

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม
OPTIMAL DESIGN OF SMALL TRANSFORMER



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชัยวุฒิ นัตอรุทัย

ผศ.วีรศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์

106
34178
2541

เลขหน้.....
เลขทะเบียน 34178
เอกสารนี้เป็นของทรัพย์สินของราชการ
วัน, เดือน, ปี 6 ต.ค. 2542

ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่รับค่าธรรมเนียมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม

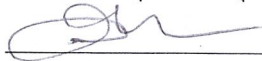
ผู้จัดทำ



1. นายชาญณรงค์ เชื้อนาค
2. นายธีรพล โปธิ์พงษ์วิวัฒน์
3. นายนฤทธิ์ ไร่รุ่งอรุณ

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ชัชวดี นัตโรทัย)

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.วีรศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม

นายชาญณรงค์ เชื้อนาค

นายธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์

นายณฤทธิ เร้ารุ่งอรุณ

ผศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.วีรศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยเทคนิคการทำให้เหมาะสม เพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีลักษณะตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยเน้นที่ น้ำหนัก ราคา หรือ ประสิทธิภาพ การออกแบบด้วยวิธีการทำให้เหมาะสมให้ผลที่ดีกว่าการออกแบบโดยทั่วไป ได้นำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณและ แสดงผลเพื่อความสะดวกในการออกแบบ

ผลที่ได้จากการออกแบบ นำมาสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม จากนั้นปรับปรุงพารามิเตอร์เพื่อให้ผลที่ได้จากโปรแกรมมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมสามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ตามวัตถุประสงค์ ที่ต้องการ

Optimal Design of Small Transformer

Mr.Chanarong Chuanak

Mr.Teeraphon Phophongviwat

Mr.Narit Raorong-a-roon

Asst.Prof Dr.Chaiwut Chat-uthai Advisor

Asst.Prof Mr.Veerarak Wongviwat Advisor

1998

Abstract

This thesis presents designing of small transformer based on optimization technique. Minimum weight and relatively low cost were considered in efforts of producing high efficiency transformer. This particular design yields a better product compared to other general methods. In addition, for convenience, a computer program was created to assist with mathematical calculations and presentation.

The sample transformer was created and tested. The tested data was compared with the result from the computer program. Thereafter, certain parameters in the program were adjusted for the correct result. Thus, this program is optimal for the designing of small transformer suitable of all purposes.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	2
2.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยวิธี Area Product	3
2.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยวิธี Numerical Optimization Technique	7
2.2.1 การสร้างสมการวัตถุประสงค์	7
2.2.2 การกำหนดสมการเงื่อนไข	12
บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	13
3.1 General Optimization Statement	13
3.2 ตัวอย่าง Numerical	16
บทที่ 4 แผนผังของโปรแกรมและผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสม	21
4.1 แผนผังของโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสม	21
4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม	30
4.3 วิเคราะห์ผลที่ได้จาก โปรแกรม	33
4.3.1 เปรียบเทียบผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า	34
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า V/N กับพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า	35
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า	36
4.3.4 เปรียบเทียบความแตกต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังเท่ากัน แต่พิกัดแรงดัน ไม่เท่ากัน	37
4.4 การทดสอบเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ	40
4.4.1 ทดลองเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B_{max})	40
4.4.2 ทดลองเปลี่ยนค่า Window Factor (F_w)	41
4.4.3 ทดลองเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสในลวดตัวนำ (J_{max})	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ทดลองเปลี่ยนค่า Stacking Factor	43
4.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธี Opimization Techniques กับการ ออกแบบโดยวิธี Area Product	44
บทที่ 5 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	48
5.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า	48
5.1.1 การทดสอบเปิดวงจร	48
5.1.2 การทดสอบลัดวงจร	50
5.2 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	52
5.3 เปรียบเทียบผล	53
5.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ ชุดที่ 2	55
5.5 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการออกแบบที่ได้จากโปรแกรม	55
5.6 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H	58
5.7 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า	60
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผล	63
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
ภาคผนวก ค	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 2.1 แกน EI มาตรฐาน	2
รูป 2.2 ปริมาตรของแกนเหล็ก	6
รูป 2.3 ความยาวเฉลี่ยของลวดค้ำนำ	7
รูป 3.1 อัลกอริทึมของการ Optimization	15
รูป 3.2 Rosenbrock' s function	15
รูป 3.3 Performance of the Rosenbrock 's function using unconstrained minimization methods	18
รูป 3.4 Iterative process of design variable using unconstrained minimization methods	18
รูป 4.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม	22
รูป 4.2 ภาพหน้าจอ Input	25
รูป 4.3 ภาพหน้าจอ Output	27
รูป 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและน้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า	33
รูป 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและราคารวมของหม้อแปลงไฟฟ้า	34
รูป 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า	34
รูป 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและค่า V/N ของหม้อแปลงไฟฟ้า	35
รูป 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพ	36
รูป 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและน้ำหนัก	45
รูป 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงและราคา	46
รูป 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงและประสิทธิภาพ	46
รูป 5-1 วงจรการทดสอบเปิดวงจร	49
รูป 5-2 วงจรสมมูลขณะทำการทดสอบเปิดวงจร	50
รูป 5-3 วงจรการทดสอบลัดวงจร	50
รูป 5-4 วงจรสมมูลการทดสอบลัดวงจร	51
รูป 5.5 วงจรสมมูลแบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	53
รูป 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H	60
รูป 5.7 อุณหภูมิ ขณะจ่ายภาระและไร้ภาระ	62
รูป 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและน้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูป 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและราคารวมของหม้อแปลงไฟฟ้า	65
รูป 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า	65
รูป 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนของค่า V/N กับน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้า	66
รูป 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนของค่า V/N กับราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า	66
รูป 6.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า และประสิทธิภาพ	68
รูป 6.7 รูปของการจัดเรียงลวดตัวนำที่ขนาดเล็กและขนาดใหญ่	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 3-1 คำตอบต่าง ๆ ของ Rosenbrock' s function ที่แก้ปัญหาโดยใช้วิธี POWELL, PR และ BFGS	17
ตาราง 4.1 ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Weight	30
ตาราง 4.2 ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Cost	31
ตาราง 4.3 ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Maximum Efficiency	32
ตาราง 4.4 ผลการเปลี่ยนพิกัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แต่พิกัดกำลังเท่ากัน	37
ตาราง 4.5 ผลการเปลี่ยนพิกัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แต่พิกัดกำลังเท่ากัน	38
ตาราง 4.6 ผลการเปลี่ยนพิกัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แต่พิกัดกำลังเท่ากัน	39
ตาราง 4.7 ผลที่ได้จากการเปลี่ยนค่า Flux Density	40
ตาราง 4.8 ผลที่ได้จากการเปลี่ยนค่า Window Factor	41
ตาราง 4.9 ผลที่ได้จากการเปลี่ยนค่า Current Density	42
ตาราง 4.10 ผลที่ได้จากการเปลี่ยนค่า Stacking Factor	43
ตาราง 4.11 ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธี Area Product	44
ตาราง 5.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ	52
ตาราง 5.2 ผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่ได้จากการพันจริง	54
ตาราง 5.3 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ ชุดที่ 2	55
ตาราง 5.4 ผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่ได้จากการพันจริง	56
ตาราง 5.5 ผลการทดสอบเปิดวงจร	58
ตาราง 5.6 ผลการทดสอบอุณหภูมิ ขณะจ่ายภาระและไร้ภาระ	61
ตาราง 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $2E$ กับ D	69

บทที่ 1

บทนำ

วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์นี้เพื่อศึกษาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีใช้เป็นส่วนประกอบอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์ทางด้านกำลังไฟฟ้าต่างๆ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปไม่ได้คำนึงถึงการหาจุดที่เหมาะสมเพียงแต่ ออกแบบให้สามารถใช้งานได้ตรงความต้องการเท่านั้น หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ ราคาแพงและประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้เกิดจุดความเหมาะสม โดยใช้หลักการของ Numerical Optimization Techniques ในการออกแบบ จะทำให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบที่มีจุดเด่นแตกต่างกันคือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักต่ำสุด หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำสุด หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเหมาะที่จะใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ และได้มีการสร้างและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบด้วยซึ่งเนื้อหาของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า และข้อกำหนดต่างๆ ในการออกแบบ รวมไปถึงการสร้างสมการหลัก (Objective Function) และสมการเงื่อนไข (Constraint Function) ที่จะนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรม Optimization Technique ที่นำมาใช้เพื่อช่วยออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎี Numerical Optimization Technique ซึ่งเป็นทฤษฎีที่นำมาใช้เพื่อช่วยในการออกแบบหาค่าที่เหมาะสม

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึง การใช้งานโปรแกรมพร้อมแสดงภาพหน้าจอของโปรแกรม ส่วนของการรับค่าข้อมูลและแสดงผลที่ได้จากโปรแกรมผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมในลักษณะต่างๆ แล้ววิเคราะห์ผลที่ได้ โดยเป็นการเปรียบเทียบในลักษณะต่างๆ คือ กรณีของน้ำหนัก ราคาและประสิทธิภาพนอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับกรออกแบบโดยวิธี Area Product ด้วย

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ เพื่อตรวจสอบและแก้ไขความถูกต้องของ โปรแกรมให้ดียิ่งขึ้นแล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกรออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธี Area Product

บทที่ 6 เป็นการสรุปและวิจารณ์ผลที่ได้จากโปรแกรมและการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ โดยจะแสดงให้เห็นถึงผลที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรมว่าสามารถนำไปสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้จริงและผลที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

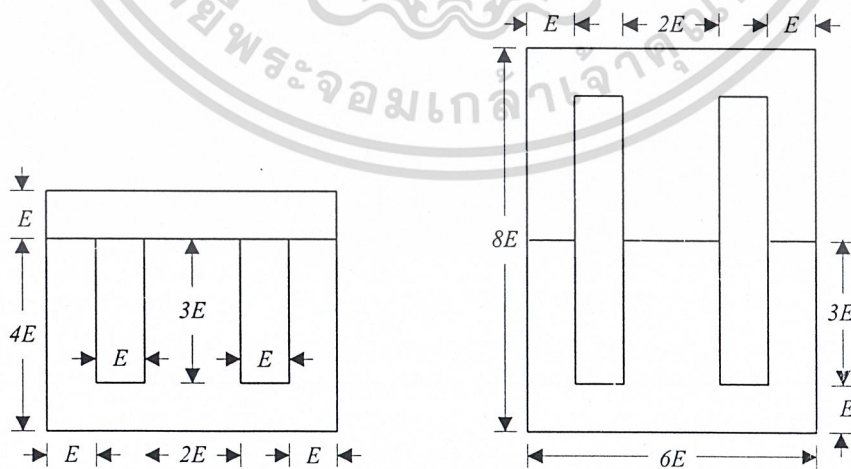
ทฤษฎีพื้นฐานของการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและปรับขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังนั้น ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบ ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าและขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนประกอบและหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถศึกษาได้จากหนังสือหม้อแปลงไฟฟ้าทั่วไป [2,7,9]

2.1 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยวิธี Area Product

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยวิธี Area Product นี้เป็นการออกแบบที่ใช้กันโดยทั่วไป ซึ่งการออกแบบโดยวิธีนี้จะไม่คำนึงถึงน้ำหนัก ราคาและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเลย ดังนั้นผลของการออกแบบที่ได้จะไม่เป็นที่พอใจในด้านน้ำหนัก ราคาและประสิทธิภาพมากนัก จะเป็นเพียงหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้เท่านั้น

หม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งจะนำมาใช้ในการออกแบบเป็นชนิด Shell type แกนเหล็กที่ใช้จะมีโครงสร้างเป็นแกนเหล็กชนิด EI ซึ่งใช้แกนเหล็กชนิดที่ผลิตขายตามท้องตลาด โดยเหตุผลทางการค้าจึงทำให้มีขนาดที่เป็นมาตรฐานและมีความสัมพันธ์ของขนาดความกว้างของแกนกลาง ($2E$) กับส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2-1



รูป 2.1 แกน EI มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การกำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจำเป็นต้อง กำหนดคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้า (Specification) ที่ต้องการออกแบบก่อนเพื่อนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณ

คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านการใช้งาน ที่จำเป็นต้องทราบมีดังต่อไปนี้

1. พิกัดกำลัง (VA)
2. แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ (V_p)
3. แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ (V_s)
4. ความถี่ใช้งาน (f)
5. พิกัดการเพิ่มของอุณหภูมิ T_{rise} ($^{\circ}C$)

กำหนดชนิดของแกนเหล็กและลักษณะของลวดตัวนำ

1. แกนเหล็กใช้แกนแบบ EI ขนาดตามมาตรฐาน ข้อมูลที่ควรทราบคือ ความหนาของแผ่นเหล็ก ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก (Watt/kg) ราคาต่อกิโลกรัม และคุณลักษณะของแกนเหล็กหรือ B-H Curve เพื่อจะทราบถึงช่วงการทำงานที่เหมาะสมของแกนเหล็ก[3] ซึ่งในทางปฏิบัติกรณีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กใช้ประมาณ 1T.

2. ลวดตัวนำใช้ลวดทองแดงแบบกลม หุ้มฉนวนชั้นเดียว ข้อมูลควรทราบที่คือขนาดของพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำตามมาตรฐาน ความต้านทานจำเพาะและราคาต่อกิโลกรัม

3. กระจวย [Bobbin] ระบุชนิดและความหนาของวัสดุที่เลือกใช้

2. หาขนาดพื้นที่หน้าตัด (A_c) และขนาดแกนเหล็ก ($2E$) โดยแทนค่าในสมการ (2-1)

$$A_c = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad (2-1)$$

โดย A_c : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีหน่วยเป็นตารางนิ้วซึ่งคิดรวมค่า Stacking Factor แล้ว (s.f.=0.95) และมีข้อกำหนดว่าพื้นที่หน้าตัดนี้จะต้องเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วย โดยมีเหตุผลเกี่ยวกับการพันลวดตัวนำ [6]

ดังนั้นจะได้ขนาดของแกนเหล็ก

$$2E \cong \sqrt{A_c} \quad (2-2)$$

นำขนาดของแกนเหล็กที่คำนวณได้ไปเลือกของแกนเหล็กจริงโดยเลือกขนาดใกล้เคียง เมื่อเลือกได้แล้วนำขนาดของแกนเหล็กที่เลือกคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดจริง

$$A_c = (2E)^2 \quad (2-3)$$

3. นำขนาดพื้นที่หน้าตัด (A_c) และแรงดันไปหาจำนวนรอบของลวดตัวนำทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิ จากสมการของ Faraday [9] ดังนั้นจะได้

$$V = 4.44 f N B_{\max} A_c \times (2.54 \times 10^2)^2 \quad (2-4)$$

หรือ

$$N_p = \frac{V_p}{4.44 f B_{\max} A_c \times (2.54 \times 10^2)^2} \quad (2-5)$$

และ

$$N_s = \frac{V_s}{4.44 f B_{\max} A_c \times (2.54 \times 10^2)^2} \quad (2-6)$$

4. หาขนาดของลวดตัวนำที่ใช้ในการพัน (A_w) ทางด้าน ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ได้จากสมการ (2-7) และ (2-8)

$$A_{w_p} = \frac{I_p}{J} f_v \quad (2-7)$$

และ

$$A_{w_s} = \frac{I_s}{J} \quad (2-8)$$

โดย f_v : ตัวประกอบความสูญเสียในหม้อแปลง

J : ค่าความหนาแน่นกระแสของลวดตัวนำ (A/mm^2)

A_{w_p} : พื้นที่หน้าตัดลวดปฐมภูมิ (mm^2)

A_{w_s} : พื้นที่หน้าตัดลวดทุติยภูมิ (mm^2)

หมายเหตุ ตัวประกอบของความสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส มีความสัมพันธ์กับขนาดพิกัดกำลังของหม้อแปลงคือ $f_v = f(VA)$ และ $J = f(VA)$ ในการคำนวณใช้วิธี

curve fitting เพื่อหาค่าของ $f_v = f(VA)$ และ $J = f(VA)$ [1] ซึ่งสามารถดูได้จากภาคผนวก ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำออกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หาพื้นที่หน้าตัดรวมของลวด (Aw_{total}) จากสมการ (2-9)

$$Aw_{total} = (N_p Aw_p + N_s Aw_s) \quad (2-9)$$

โดย Aw_{total} มีหน่วยเป็น (mm^2)

6. หาค่าพื้นที่ใช้งานจริงหรือที่เรียกว่าพื้นที่หน้าตัดว่าง (A_r) จากสมการ(2-10)

$$A_r = E \times 3E \times (2.54 \times 10^2)^2 \quad (2-10)$$

7. ตรวจสอบพื้นที่หน้าตัดรวมของลวด (Aw_{total}) และพื้นที่ใช้งานจริง (A_r) ว่าสามารถพันลวดลงไปได้จริงหรือไม่ จากสมการ(2-11)

$$A_r \geq \frac{Aw_{total}}{F_w} \quad (2-11)$$

โดยที่ F_w คือ ตัวประกอบการพันขดลวด (Winding Factor)

ถ้าหากตรวจสอบแล้วเป็นไม่ไปตามเงื่อนไขจะต้องปรับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A_c) โดยที่เลือกขนาดแกนเหล็ก ($2E$) และเปลี่ยนความหนาของการเรียงแกนเหล็กใหม่ โดยที่พื้นที่ของแกนเหล็กยังคงเท่าเดิม และทำการตรวจสอบพื้นที่การพันขดลวดใน ข้อ 7 เสียใหม่ จนสามารถพันลวดได้

จากขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าขั้นตอนการออกแบบไม่คำนึงถึงปริมาณน้ำหนักและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเลย ซึ่งเมื่อนำไปสร้างอาจจะทำให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีปริมาณน้ำหนักและราคาไม่เหมาะสมรวมถึงหม้อแปลงไฟฟ้าที่ด้อยประสิทธิภาพด้วย ดังนั้นโครงการนี้จึงนำ Numerical Optimization Technique ซึ่งเป็นเทคนิคการออกแบบที่จะช่วยให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสม

2.2 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดย Numerical Optimization Technique

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยวิธีนี้ ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดเป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ ในการออกแบบว่าต้องการหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีลักษณะอย่างไร ซึ่งในโครงการนี้จะกำหนดให้มีลักษณะดังนี้

1. น้ำหนักรวมนี้อาจต่ำสุด
2. ราคารวมนี้อาจต่ำสุด
3. ประสิทธิภาพสูงสุด

เมื่อกำหนดเป้าหมายที่ต้องการแล้ว ผู้ออกแบบจะต้องสร้างสมการเป้าหมาย(Objective Function) ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

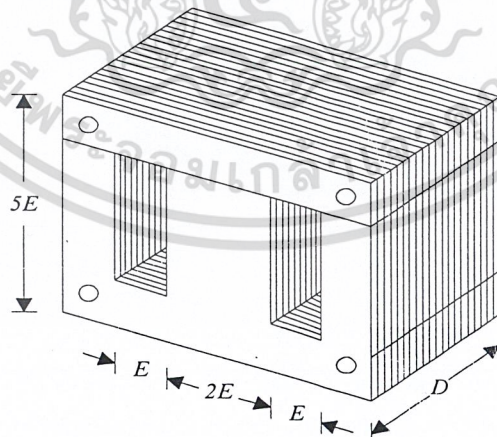
2.2.1 การสร้างสมการวัตถุประสงค์

1. น้ำหนักรวมนี้อาจต่ำสุด

น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าคือน้ำหนักลวดตัวนำรวมกับน้ำหนักของแกนเหล็ก ดังนั้น น้ำหนักรวมนี้อาจต่ำสุดคือน้ำหนักลวดตัวนำรวมกับน้ำหนักของแกนเหล็กแล้วมีค่าต่ำสุด

สมการน้ำหนักของแกนเหล็ก

น้ำหนักของแกนเหล็กสามารถกำหนดได้จากปริมาตรของแกนเหล็กและค่าความหนาแน่นของแกนเหล็กซึ่งปริมาตรของแกนเหล็กสามารถพิจารณาได้จากรูป 2-2 และปริมาตรทั้งสองนี้สามารถกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้



รูป 2.2 ปริมาตรของแกนเหล็ก

$$\text{ปริมาตรของแกนเหล็ก} = (5E)(6E)(D) - 2(3E)(E)(D) \quad (2-12)$$

$$= 30DE^2 - 6DE^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 24DE^2 \tag{2-13}$$

$$\text{น้ำหนักของแกนเหล็ก } (W_{core}) = (s.f.) \rho_{core} V_{core} \tag{2-14}$$

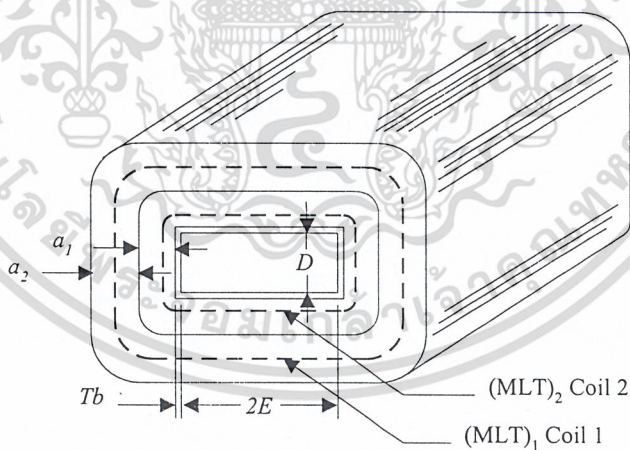
เมื่อ $s.f.$: Stacking Factor
 ρ_{core} : ความหนาแน่นของแกนเหล็ก (kg/m³)
 V_{core} : ปริมาตรของแกนเหล็ก (m³)

ดังนั้นจะได้

$$W_{core}(D, E) = (s.f.) \rho_{core} 24DE^2 \tag{2-15}$$

สมการน้ำหนักของลวดตัวนำ

ก่อนที่ผู้ออกแบบจะพิจารณาถึงน้ำหนักของลวดตัวนำ ควรพิจารณาความยาวเฉลี่ยต่อรอบของลวดตัวนำ (Mean turn length, MLT) ก่อน [11] พิจารณารูปที่ 2-3



รูป 2.3 ความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำ

จากรูป

$$MLTV_p = 2(2E + 2T_b) + 2(D + 2T_b) + \pi a_1 \tag{2-16}$$

$$MLTV_s = 2(2E + 2T_b) + 2(D + 2T_b) + \pi(2a_1 + a_2) \tag{2-17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $MLTV_s = MLTV_p + (a_1 + a_2 + 2c)$ (2-18)

เมื่อ T_b = ความหนาของกระสวย (Bobbin)

a_1 = ความหนาของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิซึ่งกำหนดจาก

$$a_1 = \frac{(AWV_p \times NV_p)}{3E \times F_w}$$

a_2 = ความหนาของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิซึ่งกำหนดจาก

$$a_2 = \frac{(AWV_s \times NV_s)}{3E \times F_w}$$

c = ความหนาของฉนวนที่คั่นระหว่างลวดตัวนำด้านปฐมภูมิและด้าน
ทุติยภูมิ

ดังนั้นจะได้

$$MLTV_p = 4E + 2D + 8T_b + \pi \frac{(AWV_p \times NV_p)}{3E \times F_w} \quad (2-19)$$

$$MLTV_s = MLTV_p + 2c + \frac{(AWV_p \times NV_p) + (AWV_s \times NV_s)}{3E \times F_w} \quad (2-20)$$

ซึ่งสามารถกำหนดความยาวของลวดตัวนำได้

$$LV_p = NV_p \times MLTV_p \quad (2-21)$$

$$LV_s = NV_s \times MLTV_s \quad (2-22)$$

ดังนั้นปริมาตรของลวดตัวนำคือ

$$V_{cu} = (AWV_p \times NV_p \times MLTV_p) + (AWV_s \times NV_s \times MLTV_s) \quad (2-23)$$

และน้ำหนักของลวดตัวนำสามารถกำหนดได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_{cu}(D, E) = \rho_{cu} V_{cu} \quad (2-24)$$

เมื่อ ρ_{cu} : ความหนาแน่นของขดลวดตัวนำ

จากน้ำหนักของแกนเหล็กและน้ำหนักของลวดตัวนำที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นทำให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดฟังก์ชันน้ำหนักต่ำสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งจะกำหนดให้เป็น Objective function ได้ดังนี้

$$F(D, E) = W_{core}(D, E) + W_{cu}(D, E) \quad \text{มีค่าต่ำสุด} \quad (2-25)$$

2. ราคาธรรมมีค่าต่ำสุด

จาก Objective function ของน้ำหนักต่ำสุดนั้นจะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กับ Objective function ของราคาต่ำสุดดังนั้นจึงสามารถกำหนด Objective function ของราคาต่ำสุดได้ ดังสมการ (2-26)

$$F(D, E) = C_c W_{core}(D, E) + C_w W_{cu}(D, E) \quad \text{มีค่าต่ำสุด} \quad (2-26)$$

เมื่อ C_c : ราคาของแกนเหล็ก Baht/kg

C_w : ราคาของลวดตัวนำ Baht/kg

3. ประสิทธิภาพสูงสุด

การคำนวณหาประสิทธิภาพนั้นสามารถพิจารณาได้จากความสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นความสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็ก (Core Loss) และความสูญเสียเนื่องจากลวดตัวนำ (Copper Loss) ซึ่งสามารถกำหนดได้จาก

1. ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss, P_{core})

$$P_{core}(D, E) = P_c W_{core}(D, E) \quad (2-27)$$

เมื่อ P_c : ความสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก (W/kg) ค่าของ P_c สามารถดูได้จากกราฟคุณลักษณะของแกนเหล็กซึ่งแสดงในภาคผนวก ข

2. ความสูญเสียในลวดตัวนำ (Copper Loss , P_{cu})

$$I^2R = \left(\frac{VA}{V_p} f_v \right) (RV_p + a^2 RV_s) \quad (2-28)$$

เมื่อ

a : Transformer Ratio

RV_p : ค่าความต้านทานของลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ

RV_s : ค่าความต้านทานของลวดตัวนำด้านทุติยภูมิ

$$RV_p = \left(\rho \frac{LV_p}{AWV_p} \right) \quad (2-29)$$

และ

$$RV_s = \left(\rho \frac{LV_s}{AWV_s} \right) \quad (2-30)$$

ดังนั้น

เมื่อ ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของขดลวดตัวนำ

$$R_{eq} = \rho \left(\frac{LV_p}{AWV_p} + \frac{LV_s}{AWV_s} \right) \quad (2-31)$$

ซึ่งความต้านทานที่อุณหภูมิทำงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น คำนวณได้จาก

$$R_{WARM} = \left(\frac{235^\circ C + T_1}{235^\circ C + T_2} \right) R_{eq} \quad (2-32)$$

เมื่อ

R_{WARM} : ความต้านทานที่อุณหภูมิทำงาน

T_1 : อุณหภูมิห้อง ($^\circ C$)

T_2 : อุณหภูมิทำงาน (ขึ้นอยู่กับชนิดของฉนวน) ($^\circ C$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบเราจะกำหนดให้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานในสถานะที่อุณหภูมิสูงสุด (75°C) ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ โดยที่ฉนวนของลวดตัวนำยังคงทนได้ดังนั้น

$$R_{warm} = \left(\frac{235^{\circ}C + T_1}{235^{\circ}C + 75} \right) R_{eq} \quad (2-33)$$

ดังนั้นค่าความสูญเสียเนื่องจากลวดตัวนำสามารถกำหนดได้โดยสมการ

$$P_{cu}(D, E) = R_{warm} \rho \left(\frac{VA}{VHV} \right)^2 \left(\frac{LHV}{AWHV} + a^2 \frac{LLV}{AWLV} \right) \quad (2-34)$$

จากสมการ (2-27) และ(2-34) สามารถกำหนด Objective function ของกรณีประสิทธิภาพสูงสุดได้ดังนี้

$$F(D, E) = P_{cu}(D, E) + P_{core}(D, E) \quad \text{มีค่าต่ำสุด} \quad (2-35)$$

2.2.2 การกำหนดสมการเงื่อนไข (Constrain Function)

ในทางคณิตศาสตร์เมื่อต้องการหาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชันเราสามารถกระทำได้โดยการหาค่า derivative ของฟังก์ชันนั้น และเนื่องจากจุดที่มีค่าต่ำสุดนั้นจะมีความชันเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเราจึงเทียบให้ derivative ที่หาได้เท่ากับศูนย์แล้วจึงแก้สมการเพื่อหาค่าต่ำสุด หรือ สามารถหาค่าต่ำสุดได้โดย กำหนดให้ตัวแปรที่มีอยู่เทียบเท่ากับศูนย์ทั้งหมด แต่เมื่อพิจารณาทางด้านวิศวกรรมแล้วไม่สามารถทำเช่นนั้นได้ เพราะหากกำหนดให้ตัวแปรเทียบเท่ากับศูนย์แล้ว จะไม่สามารถสร้างชิ้นงานได้เลย เช่น เมื่อต้องการให้น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด ซึ่งเราทราบว่า น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า คือน้ำหนักของลวดตัวนำรวมกับน้ำหนักของแกนเหล็ก ถ้าหากเรากำหนดให้ น้ำหนักของลวดตัวนำและน้ำหนักของแกนเหล็กเป็นศูนย์ เพื่อให้ได้ค่าต่ำสุด เราจะไม่สามารถสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังนั้นเราจึงต้องกำหนดสมการเงื่อนไขขึ้นเพื่อกำหนดค่าของตัวแปรให้ค่าที่คำนวณได้เป็นจริง สามารถนำไปสร้างได้ในทางปฏิบัติ ซึ่งสมการเงื่อนไขสามารถพิจารณาได้ดังนี้

จากสมการวัตถุประสงค์ (Objective Function) จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรซึ่งเกี่ยวกับขนาดของแกนเหล็ก (2E) และขนาดความหนาของแกนเหล็ก (D) ดังนั้นจะสามารถกำหนดสมการเงื่อนไข (Constrain Function) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขนาดเล็กสุดของแกนเหล็ก ($2E$) จะต้องทำให้พื้นที่ช่องว่างมีขนาดเพียงพอที่จะพันลวดตัวนำลงได้
2. ขนาดใหญ่สุดของแกนเหล็ก ($2E$) จะต้องไม่ใหญ่กว่าขนาดมาตรฐานที่มีการใช้งาน
3. ขนาดเล็กสุดของความหนาของแกนเหล็ก (D) จะต้องมีความมากกว่าศูนย์
4. ขนาดใหญ่สุดของความหนาของแกนเหล็ก (D) จะต้องมีความไม่มากกว่าผลหารของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กกับขนาดแกนเหล็ก
5. เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลซึ่งไม่มีส่วนประกอบที่เคลื่อนที่ ดังนั้นประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงสูงกว่าเครื่องจักรกลทั่วไป ซึ่งในโครงการนี้จะกำหนดให้ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบจะต้องมีประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 85 %

เมื่อกำหนดสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขแล้ว เมื่อนำไปคำนวณโดยโปรแกรม จะทำให้ทราบค่า $2E$, D และ V/N รวมถึงข้อมูลต่างๆที่จำเป็นต้องทราบในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 3

ทฤษฎีที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของการ Optimization ซึ่งมีอัลกอริทึม(algorithm)ดังแสดงในรูป 3-1 และได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่จำเป็นเช่น การหาค่า gradient ซึ่งใช้วิธี Finite Difference Approximation การ Optimization โดยการแปลงให้อยู่ในรูป Unconstrained ทฤษฎีในการหาทิศทาง ทฤษฎี Conjugate Gradient ทฤษฎี Variable Metric และยังได้กล่าวถึงทฤษฎี Transformation ในการแก้ปัญหาในกรณีที่เงื่อนไขมีลักษณะเป็น non-linear โดยจะทำการเปลี่ยนรูปของ objective และ constraint functions ซึ่งมีเทคนิคต่างๆ ดังนี้

1. Sequential Unconstrained Minimization ซึ่งแบ่งได้อีก 3 วิธี คือ

1. Exterior Penalty Function
2. Interior Penalty Function
3. Extended Interior Penalty Function

2. Augmented Lagrangian Multiplier Method

เทคนิคนี้จะไม่ได้นำมาใช้ในการทำ Project นี้ ซึ่งสามารถศึกษาได้จากหนังสือที่เกี่ยวข้องกับ Optimization [8,10,12]

3.1 General Optimization Statement

โดยมากการออกแบบการแก้ปัญหของ Optimization สามารถจัดให้อยู่ในสูตรทางคณิตศาสตร์ของเงื่อนไขทั่วไปการ Optimization ได้ตามนี้

$$\text{Minimise } F(x) \quad \text{objective function} \quad (3-1)$$

โดย

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad \text{เงื่อนไขของการเท่ากัน} \quad (3-2)$$

$$g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \text{เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน} \quad (3-3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, n \quad \text{เงื่อนไขขอบเขต} \quad (3-4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

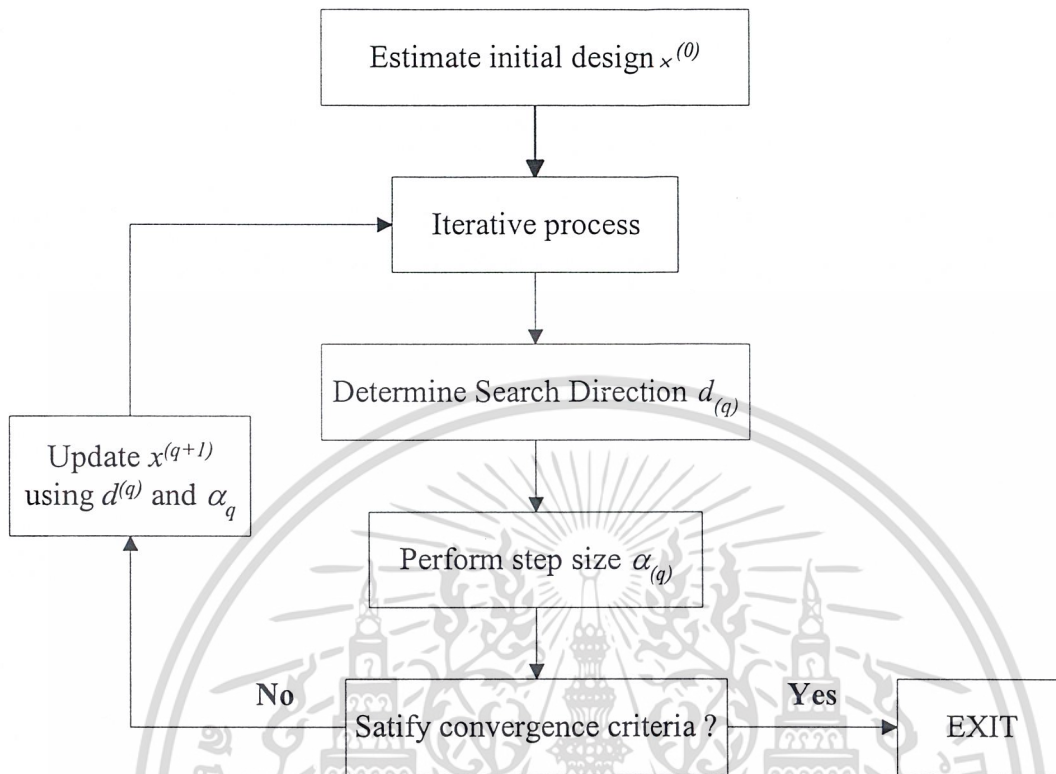
เมื่อ $x = (x_1, \dots, x_n)$ เป็น Vector ของการออกแบบตัวแปร (design variable) และ side constraints เป็นขอบเขตที่ชัดเจนของการออกแบบตัวแปร x_i^L และ x_i^U โดยเป็นค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของขอบเขตตามลำดับ

ฟังก์ชันหลัก (Objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint functions) อาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นก็ได้ ในการออกแบบตัวแปร ฟังก์ชันเหล่านี้อาจจะทราบค่า x อย่างแน่นอนหรือรู้เป็นนัยและต้องหาค่าโดยการใช้เทคนิค analytical หรือ numerical วิธีแบบ numerical ซึ่งสามารถหาค่าได้ถ้ามีเงื่อนไขในการเท่ากัน (equality constraints) เป็นจำนวน m และจะต้องรู้ค่า x อย่างแน่นอน ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้เงื่อนไขในการเท่ากันเหล่านั้นเพื่อที่จะลดตัวแปรที่ออกแบบ หลังจากนั้นปัญหาจะถูกลดลงเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข ด้วยตัวแปรไม่ทราบค่า $n - m$ ตัว เงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ (3-4) ถูกกำหนดให้เป็นขอบเขตของตัวแปรที่ออกแบบเพื่อที่จะป้องกันจากการเข้าสู่ค่าที่เป็นไปไม่ได้ทางกายภาพ (non physical values) รูปแบบที่แสดงไว้ในสมการที่ (3-1) ถึง (3-4) ไม่ได้แสดงไว้ในรูปแบบเดียว ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาที่ต้องจัดอยู่ในรูปค่าสูงสุด (maximization) สามารถจัดใหม่โดยการทำ สมการที่ (3-1) เปลี่ยนเป็น $-F(x)$ และยังคงขึ้นอยู่กับสมการเงื่อนไขเดิมในสมการที่ (3-2) ถึง (3-4)

ปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขอาจจะกำหนดจากสมการที่ (3-1) โดยปราศจากเงื่อนไขในการหาตัวแปร x ดังเช่นปัญหาที่ไม่ได้ใช้ในการปฏิบัติจริงทางวิศวกรรม ปัญหาที่มีเงื่อนไขด้วยเงื่อนไขในการเท่ากันอาจจะถูกแปลงไปเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข โดยการลดจำนวนของตัวแปรที่ออกแบบลง บางทีปัญหาที่มีทั้งเงื่อนไขในการเท่ากันและไม่เท่ากันสามารถแก้ไขเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไขโดยใช้ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Transformation Method) เพราะฉะนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะเข้าใจอย่างเพียงพอเกี่ยวกับทฤษฎี unconstrained Optimization

แผนผังทั่วไปของอัลกอริทึม Optimization แสดงในรูปที่ (3-1) กระบวนการของ Optimization ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 3 ขั้นตอน

1. การดำเนินการหาทิศทางของ vector $|d|$ ใน space
2. กระทำการค้นหาระยะทางที่ต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทาง vector $|d|$ โดยการกำหนดทีละขั้น (Step size)
3. แสดงผลได้เมื่อกระบวนการมีการพุ่งเข้ามาหาค่าที่ยอมรับได้



รูป 3.1 อัลกอริทึมของการ Optimization

โดยมากอัลกอริทึม Optimization จะมีการตั้งค่าเริ่มต้นของการออกแบบตัวแปร ($x^{(0)}$) จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากจุดเริ่มต้นและ update ค่าโดยการออกแบบข้อมูลซ้ำๆ ดังรูปแบบนี้

$$x^{(q+1)} = x^{(q)} + \alpha_q d^{(q)} \quad (3-5)$$

เมื่อ q เป็นจำนวนการทำซ้ำ อยู่ในส่วนที่ติดตามในในอัลกอริทึมต่างๆ ใช้สำหรับแสดงผลสถานะปัจจุบันของการค้นหาทิศทางของ vector $|d|$ และ Step size α รายละเอียดศึกษาเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ค.

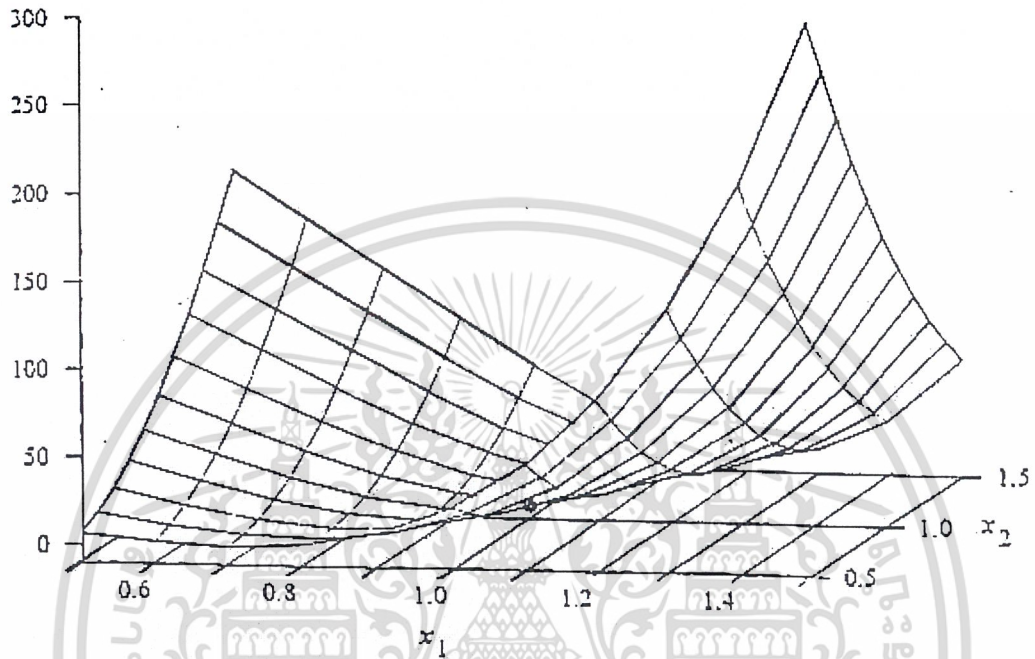
3.2 ตัวอย่าง Numerical

ปัญหาทดสอบ I

ตัวอย่างที่เลือกมาทดสอบคือ Rosenbrock's function

เอกสารนี้เป็นเอกสาร Minimize สำหรับ $F(x) = 100(x_2 - x_1^2) + (1 - x_1)^2$ อนุญาตให้นำไปใช้ (3-6) ขอนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนี้จะอยู่ที่จุด $[1,1]^T$ ซึ่งเป็นรูป banana-shaped เทคนิค unconstrained method ทั้ง 3 ถูกเลือกเพื่อมาแก้ปัญหาโดยมีจุดเริ่มต้นที่ $[0.6,0.6]^T$



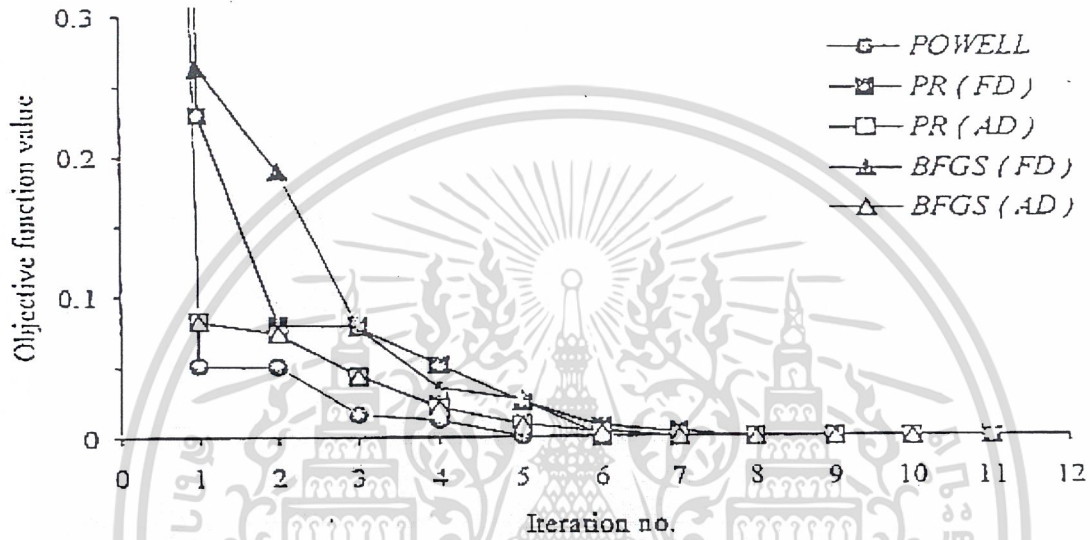
รูป 3.2 Rosenbrock's function

ตาราง 3-1 ค่าตอบต่างๆ ของ Rosenbrock's function ที่แก้ปัญหาโดยใช้วิธี POWELL, PR และ BFGS

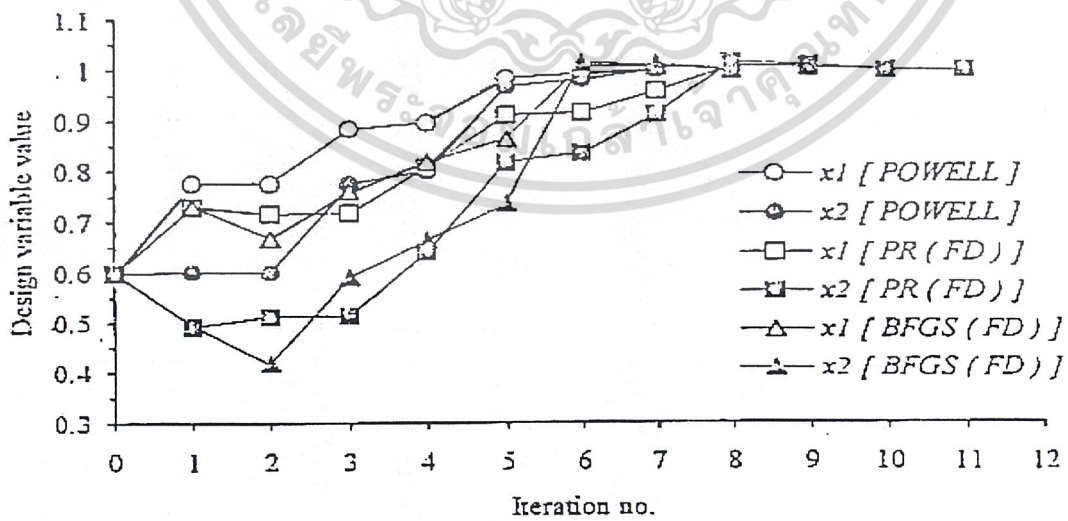
	METHOD				
	POWELL	PR (FD)	PR (AD)	BFGS (FD)	BFGS(AD)
$F(x^{(0)})$	5.9200	5.9200	5.9200	5.9200	5.9200
$F(x^*)$	1.15E-07	1.06E-07	4.28E-09	1.94E-07	4.28E-09
x_1^*	0.99977	0.99969	0.99998	1.00003	0.99998
x_2^*	0.99957	0.99940	0.99995	1.00001	0.99995
N_f	230	343	113	245	128
N_t	7	11	10	8	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ FD: finite difference approximations
 N_i : number of iterations
 N_f : number of function evaluations
 AD: analytical first derivatives



รูป 3.3 Performance of the Rosenbrock 's function using unconstrained minimization methods



รูป 3.4 Iterative process of design variable using unconstrained minimization methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีและข้อกำหนดที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ทำให้สามารถเขียนสมการวัตถุ ประสงค์และสมการเงื่อนไขในกรณีต่างๆ ได้ดังนี้

1. กรณีน้ำหนักเบาสุด

สมการวัตถุประสงค์

$$F(D, E) = W_{core}(D, E) + W_{cu}(D, E) \quad (3-7)$$

2. กรณีราคาต่ำสุด

สมการวัตถุประสงค์

$$F(D, E) = C_c W_{core}(D, E) + C_w W_{cu}(D, E) \quad (3-8)$$

3. กรณีประสิทธิภาพสูงสุด

สมการวัตถุประสงค์

$$F(D, E) = P_{cu}(D, E) + P_{core}(D, E) \quad (3-9)$$

ส่วนของสมการเงื่อนไขนั้นในทุกกรณีจะเหมือนกันคือ

1. ขนาดเล็กสุดของแกนเหล็ก ($2E$) จะต้องทำให้พื้นที่ช่องว่างมีขนาดเพียงพอที่จะพัน ลวดตัวนำลงได้ และขนาดใหญ่สุดของแกนเหล็ก ($2E$) จะต้องไม่ใหญ่กว่าขนาดมาตรฐานที่มีการใช้งานซึ่งจะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\sqrt{\frac{A_{HV} + A_{LV}}{3F_w}} \times 2 \leq 2E \leq 2E_{max} \quad (3-10)$$

2. ขนาดเล็กสุดของความหนาของแกนเหล็ก (D) จะต้องมีความมากกว่าศูนย์ และขนาด ใหญ่สุดของความหนาของแกนเหล็ก (D) จะต้องมีความไม่มากกว่าผลหารของพื้นที่ หน้าตัดของแกนเหล็กกับขนาดแกนเหล็กซึ่งจะเขียนสมการได้ดังนี้

$$0 \leq D \leq \frac{A_c}{2E_{min}} \quad (3-11)$$

3. เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรกลซึ่งไม่มีส่วนประกอบที่เคลื่อนที่ ดังนั้น

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจึงสูงกว่าเครื่องจักรกลทั่วไป ซึ่งในโครงการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะกำหนดให้ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบจะต้องมีประสิทธิภาพไม่ต่ำกว่า 85 %ซึ่งจะเขียนสมการได้ดังนี้

$$g_1(\eta) \leq 0.85 - \eta \quad (3-12)$$



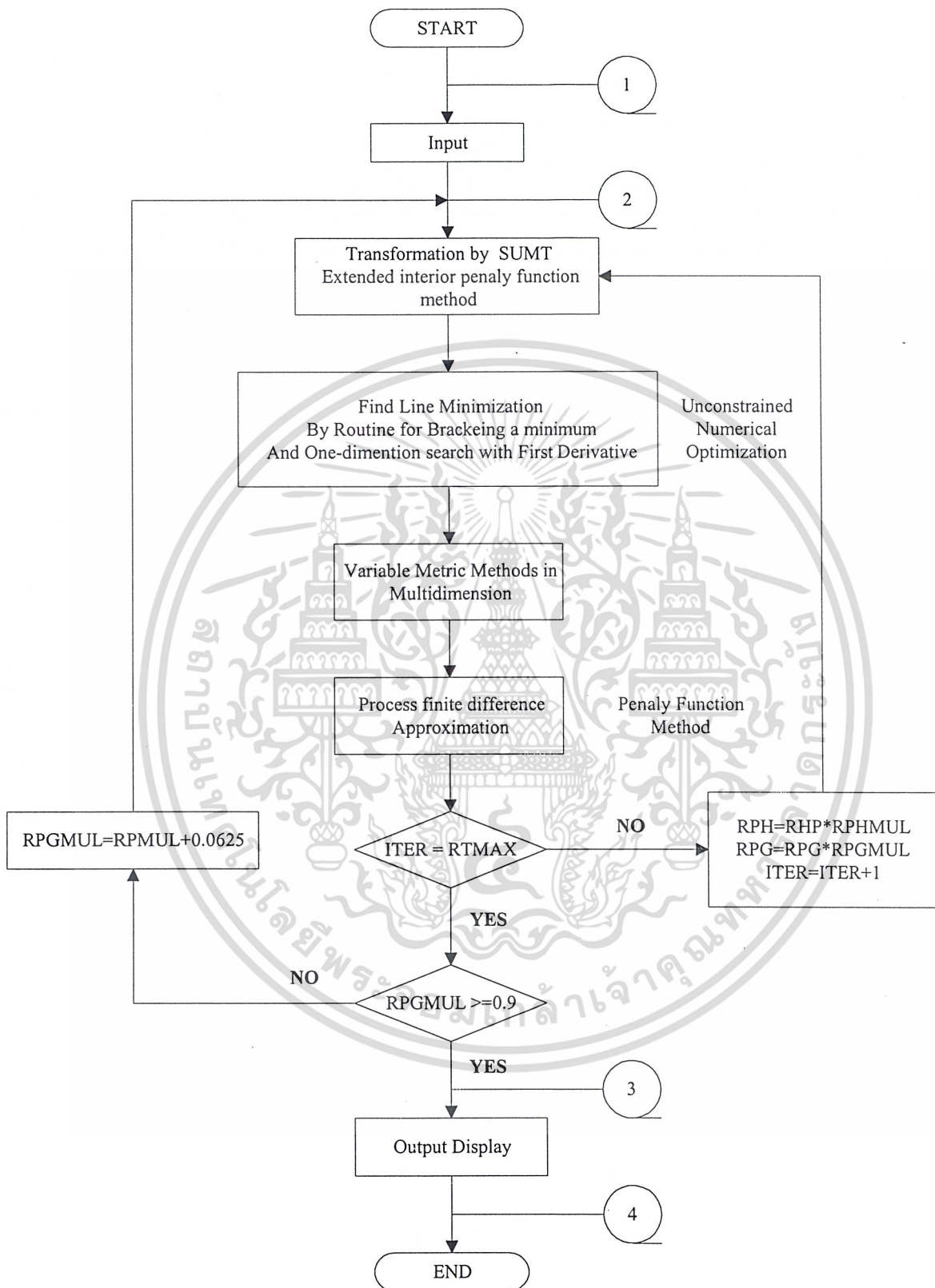
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังของโปรแกรมและผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสม

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแผนผังการทำงานของโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสม การใช้งานของโปรแกรม ซึ่งเมื่อทราบถึงการใช้งานแล้วก็จะเสนอผลที่ได้จากการออกแบบ ตลอดจนเปรียบเทียบผลที่ได้ของแต่ละกรณีและวิเคราะห์ผลที่ได้

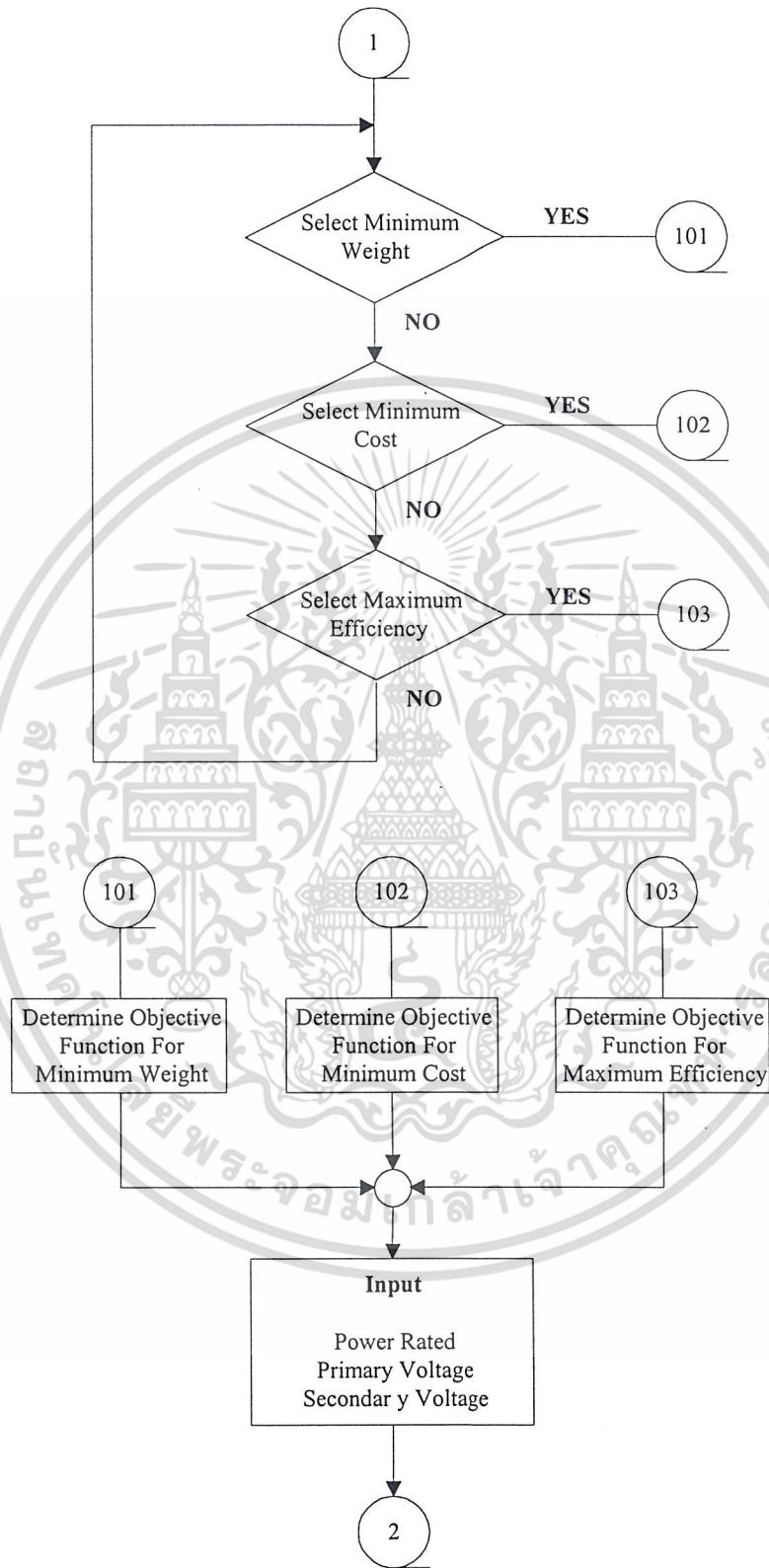
4.1 แผนผังของโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสม

ในส่วนนี้จะแสดงถึงแผนผังข้อมูลในแต่ละขั้นตอน เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงการทำงานของโปรแกรม ซึ่งจะช่วยให้ใช้งานโปรแกรมได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยรูป 4-1 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม[3,4] โดยเริ่มจากการป้อนค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งแสดงดังรูป4-2 หลังจากนั้นกลุ่มตัวแปรต่างๆจะเข้าสู่กระบวนการ Optimization เชิงตัวเลข (Numerical Optimization) เพื่อค้นหาจุดวิกฤต แล้วตรวจสอบจุดดังกล่าวว่าเป็นคำตอบที่แท้จริงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือไม่ หากยังไม่ใช่คำตอบที่แท้จริง กระบวนการจะย้อนกลับไปทำซ้ำจนกระทั่งได้จุดวิกฤตที่เป็นคำตอบแท้จริงของฟังก์ชันหลัก แล้วแสดงผลออกทางจอภาพ ซึ่งส่วนแสดงผลจะประกอบด้วยค่าต่างๆ แสดงดังรูป4-3



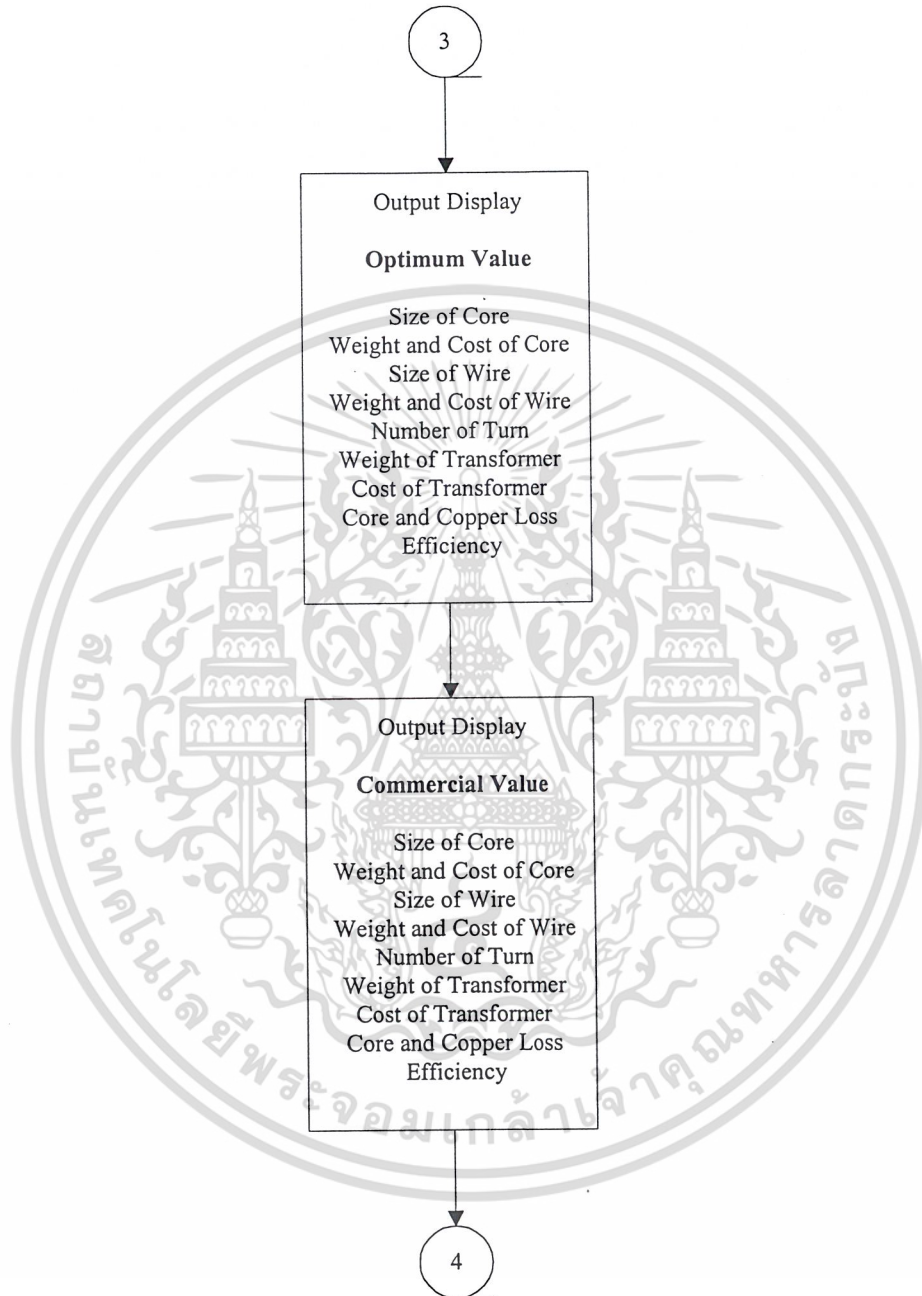
รูป 4.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



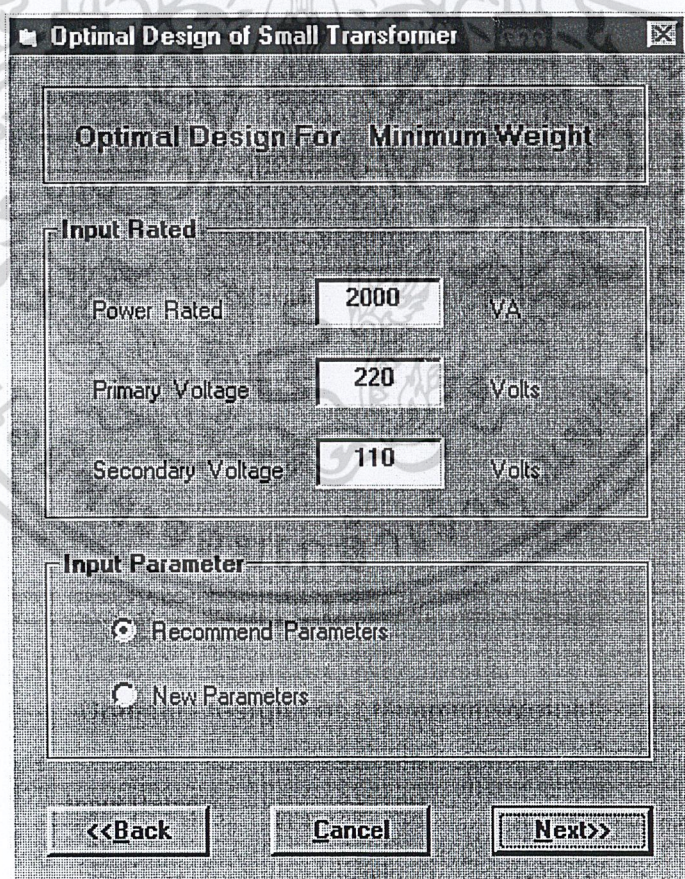
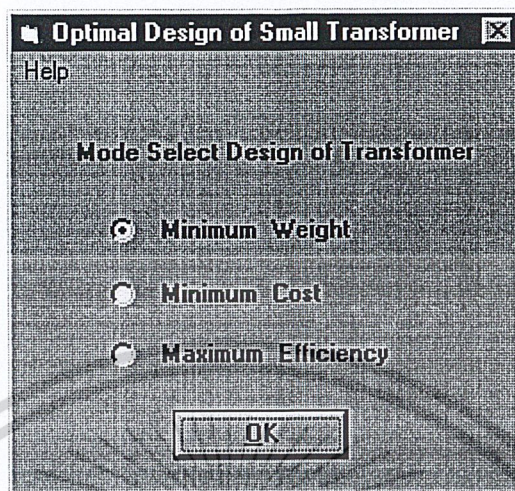
รูปที่ 4-1(ต่อ) แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



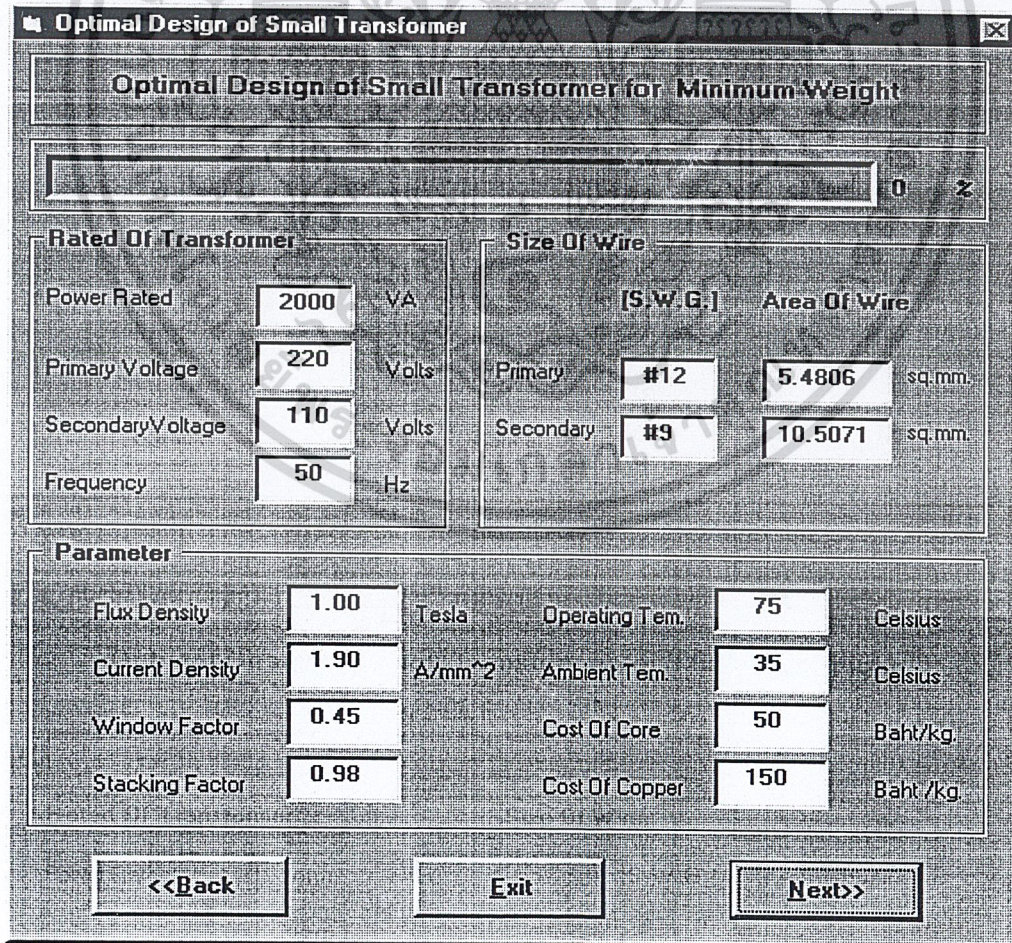
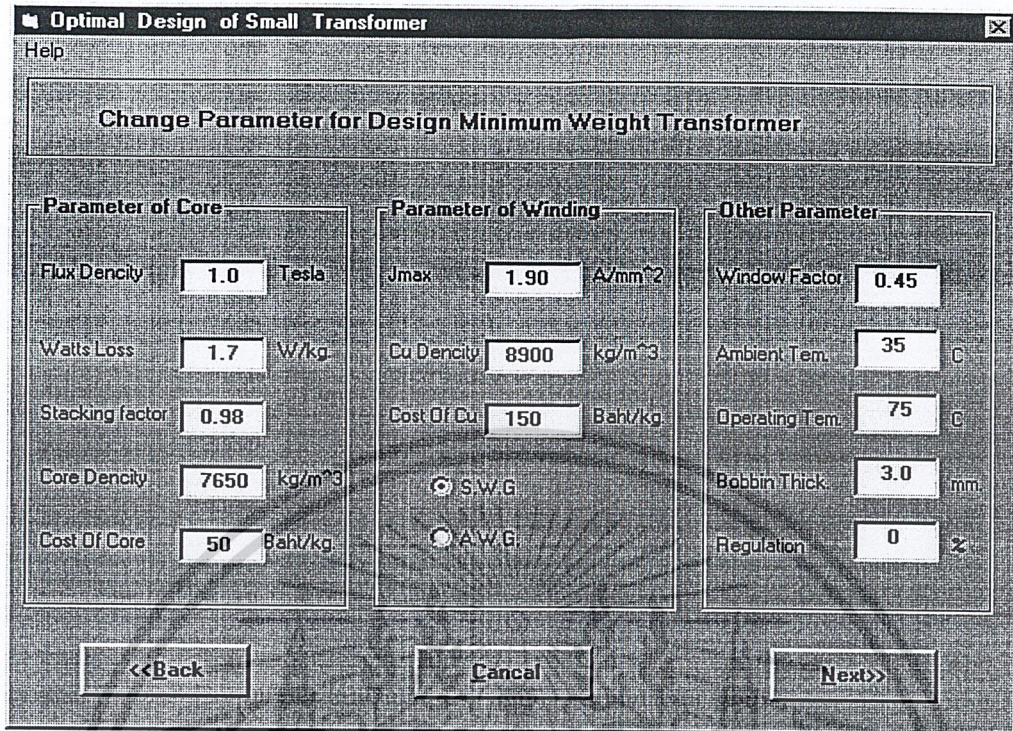
รูปที่ 4-1(ต่อ) แผนผังขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

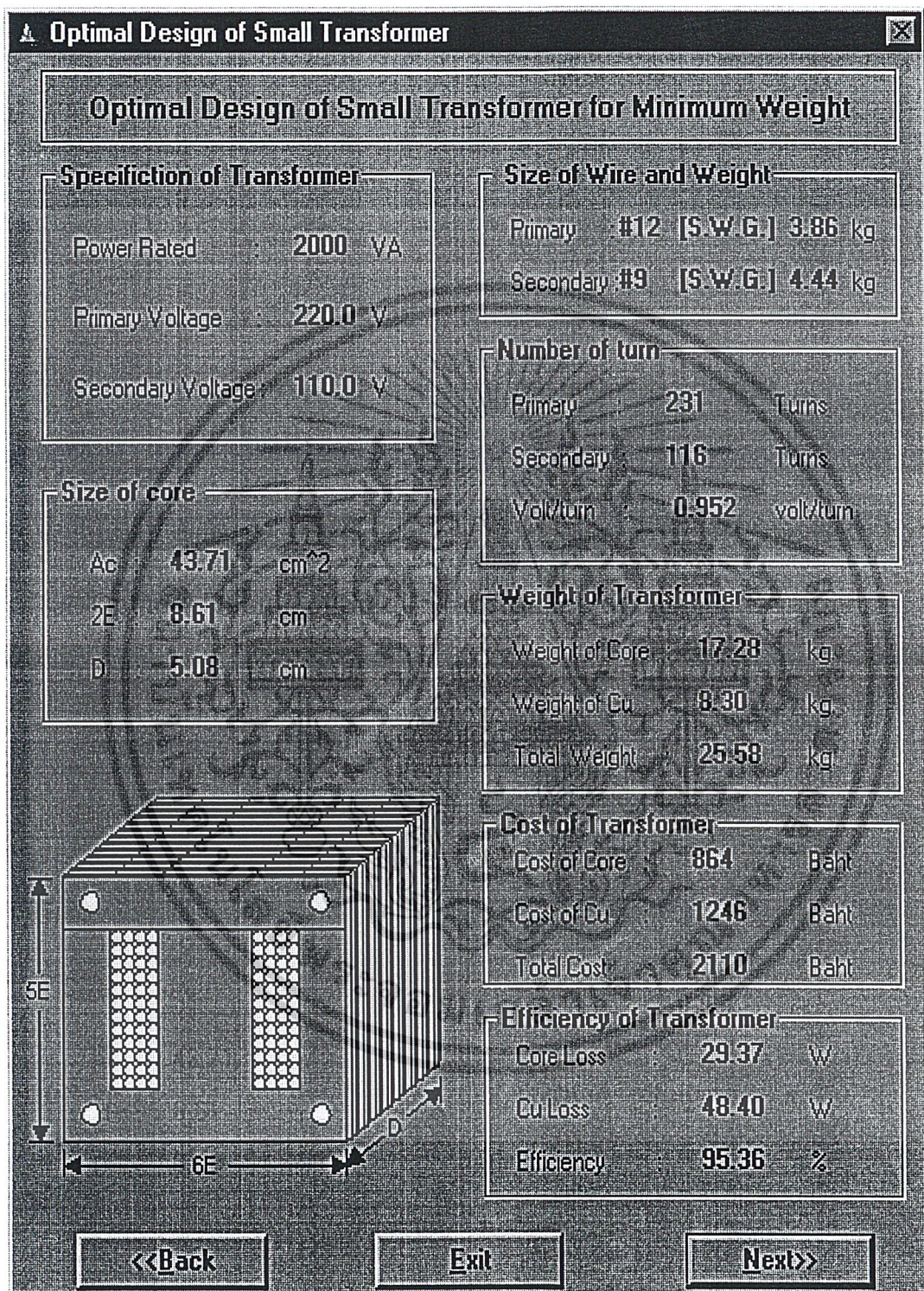


รูป 4.2 ภาพหน้าจอ Input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

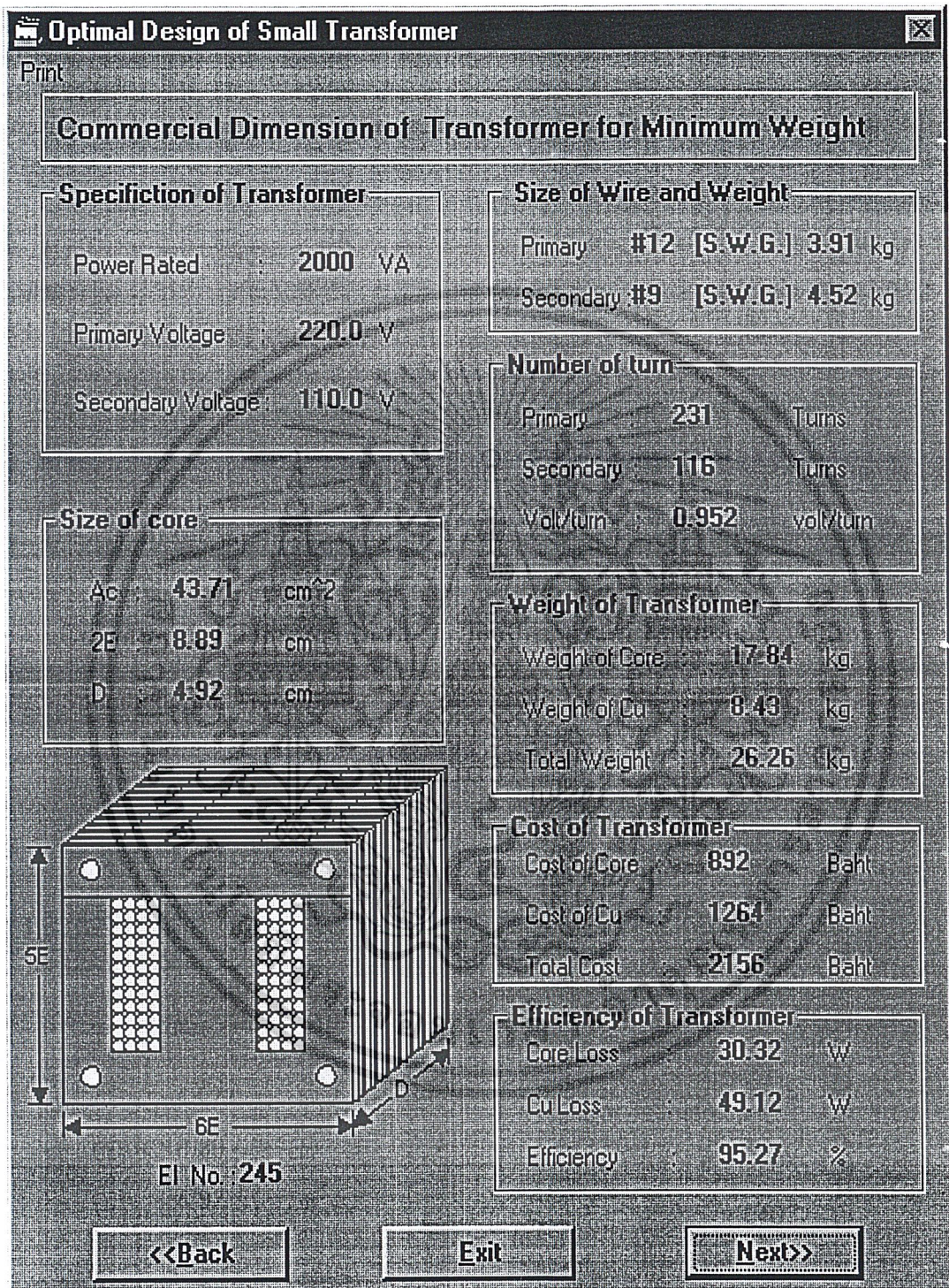


รูป 4.2(ต่อ) ภาพหน้าจอ Input เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.3 ภาพหน้าจอ Output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.3(ต่อ) ภาพหน้าจอ Output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Optimal Design of Small Transformer			
Optimal Design of Small Transformer for Minimum Weight			
Specification		Detail of Transformer	
Power :	2000 VA	Optimal	Commercial
Primary :	220.0 V	Ac :	43.71 43.71 cm ²
Secondary :	110.0 V	2E :	8.61 8.89 cm
Pri. current :	9.29 A	D :	5.08 4.92 cm
Sec. current :	18.18 A	Pri. size :	#12 [S.W.G.]
Bmax :	1.0 Tesla	Sec. size :	#9 [S.W.G.]
Jmax :	1.9 A/mm ²	Pri. weight :	3.86 3.91 kg.
Fw. :	0.45	Sec weight :	4.44 4.52 kg.
Sf. :	0.98	Number Pri. :	231 231 Turns
Core den. :	7650 kg/m ³	Number Sec.:	116 116 Turns
Cu den. :	8900 kg/m ³	Volts/turn :	0.952 0.952 volt/turn
Ambient Tem. :	35 Celsius	Weight core :	17.28 17.84 kg.
Opalting Tem. :	75 Celsius	Weight cu. :	8.30 8.43 kg.
Bobbin thick :	3.0 mm.	Total weight :	25.58 26.26 kg.
Cost core :	50 Baht/Kg.	Cost of core :	864 892 Baht
Cost cu :	150 Baht/Kg.	Cost of cu. :	1246 1264 Baht
18:24:12 12/03/99		Total cost :	2110 2156 Baht
<<Back	Print	Core loss :	29.37 30.32 W
		Copper loss :	48.40 49.12 W
		Total loss :	77.77 79.44 W
		Efficiency :	95.36 95.27 %

รูป 4.3(ต่อ) ภาพหน้าจอ Output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม

แสดงผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมโดยเปลี่ยนแปลงพิกัดกำลัง

ตาราง 4.1 ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ **Minimum Weight**

	หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัดแรงดัน 220/110 V									
Power(VA)	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Ac (cm ²)	10.23	15.60	19.45	23.57	32.90	33.05	33.37	29.92	29.92	43.71
2E (cm)	4.28	5.57	6.17	6.85	6.59	8.02	7.72	9.20	9.20	8.61
D (cm)	2.39	2.80	3.15	3.44	4.99	4.12	4.32	3.25	3.25	5.08
#Np (S.W.G.)	23	19	18	16	15	14	14	13	13	12
#Ns (S.W.G.)	20	17	15	14	13	12	11	10	10	9
V/N(Volt/Turn)	0.223	0.34	0.423	0.513	0.716	0.662	0.727	0.651	0.651	0.952
Np (Turn)	988	648	520	429	307	332	303	338	338	231
Ns (Turn)	494	324	260	214	154	166	151	169	169	116
Wcore (kg)	2.01	3.99	5.51	7.41	9.95	10.7	11.82	12.63	12.63	17.28
Wcu (kg)	1.07	2.24	3.07	4.14	4.13	5.79	6.02	9.06	9.06	8.30
Net Weight (kg)	3.08	6.23	8.58	11.55	14.08	16.5	17.84	21.69	21.69	25.58
Core Cost (Baht)	100	199	276	370	498	535	591	631	631	864
Cu Cost (Baht)	161	337	460	621	619	869	902	1359	1359	11246
Total Cost(Baht)	261	536	735	991	1117	1404	1493	1990	1990	2110
Core Loss (W)	3.41	6.78	9.37	12.59	16.92	18.2	20.10	21.47	21.47	29.37
Copper Loss(W)	18.50	23.34	29.73	33.64	31.15	39.85	44.36	54.63	69.14	48.40
Total Loss (W)	21.92	30.11	39.10	46.24	48.07	58.05	64.46	76.09	90.6	77.77
Wcore / Wcu	1.80	1.78	1.79	1.78	2.40	1.84	1.96	1.39	1.39	2.00
Efficiency (%)	87.95	91.40	92.47	93.26	94.33	94.30	94.56	94.39	94.08	95.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.2 ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Cost

	หม้อแปลงพิกัดแรงดัน 220/110 V									
Power(VA)	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Ac (cm ²)	16.22	25.39	32.03	37.97	40.82	50.78	54.61	58.93	58.93	60.72
2E (cm)	3.38	4.35	4.83	5.42	5.91	5.96	6.03	6.55	6.55	7.27
D (cm)	4.80	5.84	6.63	7.01	6.91	8.52	9.05	8.99	8.99	8.36
#Np (S.W.G.)	23	19	18	16	15	14	14	13	13	12
#Ns (S.W.G.)	20	17	15	14	13	12	11	10	10	9
V/N (Volt/Turn)	0.353	0.553	0.697	0.827	0.889	1.105	1.189	1.283	1.283	1.322
Np (Turn)	623	398	316	266	247	199	185	171	171	166
Ns (Turn)	312	199	158	133	124	100	93	86	86	83
Wcore (kg)	2.52	5.07	7.10	9.44	11.08	13.89	15.12	17.72	17.72	20.26
Wcu (kg)	0.75	1.52	2.07	2.82	3.52	3.90	4.18	5.09	5.09	6.41
Net Weight (kg)	3.27	6.59	9.17	12.27	14.60	17.79	19.30	22.81	22.81	26.67
Core Cost (Baht)	126	253	355	472	554	694	756	886	886	1013
Cu Cost (Baht)	113	229	311	424	528	586	626	763	763	962
Total Cost (Baht)	239	482	666	896	1082	1280	1383	1650	1650	1975
Core Loss (W)	4.28	8.61	12.06	16.05	18.84	23.61	25.71	30.13	30.13	34.43
Copper Loss (W)	13.04	15.85	20.17	22.82	26.51	26.73	30.84	30.65	38.79	37.35
Total Loss (W)	17.32	24.46	32.23	38.87	45.35	50.34	56.55	60.78	68.92	71.78
Wcore / Wcu	3.36	3.33	3.42	3.34	3.14	3.56	3.61	3.48	3.48	3.16
Efficiency (%)	90.23	92.90	93.71	94.27	94.64	95.02	95.19	95.47	95.43	95.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.3 ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Maximum Efficiency

	หม้อแปลงพิกัดแรงดัน 220/110 V									
Power(VA)	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Ac (cm ²)	23.13	31.25	29.92	46.89	41.69	54.91	60.18	61.64	67.20	68.63
2E (cm)	2.88	3.93	5.05	4.87	5.96	5.72	5.80	6.41	6.13	6.85
D (cm)	8.03	7.95	5.89	9.64	6.99	9.60	10.38	9.62	10.97	10.02
#Np (S.W.G.)	23	19	18	16	15	14	14	13	13	12
#Ns (S.W.G.)	20	17	15	14	13	12	11	10	10	9
V/N(Volt/Turn)	0.504	0.68	0.647	1.021	0.908	1.195	1.310	1.342	1.463	1.494
Np (Turn)	437	323	340	215	242	184	168	164	150	147
Ns (Turn)	218	162	170	108	121	92	84	82	75	74
Wcore (kg)	3.06	5.63	6.88	10.48	11.41	14.41	16.01	18.13	18.90	21.58
Wcu (kg)	0.65	1.38	2.16	2.55	3.46	3.76	3.98	4.97	4.77	5.97
Net Weight (kg)	3.71	7.01	9.05	13.02	14.87	18.17	19.99	23.10	23.67	27.55
Core Cost (Baht)	153	282	344	524	571	721	801	907	945	1079
Cu Cost (Baht)	97	207	325	382	519	563	597	745	716	895
Total Cost(Baht)	250	488	669	906	1090	1284	1397	1652	1661	1976
Core Loss (W)	5.20	9.58	11.7	17.81	19.40	24.50	27.22	30.82	32.13	36.68
Copper Loss(W)	11.23	14.31	21.05	20.52	26.05	25.69	29.38	29.92	36.36	34.74
Total Loss (W)	16.43	23.89	32.75	38.33	45.45	50.19	56.60	60.74	68.49	71.43
Wcore / Wcu	4.70	4.07	3.18	4.10	3.29	3.80	4.80	3.64	3.90	3.60
Efficiency (%)	90.69	93.05	93.73	94.35	94.64	95.03	95.19	95.47	95.46	95.73

หมายเหตุ หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมือนกัน

$$B_{\max} = 1 \text{ Tesla}$$

$$\text{Window Factor} = 0.45$$

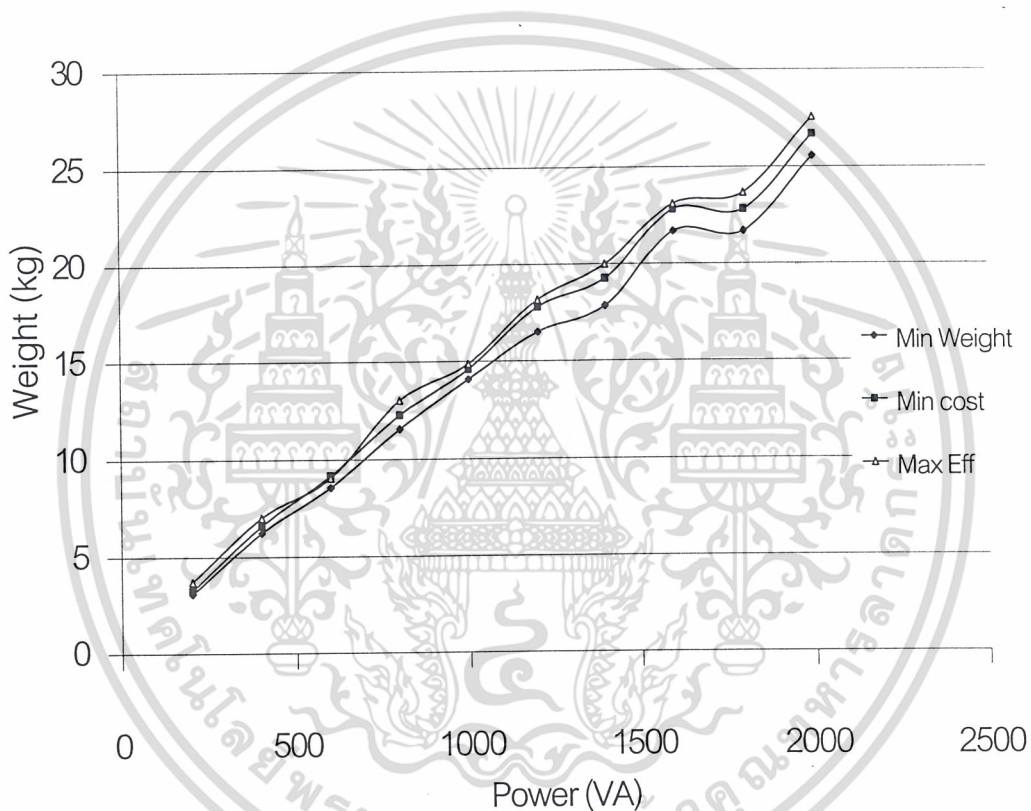
ราคาของลวดทองแดงซึ่งรวมภาษีมูลค่าเพิ่มแล้วประมาณ 150 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาของแกนเหล็กซึ่งรวมภาษีมูลค่าเพิ่มแล้วประมาณ 50 บาทต่อกิโลกรัม

4.3 วิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรม

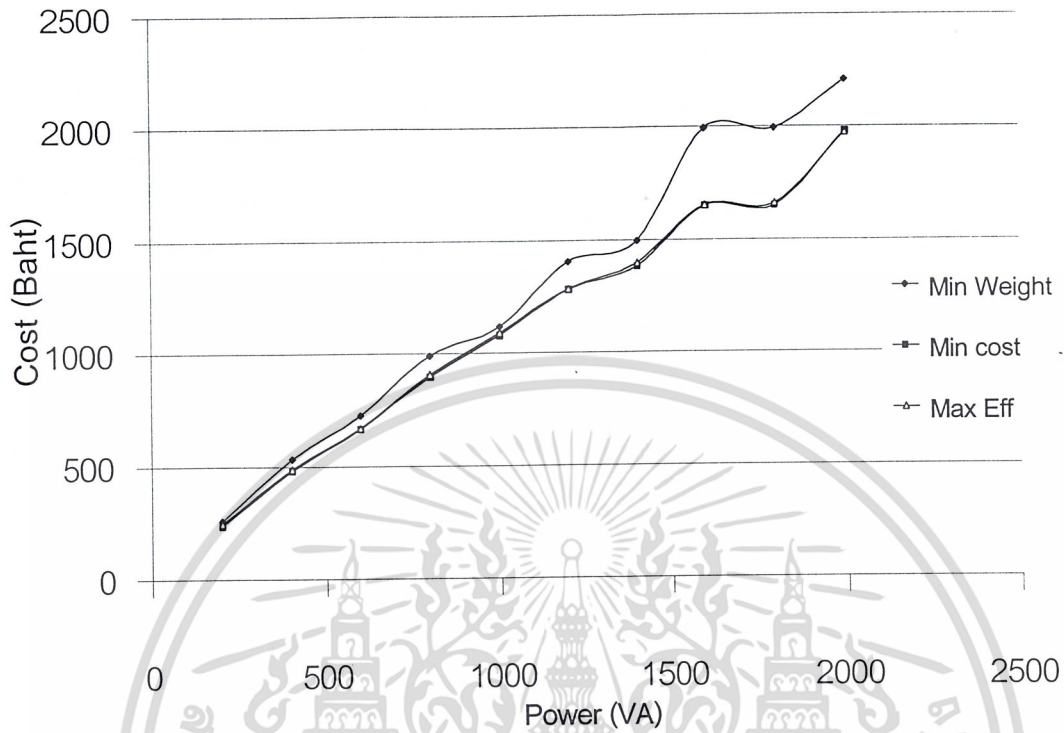
4.3.1 เปรียบเทียบผลการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

จะเห็นว่าเมื่อนำเอาหม้อแปลงทั้ง 3 แบบ ที่มีพิกัดเท่ากันมาเปรียบเทียบกัน จะได้ผลดังนี้คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบให้มีน้ำหนักต่ำสุดจะมีน้ำหนักต่ำสุด หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบให้มีราคามีราคาต่ำสุด หม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจะมีประสิทธิภาพสูงสุด นำค่าจากตารางที่ 4.1, 4.2, และ 4.3 นำมาเขียนกราฟได้ดังรูป 4-4

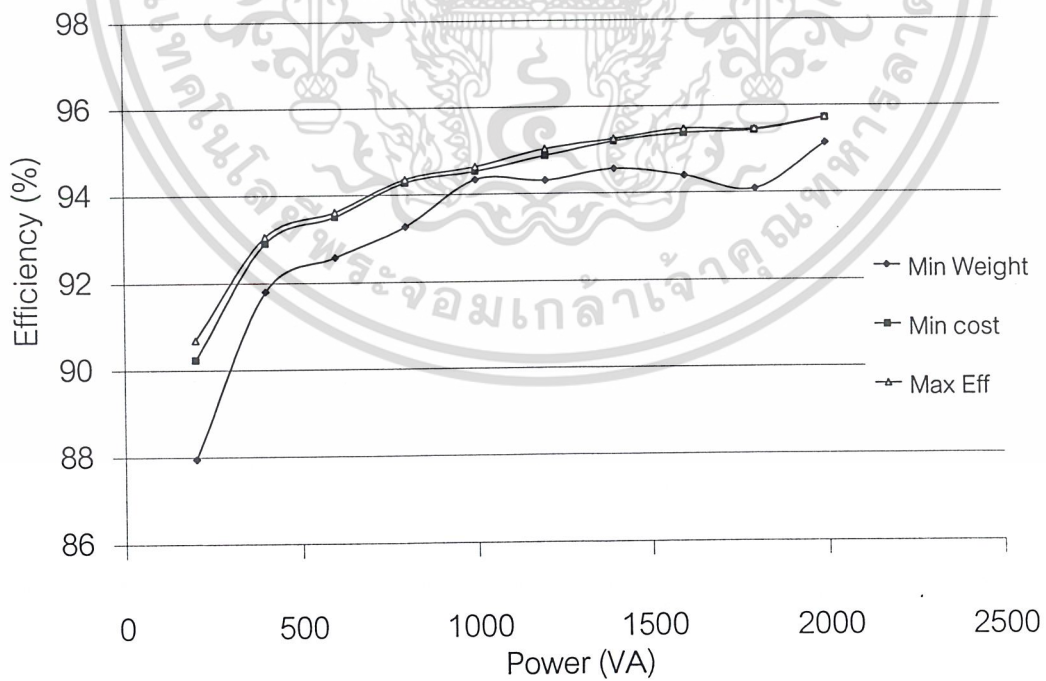


รูป 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและน้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า

สังเกตเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Cost และแบบ Maximum Efficiency จะไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะทั้งสองแบบมีหลักการที่เหมือนกันคือ ต้องการลดปริมาณของลวดตัวนำและเพิ่มปริมาณแกนเหล็ก



รูป 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและราคาารวมของหม้อแปลงไฟฟ้า

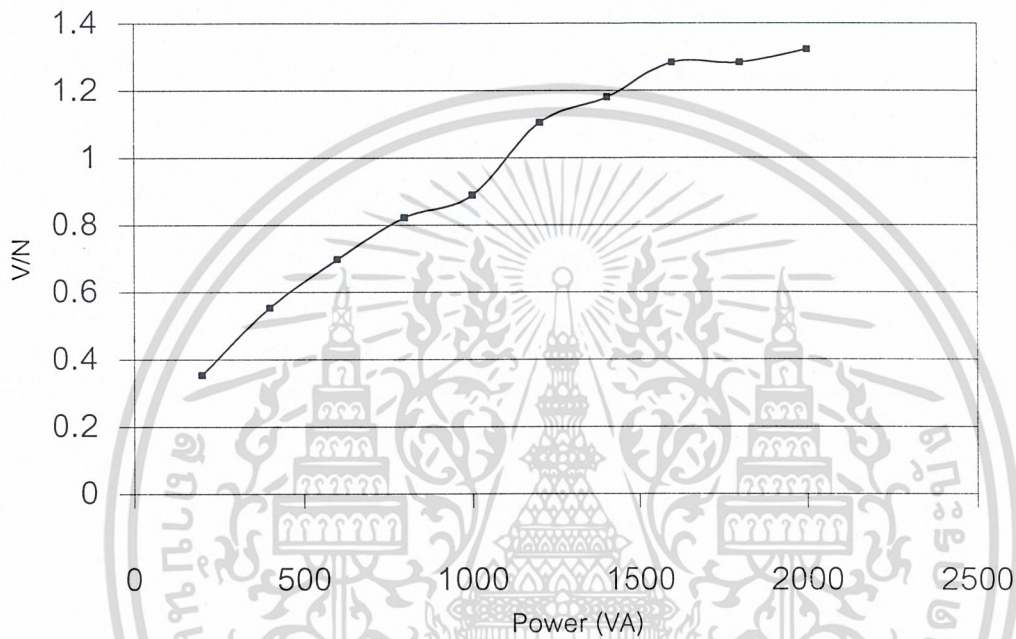


รูป 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า V/N กับพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลที่ได้จากโปรแกรมจะเห็นได้ว่าค่า V/N มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามพิกัดกำลังของหม้อแปลงที่พิกัดหม้อแปลงสูงค่า V/N จะมีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งค่า V/N ของหม้อแปลงแต่ละแบบแตกต่างกัน นำค่าจากตารางที่ 4.2 นำมาเขียนกราฟได้ดังนี้



รูป 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและค่า V/N ของหม้อแปลงไฟฟ้า

วิเคราะห์ผลที่ได้

ค่า V/N เปลี่ยนแปลงไปตามพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น ลวดตัวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงจะต้องมีการลดจำนวนรอบตัวนำให้น้อยลง เพื่อไม่ให้ขนาดแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่เกินไป ค่า V/N จึงจะต้องมีค่าสูงขึ้นเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีพิกัดใหญ่ขึ้น

หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบมีความแตกต่างกันที่ค่าของ V/N และอัตราส่วนน้ำหนักของแกนเหล็กต่อน้ำหนักของขดลวด การเปลี่ยนแปลงขนาดของความกว้างของแกนเหล็ก $2E$ ความหนาของการเรียงแกนเหล็ก D การเปลี่ยนแปลงค่าเหล่านี้จะทำให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจุดเด่นตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ แยกพิจารณาได้ดังนี้

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Weight จะมีค่า V/N ต่ำกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดอื่น และอัตราส่วนน้ำหนักของแกนเหล็กต่อน้ำหนักของขดลวด จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.5-2 เท่า ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Window Factor จะเป็นเงื่อนไขในการกำหนด โดยลักษณะภายนอกของขนาด D จะน้อยกว่าขนาดของ $2E$

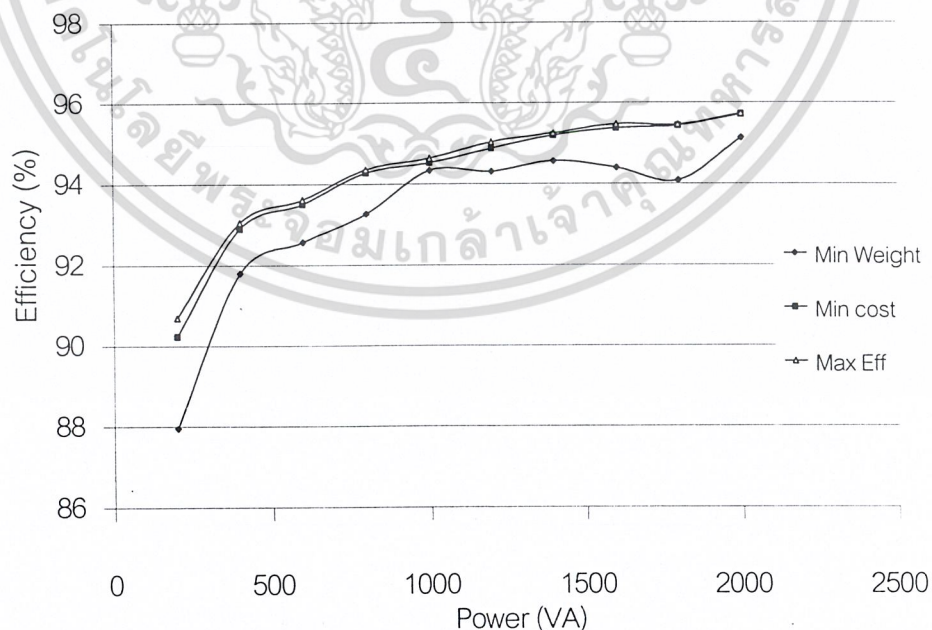
หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Cost จะมีค่า V/N ที่สูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Weight เนื่องจากโดยปกติราคาของลวดตัวนำทองแดงจะสูงกว่าราคาของแกนเหล็กประมาณ 3-4 เท่า ดังนั้นจึงต้องทำการเพิ่มค่า V/N ให้สูงขึ้นเพื่อลดปริมาณลวดทองแดงลงจึงมีผลทำให้อัตราส่วนน้ำหนักของแกนเหล็กต่อน้ำหนักของขดลวดมีค่าอยู่ในช่วง 3-4 เท่า โดยลักษณะภายนอกของขนาด D จะน้อยกว่าขนาด $2E$ เช่นกัน

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Maximum Efficiency จะมีค่าที่สูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดอื่น เพราะในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กลวดตัวนำจะมีขนาดเล็ก ค่าของ Copper Loss จะมีค่าสูง ดังนั้นจึงต้องทำการลดปริมาณลวดตัวนำลงโดยการเพิ่มปริมาณของแกนเหล็กให้มากขึ้นดังนั้นอัตราส่วนน้ำหนักของแกนเหล็กต่อน้ำหนักของขดลวดมีค่าอยู่ในช่วง 3.5-4.5 เท่า โดยลักษณะภายนอกของขนาด D จะมีค่าประมาณ 1.5-2 เท่าของขนาด $2E$

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 4.1, 4.2, และ 4.3 นำมาเขียนกราฟของพิกัดกำลังและประสิทธิภาพดัง

รูป 4.8



รูป 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละแบบที่ออกแบบมานั้น จะมีประสิทธิภาพเปลี่ยนไปตามพิกัดกำลัง คือหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังสูงจะมีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากในหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กนั้น ลวดตัวนำที่ใช้พันหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีขนาดเล็ก จึงมีค่าความต้านทานสูงทำให้เกิดค่า Copper Loss สูง และในส่วนของแกนเหล็กจะไม่มีผลมากนัก จึงทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กๆ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังสูงกว่า

4.3.4 เปรียบเทียบความแตกต่างของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังเท่ากันแต่พิกัดแรงดันไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4.4 ผลการเปลี่ยนพิกัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกันแต่พิกัดกำลังเท่ากัน

	หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Weight พิกัดกำลัง 2000 VA			
พิกัดแรงดัน	220/24	220/110	220/220	220/660
Ac (inch)	48.18	43.71	43.33	40.82
2E (inch)	8.07	8.61	8.71	8.66
D (inch)	5.96	5.08	4.97	4.72
V/N(Volt/Turn)	1.049	0.952	0.944	0.889
Wcore (kg)	17.88	17.28	17.32	16.24
Wcu (kg)	7.39	8.30	8.58	8.95
Net Weight (kg)	25.27	25.58	25.9	25.19
Core Cost (Baht)	894	864	866	812
Cu Cost (Baht)	1108	1246	1287	1343
Total Cost (Baht)	2002	2110	2153	2155
Core Loss (w)	30.4	29.37	29.45	27.62
Copper Loss(W)	45.68	48.40	47.73	56.38
Total Loss (W)	76.07	77.77	77.18	84
Efficiency (%)	95.46	95.36	95.4	95.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.5 ผลการเปลี่ยนพิกัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกันแต่พิกัดกำลังเท่ากัน

พิกัดแรงดัน	หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Minimum Cost พิกัดกำลัง 2000 VA			
	220/24	220/110	220/220	220/660
Ac (cm ²)	60.96	60.72	67.34	63.98
2E (cm)	7.16	7.27	6.98	24.71
D (cm)	8.50	8.36	9.62	9.24
V/N(Volt/Turn)	1.328	1.322	1.467	1.393
Wcore (kg)	20.03	20.26	21.63	20.33
Wcu (kg)	6.22	6.41	6.15	5.92
Net Weight (kg)	26.26	26.67	27.79	26.26
Core Cost(Baht)	1002	1013	1082	1017
Cu Cost (Baht)	933	962	923	889
Total Cost(Baht)	1935	1975	2004	1905
Core Loss (w)	24.36	34.43	36.78	34.56
Copper Loss(W)	38.42	37.35	34.24	37.43
Total Loss (W)	72.48	71.78	71.01	71.99
Efficiency (%)	95.67	95.71	95.75	95.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.6 ผลการเปลี่ยนพิกัดแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่แตกต่างกันแต่พิกัดกำลังเท่ากัน

	หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Maximum Efficiency พิกัดกำลัง 2000 VA			
พิกัดแรงดัน	220/24	220/110	220/220	220/660
Ac (cm ²)	67.59	68.63	63.53	66.45
2E (cm)	6.85	6.85	7.21	6.85
D (cm)	9.88	10.02	10.08	9.67
V/N(Volt/Turn)	1.472	1.494	1.384	1.447
Wcore (kg)	21.25	21.58	21.06	20.92
Wcu (kg)	5.85	5.97	6.36	5.79
Net Weight (kg)	27.1	27.55	27.42	26.71
Core Cost(Baht)	1063	1079	1053	1046
Cu Cost (Baht)	878	895	954	868
Total Cost(Baht)	1940	1976	2007	1914
Core Loss (w)	36.13	36.68	35.8	35.57
Copper Loss(W)	36.1	34.74	35.4	36.57
Total Loss (W)	72.23	71.43	71.19	72.14
Efficiency (%)	95.68	95.73	95.74	95.69

หมายเหตุ

หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมือนกัน

Window Factor = 0.45

 $B_{\max} = 1 \text{ T}$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละแบบที่ออกแบบจะมีลักษณะรูปร่างและน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังเดียวกันแต่มีพิกัดแรงดันต่างกันจะมีลักษณะรูปร่างและน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่าขนาดรูปร่างของหม้อแปลงไฟฟ้าจะไม่ขึ้นอยู่กัพิกัดแรงดันแต่จะขึ้นอยู่กัพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบ

4.4.1 ทดลองเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B_{max})

พิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220/110 V 2000 VA (Minimum Weight)

ตารางที่ 4.7 ผลที่ได้จากการเปลี่ยนค่า Flux Density

	Flux Density (Tesla)		
	0.8	1.0	1.2
Ac (cm ²)	55.09	43.71	38.13
2E (cm)	8.53	8.61	8.33
D (cm)	6.45	5.08	4.57
V/N(Volt/Turn)	0.960	0.952	1.005
Wcore (kg)	21.59	17.28	14.59
Wcu (kg)	8.80	8.30	7.51
Net Weight (kg)	30.40	25.58	22.10
Core loss	36.70	29.37	74.81
Cu loss	51.31	48.40	43.75
Total loss	88.01	77.77	68.56
Efficiency (%)	94.79	95.36	95.89

หมายเหตุ หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมือนกัน

Window Factor =0.45

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลที่ได้เมื่อค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก มีค่าลดลงดังนั้นน้ำหนักของแกนเหล็กก็จะลดลง เมื่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กลดลง ปริมาณของลวดทองแดงก็จะลดลงทำให้ความต้านทานและความสูญเสียลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้นและในทางกลับกันเมื่อค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลดลงก็จะให้ผลในทางตรงกันข้าม แต่ในกรณีที่กำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงกว่าเมื่อแรงดันมีการเปลี่ยนแปลง จะทำให้แกนเหล็กมีโอกาสอิ่มตัวได้ง่ายกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ทดลองเปลี่ยนค่า Window Factor (F_w)

พิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220/110 V 2000 VA (Minimum Weight)

ตารางที่ 4.8 ผลที่ได้จากการเปลี่ยนค่า Window Factor

	Window Factor		
	0.4	0.5	0.6
Ac (cm ²)	39.27	47.35	44.17
2E (cm)	9.57	7.84	7.39
D (cm)	4.11	6.04	5.96
V/N(Volt/Turn)	0.856	1.031	0.962
Wcore (kg)	12.79	17.05	15
Wcu (kg)	9.47	7.60	7.85
Net Weight (kg)	26.75	4.65	22.85
Core Loss (w)	29.39	28.99	25.50
Copper Loss(W)	55.58	44.30	45.71
Total Loss (W)	84.58	73.28	71.22
Efficiency (%)	94.98	95.62	95.74

หมายเหตุ หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมือนกัน

$$B_{\max} = 1 \text{ T}$$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลที่ได้เมื่อค่า Window Factor เพิ่มขึ้นน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าจะลดลง เนื่องจากขนาดของแกนเหล็ก (2E) จะมีขนาดเล็กลงมีผลทำให้ค่า Core Loss มีค่าลดลง และความยาวของลวดทองแดงลดลงก็จะทำให้ค่า Copper Loss ลดลงเช่นกัน มีผลทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้น ถ้าวัดค่า Window Factor ลงก็จะให้ผลในทางตรงกันข้าม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่า Window Factor จะมีผลต่อน้ำหนักอย่างมาก

4.4.3 ทดลองเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสในลวดตัวนำ (J_{\max})
พิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220/110 V 2000 VA (Minimum Weight)

ตารางที่ 4.9ผลที่ได้จากการเปลี่ยนค่า Current Density

	Current Density (A/mm ²)		
	2	2.5	3
Ac (cm ²)	38.89	29.92	33.35
2E (cm)	8.55	9.19	7.72
D (cm)	4.41	3.25	4.31
V/N(Volt/Turn)	0.846	0.651	0.727
Wcore (kg)	15.29	12.63	11.82
Wcu (kg)	8.04	9.06	6.02
Net Weight (kg)	23.33	21.69	17.84
Core Loss (w)	26	21.47	20.10
Copper Loss(W)	58.47	85.35	90.54
Total Loss (W)	84.47	106.8	110.6
Efficiency (%)	94.99	93.74	93.57

หมายเหตุ หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมือนกัน

Window Factor = 0.45

$B_{\max} = 1 \text{ T}$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อค่าความหนาแน่นของกระแส (J_{\max}) มีค่าสูงขึ้น จะทำให้น้ำหนักของขดลวดลดลง เพราะขนาดของเส้นลวดลดลง และขนาดของแกนเหล็กก็จะลดลงด้วย จึงมีผลทำให้น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง แต่ค่า Copper Loss จะสูงขึ้น เนื่องจากลวดตัวนำที่ใช้มีขนาดเล็กกลง จะเกิดค่าความต้านทานสูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง ในทางกลับกันถ้าค่าความหนาแน่นของกระแสต่ำลงก็จะให้ผลในทางตรงกันข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

4.4.4 ทดลองเปลี่ยนค่า Stacking Factor

โดยการพิจารณาหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220/110 V 2000 VA (Minimum Weight)

ตาราง 4.10 ผลที่ได้จากการเปลี่ยนค่า Stacking Factor

	Stacking Factor		
	0.92	0.95	0.98
Ac (cm ²)	52.17	51.41	43.71
2E (cm)	8.10	8.02	8.61
D (cm)	6.45	6.40	5.08
V/N(Volt/Turn)	1.068	1.085	0.952
Wcore (kg)	19.38	18.95	17.28
Wcu (kg)	7.67	2.48	8.30
Net Weight (kg)	27.05	26.43	25.58
Core Loss (W)	32.95	32.21	29.37
Copper Loss(W)	44.68	43.59	48.40
Total Loss (W)	77.63	75.80	77.77
Efficiency (%)	95.37	95.98	95.36

หมายเหตุ หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมือนกัน

Window Factor = 0.45

$B_{max} = 1 \text{ T}$

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการเปลี่ยนค่า Stacking Factor ให้มีค่าสูงขึ้นจะมีผลทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก เล็กลง และเมื่อใช้แกนเหล็กน้อยลงจะมีผลทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลงด้วย แต่ถ้ามูลค่า Stacking Factor ลงก็จะให้ผลในทางตรงกันข้าม

4.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการออกแบบโดยใช้วิธี **Opimization Techniques** กับการออกแบบ โดยวิธี **Area Product**

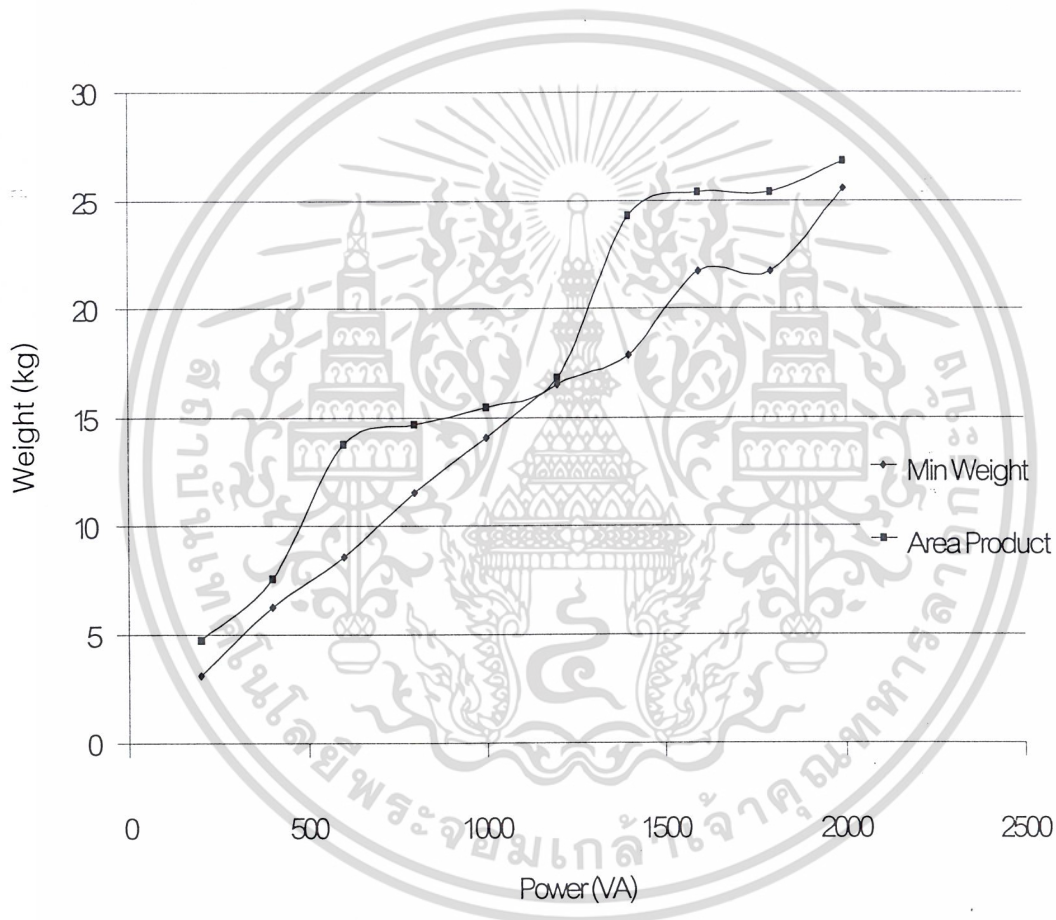
ตารางที่ 4.11 ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธี **Area Product**

	หม้อแปลงไฟฟ้าพิกัดแรงดัน 220/110									
Power(VA)	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Ac (cm³)	19.74	25.81	40.31	40.64	40.64	40.64	58.06	58.06	58.06	58.06
2E (cm)	4.45	5.08	6.35	6.35	6.35	6.35	7.62	7.62	7.62	7.62
D (cm)	4.45	5.08	6.35	6.35	6.35	6.35	7.62	7.62	7.62	7.62
#Np	23	19	18	16	15	14	14	13	13	12
#NS	20	17	15	14	13	12	11	10	10	9
V/N(Volt/Turn)	0.429	0.562	0.885	0.888	0.885	0.885	1.258	1.258	1.258	1.258
Np (Turn)	512	391	249	249	249	249	175	175	175	175
Ns (Turn)	256	196	124	124	124	124	87	87	87	87
Wcore (kg)	4.02	6.02	11.89	11.89	11.89	11.89	20.15	20.15	20.15	20.15
Wcu (kg)	0.69	1.54	1.86	2.77	3.58	4.94	4.13	5.24	5.24	6.66
Net Weight (kg)	4.71	7.56	13.75	14.66	15.47	16.83	24.28	25.39	25.39	26.81
Core Cost (Baht)	201	301	595	595	595	595	1007	1007	1007	1007
Cu Cost (Baht)	103	231	279	416	537	741	619	786	786	999
Total Cost(Baht)	304	532	873	1010	1131	1336	1626	1793	1793	2007
Core Loss (w)	6.83	10.23	20.22	20.22	20.22	20.22	34.25	34.25	34.25	34.25
Copper Loss(W)	11.91	16	18.05	22.46	26.96	31.23	30.45	31.56	39.44	38.81
Total Loss (W)	18.74	26.23	38.26	42.68	47.18	51.45	64.71	65.81	74.2	37.06
Efficiency (%)	89.52	92.42	92.62	93.75	94.43	94.91	94.54	95.11	94.52	95.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

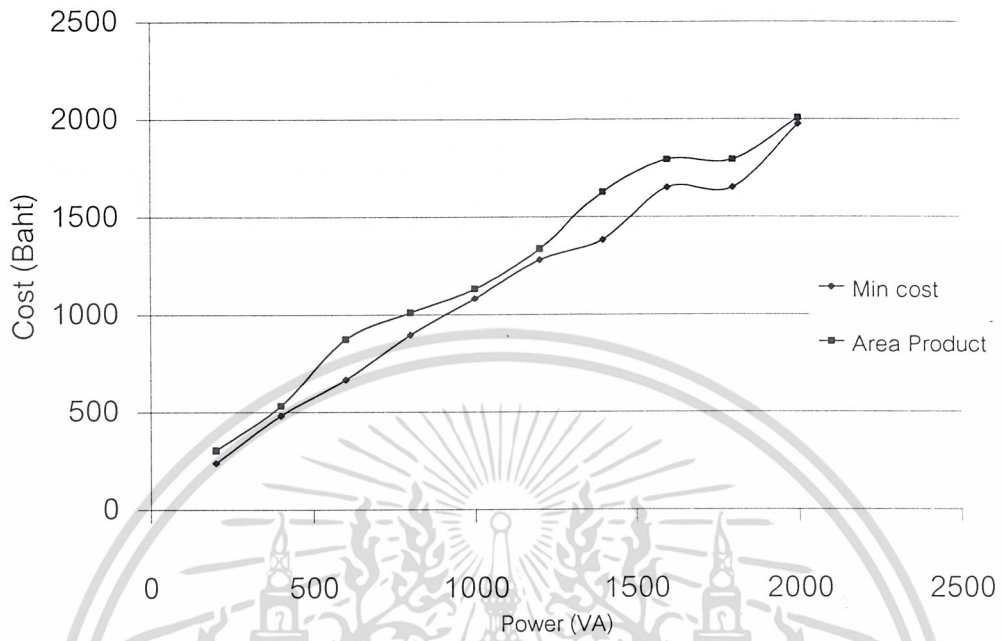
วิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบโดยใช้วิธีการ Optimal เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรอกแบบโดยใช้วิธี Area Product แล้วหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบโดยใช้วิธีการ Optimal จะให้ผลที่ดีกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบโดยวิธี Area Product ทั้ง 3 แบบ คือ แบบน้ำหนักต่ำสุด แบบราคาต่ำสุด และแบบประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อนำค่าจากตารางที่ 4.1,4.2,4.3 และ 4.11 นำมาเขียนกราฟได้ดังนี้

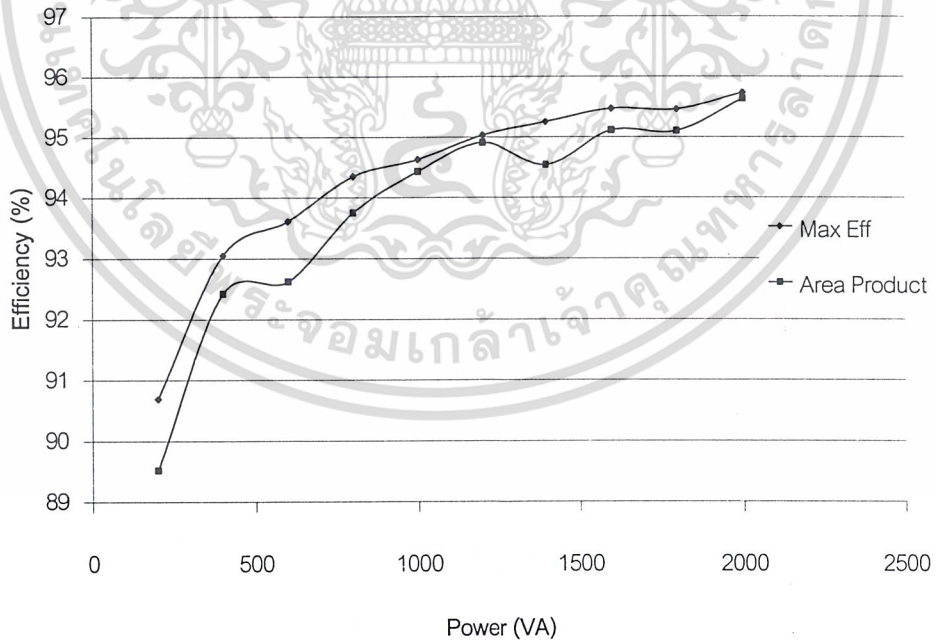


รูป 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงและราคา



รูป 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงและประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบโดยใช้วิธีการ Optimal จะให้ผลที่ดีกว่า คือ มีน้ำหนักที่ต่ำกว่า ราคาที่ถูกลงกว่า และประสิทธิภาพที่สูงกว่าการออกแบบโดยใช้วิธี Area Product ทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิเคราะห์กับผลที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรม ในการเปรียบเทียบเนื่องจากการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบมีข้อจำกัดทางด้านวัสดุที่นำมาใช้ทำแกนเหล็ก เพราะไม่สามารถจัดหาขนาดของแกนเหล็กได้ตามที่ออกแบบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำค่าของแกนเหล็กที่ได้จากการออกแบบมาปรับให้ได้ตามขนาดจริงที่มีการใช้งาน ซึ่งเมื่อปรับขนาดแล้วจะทำให้ค่าขนาดต่างๆที่ใช้ในการออกแบบเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในการเปรียบเทียบจึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมในส่วนที่ทำการปรับขนาดของแกนเหล็กแล้วกับค่าที่ได้จากการสร้างและทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

5.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นวิธีสำคัญในการหาพารามิเตอร์ต่างๆของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้สามารถทราบถึงวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งตัวได้ โดยค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นจะหาจากด้านใดด้านหนึ่งก็ได้ จากวงจรสมมูลที่ได้นี้ทำให้สามารถทำนายหม้อแปลงไฟฟ้าได้ว่าจะมีประสิทธิภาพ แรงเคลื่อนที่หายไป (Voltage drop) เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของขดลวด กำลังไฟฟ้าที่ต้องการใช้ กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกมาและอื่นๆได้อีกตามความต้องการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระไฟฟ้า ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อหาค่าพารามิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ

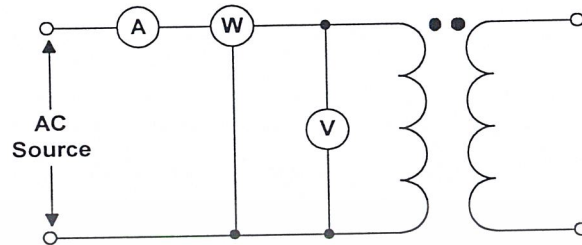
1. การทดสอบเปิดวงจร (Open Circuit Test or No load Test)
2. การทดสอบลัดวงจร (Short Circuit Test)

5.1.1 การทดสอบเปิดวงจร (Open Circuit Test or No load Test)

จุดประสงค์ของการทดสอบนี้ก็เพื่อหาส่วนสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กและกระแสกระตุ่น ซึ่งช่วยให้ทำให้หา R_c และ X_m ได้ ในการทดสอบนี้โดยปกติมักทำการเปิดวงจรด้านที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงและทำการวัดทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำดังรูป อย่างไรก็ตามในการทดสอบนี้อาจวัดหรือเปิดวงจรด้านใดด้านหนึ่งก็ได้ จุดประสงค์ที่ทำการวัดทางด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ ก็เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากการอ่านและวัดค่ากระแสขณะไม่มีภาระ ซึ่งเป็นค่าต่ำมาก (ประมาณ 2-10% ของกระแสที่พิกัด) ฉะนั้นเมื่อวัดทางด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงทำให้ได้กระแสขณะไม่มีภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงกว่าเมื่อวัดทางด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงไปเป็นจำนวน N_1/N_2 เท่าของด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง



รูป 5-1 วงจรการทดสอบเปิดวงจร

ในการทดสอบนี้จะต้องปรับให้ AC Source มีค่าเท่ากับพิกัดทางด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ แล้วทำการวัดค่าต่างๆของ Volt meter, Amp meter และ Watt meter ตามลำดับ ในขณะที่ทำการทดสอบนี้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของด้านที่วัดจะมีค่าน้อยมาก (ทั้งนี้เพราะกระแสขณะไม่มีภาระมีค่าน้อยมาก) ฉะนั้นจึงอาจตัดไม่พิจารณาค่านี้ได้และอาจเขียนวงจรสมมูลย์ขณะทำการทดสอบนี้ได้ดังรูป (เป็นวงจรสมมูลย์เมื่อพิจารณาด้านที่ทำการวัดเท่านั้น)

จากการทดสอบนี้ทำให้สามารถหาค่า R_c และ X_m ได้จากสมการ

$$P_o = V_o I_o \cos \theta_o \quad (4-1)$$

$$\theta_o = \cos^{-1} \frac{P_o}{V_o I_o} \quad (4-2)$$

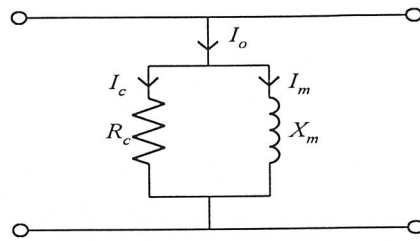
$$I_c = I_o \cos \theta_o \quad (4-3)$$

$$I_m = I_o \sin \theta_o \quad (4-4)$$

$$R_c = \frac{V_o}{I_c} \quad (4-5)$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_m} \quad (4-6)$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ขณะทำการทดสอบนี้ได้ดังรูป



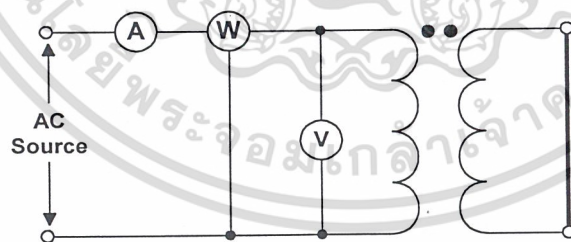
รูป 5-2 วงจรสมมูลขณะทำการทดสอบเปิดวงจร

5.1.2 การทดสอบลัดวงจร (Short Circuit Test)

จุดประสงค์ของการทดสอบนี้คือ เพื่อหา

1. สมมูลย์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ส่วนสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของขดลวดทองแดง (Copper loss) ส่วนสูญเสียนี้นำไปใช้คำนวณประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย
- 3.Regulation ของหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบวิธีนี้ โดยปกติจะทำการลัดวงจรทางด้านแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำโดยใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ลัดวงจร หรืออาจใช้แอมป์มิเตอร์เป็นตัวลัดวงจรแทนก็ได้เพื่อให้เห็นถึงกระแสที่พิกัดในขณะลัดวงจร



รูป 5-3 วงจรการทดสอบลัดวงจร

การทดสอบนี้ทำได้โดยปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าจาก A.C. Source โดยเริ่มจากศูนย์โวลท์จนกระทั่งแอมป์มิเตอร์อ่านค่าของกระแสได้ตามพิกัดของด้านที่ทำการทดสอบ (โดยปกติค่าของ A.C. Source จะมีค่าประมาณ 5-10% ของพิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของด้านที่ทำการวัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการทดสอบนี้หม้อแปลงไฟฟ้าได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่พิกัดดังนั้นจึงทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดทั้งสองด้านมีค่าต่ำ ฉะนั้นค่าของการสูญเสียในแกนเหล็กจึงมีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าที่อ่านได้จากวัตต์มิเตอร์จึงเป็นค่าที่เกิดจากการสูญเสียทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความต้านทานของขดลวดทั้งสองด้าน

จากการทดสอบนี้ทำให้สามารถหาค่า R_{eq} และ X_{eq} ได้จากสมการ

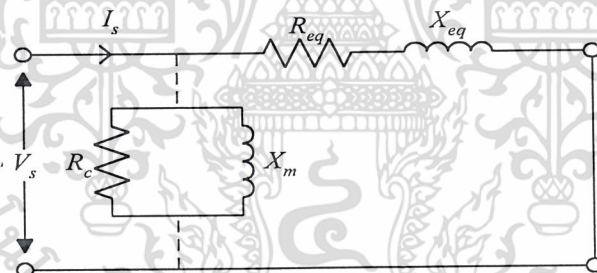
$$P_s = I_s^2 R_{eq} \tag{4-7}$$

$$Z_{eq} = \frac{V_s}{I_s} \tag{4-8}$$

$$R_{eq} = \frac{P_s}{I_s^2} \tag{4-9}$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \tag{4-10}$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลย้ขณะทำการทดสอบนี้ได้ดังรูป



รูป 5-4 วงจรสมมูลย้การทดสอบล้ดวงจร

นอกจากวงจรสมมูลย้แล้ว ประโยชน์ที่ได้จากการทดสอบอีกประการคือความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density ,B)และความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity ,H) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการของ Faraday และกฎของ Ampere [9]

$$E = 4.44 fNBA \tag{4-11}$$

$$B = \frac{E}{4.44 fNA}$$

$$NI = HI \tag{4-12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H = \frac{NI}{l}$$

5.2 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

ตาราง 5.1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

	200 VA 220/220 V (Minimum Weight)		
Open Circuit Test	220 V	33.4 mA	5.8 W
Short Circuit Test	21.5 V	0.91 A	16 W

จากผลการทดสอบที่ได้ สามารถคำนวณหาจรรยาสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบได้ดังนี้

จาก $P_o = V_o I_o \cos \theta_o$

$$\cos \theta_o = \frac{P_o}{V_o I_o} = \frac{5.8}{220 \times 33.4 \times 10^{-3}}$$

$$= 0.789$$

$$I_c = I_o \cos \theta_o = 33.4 \times 10^{-3} \times 0.789$$

$$= 26.35 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$I_m = I_o \sin \theta_o = 33.4 \times 10^{-3} \times 0.641$$

$$= 21.41 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$R_c = \frac{V_o}{I_c} = \frac{220}{26.35 \times 10^{-3}}$$

$$= 8346 \ \Omega$$

Transfer to Secondary $R_c = 2087 \ \Omega$

$$X_m = \frac{V_o}{I_m} = \frac{220}{21.41 \times 10^{-3}}$$

$$= 10.28 \times 10^3 \ \Omega$$

Transfer to Secondary $X_m = 2570 \ \Omega$

จาก $P_s = I_s^2 R_{eq}$

$$R_{eq} = \frac{P_s}{I_s^2} = \frac{16}{0.91^2}$$

$$= 19.32 \ \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

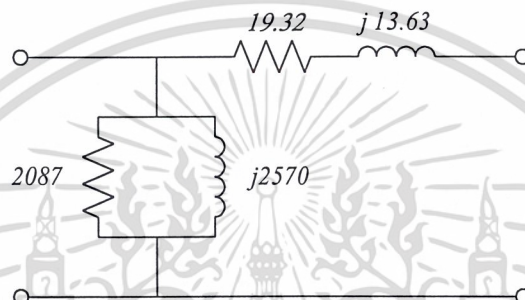
$$Z_{eq} = \frac{V_s}{I_s} = \frac{21.5}{0.91}$$

$$= 23.63 \quad \Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} = \sqrt{23.63^2 - 19.32^2}$$

$$= 13.61 \quad \Omega$$

จากค่าที่คำนวณได้สามารถเขียนวงจรสมมูลย์ได้ดังรูป



รูป 5.5 วงจรสมมูลย์แบบประมาณของหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ

5.3 เปรียบเทียบผล

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการออกแบบกับที่ได้พื้นจริง

วิเคราะห์ผลเปรียบเทียบ

จากผลการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบในตารางที่ 5.2 สรุปได้ดังนี้

1. น้ำหนักของแกนเหล็กที่ใช้จริงมีค่าแตกต่างจากที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นผลจากการกำหนดค่าความหนาแน่นของแกนเหล็กและค่า stacking factor ที่ผิดพลาด
2. จากน้ำหนักของแกนเหล็กที่ผิดพลาด จะส่งผลให้การคำนวณค่าความสูญเสียจากแกนเหล็ก (Core Loss) ผิดพลาดด้วย
3. ความยาวของลวดตัวนำที่ใช้จริงมีค่าแตกต่างจากที่คำนวณได้ ได้ ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณค่าความยาวเฉลี่ยของลวดตัวนำที่ผิดพลาด
4. ความยาวของลวดตัวนำที่ผิดพลาดจะส่งผลให้ การคำนวณค่าความสูญเสียจากลวดตัวนำ (Copper Loss) ผิดพลาด
5. Winding Factor ที่มีค่าสูงเกินไปจะส่งผลให้ การพันลวดตัวนำทำได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.2 ผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่ได้จากการพันจริง

	200 VA 220/220V Minimum Weight		
	Optimal	ปรับแกน	พันจริง
Ac(cm ²)	14.77	14.77	14.77
2E(cm)	3.45	3.81	3.81
D(cm)	4.29	3.89	3.89
Np	746	746	746
Ns	768	768	768
#Np(S.W.G.)	23	23	23
#Ns(S.W.G.)	23	23	23
V/N(Volt/Turn)	0.295	0.295	0.295
Wcore (kg)	2.15	2.38	2.58
Wcu (kg)	0.84	0.82	0.845
Net Weight (kg)	2.99	3.20	3.425
Core Cost (Baht)	108	119	129
Cu Cost (Baht)	126	124	126.75
Total Cost (Baht)	234	242	255.75
Core losses (W)	4.31	4.75	5.8
Cu losses (W)	18.73	18.36	16
Total losses (W)	23.03	23.11	21.8
Efficiency (%)	87.42	87.38	90.17
Le H.V. (m)	153	150.4	135.5
Le L.V. (m)	172	168.37	180.5
W.H.V. (kg)	0.395	0.378	0.360
W.L.V. (kg)	0.444	0.434	0.480

หมายเหตุ

Stacking Factor = 0.95

Window Factor = 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีแก้ไข

1. ปรับค่าความหนาแน่นของแกนเหล็กที่ใช้ในการคำนวณ
2. ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดและการอ่านค่าของเครื่องมือวัด
3. ตรวจสอบการคำนวณค่าความยาวเฉลี่ยต่อรอบของลวดตัวนำ
4. ตรวจสอบกระบวนการวัดความยาวของลวดตัวนำ
5. แก้ไขค่า Window Factor เพื่อความสะดวกในการพันหม้อแปลงไฟฟ้า

5.4 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ ชุดที่ 2 หลังจากการแก้ไขโปรแกรมแล้ว

ตาราง 5.3 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ ชุดที่ 2

		Transformer 400VA 220/110 V			
		Minimum Weight	Minimum Cost	Maximum Efficiency	Area Product
Open Circuit Test	V_o	110 V	110 V	110 V	110 V
	I_o	150 mA	234 mA	214 mA	212 mA
	P_o	9.25 W	16.8 W	13 W	11.75 W
Short Circuit Test	V_s	12.8 V	10.4 V	9.1 V	10.25 V
	I_s	1.818 A	1.818 A	1.818 A	1.818 A
	P_s	20 W	16 W	15 W	17 W

5.5 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการออกแบบที่ได้จากโปรแกรม

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการออกแบบกับที่ได้พันจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.4 ผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่ได้จากการพันจริง

	400VA 220/110V Minimum Weight			400VA 220/110V maximum Efficiency		
	Optimal	ปรับแกน	พันจริง	Optimal	ปรับแกน	พันจริง
Ac(cm ³)	19.48	19.48	19.48	34.65	34.65	34.65
2E(cm)	4.9	5.08	5.08	3.68	3.81	3.81
D(cm)	3.99	3.84	3.84	9.37	9.12	9.12
Np	518	518	518	292	292	292
Ns	272	259	259	153	146	146
#Np(S.W.G.)	20	20	20	20	20	20
#Ns(S.W.G.)	17	17	17	17	17	17
V/N(Volt/Turn)	0.425	0.425	0.425	0.754	0.754	0.754
Wcore (kg)	4.4	4.55	4.52	5.87	6.04	6.03
Wcu (kg)	1.69	1.71	1.71	1.24	1.23	1.24
Net Weight (kg)	6.09	6.26	6.23	7.11	7.27	7.27
Core Cost (Baht)	220	228	226	294	302	301.5
Cu Cost (Baht)	254	257	257	185	184	186
Total Cost (Baht)	474	484	483	479	486	487.5
Core losses (W)	7.47	7.74	8	9.98	10.27	13
Cu losses (W)	21.26	21.47	22	15.62	15.53	15
Total losses (W)	30.5	30.57	30	25.6	25.79	28
Efficiency (%)	91.76	91.64	93.19	92.59	92.54	93.46
Le H.V. (m)	115.79	116.65	117.8	88.07	87.36	89.06
Le L.V. (m)	71.88	72.76	76	50.99	50.8	52.785
W.H.V. (kg)	0.676	0.681	0.65	0.5147	0.5105	0.5
W.L.V. (kg)	1.0165	1.029	1.06	0.7211	0.718	0.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.4 (ต่อ) ผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการออกแบบกับค่าที่ได้จากการพันจริง

	400VA 220/110V Minimum Cost			400VA 220/110V Area Product		
	Optimal	ปรับแกน	พันจริง	Optimal	ปรับแกน	พันจริง
Ac (cm ²)	25.03	25.03	25.03	-	25.81	25.81
2E (cm)	4.32	4.45	4.45	-	5.08	5.08
D (cm)	5.82	5.64	5.64	-	5.08	5.08
Np	403	403	403	-	391	391
Ns	212	202	202	-	206	196
#Np (S.W.G.)	20	20	20	-	20	20
#Ns (S.W.G.)	17	17	17	-	17	17
V/N(Volt/Turn)	0.546	0.546	0.546	-	0.562	0.562
Wcore (kg)	4.96	5.11	5.04	-	6.02	5.98
Wcu (kg)	1.42	1.43	1.42	-	1.43	1.43
Net Weight (kg)	6.39	6.53	6.46	-	7.45	7.41
Core Cost (Baht)	248	255	252	-	301	299
Cu Cost (Baht)	214	214	213	-	214	214.5
Total Cost (Baht)	462	469	465	-	515	513.5
Core losses (W)	8.44	8.68	16.8	-	10.23	11.75
Cu losses (W)	17.93	17.95	16	-	17.93	17
Total losses (W)	26.36	26.63	32.8	-	28.16	28.75
Efficiency (%)	92.39	92.32	92.42	-	91.91	93.51
Le H.V. (m)	99.15	99.06	99.34	-	97.89	100
Le L.V. (m)	59.74	59.9	60.3	-	60.51	60.5
W.H.V. (kg)	0.579	0.578	0.56	-	0.572	0.57
W.L.V. (kg)	0.8449	0.8471	0.86	-	0.856	0.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่ามีผลสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 4 กล่าวคือ น้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้า ในกรณีของน้ำหนักรวมต่ำก็สามารถสร้างได้น้ำหนักต่ำกว่าการออกแบบโดยวิธี Area Product และส่วนในกรณีของราคาและประสิทธิภาพก็สามารถสร้างได้เช่นกัน

ในส่วนของประสิทธิภาพ จะพบปัญหาในขั้นตอนของการทดสอบแบบเปิดวงจรคือ ขณะวัดค่ากระแสกระตุ้น ค่าที่วัดได้มี ความแตกต่างกับที่ได้ออกแบบไว้สาเหตุเกิดเนื่องจากเครื่องมือวัดที่ใช้ทำการทดสอบนั้นตอบสนองสัญญาณรูป Sinusoidal เท่านั้น ในขณะที่สัญญาณของกระแสกระตุ้นนั้น ไม่ใช่สัญญาณรูป Sinusoidal ที่เป็นเช่นนั้นเพราะ สารแม่เหล็กที่นำมาใช้ทำแกนเหล็กมีความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่เป็นเชิงเส้นดังนั้นจึงทำให้สัญญาณของกระแสกระตุ้นที่มีผลของฮาโมนิกส์เข้ามาด้วยผลการทดสอบจึงมีค่าผิดพลาดไปบ้าง แต่ไม่มากนักเพราะขนาดของสัญญาณมีขนาดที่ต่ำ

5.6 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H นี้เพื่อตรวจสอบการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเหล็ก

ตาราง 5.5 ผลการทดสอบเปิดวงจร

Transformer 400VA 220/110V				
$V_{oc}(V)$	$I_{oc}(mA)$	$W_{oc}(W)$	$H(A-T/m)$	$B(T)$
10	44	0	25.93983	0.090812
15	49.5	0	29.18231	0.136218
20	58	0.5	34.19342	0.181625
25	64.5	1	38.02544	0.227031
30	70	1.1	41.26792	0.272437
35	75.5	1.5	44.5104	0.317843
40	80	2	47.16334	0.363249
45	86	2.5	50.70059	0.408655
50	91	3	53.64829	0.454062
55	96.25	3.75	56.74339	0.499468

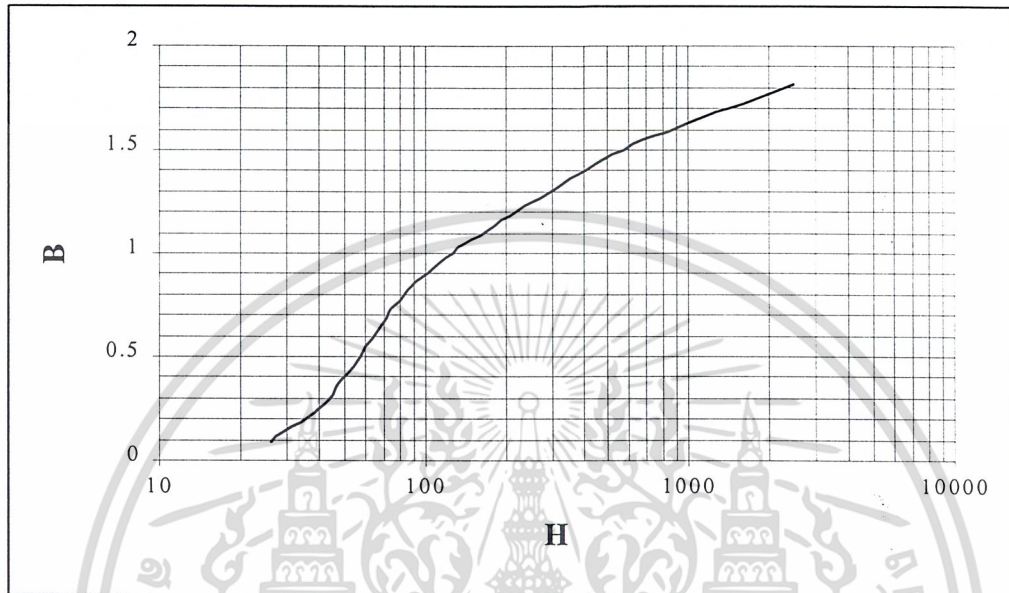
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voc(V)	Ioc(mA)	Woc(W)	H(A-T/m)	B(T)
60	101.75	4	59.98587	0.544874
65	107	5	63.08096	0.59028
70	113	5.5	66.61821	0.635686
75	119.75	6.5	70.59762	0.681092
80	126.25	7	74.42964	0.726499
85	135	8	79.58813	0.771905
90	145	9	85.48355	0.817311
95	158	10	93.14759	0.862717
100	173	11	101.9907	0.908123
105	193	12	113.7815	0.953529
110	214	13	126.1619	0.998935
115	240.5	14.2	141.7848	1.044342
120	273	15.5	160.9449	1.089748
125	310	16.75	182.7579	1.135154
130	358	18	211.0559	1.18056
135	405	19.5	238.7644	1.225966
140	458	21	270.0101	1.271372
145	528	22.25	311.278	1.316779
150	595	23.75	350.7773	1.362185
155	685	25.25	403.8361	1.407591
160	810	27	477.5288	1.452997
165	960	29	565.96	1.498403
170	1140	31	672.0775	1.543809
175	1430	31.5	843.0446	1.589216
180	1730	35	1019.907	1.634622
185	2150	37	1267.515	1.680028
190	2750	40	1621.24	1.725434
195	3450	45	2033.919	1.77084
200	4270	50	2517.343	1.816246

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลที่ได้จากการทดสอบ มาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H จากสมการ 4-11 และ 4-12 ได้ดังแสดงในตาราง 5.5 แล้วนำผลที่ได้เขียนกราฟดังแสดงในรูป 5.6



รูป 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H

สรุปผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากการคำนวณและกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H เห็นได้ว่าเป็นความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลของแกนเหล็กจริงที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต และขนาดของ B ที่ได้ก็ตรงตามที่ออกแบบไว้

5.7 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

นำผลที่ได้จากการทดสอบในตาราง 5.6 เขียนกราฟดังแสดงในรูป 5.7

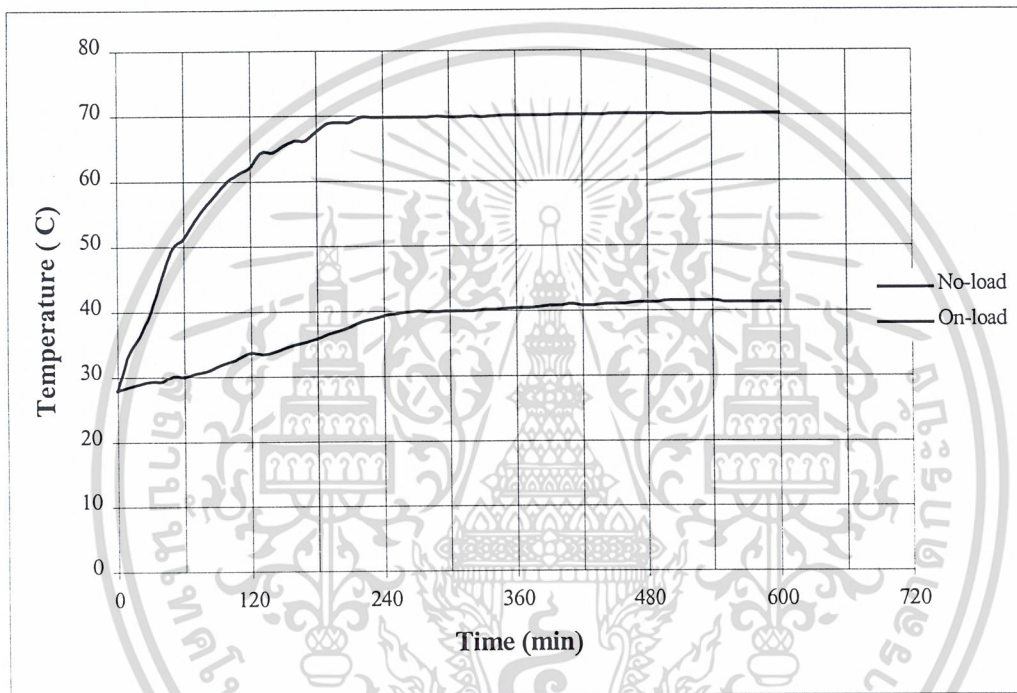
ตาราง 5.6 ผลการทดสอบอุณหภูมิ ขณะจ่ายภาระและไร้ภาระ

Time	Temperature(°C)		Time	Temperature(°C)	
	On-load	No-load		On-load	No-load
10	33.4	28.5	310	69.8	40
20	36.2	28.9	320	69.9	40
30	40	29.3	330	69.8	40.2
40	45.3	29.3	340	69.9	40.2
50	49.6	30.1	350	70	40.3
60	51.3	30	360	70	40.4
70	54.1	30.5	370	70	40.4
80	56.3	30.9	380	70	40.6
90	58.2	31.6	390	70	40.8
100	60.1	32.2	400	70.1	40.8
110	61.2	33	410	70.1	41
120	62.2	33.7	420	70.1	40.8
130	64.4	33.4	430	70.1	40.8
140	64.4	33.8	440	70.1	41
150	65.4	34.4	450	70.2	41
160	66.2	34.9	460	70.2	41
170	66.2	35.3	470	70.2	41.3
180	67.6	35.8	480	70.2	41.3
190	68.8	36.5	490	70.2	41.3
200	69	37	500	70.1	41.5
210	69	37.6	510	70.1	41.5
220	69.8	38.4	520	70.1	41.5
230	69.8	38.8	530	70.1	41.5
240	69.8	39.3	540	70.2	41.5
250	69.8	39.6	550	70.2	41.3
260	69.8	39.8	560	70.2	41.3
270	69.8	40	570	70.2	41.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time	Temperature(°C)	
	On-load	No-load
280	69.8	39.9
290	69.9	39.9
300	69.8	40

Time	Temperature(°C)	
	On-load	No-load
580	70.3	41.3
590	70.3	41.3
600	70.3	41.3



รูป 5.7 อุณหภูมิ ขณะจ่ายภาระและไร้ภาระ

สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบ ผลที่ได้จะเห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า มีค่าประมาณ 70°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่เกินกว่าที่ฉนวนของลวดตัวนำทนได้ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบอุณหภูมิขณะไร้ภาระด้วย ซึ่งผลที่ได้คืออุณหภูมิคงที่อยู่ประมาณ 42°C ดังนั้นจึงบอกได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดทำงานนั้นเกิดจากอุณหภูมิของลวดตัวนำที่จ่ายภาระ มิได้เกิดจากการอิมตัวของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจะมีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง เนื่องจาก
ขณะทดสอบอุณหภูมิห้องมีการเปลี่ยนแปลง



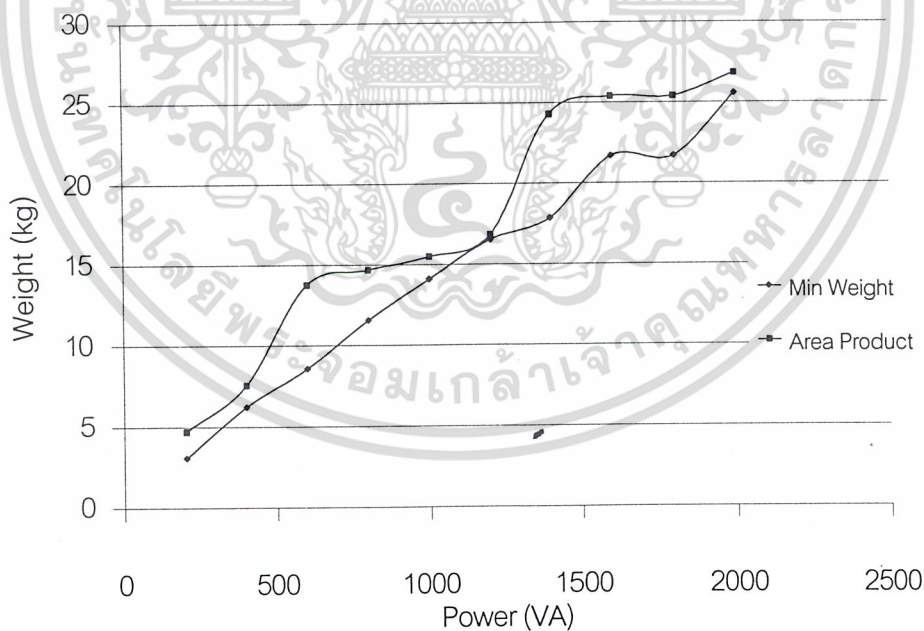
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

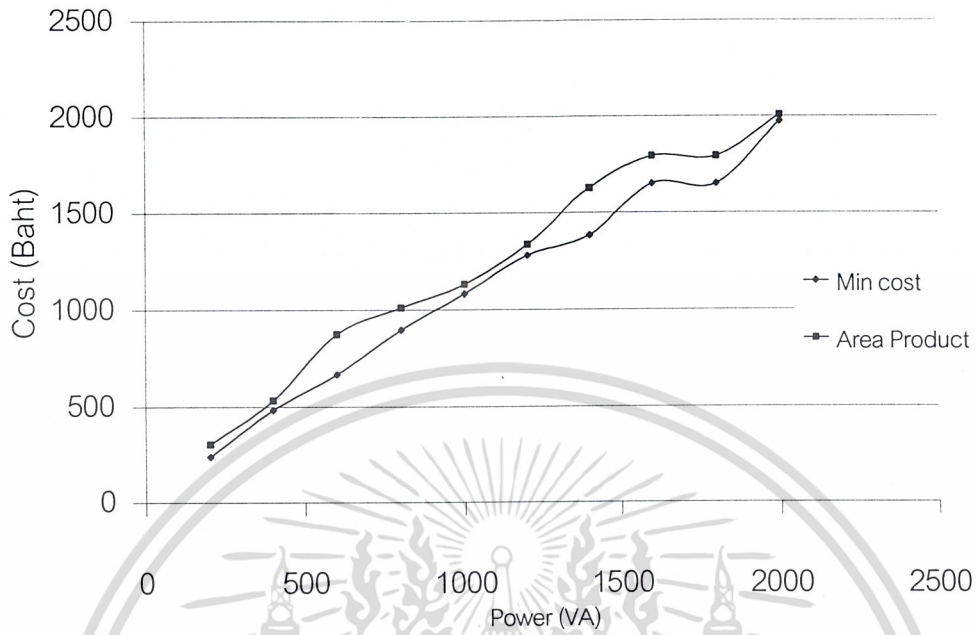
สรุปและวิจารณ์ผล

เป็นการสรุปและวิจารณ์ผลที่ได้จากโปรแกรมและการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ โดยจะแสดงให้เห็นถึงผลที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรมว่าสามารถนำไปสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้จริงและผลที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎี

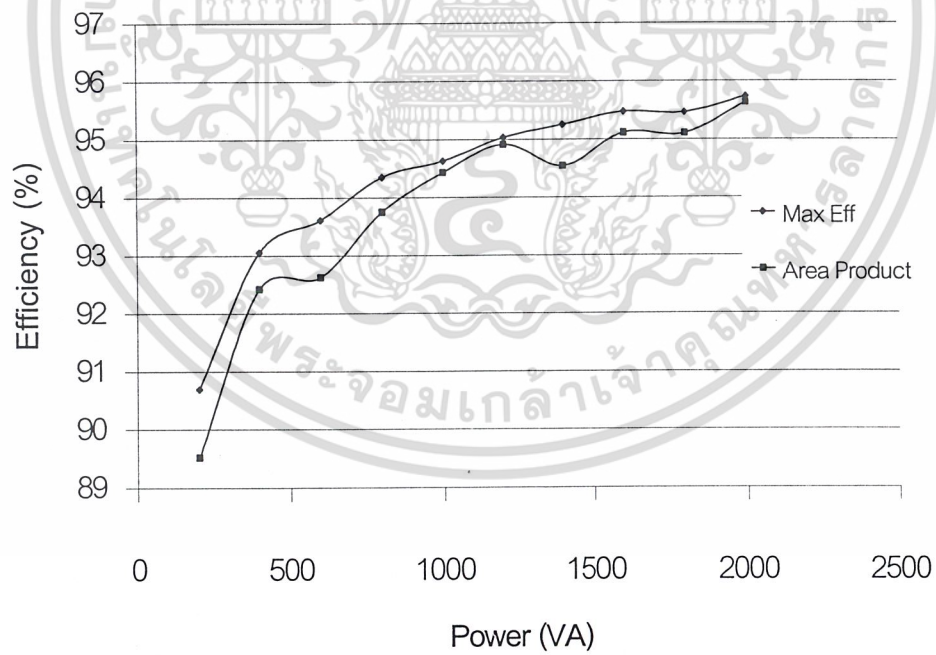
1. ผลที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธี Optimization Techniques จะได้หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ คือหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักต่ำสุด หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำสุด หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธี Area Product ที่มีพิกัดกำลังเท่ากันแล้ว โดยที่ยังคงใช้ค่าพารามิเตอร์เดียวกันวิธี Optimization Techniques จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าทางด้าน น้ำหนัก ราคา และ ประสิทธิภาพ จากตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูป 6-1 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและน้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูป 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูป 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

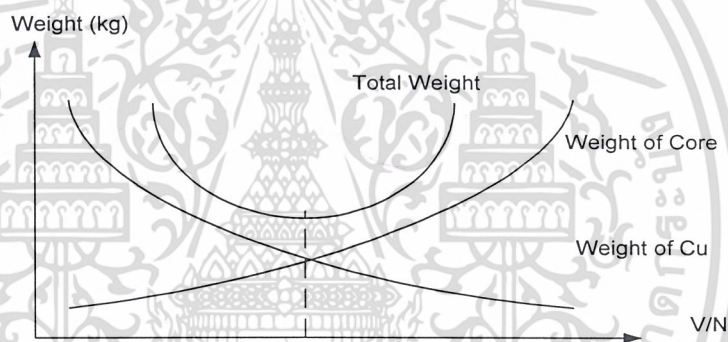
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิดที่ได้จากการออกแบบจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งเกิดจากการที่โปรแกรมได้ค้นหาค่าต่างๆ เพื่อทำให้เกิดจุดที่เหมาะสมโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของน้ำหนักแกนเหล็กต่อน้ำหนักขดลวดโดยการเปลี่ยนค่า V/N และการเลือกค่า D และ $2E$ จึงทำให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีรูปร่างของโครงสร้างภายนอก น้ำหนักแกนเหล็ก น้ำหนักขดลวด และค่า V/N ที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละแบบตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

เมื่อพิจารณาจากสมการของฟาราเดย์ที่เขียนอยู่ในรูปของอัตราส่วนแรงดันต่อจำนวนรอบจะได้

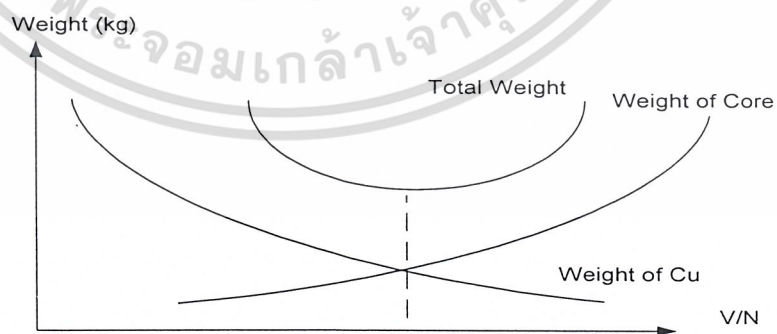
$$\frac{V}{N} = 4.44 f B_{\max} s \cdot f \cdot A \quad (6.1)$$

จากสมการที่ 6.1 สามารถแยกพิจารณาสมการออกได้ 2 เทอม ด้านซ้ายมือคือเทอมของลวดตัวนำและด้านขวามือคือเทอมของแกนเหล็กที่ใช้ทำหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณเส้นกราฟของสมการดังกล่าวได้ดังนี้



รูป 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนของค่า V/N กับน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้า

ฟ้า



รูป 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนของค่า V/N กับราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟสามารถพิจารณาห่อแปลงไฟฟ้าในแต่ละวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

-กรณีออกแบบห่อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักต่ำสุด จากกราฟแล้วควรจะเป็นจุดที่น้ำหนักของลวดตัวนำเท่ากับน้ำหนักของแกนเหล็ก แต่ผลที่ได้จากโปรแกรมน้ำหนักของแกนเหล็กจะมีค่ามากกว่าน้ำหนักของลวดตัวนำ (W_{core}/W_{cu}) จะมีค่าประมาณ 1.5-2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากเงื่อนไขของค่า Winding Factor ในการพันขดลวด เป็นตัวกำหนดการเผื่อพื้นที่ว่างในการพันขดลวดจึงทำให้ขนาดของแกนเหล็กใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักสูงขึ้น

-กรณีออกแบบห่อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำสุด จากกราฟจะเห็นว่า V/N ของห่อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะมีค่าสูงกว่ากรณีออกแบบห่อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักต่ำสุด เนื่องจากปกติแล้วราคาของลวดตัวนำทองแดงในท้องตลาดจะสูงกว่า ราคาของแกนเหล็กประมาณ 3-4 เท่า ดังนั้นในการหาค่าที่เหมาะสมจึงได้ทำให้ปริมาณลวดตัวนำลดลงไปโดยการเพิ่มค่า V/N ให้สูงขึ้น ซึ่งค่า V/N ของห่อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาต่ำสุด จะมีค่าสูงกว่าห่อแปลงไฟฟ้าแบบที่มีน้ำหนักต่ำสุด และอัตราส่วนน้ำหนักของแกนเหล็กต่อน้ำหนักของขดลวด (W_{core}/W_{cu}) จะมีค่าประมาณ 3-4 เท่า

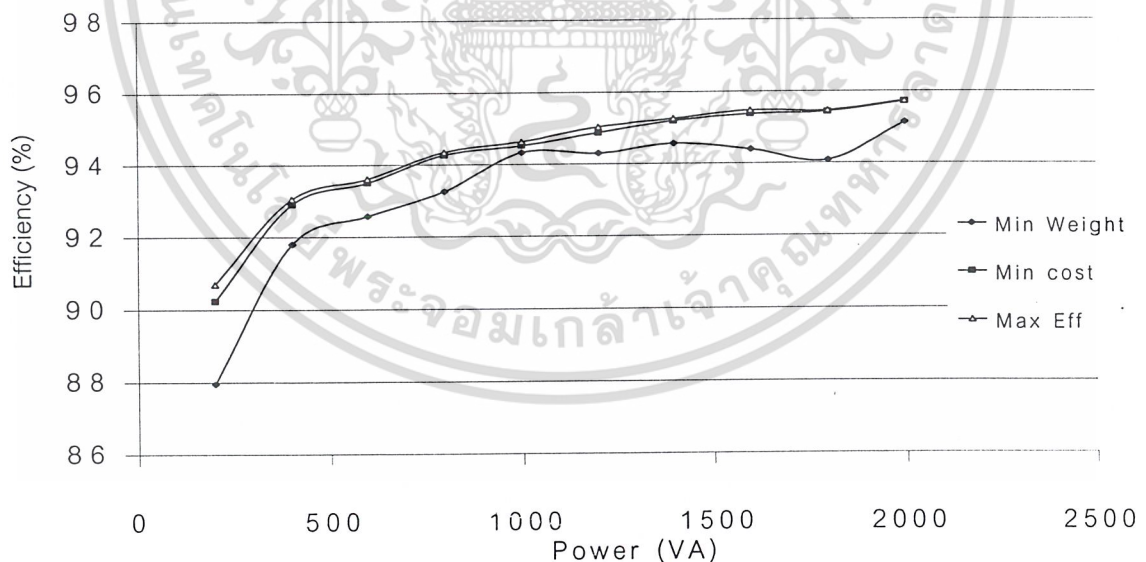
-กรณีออกแบบห่อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จากทฤษฎีแล้วห่อแปลงไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุดค่าสูญเสียในแกนเหล็กจะเท่ากับค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำ โดยปกติห่อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กทั่วไป ลวดตัวนำที่ใช้จะมีขนาดเล็กและแกนเหล็กที่ใช้ก็จะมีจำนวนไม่มากนักโดยที่ปริมาณของแกนเหล็กไม่ได้แปรผันโดยตรงกับขนาดพิกัดกำลังของห่อแปลงไฟฟ้า ที่ห่อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กปริมาณแกนเหล็กที่ใช้เมื่อเทียบกับขนาดพิกัดก็ยังคงมากอยู่จึงทำให้ค่า Copper Loss มากกว่าค่า Core Loss ในห่อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้จะมีค่า V/N สูงกว่าห่อแปลงไฟฟ้าชนิดอื่น เพราะโปรแกรมจะทำการลดปริมาณลวดตัวนำที่ใช้ให้น้อยลง แต่จะไปทำการเพิ่มปริมาณของแกนเหล็กให้มากขึ้น มีผลทำให้ค่า Copper Loss และค่า Core Loss มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

3. จากข้อ 2. เมื่อนำค่าอัตราส่วนน้ำหนักของแกนเหล็กต่อน้ำหนักของขดลวดตัวนำของห่อแปลงไฟฟ้าแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าค่าที่ได้ในห่อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักต่ำสุดจะมีค่าน้อยที่สุด และห่อแปลงไฟฟ้าแบบที่มีราคาต่ำสุดจะมีค่าสูงกว่า และห่อแปลงไฟฟ้าแบบที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจะมีค่ามากที่สุด

4. ค่าอัตราส่วนของแรงดันต่อจำนวนรอบ (Volt per Turn) ที่ได้จากโปรแกรมนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า คือค่า V/N จะแปรผันตรงกับพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าสูงขึ้นขนาดลวดตัวนำจะมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงต้องลดจำนวนรอบของลวดตัวนำลงเพื่อไม่ให้ขนาดแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าใหญ่มากเกินไป

5. จากข้อ 4. เมื่อนำค่า V/N ของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าค่า V/N ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีน้ำหนักเบาสุดจะมีค่าน้อยที่สุด และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบที่มีราคาต่ำสุดจะมีค่า V/N ที่สูงขึ้น และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจะมีค่า V/N มากที่สุด

6. ผลที่ได้จากโปรแกรมจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพิกัดกำลัง เนื่องจากที่พิกัดกำลังต่างๆ ลวดตัวนำที่ใช้ จะมีขนาดเล็กและมีจำนวนมารอบ ทำให้มีความต้านทานสูง จึงมีผลทำให้เกิดการสูญเสียในลวดตัวนำ (Copper Loss) ซึ่งเมื่อค่า Copper Loss นี้สูงจะทำให้ประสิทธิภาพหม้อแปลงไฟฟ้าต่ำ จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า และประสิทธิภาพจากตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ได้ดังรูปที่ 6.6

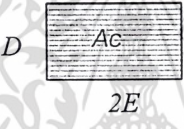

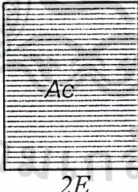


รูป 6.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า และประสิทธิภาพ

7. ผลที่ได้จากโปรแกรมจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดันต่างกัน แต่มีพิกัดกำลังเท่ากันจะมีขนาดและรูปร่างคล้ายกัน(ขนาดของ $2E$ และ D มีขนาดใกล้เคียงกัน) ดังนั้นขนาดของตัวหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับขนาดของพิกัดกำลังมากกว่าขนาดพิกัดแรงดัน

8. พื้นที่หน้าตัดที่ขากลางของแกนเหล็ก(A_c) ในหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละแบบของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบมาเปรียบเทียบกันดังนี้

ตาราง 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $2E$ กับ D

ชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า	รูปพื้นที่หน้าตัดแกนกลาง	
Minimum Weight		$D < (2E)$
Minimum Cost		$D \approx (1-1.5)(2E)$
Maximum Efficiency		$D \approx (1.5-2)(2E)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก(B_{max}) ที่กำหนดในการออกแบบ เมื่อเราทำการเปลี่ยนค่าให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ขนาดแกนเหล็กที่ได้จะมีขนาดลดลง และน้ำหนักหม้อแปลงไฟฟ้าจะลดลงแต่ในทางกลับกัน ถ้ากำหนดให้ B_{max} มีค่าต่ำลงผลที่ได้จะมีค่าตรงกันข้ามกัน ซึ่งการกำหนดค่า B_{max} ในการออกแบบจะต้องพิจารณาจาก B-H Curve และพิจารณาถึงช่วงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ใช้ด้วย

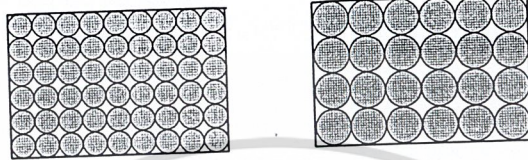
10. ความหนาแน่นของกระแส (Current Density) เมื่อ มีค่าสูงขึ้น จะทำให้น้ำหนักของขดลวดลดลง เพราะขนาดของเส้นลวดลดลง และขนาดของแกนเหล็กก็จะลดลงด้วย จึงมีผลทำให้น้ำหนักรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าลดลง แต่ค่า Copper Loss จะสูงขึ้น เนื่องจากลวดตัวนำที่ใช้มีขนาดเล็กลง จะเกิดค่าความต้านทานสูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพต่ำลง ในทางกลับกันถ้าค่าความหนาแน่นของกระแสต่ำลงก็จะให้ผลในทางตรงกันข้าม

11. การกำหนดค่า Stacking Factor ซึ่งแตกต่างกันจะมีผลต่อขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ถ้ากำหนดค่า Stacking Factor ให้มีค่าสูงจะมีผลทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีขนาดลดลงเล็กน้อย ซึ่งจะมีผลต่อน้ำหนักหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มากนัก ซึ่งการกำหนดค่า Stacking Factor นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแกนเหล็กและความหนาของฉนวนที่เคลือบอยู่ที่แผ่นเหล็ก และการจัดเรียงแกน

12. การกำหนดค่า Window Factor ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อน้ำหนักของหม้อแปลงไฟฟ้า ถ้าต้องการเนื้อพื้นที่ในการพันขดลวดให้มากขึ้น โดยการกำหนดค่า Window Factor ให้ต่ำจะทำให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องใช้ขนาดแกนเหล็กที่ใหญ่ ซึ่งทำให้มีน้ำหนักมากขึ้นไปด้วย แต่ถ้ากำหนดให้ Window Factor มีค่ามากๆ ก็จะทำให้ปริมาตรของแกนเหล็กที่ใช้น้อยลง แต่จะทำให้เกิดปัญหาในการพันขดลวด ซึ่งการกำหนดค่า Window Factor นี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการพัน และประสบการณ์ในการพันขดลวด ซึ่งในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบในปริญญาโทขั้นนี้ ทางผู้จัดทำให้ใช้ค่า Window Factor อยู่ระหว่าง 0.4-0.45 ซึ่งสามารถพันลวดได้พอดี

13. จากการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดต่างกันผู้ปฏิบัติงานได้สรุปว่าค่า Window Factor ที่กำหนดในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้านั้น เมื่อนำไปใช้ในการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าจริงแล้ว

จะต้องเปลี่ยนแปลงไปตามพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า คือที่หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังสูงขึ้น ค่า Window Factor จะต้องมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังสูงจะใช้ลวดตัวนำขนาดใหญ่ ดังนั้นการจัดเรียงเส้นลวดจะทำได้ยากกว่าลวดตัวนำเส้นเล็กจึงต้องเผื่อพื้นที่ในการพันให้มากขึ้น พิจารณาจากรูป



ลวดตัวนำขนาดเล็ก

ลวดตัวนำขนาดใหญ่

รูป 6.7 รูปของการจัดเรียงลวดตัวนำที่ขนาดเล็กและขนาดใหญ่

14. เมื่อนำหม้อแปลงไฟฟ้าไปทำการจ่ายโหลด จะมีแรงดันส่วนหนึ่งที่ตกคร่อมอยู่ในขดลวด (Voltage Drop) ทำให้แรงดันเอาท์พุท ของหม้อแปลงไฟฟ้าตกลงไป ซึ่งในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังต่ำจะมีค่า Voltage Regulation สูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังสูงกว่า เนื่องจากลวดตัวนำเส้นเล็กมีความต้านทานสูงจะมีแรงดันตกคร่อมมากกว่า จึงต้องมีการเผื่อจำนวนรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิไว้เพื่อชดเชยแรงดันตก ซึ่งการเผื่อจำนวนรอบนี้จะขึ้นอยู่กับพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดต่ำจะต้องเผื่อมากกว่า ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน

15. หม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการ Optimization Techniques จะได้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความเหมาะสม ณ ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดนั้นๆ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ไปจากเดิมหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบได้ก็จะมีค่าที่เหมาะสม ณ ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดใหม่นั้นๆ ดังนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ออกแบบได้จึงสามารถมีได้หลายรูปแบบ

16. เมื่อนำค่าที่ได้จากโปรแกรมไปสร้างและจากการทดสอบจะเห็นได้ว่า หม้อแปลงมีคุณสมบัติเป็นไปตามต้องการ

วิจารณ์ผล

1. เครื่องมือที่มีใช้ยังมีความละเอียดไม่มากพอ อาจจะมีผลทำให้ค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อน
2. ขนาดลวดตัวนำที่คำนวณได้มีขนาดไม่ตรงตามมาตรฐาน (AWG, SWG) แต่ในการออกแบบจำเป็นต้องเลือกลวดตัวนำที่มีขนาดใกล้เคียงตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าบางตัวที่มีพิสัยใกล้เคียงกันมีขนาดเท่ากัน
3. ไม่สามารถนำค่าที่ได้จากโปรแกรมซึ่งเป็นค่าที่ Optimum ที่จุดนั้นมาสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบ เนื่องจากปัญหาเรื่องขนาดของแกนเหล็ก EI ซึ่งการตัดแกนเหล็กรูปตัว E และรูปตัว I ที่มีขายตามท้องตลาดจะเป็นสัดส่วนกันมีขนาดตามมาตรฐาน ในส่วนโปรแกรมจึงต้องทำการปรับค่าและเลือกใช้แกน EI ขนาดมาตรฐานมาใช้ ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าต้นแบบที่สร้างขึ้นมาอาจจะมีขนาดคลาดเคลื่อนไปบ้างแต่ไม่มากนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



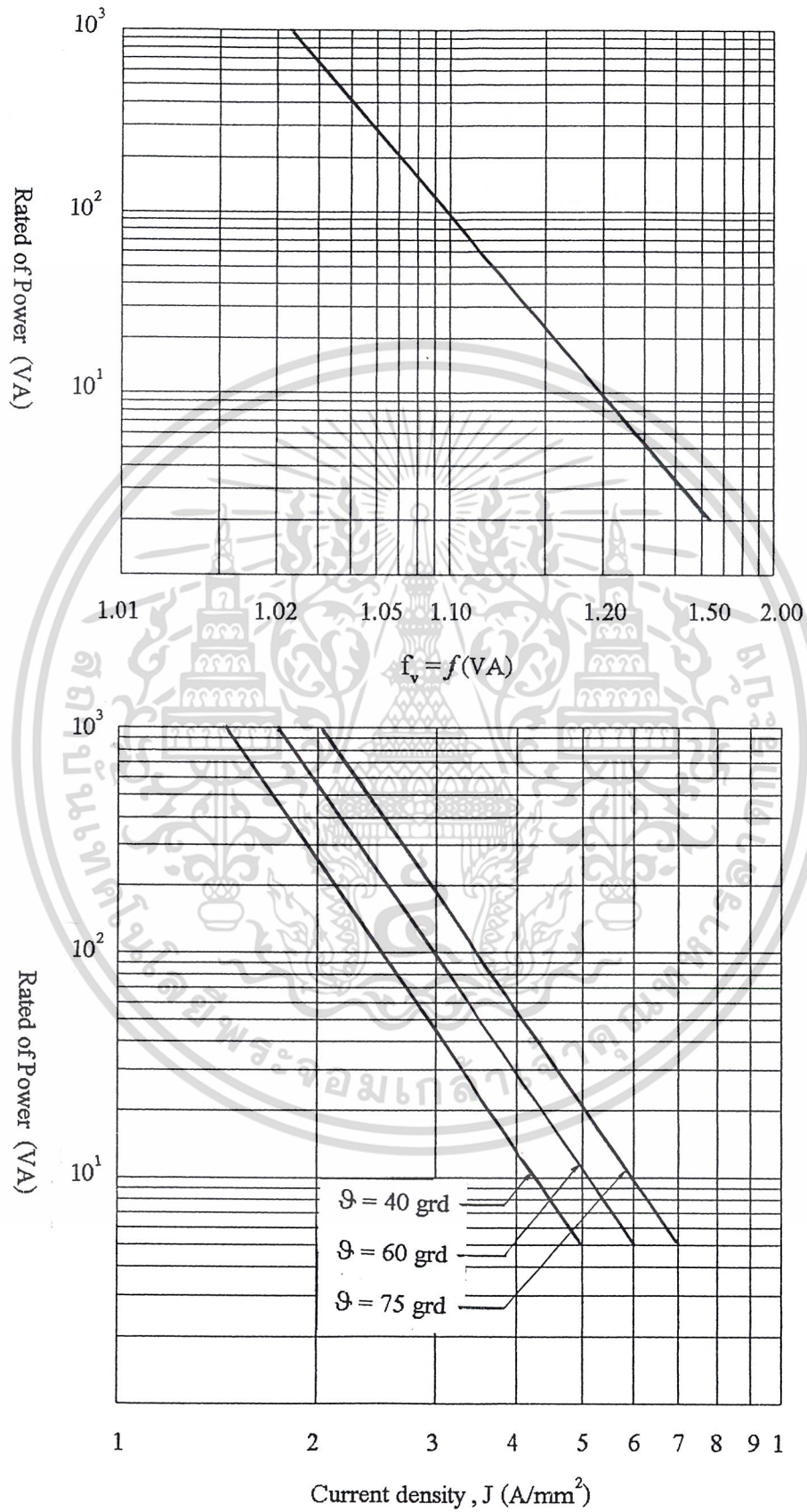
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

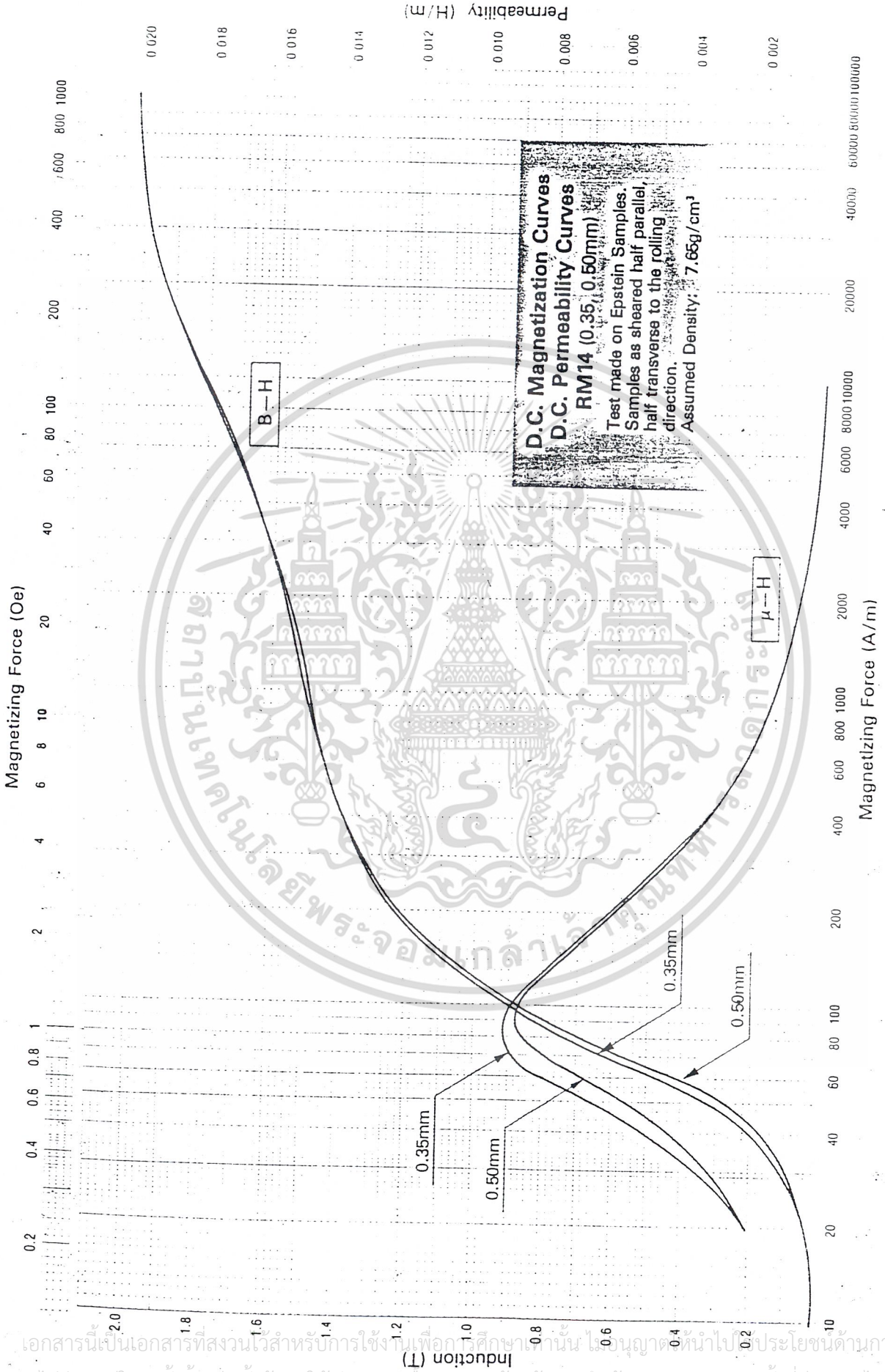
แสดงความสัมพันธ์ของความเสี่ยงและความหนาแน่นกระแสกับพิกัดกำลังไฟฟ้าและ
คุณลักษณะของแกนเหล็ก



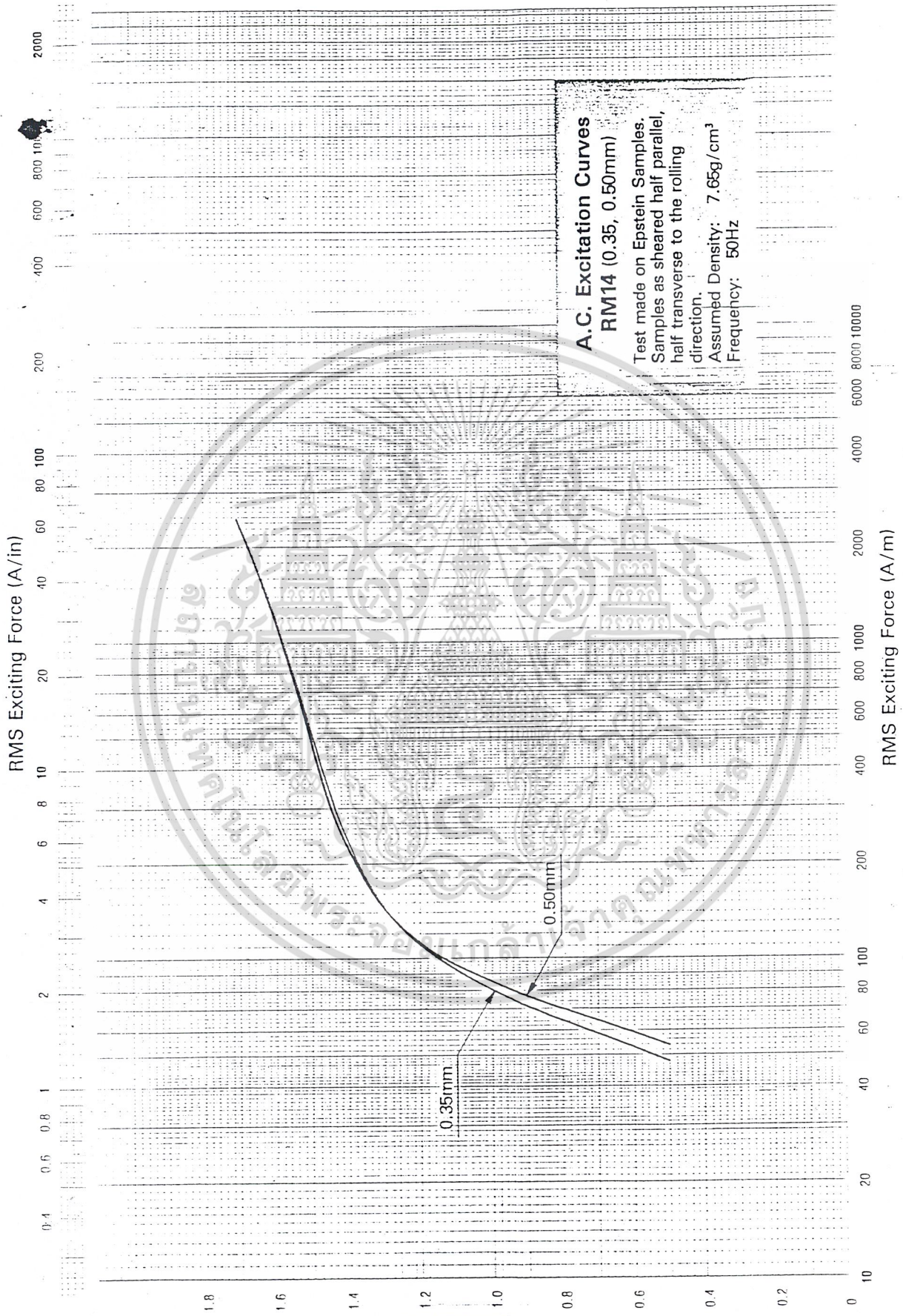
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



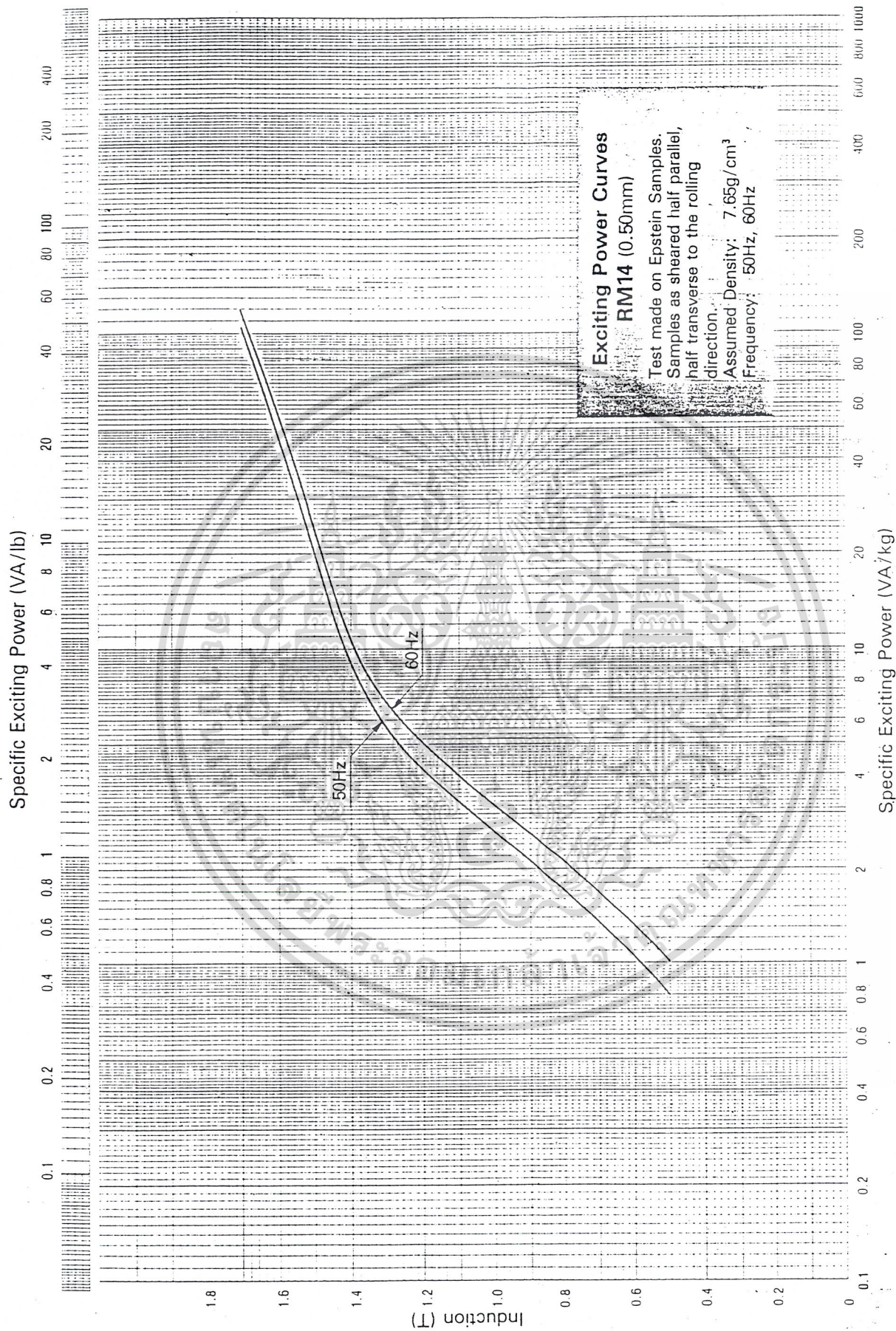
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



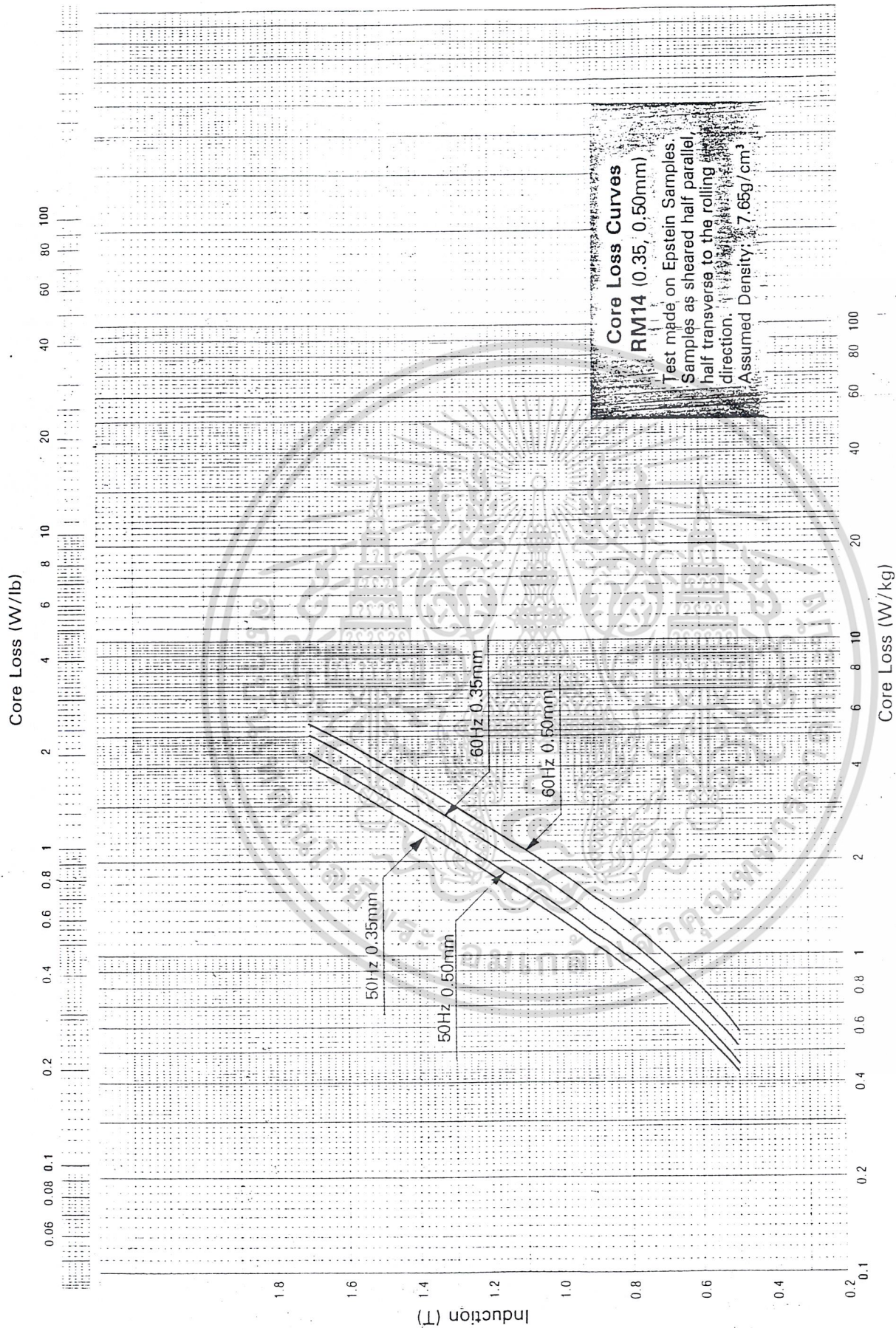
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดทางนโยบายด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

WIRE GAUGES TABLE

ตารางที่ ข-1. S.W.G. Standard

Gauge S.W.G.	Diameter (mm)	Sectional area (mm ²)
7/0	12.700	126.7
6/0	11.786	109.1
5/0	10.973	94.56
4/0	10.160	81.07
3/0	9.440	70.12
2/0	8.839	61.36
0	8.230	53.19
1	7.629	45.60
2	7.010	39.60
3	6.401	32.18
4	5.893	27.27
5	5.385	22.77
6	4.877	18.68
7	4.470	15.70
8	4.064	12.97
9	3.685	10.52
10	3.251	8.302
11	2.946	6.818
12	2.642	5.481
13	2.337	4.289
14	2.032	3.243
15	1.829	2.627
16	1.626	2.075
17	1.422	1.589
18	1.219	1.1670
19	1.016	0.8107
20	0.9144	0.6576

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gauge S.W.G.	Diameter (mm)	Sectional area (mm ²)
21	0.8128	0.5189
22	0.7112	0.3973
23	0.6096	0.2919
24	0.5583	0.2452
25	0.5080	0.2027
26	0.4572	0.1642
27	0.4166	0.1313
28	0.3759	0.1110
29	0.3454	0.09372
30	0.3150	0.07791
31	0.2946	0.06818
32	0.2743	0.05913
33	0.2540	0.05067
34	0.2337	0.04289
35	0.2134	0.03575
36	0.1930	0.02927
37	0.1727	0.02343
38	0.1524	0.01824
39	0.1321	0.01370
40	0.1219	0.01167
41	0.1180	0.009810
42	0.1016	0.008127
43	0.09114	0.006567
44	0.08138	0.005819
45	0.07113	0.003973
46	0.0696	0.002929
47	0.05080	0.002027
48	0.04064	0.001297
49	0.03048	0.0007297
50	0.02540	0.0005067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2. A.W.G. Standard

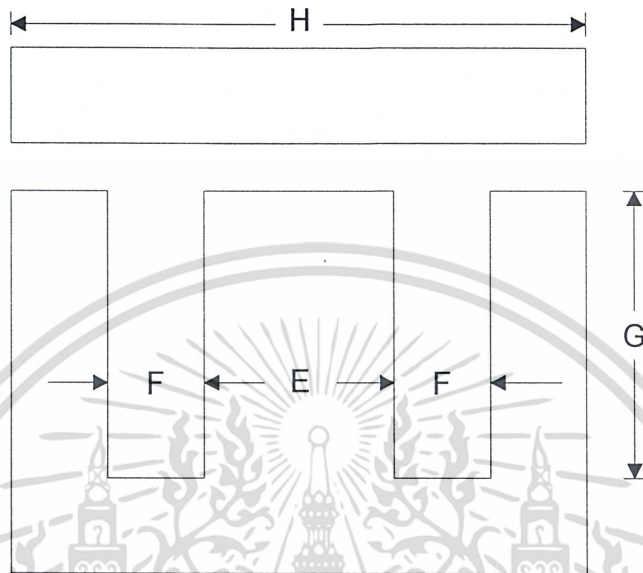
Gauge A.W.G.	Diameter (mm)	Sectional area (mm ²)
4/0	11.684	107.2
3/0	10.404	85.03
2/0	9.266	67.42
0	8.250	53.49
1	7.348	42.41
2	6.544	33.63
3	5.827	26.66
4	5.189	21.15
5	4.621	16.77
6	4.115	13.30
7	3.665	10.55
8	3.264	8.368
9	2.906	6.632
10	2.588	5.262
11	2.305	4.172
12	2.053	3.309
13	1.828	2.624
14	1.628	2.081
15	1.450	1.650
16	1.291	1.309
17	1.150	1.037
18	1.024	0.8226
19	0.9116	0.6529
20	0.8118	0.5174
21	0.7229	0.4105
22	0.6438	0.3256
23	0.5733	0.2581
24	0.5106	0.2047
25	0.4547	0.1623
26	0.4049	0.1288

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gauge A.W.G.	Diameter (mm)	Sectional area (mm ²)
27	0.606	0.1021
28	0.3211	0.08097
29	0.2859	0.06425
30	0.2546	0.05097
31	0.2238	0.04039
32	0.2019	0.03203
33	0.1798	0.02540
34	0.1601	0.02014
35	0.1426	0.01597
36	0.1270	0.01267
37	0.1131	0.01005
38	0.1007	0.007968
39	0.08969	0.006319
40	0.07987	0.005012
41	0.07113	0.003973
42	0.06334	0.003151
43	0.05641	0.002495
44	0.05023	0.001982
45	0.04473	0.001572
46	0.03984	0.001246
47	0.03547	0.0009884
48	0.03159	0.0007838
49	0.02813	0.0006216
50	0.02505	0.0004929

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE OF DIMENSION OF EI - CORE



ตารางที่ ข-3 Dimension of EI - core

EI number	F (mm)	E (mm)	G (mm)	H (mm)
14	3.5	3.5	10	14
16	4	4	10	16
19	4	5	10	19
24	6	6	12	24
28	6	8	17	28
35	7.2	9.6	19.5	35
40	7.45	12.7	20	40
41	8	13	21	41
48	8	16	24	48
54	9	18	27	54
57	9.5	19	28.5	57
60	10	20	30	60
66	11	22	33	66
76.2	12.7	25.4	38.1	76.2
85.8	14.3	28.6	42.9	85.5
95	15	30	47	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EI number	F (mm)	E (mm)	G (mm)	H (mm)
96	16	32	48	96
105	17.5	35	52.5	105
114	19	38	57	114
133.2	22.2	44.4	66.6	133.2
152	25.4	50.8	76.2	152.4
190	31.95	63.75	95.3	190.5
225	38.1	76	114.65	228.6
245	44.5	88.9	134.05	247.5
300	50.75	101.4	152.6	304.8

Stacking factor [13]

Lamination Thickness (mm)	Stacking Factor
0.0127	0.50
0.0254	0.75
0.0508	0.85
0.1-0.25	0.90
0.27-0.36	0.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ทฤษฎี Optimization

ค-1 Status of Constraints

ใน Constrained Optimization มีการกำหนดสถานะของการบังคับการออกแบบจุดซึ่งมีความจำเป็นในการได้เทียบของการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พิจารณาในรูปที่ (ค-1) $g_k(x)$ เป็น inequality constraint แบ่งช่วงการออกแบบเป็นช่วง feasible และช่วง infeasible ดังนั้นสถานะของเงื่อนไขสามารถกำหนดได้ดังนี้

1. Active Constraint

inequality constraint $g_k(x) \leq 0$ สามารถเป็นเงื่อนไข active ของการออกแบบที่จุด $x^{(q)}$ ถ้าแทนค่าแล้วเป็น equality ที่จุดนั้น เช่น $g_k(x^{(q)}) = 0$

2. Inactive Constraint

inequality constraint $g_k(x) \leq 0$ สามารถเป็นเงื่อนไข inactive ของการออกแบบที่จุด $x^{(q)}$ ถ้าแทนค่าแล้วเป็นลบที่จุดนั้น เช่น $g_k(x^{(q)}) < 0$

3. Violated Constraint

inequality constraint $g_k(x^{(q)}) \leq 0$ สามารถเป็นเงื่อนไข violated ของการออกแบบที่จุด $x^{(q)}$ ถ้าแทนค่าแล้วเป็นบวกที่จุดนั้น $g_k(x^{(q)}) > 0$ equality constraint $h_j(x) = 0$ เป็น Violated ของการออกแบบที่จุด $x^{(q)}$ ถ้าแทนค่าแล้วมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ $h_j(x^{(q)}) \neq 0$

4. ϵ -Active constraint

inequality constraint $g_k(x) \leq 0$ สามารถเป็นเงื่อนไข ϵ -active ที่จุด $x^{(q)}$ ถ้า $g_k(x^{(q)}) < 0$ แต่ $g_k(x^{(q)}) + \epsilon \geq 0$ เมื่อ $\epsilon \geq 0$ เป็นค่าน้อย ๆ

การอธิบายถึงสถานะของ constraint พิจารณา k^{th} inequality constraint $g_k(x) \leq 0$ ในรูปที่ (ค-1) ด้าน feasible และ infusible ของ constraint จะเหมือนกันขอบเขต $g_k(x) + \epsilon = 0$ ซึ่งอยู่ภายในช่วง feasible พิจารณาการออกแบบจุด a , constraint $g_k(x)$ มีค่า เป็นลบ และ $g_k(x) + \epsilon < 0$ เสมอ ดังนั้น constraint จะเป็นแบบ inactive สำหรับการออกแบบที่จุด a เมื่อออกแบบจุด b , $g_k(x)$ มีค่าน้อยกว่าศูนย์ซึ่งเป็น inactive เช่นเดียวกันแต่อย่างไร $g_k(x) + \epsilon > 0$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น constraint เป็น active จากการออกแบบจุด b สำหรับการออกแบบจุด c , $g_k(x) = 0$
 เพราะฉะนั้น constraint เป็นแบบ active สำหรับการออกแบบที่จุด d , $g_k(x)$ มีค่ามากกว่าศูนย์
 ดังนั้น constraint เป็นแบบ violated



รูป ก-1 constraint status at design point a, b, c and d

ก-2 The Necessary Condition for Constrained Optimization

(เงื่อนไขที่จำเป็นของ Constrained Optimization)

จากรูปที่ (ก-2) สมมติว่าที่จุด a เป็น constraint active ซึ่งทำให้คิดขึ้น โดยการหาทิศทางของ vector $|d|$ จะทำให้ Objective function ลดลงและไม่ทำให้ active constraint มีค่าเป็น violate ผลคูณแบบ scalar ของ direction vector $|d|$ ที่เป็น usable sector กับ Gradient ของ Objective function $\nabla F(x)$ จะน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ เมื่อเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ usable เขียนให้อยู่ในรูปคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

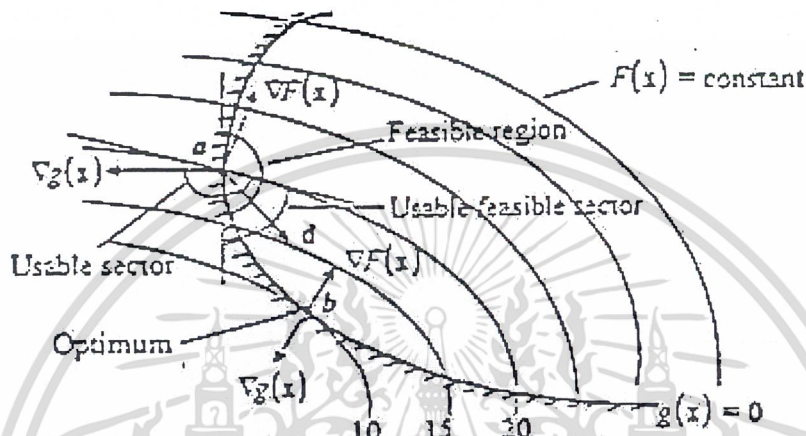
$$\text{Usable direction} \quad d^T \nabla F(x) \leq 0 \quad (\text{ก-1})$$

แต่อย่างไรผลคูณของ vector $|d|$ กับ gradient ของ constraint ∇g_k จะต้องเป็นลบหรือเท่ากับศูนย์ ในทางปฏิบัติของปัญหา Optimization ซึ่งมี active constraint มากในการออกแบบต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เป็นไปได้ (Feasible direction)

$$\text{Feasible direction} \quad d^T \nabla g_k(x) \leq 0 \quad (\text{ก-2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดที่น่าสนใจคือ การเคลื่อนที่ควรเป็นไปในระยะสั้นๆ ของทิศทางซึ่งสัมพันธ์กับ hyper plane ซึ่งเป็นขอบเขตของช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ให้ constraint violate แต่ก็ช่วยลด Objective function อย่างรวดเร็วทีเดียว



รูป ก-2 Usable and feasible search direction

ให้จุด b เป็นจุดที่ Optimization จากการออกแบบเพื่อใช้ในการอธิบาย รูปที่ (ก-2) แสดงถึง gradient ของ object และ gradient ของ constraint ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับ vector $|S|$ จะมีความปลอดภัยในการ usability และ feasibility โดยเป็นเส้นสัมผัสกับขอบเขตของค่า constraint และเส้นตั้งของ Objective function ที่มีมุม 90 องศา กับ gradient จากที่เขียนมาดังกล่าว สามารถเขียนในรูปคณิตศาสตร์ได้

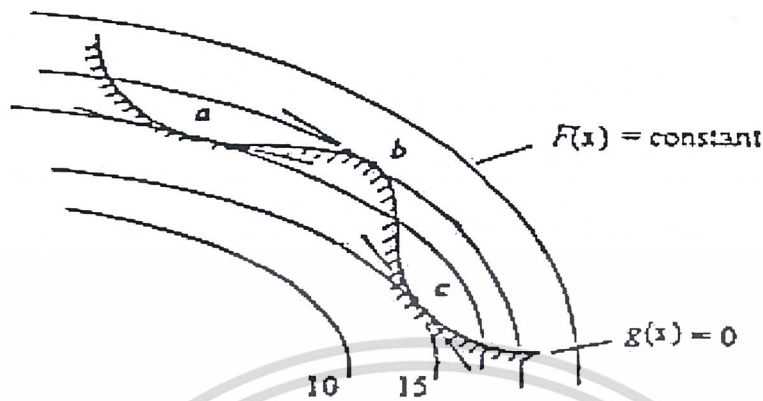
$$\nabla F(x) + \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla g_k(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_{1+j} \nabla h_j(x) = 0 \quad (\text{ก-3})$$

$$\lambda_k \geq 0 ; \lambda_{1+j} \quad \text{unrestricted in sign}$$

เมื่อ λ เป็น Lagrange multiplier

จากสมการ (ก-3) ได้กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบ Optimization แต่ก็ยังไม่เพียงพอซึ่งสามารถเห็นได้จากรูปที่ (3-4) จุด a, b และ c ทุกจุดได้จากสมการที่ (3-8) แต่มีจุด c ที่เป็น true global optimum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก 3 Relative optimum of constrained function

เงื่อนไขของ Kuhn - Tucker

ถ้าให้ vector X^* ถูกกำหนดมาในการออกแบบ optimization แต่ต้องมีเงื่อนไข 3 ข้อ ดังนี้

1) x^* เป็นสิ่งที่เป็นไปได้ (feasible) (ก-4)

ถ้าต้องการที่จะออกแบบให้ optimization ที่พอใจทุกๆ constraint

2) $\lambda_k g_k(x^*) = 0 ; k = 1, \dots, l \quad \lambda_k \geq 0$ (ก-5)

ถ้า constraint $g_k(x)$ ที่ได้มา ยังไม่ถูกต้องทั้งหมดเช่น $g_k(x) < 0$ โดยใช้ตัวคูณ Lagrange ที่มากกว่าศูนย์

3) $\nabla F(x^*) + \sum_{k=1}^l \lambda_k \nabla g_k(x^*) + \sum_{j=1}^m \lambda_{1+j} \nabla h_j(x^*) = 0$ (ก-6)

$\lambda_k \geq 0 ; \lambda_{1+j}$ unrestricted in sign เป็นเงื่อนไขเหมือนกับใช้ในสมการที่ (ก-3)

เงื่อนไขของ **Kuhn - Tucker** สามารถให้เห็นโดยเทียบกับรูปที่ (ค-4) ซึ่งแสดงถึง ปัญหา minimization 2 ตัวแปรด้วย inequality constraints ณ จุด optimum x^* ซึ่งเป็นไปได้ constraint

$g(x^*)$ ไม่เป็นจุดวิกฤตจากสมการ (ค-5) จะได้ $\lambda_3 = 0$ เป็นเงื่อนไขที่สำคัญของการให้ gradient ของ constraint ที่วิกฤต $g_1(x^*)$ และ $g_2(x^*)$ ซึ่งคูณโดย Lagrange multiplier แล้วผลรวมของ vector นั้นจะเท่ากับค่าลบของ gradient ของ objective function จากรูปที่ (ค-4) จะได้

$$\nabla F(x^*) + \lambda_1 \nabla g_1(x^*) + \lambda_2 \nabla g_2(x^*) = 0 \quad (\text{ค-7})$$

$$\lambda_1 \geq 0 ; \lambda_2 \geq 0$$

เริ่มต้น $g_1(x^*) = 0$ และ $g_2(x^*) = 0$ เงื่อนไขที่สองถูกต้องสำหรับ ดังนั้นก็ได้ว่าเงื่อนไขของ **Kuhn - Tucker** จะถูกต้อง

ค-3 Global และ Local Minimum

ในทางปฏิบัติปัญหา optimization ซึ่งสุดท้ายก็ต้องหาค่า minimum ของ Objective function ซึ่งอยู่ในช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) โดยการหา optimum ในฟังก์ชันทั่วไปหาจำนวนที่แสดงของ จุด optimum ถ้าจุดดังกล่าวของ Objective function เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นในเส้นทางของทุกทิศทาง หรือเป็นอยู่ในทางทิศทาง แต่เพิ่มขึ้นในทุกส่วนซึ่งเรียกว่า local minimum แต่จะมีอยู่จุดหนึ่งที่ฟังก์ชันมีค่าต่ำสุด เรียกว่า global minimum ซึ่งจะอธิบายให้เข้าใจยิ่งกว่านี้

1) Global Minimum

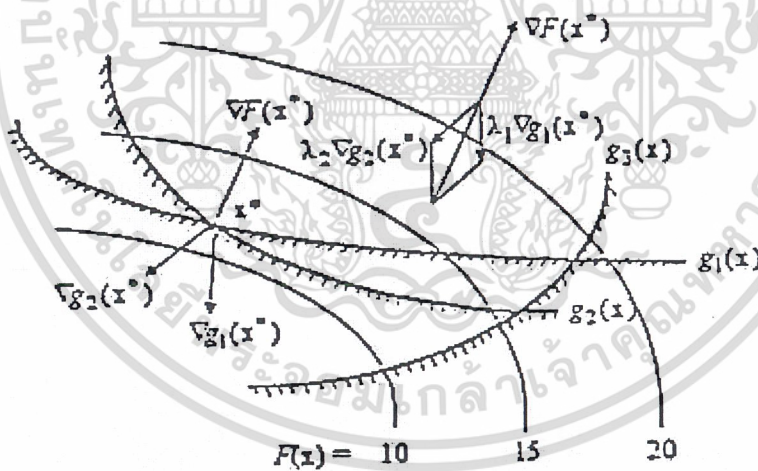
$F(x)$ เป็นฟังก์ชันที่มี n ตัวแปร มี global minimum คือ x^* if $F(x^*) \leq F(x)$ ทุกค่าของ x ในช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) ถ้า strict inequality ทุก x นั้น ๆ แล้ว x^* จะเป็น x^* ที่เรียกว่า strict global minimum

2) Local Minimum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

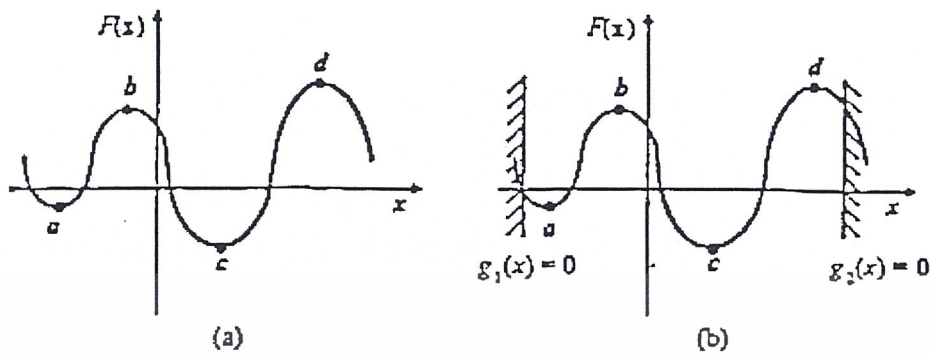
$F(x)$ เป็นฟังก์ชันที่มี n ตัวแปร มี local minimum คือ x^* ถ้า $F(x^*) \leq F(x)$ ทุกค่าของ x ที่อยู่ภายใน a small neighborhood N of x^* ในช่วงที่เป็นไปได้ (Feasible region) ถ้า strict inequality คือว่า x^* นั้นเรียกว่า strict local minimum. Neighborhood N ของจุด x^* ที่กำหนดจาก set ของจุด $N = \{x \in \mathcal{E} \mid \|x - x^*\| < \delta\}$ และมีค่าน้อย $\delta > 0$ จะได้ว่าในช่วงเล็กๆ ที่เป็นไปได้ small feasible region ที่อยู่ของจุด x^*

รูปที่ ค-5 (a) a และ c เป็น local minimum เริ่มเป็นฟังก์ชันที่มีค่าน้อยที่สุดซึ่งเกิดใน neighborhood จุด b และ d เป็นจุด local maximum ของ function ซึ่งใน case นี้จะไม่มี global minimum or maximum ของ function เพราะ domain และ function $F(x)$ ไม่มีขอบเขต x และ $F(x)$ จะมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ และ $+\infty$ ถ้า domain มีการ strict constrain (restricted) ที่แสดงโดยรูปที่ ค-5 (b) จะได้จุด c เป็น global minimum และจุด d เป็น global maximum ของ function



รูป ค-4 Geometric interpretation of the Kuhn - Tucker condition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ค-5 Graphical representation of optimum point

ค-4 Convergence Criteria (การลู่เข้าสู่จุดวิกฤต)

เส้นทางวิกฤตของ optimization สามารถหาได้เมื่อ หยุดกระบวนการค้นหา optimum การสิ้นสุดของจุดวิกฤต เราสามารถเลือกจาก ปฏิกริยาที่สำคัญของประสิทธิภาพและความแน่นอนของกระบวนการ ptimization ซึ่งการลู่เส้นทางวิกฤตหาได้จาก

1) Maximum number of iteration (จำนวนสูงสุดของกระบวนการซ้ำ)

ถ้าจำนวนของกระบวนการซ้ำ q มีค่ามาก จำนวน q_{\max} นั้นแล้วกระบวนการค้นหา จะจบลง

ถ้ากระบวนการซ้ำเพราะ numerical หรือ algorithmic ยากหรือง่ายอันเนื่อง มาจาก โปรแกรมผิดพลาด ทำให้โปรแกรมนี้ไม่ต่อเนื่องถึง iterate indefinitely

2) การเปลี่ยนแปลง Objective function ซึ่งมี 2 วิธี ถ้าหากกระบวนการนั้นซ้ำมากจน ไม่มีทางจะหาค่าลู่เข้าได้

1. เป็นการเปรียบเทียบ ค่าสัมบูรณ์ของ $F(x)$ มีผลต่อกระบวนการทำซ้ำ การลู่เข้า นั้นได้แสดง ดังนี้

$$|F(x^{(q+1)}) - F(x^{(q)})| \leq \epsilon_A \quad (\text{ค-8})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่

เมื่อ ε_A เป็น specified tolerance (ค่าผิดพลาด) ซึ่งเป็นค่าคงที่ หรือเป็นค่าคง

ของ objective function ที่ค่า $x^{(0)}$ จากตัวอย่าง set $\varepsilon_A = 0.001|F(x^{(0)})|$

2. การตรวจความสัมพัทธ์ของการเปลี่ยนในระหว่างการเป็นไปได้ของกระบวนการซ้ำในการลู่อเข้าที่เป็นไปได้คือ

$$\frac{2|F(x^{(q+1)}) - F(x^{(q)})|}{|F(x^{(q+1)})| + |F(x^{(q)})| + 10^{-10}} \leq \varepsilon_R \quad (\text{ก-9})$$

เมื่อ ε_R เป็นค่า specified fractional change

3) เงื่อนไขของ Kuhn - Tucker

จาก constrained minimization เงื่อนไขถูกกำหนดโดยอยู่ในส่วน ค-2 ใน case ของ unconstrained minimization ในการต้องการ gradient ของ $F(x)$ ซึ่งตรวจได้จากส่วนของ $\nabla F(x^{(q)})$ ที่มีขนาดเล็กเพียงพอกับศูนย์คือ $\varepsilon_K = 1.00E - 04$

ค-5 Gradient Evaluations

Gradient Evaluations เป็นหัวข้อสำคัญในการขบวนการปฏิบัติของ numerical optimization ของการประมาณค่าของ derivative จาก a simple function ที่ทำได้โดยการวิเคราะห์ (Calculate analytically) และสามารถหาได้โดยใช้ gradient หรือ Hessian Evaluation โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical method) อย่างไรก็ตามบางฟังก์ชันนั้นมีความยากในการวิเคราะห์หรือความ

ลำบากมากในการคำนวณ เพื่อความสะดวกในการหาคำตอบจะใช้วิธี finite difference ในการหาคำตอบโดยประมาณของ derivative ปัญหาส่วนใหญ่ในการปฏิบัติในทางวิศวกรรมส่วนมากจะเป็น implicit model for function evaluation จากตัวอย่างของฟังก์ชัน อาจจะได้มาจากการหาคำตอบ

ทางการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ของแบบจำลองระบบ electromagnetic โดยวิธี finite element

Finite Difference Approximations

คำตอบจากการวิเคราะห์ที่ใช้ใน optimization เสมอ ๆ นั้นมาจากอนุกรม Taylor ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวมีความสำคัญเพราะเป็นการแสดงลักษณะ derivative ที่จุดจุดหนึ่งของฟังก์ชันจากการประมาณค่าของฟังก์ชันสามารถคำนวณทุกจุดที่อยู่กึ่งกลางของจุดขอบเขตได้ ในรูปที่ (ก-6) เป็นฟังก์ชัน 1 ตัวแปรอย่างง่าย ๆ ซึ่งใช้อนุกรมของ Taylor ที่รอบจุด x_0 เขียนอธิบายได้ดังนี้

$$F(x_0 + h) = F(x_0) + hF'(x_0) + (1/2)h^2 F''(x_0) + \dots + (1/(r-1)!)h^{(r-1)} F^{(r-1)}(x_0) + o(h^r) \quad (\text{ก-10})$$

สมมติให้ $F^{(r)}(x_0)$ อยู่ในช่วง $[x_0, x_0 + h]$

ในการคำนวณเพื่อนำมาใช้ เราสนใจใน 3 เทอมแรกของสมการเท่านั้น

$$F(x_0 + h) = F(x_0) + hF'(x_0) + (1/2)h^2 F''(x_0) + o(h^3) \quad (\text{ก-11})$$

การหาคำตอบของ $F'(x_0)$ และไม่คิดถึงเทอมอันดับสูงกว่า เราได้

$$F'(x_0) = \frac{F(x_0 + h) - F(x_0)}{h} + o(h) \quad (\text{ก-12})$$

ซึ่งเทอมอันดับคือ $(1/2)hF''(\xi)$; $x_0 \leq \xi \leq x_0 + h$ เป็นการประมาณค่าของ derivatives ซึ่งเป็นแบบ forward และค่า $(1/2)hF''(\xi)$ เป็นเทอมที่จะละได้ของสมการ Taylor ถ้าสมมติให้สมการเป็น backward ที่จุด $x_0 - h$ นั้นเราจะได้

$$F(x_0 - h) = F(x_0) - hF'(x_0) + (1/2)h^2 F''(x_0) - o(h^3) \quad (\text{ก-13})$$

การกระจายสมการนี้เป็นการประมาณค่าแบบ *backward difference*

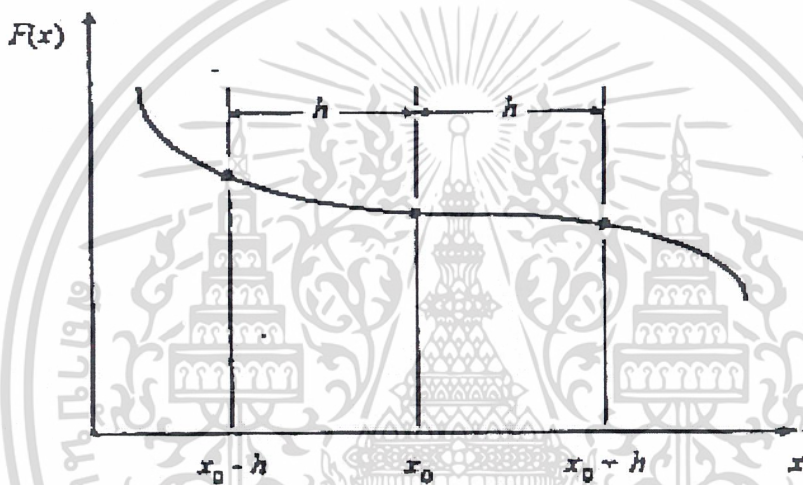
$$F'(x_0) = \frac{F(x_0) - F(x_0 - h)}{h} + o(h) \quad (\text{ก-14})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการ (ค-13) ลบกับสมการ (ค-14) จัดสมการใหม่เพื่อหา $F'(x_0)$ เราจะได้

$$F'(x_0) = \frac{F(x_0 + h) - F(x_0 - h)}{2h} + o(h^2) \quad (\text{ค-15})$$

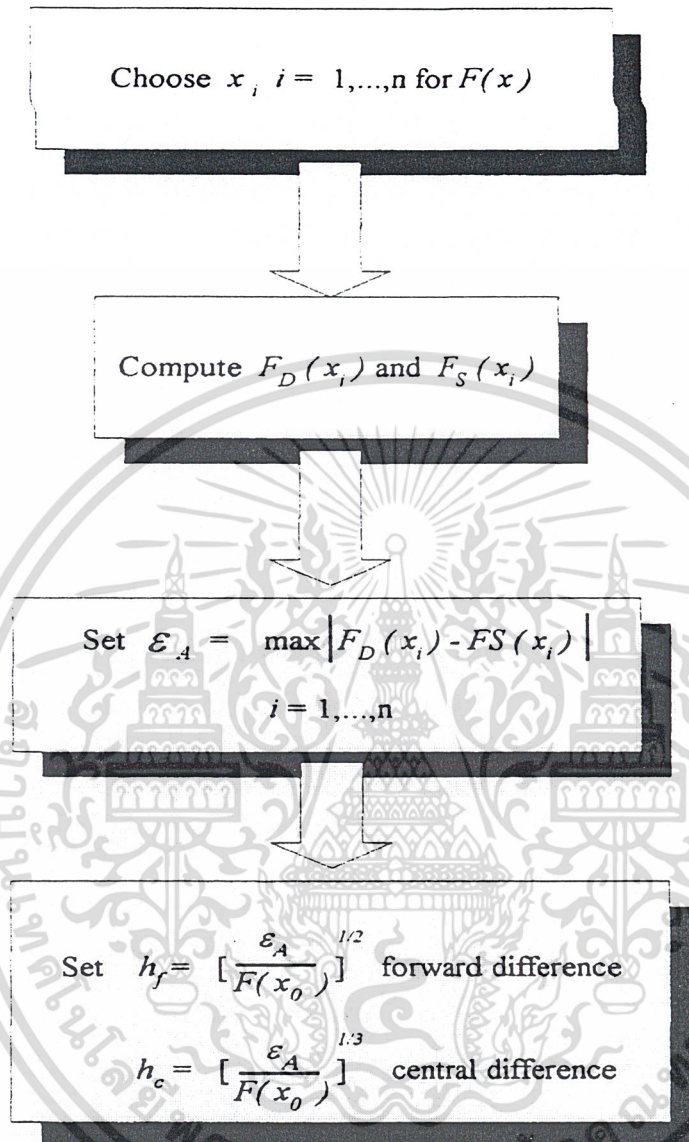
ที่ซึ่งเทอมหลังเป็น $(1/6 h^2 F'''(\xi))$ นี้จึงเรียกว่า การประมาณแบบ central difference



รูป ค-6 Finite difference intervals

ในการคำนวณด้วย finite difference มีความผิดพลาดอื่นๆ ที่อยู่ในการคำนวณหาค่าของฟังก์ชันของตัวเลข ความผิดนี้ปกติเรียกว่า เงื่อนไขหรือการยกเลิกข้อผิดพลาดซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยตรงกับ $1/h$ โดยที่ค่าผิดพลาดทั้งหมดนั้นเราจะประมาณให้อยู่ในรูปของ 2 เทอมเท่านั้น คือค่าจริง

(truncation) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ h และการยกเลิกค่าผิดพลาด (cancellation) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $1/h$ การคำนวณหาค่า h โดยใช้โพธิ์เคอร์ตามรูป (ค-7)



รูป-ค-7 อัลกอริทึมของการคำนวณหาค่า

การแนะนำความถูกต้องของการประมาณ finite difference โดยการทดสอบฟังก์ชันสองสมการ โดยใช้การคำนวณวิเคราะห์และการประมาณค่าแบบ finite difference (GRAD-FD code) ฟังก์ชันแรก เรียกว่า Rosenbrock 's function และฟังก์ชันที่สองได้โดยการใช้ quadratic ซึ่งข้อมูลอยู่ส่วนที่ 3.4.2 และ 3.5.3 ทุกฟังก์ชันที่ใช้ทดสอบจะมีการกำหนดค่าของ x เป็น 3 ค่า ตารางที่ (ค-1) และ (ค-2) แสดงผลลัพธ์ของ first derivative ของทั้งสองฟังก์ชัน ค่าผิดพลาดของผลลัพธ์ โดยการใช้ forward derivative และ central derivative เหมาะสำหรับการนำมาใช้งานทีเดียว อย่างไรก็ตาม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไรต์ตามค่าความผิดพลาดอาจแตกต่างกัน เพราะว่าฟังก์ชันต่างกันและอาจมีค่าแตกต่างกันมาก
 เพราะเป็นฟังก์ชันแบบ non-linear

ตารางที่ ค-1 First derivative of $F(x) = 100(x_2 - x_1^2) + (1 - x_1)^2$

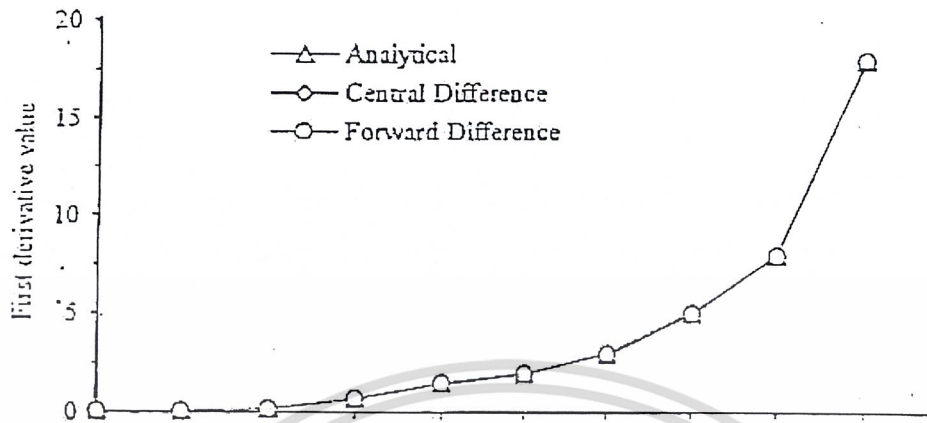
Test		I	II	III
Design	x_1	0.0005	0.5000	5.0000
Variables	x_2	0.0005	0.5000	5.0000
	$F(x)$	0.9990	6.5000	40016.00
$\frac{\partial F(x)}{\partial x_1}$	Analytical	-1.9991	-51.0000	40008.00
	Central	-1.9991	-50.9988	40008.01
	Forward	-1.9990	-50.9938	40009.71
$\frac{\partial F(x)}{\partial x_2}$	Analytical	0.0999	50.0000	-4000.00
	Central	0.0999	50.0000	-4000.00
	Forward	0.1121	50.0122	-3999.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

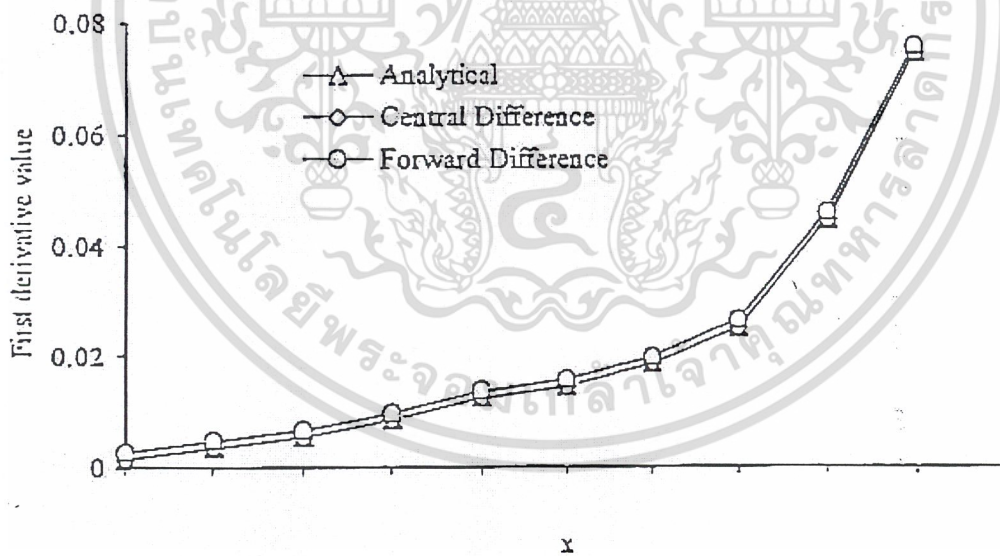
ตาราง ก-2 First derivative of $2x_1^2 + 2x_2^2 + x_3^2 + 2x_1x_2 - x_1x_3 - 0.8x_2x_3$

Test		I	II	III
Design	x_1	0.0005	-0.5000	5.0000
Variables	x_2	0.0005	0.5000	5.0000
	x_3	0.0005	-5.0000	5.0000
	$F(x)$	1.3000E-06	7000.00	1.3000E06
$\partial F(x)/\partial x_1$	Analytical	25000E-03	-50.0000	2500.0000
	Central	25000E-03	-50.9988	2500.0000
	Forward	3.7529E-03	-49.9987	2500.0013
$\partial F(x)/\partial x_2$	Analytical	2.6000E-03	140.0000	2600.0000
	Central	2.6000E-03	140.0000	2600.0000
	Forward	3.8529E-03	140.0013	2600.0012
$\partial F(x)/\partial x_3$	Analytical	1.0000E-04	-90.0000	100.0000
	Central	1.0000E-04	-90.0000	100.0000
	Forward	7.2647E-04	-89.9994	100.0006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ค-8 ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าแบบ finite difference ของ $\partial F(x)/\partial x_1$ ในตารางที่ ค-2 เมื่อ $\partial F(x)/\partial x_1$ มีค่ามาก



รูป ค-9 ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าแบบ finite difference ของ $\partial F(x)/\partial x_1$ ในตารางที่ ค-2 เมื่อ $\partial F(x)/\partial x_1$ มีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

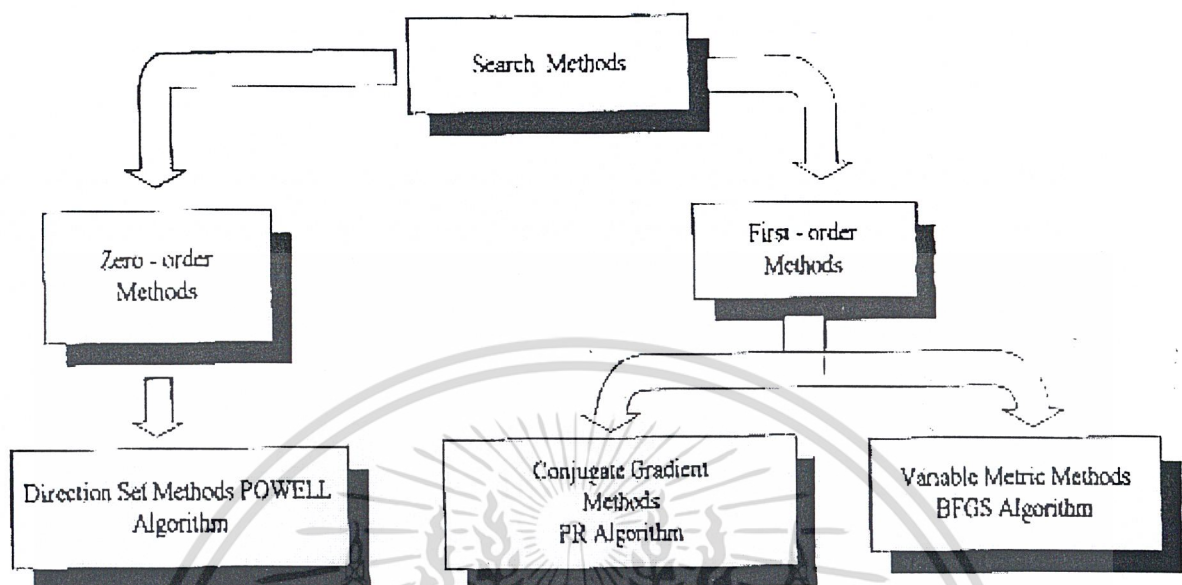
ค-6 การ Optimization โดยใช้วิธี Unconstrained Numerical

การ Optimization โดยใช้วิธี Unconstrained Numerical เป็นการใช้พื้นฐานของสูตรการวนซ้ำที่ใช้ในสมการ (3-5) จากบทที่ 3 อัลกอริทึมของการ Optimization ส่วนมากจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือการหาทิศทาง (search direction) และการกำหนดขนาดที่ขยับ (step size determination) สำหรับปัญหาของการ Optimization ด้วยตัวแปรหลายตัวก็คือปัญหาในการหาทิศทางที่ใช้ในการแก้ปัญหาเป็นอันดับแรก หลังจากนั้นจึงกำหนดขนาดที่จะกระโดด โดยการหาฟังก์ชันที่น้อยที่สุดตามทิศทางที่กำหนดในพื้นที่ที่ออกแบบซึ่งเรียกว่าการหาในหนึ่งมิติ (one dimensional search)

ในการเลือกทฤษฎีที่ใช้ในการ Optimization อยู่บนพื้นฐานของคุณสมบัติของฟังก์ชันที่สนใจ (objective function) และฟังก์ชันเงื่อนไข (constraint function) ยิ่งไปกว่านั้นทฤษฎีจะเปลี่ยนไปขึ้นกับวิธีการใช้ในการแก้ปัญหา เช่น อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) ซึ่งการใช้อนุพันธ์มีประสิทธิภาพมากกว่าการหาค่าโดยใช้ฟังก์ชันทั่วไป ถ้าหากการใช้อนุพันธ์ไม่สามารถนำมาใช้ได้ ทฤษฎีที่ไม่ใช่อนุพันธ์ (non-derivative) จะต้องถูกนำมาใช้ แต่ควรจะตระหนักถึงกระบวนการที่ยุ่งยากจะเพิ่มขึ้นและ ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ลดลงจากการที่ไม่ได้ใช้วิธีการอนุพันธ์

ค-6.1 การกำหนดวิธีหาทิศทาง และ ขนาดของการขยับ (Step)

การหาทิศทางสามารถจะหาโดยใช้อนุพันธ์หรือไม่ใช้อนุพันธ์ก็ได้ดังแสดงในรูป (ค-10) ซึ่งการใช้อนุพันธ์สามารถแบ่งได้เป็นอีก 2 วิธีที่วันนี้ต้องการวิธีหาค่าน้อยที่สุดในหนึ่งมิติ (one - dimensional minimization subproblem) วิธีแรกนี้เรียกว่า conjugate gradient methods ซึ่งมีแบบอย่างมาจาก อัลกอริทึม “Fletcher – Reeves” และอัลกอริทึม “Polak – ribiere” วิธีที่สองเรียกว่า variable metric หรือ quasi Newton method ซึ่งมีแบบอย่างมาจากอัลกอริทึม “Davidon - Fletcher - Powell (DFP) และ Broyden – Fletcher – Goldfarb – Shanno (BFGS)”



รูป ค-10 Classification of search methods

ค-6.1.1 ทฤษฎีการจัดทิศทาง (Direction Set Methods)

ทฤษฎีนี้เริ่มต้นด้วยการกำหนดเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) e_1, e_2, \dots, e_n ซึ่งเป็นเวกเตอร์ทิศทาง การใช้ทฤษฎี Golden Section Search จะเคลื่อนที่ไปตามเวกเตอร์ทิศทางแรกที่กำหนดไปสู่ค่าที่น้อยที่สุดของทิศทางนั้น หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่สอง เพื่อไปสู่ค่าที่น้อยที่สุดของทิศทางที่สองนั้น และจะเป็นลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ ขบวนการที่จะวนไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าของฟังก์ชันไม่สามารถลดค่าลงได้อีก ซึ่งเทคนิคนี้จะเห็นว่าจำเป็นต้องกำหนดทิศทางเริ่มต้นให้ดี Powell ค้นพบทฤษฎีในการจัดทิศทาง ซึ่งเป็นพื้นฐานของ conjugate direction โดยที่ทิศทาง d^i และ d^j เป็น conjugate กัน ถ้า

$$(d^i)^T S d^j = 0 \tag{ค-16}$$

ซึ่ง S เป็นเมตริกซ์เอกลัทกษณ์ที่เริ่มต้นและ d โดย $i = 1, \dots, n$ ที่เป็นทิศทางร่วม (co-ordinate direction)

ค-6.1.2 ทฤษฎี Conjugate Gradient Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎี Conjugate Gradient Method พัฒนาจากทฤษฎี steepest descent ซึ่ง 2 ส่วนที่สำคัญที่สุดของ conjugate gradient คือ ทฤษฎี Fletcher - Reeves และทฤษฎี Polak – Ribiere ทฤษฎีการหาทิศทางนั้นสิ่งที่จำเป็นจะต้องถูกจัดเก็บไว้จากการ minimization ในหนึ่งมิติและต้องการฟังก์ชันที่ใช้ในการหาจำนวนมาก การใช้ gradient จะช่วยให้ข้อมูลใหม่ๆ ที่มีประโยชน์สำหรับการกำหนดการจดหาทิศทางและขนาด การขยับในกระบวนการทำซ้ำ

$$d^{(q)} = -\nabla F(x^{(q)}) + \beta_q d^{(q-1)} \quad (ก-17)$$

$$\beta_q = \frac{|\nabla F(x^{(q)})|^2}{|\nabla F(x^{(q-1)})|^2} \quad (ก-18)$$

ก-6.1.3 ทฤษฎี Variable Metric Methods

ทฤษฎี variable metric methods บางทีอาจจะเรียกว่า quasi-newton method โดยไม่แตกต่างไปจาก conjugate gradient แทนที่ข้อมูลจะอยู่ในรูป single scalar ข้อมูลจะถูกเก็บในรูปแบบ array n มิติ การหาทิศทางที่ลำดับ q ของการวนซ้ำ จะได้เป็น

$$C^{(q)} = \nabla F(x^{(q)}) \quad (ก-19)$$

$$H^{(q)} d^{(q)} = -C^{(q)} \quad (ก-20)$$

ซึ่ง H คือการประมาณสำหรับ Hessian เมตริกซ์ของฟังก์ชันที่เราสนใจระหว่างขบวนการ optimization ซึ่งสามารถสร้างได้จากการใช้ข้อมูลอันดับหนึ่งเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีเหล่านี้จะมีลักษณะการลู่เข้าเหมือนกับ second order ที่จุดเริ่มต้นเมตริกซ์ H จะถูกกำหนดเป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ $H=I$ หลังจากนั้นในการวนซ้ำที่ q ค่า H ใหม่จะได้เป็น

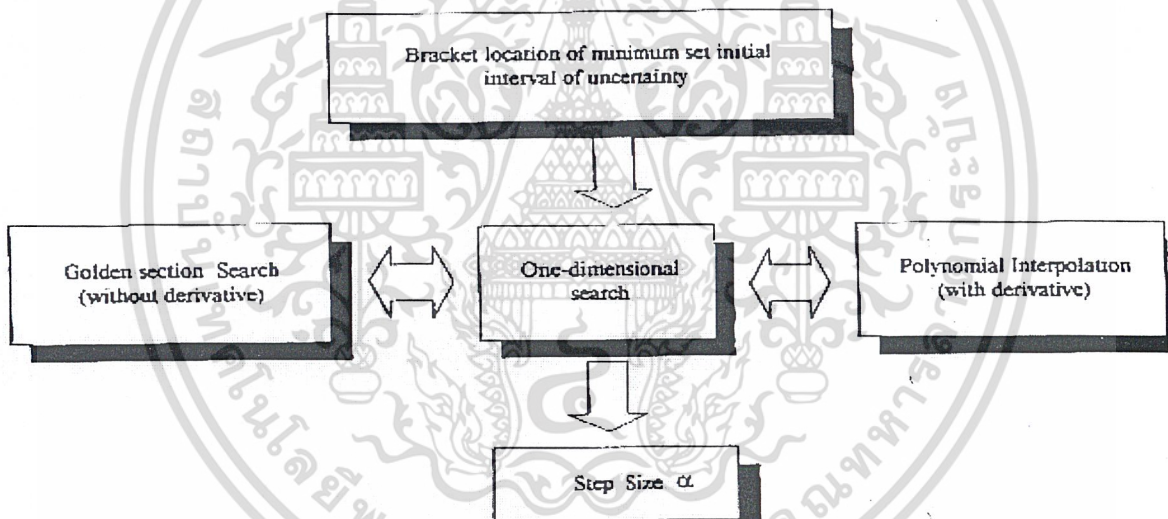
$$H^{(q+1)} = H^{(q)} + D^{(q)} + E^{(q)} \quad (ก-21)$$

ซึ่ง D และ E เป็นเมตริกซ์ symmetric correction มี 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการเปลี่ยนเมตริกซ์ คือ Davidon – Fletcher – Powell (DFP code) และ Broyden – Fletcher – Goldfarb – Shanno ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีทั้งสองแตกต่างกันในรายละเอียดเท่านั้น เช่น ค่า round-off error และ convergence tolerances

ขบวนการเบื้องต้นของการหาขนาดการกระโดด (step size) โดยอาศัยอัลกอริทึม (algorithms) ในรูปที่ (ค-11) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นแรกจะแบ่งขอบเขตของเส้นทางเริ่มต้นในการหาจุดต่ำสุด ส่วนในขั้นตอนที่สอง ในเส้นทางที่กำหนดจะถูกปรับโดยการตัดพื้นที่ในส่วนที่ไม่ได้ให้ค่าต่ำสุดออก ในที่สุดก็จะได้ขนาดการกระโดดที่เหมาะสม สิ่งที่น่าสังเกตคือ วิธี Golden Section เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับ non derivative แต่วิธีนี้ต้องการฟังก์ชันเป็นจำนวนมากในการคำนวณ ซึ่งวิธีนี้จะไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติของการ design แต่ทว่าวิธี polynomial interpolation จะมีประสิทธิภาพดีกว่า

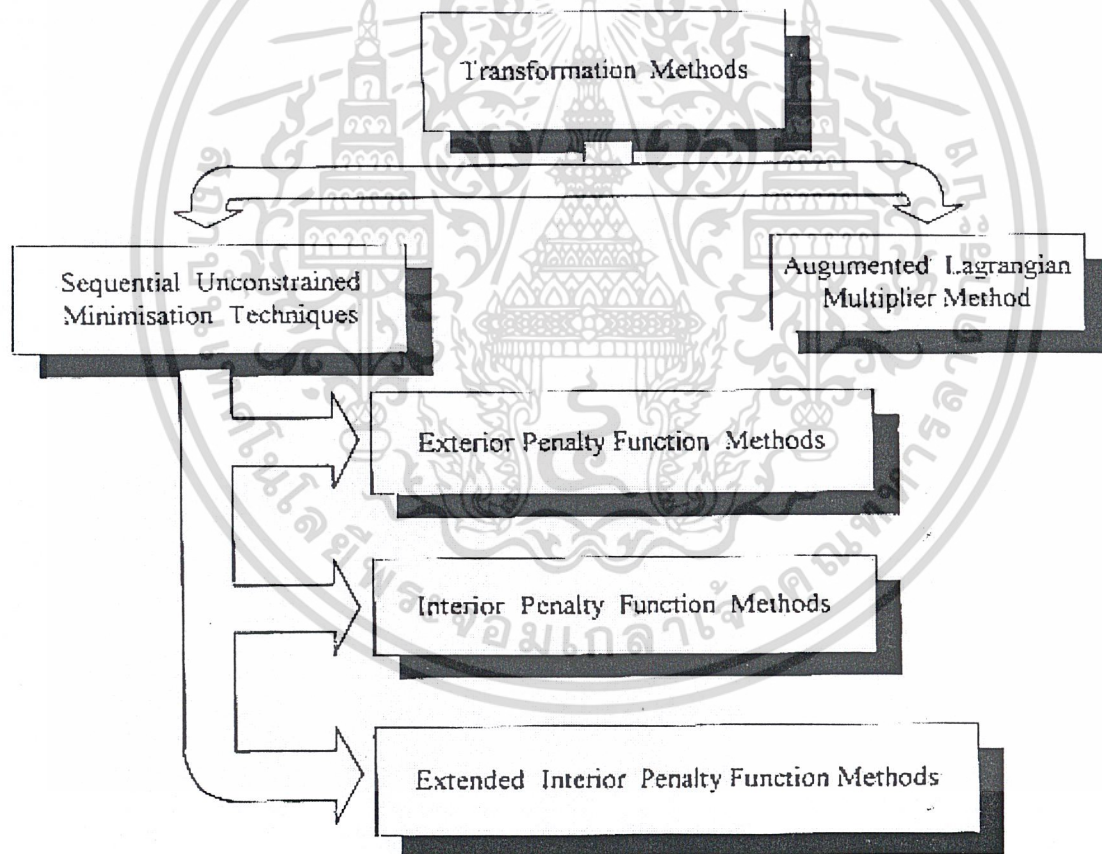


รูป ค-11 Step size determination algorithm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-7 วิธีการเปลี่ยนรูป

ในส่วนนี้จะเป็นเทคนิคในการแก้ค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้ได้ผลดีที่สุด ซึ่งจะใช้วิธีการเปลี่ยนรูปโดยปรับปรุงค่าและฟังก์ชันที่เป็นจุดเริ่มต้นของปัญหาซึ่งสามารถแก้ปัญหาที่ไม่จำเป็นได้ โดยพื้นฐานเพื่อที่จะสร้างผู้โดยฟังก์ชัน (Pseudo function) และคอนสเตรนทฟังก์ชัน (constraint function) วิธีการเปลี่ยนรูปสามารถแยกออกเป็น 2 ชนิด ซึ่งแสดงในรูปที่ (ค-12) วิธีแรกเกี่ยวกับวิธีการภายนอก (penalty) และภายใน (barrier) ซึ่งอ้างถึง Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) อย่างที่ 2 คือ การปรับปรุงฟังก์ชัน Lagrangian ที่เรียกว่า วิธีการ Augmented Lagrangian Multiplier Methods (ALMM)



รูป ค-12 Classification of the transformation methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3-1) ถึง (3-4) จากบทที่ 3 วิธีการเปลี่ยนแปลงรูปฟังก์ชันเหล่านี้เข้ากับปัญหาที่ไม่
จำเป็นสำหรับ

สต็อกฟังก์ชัน จะได้ว่า

$$\phi(x, r) = F(x) + P[h(x), g(x), r] \quad (ค-22)$$

ขณะที่ r คือเวกเตอร์ทั่วไปของตัวแปรควบคุม และ $P[h(x), g(x), r]$ คือ ค่าฟังก์ชันจริง
ซึ่งแปรตามค่า r รูปแบบของ P ขึ้นกับวิธีการที่ใช้ ฟังก์ชัน $\phi(x, r)$ เป็นค่าของ Unconstrained ที่
ต่ำที่สุด โดยการเก็บค่า r ในระหว่างที่ทำซ้ำแต่ละครั้ง ค่าพารามิเตอร์ r จะถูกเปลี่ยนใหม่และ
กระบวนการจะถูกทำซ้ำจนกระทั่งไม่สามารถปรับปรุงค่าได้อีกแล้ว สำหรับค่า P และ r ที่เหมาะ
สม ควรใช้วิธี Unconstrained แก้ปัญหา

ค-7.1 Sequential Unconstrained Minimization Techniques

วิธีการเหล่านี้ถูกพัฒนาและอธิบายรายละเอียดโดยเฟลคโค และแมคคอกนิก (1968) วิธี
ลำดับค่าจะแบ่งเป็น

2 ส่วน ส่วนแรก คือ ลักษณะคุณสมบัติของการรักษาค่า Constraint ทั้งหมดที่เป็นไปได้ จากการ
ออกแบบค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีที่ดีกว่า ถ้าตัดสินใจใช้ Penally เพราะถ้าหากว่ามันไม่รวมกัน มัน
ยังคงออกแบบค่าที่เป็นไปได้ ในส่วนที่ 2 ใช้ลำดับค่าที่เป็นไปไม่ได้และเป็นไปได้ที่มีค่าเหมาะสม
เท่านั้นมีอันอ้างถึงวิธีการฟังก์ชัน exterior penalty หรือ penalty เพื่อให้ได้ลักษณะวิธีการภายนอกและ
ภายในที่ดีที่สุด

ค-7.1.1 วิธีการ Exterior Penalty Function

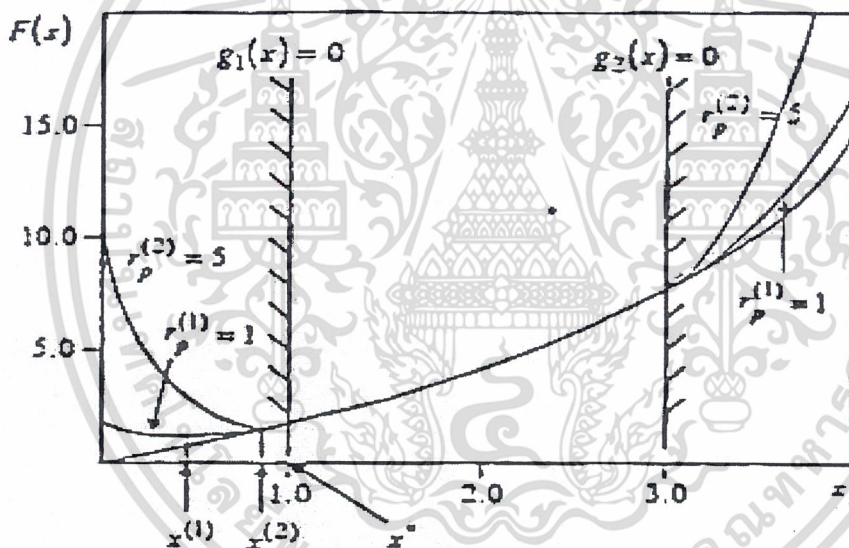
วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดจะรวมเอากระบวนการที่เหมาะสมเข้าไปด้วยกัน เพราะ
มันจะบังคับแค่

สต็อกฟังก์ชันเท่านั้น การปฏิบัติได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ควบคุมค่า equality และ inequality ดังนี้

$$P[h(x), g(x), r_p] = r_p \left\{ \sum_{k=1}^l [\max\{0, g_k(x)\}]^2 + \sum_{j=1}^m [h_j(x)]^2 \right\} \quad (ค-23)$$

จากสมการ (ค-23) ฟังก์ชัน penalty ไม่ถูกบังคับถ้า constraints ทั้งหมดเป็นที่น่าพอใจ พารามิเตอร์ r_p เป็นค่าเริ่มต้นที่มีค่าน้อย ($r_p = 1$) และจะถูกเปลี่ยนค่าโดยแฟกเตอร์ตัวคูณ $\gamma (\gamma > 1)$ รูปที่ (ค-13) และ (ค-14) แสดงตัวอย่างเพื่อสาธิตเทคนิคให้ดู มันมีค่าต่ำสุดที่ดีและง่ายในการใช้โพลีโนเมียล แต่ค่าที่เหมาะสมคือ ค่าภายนอกขอบเขตที่น่าเป็นไปได้สังเกตได้ว่าเมื่อ r_p มีค่าเพิ่มขึ้น ฟังก์ชันจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเชิงเส้น เพราะการออกแบบค่าที่เหมาะสมจากช่วงที่เป็นไปไม่ได้ ดังนั้นมันจึงไม่มีประโยชน์ เพราะถ้ากระบวนการหยุดก่อนถึงเวลาอันควร การออกแบบก็ไม่สามารถใช้ได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถเริ่ม

กระบวนการด้วยการออกแบบค่าดั้งเดิมที่เป็นไปไม่ได้



รูป ค-13 ภาพประกอบของวิธีการฟังก์ชัน exterior penalty ได้นำมาใช้หาค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ 1 ตัวแปรที่ถูกจำกัดโดย 2 inequality constraints

ค-7.1.2 วิธีการ Interior Penalty Function

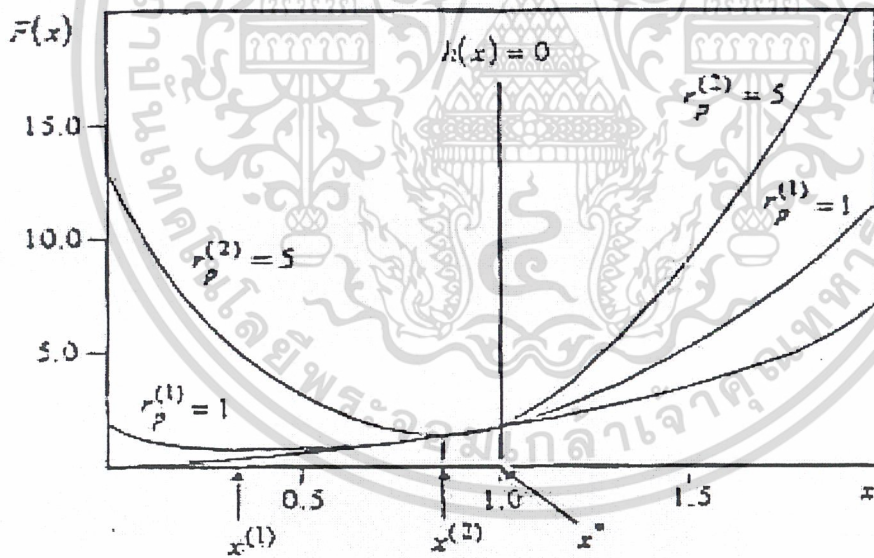
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการนี้จะออกเพื่อปรับปรุงค่าที่เป็นไปได้ โดยการใช้รูปแบบที่แตกต่างกับของฟังก์ชัน Penalty ประยุกต์เข้ากับ inequality constraints และเก็บค่าก่อนพารามิเตอร์ Penalty จะถูกลดลงแทนที่จะเพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการ วิธีนี้ไม่เหมาะกับค่า equality constraints เพราะไม่มีทางแน่ใจว่า x^* เป็นที่นำใจของ equality constraints หรือไม่

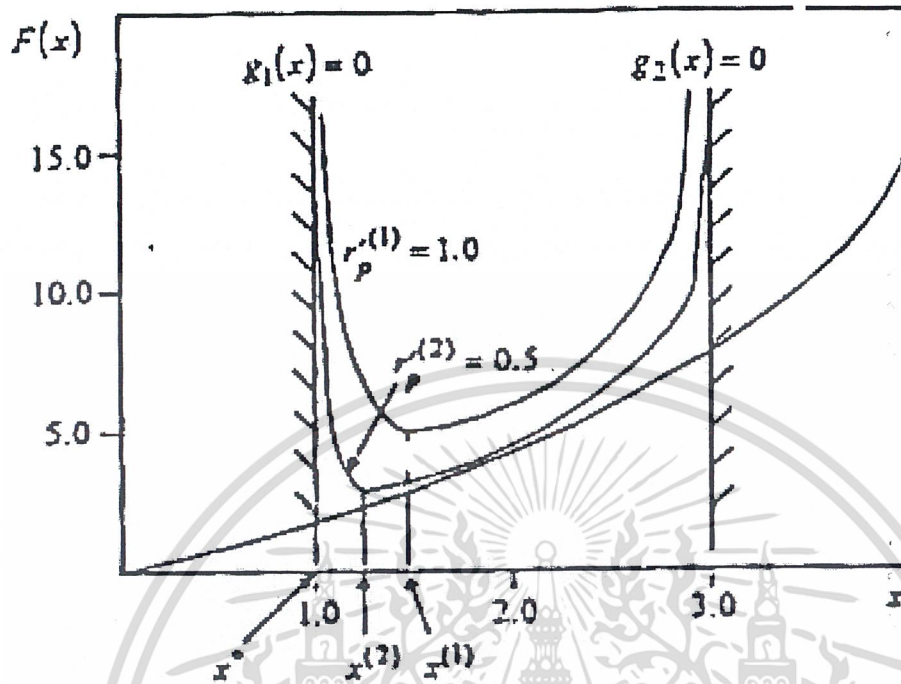
$$P[h(x), g(x), r'_p] = r'_p \sum_{k=1}^l [-1/g_k(x)] \quad (ค-24)$$

$$P[h(x), g(x), r'_p] = r'_p \sum_{k=1}^l \log[-g_k(x)] \quad (ค-25)$$

ในกรณีนี้ที่ r'_p เริ่มต้นมีค่าบวกมากและลดลงมา r'_p ถูกคูณโดย $\lambda' (\lambda' < 1)$ สังเกตได้ว่าสมการ (3.29) สามารถนำมาใช้เมื่อ $g_k(x)$ มีค่าบวกหรือลบค่าใดค่าหนึ่ง แต่สมการที่ (3-31) สามารถนำมาใช้เมื่อ $g_k(x)$ เป็นลบเท่านั้น แต่อัลกอริทึมนี้ไม่สามารถใช้ได้กับ numerical ที่ยากๆ เมื่อ $g_k(x) \rightarrow 0$ เพราะค่า Penalty จะเข้าใกล้อินฟินิตี้ดังแสดงในรูปที่ (3-19)



รูป ค 3-14 ภาพประกอบของวิธีการฟังก์ชัน exterior penalty ได้นำมาใช้หาค่าฟังก์ชันต่ำสุดของ 1 ตัวแปรที่ถูกจำกัดโดย Single equality constraints



รูป 3-14 Illustration of the interior penalty function methods

3.4.1.3 วิธีการ Extended Interior Penalty

เทคนิคเหล่านี้สามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีการภายในและภายนอกได้ดีที่สุดในส่วนนี้จะนำเสนอเทคนิค 2 อย่างที่ใช้ได้ดี ฟังก์ชัน Penalty สำหรับ equality constraints ก็ยังคงเหมือนก่อนรูปแบบของ penalty ของ inequality constraints เท่านั้น จะแตกต่างออกไปดังนี้

1) ฟังก์ชันเชิงเส้น Extended Penalty

$$P[h(x), g(x), r_p, r'_p] = r'_p \sum_{k=1}^l \bar{g}_k(x) + r_p \sum_{j=1}^l [h_j(x)]^2 \quad (\text{ก-26})$$

$$\bar{g}_k(x) = [-1/g_k(x)] \quad \text{if } g_k(x) \leq \varepsilon_e \quad (\text{ก-27})$$

$$\bar{g}_k(x) = -[2\varepsilon - g_k(x)]/\varepsilon_e^2 \quad \text{if } g_k(x) > \varepsilon_e \quad (\text{ก-28})$$

$$\varepsilon_e = -c_e (r'_p)^a \quad 1/3 \leq a_e \leq 1/2 \quad (\text{ก-29})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ε_e คือ ค่าลบน้อยๆ ซึ่งเปลี่ยนค่าจาก interior penalty เป็น extended penalty และ c_e คือค่าคงที่

2) ฟังก์ชัน Quadratic Extended Penalty

$$\bar{g}_k(x) = [-1/g_k(x)] \quad \text{if } g_k(x) \leq \varepsilon_e \quad (\text{ก-30})$$

$$\bar{g}_k(x) = -1/\varepsilon_e \{ [g_k(x)/\varepsilon_e]^2 - 3[g_k(x)/\varepsilon_e] + 3 \} \quad \text{if } g_k(x) > \varepsilon_e \quad (\text{ก-31})$$

ฟังก์ชันเชิงเส้น extended penalty มีค่าต่อเนื่องและต่อเนื่องใน first derivatives ที่ $g_k(x) = \varepsilon_e$ อย่างไรก็ตามถ้าเป็น secondary จะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นถ้าประมาณค่าโดยใช้วิธีซึ่งใช้หาควรวีธีการ ฟังก์ชัน quadratic extended penalty เทคนิคนี้ได้เคยนำมาใช้ออกแบบหาค่าต่างๆ ที่เหมาะสม สำหรับวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า

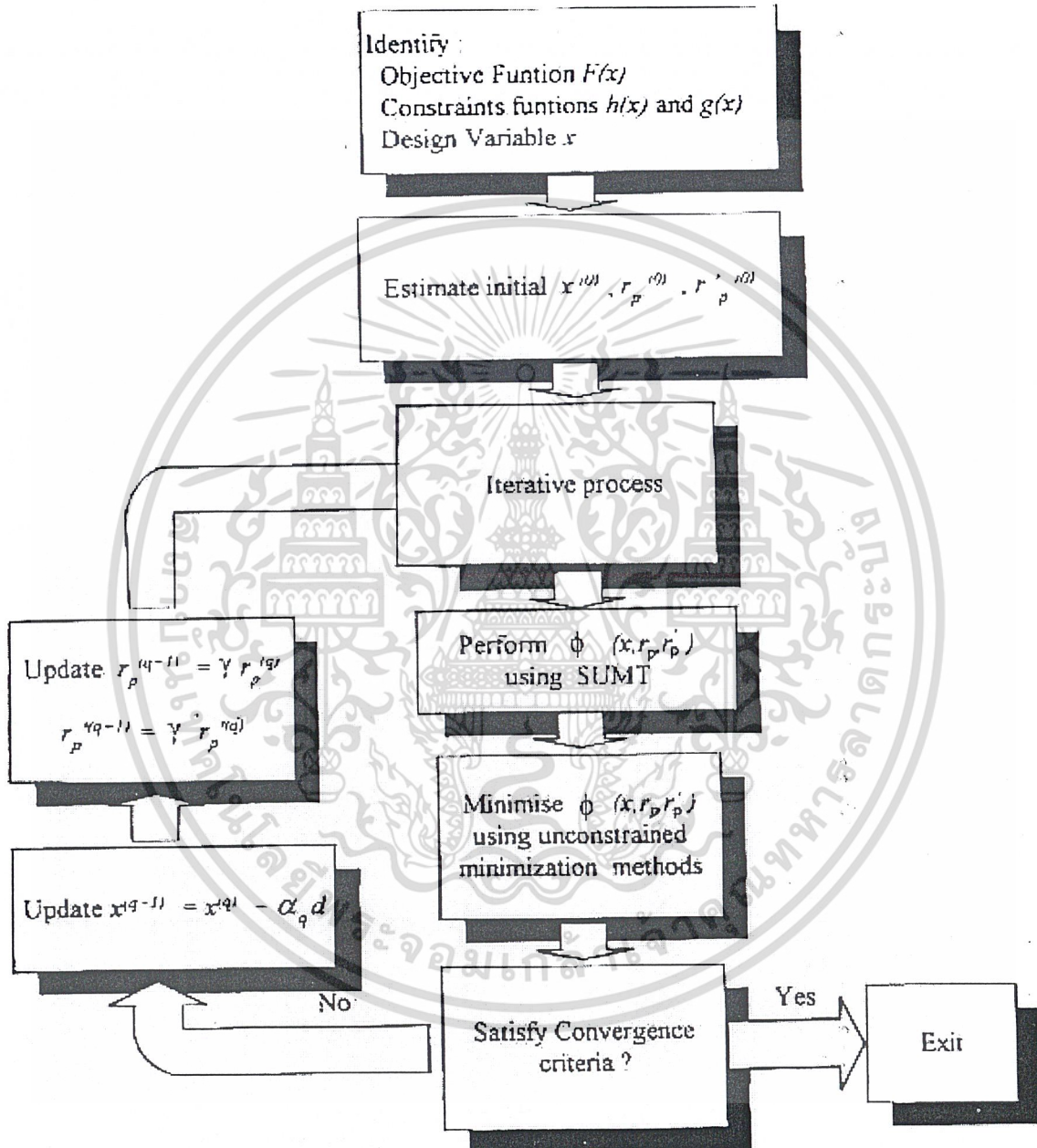
ก-7.1.4 การปฏิบัติโดยทั่วไปสำหรับ SUMT

การปฏิบัติทั่วไปสำหรับ SUMT ถูกอธิบายไว้ในรูปที่ (ก-16) กระบวนการเริ่มต้นด้วยการประมาณ

ค่าเดิม $x^{(0)}$ และ r ดังนั้นสูโดฟังก์ชัน $\phi(x, r)$ ได้ถูกพิสูจน์โดยใช้เทคนิคของ SUMT $\phi(x, r)$ เป็นค่า unconstrained ที่ต่ำสุดและพารามิเตอร์ r เป็นค่าคงที่ที่เก็บไว้ระหว่างทำซ้ำในแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงถูกเปลี่ยนโดยตัวคูณที่ทำซ้ำครั้งต่อไป กระบวนการจะทำซ้ำจนกว่าค่าจะเป็นที่น่าพอใจ

การเลือกค่าพารามิเตอร์ r_p และ r'_p เป็นจุดสำคัญในกระบวนการหาค่า Optimization บางครั้ง ตัวเลือกของ r_p^0 และ $r'_p{}^0$ อาจจะทำให้กระบวนการ numerical เกิดโอเวอร์โฟล ดังนั้นมันจึงมีอุปสรรคบ้างในการใช้ SUMT ในทางปฏิบัติ แวนเดอเพลท (1984) ให้คำแนะนำว่า ค่าตั้งเดิมที่ใกล้เคียงคือ ตัวเลือกที่ดีสำหรับพารามิเตอร์ r_p สำหรับฟังก์ชัน interior penalty คาสซิส และ เซอมีท (1976) สมมติค่าเดิมของ r'_p สามารถประมาณได้เป็น

$$r_p^{(0)} = \frac{\beta F(x^{(0)})}{P(x^{(0)})} \quad 0 < \beta < 1 \quad (\text{ก-32})$$



รูป ก-16 General procedure for the sequential unconstrained minimization techniques

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณ ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, ผศ. วีรศักดิ์ วงศ์วิวัฒน์ และ คุณต่อพงษ์ ยวงพานิช เป็นอย่างสูงที่สละเวลา ให้คำแนะนำและคำปรึกษารวมทั้งให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน ซึ่งทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤตวิทย์ บัวใหญ่, สัมฤทธิ์ หังสะสูตร , “ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็กโดยวิธีการทำให้เหมาะสม ” , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 19 , พ.ศ. 2539 .
- [2] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “ เอกสารประกอบการสอน วิชา Fundamental of Electrical Machines” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- [3] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย , “ เอกสารประกอบการสอน วิชา Electrical Engineering Materials” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- [4] ณัฐติพล ทันจิตรวัฒน์ , ต่อพงศ์ ยวงพานิช และ อนุชิต ศรีสมบูรณ์สกุล , “ การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก EI ” , ปรินูญานิพนธ์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538 .
- [5] นิพัทธ์ จันทรมินทร์ , บัณฑิต สามพันธ์ และ ภาคภูมิ กิจสมบูรณ์โสหะ , “ การออกแบบต่อเหนี่ยวนำไฟฟ้าแกนเหล็ก EI โดยใช้วิธีอ็อพทิโมเซชัน ” , ปรินูญานิพนธ์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2539 .
- [6] ประภาส ไพรสุวรรณ , “ เอกสารประกอบการสอน วิชา ENERGY CONVERSION” คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- [7] พิเชิต ถ้ายอง , “ เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2537 .
- [8] Acton , Forman S , “Numerical Method That Work” , Harper and Row , Inc. 1970.
- [9] A.E. Fitzgerald, Charies, Jr. Stephm D. umans , “ Electric Machinery” Fifth Edition , McGrawHill , Inc. 1990 .
- [10] Brent , Richard P. , “Algorithms for Minimization without derivatives” , Englewood Cliffs, N.J. :Prentice-Hall , Inc. 1973.
- [11] Colonel Wm.T. Melyman, “Transformer and Inductor Handbook”, Marcel Dekker, Inc. 1990.
- [12] Jacobs , David A.H. , “The State of the Art in NumericalAnalysis”, Academic Press. London , 1977.
- [13] Pual, C.r. Nasar, S.A., Unnewehr, L.E., “Induction to Electrical Engineering”, Mc Graw Hill, Inc. 1980 .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้