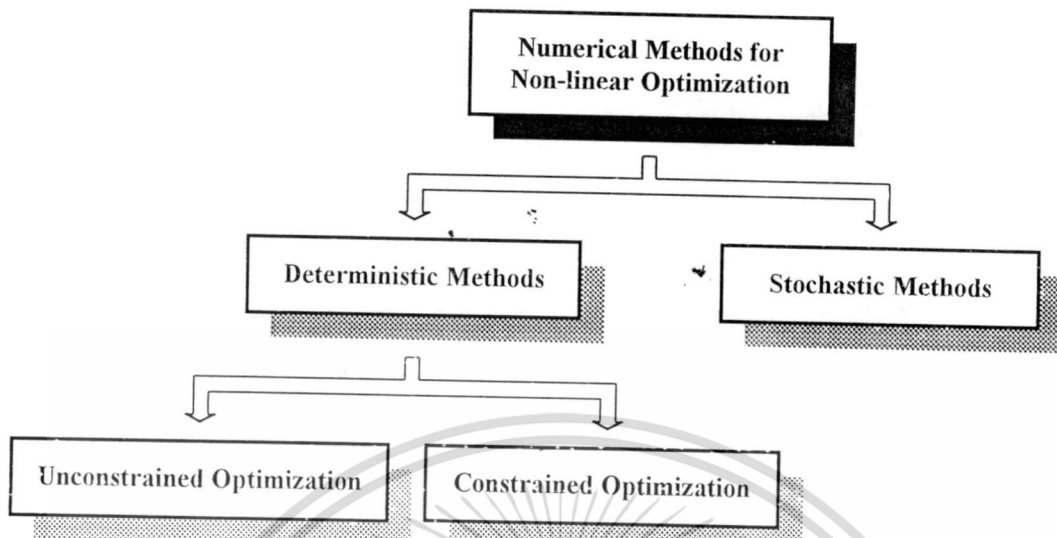
ข้อมูลแกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า	25
--	----

บทที่ 1

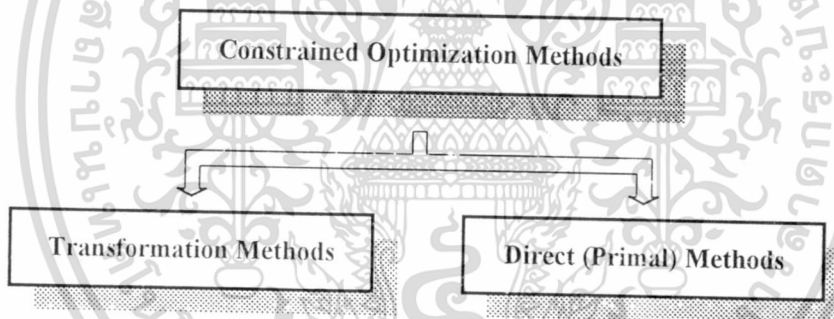
บทนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับใช้ในวงจรไฟฟ้าลักษณะต่าง ๆ ได้มีการพัฒนาการออกแบบกันอย่างแพร่หลายเช่น การใช้วิธี Area Product (A.P.) ซึ่งได้จากการใช้คู่มือการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของ McLyman [1-2] ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่พิจารณาความสัมพันธ์ของค่าพื้นที่หน้าตัดวงจรแม่เหล็กกับค่าขนาดกำลังไฟฟ้า (apparent power) ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยไม่ได้พิจารณาถึงผลทางด้านต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เช่น น้ำหนัก ค่าสูญเสีย หรือราคาวัสดุต่าง ๆ ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเลือกสารแม่เหล็ก และทราบค่าขนาดของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ใช้ ผู้ออกแบบจะทำการพิจารณาเทียบกับตารางแกนเหล็กมาตรฐานซึ่งอาจจะเป็นแบบแกน EI หรือ EE (จากโรงงานผู้ผลิต) เพื่อเลือกใช้ขนาดแกนเหล็กที่เหมาะสม จากนั้นทำการออกแบบจำนวนรอบของขดลวดที่ทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าตามที่ต้องการซึ่งวิธีการนี้อาจจะทำให้โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้ไม่สามารถได้ผลตามเป้าหมายที่ผู้ออกแบบต้องการ แต่ถ้าผู้ออกแบบนำเอาวิธีการอ็อปทิไมเซชันเชิงตัวเลขแบบมีเงื่อนไขมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะทำให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดเป้าหมายการออกแบบได้ตามต้องการเช่น ต้องการออกแบบให้ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีน้ำหนักรวมน้อยที่สุด หรือมีค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุด หรือมีราคาวัสดุรวมต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนดให้ จะเห็นได้ว่าผลที่ได้นี้จะสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ออกแบบในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

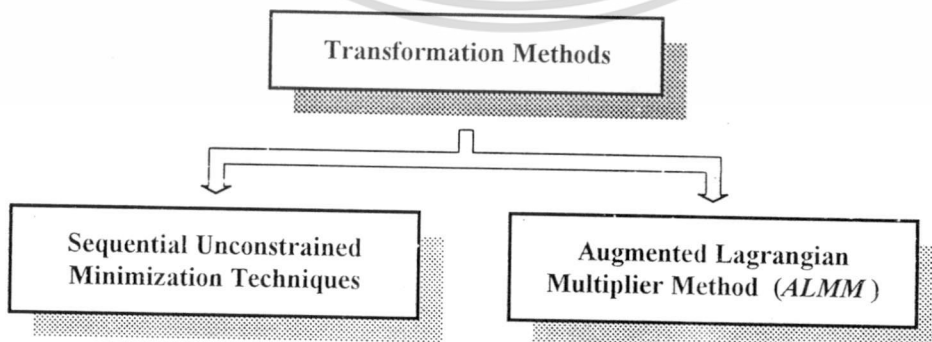
ในทางปฏิบัติการออกแบบผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะต้องเกี่ยวข้องกับสภาพเงื่อนไขต่าง ๆ ของตัวแปรในการออกแบบ และคุณลักษณะของระบบที่ต้องการ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถทำการออกแบบปัญหาในลักษณะนี้ได้โดยใช้หลักการเชิงตัวเลขด้วยวิธีการอ็อปทิไมเซชันแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ถึง 1.4 สำหรับโครงการวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการอ็อปทิไมเซชันเชิงตัวเลขแบบมีเงื่อนไขด้วยวิธี sequential unconstrained minimization technique (SUMT) แบบ quadratic extended penalty function (QUAP) [3-4] ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของวิธีการจะอธิบายในบทที่ 2



รูปที่ 1.1 การจำแนกกลุ่มของ numerical optimization methods

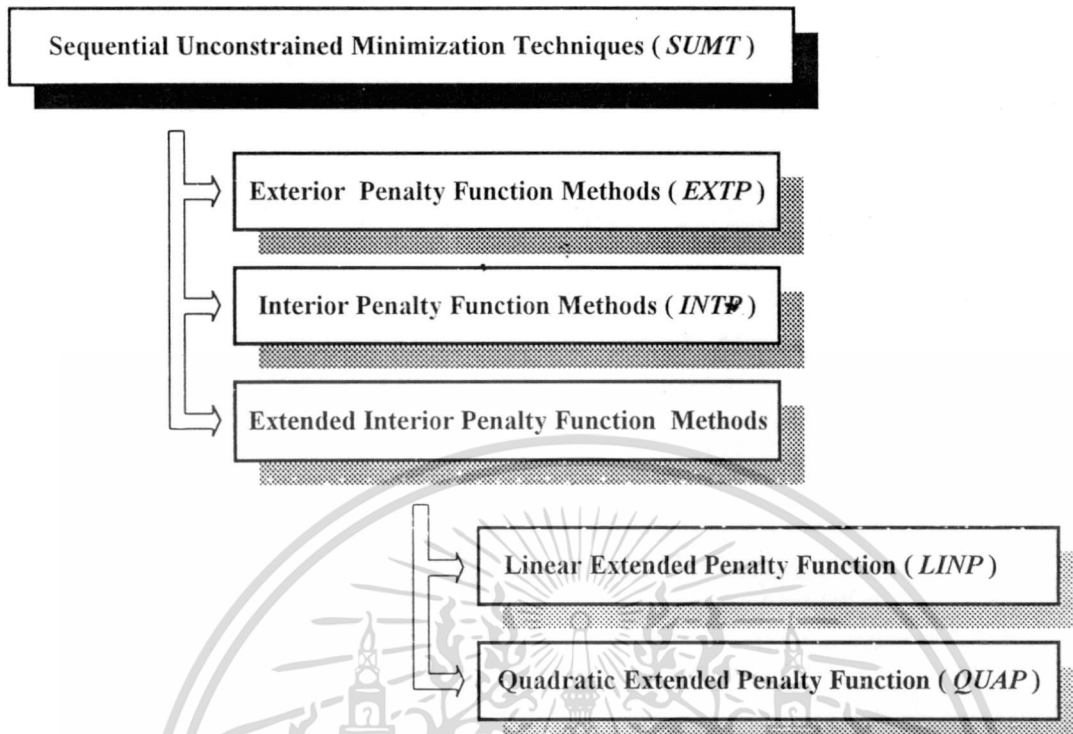


รูปที่ 1.2 การจำแนกกลุ่มของ constrained optimization methods



รูปที่ 1.3 การจำแนกกลุ่มของ transformation methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 การจำแนกกลุ่มของ sequential unconstrained minimization techniques

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วิธีการออปทิไมเซชันแบบมีเงื่อนไข

2.1 สมการพื้นฐานของวิธีการออปทิไมเซชันแบบมีเงื่อนไข

หลักการพื้นฐานของวิธีการออปทิไมเซชันแบบมีเงื่อนไข (constrained optimization method) สามารถแสดงในรูปแบบสมการต่าง ๆ ดังนี้ [5-7]

$$\text{Minimise } F(\mathbf{x}) \quad \text{objective function} \quad (2.1)$$

subject to

$$h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad \text{equality constraints} \quad (2.2)$$

$$g_k(\mathbf{x}) \leq 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \text{inequality constraints} \quad (2.3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, n \quad \text{side constraints} \quad (2.4)$$

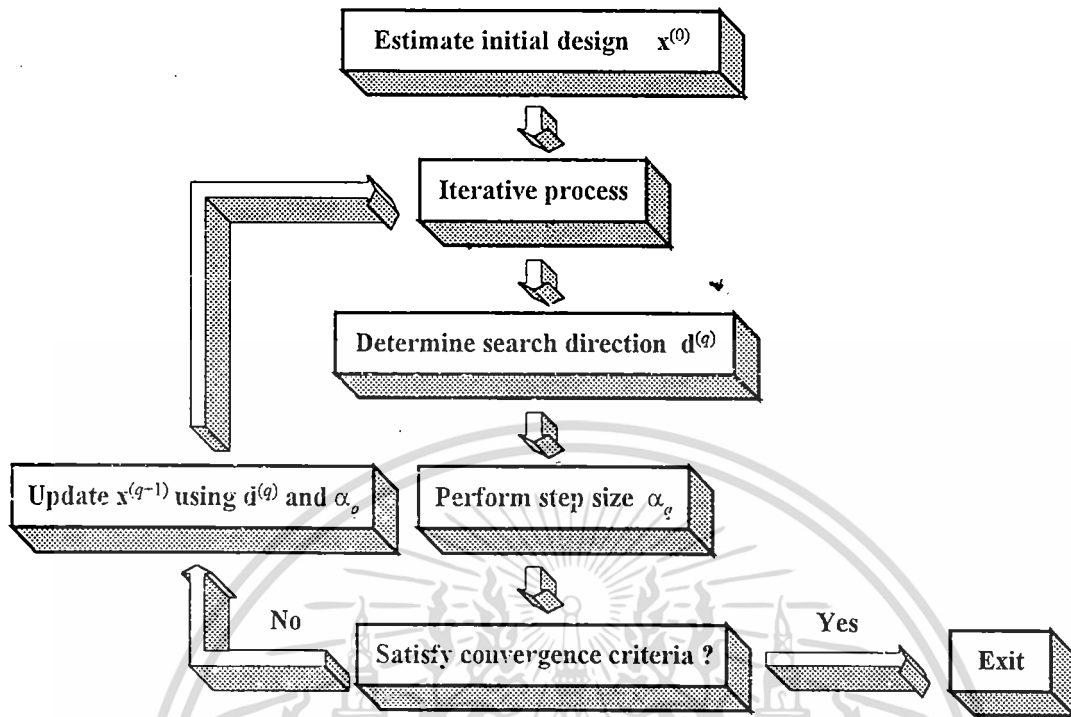
เมื่อกำหนดให้ $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรในการออกแบบ และ side constraints เป็นขอบเขตของค่าตัวแปร โดยที่ x_i^L และ x_i^U เป็นค่าขอบเขตด้านล่าง และด้านบนตามลำดับ

ขั้นตอนวิธีการออปทิไมเซชันโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 จะเป็นลักษณะการพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ โดยการปรับปรุงค่าตัวแปรตามสมการ

$$\mathbf{x}^{(q+1)} = \mathbf{x}^{(q)} + \alpha_q \mathbf{d}^{(q)} \quad (2.5)$$

เมื่อ q เป็นค่า iteration number \mathbf{d} เป็นค่า search direction และ α เป็นค่า step size

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนพื้นฐานของวิธีการออปทิไมเซชัน

2.2 วิธีการ sequential unconstrained minimization technique (SUMT)

การพิจารณาหาค่า d และ α ในสมการที่ 2.5 งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการ transformation method แบบ sequential unconstrained minimization techniques (SUMT) ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.2 วิธีการ SUMT เป็นการจัดสมการที่ 2.1 ถึง 2.4 ให้อยู่ในรูปแบบสมการใหม่ดังนี้

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{r}) = F(\mathbf{x}) + P[\mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x}), \mathbf{r}] \quad (2.6)$$

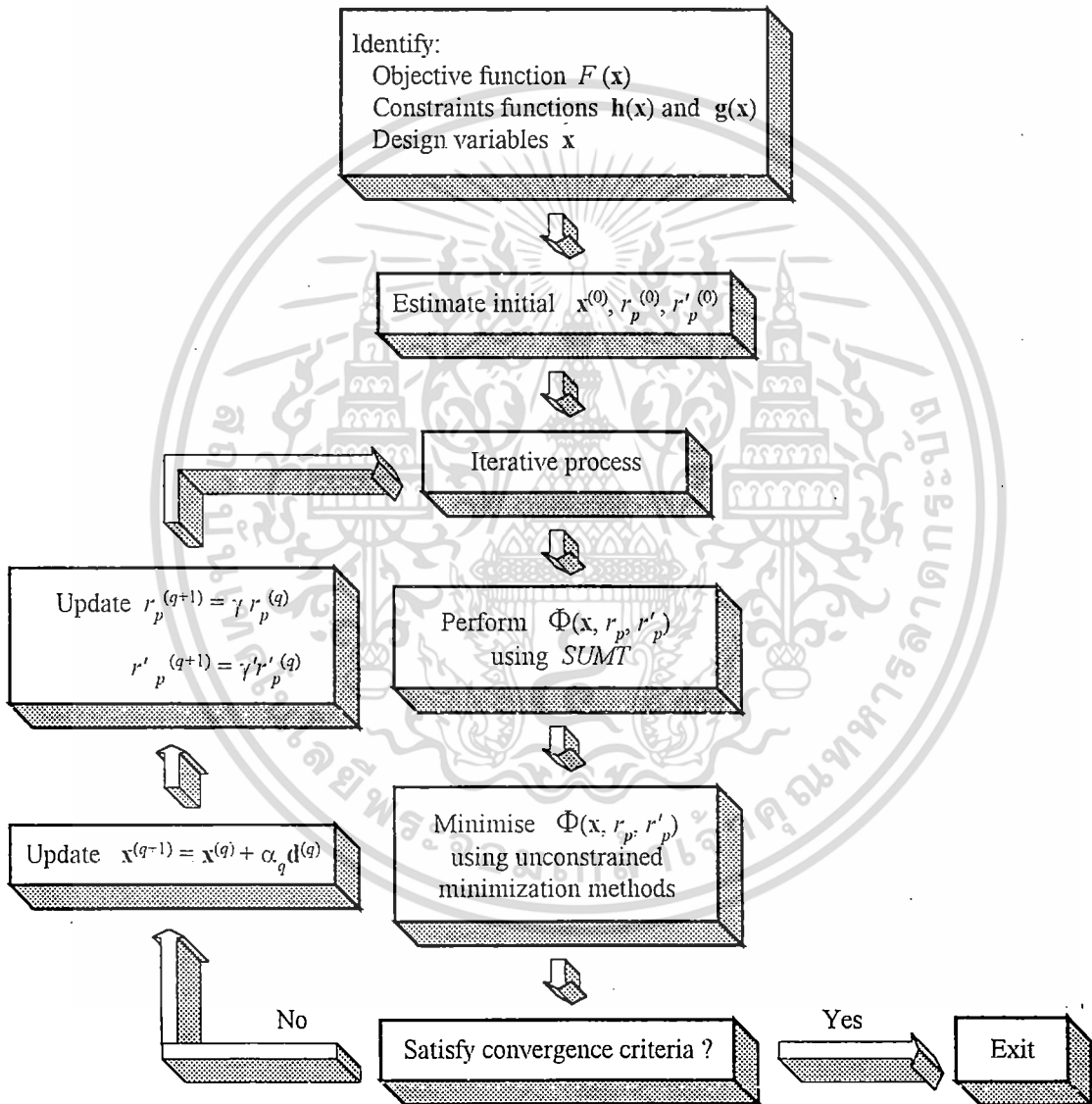
เมื่อ $\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{r})$ เป็น pseudo-objective function \mathbf{r} เป็น control parameter และ $P[\mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x}), \mathbf{r}]$ เป็น penalty function ซึ่งกำหนดให้จัดอยู่ในรูปแบบ quadratic extended penalty function ดังนี้

$$P[\mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x}), r_p, r'_p] = r'_p \sum_{k=1}^l \bar{g}_k(\mathbf{x}) + r_p \sum_{j=1}^m [h_j(\mathbf{x})]^2 \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 $\bar{g}_k(\mathbf{x}) = \frac{1}{g_k(\mathbf{x})}$ if $g_k(\mathbf{x}) \leq \epsilon_e$ (2.8)
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{g}_k(\mathbf{x}) = -\frac{1}{\varepsilon_e} \left\{ \left[\frac{g_k(\mathbf{x})}{\varepsilon_e} \right]^2 - 3 \left[\frac{g_k(\mathbf{x})}{\varepsilon_e} \right] + 3 \right\} \quad \text{if } g_k(\mathbf{x}) > \varepsilon_e \quad (2.9)$$

กำหนดให้ ε_e เป็นค่าลบค่าน้อยๆ



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนพื้นฐานของวิธีการ sequential unconstrained minimization techniques

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่เหมาะสม

3.1 โครงสร้างแกนเหล็กแบบแกน EI ของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

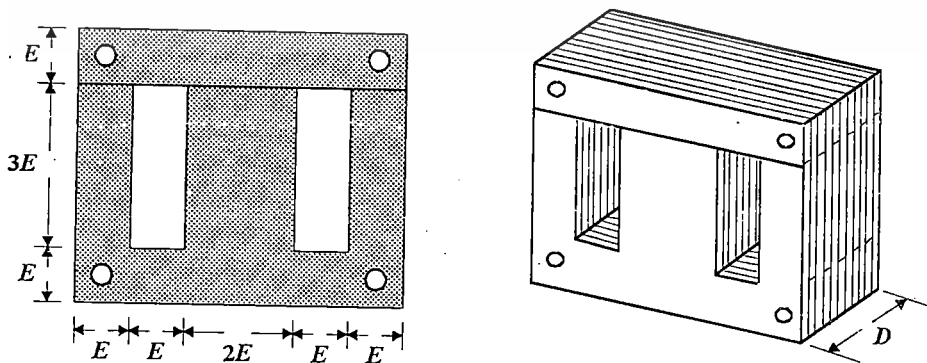
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แกนเหล็กชนิด RM14 (ภาคผนวก ก.) เป็นแผ่น lamination ที่มีความหนา 0.5 mm แบบ EI โดยกำหนดให้มีขนาดต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักของแกนเหล็ก We_{core} สามารถกำหนดจากปริมาตรของแกนเหล็ก Vol_{core} และค่าความหนาแน่นของแกนเหล็ก σ_{core} ดังนี้

$$Vol_{core} = 24 D E^2 \quad (3.1)$$

$$We_{core} = F_s \sigma_{core} Vol_{core} \quad (3.2)$$

เมื่อ F_s เป็นค่า stacking factor ของแกนเหล็ก และค่าสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมดคำนวณได้จากค่าสูญเสียในแกนเหล็กต่อกิโลกรัม P_c และน้ำหนักของแกนเหล็กดังนี้

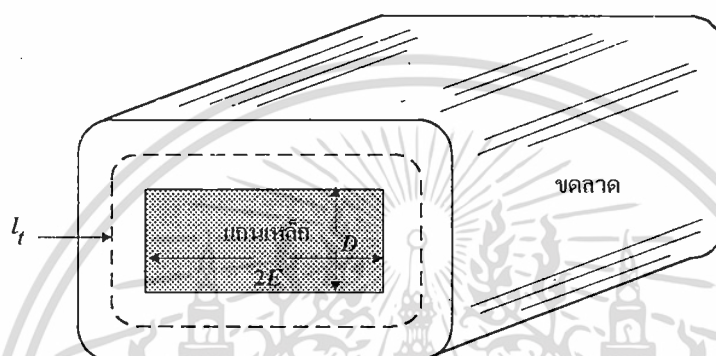
$$P_{core} = P_c We_{core} \quad (3.3)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.1 โครงสร้างแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กแบบแกน EI
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 โครงสร้างขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

สำหรับการคำนวณน้ำหนักของลวดตัวนำที่ใช้ We_{cu} สามารถพิจารณาได้จากค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (mean length per turn) ของลวดตัวนำ l_t จำนวนรอบของขดลวด N ขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ A_w และค่าความหนาแน่นของลวดตัวนำ σ_{cu} ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนี้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างขดลวดของวงจรแม่เหล็กแบบแกน EI

$$Vol_{cu} = A_w N l_t \quad (3.4)$$

$$We_{cu} = \sigma_{cu} Vol_{cu} \quad (3.5)$$

ค่าสูญเสียในลวดทองแดงทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากค่ากระแสไฟฟ้า I ค่าความต้านทานไฟฟ้าของลวดตัวนำ R และค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ρ_{cu} ดังนี้

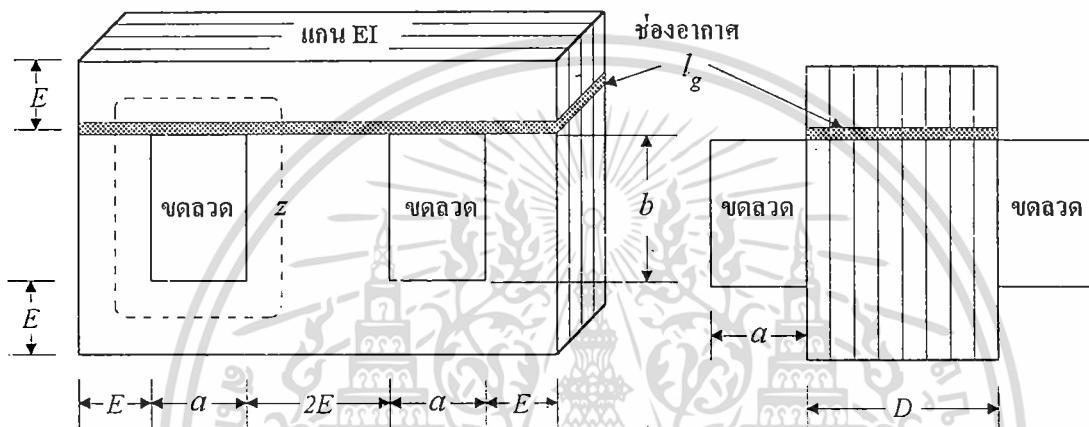
$$P_{cu} = I^2 R = I^2 \rho_{cu} \frac{N l_t}{A_w} \quad (3.6)$$

ดังนั้นในการออกแบบวงจรแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะสามารถพิจารณาเงื่อนไขการออกแบบได้ในลักษณะต่าง ๆ กัน เช่น น้ำหนักของโครงสร้าง ค่าสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น หรือราคาวัสดุรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สมการการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ที่เหมาะสม

โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ดังรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงวิธีการพิจารณาใช้คุณสมบัติของวงจรมแม่เหล็กที่มีช่องอากาศในการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า การออกแบบในลักษณะนี้จะมีข้อได้เปรียบในด้านการปรับแต่งตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้ได้ค่าตามที่ต้องการโดยการปรับระยะห่างของช่องอากาศในวงจรมแม่เหล็ก



รูปที่ 3.3 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI

จากรูปที่ 3.3 ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากสมการความสัมพันธ์

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N B A_c F_s}{i} = \frac{\mu_0 N^2 A_c F_s}{2l_g + (\mu_0/\mu)z} H \quad (3.7)$$

เมื่อ λ เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง i เป็นกระแสในขดลวด N เป็นจำนวนรอบของขดลวด B เป็นความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ A_c เป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก μ เป็นค่าซึมซาบแม่เหล็กของแกนเหล็ก l_g เป็นระยะช่องอากาศและ z เป็นระยะทางเฉลี่ยของวงจรมแม่เหล็ก

ในการออกแบบโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำจำเป็นต้องมีข้อจำกัดบางประการได้แก่

1. ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กต้องมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่กำหนด B_d ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของค่า E และ D

$$Li = N B_d (2ED) F_s \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าพื้นที่ช่องว่างสำหรับบรรจุขดลวดต้องมีค่าเพียงพอกับค่าที่ต้องการใช้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของค่า E ขนาดพื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำ และจำนวนรอบของขดลวด

$$\frac{A_w N}{F_w} = (3E)E \quad (3.9)$$

เมื่อ F_w เป็นค่า window utilization factor ของการพันขดลวดตัวนำ

3.4 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีน้ำหนักรวมน้อยที่สุด

โครงสร้างวงจรแม่เหล็กประกอบด้วยวัสดุที่เป็นแกนเหล็ก และขดลวดตัวนำ สมการที่ใช้ในการพิจารณาคือ

$$\text{Minimum Weight} \quad W_{e_{total}}(D, E) = W_{e_{core}} + W_{e_{cu}} \quad (3.10)$$

$$W_{e_{total}}(D, E) = F_s \sigma_{core} Vol_{core} + \sigma_{cu} Vol_{cu} \quad (3.11)$$

3.5 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีค่าสูญเสียทางไฟฟารวมน้อยที่สุด

ค่าสูญเสียในวงจรแม่เหล็กจะประกอบด้วยค่าสูญเสียในแกนเหล็กและค่าสูญเสียในลวดทองแดง สมการที่ใช้ในการพิจารณาคือ

$$\text{Minimum Loss} \quad P_{total}(D, E) = P_c(F_s \sigma_{core} Vol_{core}) + I^2 \rho_{cu} \frac{N l_t}{A_w} \quad (3.12)$$

3.6 โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีราคาวัสดุรวมต่ำที่สุด

ราคาวัสดุจะพิจารณาจากค่าราคาต่อกิโลกรัมของวัสดุ กำหนดให้ K_{core} เป็นค่าราคาแกนเหล็กต่อกิโลกรัม และ K_{cu} เป็นค่าลวดทองแดงต่อกิโลกรัม สมการที่ใช้ในการพิจารณาคือ

$$\text{Minimum Cost} \quad C_{total}(D, E) = C_{core} + C_{cu} \quad (3.13)$$

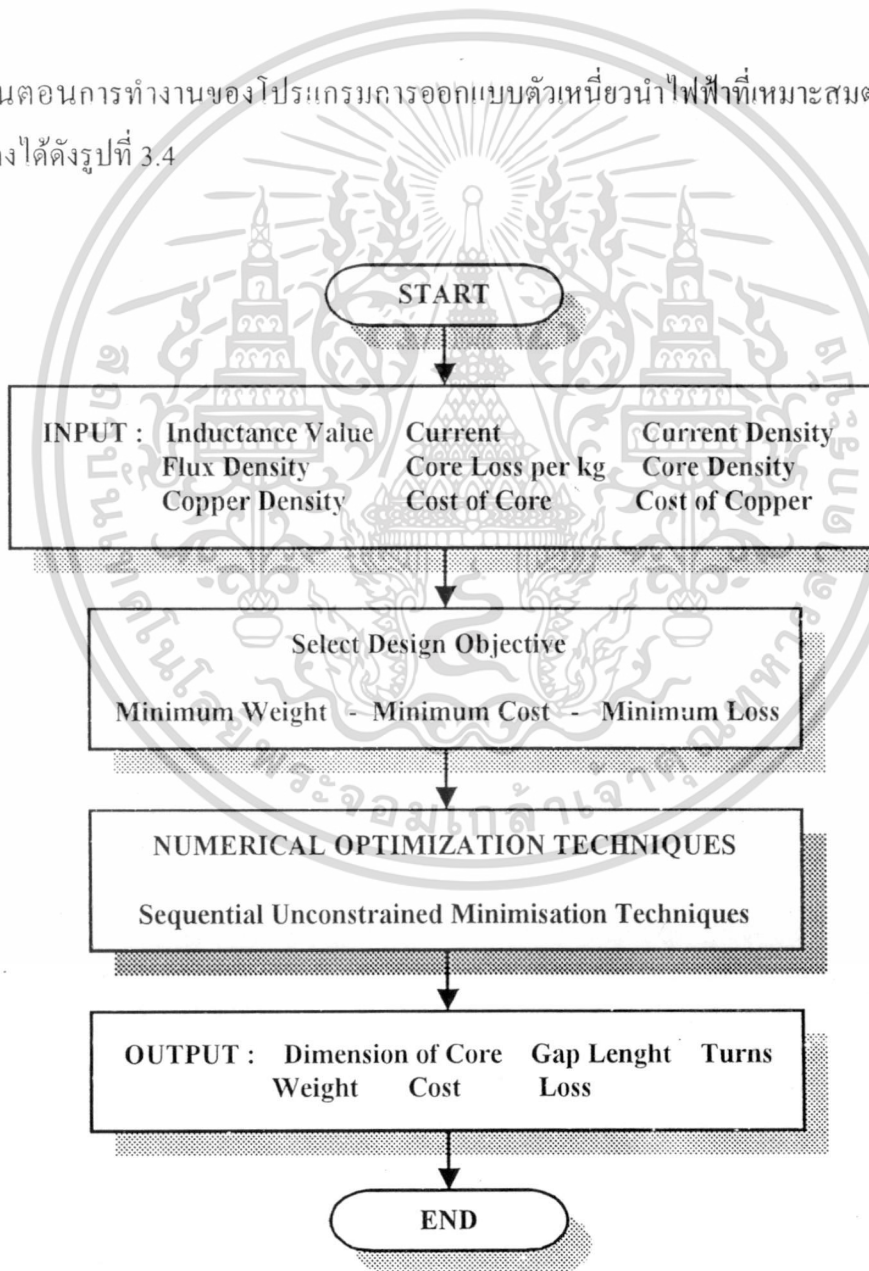
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{total}(D,E) = K_{core}(F_s \sigma_{core} Vol_{core}) + K_{cu}(\sigma_{cu} Vol_{cu}) \quad (3.14)$$

จะเห็นได้ว่าราคาของแกนเหล็ก C_{core} จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักแกนเหล็ก และราคาของลวดทองแดง C_{cu} จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักลวดทองแดง ค่า K_{core} และ K_{cu} จะมีค่าไม่เท่ากันและจะเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพของราคาตลาดซึ่งจะมีผลทำให้โครงสร้างที่พิจารณาจะมีรูปทรงที่เปลี่ยนไปด้วย

3.7 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมการออกแบบ

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมตามเป้าหมายต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3.4 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบการทำงานของโปรแกรมโดยการกำหนดเป้าหมายการออกแบบในเงื่อนไขทั้ง 3 แบบ เมื่อค่าตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ต้องการออกแบบเท่ากับ 20 mH 10 A และ 80 mH 20 A กำหนดให้

ค่า B_d เท่ากับ 1.0 Tesla

ค่า P_c ที่ 1.0 Tesla เท่ากับ 1.4 W/kg

ค่า K_{core} และ K_{cu} เท่ากับ 47 และ 130 Baht/kg ตามลำดับ

ค่า σ_{core} และ σ_{cu} เท่ากับ 7650 และ 8690 kg/m³ ตามลำดับ

ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 2.0 A/mm²

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบตามเงื่อนไขที่กำหนดเป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการทดสอบต้นแบบเพื่อยืนยันผลอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมเมื่อกำหนดเป้าหมายตามเงื่อนไขทั้ง 3 แบบ

$L = 20 \text{ mH}, 10 \text{ A}$	ผลที่ได้จากโปรแกรม		
	น้ำหนัก (kg)	ราคา (Baht)	ค่าสูญเสีย (W)
น้ำหนักรวมน้อยที่สุด	5.27	393.50	31.04
ราคาวัสดุรวมต่ำที่สุด	5.53	371.90	24.97
ค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุด	6.23	385.94	22.17

$L = 80 \text{ mH}, 20 \text{ A}$	ผลที่ได้จากโปรแกรม		
	น้ำหนัก (kg)	ราคา (Baht)	ค่าสูญเสีย (W)
น้ำหนักรวมน้อยที่สุด	40.70	3048.10	253.00
ราคาวัสดุรวมต่ำที่สุด	43.60	2857.14	189.02
ค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุด	47.90	2974.60	67.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

4.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับผลจากการทดสอบต้นแบบ

ในงานวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจำนวน 6 ชุด เพื่อนำมาทดสอบทางไฟฟ้าและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากโปรแกรม ดังนี้ ค่า L เท่ากับ 12 mH, 6 A และ 53 mH, 5 A แบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุด ค่า L เท่ากับ 42 mH, 5 A แบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุดและแบบ Area Product ค่า L เท่ากับ 68 mH, 5 A แบบค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุดและแบบ Area Product สำหรับแบบราคาวัสดุรวมต่ำสุดไม่จำเป็นต้องสร้างต้นแบบทดสอบทั้งนี้เพราะโครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับราคาของวัสดุในช่วงเวลาที่ออกแบบ จากนั้นนำต้นแบบเหล่านี้มาทดสอบทางไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากโปรแกรมซึ่งพบว่าต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าทั้ง 6 ชุด สามารถให้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 12 mH, 6 A และ 53 mH, 5 A โดยใช้โปรแกรม และต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยมีเป้าหมายแบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการสร้างและทดสอบต้นแบบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรม

ตารางที่ 4.1 ผลการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 12 mH, 6 A และ 53 mH, 5 A แบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุด

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

B_d (Tesla)	J (A / mm ²)	P_c (W / kg)	K_{core} (Baht / kg)	K_{cu} (Baht / kg)	σ_{core} (kg / m ³)	σ_{cu} (kg / m ³)
1.0	2.0	1.4	47	130	7650	8690

โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

น้ำหนักรวมน้อยที่สุด	12 mH, 6 A		53 mH, 5 A	
	ออกแบบ	ต้นแบบ	ออกแบบ	ต้นแบบ
$2E$ (cm)	4.13	3.81	5.09	5.08
D (cm)	1.64	2.10	2.62	2.65
N (turns)	158	135	295	295
l_g (mm)	0.84	1.1	1.31	3.1
R (Ω)	0.156	0.15	0.48	0.49
P_{total} (W)	12.71	11.00	26.50	23.50
We_{core} (kg)	1.23	1.30	2.96	3.02
We_{cu} (kg)	0.77	0.68	1.56	1.62
We_{total} (kg)	2.00	1.98	4.52	4.64

การปรับระยะช่องอากาศของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 12 mH, 6 A

Gap (mm)	0.0	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	open
V (V)	46.5	27	24.5	23.5	22.0	21.0	9.0
I (A)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
P (W)	16.0	12.0	11.5	11.0	9.0	8.0	7.0
L (mH)	24.7	14.3	13.0	12.5	11.7	11.1	4.8

การปรับระยะช่องอากาศของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 53 mH, 5 A

Gap (mm)	0.0	2.0	2.4	3.1	3.2	3.5	open
V (V)	176.0	108.0	95.0	83.0	81.0	77.0	46.0
I (A)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
P (W)	34.0	26.0	24.5	23.5	20.0	18.0	15.0
L (mH)	112.1	68.8	60.5	52.8	51.6	49.1	29.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบต้นแบบที่ได้จากโปรแกรมและจากวิธี Area Product

4.2.1 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 42 mH, 5 A แบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุด และแบบ Area Product

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 42 mH, 5 A โดยใช้โปรแกรม และโดยวิธี Area Product โดยมีเป้าหมายแบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด

ตารางที่ 4.2 ผลการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 42 mH, 5 A แบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุด และแบบ Area Product

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

B_d (Tesla)	J (A / mm ²)	P_c (W / kg)	K_{core} (Baht / kg)	K_{cu} (Baht / kg)	σ_{core} (kg / m ³)	σ_{cu} (kg / m ³)
1.2	2.0	2.0	47	130	7650	8690

โครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

	น้ำหนักรวมน้อยที่สุด		Area Product	
	ออกแบบ	ต้นแบบ	ออกแบบ	ต้นแบบ
$2E$ (cm)	4.39	5.08	3.81	3.81
D (cm)	2.21	1.65	3.81	3.81
N (turns)	254	295	160	160
l_g (mm)	0.95	2.8	0.64	0.6
R (Ω)	0.40	0.43	0.25	0.25
P_{total} (W)	20.3	18.0	16.7	17.0
$W_{e_{core}}$ (kg)	1.96	1.92	2.54	2.50
$W_{e_{cu}}$ (kg)	1.17	1.44	0.80	0.82
$W_{e_{total}}$ (kg)	3.13	3.3	3.34	3.32

การปรับระยะช่องอากาศของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 42 mH, 5 A แบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุด

Gap (mm)	0.0	0.7	1.2	2.0	2.8	2.9	open
V (V)	116.0	101.0	90.0	75.0	65.0	63.0	37.0
I (A)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
P (W)	29.0	25.0	23.0	20.5	18.0	16.0	14.5
L (mH)	73.8	64.3	57.3	47.7	41.4	40.7	23.6

การปรับระยะช่องอากาศของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 42 mH, 5 A แบบ Area Product

Gap (mm)	0.0	0.5	0.6	0.7	open
V (V)	102.0	76.0	65.0	58.0	14.0
I (A)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
P (W)	28.0	20.0	17.0	15.0	9.0
L (mH)	64.9	48.4	41.6	36.9	8.9

4.2.2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 68 mH, 5 A แบบค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุด และแบบ Area Product

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 68 mH, 5 A โดยใช้โปรแกรม และโดยวิธี Area Product โดยมีเป้าหมายแบบค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด

ตารางที่ 4.3 ผลการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 68 mH, 5 A แบบค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุด และแบบ Area Product

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

B_d (Tesla)	J (A / mm ²)	P_c (W / kg)	K_{core} (Baht / kg)	K_{cu} (Baht / kg)	σ_{core} (kg / m ³)	σ_{cu} (kg / m ³)
1.2	2.0	2.0	47	130	7650	8690

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบจากตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็นได้ว่าผลที่ได้จากโปรแกรมจะให้ค่าตามเป้าหมายที่ต้องการ แต่เนื่องจากในการสร้างต้นแบบจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงขนาด $2E$ ที่ได้จากโปรแกรมให้มีขนาดตามที่มีการผลิตจำหน่ายซึ่งจะมีผลทำให้ค่า D และ N ต้องมีการคำนวณใหม่ ตัวอย่างเช่น

ในตารางที่ 4.1 ที่ค่า L เท่ากับ 42 mH ค่า $2E$ จากโปรแกรมเท่ากับ 4.39 cm จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงให้มีขนาดเท่ากับที่มีจำหน่ายซึ่งต้องเปลี่ยนค่าเป็น 5.08 cm ดังนั้นจึงมีผลทำให้น้ำหนักรวมของต้นแบบคลาดเคลื่อนจากการออกแบบไป 5.4 % (จาก 3.13 kg เป็น 3.3 kg)

ในตารางที่ 4.2 ที่ค่า L เท่ากับ 68 mH ค่า $2E$ เปลี่ยนจาก 3.59 cm เป็น 3.81 cm มีผลทำให้ค่าสูญเสียรวมของต้นแบบคลาดเคลื่อนจากการออกแบบไป 6.8 % (จาก 20.6 W เป็น 22 W)

จากผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าต้นแบบที่สร้างขึ้น เมื่อใช้หลักการของวงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศโดยพิจารณาถึงผลของการปรับค่ากระแสที่ระยะช่องอากาศค่าต่าง ๆ พบว่า ถ้าวงจรแม่เหล็กไม่มีช่องอากาศค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จะไม่คงที่เมื่อค่ากระแสเปลี่ยนแปลง และถ้ามีช่องอากาศค่าความเหนี่ยวนำจะค่อนข้างคงที่ที่ระยะช่องอากาศค่าหนึ่ง ๆ ทำให้สามารถใช้วิธีการปรับระยะช่องอากาศมาทำการปรับแต่งให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ต้องการได้

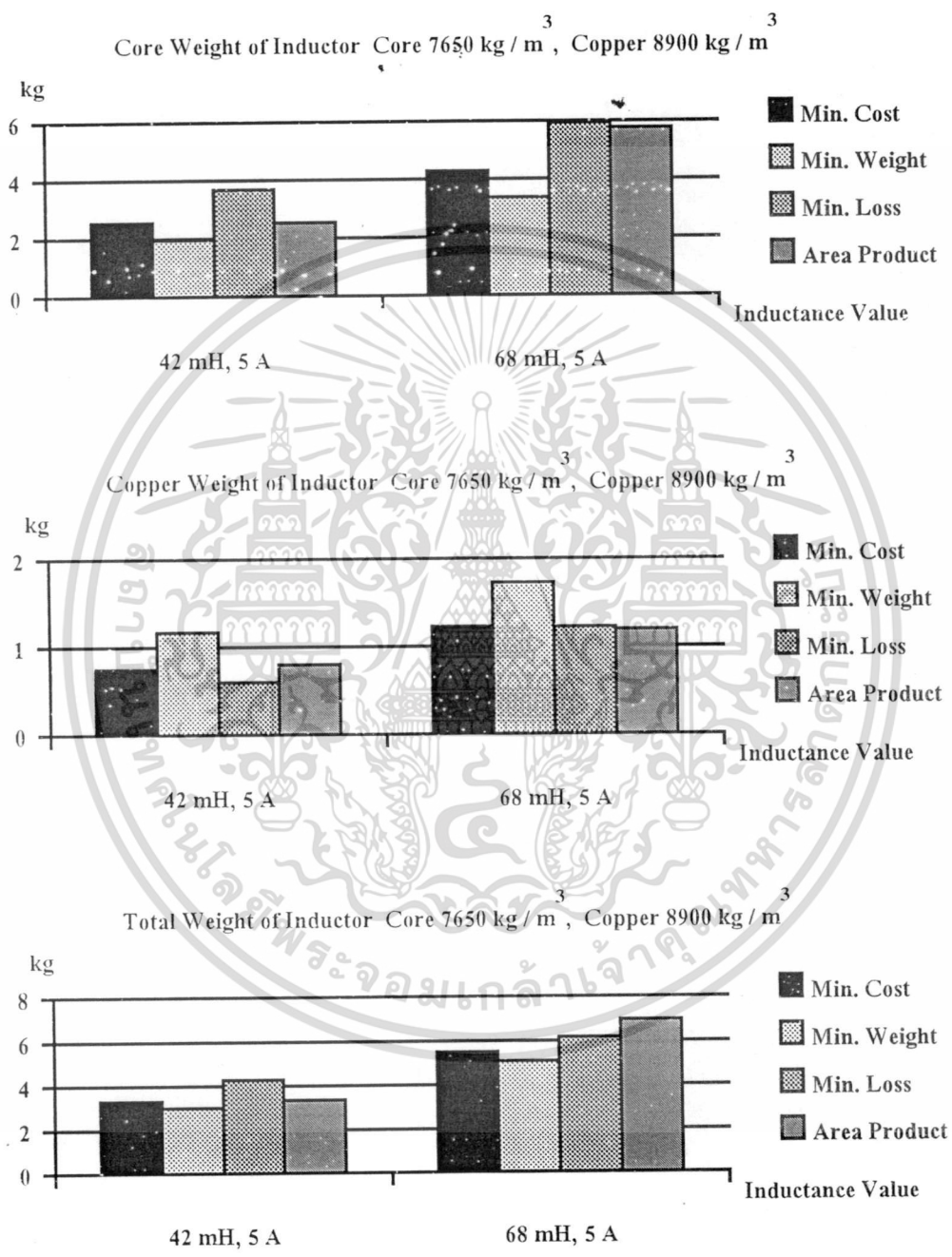
4.3 การเปรียบเทียบผลการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

หลังจากการตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบโดยพิจารณาจากผลการทดสอบต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจำนวน 6 ชุด แล้ว ทำให้สามารถทำการเปรียบเทียบผลการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาด 42 mH, 5 A และ 68 mH, 5 A ที่ได้จากโปรแกรมการออกแบบตามเป้าหมายต่าง ๆ กับผลที่ได้จากวิธี Area Product ดังนี้

Min. Weight	เป็นโปรแกรมแบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุด
Min. Loss	เป็นโปรแกรมแบบค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุด
Min. Cost	เป็นโปรแกรมแบบราคาวัสดุรวมต่ำที่สุด

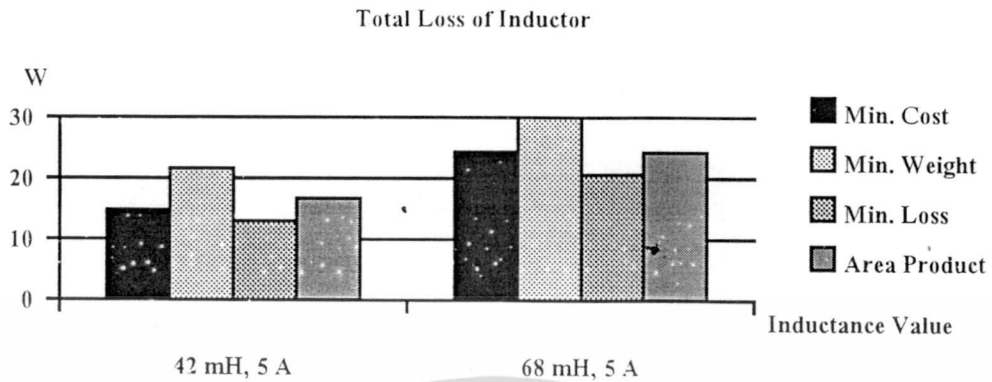
การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักรวมของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรมแบบต่าง ๆ กับการใช้วิธี Area Product แสดงดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมแบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุด จะได้ค่าน้ำหนักรวมน้อยกว่าทุกแบบ ดังนี้ ที่ค่า L เท่ากับ 42 mH มีค่าเท่ากับ 3.13 kg ในขณะที่เมื่อใช้วิธี Area Product จะมีค่าเท่ากับ 3.34 kg จะเห็นได้ว่าน้ำ

หนักจะลดลงประมาณ 6.3 % ที่ค่า L เท่ากับ 68 mH มีค่าเท่ากับ 5.3 kg ในขณะที่เมื่อใช้วิธี Area Product จะมีค่าเท่ากับ 6.7 kg จะเห็นได้ว่าน้ำหนักจะลดลงประมาณ 21 %

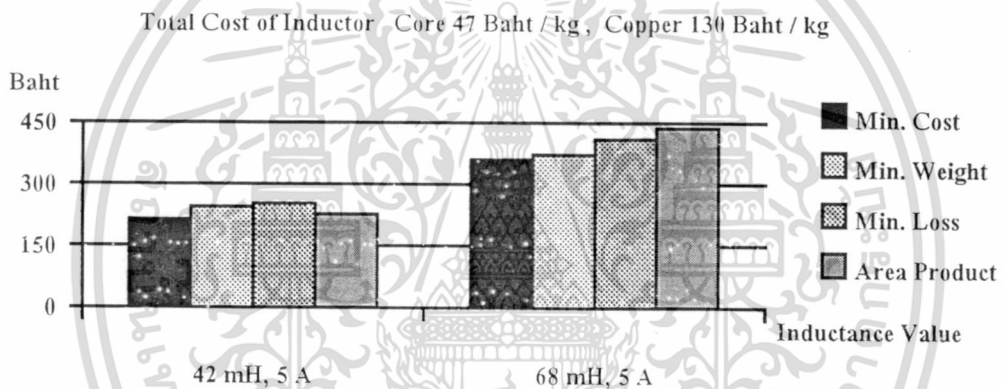


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักรวมของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรมแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าสูญเสียรวมของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรมแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าราคาวัสดุรวมของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรมแบบต่าง ๆ

การเปรียบเทียบค่าสูญเสียรวมของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรมแบบต่าง ๆ กับการใช้วิธี Area Product แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมแบบค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุดจะได้ค่าสูญเสียรวมมีค่าน้อยกว่าทุกแบบ ดังนี้ ที่ค่า L เท่ากับ 42 mH มีค่าเท่ากับ 13.4 W ในขณะที่เมื่อใช้วิธี Area Product จะมีค่าเท่ากับ 16.7 W จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสียจะลดลงประมาณ 19.7 % ที่ค่า L เท่ากับ 68 mH มีค่าเท่ากับ 20.6 W ในขณะที่เมื่อใช้วิธี Area Product จะมีค่าเท่ากับ 24.3 W จะเห็นได้ว่าค่าสูญเสียจะลดลงประมาณ 15.2 %

การเปรียบเทียบราคาวัสดุรวมของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ได้จากการใช้โปรแกรมแบบต่าง ๆ กับการใช้วิธี Area Product แสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมแบบราคาวัสดุรวมต่ำที่สุดจะได้ราคาวัสดุรวมมีค่าต่ำกว่าทุกแบบ ดังนี้ ที่ค่า L เท่ากับ 42 mH มีค่าเท่ากับ 214 Baht ในขณะที่เมื่อใช้วิธี Area Product จะมีค่าเท่ากับ 226 Baht จะเห็นได้ว่าราคาวัสดุจะลดลงประมาณ 5.4 % ที่ค่า L เท่ากับ 68 mH มีค่าเท่ากับ 361 Baht ในขณะที่เมื่อใช้วิธี Area Product จะมีค่าเท่ากับ 361 Baht จะเห็นได้ว่าราคาวัสดุจะลดลงประมาณ 17.6 %

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

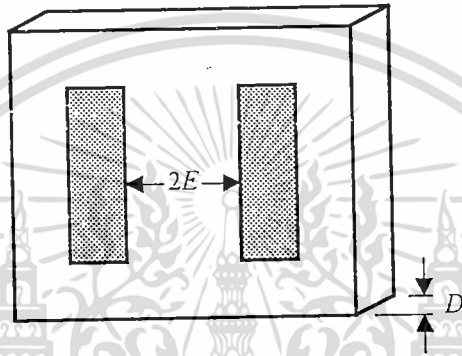
จากการพิจารณาวิธีการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI ด้วยวิธีการ Area Product เปรียบเทียบกับวิธีการอ็อพทีไมเซชันเชิงตัวเลขแบบมีเงื่อนไข โดยที่กำหนดเป้าหมายของการออกแบบที่แตกต่างกันได้แก่ โครงสร้างที่มีน้ำหนักรวมน้อยที่สุด หรือมีค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุด หรือมีราคาวัสดุรวมต่ำที่สุด จะพบว่าวิธีการ Area Product จะเน้นที่การออกแบบให้แกนหลักมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามขนาดแกนหลักมาตรฐาน โดยจะไม่คำนึงถึงผลทางด้านน้ำหนักของแกนหลักและขดลวด ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนหลักและขดลวด และราคาวัสดุของแกนหลักและขดลวดที่ใช้ ในขณะที่วิธีการอ็อพทีไมเซชันสามารถนำเอาผลเหล่านี้มาร่วมพิจารณาในการออกแบบได้ ซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมตามความต้องการดีกว่าการออกแบบโดยใช้วิธีการ Area Product ผลสรุปที่ได้จากโครงการวิจัยเป็นดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ โดยการสร้างต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจำนวน 6 ชุด เพื่อนำมาทดสอบทางไฟฟ้าและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 จะเห็นได้ว่าต้นแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่าง ๆ สามารถให้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการโดยใช้วิธีการปรับระยะห่างของช่องอากาศของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า
2. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมที่มีเป้าหมายให้มีน้ำหนักรวมน้อยที่สุดที่ค่า L เท่ากับ 42 mH จะได้ค่าน้ำหนักรวมลดลงประมาณ 6.3 % และที่ค่า L เท่ากับ 68 mH จะได้ค่าน้ำหนักรวมลดลงประมาณ 21 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ Area Product
3. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมที่มีเป้าหมายให้มีค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุดที่ค่า L เท่ากับ 42 mH จะได้ค่าสูญเสียรวมลดลงประมาณ 19.7 % และที่ค่า L เท่ากับ 68 mH จะได้ค่าสูญเสียรวมลดลงประมาณ 15.2 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ Area Product
4. การออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมที่มีเป้าหมายให้มีราคาวัสดุรวมน้อยที่สุดที่ค่า L เท่ากับ 42 mH จะได้ราคาวัสดุรวมลดลงประมาณ 5.4 % และที่ค่า L เท่ากับ 68 mH จะได้ราคาวัสดุรวมลดลงประมาณ 17.6 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ Area Product

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

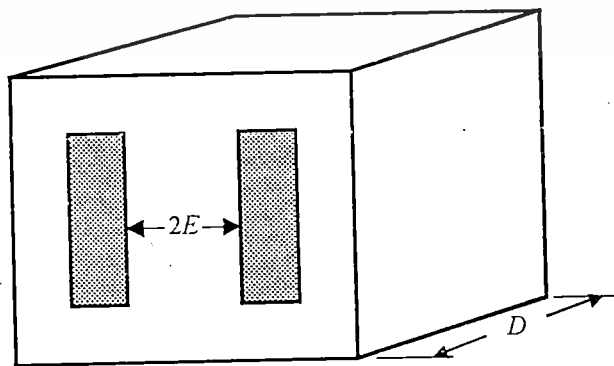
5. เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปร่างโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ออกแบบโดยโปรแกรม ที่มีเป้าหมายต่าง ๆ กัน จะสังเกตเห็นได้ว่า

แบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุดจะมีลักษณะโครงสร้างของแกนเหล็กเป็นแบบที่มีขนาด D น้อยกว่า $2E$ ดังรูปที่ 5.1 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าโปรแกรมแบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุดนี้จะพยายามออกแบบให้น้ำหนักแกนเหล็กและน้ำหนักขดลวดให้มีค่าประมาณเท่า ๆ กัน ดังนั้นน้ำหนักของทั้งสองส่วนจะมีค่าไม่แตกต่างกันมาก



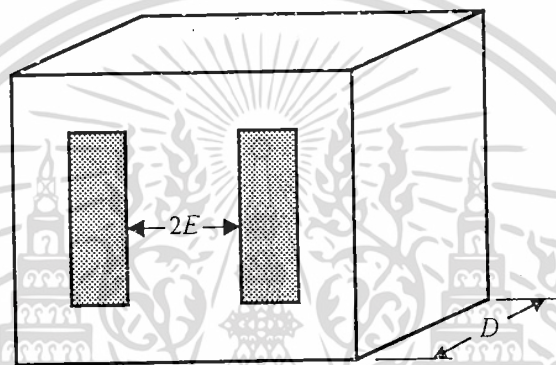
รูปที่ 5.1 ลักษณะโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบน้ำหนักรวมน้อยที่สุด

แบบค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุดจะมีลักษณะโครงสร้างของแกนเหล็กเป็นแบบที่มีขนาด D มากกว่า $2E$ ดังรูปที่ 5.2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าโปรแกรมแบบค่าสูญเสียรวมน้อยที่สุดนี้จะพยายามออกแบบให้น้ำหนักแกนเหล็กมีค่ามากกว่าน้ำหนักขดลวด ทั้งนี้เพราะค่าสูญเสียทางไฟฟ้าจากแกนเหล็กและขดลวดจะขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนัก โดยทั่วไปแล้วค่าสูญเสียในแกนเหล็ก (W/kg) จะมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับค่าสูญเสียในขดลวด (I^2R) ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักแกนเหล็กจะมีผลทำให้น้ำหนักขดลวดลดลงซึ่งเป็นการพยายามที่จะลดการสูญเสียในขดลวดเพื่อให้ได้ผลที่ทำให้ค่าสูญเสียรวมลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในด้าน การค้า ไม่ควรละเมิดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบราคาวัสดุรวมน้อยที่สุดจะมีลักษณะโครงสร้างของแกนเหล็กขึ้นอยู่กับราคาของแกนเหล็กและราคาของขดลวด ณ ช่วงเวลาที่ออกแบบ โดยทั่วไปแล้วในปัจจุบันราคาแกนเหล็กต่อกิโลกรัมจะต่ำกว่าราคาขดลวดต่อกิโลกรัมประมาณ 4 เท่า จะมีผลทำให้โครงสร้างของแกนเหล็กเป็นแบบที่มีขนาด D มากกว่า $2E$ ดังรูปที่ 5.3 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าโปรแกรมแบบราคาวัสดุรวมน้อยที่สุดนี้จะพยายามออกแบบให้น้ำหนักแกนเหล็กมีค่ามากกว่าน้ำหนักขดลวด ทั้งนี้เพราะราคาแกนเหล็กและขดลวดจะขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนัก ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักแกนเหล็กจะมีผลทำให้น้ำหนักขดลวดลดลงซึ่งเป็นการพยายามที่จะลดราคาขดลวดให้มีค่าน้อยลงเพื่อให้ได้ผลที่ทำให้ราคาวัสดุรวมลดลง จะเห็นได้ว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงราคาแกนเหล็กและขดลวดโครงสร้างก็จะมีรูปร่างที่แตกต่างกันไป



ราคาแกนเหล็กต่อกิโลกรัมต่ำกว่าราคาขดลวดต่อกิโลกรัมประมาณ 4 เท่า

รูปที่ 5.3 ลักษณะโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบราคาวัสดุรวมน้อยที่สุด

จากการวิจัยนี้จะเห็นได้ว่ามีข้อได้เปรียบอย่างเห็นได้ชัดในการใช้วิธีการออกแบบอ็อพทิไมเซชันเชิงตัวเลขคือผลลัพธ์ที่ได้สามารถช่วยให้ผู้ออกแบบได้โครงสร้างที่เหมาะสมโดยไม่ต้องเสียเวลาไปกับการใช้วิธีลองผิดลองถูก ดังนั้นวิธีการนี้จะทำให้ผู้ออกแบบมีแนวทางใหม่ในการพิจารณาออกแบบโครงสร้างตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดเช่น สามารถลดค่าน้ำหนัก หรือลดค่าสูญเสีย หรือลดต้นทุนการผลิตได้ เป็นต้น อย่างไรก็ตามโครงการวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขของแกนเหล็กที่ต้องเป็นไปตามรูปทรงแกนเหล็กมาตรฐานตามที่มีจำหน่ายดังรูปที่ 3.1 คือช่องว่างสำหรับขดลวดยังต้องมีขนาดเป็น $3E$ และ E จะมีผลทำให้การออกแบบจะยังไม่ได้ค่าที่ดีที่สุดในแต่ละเป้าหมาย ซึ่งสามารถวิจัยและพัฒนาต่อไปได้โดยการกำหนดให้ขนาดช่องว่างสำหรับขดลวดเป็นตัวแปรในการออกแบบด้วยจะทำให้ได้ผลที่ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

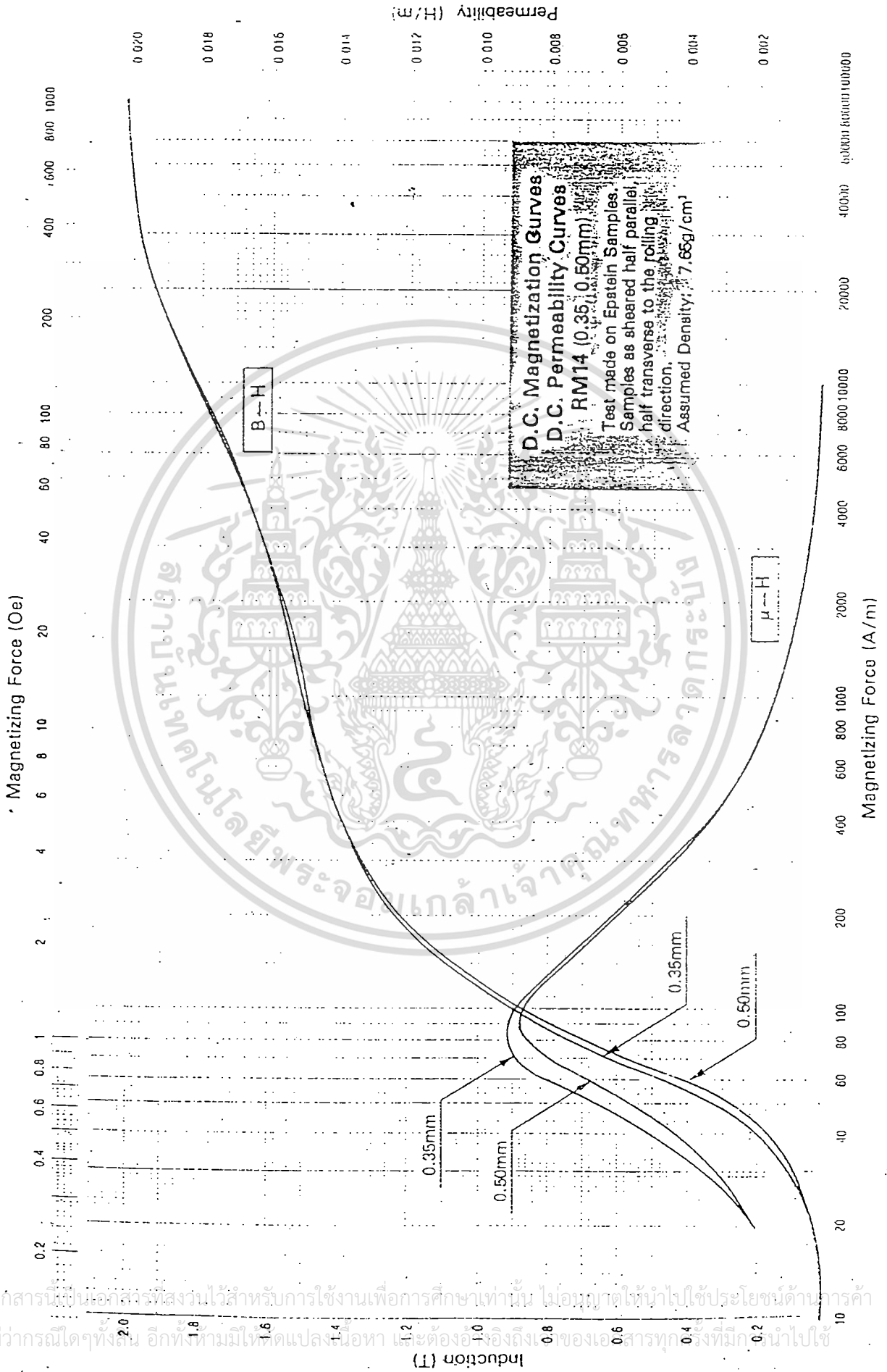
- [1] W. T. McLyman, Transformer and Inductor Design Handbook, Marcel Dekker, New York, 1990.
- [2] W. T. McLyman, Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors, Marcel Dekker, New York, 1982.
- [3] C. Chat-uthai and Pichit Lumyong, "Inductor Design Using Constrained Numerical Optimization", The 18th Electrical Engineering Conference, EECON-18, Thailand, November 1995, pp. 43 - 48
- [4] Topong Yungpanich and C. Chat-uthai, "Minimum Cost Design of Air-cored Solenoid Inductors" The 19th Electrical Engineering Conference, EECON-19, Thailand, November 1996, pp. PW72 - PW77.
- [5] G. N. Vanderplaats, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [6] J. S. Arora, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [7] W. H. Middendorf, Design of Devices and Systems, Marcel Dekker Inc., New York, 1990.

ภาคผนวก ก

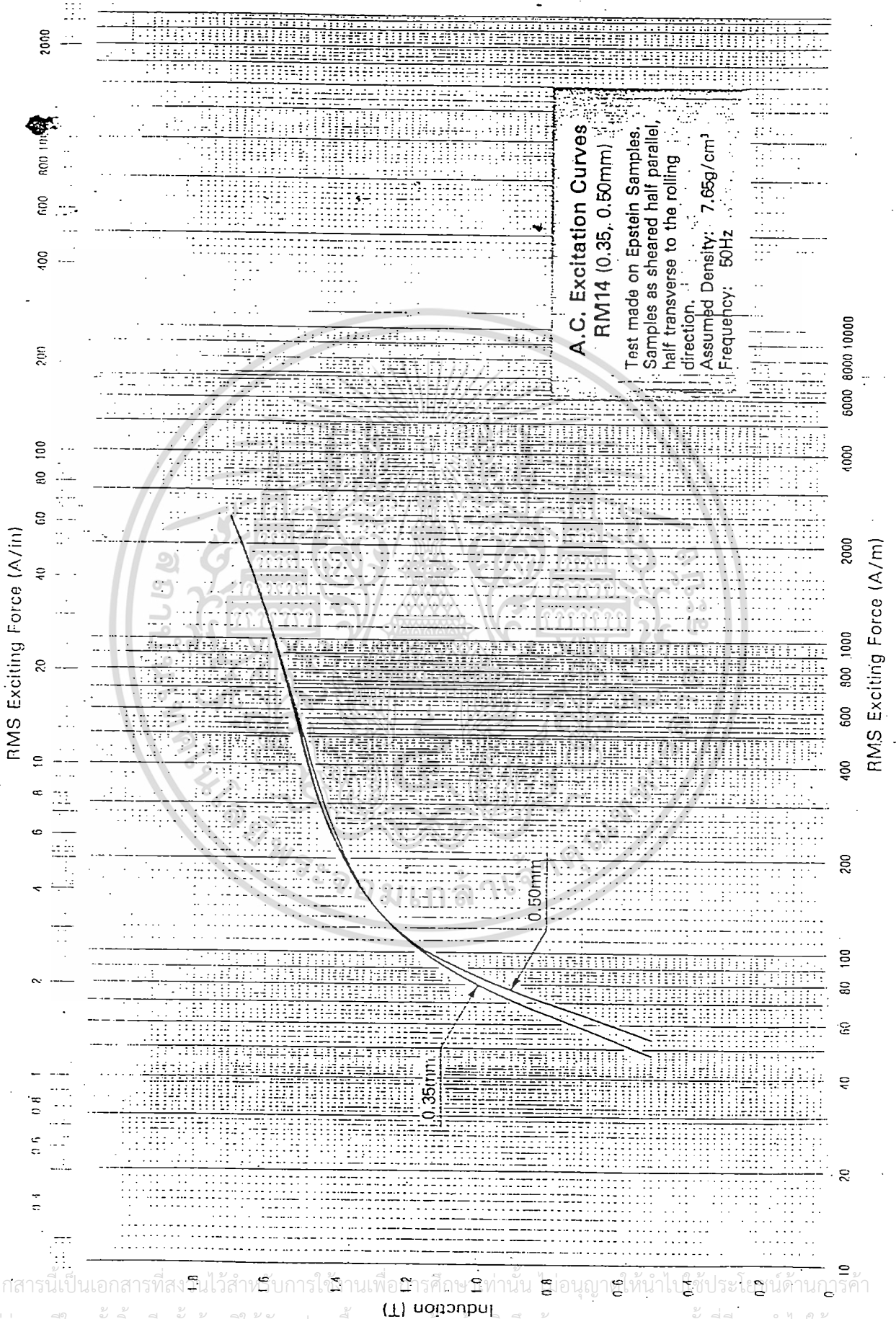
ข้อมูลแกนหลักที่ใช้ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า



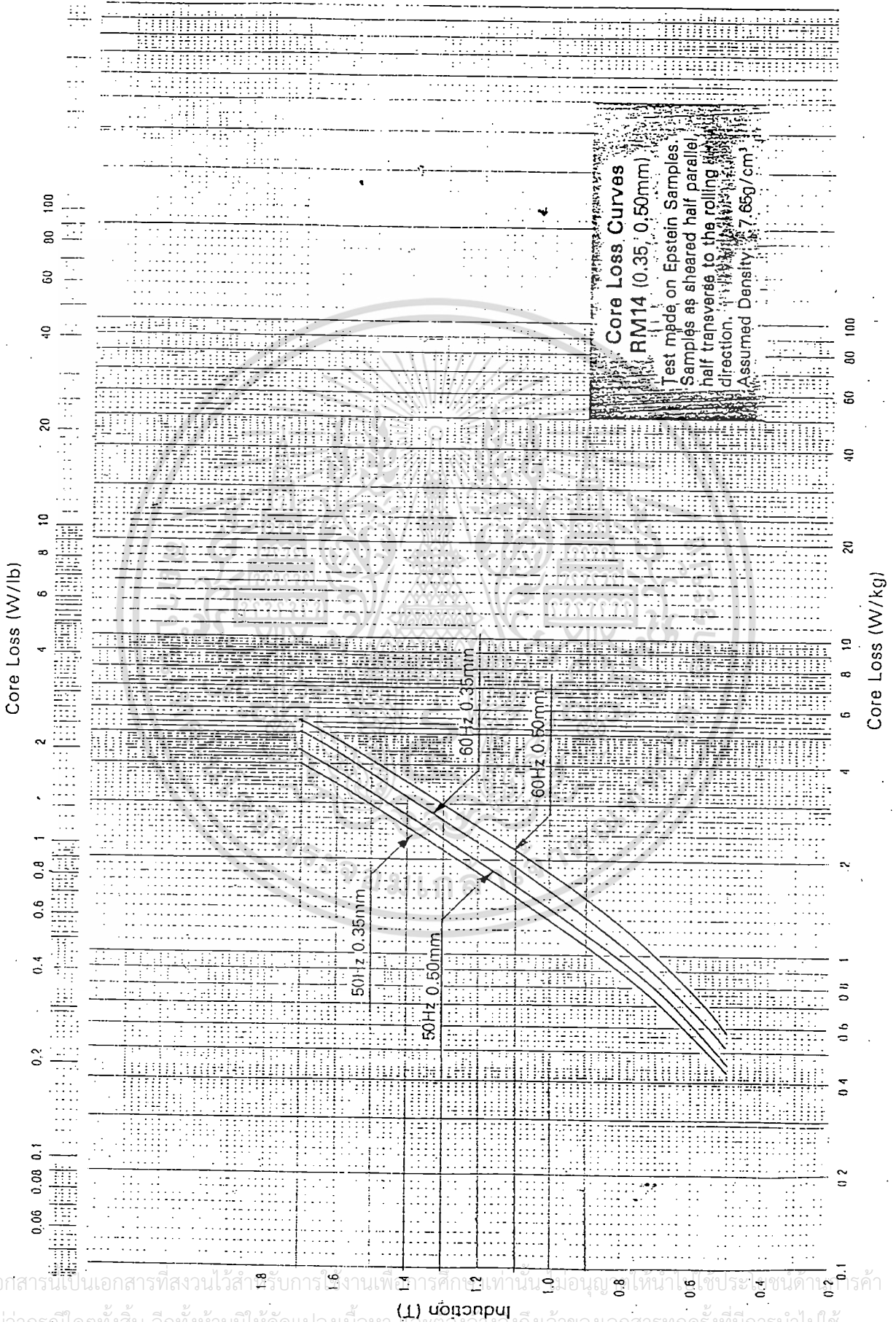
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ก่อนอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้