

การออกแบบ น้ำหนักเบาสูงของเครื่องจ่ายไฟฟ้า
FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

MINIMUM WEIGHT DESIGN OF HIGH-FREQUENCY TRANSFORMER
FOR FLY-BACK CONVERTER

อภิวุฒิ คำนวนกุจ
APIVUT KUMNUANKU

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาด้านหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิชาแม่ปั้นชิ้น
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-921-6

สำนักงานสมุดกลาง พิพิธภัณฑ์ชาติไทย

การออกแบบหน้ม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวออร์เตอร์ชนิด
FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

MINIMUM WEIGHT DESIGN OF HIGH-FREQUENCY TRANSFORMER
FOR FLY-BACK CONVERTER



อภิวุฒิ คำนวนกิจ

APIVUT KUMNUANKIJ

เลขที่.....
เลขประจำปี..... 47521
วัน, เดือน, ปี..... 19 ธ.ค. 2546

.b.....
.j.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาชีวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-921-6

**MINIMUM WEIGHT DESIGN OF HIGH-FREQUENCY TRANSFORMER
FOR FLY-BACK CONVERTER**

APIVUT KUMNUANKIJ

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2002

ISBN 974-648-921-6

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ในรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบน้ำหนักเบาของคอนเวอเรอร์ชั้น nid FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

MINIMUM WEIGHT DESIGN OF HIGH-FREQUENCY TRANSFORMER
FOR FLY-BACK CONVERTER

ชื่อนักศึกษา

นายอภิชา คำนวนกิจ

รหัสประจำตัว

41061052

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชัยวุฒิ พัตรอุทัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.พิชิต	ลายของ
ผศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ
ดร.อานันทวัฒน์	คุณกร
ผศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ขันเงิน
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ	พัตรอุทัย

วัน/เดือนปี ที่สอบ 20 พฤษภาคม 2545 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.นิยุตวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๑๗.....เดือน.....พฤษภาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๕.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด
นักศึกษา	นาย อภิวุฒิ คำนวนกิจ
รหัสประจำตัว	41061052
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้กับคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข ร่วมกับการใช้อัลกอริธึมที่ผู้ออกแบบสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ด้วยการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักหม้อแปลงเป็นค่ามิติของแกนเพอร์ไร์ต์ (แบบ EE), ระยะช่องอากาศ, จำนวนรอบในการพันขดลวด, ขนาดของขดลวด และค่ากระแสสูงสุดทางด้านปฐมภูมิ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของค่าความสูญเสียของหม้อแปลงความถี่สูงโดยตรง แต่จะใช้การกำหนดค่าเพื่อสำหรับการออกแบบที่เหมาะสม งานวิจัยนี้นำเสนอผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ที่มีขนาดแรงดันและกระแสออก $5\text{ V} / 1.2\text{ A}$, $12\text{ V} / 2\text{ A}$ และ $24\text{ V} / 4\text{ A}$ ซึ่งมีความถี่ใช้งานอยู่ที่ 40 kHz , 60 kHz และ 100 kHz ตามลำดับ โครงสร้างหม้อแปลงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุดซึ่งได้จากการวิเคราะห์ที่นำเสนอจะมีค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ และจากผลที่ได้จากการออกแบบนี้สามารถนำไปใช้ศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมนั่นคือ ค่าความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟสวิตซ์ และค่าพิกัดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนเพอร์ไร์ต์

Thesis Title	Minimum Weight Design of High-Frequency Transformer for FLY-BACK Converter
Student	Mr. Apivut Kumnuankij
Student ID.	41061052
Degree	Master of Engineering (M. Eng)
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr. Chaiwut Chat-uthai

Abstract

The objective of this thesis is to introduce the design of high-frequency transformers for a FLY-BACK converter, which has minimum weight using numerical constrained optimization techniques combined with an interactive algorithm. The dimension of ferrite core (EE type), gap length, number of turns, diameter of conductors and maximum primary current which have the effect to the total weight of transformer are defined as design variables. In this thesis, the losses of high-frequency transformer are omitted, however the proper design margin is represented. The design of 5 V / 1.2 A, 12 V / 2 A and 24 V / 4 A Switched Mode Power Supply (SMPS), which have operating frequency 40 kHz, 60 kHz and 100 kHz respectively are presented. The configuration of transformer having minimum weight obtained by this proposed technique is practical. Furthermore, this optimal result can be used for studying the design parameters, which have indirect effect to the weight of transformer such as the operating frequency of SMPS and maximum flux density limit of ferrite core.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบคุณ พ.ศ. ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และการแก้ไขอุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลังได้ด้วยดี ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ช่วยเหลือการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทความรู้ให้แก่ผู้วิจัย อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ ตลอดจนบิดา มารดาของผู้ทำวิจัยที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยตลอดมา

อภิญญา คำนวนกิจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 អ្នកແປلغความតិ៍សុង.....	6
2.1 គណវេរីទេរីចនិត FLY-BACK.....	6
2.2 ក្រសាន្យនៃអ្នកແປلغឈាមតិ៍សុងនិងការចាប់ផ្តើម.....	8
2.2.1 ក្រសាន្យនៃកោដ.....	8
2.2.2 ក្រសាន្យនៃការបង្កើតនិងការប្រើប្រាស់.....	9
2.3 ការរាយការណ៍នៃក្រសាន្យនៃអ្នកແປلغឈាមតិ៍សុង.....	11
บทที่ 3 ការអនុវត្តន៍យករាយការណ៍នៃក្រសាន្យនៃអ្នកແປلغឈាមតិ៍សុង.....	13
3.1 ការអនុវត្តន៍យករាយការណ៍នៃក្រសាន្យនៃអ្នកແປلغឈាមតិ៍សុង.....	13
3.2 ការអនុវត្តន៍យករាយការណ៍នៃក្រសាន្យនៃអ្នកແປلغឈាមតិ៍សុង.....	14
3.2.1 ក្រសាន្យនៃកោដ.....	14
3.2.2 ក្រសាន្យនៃការបង្កើតនិងការប្រើប្រាស់.....	14
3.2.3 ក្រសាន្យនៃការបង្កើតនិងការប្រើប្រាស់.....	15
3.2.4 ក្រសាន្យនៃការបង្កើតនិងការប្រើប្រាស់.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 สมการเงื่อนไขต่างๆ และขอบเขตของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง.....	17
3.3.1 ค่าความหนาแน่นของขดลวด Primary.....	17
3.3.2 คาดเวลาในการ On และ Off ที่เหมาะสม.....	18
3.3.3 แรงดันตกครั่อมสูงสุดที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET.....	20
3.3.4 ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกน.....	20
3.3.5 พื้นที่ในการพันขดลวด.....	21
3.3.6 ขนาดขดลวดที่ใช้ในการพันที่เหมาะสม.....	24
3.3.7 ขอบเขตของตัวแปรในการออกแบบ.....	25
3.4 ขั้นตอนของระบบที่สร้างขึ้น.....	26
3.5 กระบวนการ Interactive.....	29
3.6 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด.....	34
3.6.1 อ่านไฟล์ฟังก์ชันและสมการเป้าหมาย (Objective Function).....	34
3.6.2 อ่านไฟล์ฟังก์ชันและสมการเงื่อนไข (Constrains Function).....	34
3.6.3 อ่านไฟล์ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ.....	34
3.6.4 อ่านไฟล์ฐานข้อมูลของแกนเฟอร์ไรต์.....	34
3.6.5 อ่านไฟล์ฐานข้อมูลของลวดทองแดงชนิดต่างๆ.....	35
3.6.6 อ่านไฟล์ชุดคำสั่งในการวิเคราะห์และแสดงผลการออกแบบ.....	35
บทที่ 4 ตัวอย่างการออกแบบและการทดลอง.....	36
4.1 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูง.....	36
4.1.1 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A.....	36
4.1.2 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A.....	36
4.1.3 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A.....	36
4.2 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A.....	37
4.2.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป.....	40
4.2.2 การออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 5 V / 1.2 A.....	59
4.3.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป.....	61
4.3.2 การออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอด..	62
4.4 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 24 V / 4 A.....	66
4.4.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป.....	68
4.4.2 การออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอด..	68
4.5 การลดน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อม.....	73
4.5.1 ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์.....	73
4.5.2 พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด.....	75
4.6 การสูญเสียในแกน (Core loss) และการสูญเสียในขดลวด (Copper loss).....	76
 บทที่ 5 บทสรุป.....	80
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
 เอกสารอ้างอิง.....	85
 ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK.....	87
ภาคผนวก ข วงจรที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงความถี่สูง.....	98
ภาคผนวก ค ทฤษฎีการออกแบบด้วยกระบวนการหารากที่เหมาะสม.....	100
ภาคผนวก ง ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบ สวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ที่ความถี่ค่าต่างๆ.....	106
ภาคผนวก จ ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบ สวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ที่พิกัดฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดค่าต่างๆ.....	108
ภาคผนวก ฉ ตารางแกนเฟอร์ไรต์ของผู้ผลิต.....	110

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ๗ ตารางข้อมูลแต่ละชนิด.....	114
ภาคผนวก ๘ วิธีการวัดกำลังงานโดยหาค่าเฉลี่ยรูปคลื่นกำลังงาน.....	117
ภาคผนวก ๙ ผลการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของต้นแบบหน้าแปลงความถี่สูง ทั้ง ๓ ตัว.....	120
ภาคผนวก ๑๐ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ SMPS ชนิด FLY-BACK (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร).....	11
3.1 กรณีต่างๆ ในการปรับค่าของ N_p และ N_s	32
4.1 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ แบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร).....	37
4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A โดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation).....	45
4.3 ค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ แบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A.....	46
4.4 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ในรอบแรก (Loop 1).....	48
4.5 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่ 2 (Loop 2).....	50
4.6 น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A โดยโครงสร้างของแกนขนาดต่างๆ.....	50
4.7 ผลลัพธ์ของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบ สวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่ 3 ที่ได้จากการคำนวณรอบในกรณีต่างๆกัน.....	51
4.8 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่ 3 (Loop 3).....	53
4.9 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4).....	55
4.10 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ ขนาด 12 V / 2 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คิดน้ำหนักของ W_{bob} และ etc.).....	56
4.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ ขนาด 12 V / 2 A ขณะจ่าย Load 2A.....	56
4.12 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่ง จ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 5 V / 1.2 A (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร).....	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ผลการอ kokแบบหน้าอเปล่งความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A โดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation).....	61
4.14 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการอ kokแบบหน้าอเปล่งความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4).....	62
4.15 ลักษณะทางกายภาพของหน้าอเปล่งความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คิดน้ำหนักของ W_{bob} และ etc.).....	63
4.16 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหน้าอเปล่งความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ขณะจ่าย Load 1.2 A.....	64
4.17 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการอ kokแบบหน้าอเปล่งความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร).....	66
4.18 ผลการอ kokแบบหน้าอเปล่งความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A โดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation).....	68
4.19 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการอ kokแบบหน้าอเปล่งความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4).....	69
4.20 ลักษณะทางกายภาพของหน้าอเปล่งความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คิดน้ำหนักของ W_{bob} และ etc.).....	70
4.21 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหน้าอเปล่งความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A ขณะจ่าย Load 4 A.....	70
4.22 ค่าความสูญเสียในแกนของต้นแบบหน้าอเปล่งความถี่สูงที่สร้างขึ้นมาทั้ง 3 ตัว ขณะจ่าย load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าต่ำสุด.....	77
4.23 ค่าความสูญเสียในคลาวดของต้นแบบหน้าอเปล่งความถี่สูงที่สร้างขึ้นมาทั้ง 3 ตัว ขณะจ่าย load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าต่ำสุด.....	77
4.24 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ของต้นแบบหน้าอเปล่งความถี่สูงทั้ง 3 ตัวที่สร้างขึ้นมา ในขณะ จ่าย Load สูงสุด.....	77
4.25 กำลังงานขาเข้าและขาออกของต้นแบบหน้าอเปล่งความถี่สูงทั้ง 3 ตัว ที่สร้างขึ้นมาในขณะจ่าย Load สูงสุด.....	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.1 เปรียบเทียบน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด้วย (Program) และต้นแบบที่สร้างขึ้นจริง (Prototype).....	81
5.2 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด้วย (Program) ในกระบวนการหาราค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) และรอบสุดท้าย (Loop 4).....	81
5.3 น้ำหนักที่ลดลงของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีทั่วไป (Manual) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่นำเสนอด้วย (Program).....	82
5.4 เปรียบเทียบการออกแบบโดยวิธีทั่วไปและวิธีที่นำเสนอด้วย.....	83
ก.1 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ที่ความถี่ค่าต่างๆ.....	107
ก.1 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ที่พิกัดฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดค่าต่างๆ.....	109
ก.1 ตารางแกนเฟอร์ไรต์ของผู้ผลิต EPCOS.....	111
ก.2 ตารางแกนเฟอร์ไรต์ของผู้ผลิต KAWATETSU.....	112
ก.1 ตารางขค漉ดแต่ละชนิด.....	115

สารบัญ

หัว	หน้า
รูปที่	
1.1 ขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย.....	5
2.1 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK.....	7
2.2 ยานพิกัดกำลังขาออกและโวลาท์เดชของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK เมื่อเทียบกับคอนเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆ.....	7
2.3 มิติโครงสร้างของเกนเฟอร์ไรต์แบบ EE.....	8
2.4 ลักษณะการพันขดคลวตแบบแซนวิช.....	10
2.5 การพันลวดแบบขนานกัน.....	10
2.6 การพันขดคลวตในการพิมพ์泥หลายเยอร์ (Layer).....	10
3.1 คำาเวลาการทำงานในแบบ CCM.....	19
3.2 คำาเวลาการทำงานในแบบ DCM.....	19
3.3 ขั้นตอนการออกแบบโดยรวมของระบบที่สร้างขึ้น.....	26
3.4 ขั้นตอนการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นต่างๆ ของเกนและขดคลวต.....	27
3.5 ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้งหมด และสมการย่อต่างๆ เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบแรก (Loop 1).....	28
3.6 ขั้นตอนการกำหนดและปรับปรุงค่า E เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมใน รอบที่สอง (Loop 2).....	30
3.7 ขั้นตอนการกำหนดและปรับปรุงค่า N_p และ N_s เพื่อนำไปสู่กระบวนการ หาค่าที่เหมาะสมในรอบที่สาม (Loop 3).....	31
3.8 ขั้นตอนการกำหนดและปรับปรุงค่า d_p และ d_s เพื่อนำไปสู่กระบวนการ หาค่าที่เหมาะสมในรอบสุดท้าย (Loop 4).....	33
4.1 ด้านแบบหน้าแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตซิ่งทั้ง 3 ขนาดที่สร้างขึ้น โดยที่ จากทางค้านซ้ายไปขวา จะเป็นขนาด 5 V / 1.2 A, 12 V / 2 A และ 24 V / 4 A ตามลำดับ.....	37
4.2 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ แบบสวิตซิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบแรก (Loop 1).....	47
4.3 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ แบบสวิตซิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่สอง (Loop 2).....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งนาค 12 V / 2 A ในรอบที่สาม (Loop 3).....	52
4.5 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งนาค 12 V / 2 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4).....	54
4.6 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งนาค 12 V / 2 A ที่สร้างขึ้น....	55
4.7 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุด (85 VAC) โดยจ่าย Load 2 A.....	58
4.8 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าสูงสุด (264 VAC) โดยจ่าย Load 2 A.....	58
4.9 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งนาค 5 V / 1.2 A.....	63
4.10 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุด (85 VAC) โดยจ่าย Load 1.2 A.....	65
4.11 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าสูงสุด (264 VAC) โดยจ่าย Load 1.2 A.....	65
4.12 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งนาค 24 V / 4 A.....	69
4.13 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุด (85 VAC) โดยจ่าย Load 4 A.....	72
4.14 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าสูงสุด (264 VAC) โดยจ่าย Load 4 A.....	72
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (f) และน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (Weight) ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งนาค 12 V / 2 A.....	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ($B_{(max)Limit}$) และ น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (Weight) ของหม้อแปลงความถี่สูง ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A.....	76
4.17 ตำแหน่งที่พิจารณากำลังงานขาเข้าหม้อแปลงความถี่สูงและกำลังงานขาออกของ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งสำหรับงานวิจัยนี้.....	78
ก.1 วงจรพื้นฐานของแหล่งจ่ายไฟแบบลินีเนียร์ (Linear Supplies).....	88
ก.2 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK.....	89
ก.3 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด BOOST.....	89
ก.4 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FORWARD.....	90
ก.5 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK.....	92
ก.6 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในโหมดกระแส ไม่ต่อเนื่อง (DCM) ทางอุคณคติ.....	92
ก.7 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในโหมดกระแส ต่อเนื่อง (CCM) ทางอุคณคติ.....	94
ก.8 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในทางปฏิบัติ.....	94
ก.9 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในโหมดกระแส ไม่ต่อเนื่อง (DCM) ในทางปฏิบัติ.....	96
ก.10 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในโหมด กระแสต่อเนื่อง (CCM) ในทางปฏิบัติ.....	96
ข.1 วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK.....	99
ค.1 ระเบียบวิธีทางตัวเลขสำหรับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบต่างๆ.....	101
ค.2 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่มีเงื่อนไขแบบต่างๆ.....	102
ค.3 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธี Stochastic แบบต่างๆ.....	103
ค.4 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขแบบต่างๆ.....	103
ค.5 วิธีการแปลงรูปในแบบต่างๆ.....	104
ค.6 เทคนิค Sequential unconstrained minimization ในแบบต่างๆ.....	104
ค.7 วิธีตรงในแบบต่างๆ.....	105
ช.1 ทิศทางในการวัดแรงดันและกระแสที่เข้าสู่หม้อแปลงความถี่สูง.....	118

สารบัญรูป (ต่อ)

ช.2 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดแรงดัน (บบ) และกระแส (ล่าง).....	119
ช.3 รูปคลื่นที่ได้จากผลคุณระหว่างแรงดันกับกระแส.....	119
ณ.1 ผลการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 5 V / 1.2 A ขณะจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าสูงสุด และ ต่ำสุดตามลำดับ.....	121
ณ.2 ผลการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ขณะจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าสูงสุด และ ต่ำสุดตามลำดับ.....	122
ณ.3 ผลการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 24 V / 4 A ขณะจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าสูงสุด และ ต่ำสุดตามลำดับ.....	123
ณ.4 ระบบที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของต้นแบบหม้อแปลงทั้ง 3 ตัว.....	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปั๊มห่า

ในการออกแบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง หรือ Switched Mode Power Supply (SMPS) ส่วนประกอบหลักที่สำคัญก็คือ หม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งมีหน้าที่ในการส่งผ่านพลังงานจากด้าน Primary (แรงดันสูง) ไปยังด้าน Secondary (แรงดันต่ำ) พบว่าโครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูง จะเป็นส่วนที่กำหนดขนาดของ SMPS ซึ่งมีขนาดประมาณ 25% ของขนาดโดยรวม และมีน้ำหนักประมาณ 30% ของน้ำหนักทั้งหมด [1] ในปัจจุบันการออกแบบผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook, PDA (Personal Digital Assistant) โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น นับวันก็ยิ่งมีความต้องการในด้านความสะดวกและคล่องตัว นั่นก็คือ มีขนาดที่เล็กกะทัดรัด และน้ำหนักที่เบา เพื่อสะดวกในการพกพาโดยยังคงประสิทธิภาพให้ได้เหมือนเดิมหรือมากยิ่งขึ้น ฉะนั้น การที่จะทำการออกแบบ SMPS ให้มีขนาดและน้ำหนักเบา ก็คือ การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง ให้มีขนาดและน้ำหนักน้อยที่สุด [2]

การที่จะ ได้มาซึ่งเป้าหมายที่ต้องการจึง ได้มีการนำเอาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เข้ามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด หรือเพื่อต้องการศึกษาแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่างๆ ว่ามีผลกระทบต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงอย่างไร

สืบเนื่องมาจากการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงโดยทั่วๆ ไป ไม่อาจทราบได้ว่า ผลการออกแบบที่จะ ได้มาซึ่ง มีผลทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงมีค่าน้อยที่สุดด้วยเงื่อนไขที่กำหนดเอาไว้ หรือไม่ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบข้าแล้วข้าอีก ซึ่งจะทำให้สูญเสียเวลาในการออกแบบไป เป็นอย่างมาก แต่ถ้าหากนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เข้ามาประยุกต์ใช้ โปรแกรมจะสามารถค้นหาค่าของตัวแปรที่เหมาะสมในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

กระบวนการ Interactive ที่เพิ่มเข้าไปในระบบจะสามารถช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถแก้ไข และกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างอิสระในกรณีที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อาจไม่เป็นที่น่าพอใจ เช่น ค่าที่ได้อ้างไม่มีข่ายอยู่จริงในท้องตลาด ก็จำเป็นที่จะต้องปรับปรุงค่าพารามิเตอร์โดยผู้ออกแบบเอง

โปรแกรมดังกล่าวซึ่งสามารถทำให้ผู้ออกแบบทราบถึงแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อม โดยสามารถลดเวลาในการวิเคราะห์ลงได้ ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อม เช่น ความถี่ และ

พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด โดยจะสามารถทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงได้เช่นกัน

1.2 ความนุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยนำหลักการของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข (Numerical Constrained Optimization Techniques) เข้ามาช่วยในการกำหนดตัวแปรต่างๆ ในการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง โดยตรงซึ่งได้แก่ มิติของแกนเฟอร์ไรร์, ระยะห่างอากาศ, จำนวนรอบในการพันคลัวด, ขนาดของคลัวด และกระแสสูงทางด้าน Primary ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในด้านน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงสามารถนำไปปรับปรุงพารามิเตอร์ตัวอื่นที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมนั่นคือ ความถี่การทำงานของ SMPS และค่าพิกัดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนเฟอร์ไรร์ ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลอย่างไรต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง และค่าใดมีความเหมาะสมที่จะทำให้ผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงมีน้ำหนักน้อยที่สุด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การออกแบบด้วยวิธีเดินต้องอาศัยความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์ของผู้ออกแบบ เป็นอย่างมากในการเลือกใช้วัสดุ, ปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หรือประเมินการอ่ายองร้าวๆ จากข้อมูลใน Data Sheet ของผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรร์ ซึ่งมิอาจให้ผลลัพธ์ของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงหลังจากการออกแบบให้มีค่าน้อยที่สุดได้ จึงแตกต่างจากวิธีที่นำเสนอดังนี้เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข โดยที่ขึ้นตอนดังกล่าวจะมีการวิเคราะห์ว่าตัวแปรแต่ละตัวมีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงແడกต่างกันอย่างไร โดยจะวิเคราะห์แนวโน้มและให้ความสำคัญต่อตัวแปรที่มีผลต่อน้ำหนักมากที่สุดก่อน จากนั้นจะทำการปรับค่าของตัวแปรต่างๆ ให้ได้ผลลัพธ์เป็นน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด ซึ่งถ้าหากได้ผลลัพธ์ในการออกแบบไม่เป็นที่น่าพอใจ หรือค่าที่ได้อ้างไม่มีข่ายอยู่จริงในท้องตลาด ผู้ออกแบบก็สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆ ในขั้นตอน Interactive

นอกจากนี้ขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวมานี้ ได้ถูกสร้างโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีประสิทธิภาพในการคำนวณที่แม่นยำและรวดเร็ว จึงสะดวกต่อผู้ออกแบบในการปรับแต่งพารามิเตอร์ บางตัวเพื่อให้ผลการออกแบบดีที่สุดตามที่ผู้ออกแบบต้องการได้ หรือใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาและวิเคราะห์ว่าพารามิเตอร์แต่ละตัวมีผลอย่างไรต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง

1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

โครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูงที่มีผลต่อน้ำหนักจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน กือ ส่วนที่เป็นแกนเฟอร์ไรต์ และส่วนของชุดลวดที่ใช้ในการพัน ตัวแปรต่างๆ ที่ประกอบอยู่ในโครงสร้างนี้มีทั้งหมด 7 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ E , g , N_p , N_s , d_p , d_s และ $I_{p(max)}$ จะถูกนำมาสร้างเป็นสมการเป้าหมายที่ป็นน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง จากนั้นจะทำการวิเคราะห์เงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง เช่น ความหนาแน่น พลังซึ่งสุดของแกนเฟอร์ไรต์, จำนวนรอบการที่เหมาะสมของชุด Primary และ Secondary เป็นต้น ซึ่งมีทั้งหมด 7 เงื่อนไข

จากนั้นได้มีการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข เข้ามาประยุกต์ใช้ในการปรับค่าตัวแปรที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงทั้งหมด มาทำการหาค่าที่คิดว่าสุดที่จะทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงน้อยที่สุดด้วยเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นได้

นอกจากนี้ ยังได้เพิ่มกระบวนการ Interactive เข้าไปในระบบ กระบวนการดังกล่าว ผู้ออกแบบจะสามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขตัวแปรหรือพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ได้อย่างอิสระ เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อาจให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ เช่น ค่าที่ได้อาจไม่มีข่ายอยู่จริงในท้องตลาด ก็จำเป็นที่จะต้องปรับปรุงค่าพารามิเตอร์โดยผู้ออกแบบเอง

ขั้นตอนดังกล่าวจะถูกนำไปสร้างโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด และจะยังช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์และศึกษาแนวโน้มของพารามิเตอร์ได้ฯ ว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงได้อย่างรวดเร็ว

ในปัจจุบันมีโปรแกรมการคำนวนมากมายที่มีความสามารถในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม แต่โดยในหลักการแล้วก็จะมีรูปแบบ และอัลกอริธึม (Algorithm) ที่คล้ายกัน และถึงแม้ว่าในปัจจุบันได้มีอัลกอริธึม ใหม่ ๆ เกิดขึ้นอย่างมาก แต่จุดประสงค์ก็เพื่อทำให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้นเท่านั้นเอง จุดประสงค์ของบทความนี้จะไม่ได้เน้นอยู่ที่การอธิบายถึงหลักการของ การหาค่าที่เหมาะสมอย่างละเอียด แต่จะเป็นเพียงการแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม กับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์และการออกแบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จะใช้ประโยชน์จาก Optimization Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งจะเลือกใช้วิธี SQP (Sequential Quadratic Programming) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของการวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขโดยวิธีตรง (Direct Method)

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีได้คำนึงถึงผลผลกระทบโดยตรงของค่าความสูญเสียของหม้อแปลงความถี่สูงที่ประกอบไปด้วย ความสูญเสียในแกน และ ความสูญเสียในชุดลวด แต่จะใช้การกำหนดค่าเพื่อสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมเอาไว้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ จะสามารถจ่ายกำลังงานได้เพียงพอต่อความต้องการของ Load สูงสุดที่ต้องถูกจ่ายโดยแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์ที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบ EE เนื่องจากแกนลักษณะดังกล่าวมีหลายขนาดให้เลือกอยู่จำนวนมากในท้องตลาด และมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับแกนในลักษณะอื่น

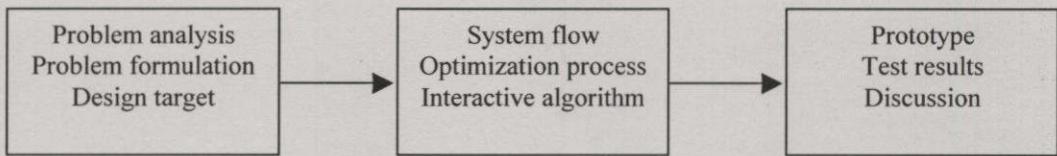
ลักษณะการพัฒนาของชุดลวดจะเป็นแบบแซนวิช กล่าวคือชุดแรกจะเป็นชุด Primary ครึ่งหนึ่ง ต่อมามาเป็นชุด Secondary และตามด้วยชุด Primary ที่เหลืออีกรึ่งหนึ่ง และสุดท้ายเป็นชุดไบอัลไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุมซึ่งอยู่ทาง Primary ทั้งนี้เพื่อลดค่าความเห็นใจนำรั่วไฮโล (Leakage Inductance) ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงความถี่สูง ลักษณะลวดที่ใช้ในการพัฒนาจะเป็นลวดตัวนำแบบธรรมด้าที่ไม่มีการตีเกลียวของกลุ่มลวดตัวนำขนาดเล็กๆรวมกันอย่างเช่นชุดลวดแบบ Litz และขอนให้มีการขนาดลวดตัวนำดังกล่าวเพื่อเพิ่มการรองรับกระแสของลวดตัวนำให้มากขึ้น ได้ไม่เกินกว่า 3 เส้น

ตัวแปรในการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักหม้อแปลงเป็นค่ามิติของแกนเฟอร์ไรต์ จำนวนรอบในการพัฒนาดัดลวด และขนาดของชุดลวด โดยนำเสนอผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งที่มีขนาดแรงดันและกระแสขาออก 5 V / 1.2 A, 12 V / 2 A และ 24 V / 4 A ซึ่งมีความถี่ใช้งานอยู่ที่ 40 kHz, 60 kHz และ 100 kHz ตามลำดับ โครงสร้างหม้อแปลงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุดซึ่งได้จากวิธีที่นำเสนอจะมีค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ และจากผลที่ได้จากการออกแบบนี้สามารถนำไปใช้ศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมเช่นค่าความถี่การทำงานของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่ง และค่าพิกัดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์ และสุดท้าย น้ำหนักของเทปปอนวนจะไม่ถูกนำมาคำนวณเข้ากับน้ำหนักร่วมของหม้อแปลงความถี่สูงแต่ถูกตัดออกไป

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนของการศึกษาโดยที่สามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนดังรูปที่ 1.1 ซึ่งในส่วนแรกจะมีการวิเคราะห์ถึงปัญหาเรื่องการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดนั้นจะต้องคำนึงถึงตัวแปรใดบ้าง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหา และเป้าหมายของการออกแบบ จากนั้นในส่วนที่สองจะทำการออกแบบ

ขั้นตอนและระบบของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข นอกจากนั้นยังได้เพิ่มขั้นตอนที่ผู้ออกแบบสามารถทำการปรับปรุงและแก้ไขค่าของตัวแปรแต่ละตัวได้ ส่วนสุดท้ายจะมีการสร้างต้นแบบเพื่อทำการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่ามีอิทธิพลความถี่สูงที่ได้ออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอสามารถนำไปสร้างและใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยมีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งคำจำกัดความของของตัวแปรแต่ละตัวที่มีอิทธิพลความถี่สูงที่มีผลต่อน้ำหนัก ซึ่งจะแบ่งเป็นสองส่วน โดยในส่วนแรกจะเป็นการอธิบายถึงเกณฑ์เฟอร์ไรต์ และในส่วนที่สองจะเป็นการอธิบายถึงขดลวดที่ใช้พัน

ในบทที่ 3 จะเป็นการแสดงสมการและเงื่อนไขทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบมีอิทธิพลความถี่สูงซึ่งจะประกอบไปด้วยสมการเป้าหมาย สมการเงื่อนไข และ สมการสนับสนุนอื่น ๆ รวมทั้งหลักการของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขเบื้องต้น, ขั้นตอนของการออกแบบของระบบที่สร้างขึ้น และกระบวนการ Interactive

ในบทที่ 4 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองทางกายภาพ และทางไฟฟ้าของมีอิทธิพลความถี่สูงต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ ซึ่งจะทำการสร้างต้นแบบเป็นมีอิทธิพลความถี่สูงที่มีพิกัดกำลังงานขาออกต่างกัน 3 แบบด้วยกัน นอกจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่สามารถลดน้ำหนักของมีอิทธิพลความถี่สูงได้ทางอ้อม รวมทั้งผลของค่าความสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมีอิทธิพลความถี่สูงว่ามีผลอย่างไรต่อมีอิทธิพลความถี่สูงต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นมา

ในบทที่ 5 เป็นการสรุปงานวิจัยทั้งหมด โดยอ้างอิงจากผลการทดลอง, ข้อเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบโดยวิธีทั่วไปและวิธีที่นำเสนอ รวมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

บทที่ 2

หม้อแปลงความถี่สูง

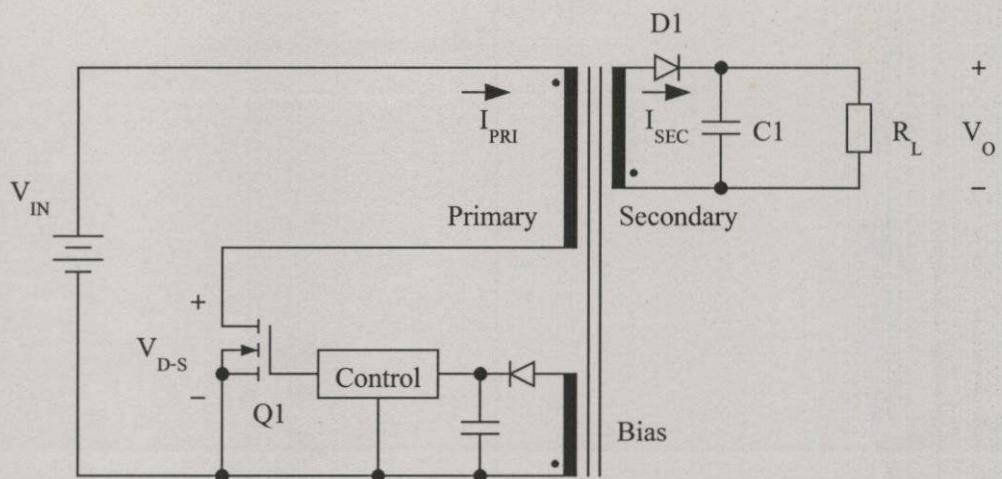
2.1 คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK

วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK สามารถดูได้จากรูปที่ 2.1 ซึ่งหมายเหตุนี้จะแสดงถึงจ่ายไฟที่มีการต่อตรงเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ (Off-Line) และมีการแบ่งแยกออกจากกันทางไฟฟ้า (Isolate) ระหว่างแหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันขาออกกระแสตรง

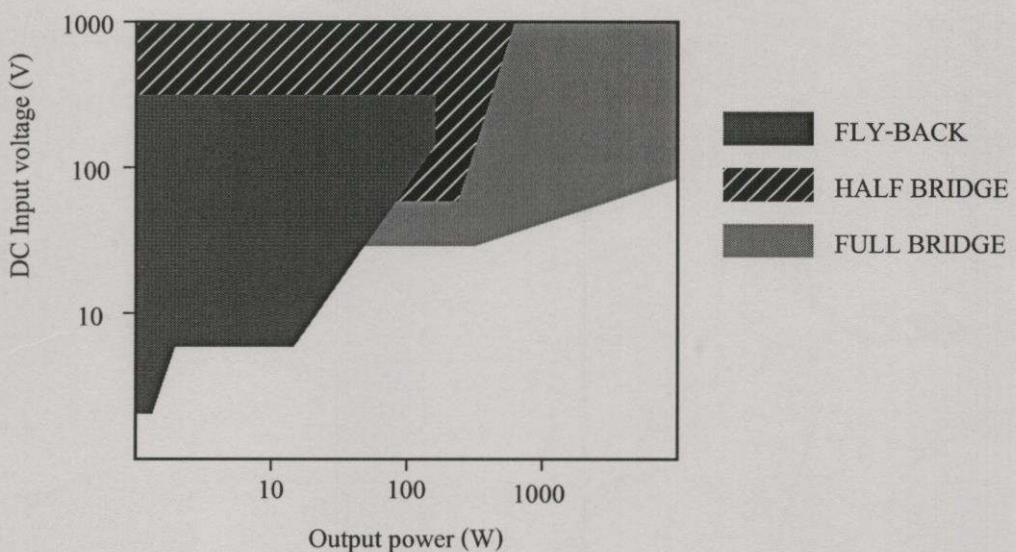
นอกจากนี้คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ยังมีจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่น้อย, สามารถต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดันสูงได้หลายระดับ, มีการป้อนกลับของระดับแรงดันขาออกโดยธรรมชาติ, สามารถจ่ายแรงดันขาออกได้ทางเดียว (Single Output) หลายค่าในเวลาเดียวกัน (Multiple Output), ระดับแรงดันขาออกที่จ่ายสามารถมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันขาเข้า, และสามารถจ่ายแรงดันขาออกที่เป็นบวกหรือลบกันได้

โดยส่วนใหญ่แหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งที่มีการต่อตรงเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ (Off-Line) จะต้องทำการแบ่งแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่ทางแหล่งกำเนิดแรงดันสูง (Primary) และแรงดันขาออก (Secondary) ออกจากกันเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยของประเทศไทย หรือของสถาบันซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้หม้อแปลงในการแปลงระดับแรงดันและแบ่งแยกระหว่างทาง Primary และ Secondary ออกจากกัน นอกจากนี้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งยังต้องการตัวหนีชวน (Inductor) เพื่อใช้ในการเก็บสะสมพลังงานและยังเป็นตัวรองความถี่ต่ำให้ผ่านไป (Low-Pass Filter) ทั้งนี้ก็เพื่อทำการแปลงรูปคลื่นแรงดันที่มีการกระแสเพื่อม (Pulse Width Modulation) ให้กลายเป็นแรงดันกระแสตรง คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดีในยานพาณิชย์งานค้า เนื่องจากมีหม้อแปลงซึ่งทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน, แบ่งแยกระหว่างทาง Primary ออกจาก Secondary และแปลงระดับแรงดันให้ภายในหม้อแปลงตัวเดียวกัน

ถ้าหากนำไปเปรียบเทียบกับคอนเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆแล้ว คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK จะมีจำนวนอุปกรณ์แม้จะลึกน้อยที่สุดเป็นผลให้ราคาน้ำหนักต่ำที่สุด แต่ความได้เปรียบของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK นี้จะถูกจำกัดอยู่ที่กำลังขาออกไม่เกิน 100-150 W ดังรูปที่ 2.2 [3] หรือกระแสขาออกไม่เกิน 10 A เนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆจะต้องมีพิกัดทางไฟฟ้าสูงเกินไปเป็นผลให้ราคากลับแพงมากขึ้น



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของคุณเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK



รูปที่ 2.2 ย่านพิกัดกำลังขาออกและโวลท์เพดานของคุณเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK เมื่อเทียบกับคุณเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆ

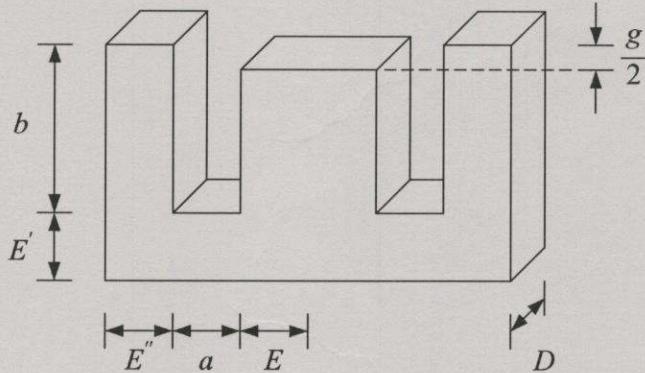
ข้อดีอี่นๆของคุณเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ก็คือ แรงดันป้อนกลับ (Feedback Voltage) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันขาออกซึ่งสามารถตรวจสอบระดับแรงดันขาออกนี้ได้โดยตรงจากชุดป้อนกลับ (Feedback Winding) ของหม้อแปลง นั่นคือ แรงดันที่อยู่ทางฝั่ง Secondary จะถูกควบคุมโดยแรงดันทางฝั่ง Primary โดยปราศจากการใช้ Photo Coupler หรือ อุปกรณ์เชื่อมต่อชนิดอื่นที่

มีการแยกกันทางไฟฟ้า หรือแม้แต่แรงดันขาออกหลายค่า (Multiple Output) และแรงดันบวกหรือลบก็สามารถใช้ประโยชน์จากการควบคุมทาง Primary ได้ เช่น กัน (ภาคผนวก ก)

2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูงและคำจำกัดความ

2.2.1 โครงสร้างของแกน

แกนที่นิยมใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของเหล็กจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง กีวีอีแกน EE ดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและยังมีหลายขนาดให้เลือกแตกต่างกันไป ซึ่งข้อมูลมิติของโครงสร้างของแกนสามารถพิจารณาได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตแต่ละบริษัท แต่โดยทั่วไปแล้วมิติที่สำคัญของแกนจะมีอยู่ 4 ค่า คือความกว้างครึ่งหนึ่งของขากลาง (E) ความหนาแกนกลาง (D) ความกว้างช่องพันขาดลวด (a) และความสูงครึ่งหนึ่งของช่องพันขาดลวด (b)



รูปที่ 2.3 มิติโครงสร้างของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE

แต่โดยทั่วไปค่าของ E จะมีความสัมพันธ์กับ D ด้วยค่าคงที่ K_1 และค่าของ a จะมีความสัมพันธ์กับ b ด้วยค่าคงที่ K_2 [2] ดังนี้

$$D = 2EK_1 \quad (2.1)$$

$$b = \frac{aK_2}{2} \quad (2.2)$$

โดยค่าของ K_1 จะมีค่าประมาณ 1~2 และ K_2 จะมีค่าประมาณ 1~3

จะเห็นได้ว่า จำนวนตัวแปรที่แสดงมิติของแกนสามารถลดลงได้โดยอาศัยค่าคงที่ K เพื่อความสะดวกของงานวิจัยนี้ นอกจากราคาการลดตัวแปร D และ b ลงโดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการข้างต้นแล้ว จะได้มีการทำการทำลดตัวแปร a, E' และ E'' ลงอีกโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$a = EK_3 \quad (2.3)$$

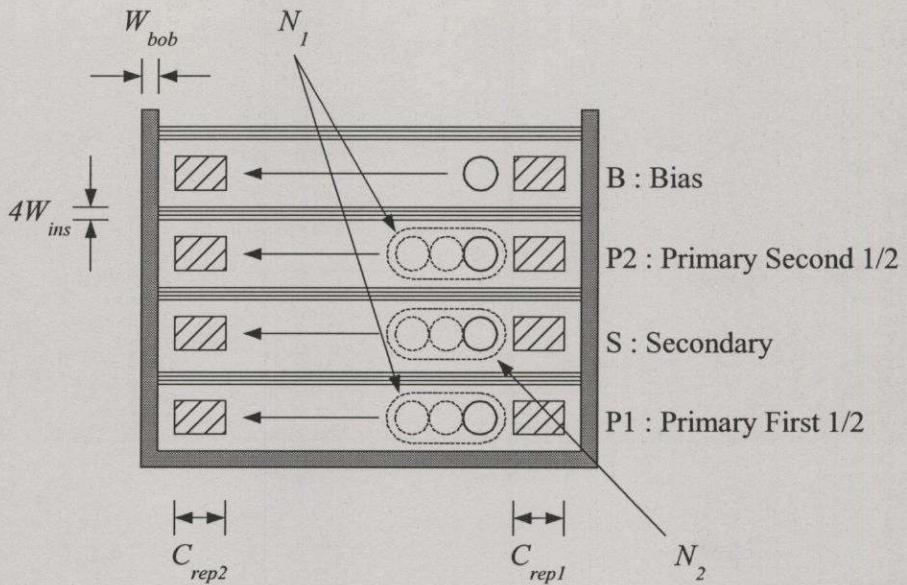
$$E' = EK_4 \quad (2.4)$$

$$E'' = EK_5 \quad (2.5)$$

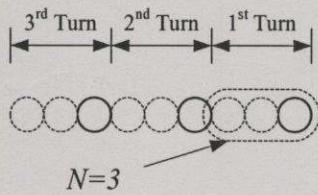
ค่าคงที่ K ได้จากอาศัยการคำนวณหาค่าเฉลี่ยจาก Data Sheet ของผู้ผลิตแกนแต่ละรายสำหรับสมการที่ 2.1 ถึง 2.5 จะถูกใช้ในการประมาณค่าของมิติต่างของแกนเพอร์ไทร์ในการออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดโดยกระบวนการหาราคาที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) เท่านั้น ส่วนกระบวนการในรอบต่อๆ ไป จะใช้ค่าที่มาจาก Data Sheet ของผู้ผลิตแกนแต่ละราย ตามเบอร์ของแกนที่ถูกเลือกภายหลังจากการกระบวนการในรอบแรก (Loop 1) เสร็จสิ้น ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้ในหัวข้อที่ 3.4

2.2.2 โครงสร้างการพันของขดลวด

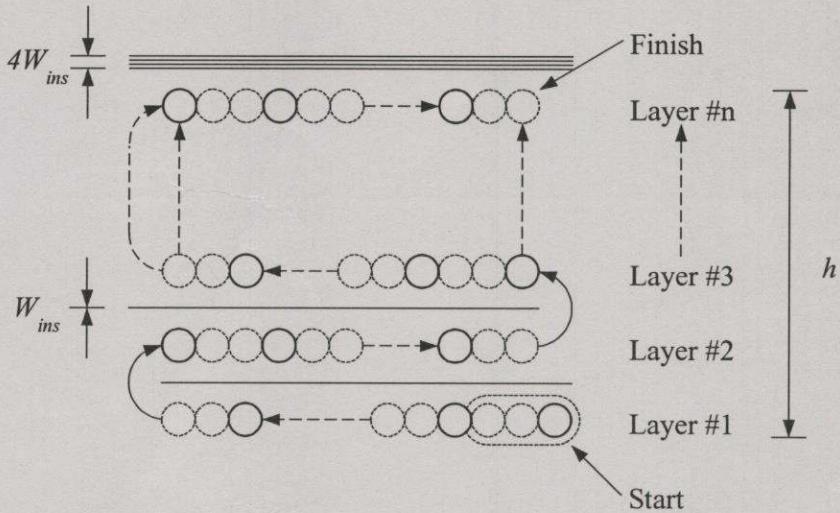
ลักษณะการพันขดลวดในหน้าแปลงความถี่สูงมีอยู่หลายวิธี แต่โดยทั่วไปจะมีลักษณะการพันที่เป็นแบบแซนวิช โดยที่ขดแรกจะเป็นขด Primary ครึ่งหนึ่ง (P1) ต่อมานำเป็นขด Secondary (S) และตามด้วยขด Primary ที่เหลืออีกครึ่งหนึ่ง (P2) และสุดท้ายเป็นขดใบอัลไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุมซึ่งอยู่ทาง Primary (B) ดังรูปที่ 2.4 ทั้งนี้เพื่อลดค่าความเหนี่ยววนรั่วไฮโล (Leakage Inductance) ที่เกิดขึ้นในหน้าแปลงความถี่สูง ความหมายของสัญลักษณ์ต่างๆ ในรูปที่ 2.4 สามารถดูได้จากตารางที่ 2.1 โดยปกติการพันขดลวดที่ดีควรจะพันให้เรียงชิดติดกัน (Perfect Winding) แต่ในทางปฏิบัติ บางครั้งช่องพันขดลวดที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะพันขดลวดให้เต็มพอดีได้ในชั้นนั้นๆ จะใช้ลักษณะการพันแบบมีช่องว่าง (Space Winding) เพื่อให้การคับปลิง (Coupling) ระหว่างขดเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์มากที่สุด นอกจากนี้ในการพันขดลวดเพื่อที่จะลดค่าความด้านทานของลวดทองแดงบางครั้งจำเป็นต้องใช้ลวดทองแดงมาพันบนกัน แล้วพันให้ได้ครบตามจำนวนรอบนั้น ลักษณะการพันดังกล่าวแสดงได้ในรูปที่ 2.5 การขนาดลวดทองแดงมากกว่า 3 เส้น มักไม่นิยมทำกัน เพราะจะพันขดลวดได้ลำบากหรืออาจทำให้ขดลวดสูงเกินกว่าที่จะพันบนบนอบบืน [4, 5]



รูปที่ 2.4 ลักษณะการพันขดลวดแบบแซนวิช



รูปที่ 2.5 การพันลวดแบบขานกัน



รูปที่ 2.6 การพันขดลวดในกรณีที่มีหลายเลเยอร์ (Layer)

ในงานวิจัยนี้จะอาศัยการพันชุดลวดแบบแซนวิชที่เรียงชิดติดกัน (Perfect Winding) และมีการย้อมให้มีการพันชุดลวดทองแดงแบบบานานกันได้ไม่เกิน 3 เส้น นอกจากนี้ หากการพันชุดลวดชุดใดที่จำเป็นที่จะต้องมีการพันหลายเลเยอร์ (Layer) ก็จำเป็นที่จะต้องมีการพันเทปปิดหนึ่งรอบ คัน ไว้ในแต่ละเดเยอร์ด้วยดังรูปที่ 2.6

2.3 พารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

พารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่จะใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดนั้นจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ SMPS ชนิด FLY-BACK

(เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร)

Symbols	Description	Unit
D_c	Core density	kg/mm ³
μ_i	Initial permeability	-
D_p	Primary winding density	kg/mm ³
D_s	Secondary winding density	kg/mm ³
D_b	Bias winding density	kg/mm ³
W_{bob}	Bobbin thickness	mm
W_{ins}	Insulation thickness	mm
N_b	Bias turns	turns
d_b	Bias winding diameter	mm
$I_{p(max)Limit}$	Maximum primary current limit	A
$B_{(max)Limit}$	Maximum flux density limit	T
V_o	Output voltage	V
$I_{o(max)}$	Maximum output current	A
$D_{(min)Limit}$	Minimum duty cycle limit	-
$D_{(max)Limit}$	Maximum duty cycle limit	-

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

Symbols	Description	Unit
$V_{in(min)}$	Minimum input voltage	V
$V_{in(max)}$	Maximum input voltage	V
$V_{d(max)}$	Maximum dropout voltage across diode	V
C_{rep1}	Safety creepage distance from primary	mm
C_{rep2}	Safety creepage distance from secondary	mm
f	Frequency	kHz
$V_{DS(max)Limit}$	Maximum Drain-Source voltage limit	V
N_1	Number of primary parallel winding	turns
N_2	Number of secondary parallel winding	turns
T_{mar}	Transformer design margin	-
$g_{(min)Limit}$	Minimum gap length limit	mm
$g_{(max)Limit}$	Maximum gap length limit	mm
E	Half of center leg width *	mm
g	Air gap length *	mm
N_p	Primary turns *	turns
N_s	Secondary turns *	turns
d_p	Primary winding diameter *	mm
d_s	Secondary winding diameter *	mm
$I_{p(max)}$	Maximum primary current *	A

จากตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์และตัวแปรเหล่านี้ จะนำไปใช้ในการสร้างสมการเป้าหมาย (Objective Function) ซึ่งเป็นสมการน้ำหนักของหมวดแปลงและสมการเงื่อนไข (Constraint Function) โดยที่พารามิเตอร์ที่กำหนดให้เป็นตัวแปรมีทั้งหมด 7 ตัวด้วยกัน ได้แก่ E, g, N_p, N_s, d_p, d_s และ $I_{p(max)}$ ส่วนพารามิเตอร์ที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาก็จะเป็นค่าคงที่ที่ผู้ออกแบบสามารถกำหนดขึ้นเองหรือเปิดคูดูได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตแต่ละราย ได้อย่างอิสระ

บทที่ 3

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

3.1 หลักการของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข เบื้องต้น

โดยทั่วไปปัญหาในการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม จะเป็นการหาเซตของตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบ $x = (x_1, \dots, x_n)$ ซึ่งจะมีค่านี้ที่เหมาะสม ในเบื้องต้นจะเป็นการหาค่าค่าที่สุดหรือสูงที่สุดของระบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า x ส่วนในระดับที่สูงขึ้นจะมีการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ซึ่งสามารถเขียนในรูป $F(x)$ ภายใต้เงื่อนไขของการเท่ากัน (Equality Constraints) ซึ่งสามารถเขียนในรูป $h_j(x) = 0$, เงื่อนไขของการไม่เท่ากัน (Inequality Constraints) ซึ่งสามารถเขียนในรูป $g_k(x) \leq 0$ และ/หรือ พารามิเตอร์ขอบเขต (Side Constraints) ซึ่งสามารถเขียนในรูป x_i^L, x_i^U

$$\text{Minimise} \quad F(x) \quad \text{objective function} \quad (3.1)$$

Subject to :

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, m \quad \text{Equality Constraints} \quad (3.2)$$

$$g_k(x) \leq 0 \quad k = 1, \dots, l \quad \text{Inequality Constraints} \quad (3.3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, n \quad \text{Side Constraints} \quad (3.4)$$

โดยที่ให้ x เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรในการออกแบบ ($x \in \mathbb{R}^n$), $F(x)$ เป็นสมการเป้าหมายซึ่งจะให้ค่าที่เป็นจำนวนสเกลลาร์ ($F(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$) และเวกเตอร์ของฟังก์ชัน $h_j(x) = 0$ ซึ่งจะให้ค่าของเงื่อนไขของการเท่ากันและ $g_k(x) \leq 0$ ซึ่งจะให้ค่าของเงื่อนไขของการไม่เท่ากันที่ถูกวิเคราะห์ในช่วง $x(h_j(x), g_k(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m)$

ประสิทธิภาพและความแม่นยำในการหาค่าตอบของปัญหาจะไม่เพียงขึ้นกับขนาดของปัญหาที่มีจำนวนตัวแปรและจำนวนเงื่อนไขที่มากแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมด เมื่อสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) จะถูกเรียกว่า Linear Programming (LP) สำหรับสมการเป้าหมายที่มีลักษณะที่เป็นฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic Function) จะถูกเรียกว่า Quadratic Programming (QP) ซึ่งทั้งสองลักษณะจะมีขั้นตอนวิธีการหาค่าตอบที่แน่นอนและง่ายแต่สำหรับปัญหาที่ไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น Nonlinear Programming (NP) ซึ่งจะมีสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขที่ไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Nonlinear Function) จะมีวิธีการหาค่าตอบที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่า โดยทั่วไปจำเป็นที่จะต้องมีขั้นตอนในการหาทิศทางการกระโดด (Search

Direction) ของการคำนวณในแต่ละครั้ง โดยที่ขั้นตอนเหล่านี้สามารถหาได้จากการหาคำตอบโดยวิธีการแบบเดียวกับ LP, QP หรือ ปัญหาอย่างเดียวไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Sub-problem)

ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขเข้ามาช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทั้งหมด 7 ตัวเพื่อทำให้โครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูง มีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด ซึ่งจะเห็นได้ว่า สมการเป้าหมายคือสมการของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่เป็นพึงขั้นของตัวแปรทั้งหมด 7 ตัว โดยมีสมการเงื่อนไขต่างๆ นั้นคือ เงื่อนไขในการออกแบบที่กำหนด โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ประโยชน์จาก Optimization Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขของตัวแปรทั้งหมดซึ่งจะเลือกใช้วิธี SQP (Sequential Quadratic Programming) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขโดยตรง (Direct Method) [6, 7] (ภาคผนวก ข)

3.2 สมการเป้าหมายของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง

ในการพิจารณาคำนวณน้ำหนักของส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างหม้อแปลงความถี่สูงสามารถจำแนกได้เป็นดังนี้

3.2.1 น้ำหนักของแกนเฟอร์ไรร์

การคำนวณน้ำหนักของแกนเฟอร์ไรร์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$W_c = 2DD_c[2bE'' + 2aE' + (2b - g)E + 2EE' + 2E'E''] \times 1000 \quad (3.5)$$

และจากสมการที่ 2.1 – 2.5 นั้นคือค่า D, b, a, E', E'' จะมีความสัมพันธ์กับ E ด้วยค่าคงที่ K_1, K_2, K_3, K_4 และ K_5 ตามลำดับ

3.2.2 น้ำหนักของขดลวด Primary

จากลักษณะการพันที่เป็นแบบแซนวิช นั้นคือ ขด Primary จะพันประกอบกับขด Secondary ด้านบนและด้านล่าง ทำให้การพิจารณาคำนวณน้ำหนักของขดลวด Primary ชุดแรกที่ถูกพันลงไปจะหนำแน่น้ำหนักได้จาก

$$W_{p1} = N_1 \times D_p \times MLT_{p1} \times \frac{N_p}{2} \times A_p \times 1000 \quad (3.6)$$

โดยที่ MLT_{p1} คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันรอบแกน 1 รอบ ของขดลวดชุดแรก ซึ่งจะหาได้จาก

$$MLT_{p1} = C_{bob} + \pi \cdot d_p \quad (3.7)$$

โดยที่ C_{bob} คือ ความยาวของเส้นรอบวงของแกนกลางที่ถูกสวมด้วยบอนบินที่จะใช้ในการพัน นั้นคือ

$$C_{bob} = 2(2E + 2W_{bob}) + 2(D + 2W_{bob}) \quad (3.8)$$

และ A_p คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด Primary ไม่รวมจำนวนช่องหาได้จาก

$$A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2 \quad (3.9)$$

ส่วนขดลวดชุดที่สองที่พันลงไปหลังจากพันขด Secondary จะหนาแน่นก็ได้จาก

$$W_{p2} = N_1 \times D_p \times MLT_{p2} \times \frac{N_p}{2} \times A_p \times 1000 \quad (3.10)$$

โดยที่ MLT_{p2} คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันรอบแกน 1 รอบของลวดชุดที่สอง หาได้โดย

$$MLT_{p2} = C_{bob} + 2\pi(d_p + 8W_{ins} + d_s + \frac{d_p}{2}) \quad (3.11)$$

3.2.3 หนาแน่นของขดลวด Secondary

การคำนวณหนาแน่นของขดลวด Secondary สามารถคำนวณได้จาก

$$W_s = N_2 \times D_s \times MLT_s \times N_s \times A_s \times 1000 \quad (3.12)$$

โดยที่ MLT_s คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันรอบแกน 1 รอบ ของขดลวด Secondary ซึ่งจะหาได้จาก

$$MLT_s = C_{bob} + 2\pi(d_p + 4W_{ins} + \frac{d_s}{2}) \quad (3.13)$$

และ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด Secondary ไม่รวมจำนวนช่องที่ได้จาก

$$A_s = \frac{\pi}{4} d_s^2 \quad (3.14)$$

3.2.4 น้ำหนักของขดลวด ใบอัส

ถึงแม้ขด ใบอัส มีจำนวนรอบที่น้อยและมีขนาดลดลงที่ไม่ใหญ่นัก ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องนำมาคิดก็ได้ แต่ถ้าหากผู้ออกแบบมีความต้องการที่จะพิจารณาถึงน้ำหนักของขด ใบอัส ก็สามารถหาได้จากการน้ำหนักของขด ใบอัส นั่นคือ

$$W_b = D_b \times MLT_b \times N_b \times A_b \times 1000 \quad (3.15)$$

โดยที่ MLT_b คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันรอบแกน 1 รอบ ของขดลวด ใบอัส ซึ่งหาได้จาก

$$MLT_b = C_{bob} + 2\pi(d_p + 9W_{ins} + d_s + d_p + \frac{d_b}{2}) \quad (3.16)$$

และ A_b คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด ใบอัส ไม่รวมจำนวนช่องที่ได้จาก

$$A_b = \frac{\pi}{4} d_b^2 \quad (3.17)$$

นอกจากสมการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ก็อาจรวมถึงน้ำหนักของส่วนประกอบอื่นๆ ที่เหลืออีก เช่น น้ำหนักของเทปปนวน ซึ่งในบทความนี้ จะถือว่าไม่มีผลต่อน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงแต่อย่างใด และเมื่อรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกันก็จะกลายเป็นสมการน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปร 7 ตัว ดังนี้

$$W_{trans} = W_c + W_{p1} + W_{p2} + W_s + W_b \quad (3.18)$$

3.3 สมการเงื่อนไขต่างๆ และขอบเขตของการออกแบบหนึ่งที่แปลงความถี่สูง

การออกแบบหนึ่งที่แปลงความถี่สูงให้มีหนักน้อยที่สุดนั้นจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดเพื่อให้มีหนึ่งที่แปลงมีการทำงานที่ถูกต้องและมีความเป็นไปได้ในการสร้างจริง ซึ่งมีเงื่อนไขต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 ค่าความหนึ่งที่ของขดลวด Primary

เนื่องจากพลังงานที่ถูกถ่ายทอดมาอย่างด้าน Secondary จะถูกสะสมอยู่ในรูปพลังงานแม่เหล็กที่ขด Primary โดยสามารถเขียนสมการการถ่ายทอดกำลังงานได้ดังนี้

$$\frac{1}{2} L_p I_{p(\max)}^2 f \geq V_o I_{o(\max)} T_{mar} \quad (3.19)$$

โดยที่ L_p คือ ค่าความหนึ่งที่ของขดลวด Primary โดยคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$L_p = N_p^2 \times AL \times 10^{-9} \quad (3.20)$$

ค่า AL คือค่า core factor ซึ่งประมาณได้จากสมการต่อไปนี้ [8, 9]

$$AL = \frac{1.257 A_e}{l_{av}} \cdot \frac{\mu_i}{1 + \frac{g\mu_i}{l_{av}}} \quad (3.21)$$

ค่า l_{av} คือความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็กซึ่งประมาณค่าได้จาก

$$l_{av} = (2a + 4b) + \pi E - g \quad (3.22)$$

ค่า A_e คือพื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์ขากลางซึ่งประมาณค่าได้จาก

$$A_e = 2E \cdot D \quad (3.23)$$

สำหรับสมการที่ 3.19 จะถูกใช้ในการประมาณค่าของ A_e ใน การออกแบบหนึ่งที่แปลงความถี่สูงให้มีหนักน้อยที่สุด โดยกระบวนการหาราค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) เท่านั้น ส่วนกระบวนการในรอบต่อๆ ไป จะใช้ค่าที่มาจากการ Data Sheet ของผู้ผลิตแกนแต่ละราย ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้ในบทที่ 4.1

3.3.2 ความเวลาในการ On และ Off ที่เหมาะสม

ให้ความเวลาในการ On และ Off ของกระแสที่ขด Primary และ Secondary เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ตามลำดับ ณ ความถี่ใช้งานของ SMPS โดยจะยังคงสภาพการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode : DCM) เนื่องจากเป็นการทำงานที่มีเสถียรภาพที่ดีกว่าโหมดกระแสต่อเนื่อง (Continuous Current Mode : CCM)

สมการการ $t_{on(max)}$ และ $t_{off(max)}$ สูงสุดจะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$t_{on(max)} = \frac{L_p I_{p(max)}}{V_{in(min)}} \quad (3.24)$$

$$t_{off(max)} = \frac{L_s I_{s(max)}}{V_{out} + V_{d(max)}} \quad (3.25)$$

เพื่อเป็นการลดพารามิเตอร์ลง ด้วยคุณสมบัติของหม้อแปลงนั้นคือความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของค้าน Primary กับ Secondary จะมีความสัมพันธ์ด้วย Transformer Ratio

$$ratio = \frac{N_p}{N_s} \quad (3.26)$$

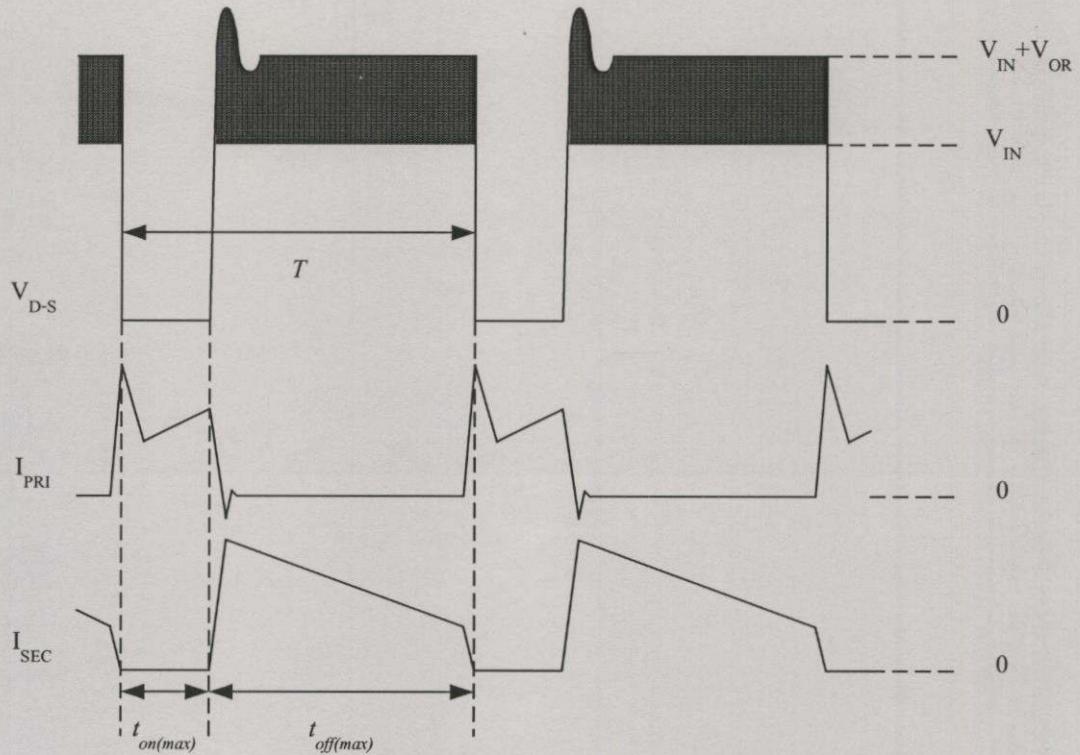
ฉะนั้น พารามิเตอร์ของตัวแปรทางฝั่ง Secondary จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรทางฝั่ง Primary ได้ดังนี้

$$I_{s(max)} = ratio \cdot I_{p(max)} \quad (3.27)$$

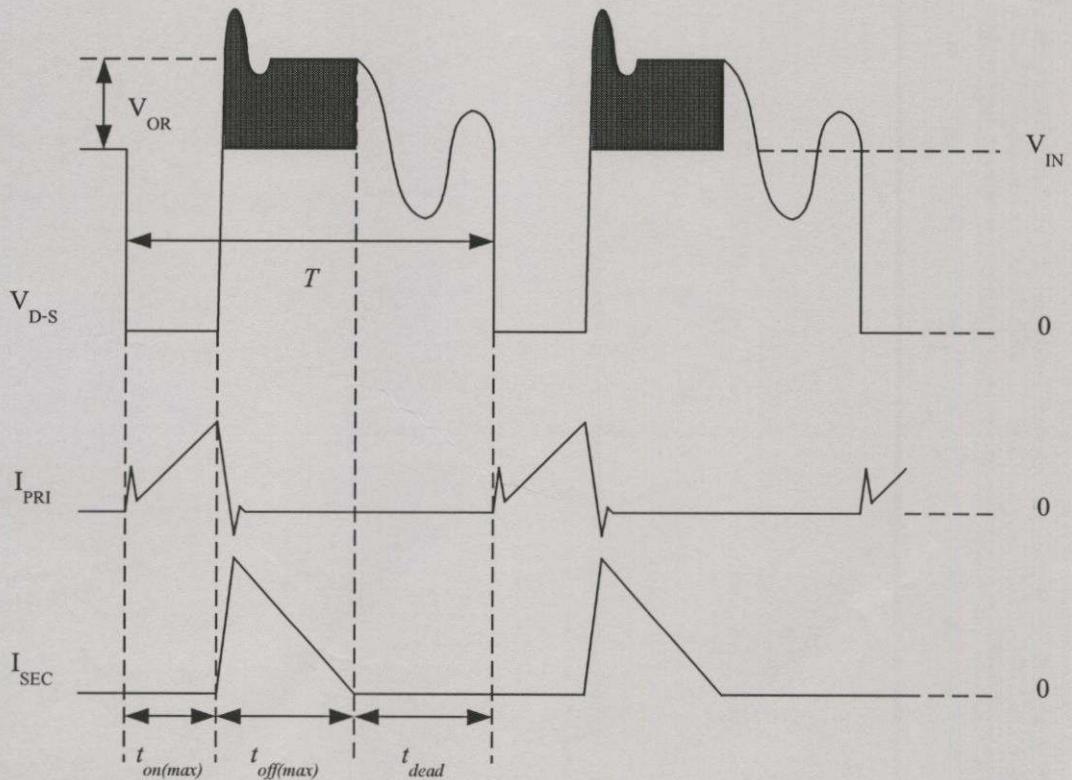
$$L_s = \frac{L_p}{ratio^2} \quad (3.28)$$

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 ค่า $t_{on(max)}$ และ $t_{off(max)}$ จะมีค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อ SMPS ทำการจ่าย Load สูงสุดตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ เพื่อคงสภาพการทำงานในโหมด DCM เวลาเพื่อ (Dead time : t_{dead}) โดยทั่วไปจะกำหนดคอยู่ที่ 20% ของความเวลารวมทั้งหมด [4] ฉะนั้นเราสามารถกำหนดเงื่อนไขของความเวลาในการ On และ Off ได้ดังนี้

$$t_{on(max)} + t_{off(max)} \leq \frac{0.8}{f} \quad (3.29)$$



รูปที่ 3.1 ค่าเวลากำหนดการทำงานในแบบ CCM



รูปที่ 3.2 ค่าเวลากำหนดการทำงานในแบบ DCM

โดยทั่วไป ความเวลาในการ On จะถูกกำหนดอยู่ที่ประมาณ 30% - 40% ของความเวลารวมทั้งหมด แต่ในงานวิจัยนี้ ผู้ออกแบบสามารถที่จะกำหนดความเวลาดังกล่าวได้โดยกำหนดจากค่า $D_{(max)Limit}$ และ $D_{(min)Limit}$ นั่นคือ

$$\frac{D_{(min)Limit}}{f} \leq t_{on(max)} \leq \frac{D_{(max)Limit}}{f} \quad (3.30)$$

3.3.3 แรงดันต่อกลุ่มสูงสุดที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET

ในระหว่างที่ฝั่ง Primary ทำการ Off และ Secondary ทำการ On จะเกิดแรงดันสะท้อน (V_{OR}) มาข้างคด Primary ดังที่เห็นในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันต่อกลุ่มที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET ในปริมาณที่สูง [4, 5, 10] จึงจำเป็นที่จะต้องจำกัดแรงดันสะท้อนนี้ไม่ให้มีค่าเกินกว่าพิกัดทันแรงดันของ MOSFET ในกรณีที่แรงดันขาเข้ามีค่าสูงสุด ซึ่งจะหาได้จาก

$$V_{DS(max)} \leq V_{DS(max)Limit} \quad (3.31)$$

ค่า $V_{DS(max)}$ คือแรงดันที่ปรากฏอยู่ระหว่างขา Drain และ Source ของ MOSFET โดยเป็นผลรวมมาจากค่าของค่าของแรงดันสไปค์ (V_{spike}) แรงดันขาเข้าสูงสุด ($V_{in(max)}$) และ แรงดันสะท้อน ดังกล่าว โดยค่าแรงดันสะท้อนนี้จะมีผลมาจากการอัตราส่วน *ratio* สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_{DS(max)} = V_{spike} + V_{in(max)} + ratio(V_{d(max)} + V_o) \quad (3.32)$$

ค่า V_{spike} โดยทั่วไปสามารถประมาณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [4]

$$V_{spike} = 0.3V_{in(max)} \quad (3.33)$$

3.3.4 ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักช์แม่เหล็กสูงสุดในแกน

เพื่อป้องกันการอิมตัวที่จะเกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีอเปลกความถี่สูงจ่ายกำลังสูงสุดจะต้องมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดที่ผู้ผลิตกำหนดมาโดยจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$B_{(max)} \leq B_{(max)Limit} \quad (3.34)$$

ค่า $B_{(max)}$ สามารถหาได้จาก

$$B_{(max)} = \frac{L_p I_{p(max)} \times 10^6}{A_e N_p} \quad (3.35)$$

ค่า A_e สามารถประมาณค่าได้จาก

$$A_e = 2E \times D \quad (3.36)$$

สำหรับสมการที่ 3.31 จะถูกใช้ในการประมาณค่าของ A_e ในกระบวนการหาราค่าที่เหมาะสม แบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) เท่านั้น แต่ในกระบวนการรอบถัดไปจะใช้ค่าที่มาจากการ Data Sheet ของผู้ผลิตแกนแต่ละรายตามเบอร์ของแกนที่ถูกเลือกภายหลังจากการวนการในรอบแรก (Loop 1) เสร็จสิ้น ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้ในหัวข้อที่ 3.4

3.3.5 พื้นที่ในการพันขดลวด

จากรูปที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 โครงสร้างของหม้อแปลงที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ก็คือการนำขดลวดต่างๆ, ระยะคีบคลานที่ปลอดภัย (Safety Creepage Distance), เทปปอนวน และ บอนบัน บรรจุลงไปในช่องว่างการพันของแกนได้ จะเห็นได้ว่าระยะ a มีความสำคัญมากที่สุด ในขดลวดแต่ละชุดถ้าหากมีการพันที่มีจำนวนรอบมาก จำนวนเลเยอร์ (Layer) ก็จะมากตามไปด้วย ทำให้ระยะความสูงของขดลวดแต่ละชุด (h) มากขึ้น พารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้ หาได้จาก

$$h_p = Od_p \cdot LAY_p \quad (3.37)$$

$$h_s = Od_s \cdot LAY_s \quad (3.38)$$

$$h_b = Od_b \cdot LAY_b \quad (3.39)$$

เงื่อนไขในการพันขดลวดบนแกนจึงหาได้จาก

$$a \geq W_{bob} + 2h_p + h_s + h_b + 13W_{ins} + 2(LAY_p - 1)W_{ins} + (LAY_s - 1)W_{ins} \quad (3.40)$$

ค่า LAY_p , LAY_s และ LAY_b คือจำนวนเลเยอร์ของคลัวด Primary, ชด Secondary และชด ในอัตราตามลำดับ โดยการปักเศษจำนวนเลเยอร์ของคลัวดแต่ละชดที่คำนวณได้จริง เป็นจำนวนเดิมนั่นคือ

$$LAY_p = lay_{p1} = lay_{p2} \quad (3.41)$$

$$LAY_s = lay_s \quad (3.42)$$

$$LAY_b = lay_b \quad (3.43)$$

ค่า lay_{p1} , lay_{p2} , lay_s และ lay_b คือจำนวนเลเยอร์ของคลัวด Primary ชดแรก, ชด Primary ชดที่สอง, ชด Secondary และชด ในอัตราที่คำนวณได้จริงตามลำดับ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$lay_{p1} = \frac{N_1 N_p Od_p}{2(2b - 2W_{bob} - Crep_1 - Crep_2)} \quad (3.44)$$

$$lay_{p2} = lay_{p1} \quad (3.45)$$

$$lay_s = \frac{N_2 N_s Od_s}{2b - 2W_{bob} - Crep_1 - Crep_2} \quad (3.46)$$

$$lay_b = \frac{N_b Od_b}{2b - 2W_{bob} - Crep_1 - Crep_2} \quad (3.47)$$

โดยที่ Od_p , Od_s และ Od_b คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของคลัวร์วนบนของลวดทองแดงในแต่ละชด เส้นผ่านศูนย์กลางของคลัวร์วนบนของคลัวดในแต่ละชนิดสามารถประมาณค่าได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำดังตัวอย่างของลวดชนิดต่างๆ ดังใน [11]

ขดลวดขนาดมาตรฐาน NEMA MW-1000 (Heavy)

$$Od_p = 1.0999 \cdot d_p^{0.9374} \quad (3.48)$$

$$Od_s = 1.0999 \cdot d_s^{0.9374} \quad (3.49)$$

$$Od_b = 1.0999 \cdot d_b^{0.9374} \quad (3.50)$$

ขดลวดขนาดมาตรฐาน JIS (Class 1)

$$Od_p = 1.0411 \cdot d_p + 0.0434 \quad (3.51)$$

$$Od_s = 1.0411 \cdot d_s + 0.0434 \quad (3.52)$$

$$Od_b = 1.0411 \cdot d_b + 0.0434 \quad (3.53)$$

ขดลวดขนาดมาตรฐาน JIS (Class 2)

$$Od_p = 1.0392 \cdot d_p + 0.0219 \quad (3.54)$$

$$Od_s = 1.0392 \cdot d_s + 0.0219 \quad (3.55)$$

$$Od_b = 1.0392 \cdot d_b + 0.0219 \quad (3.56)$$

สำหรับสมการที่ 3.48 ถึง 3.56 เป็นตัวอย่างของขนาดขดลวดตามมาตรฐานต่างๆ (ภาค พนวก ช) ซึ่งจะถูกใช้ในการประมาณค่าของ Od_p , Od_s และ Od_b ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม แบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) จนถึงรอบที่สาม (Loop 3) เท่านั้น ส่วนกระบวนการในรอบสุดท้าย (Loop 4) จะใช้ค่าที่มาจากการคำนวณขดลวดแต่ละชนิดตามขนาดขดลวดที่ถูกเลือกภายหลัง จากกระบวนการในรอบที่สาม (Loop 3) เสร็จสิ้น ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้ในหัวข้อที่ 3.4

สำหรับขดใบอัลลอยด์เป็นขดที่ไม่ค่อยมีความสำคัญมากนัก ค่า d_b และ N_b จะไม่ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรเนื่องจากจะสามารถลดความซับซ้อนของสมการและกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม

แบบมีเงื่อนไขในการออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงลงได้ ค่า d_b และ N_b จึงถูกกำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ออกแบบสามารถกำหนดได้อย่างอิสระเหมือนกับพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 2.1

3.3.6 ขนาดคลัวที่ใช้ในการพันที่เหมาะสม

ในการรองรับกระแสที่ไหลในขด Primary และ Secondary ซึ่งสามารถกำหนดให้อยู่ในเทอมของ Circular Mils per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าปกติของค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) [10, 12] ค่าของ CMA ที่เหมาะสมของขด Primary และ Secondary สามารถหาได้จาก

$$300 \leq CMA_p \leq 500 \quad (3.57)$$

$$300 \leq CMA_s \leq 500 \quad (3.58)$$

ซึ่ง CMA_p และ CMA_s เป็นค่า CMA ของขด Primary และ Secondary ตามลำดับ โดยหาได้จาก

$$CMA_p = \frac{0.9975 \times N_1 d_p^2}{I_{p(\max)rms}} \times \left(\frac{1000}{25.4} \right)^2 \quad (3.59)$$

$$CMA_s = \frac{0.9975 \times N_2 d_s^2}{I_{s(\max)rms}} \times \left(\frac{1000}{25.4} \right)^2 \quad (3.60)$$

โดยที่ $I_{p(\max)rms}$ และ $I_{s(\max)rms}$ หาได้จาก [10, 12]

$$I_{p(\max)rms} = \frac{I_{p(\max)} \sqrt{t_{on(\max)} \cdot f}}{\sqrt{3}} \quad (3.61)$$

$$I_{s(\max)rms} = ratio \cdot I_{p(\max)rms} \quad (3.62)$$

สำหรับค่าอัตโนมัติที่ไม่มีกระแสในปริมาณสูงให้ลดผ่าน จึงไม่มีความจำเป็นในการที่จะกำหนดให้เป็นเงื่อนไข ซึ่งจะสามารถลดความซับซ้อนของสมการและกระบวนการหารากที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงลงได้

ค่าของ CMA ที่มีค่าอยู่ในระหว่าง 300 ถึง 500 ดังที่เห็นในสมการที่ 3.57 และ 3.58 จะเป็นค่าที่ทำให้เกิดความสูญเสียในคลาด (Copper Loss) ต่ำมาก ซึ่งจะกล่าวถึงภายหลังในหัวข้อที่ 4.6

3.3.7 ขอบเขตของตัวแปรในการออกแบบ

เพื่อป้องกันค่าของตัวแปรหลังจากการหารากที่เหมาะสมไม่ให้มีค่าเกินหรือต่ำกว่าความเป็นจริง จึงต้องกำหนดขอบเขตให้กับตัวแปรต่าง ๆ ด้วยดังนี้

$$0.9 \leq E \leq 9.9 \quad (3.63)$$

$$g_{(\min)Limit} \leq g \leq g_{(\max)Limit} \quad (3.64)$$

$$1 \leq N_p \leq 200 \quad (3.65)$$

$$1 \leq N_s \leq 50 \quad (3.66)$$

$$0.0503 \leq d_p \leq 2.588 \quad (3.67)$$

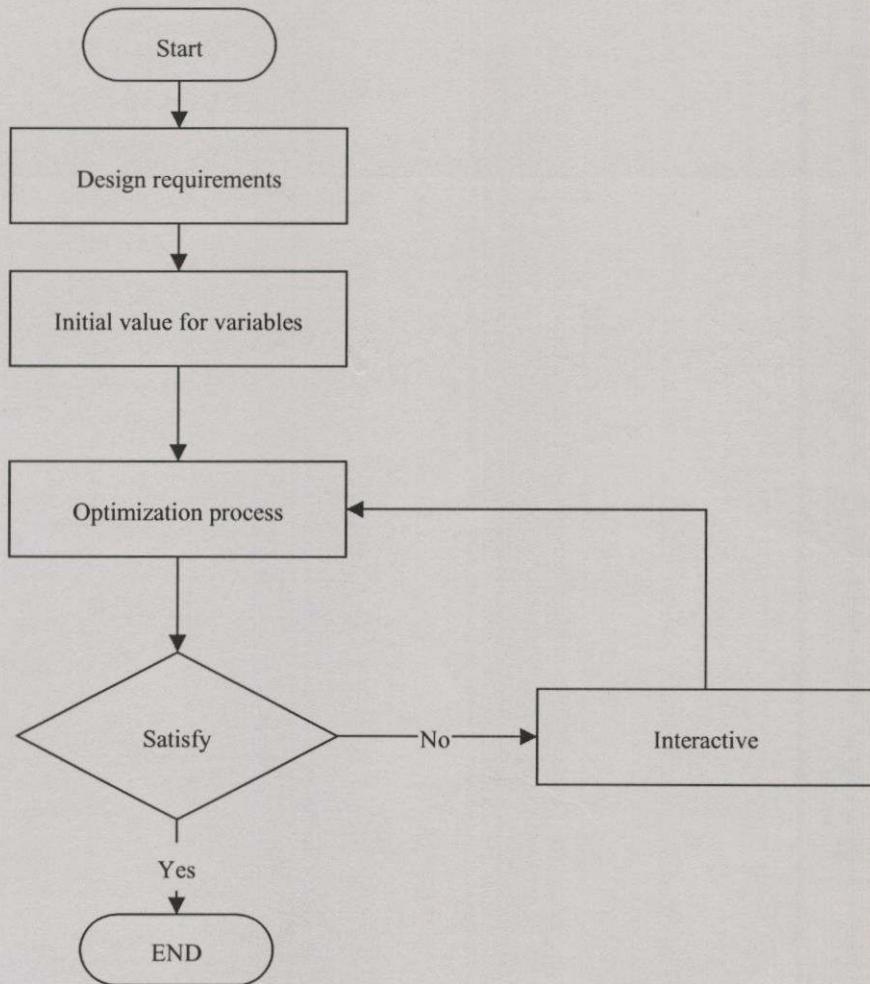
$$0.0503 \leq d_s \leq 2.588 \quad (3.68)$$

$$0.01 \leq I_{p(\max)} \leq I_{p(\max)Limit} \quad (3.69)$$

การกำหนดค่าของเขตเหล่านี้ ผู้ออกแบบสามารถกำหนดให้เป็นค่าอื่นได้อย่างอิสระแต่การเลือกค่าของเขตที่กว้างมากเกินไปอาจมีผลเสียต่อเสถียรภาพของการหารากที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขได้

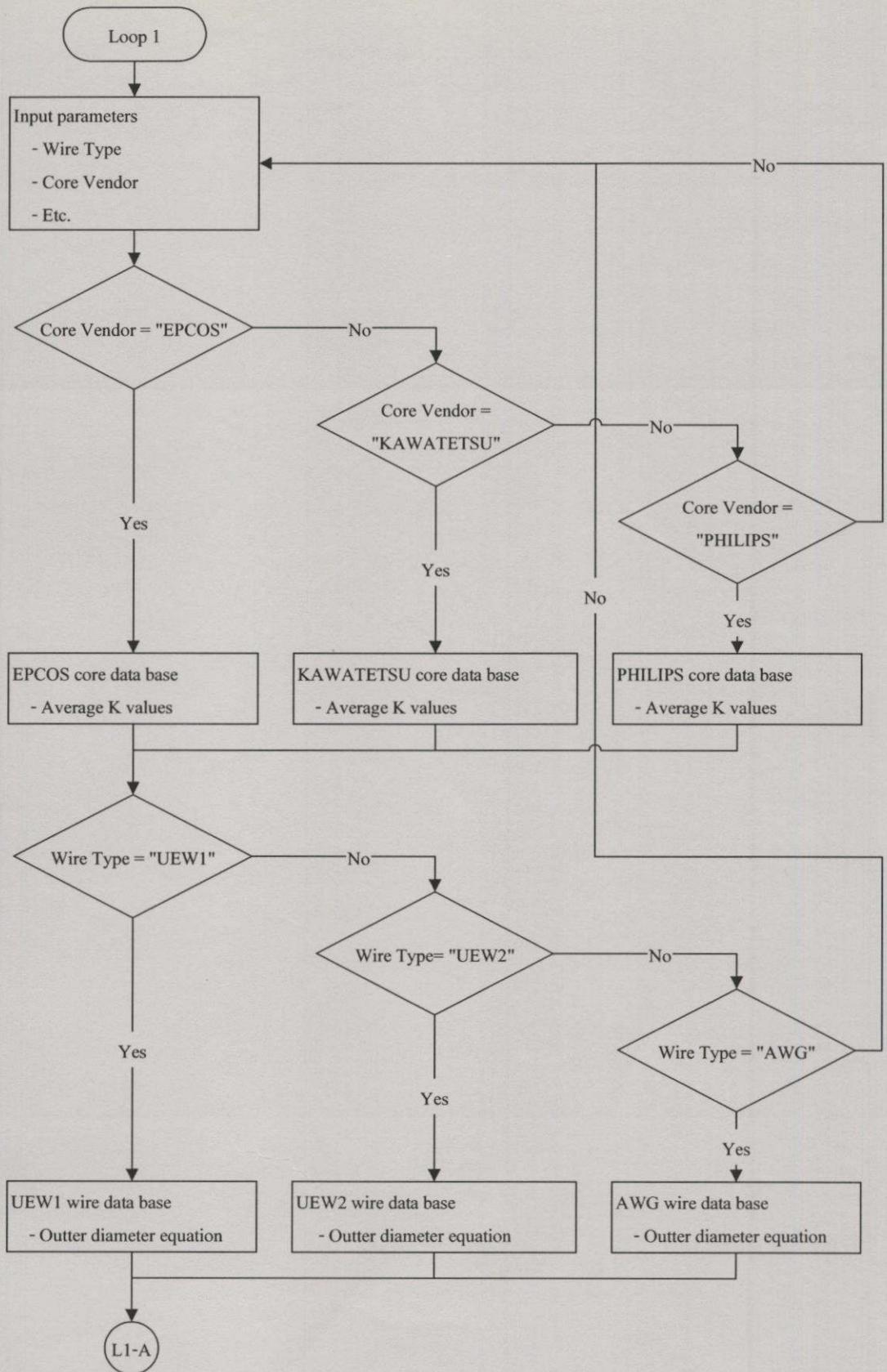
3.4 ขั้นตอนของระบบที่สร้างขึ้น

จากสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกนำไปสร้างเป็นกระบวนการทางค่าที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MATLAB ขั้นตอนในการออกแบบมีขั้นตอนต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



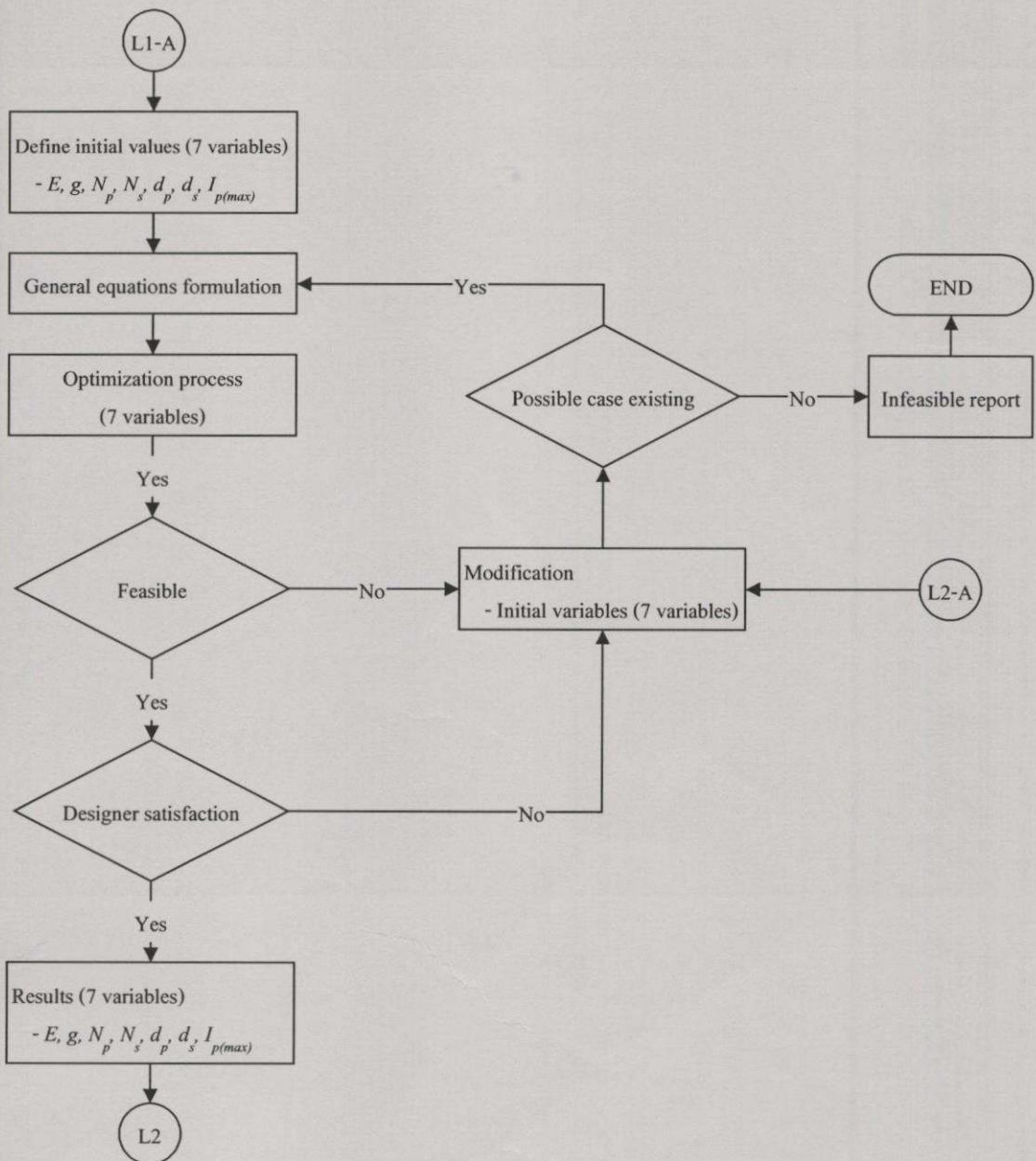
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการออกแบบโดยรวมของระบบที่สร้างขึ้น

ในขั้นตอนแรก ข้อมูลอินพุททั้งหมดจะเป็น Design Requirement ของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะมีการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นต่างๆ ของแกนและคลาด ซึ่งจะต้องทราบว่าเป็นของผู้ผลิตรายใดเป็นต้น สำหรับแผนผังของขั้นตอนดังกล่าวสามารถดูได้จากรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นต่างๆ ของแกนและชุดลวด

จากนั้นจะเป็นขั้นตอนที่มีการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้งหมด และสมการย่อๆต่างๆ เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบแรก (Loop 1) ถ้าหากโปรแกรมไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้หรือผู้ออกแบบยังไม่พอใจกับคำตอบของตัวแปรที่ถูกปรับใหม่โดยโปรแกรม ก็จำเป็นที่จะต้องทำการปรับค่าเริ่มต้นใหม่อีกรอบแล้ววนกลับเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งจะวนซ้ำอย่างนี้เรื่อยไป หากผู้ออกแบบไม่สามารถพบคำตอบที่น่าพอใจ โปรแกรมก็จะหยุดการทำงาน แผนผังของขั้นตอนดังกล่าวสามารถดูได้จากรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้งหมด และสมการย่อๆต่างๆ เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบแรก (Loop 1)

ต่อจากนั้นผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) จะถูกพิจารณาว่าสามารถนำไปสร้างจริงได้หรือไม่ โดยพิจารณาว่า มิติของแกน คือ E ที่ได้นานั้นมีอยู่จริงใน Data Sheet ของผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรต์หรือไม่, จำนวนรอบ N_p และ N_s เป็นเลขจำนวนเต็มหรือไม่ และขนาดลวด d_p และ d_s มีอยู่จริงในการงานขดลวดหรือไม่ ถ้าหากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าว โปรแกรมก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงค่าตัวแปรในการออกแบบซึ่งเรียกว่าขั้นตอน Interactive ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เปิดโอกาสให้ผู้ออกแบบสามารถที่จะพิจารณาหาอัลกอริธึมในการปรับปรุงค่าตัวแปรต่างๆ เข้าสู่ค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ในขั้นตอนนี้ค่าตัวแปรที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติบางส่วนจะถูกปรับไปสู่ค่าใหม่ที่ใกล้เคียงค่าเดิมที่สามารถสร้างได้จริง หลังจากนั้นจะกลับเข้าสู่กระบวนการหาราค่าที่เหมาะสมอีกรอบ เพื่อให้ตัวแปรที่เหลืออยู่บางส่วนได้ค่าที่เหมาะสมใหม่ และทำการปรับปรุงค่าตัวแปรใหม่ที่ได้ไปสู่ค่าใหม่ที่ใกล้เคียงซึ่งใช้การพิจารณาในลักษณะเดียวกันกับขั้นตอนนี้ จนสามารถปรับตัวแปรทั้งหมดให้มีค่าที่เป็นไปได้ ซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างที่ทำให้มือแปลงความถี่สูงมีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยยังคงอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด สำหรับขั้นตอน Interactive นี้จะอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 3.6

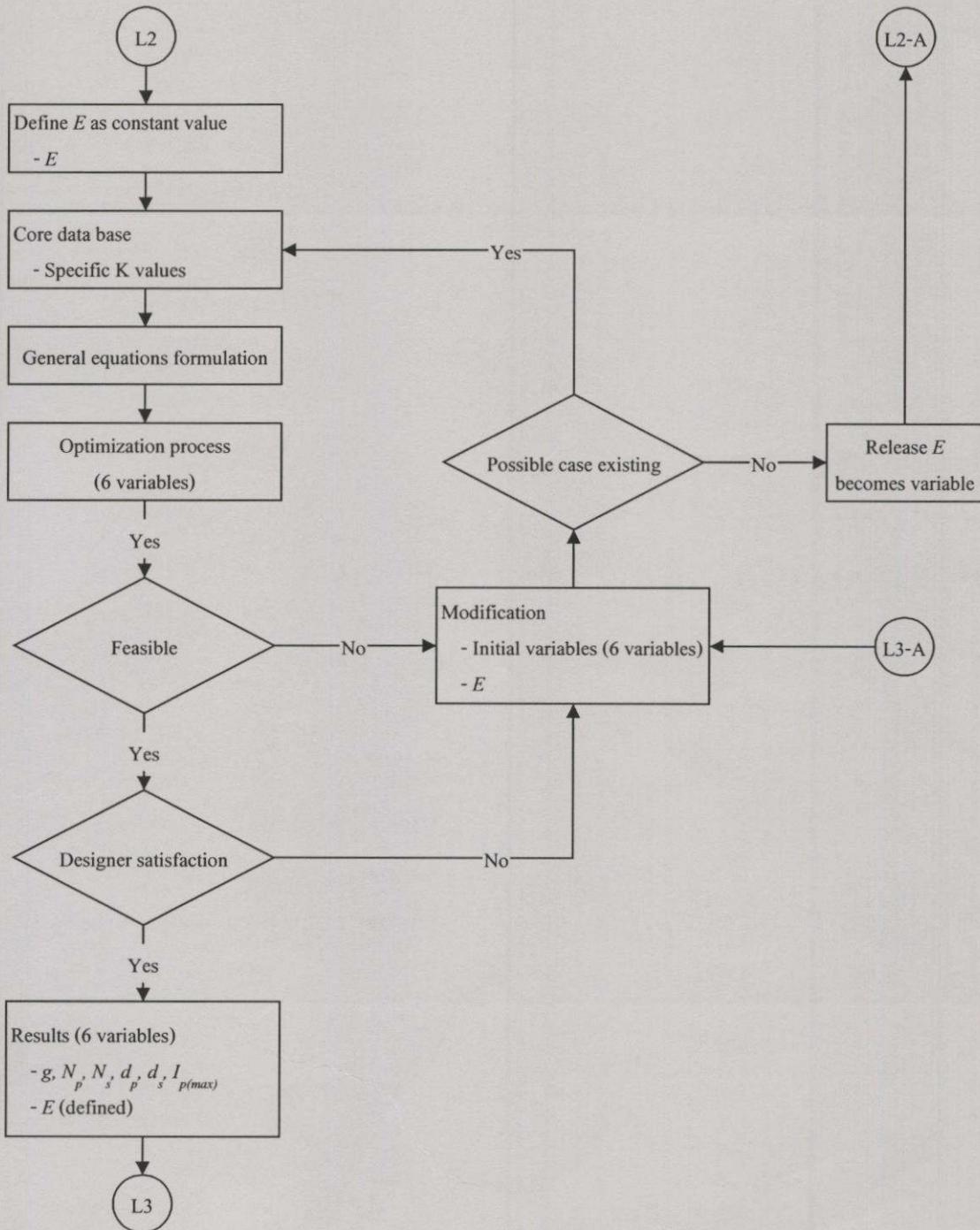
3.5 กระบวนการ Interactive

ก่อนที่โปรแกรมจะเข้าสู่กระบวนการหาราค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบที่ 2 (Loop 2) ผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) จะถูกนำมาพิจารณาว่าสามารถนำไปสร้างจริงได้หรือไม่ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ได้แก่ E , N_p , N_s , d_p และ d_s จากกระบวนการหาราค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขใน Loop 1 ตัวแปรที่มีผลต่อน้ำหนักและโครงสร้างต่างๆ ของมือแปลงความถี่สูงที่จะต้องนำมาพิจารณาในอันดับแรกนั่นคือ มิติของแกนเฟอร์ไรต์ (E) ซึ่งจะถูกนำไปพิจารณาเบรรியนเทียนกับ Data Sheet ของผู้ผลิตแต่ละรายว่ามีอยู่จริงหรือไม่ ถ้าหากไม่ตรงกันก็ให้เลือกปรับแกนที่มีมิติ E ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้ จากนั้น ค่าของ E จะไม่ถูกโปรแกรมเปลี่ยนแปลงค่าได้อีก เนื่องจากจะต้องมีการวนกลับไปสู่กระบวนการหาราค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขนั้นอีกรอบ ซึ่งโปรแกรมจะทำการปรับปรุงค่าตัวแปรที่เหลือให้เหมาะสมกับค่า E ที่ถูกผู้ออกแบบเลือกมา โดยยังคงเป็นมาตรฐานของน้ำหนักโดยรวมของมือแปลงความถี่สูงให้มีค่าน้อยที่สุด

ถ้าหากโปรแกรมไม่สามารถปรับตัวแปรที่เหลือให้เข้ากับ E ที่เลือกมาได้ โปรแกรมก็จะบอกว่า Infeasible นั่นคือ ไม่สามารถหาค่าตอบของตัวแปรที่เหลือภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดได้ จึงจะต้องทำการเลือกแกนใหม่อีกรอบซึ่งจะมีการกระทำเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าจะพบแกนที่เหมาะสม

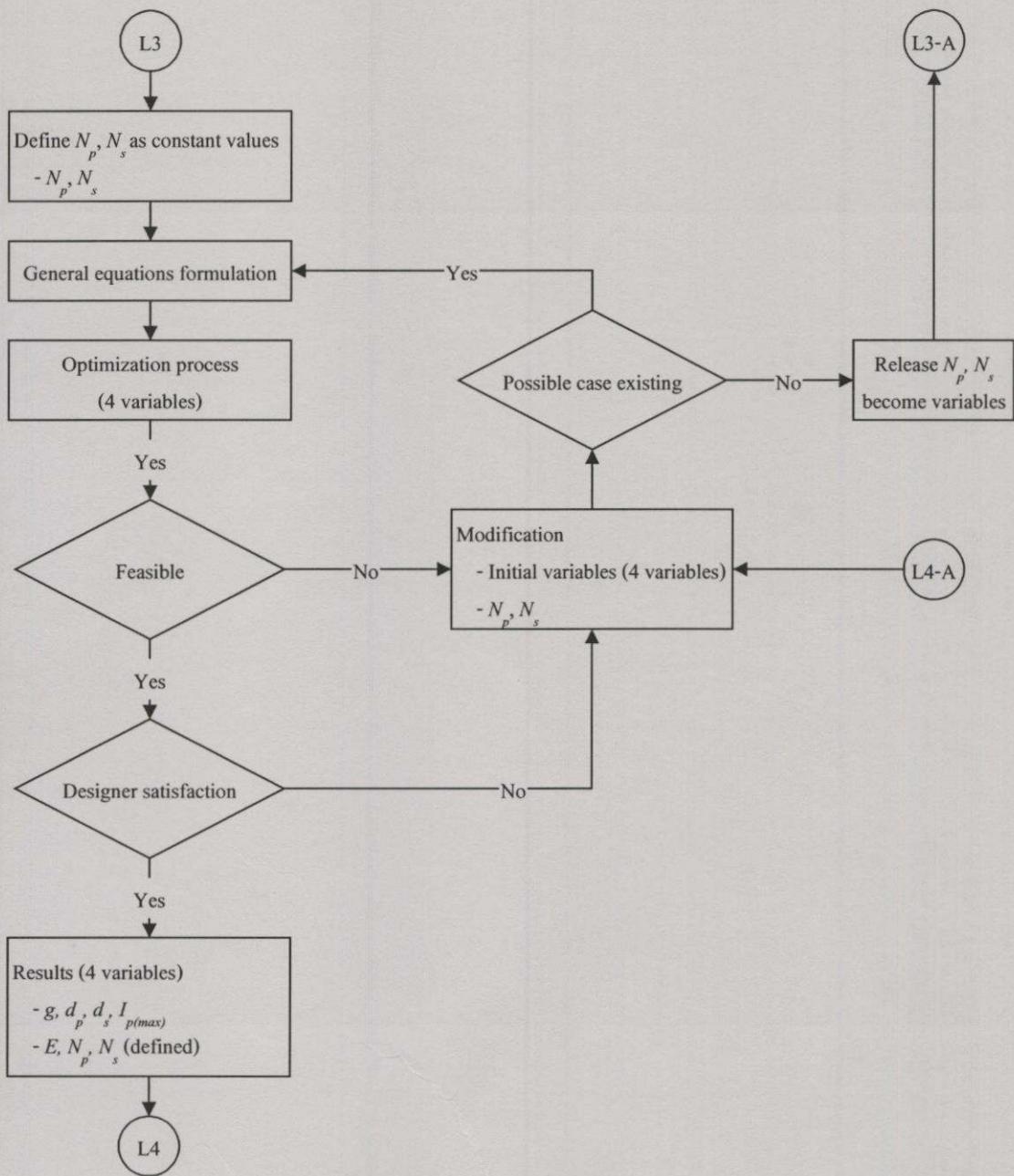
หลักในการเลือกแกนที่ดีคือ การเลือกจากแกนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการกระบวนการหาราค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขใน Loop 1 โดยเลือกจากแกนขนาดเล็กกว่าไปจนถึงแกนที่มีขนาดใหญ่กว่า และควรเลือกแกนที่สามารถให้น้ำหนักโดยรวมของมือแปลงความถี่สูงนี้

ค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการพิจารณาของผู้ออกแบบเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรแกรมต้องสามารถปรับตัวแปรที่เหลือให้มีความเหมาะสมกับแกนดังกล่าวได้ ตัวอย่างของการเลือกแกนใน Loop ที่ 2 สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 4.1



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการกำหนดและปรับปรุงค่า E เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบที่สอง (Loop 2)

ใน Loop ที่ 3 หลังจากที่ผู้ออกแบบได้ทำการเลือกแกนที่ต้องการแล้ว ผลลัพธ์ของตัวแปรจะเปลี่ยนไปจากเดิม เพื่อให้สอดคล้องกับแกนที่เลือกโดยยังคงเป้าหมายของน้ำหนักโดยรวมให้มีค่าน้อยที่สุด ตัวแปรชุดต่อไปที่จะทำการปรับปรุงก็คือ จำนวนรอบ N_p และ N_s



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการกำหนดและปรับปรุงค่า N_p และ N_s เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบที่สาม (Loop 3)

ในทางปฏิบัติจำนวนรอบจำเป็นที่จะต้องเป็นจำนวนเต็ม กล่าวคือ ไม่มีทศนิยม จะนั่นผู้ออกแบบจึงจำเป็นที่จะต้องปรับจำนวนให้มีค่าเท่าหมาย ซึ่งในกรณีที่ผลลัพธ์ของ N_p และ N_s ไม่เป็นเลขจำนวนเต็มก็ให้ทำการปัดขึ้นหรือปัดลง โดยสามารถแบ่งเป็นกรณีได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 กรณีต่างๆ ในการปรับค่าของ N_p และ N_s

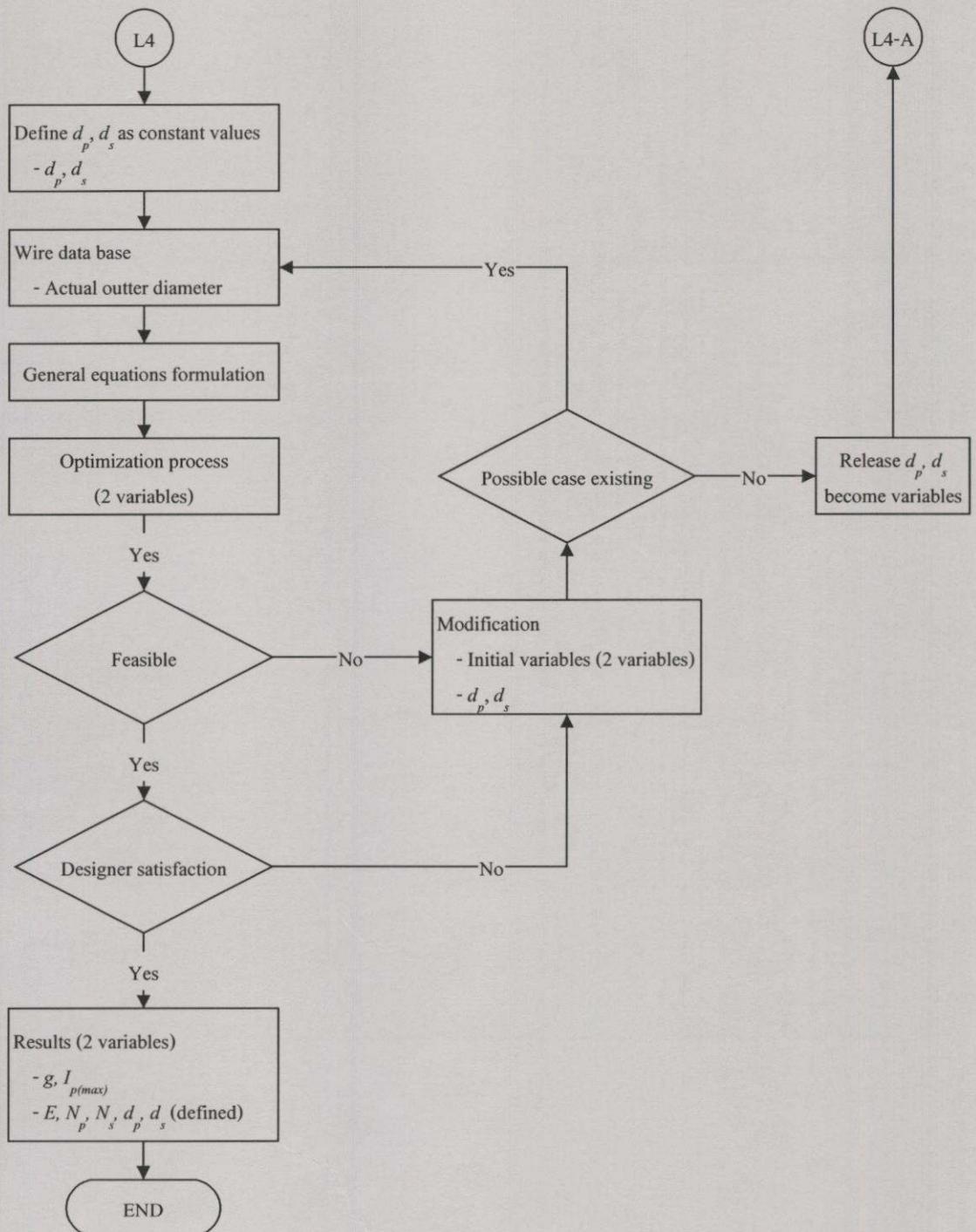
	N_p	N_s
Case 1	Round towards plus integer	Round towards plus integer
Case 2	Round towards plus integer	Round towards minus integer
Case 3	Round towards minus integer	Round towards plus integer
Case 4	Round towards minus integer	Round towards minus integer

จากนั้นก็ให้ผู้ออกแบบทำการกำหนดค่าใหม่ของ N_p และ N_s เช่นเดียวกับการกำหนดค่าของ E ใน Loop ที่ 2 และวนกลับไปสู่ขั้นตอนกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขอีกรึ่ง เพื่อหาร่วมกันว่ากรณีใดที่สามารถเป็นไปได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดและให้นำหนักโดยรวมน้อยที่สุด แต่ถ้าหากโปรแกรมไม่สามารถหาค่าตัวแปรที่เหลือภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดได้นั่นคือ กรณีที่เลือกมา นั้นไม่สามารถนำมาสร้างในทางปฏิบัติให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ ก็ให้กลับไปที่ Loop 2 แล้วทำการเลือกแกนใหม่ขนาดใหญ่ขึ้นไปอีก

จาก Loop ที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่า จำนวนตัวแปรลดลงไปเรื่อยๆ เนื่องจากผู้ออกแบบได้ทำการกำหนดค่าของตัวแปรเอาไว้แล้วถึง 4 ตัวด้วยกัน ซึ่งใน Loop 4 ตัวแปรที่จะทำการปรับชุดต่อไป ก็คือ d_p และ d_s ซึ่งผู้ออกแบบสามารถคูณได้จากตารางลักษณะผู้ผลิต แล้วทำการเลือก โดยทั่วไปจะต้องเลือก漉คที่มีขนาดใหญ่กว่า เมื่อจากเงื่อนไขของ Circular Mils per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่า พกพาของค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) โดยให้เลือก漉คที่มีขนาดใหญ่กว่า漉คไปแล้ววนกลับไปสู่ขั้นตอนของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขอีกรึ่ง หากโปรแกรมไม่สามารถหาค่าตัวแปรที่เหลือภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดได้นั่นคือ กรณีที่เลือกมา นั้นไม่สามารถนำมาสร้างในทางปฏิบัติให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ ก็ให้กลับไปที่ Loop 3 และ Loop 2 ตามลำดับ

สุดท้าย ผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้ทั้งหมดจะสามารถนำไปสร้างได้ในทางปฏิบัติภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดโดยสมการเงื่อนไขทั้งหมดและผู้ออกแบบ แม้ว่าตัวแปรของ g และ $I_{p(max)}$ จะยังไม่ได้

ถูกทำการปรับปรุงค่าเหล่านี้เดียวกับตัวแปรอื่นๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้น เนื่องจากในทางปฏิบัติ ตัวแปรเหล่านี้สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระมากกว่า



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการกำหนดและปรับปรุงค่า d_p และ d_s เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบสุดท้าย (Loop 4)

3.6 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบหน้าจอแปลงความถี่สูงที่มีหน้าหนักน้อยที่สุด

ในงานวิจัยนี้ ได้นำประโภชน์ของทูลบ็อกของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Toolbox) ที่มีอยู่ในโปรแกรม MATLAB มาใช้ เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีทางตัวเลข (Numerical) ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข (Constrained Optimization) เท่านั้น ส่วนของค่าประกอบอื่น เช่น ส่วนอินเตอร์เฟส (Interface) ระหว่างกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขกับผู้ออกแบบ และส่วนฐานข้อมูล (Data Base) เป็นต้น จำเป็นต้องสร้างขึ้นมาจาก เอ็มไฟล์ (M-file) เพื่อใช้ในการรับและส่งค่าให้กับทูลบ็อกของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม และเอ็มไฟล์ด้วยกันเอง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้ [7, 13]

3.6.1 เอ็มไฟล์ฟังก์ชันและสมการเป้าหมาย (Objective Function)

เป็นเอ็มไฟล์ที่บรรจุสมการเป้าหมายที่ต้องการให้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข หาค่าของฟังก์ชันนั้นๆ ให้มีค่าต่ำสุด ในที่นี้ คือ สมการน้ำหนักของหน้าจอแปลง โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำมาประกอบกันเป็นสมการจะมาจากการอ่านเอ็มไฟล์ที่ใช้เก็บค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ในหัวข้อที่ 3.5.3

3.6.2 เอ็มไฟล์ฟังก์ชันและสมการเงื่อนไข (Constraints Function)

เป็นส่วนที่บรรจุเซตของเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบทั้งหมด โดย $c(n)$ เป็นเงื่อนไขของการไม่เท่ากัน (Inequality Constraint) และ $ceq(n)$ เป็นเงื่อนไขของการเท่ากัน (Equality Constraint) โดยที่ n คือเลขจำนวนเต็มมากใดๆ

3.6.3 เอ็มไฟล์ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ

เป็นเอ็มไฟล์ที่เก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ, สมการ และคำนิยามของพารามิเตอร์ทุกๆ ตัว นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วน Interface หลักระหว่างโปรแกรมและผู้ออกแบบให้สามารถกำหนดและปรับปรุงค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ และ ลำดับขั้นการวนรอบของกระบวนการ Interactive ที่จะทำการปรับปรุงค่าตัวแปร

3.6.4 เอ็มไฟล์ฐานข้อมูลของแกนเฟอร์ไรต์

เป็นเอ็มไฟล์ที่ใช้เก็บค่ามิติต่างๆ ของแกนเฟอร์ไรต์จากผู้ผลิตต่างๆ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถดึงค่าไปได้ทั้งหมดโดยการเลือกเพียงตัวเลขในหลักแรกของแต่ละแถว

3.6.5 เอ็มไฟล์ฐานข้อมูลของ漉ดทองแดงชนิดต่างๆ

เป็นเอ็มไฟล์ที่ใช้เก็บค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกจริงๆ ของ漉ด漉ที่จะนำไปใช้ในการพัฒนาระบบต่างๆ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถดึงค่าไปได้ทั้งหมดโดยการเลือกเพียงตัวเลขในหลักแรกของแต่ละแrew

3.6.6 เอ็มไฟล์ชุดคำสั่งในการวิเคราะห์และแสดงผลการออกแบบ

เป็นเอ็มไฟล์ส่วนที่เก็บชุดคำสั่งที่เป็นสคริปต์ (Script) ของโปรแกรม MATLAB และการกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial Value) ของตัวแปรทั้งหมด รวมทั้งยังเป็นศูนย์กลางในการเรียกเอ็มไฟล์ที่จะใช้งานแต่ละตัวตามลำดับอีกด้วย

บทที่ 4

การออกแบบและการทดสอบ

4.1 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูง

ในงานวิจัยนี้ จะแสดงขั้นตอนในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดของหม้อแปลง 3 แบบที่ใช้กับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งที่มีพิกัดกำลังและแรงดันขาออกที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

4.1.1 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ความถี่ใช้งาน 60 kHz

ด้วยแรงดันขาออกเท่ากับ 12 V มักใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook Computer) ซึ่งมีความต้องการกำลังงานที่ไม่สูงนัก ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A มีพิกัดกำลังขาออกที่มีขนาดปานกลาง (Medium Power)

4.1.2 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ความถี่ใช้งาน 40 kHz

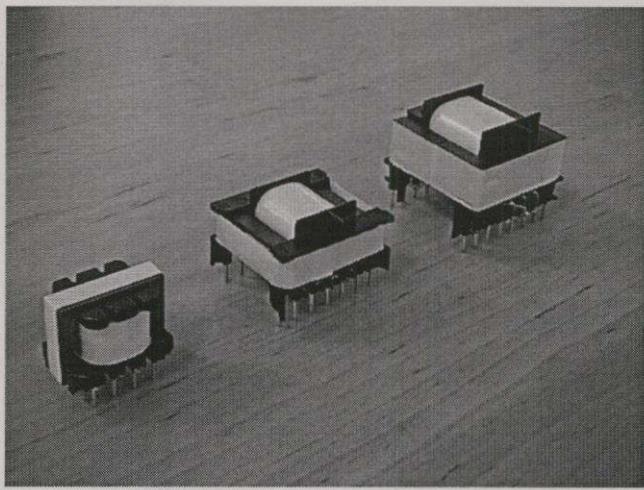
แรงดันขนาด 5 V มักใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคิจิตลายน้ำเด็กทั่วๆ ไป เช่น เครื่องเล่น CD และ MP3 ขนาดพกพา หรือแม้กระทั่งที่ชาร์จแบตเตอรี่ของโทรศัพท์มือถือ และกล้องถ่ายรูปดิจิตอลเป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A มีพิกัดกำลังขาออกที่มีขนาดต่ำ (Low Power)

4.1.3 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A ความถี่ใช้งาน 100 kHz

เพื่อใช้งานวิจัยนี้รอบคุณลักษณะของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งที่มีพิกัดกำลังขาออกที่สูง ให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการออกแบบที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด จึงได้มีการเลือกแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งที่มีแรงดันขาออกเท่ากับ 24 V ซึ่งมักถูกใช้ในอุปกรณ์สำนักงานและอุปกรณ์ต่อพ่วงกับคอมพิวเตอร์ต่างๆ เช่น เครื่องพิมพ์ชนิดหมึก, เครื่องโทรศัพท์ที่ใช้กระแสความร้อน และเครื่องพิมพ์ชนิดเลเซอร์ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะกำหนดแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A มีพิกัดกำลังขาออกที่มีขนาดสูง (High Power)

จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงความถี่สูงที่เลือกมาทำการออกแบบจะมีขนาดและพิกัดกำลังขาออกรอบคุณลักษณะตั้งแต่ขนาดเล็ก กำลังงานต่ำไปจนถึงขนาดใหญ่ กำลังงานสูง นอกจากนี้จะทำ

การสร้างจริงตามผลที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ เพื่อแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่สามารถใช้งานได้จริงตามความต้องการของผู้ออกแบบ โดยที่ต้นแบบของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสามตัวที่สร้างขึ้นจะเป็นไปตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งทั้ง 3 ขนาดที่สร้างขึ้น โดยที่จากทางด้านซ้ายไปขวา จะเป็นขนาด 5 V / 1.2 A, 12 V / 2 A และ 24 V / 4 A ตามลำดับ

4.2 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12V / 2A

ในการออกแบบหม้อแปลงดังกล่าวจะมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆในการออกแบบ ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร)

Symbols	Description	Value	Unit
-	Core vendor	EPCOS	-
-	Wire type	UEW Class 1 (JIS)	-
-	Bobbin	Horizontal	-
-	Core material	N27	-
D_c	Core density	4.75E-06	kg/mm^3
μ_i	Initial permeability	2000	-

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Symbols	Description	Value	Unit
D_p	Primary winding density	8.91E-06	kg/mm ³
D_s	Secondary winding density	8.91E-06	kg/mm ³
D_b	Bias winding density	8.91E-06	kg/mm ³
W_{bob}	Bobbin thickness	1	mm
W_{ins}	Insulation thickness	0.08	mm
d_b	Bias winding diameter	0.04	mm
$I_{p(max)Limit}$	Maximum primary current limit	3	A
$B_{(max)Limit}$	Maximum flux density limit	0.16	T
V_o	Output voltage	12	V
$I_{o(max)}$	Maximum output current	2	A
$D_{(min)Limit}$	Minimum duty cycle limit	0.3	-
$D_{(max)Limit}$	Maximum duty cycle limit	0.4	-
$V_{in(min)}$	Minimum input voltage	120.19	V
$V_{in(max)}$	Maximum input voltage	373.296	V
$V_{d(max)}$	Maximum dropout voltage across diode	1	V
C_{rep1}	Safety creepage distance from primary	4	mm
C_{rep2}	Safety creepage distance from secondary	4	mm
f	Frequency	60	kHz
$V_{DS(max)Limit}$	Maximum Drain-Source voltage limit	1000	V
N_1	Number of primary parallel winding	1	turns
N_2	Number of secondary parallel winding	2	turns
T_{mar}	Transformer design margin	1.25	-
$g_{(min)Limit}$	Minimum gap length limit	0.1	mm

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Symbols	Description	Value	Unit
$g_{(max)Limit}$	Maximum gap length limit	1	mm
E	Half of center leg width *	-	mm
g	Air gap length *	-	mm
N_p	Primary turns *	-	turns
N_s	Secondary turns *	-	turns
d_p	Primary winding diameter *	-	mm
d_s	Secondary winding diameter *	-	mm
$I_{p(max)}$	Maximum primary current *	-	A

หน้าแปลงความถี่สูงดังกล่าวจะถูกนำมาใช้สำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่ใช้กับแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายได้หลายระดับ นั่นคือสามารถใช้งานได้ทั่วโลก (Universal Input) ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งมีค่าอยู่ที่ 60 kHz ซึ่งนับว่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบแหล่งจ่ายไฟขนาดกลาง

ขอบบินที่เลือกใช้จะเป็นแบบแนวอน (Horizontal) เนื่องจากต้องการลดความสูงของหน้าแปลงลงเพื่อให้ประกอบอยู่ในโครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟที่มีขนาดเล็กได้ และเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟนี้สามารถใช้งานได้ทั่วโลก มาตรฐานความปลอดภัยจึงต้องใช้มาตรฐานสากล จึงทำให้ระบุค่าความปลอดภัย (Creepage Safety Distance) มีค่าเท่ากับ 4 mm. เท่ากันทั้งสองด้าน [4, 12]

ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดจะเลือกใช้ที่ค่า 0.16 T เนื่องจากค่าดังกล่าวจะทำให้ผลของค่าความสูญเสียในแกน (Core Loss) มีค่าต่ำจนสามารถลดทิ้งไปได้ ค่า Circular Mils per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าพกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) ต่ำสุดที่เชื่อมกัน จะเลือกใช้ค่า 300 mil/A เนื่องจากค่าดังกล่าวจะทำให้ผลของค่าความสูญเสียในขดลวด (Copper Loss) มีค่าต่ำจนสามารถลดทิ้งไปได้เช่นกัน [12]

เพื่อความแน่ใจว่าหน้าแปลงความถี่สูงดังกล่าวจะสามารถถ่ายทอดกำลังงานที่เพียงพอต่อความต้องการของ Load จึงอาศัยค่าเพื่อในการออกแบบ (Transformer Design Margin) มีค่าเท่ากับ 1.25 ซึ่งโดยปกติค่าเพื่อดังกล่าวจะอยู่ที่ 1.2 ~ 1.3

ค่าอัตราส่วนของช่วงเวลาในการ On ต่อค่าเวลาสูงสุดของรูปคลื่น (Maximum Duty Cycle) จะถูกกำหนดไม่ให้สูงกว่า 0.4 และต่ำกว่า 0.3 เนื่องจากอัตราส่วนของช่วงเวลาดังกล่าว

ที่สูงเกินไปจะทำให้กระแสไฟฟ้า Secondary มีค่าสูงซึ่งจะเกิดความสูญเสียที่วงจรเริงกระแสไฟฟ้าด้าน Secondary ที่สูงเช่นกัน และค่าที่ต่ำเกินไปจะมีผลกระทบต่อเส้นใยรากของวงจรในการควบคุมแรงดันขาออกให้มีค่าคงที่ ขณะที่แรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่าสูงสุดและมีค่า Load ต่ำสุด เนื่องจากอัตราส่วนของช่วงเวลาดังกล่าว จะมีค่าต่ำมากซึ่งจะรบกวนคุณภาพของนิคติอาศัย ความถี่คงที่จะไม่สามารถควบคุมความเวลาในการ On ที่ต่ำๆ ได้ จึงทำให้แรงดันขาออกมีค่าสูงขึ้นเกินความต้องการ

4.2.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation)

รายละเอียดของการออกแบบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [4, 5, 12] ทั้งนี้ได้มีการปรับปรุงขั้นตอนการออกแบบในบางช่วงเพื่อความสอดคล้องกับการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ ทั้งนี้จะบังคับอาศัยบรรทัดฐานเดิมอยู่ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

จากสมการกำลังงานขาออกสูงสุดในสมการที่ 3.19 แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงไปจะได้สมการใหม่ดังนี้

จาก

$$\frac{1}{2} L_p I_{p(\max)}^2 60 \times 10^3 \geq 12 \times 2 \times 1.25$$

ดังนั้น

$$L_p I_{p(\max)}^2 \geq 0.001 \quad (4.1)$$

จากสมการ $t_{on(\max)}$ ในสมการที่ 3.24 แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงไปจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$t_{on(\max)} = \frac{L_p I_{p(\max)}}{120.19} \quad (4.2)$$

จากเงื่อนไขของ $t_{on(\max)}$ ในสมการที่ 3.30 จะได้สมการดังนี้

$$5 \times 10^{-6} \leq t_{on(\max)} \leq 6.667 \times 10^{-6} \quad (4.3)$$

ทำการเลือกค่า $t_{on(\max)}$ โดยจะเลือกค่ากลางที่อยู่ระหว่าง 5×10^{-6} และ 6.667×10^{-6} นั้นคือ 5.834×10^{-6} แล้วแทนค่าลงในสมการที่ 4.2 ได้ดังนี้

จาก

$$5.834 \times 10^{-6} = \frac{L_p I_{p(\max)}}{120.19}$$

ค้างนั้น

$$L_p I_{p(\max)} = 0.701 \times 10^{-3} \quad (4.4)$$

แทนค่าสมการที่ 4.4 ลงในสมการที่ 4.1 จะได้ว่า

$$I_{p(\max)} \geq 1.427 \quad (4.5)$$

ทำการเลือกค่า $I_{p(\max)}$ เท่ากับ 1.427 และนำไปแทนค่าในสมการที่ 4.4 จะได้

$$L_p = 0.491 \times 10^{-3} \quad (4.6)$$

จากเงื่อนไขของ $t_{off(\max)}$ ในสมการที่ 3.29 จะได้สมการดังต่อไปนี้

จาก

$$5.834 \times 10^{-6} + t_{off(\max)} \leq \frac{0.8}{60 \times 10^3}$$

ค้างนั้น

$$t_{off(\max)} \leq 7.499 \times 10^{-6} \quad (4.7)$$

จากสมการ $t_{off(\max)}$ ในสมการที่ 3.25 นำไปแทนค่าในสมการที่ 4.7 เป็นดังนี้

จาก

$$\frac{L_s I_{s(\max)}}{12+1} \leq 7.499 \times 10^{-6}$$

ค้างนั้น

$$L_s I_{s(\max)} \leq 97.487 \times 10^{-6} \quad (4.8)$$

จากสมการอัตราส่วน $ratio$ ในสมการที่ 3.26 ถึง 3.24 สามารถแทนค่าพารามิเตอร์ทางผัง Secondary ด้วยพารามิเตอร์ทางผัง Primary ลงในสมการที่ 4.8 ได้ดังนี้

จาก

$$L_p I_{p(\max)} \frac{ratio}{ratio^2} \leq 97.487 \times 10^{-6}$$

ค้างนั้น

$$7.194 \geq ratio \quad (4.9)$$

จากสมการแรงดันที่ป্রากถืออยู่ระหว่างขา Drain และ Source ของ MOSFET ในสมการที่ 3.31 ถึง 3.33 จะเป็นดังนี้

จาก

$$112.006 + 373.35 + ratio(1+12) \leq 1000$$

ดังนั้น

$$ratio \leq 39.59 \quad (4.10)$$

จากสมการที่ 4.9 และ 4.10 จะเลือกค่าอัตราส่วน $ratio$ เท่ากับ 8

จากสมการค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในสมการที่ 3.34 และ 3.35 จะได้

จาก

$$\frac{0.491 \times 10^{-3} \times 1.427 \times 10^6}{A_e N_p} \leq 0.16$$

ดังนั้น

$$4379.106 \leq A_e N_p \quad (4.11)$$

เลือกแกนจาก Data Sheet ของผู้ผลิต โดยจะเลือกแกนเบอร์ 12 นั้นคือ E25/13/7 (EF 25) ซึ่งมีค่า A_e เท่ากับ 52.5 แล้วแทนค่าลงในสมการที่ 4.11 จะได้เป็น

$$83.41 \leq N_p \quad (4.12)$$

เลือกค่า N_p มีค่าเท่ากับ 84 แล้วนำไปหาค่า N_s จากค่า $ratio$ ที่เลือกเอาไว้ในตอนต้น นั้นคือ 8 ซึ่งจะได้

$$N_s = 10.5 \quad (4.13)$$

เลือกค่า N_s มีค่าเท่ากับ 10

จากสมการปริมาณกระแสที่ไหลในขดลวดในเทอมของ Circular Mils per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าปกผนของค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) ในสมการที่ 3.57 ถึง 3.62 จะได้สมการดังนี้

ขด Primary :

จาก

$$300 \leq \frac{0.9975 \times 1 \times d_p^2}{1.427 \times \frac{\sqrt{5.834 \times 10^{-6} \times 60 \times 10^3}}{\sqrt{3}}} \times \left(\frac{1000}{25.4} \right)^2 \leq 500$$

ดังนั้น

$$0.307 \leq d_p \leq 0.398 \quad (4.14)$$

ขด Secondary :

จาก

$$300 \leq \frac{0.9975 \times 2 \times d_s^2}{\frac{84}{10} \times 1.427 \times \frac{\sqrt{5.834 \times 10^{-6} \times 60 \times 10^3}}{\sqrt{3}}} \times \left(\frac{1000}{25.4} \right)^2 \leq 500$$

ดังนั้น

$$0.631 \leq d_p \leq 0.814 \quad (4.15)$$

ทำการเลือกขนาดที่จะใช้ในการพันขด Primary และ Secondary มีค่าเท่ากับ 0.32 และ 0.65 ตามลำดับ

จากสมการความสูงของขนาดในสมการที่ 3.37 ถึง 3.39 และ สมการที่ 3.41 ถึงสมการที่ 3.47 สามารถหาความสูงของขนาดแต่ละขดได้ดังนี้

$$h_p = 0.372 \times 3 = 1.116 \quad (4.16)$$

$$h_s = 0.724 \times 2 = 1.448 \quad (4.17)$$

จากสมการพื้นที่ในการพันขดในสมการที่ 3.40 จะได้ว่า

$$1 + (2 \times 1.116) + 1.448 + 0.079 + (13 \times 0.08) + (2 \times (3 - 1) \times 0.08) + ((3 - 1) \times 0.08) = 6.279$$

ดังนั้น

$$6.279 \geq 5 \quad (4.18)$$

จะเห็นได้ว่า สมการที่ 4.18 มีค่ามากกว่าค่า a ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 นั้นหมายถึงไม่สามารถใช้เกนเฟอร์ไรต์เบอร์ดงกล่าวได้ ฉะนั้นต้องทำการเลือกเกนใหม่อีกรั้ง โดยครั้งนี้จะทำการ

เลือกแกนเบอร์ 14 นั่นคือ E30/15/7 ซึ่งมีค่า A_e เท่ากับ 60 แล้วแทนค่าลงในสมการที่ 4.11 ใหม่ อีกครั้งจะได้เป็น

$$72.985 \leq N_p \quad (4.19)$$

เลือกค่า N_p มีค่าเท่ากับ 74 แล้วนำไปหาค่า N_s จากค่า ratio ที่เลือกเอาไว้ในตอนด้านนั่นคือ 8 จะได้

$$N_s = 9.25 \quad (4.20)$$

เลือกค่า N_s มีค่าเท่ากับ 9

จากสมการปริมาณกระแสที่ไหลในขดลวดในเทอมของ Circular Mils per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าพกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) ในสมการที่ 3.57 ถึง 3.62 จะได้สมการดังนี้

ขด Primary :

จาก

$$300 \leq \frac{0.9975 \times 1 \times d_p^2}{1.427 \times \frac{\sqrt{5.834 \times 10^{-6} \times 60 \times 10^3}}{\sqrt{3}}} \times \left(\frac{1000}{25.4}\right)^2 \leq 500$$

ดังนั้น

$$0.307 \leq d_p \leq 0.398 \quad (4.21)$$

ขด Secondary :

จาก

$$300 \leq \frac{0.9975 \times 2 \times d_s^2}{\frac{74}{9} \times 1.427 \times \frac{\sqrt{5.834 \times 10^{-6} \times 60 \times 10^3}}{\sqrt{3}}} \times \left(\frac{1000}{25.4}\right)^2 \leq 500$$

ดังนั้น

$$0.624 \leq d_p \leq 0.805 \quad (4.22)$$

ทำการเลือกขดลวดที่จะใช้ในการพันขด Primary และ Secondary มีค่าเท่ากับ 0.32 และ 0.65 ตามลำดับ

จากสมการความสูงของขดลวดในสมการที่ 3.37 ถึง 3.39 และ สมการที่ 3.41 ถึงสมการที่ 3.47 สามารถหาความสูงของขดลวดแต่ละชุดได้ดังนี้

$$h_p = 0.372 \times 2 = 0.744 \quad (4.23)$$

$$h_s = 0.724 \times 2 = 1.448 \quad (4.24)$$

จากสมการพื้นที่ในการพันขดลวดในสมการที่ 3.40 จะได้ว่า

$$1 + (2 \times 0.744) + 1.448 + 0.079 + (13 \times 0.08) + (2 \times (2 - 1) \times 0.08) + ((2 - 1) \times 0.08) = 5.295$$

ดังนั้น

$$5.295 \leq 6.15 \quad (4.25)$$

จะเห็นได้ว่า สมการที่ 4.25 มีค่าน้อยกว่าค่า a ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.15 นั้นหมายถึงสามารถใช้แกนเฟอร์ไรต์เบอร์ดังกล่าวได้

เพราะจะนั้น ผลลัพธ์ของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ถึง 4.25 สามารถสรุปได้เป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ชิงขนาด 12 V / 2 A โดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation)

	Manual
E	3.6
g	0.8102
N_p	74
N_s	9
d_p	0.32
d_s	0.65
$I_{p(max)}$	1.427
Weight	29.66

4.2.2 การออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอด้วย

จากขั้นตอนการออกแบบในรูปที่ 3.3 นั้น ความต้องการของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชั่วคราวเป็นไปตามตารางที่ 4.1 จะถูกป้อนเข้าสู่โปรแกรมเพื่อใช้ในกระบวนการหาราค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขทั้งหมด จากนั้นผู้ออกแบบจำเป็นที่จะต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้ง 7 ตัว ซึ่งแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบมือแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชั่วขณะด้วยขนาด $12 \text{ V} / 2 \text{ A}$

	Initial
E	3
g	0.5
N_p	100
N_s	5
d_p	0.4
d_s	0.5
$I_{p(max)}$	1

เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้งหมดแล้วก็ป้อนคำสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณของตัวแปรทั้งหมดด้วยกระบวนการหาราค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) โดยโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้จากหน้าจอแสดงผลจะเป็นค่าของตัวแปรแต่ละตัวที่ถูกปรับใหม่ จะเป็นดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสามารถสรุปค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.4

จะเห็นได้ว่าโปรแกรมได้ทำการปรับค่าของตัวแปรทั้งหมด โดยที่มีเป้าหมายอยู่ที่น้ำหนักโดยรวมของมือแปลงมีค่าน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขที่กล่าวไว้ข้างต้นทั้งหมด จากนั้นผู้ออกแบบต้องทำการพิจารณาผลลัพธ์ของตัวแปรเหล่านี้ว่าพอใช้หรือไม่ ซึ่งในที่นี้จะเห็นได้จากค่าของ E , d_p , d_s ไม่มีอยู่จริงใน Data Sheet ของผู้ผลิต และจำนวนรอบ N_p และ N_s ก็ไม่สามารถนำไปสร้างจริงได้ เนื่องจากจำนวนรอบที่ได้เป็นตัวเลขที่ไม่ลงตัว ส่วนค่า g และ $I_{p(max)}$ นั้น ไม่มีปัญหาแต่อย่างใด เพราะค่า g สามารถปรับอย่างอิสระได้ในภายหลังและ $I_{p(max)}$ ก็เป็นค่าของกระแสที่ไฟล์ในวงจรที่แท้จริงทาง Primary มิใช่ค่าพิกัด ฉะนั้นจึงจำเป็นที่ผู้ออกแบบจะต้องทำการปรับค่า E , d_p , d_s , N_p และ N_s ใหม่ในกระบวนการ Interactive

```
***** Diagnostic Information *****
```

Diagnostic Information

Number of variables: 7

Functions

Objective:	ObjSimTrans06
Gradient:	finite-differencing
Hessian:	finite-differencing (or Quasi-Newton)
Nonlinear constraints:	ConSimTrans06
Gradient of nonlinear constraints:	finite-differencing

Constraints

Number of nonlinear inequality constraints:	30
Number of nonlinear equality constraints:	0

Number of linear inequality constraints:	0
Number of linear equality constraints:	0
Number of lower bound constraints:	0
Number of upper bound constraints:	0

Algorithm selected
medium-scale

```
***** End diagnostic information *****
```

Iter	F-count	f(x)	max		Directional	
			constraint	Step-size	derivative	Procedure
1	8	18.1307	5.109	1	23.4	infeasible
2	19	24.8812	3.467	0.25	0.236	
3	28	25.7979	0.9714	1	8.19	
4	37	34.8462	0.3361	1	-11.7	
5	47	29.3127	0.2567	0.5	-6.3	
6	56	23.4669	0.6135	1	-1.23	
7	68	23.3121	0.54	0.125	-5.15	
8	82	23.1504	0.5234	0.0313	-5.5	
9	99	23.1289	0.5214	0.00391	-5.51	
10	120	23.1276	0.5213	0.000244	-5.51	
11	146	23.1275	0.5213	7.63e-006	-5.51	
12	172	23.1275	0.5213	7.63e-006	-5.58	
13	198	23.1275	0.5213	7.63e-006	-5.58	
14	226	23.1274	0.5213	1.91e-006	-4.86	
15	254	23.1274	0.5213	1.91e-006	-5.61	
16	284	23.1274	0.5213	4.77e-007	-0.498	
17	294	22.9559	0.6548	0.5	-0.191	
18	303	22.7515	0.4967	1	-0.0112	
19	312	22.7232	0.02314	1	-0.0128	Hessian modified twice
20	321	22.6718	0.05239	1	-0.0227	
21	330	22.4652	0.2501	1	0.198	
22	340	22.5652	0.1236	0.5	0.0979	Hessian modified twice
23	350	22.6145	0.06149	0.5	0.0487	Hessian modified twice
24	361	22.6267	0.04609	0.25	0.0369	Hessian modified twice
25	374	22.629	0.04321	0.0625	0.0342	Hessian modified twice
26	388	22.6301	0.04186	0.0313	0.13	Hessian modified twice
27	402	22.6335	0.04141	0.0313	0.129	Hessian modified twice
28	416	22.6369	0.04096	0.0313	1.31	
29	426	23.3381	0.02102	0.5	0.0703	Hessian modified twice
30	439	23.3419	0.0205	0.0625	0.00961	
31	449	23.3462	0.01098	0.5	0.00539	
32	460	23.3475	0.008279	0.25	0.773	
33	476	23.3536	0.0007893	0.00781	0.00055	Hessian modified twice
34	485	23.3541	-8.207e-010	1	-2.21e-010	Hessian modified twice

Optimization terminated successfully:

Search direction less than 2*options.TolX and
maximum constraint violation is less than options.TolCon

Active Constraints:

1

Iteration is complete

E (mm.) ---> 3.5790

g (mm.) ---> 0.7931

Np (Turns) ---> 62.7648

Ns (Turns) ---> 11.1588

dp (mm.) ---> 0.3621

ds (mm.) ---> 0.5359

Ipmx (A.) ---> 1.6640

Maximum flux density (T.) ---> 0.1600

Transformer weight (g.) ---> 23.3541

รูปที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ
แบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบแรก (Loop 1)

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหนึ่งชุดของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบแรก (Loop 1)

	Initial	Loop 1
E	3	3.579
g	0.5	0.7931
N_p	100	62.7648
N_s	5	11.1588
d_p	0.4	0.3621
d_s	0.5	0.5359
$I_{p(max)}$	1	1.664
Weight	-	23.3541

การวนรอบครั้งที่ 2 (Loop 2) กระบวนการ Interactive ได้กำหนดให้ผู้ออกแบบทำ การปรับค่า E ก่อน นั่นคือ ค่าทางมิติของแกนเฟอร์ไรร์ซึ่งมีผลโดยตรงต่อหน้าหนังสือรวมของหนึ่งชุดของแกนที่ต้องการปรับเปลี่ยน ผู้ออกแบบจำเป็นที่จะต้องใช้ฐานข้อมูลของแกนที่เลือกใช้ หรืออาจเปิดดูได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแกนเบอร์ 12 และเบอร์ 14 ที่มีค่าไกลส์เคิงกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ซึ่งผู้ออกแบบจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบว่าแกนใดที่สามารถใช้ได้ในทางปฏิบัติ โดยทำการเปลี่ยนค่าของ E จากตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระโดยโปรแกรมให้กลายเป็นค่าคงที่ใดๆที่โปรแกรมไม่สามารถปรับค่าได้ ในที่นี้จะทำการปรับให้เป็นแกนเบอร์ 12 ก่อน จากนั้นก็สั่งให้โปรแกรมวนกลับเข้าไปสู่กระบวนการหาราคาที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขอีกรอบเพื่อตรวจว่า แกนที่ผู้ออกแบบเลือกไปนั้นสามารถใช้งานได้หรือไม่ โดยยังไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับค่าอื่นๆ ที่เหลืออยู่นั้นคือ N_p , N_s , d_p และ d_s

จากการตรวจสอบพบว่า แกนเบอร์ 12 ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากไม่สามารถอยู่ภายใต้เงื่อนไขบางข้อที่ผู้ออกแบบได้กำหนดเอาไว้ในสมการเงื่อนไขได้ (Infeasible) ผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องเลือกแกนเบอร์ใหม่นั้นคือแกนเบอร์ 14

จากการตรวจสอบของโปรแกรมพบว่า แกนเบอร์ 14 สามารถใช้งานได้ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมซึ่งมีการปรับค่าตัวแปรใหม่ทั้งหมดโดยยกเว้นค่า E จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่

```

***** Diagnostic Information *****

Number of variables: 7

Functions
Objective: ObjSimTrans06
Gradient: finite-differencing
Hessian: finite-differencing (or Quasi-Newton)
Nonlinear constraints: ConSimTrans06
Gradient of nonlinear constraints: finite-differencing

```

```

Constraints
Number of nonlinear inequality constraints: 30
Number of nonlinear equality constraints: 0

Number of linear inequality constraints: 0
Number of linear equality constraints: 0
Number of lower bound constraints: 0
Number of upper bound constraints: 0

```

```

Algorithm selected
medium-scale

```

```

***** End diagnostic information *****

```

Iter	F-count	f(x)	max constraint	Step-size	Directional derivative	Procedure
1	8	31.0082	5.152	1	-0.416	
2	17	32.8108	1.878	1	-2.6	Hessian modified
3	26	30.4421	0.3306	1	-0.221	
4	35	30.2232	0.03063	1	-0.285	Hessian modified
5	45	30.0761	0.1258	0.5	-0.756	Hessian modified
6	56	29.8779	0.2851	0.25	-0.632	Hessian modified
7	66	29.5312	0.6559	0.5	-0.402	Hessian modified
8	76	29.3123	0.5124	0.5	-0.52	
9	85	28.7264	0.1739	1	0.114	
10	94	28.8417	0.0002512	1	0.000161	
11	103	28.8419	6.182e-006	1	-0.0725	Hessian modified
12	112	28.557	0.3029	1	0.229	
13	121	28.7934	4.441e-016	1	-0.00647	Hessian modified twice
14	130	28.7869	5.329e-015	1	-4.57e-006	Hessian modified
15	139	28.7869	1.776e-014	1	-2.37e-012	Hessian modified

Optimization terminated successfully:

Search direction less than 2*options.TolX and
maximum constraint violation is less than options.TolCon

Active Constraints:

1
3
4
6
8
10

Iteration is complete

E (mm.) ---> 3.6000

g (mm.) ---> 0.7876

Np (Turns) ---> 62.5990

Ns (Turns) ---> 11.2847

dp (mm.) ---> 0.3196

ds (mm.) ---> 0.5322

Ipmax (A.) ---> 1.6640

Maximum flux density (T.) ---> 0.1600

Transformer weight (g.) ---> 28.7869

รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ
แบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่สอง (Loop 2)

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมแบบนี้
เงื่อนไขในรอบที่สอง (Loop 2) โดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถสรุปค่าของตัวแปรต่างๆ
ที่ได้จากโปรแกรมเป็นดังตารางที่ 4.5 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่ 2 (Loop 2)

	Initial	Loop 1	Loop 2
E	3	3.579	3.6
g	0.5	0.7931	0.7876
N_p	100	62.7648	62.599
N_s	5	11.1588	11.2847
d_p	0.4	0.3621	0.3196
d_s	0.5	0.5359	0.5322
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664
Weight	-	23.3541	28.7869

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่งขนาด 12 V / 2 A โดยโครงสร้างของแกนขนาดต่างๆ

	Weight
No.8	Infeasible
No.9	Infeasible
No.10	Infeasible
No.11	Infeasible
No.12	Infeasible
No.13	Infeasible
No.14	28.7869
No.15	37.5266
No.16	42.6414
No.17	36.4611
No.18	55.5009
No.19	61.2255

เพื่อความแน่ใจว่าแกนเบอร์ 14 ให้ค่าน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงน้อยที่สุด ผู้ออกแบบสามารถเลือกแกนเบอร์อื่นที่ใกล้เคียงนอกเหนือจากเบอร์ 12 และ 14 เช่น เบอร์ 8, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 17 และ 18 ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ของน้ำหนักดังตารางที่ 4.6

ซึ่งจะเห็นได้ว่าแกนเบอร์ 14 ให้ผลลัพธ์ของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงน้อยที่สุดจึงเลือกแกนเบอร์ 14

การวนรอบครั้งที่ 3 (Loop 3) จากตารางที่ 4.5 ค่าของตัวแปรต่อไปที่กระบวนการ Interactive กำหนดให้ผู้ออกแบบ ปรับเปลี่ยนค่านี้ คือ N_p และ N_s เนื่องจากจำนวนรอบการพัน มีผลต่อค่าทางไฟฟ้า, พื้นที่ว่างในการพัน และที่สำคัญ คือ น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง จึงสมควรที่ผู้ออกแบบจะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่า d_p และ d_s การปรับเปลี่ยนค่าของ N_p และ N_s จะอาศัยหลักที่ว่า จำนวนรอบจะต้องเป็นเลขจำนวนเต็มเสมอ ดังที่กล่าวเอาไว้ในบทที่ 3 การปรับจะแบ่งเป็น 4 กรณี ซึ่งการตรวจสอบว่ากรณีใดสามารถให้ผลการสร้างมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ โดยให้น้ำหนักร่วมที่น้อยที่สุด และเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดในสมการเงื่อนไขนั้น สามารถทำในลักษณะที่คล้ายกับการเลือกแกน นั่นคือ ผู้ออกแบบทดลองป้อนค่าใหม่ของ N_p และ N_s ในแต่ละกรณีแล้วสังเกตโปรแกรมว่ากลับเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขอีกรั้งแล้วจากผลลัพธ์ของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้ ซึ่งผลลัพธ์จะเป็นดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลลัพธ์ของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงขนาด $12 \text{ V} / 2 \text{ A}$ ในรอบที่ 3 ที่ได้จากการวนรอบในกรณีต่างๆ กัน

	N_p	N_s	Weight
Case 1	63	12	Infeasible
Case 2	63	11	28.8044
Case 3	62	12	Infeasible
Case 4	62	11	Infeasible

จะเห็นได้ว่า กรณีที่สามารถทำให้การสร้างเป็นไปได้ในทางปฏิบัติที่ให้น้ำหนักร่วมที่น้อยที่สุดและเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนด ในสมการเงื่อนไขนั้น คือ กรณีที่ 2 ซึ่งผู้ออกแบบจะปรับค่า N_p และ N_s ใหม่ ให้มีค่าเท่ากัน 63 และ 11 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการวนรอบครั้งที่ 3 (Loop 3) ได้ดังรูปที่ 4.4

```

***** Diagnostic Information *****

Number of variables: 7

Functions
Objective: ObjSimTrans06
Gradient: finite-differencing
Hessian: finite-differencing (or Quasi-Newton)
Nonlinear constraints: ConSimTrans06
Gradient of nonlinear constraints: finite-differencing

```

```

Constraints
Number of nonlinear inequality constraints: 30
Number of nonlinear equality constraints: 0

Number of linear inequality constraints: 0
Number of linear equality constraints: 0
Number of lower bound constraints: 0
Number of upper bound constraints: 0

```

```

Algorithm selected
medium-scale

```

```

***** End diagnostic information *****

```

Iter	F-count	f(x)	max constraint	Step-size	Directional derivative	Procedure
1	8	29.8792	13.09	1	1.17	
2	17	31.1672	0.1639	1	-1.84	Hessian modified
3	26	29.4759	-4.42e-006	1	-0.678	
4	35	28.8372	1.019e-005	1	-0.0328	
5	44	28.8045	4.563e-009	1	-0.000114	Hessian modified
6	53	28.8044	2.487e-014	1	-1.4e-009	Hessian modified

Optimization terminated successfully:

Search direction less than 2*options.TolX and
maximum constraint violation is less than options.TolCon

Active Constraints:

1
6
8
10

Iteration is complete
E (mm.) ---> 3.6000

g (mm.) ---> 0.7876

Np (Turns) ---> 63

Ns (Turns) ---> 11

dp (mm.) ---> 0.3191

ds (mm.) ---> 0.5399

Ipmx (A.) ---> 1.6534

Maximum flux density (T.) ---> 0.1600

Transformer weight (g.) ---> 28.8044

รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ
แบบสวิตซ์ชขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่สาม (Loop 3)

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมแบบนี้
เงื่อนไขในรอบที่สาม (Loop 3) โดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถสรุปค่าของตัวแปรต่างๆ
ที่ได้จากโปรแกรมเป็นดังตารางที่ 4.8 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.8 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่ 3 (Loop 3)

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3
E	3	3.579	3.6	3.6
g	0.5	0.7931	0.7876	0.7876
N_p	100	62.7648	62.599	63
N_s	5	11.1588	11.2847	11
d_p	0.4	0.3621	0.3196	0.3191
d_s	0.5	0.5359	0.5322	0.5399
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6534
Weight	-	23.3541	28.7869	28.8044

จากตารางที่ 4.8 ค่าของตัวแปรชุดสุดท้ายที่ผู้ออกแบบจะต้องทำการปรับก็คือ d_p และ d_s เป็นลำดับสุดท้ายในการวนรอบครั้งสุดท้าย (Loop 4) เนื่องจากค่า d_p และ d_s จะมีผลต่อเงื่อนไขพื้นที่การพันขดลวดรวมทั้งเงื่อนไขของปริมาณกระแสที่ไหลในขดลวดเท่านั้น ทั้งนี้ผลของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่จะต้องเปลี่ยนไปหลังจากการปรับค่า d_p และ d_s จะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยทั่วไปการปรับค่า d_p และ d_s กระทำได้โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ d_p และ d_s ที่ได้จากโปรแกรมกับฐานข้อมูลของขนาดขดลวดชนิดที่เลือกใช้ หรือ Data Sheet ของผู้ผลิตขดลวด จากนั้นก็ให้เลือกค่าที่ใกล้เคียงที่สุดโดยเลือกจากค่าที่สูงกว่าเป็นหลักเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขของปริมาณกระแสที่เหมาะสมที่ไหลในขดลวด แม้ว่าการเลือกค่า d_p และ d_s ที่ใหญ่ขึ้นอาจทำให้ขดลวดพันลงไปในช่องว่างของแกนล้านอกมา แต่โดยส่วนใหญ่จะไม่เกิดปัญหานี้ นอกเสียจากว่าพื้นที่ที่เหลือในการพันขดลวดเหลืออยู่น้อยมากๆ ถ้าหากเกิดปัญหานี้จริง โปรแกรมจะเป็นตัวบอกว่าไม่มีขดลวดที่เลือกจาก Data Sheet ที่สามารถพันลงไปในช่องว่างการพันของแกนได้ ซึ่งผู้ออกแบบต้องกลับไปที่การวนรอบครั้งที่ 3 (Loop 3) อีกครั้ง เพื่อเลือกจำนวนรอบของ N_p และ N_s ที่น้อยลง แล้วทำการขันตอนเดินเข้าอีกครั้ง แต่การลดจำนวนรอบจะทำให้ค่าผลลัพธ์ของ d_p และ d_s มีค่าสูงขึ้นอีก ซึ่งก็อาจทำให้ไม่สามารถพันขดลวดลงไปได้เช่นกัน เพราะฉะนั้นการเลือกแกนใหม่ให้ใหญ่ขึ้นในการวนรอบครั้งที่ 2 (Loop 2) น่าจะเป็นการแก้ปัญหาที่ดีที่สุด

ผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ชิงขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่สุดท้าย (Loop 4) แสดงได้ดังรูปที่ 4.5

```
Diagnostic Information
```

Number of variables: 7

Functions

Objective:	ObjSimTrans06
Gradient:	finite-differencing
Hessian:	finite-differencing (or Quasi-Newton)
Nonlinear constraints:	ConSimTrans06
Gradient of nonlinear constraints:	finite-differencing

Constraints

Number of nonlinear inequality constraints:	30
Number of nonlinear equality constraints:	0

Number of linear inequality constraints:	0
Number of linear equality constraints:	0
Number of lower bound constraints:	0
Number of upper bound constraints:	0

Algorithm selected
medium-scale

```
End diagnostic information
```

Iter	F-count	f(x)	constraint	Step-size	Directional	
					derivative	Procedure
1	8	28.9734	13.09	1	-0.0304	infeasible
2	17	28.943	2.126	1	-0.036	Hessian modified; infeasible
3	26	28.907	0.02045	1	-0.00836	Hessian modified
4	35	28.8986	0.0001635	1	-0.000259	Hessian modified
5	44	28.8984	8.416e-007	1	-2.8e-007	Hessian modified twice
6	53	28.8984	2.216e-013	1	-3.03e-013	Hessian modified twice

Optimization terminated successfully:

Search direction less than 2*options.TolX and
maximum constraint violation is less than options.TolCon

Active Constraints:

3
8

Iteration is complete

Core Number ---> 14

E (mm.) ---> 3.6000

g (mm.) ---> 0.8003

Np (Turns) ---> 63

Ns (Turns) ---> 11

dp (mm.) ---> 0.3200

ds (mm.) ---> 0.5500

Ipmax (A.) ---> 1.6685

Maximum flux density (T.) ---> 0.1590

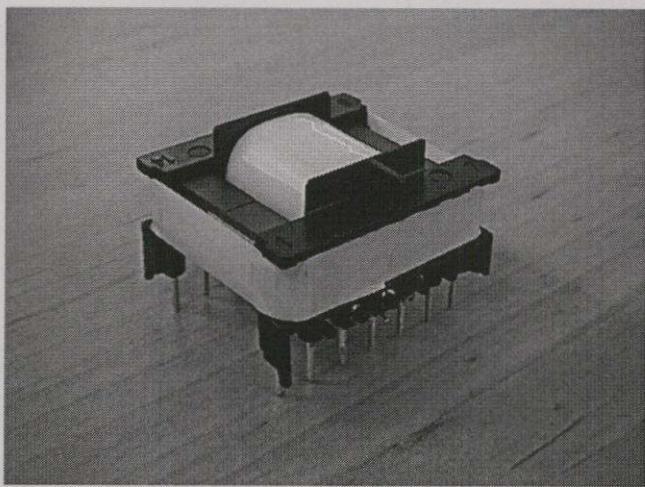
Transformer weight (g.) ---> 28.8984

รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชิงขนาด 12 V / 2 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4)

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบที่สุดท้าย (Loop 4) โดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถสรุปค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรมเป็นดังตารางที่ 4.9 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.9 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4)

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.579	3.6	3.6	3.6
g	0.5	0.7931	0.7876	0.7876	0.8003
N_p	100	62.7648	62.599	63	63
N_s	5	11.1588	11.2847	11	11
d_p	0.4	0.3621	0.3196	0.3191	0.32
d_s	0.5	0.5359	0.5322	0.5399	0.55
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6534	1.6685
Weight	-	23.3541	28.7869	28.8044	28.8984



รูปที่ 4.6 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่สร้างขึ้น

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ด้วยวิธีที่นำเสนอ สามารถให้โครงสร้างที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติซึ่งสามารถนำไปสร้างได้จริง ส่วนการทดสอบลักษณะทางกายภาพและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A จะเป็นดังตารางที่ 4.10 และ 4.11

ตารางที่ 4.10 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

ขนาด 12 V / 2 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คิดนำหนักของ W_{bob} และ etc.)

	Program (g)	Prototype (g)			
		No. 1	Error (%)	No. 2	Error (%)
W_{p1}	0.888	0.8	11.00	0.8	11.00
W_{p2}	1.2601	1.2	5.01	1.2	5.01
W_s	2.2159	2.4	-7.67	2.4	-7.67
W_b	0.0059	very low	-	very low	-
W_c	24.5284	21.4	14.62	21.6	13.56
W_{total}^*	28.8984	25.8	12.01	26	10.03
W_{bob}	-	4.6	-	4.7	-
etc.	-	2.4	-	2.2	-

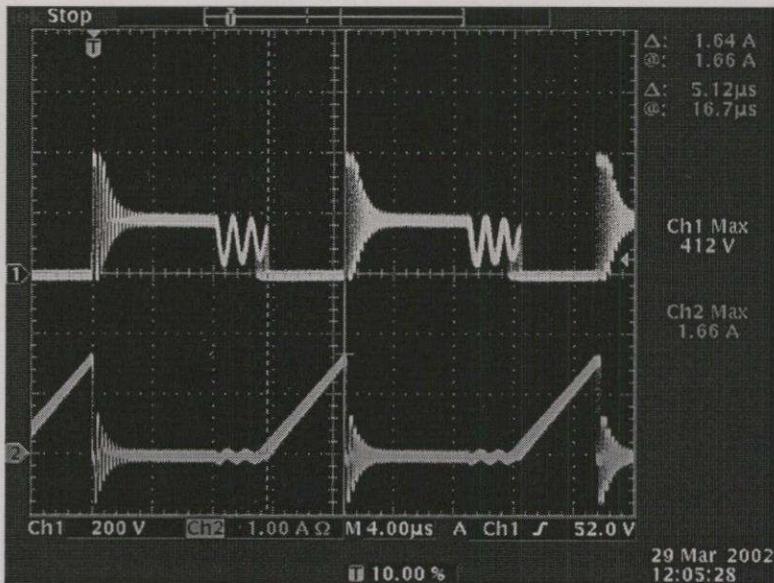
ตารางที่ 4.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

ขนาด 12 V / 2 A ขณะจ่าย Load 2A

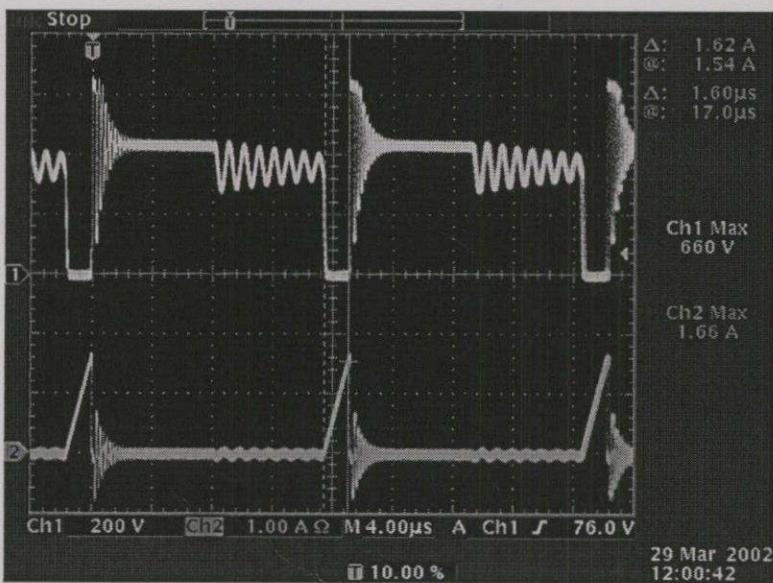
		Program	Prototype	Error (%)
85 VAC	$I_{p(max)}$ (A)	1.6685	1.66	0.51
	$t_{on(max)}$ (μ s)	5	5.12	-2.34
	$t_{off(max)}$ (μ s)	8.0714	8	0.89
	f (kHz)	60	59.52	0.81
264 VAC	$I_{p(max)}$ (A)	1.6685	1.66	0.51
	$t_{on(max)}$ (μ s)	1.6096	1.6	0.60
	$t_{off(max)}$ (μ s)	8.0714	8	0.89
	f (kHz)	60	58.85	1.95

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (W_{total}) ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด (Program) และที่ได้จากดันแบบ (Prototype) จำนวน 2 ตัว จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปบ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าน้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์ (W_g) ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ของน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่วัดได้จากดันแบบจริงที่ไม่นำน้ำหนักของบอนบิน (W_{bob}) และ น้ำหนักอื่นๆ (etc.) เช่น น้ำหนักของเทปปันวน มาคิดด้วย

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด (Program) และที่ได้จากดันแบบ (Prototype) จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากดันแบบจริง นั่นแสดงให้เห็นว่าการคำนวณมีความถูกต้อง นอกนั้น ยังได้ทำการวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงในขณะที่ทำการจ่าย Load สูง ดูค่าแรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับซึ่งเป็นการวัดแรงดันและกระแสที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET ในวงจรดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุด (85 VAC) โดยจ่าย Load 2 A



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าสูงสุด (264 VAC) โดยจ่าย Load 2 A

4.3 การออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 5 V/1.2A

ในการออกแบบหน้าแปลงดังกล่าวจะมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 5 V / 1.2 A (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร)

Symbols	Description	Value	Unit
-	Core vendor	KAWATETSU	-
-	Wire type	UEW Class 1 (JIS)	-
-	Bobbin	Vertical	-
-	Core material	MB3	-
D_c	Core density	4.90E-06	kg/mm ³
μ_i	Initial permeability	2500	-
D_p	Primary winding density	8.91E-06	kg/mm ³
D_s	Secondary winding density	8.91E-06	kg/mm ³
D_b	Bias winding density	8.91E-06	kg/mm ³
W_{bob}	Bobbin thickness	1	mm
W_{ins}	Insulation thickness	0.08	mm
d_b	Bias winding diameter	0.04	mm
$I_{p(max)Limit}$	Maximum primary current limit	3	A
$B_{(max)Limit}$	Maximum flux density limit	0.16	T
V_o	Output voltage	5	V
$I_{o(max)}$	Maximum output current	1.2	A
$D_{(min)Limit}$	Minimum duty cycle limit	0.3	-
$D_{(max)Limit}$	Maximum duty cycle limit	0.4	-
$V_{in(min)}$	Minimum input voltage	120.19	V

ตารางที่ 4.12 (ต่อ)

Symbols	Description	Value	Unit
$V_{in(max)}$	Maximum input voltage	373.296	V
$V_{d(max)}$	Maximum dropout voltage across diode	1	V
C_{rep1}	Safety creepage distance from primary	4	mm
C_{rep2}	Safety creepage distance from secondary	2	mm
f	Frequency	40	kHz
$V_{DS(max)Limit}$	Maximum Drain-Source voltage limit	1000	V
N_1	Number of primary parallel winding	1	turns
N_2	Number of secondary parallel winding	1	turns
T_{mar}	Transformer design margin	1.25	-
$g_{(min)Limit}$	Minimum gap length limit	0.1	mm
$g_{(max)Limit}$	Maximum gap length limit	1	mm
E	Half of center leg width *	-	mm
g	Air gap length *	-	mm
N_p	Primary turns *	-	turns
N_s	Secondary turns *	-	turns
d_p	Primary winding diameter *	-	mm
d_s	Secondary winding diameter *	-	mm
$I_{p(max)}$	Maximum primary current *	-	A

หน้าอแดปต์ความถี่สูงดังกล่าวจะถูกนำมาใช้สำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ที่ใช้กับแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายได้หลายระดับ นั่นคือสามารถใช้งานได้ทั่วโลก (Universal Input) เช่นเดียวกับการออกแบบแรก ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 40 kHz ซึ่งมีค่าไม่ต่างจากทำให้เกิดเสียงรบกวนแก่ประสิทธิภาพ ได้ยินของมนุษย์ได้

เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟดังกล่าวหมายเหตุกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ซึ่งตัวแหล่งจ่ายไฟมีความกว้างมากกว่ากัน ขอบบินที่เลือกใช้จะเป็นแบบแนวตั้ง (Vertical) ก้าวคือ ขั้วที่ใช้ในการพันขดลวดของ Primary และ Secondary จะอยู่ด้านเดียวกัน ทำให้ลดพื้นที่ของแผ่น PCB ลงได้

ระยะคีบคลานปลอดภัย (Creepage Safety Distance) ทางฝั่งที่เป็นขั้วที่ใช้ในการพันขดลวดจะมีค่าเท่ากับ 4 mm. แต่อีกฝั่งตรงข้ามจะมีค่าเท่ากับ 2 mm. เนื่องจากขั้วที่ใช้ในการพันขดลวด Primary และ Secondary อยู่ด้านเดียวกัน ฉะนั้น ฝั่งตรงข้ามจึงสามารถลดระยะคีบคลานที่เหลือเพียงครึ่งหนึ่งซึ่งจะช่วยให้พื้นที่ในการพันขดลวดเพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ จะมีลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหนึ่งแบบเดียวกัน ของแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ขนาด 12V/2A ในตอนแรกทั้งหมด

4.3.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation)

การออกแบบโดยวิธีทั่วไปจะมีลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหนึ่งแบบเดียวกัน ของแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ในตอนแรกทั้งหมด ซึ่งสามารถสรุปผลการออกแบบเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.13 ผลการออกแบบหนึ่งแบบเดียวกันของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด

5 V / 1.2 A โดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation)

	Manual
E	3.175
g	0.441
N_p	164
N_s	10
d_p	0.16
d_s	0.65
$I_{p(max)}$	0.3565
Weight	12.65

4.3.2 การออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอด้วย

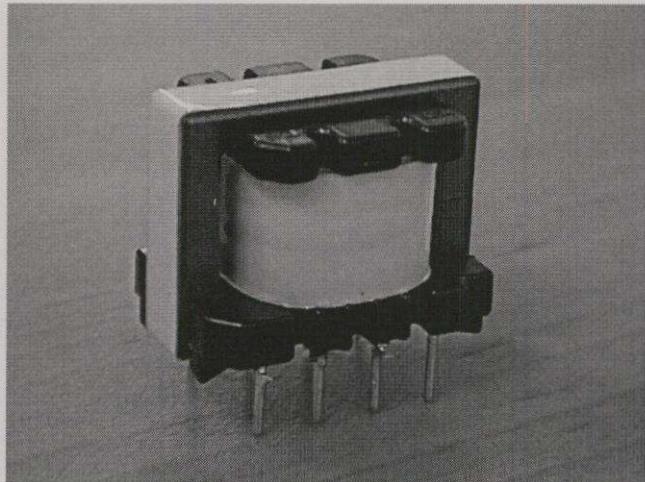
ขั้นตอนและวิธีการในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ด้วยวิธีที่นำเสนอด้วยมีลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในตอนแรกเช่นกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.14 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4)

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	2	2.6967	3.175	3.175	3.175
g	0.5	0.504	0.4406	0.4406	0.4451
N_p	100	160.2121	140.4964	141	141
N_s	10	8.5813	11.6895	11	11
d_p	0.1	0.1598	0.1598	0.1596	0.16
d_s	0.5	0.6904	0.554	0.5716	0.6
$I_{p(max)}$	0.2	0.416	0.416	0.4145	0.4171
Weight	-	11.9889	12.2183	12.2273	12.3632

ในความเป็นจริง แกนเฟอร์ไรต์ที่ให้น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าน้อยที่สุดคือแกนเบอร์ 16 (EE25K) ซึ่งให้น้ำหนักรวมของหม้อแปลงความถี่สูงเท่ากับ 12.2633 g แต่เนื่องจากไม่สามารถหาแกนเบอร์ดังกล่าวในห้องคลадได้ จึงอาศัยแกนเบอร์ 17 (EE25.4A) แทน จึงทำให้ผลลัพธ์ของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ด้านแบบจริงที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A เป็นดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ด้วยวิธีที่นำเสนอ สามารถให้โครงสร้างที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติซึ่งสามารถนำไปสร้างได้จริง

ตารางที่ 4.15 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

ขนาด 5 V / 1.2 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คิดนำหนักของ W_{bob} และ etc.)

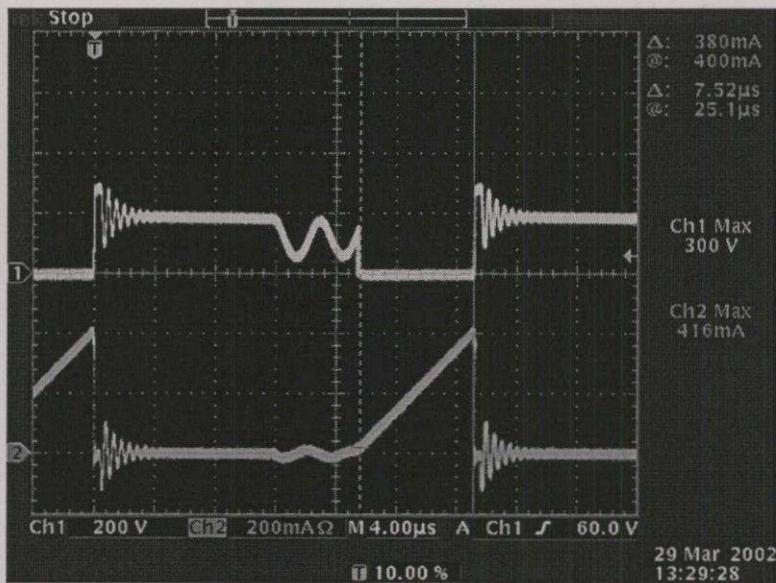
	Program (g)	Prototype (g)			
		No. 1	Error (%)	No. 2	Error (%)
W_{p1}	0.4558	0.4	13.95	0.4	13.95
W_{p2}	0.6812	0.6	13.53	0.6	13.53
W_s	1.2473	1.2	3.94	1.2	3.94
W_b	0.0122	Very low	-	Very low	-
W_c	9.9667	10	-0.33	10.2	-2.34
W_{total}^*	12.3632	12.2	1.34	12.4	-0.30
W_{bob}	-	2.8	-	2.6	-
etc.	-	1.4	-	1.4	-

จากตารางที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า $\text{น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง} (W_{total})$ ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด้วยโปรแกรม (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จำนวน 2 ตัว จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปบ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าน้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์ (W_c) ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ของน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่วัดได้จากต้นแบบจริงที่ไม่นำน้ำหนักของบอบบิน (W_{bob}) และ น้ำหนักอื่นๆ (etc.) เช่น น้ำหนักของเทปปุณวน มาคิดด้วย

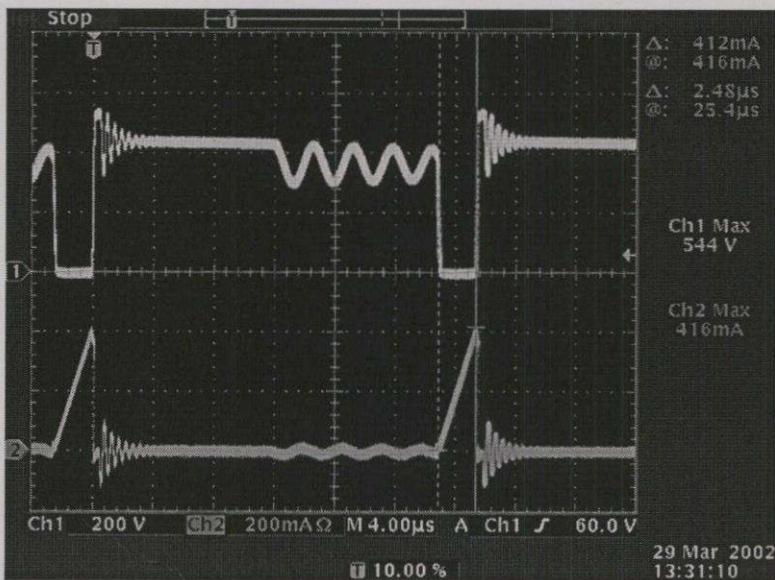
ตารางที่ 4.16 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ขนาด 5 V / 1.2 A ขณะจ่าย Load 1.2 A

		Program	Prototype	Error (%)
85 VAC	$I_{p(max)}$ (A)	0.4171	0.416	0.26
	$t_{on(max)}$ (μs)	7.5	7.52	-0.27
	$t_{off(max)}$ (μs)	11.721	12	-2.33
	f (kHz)	40	39.68	0.81
264 VAC	$I_{p(max)}$ (A)	0.4171	0.416	0.26
	$t_{on(max)}$ (μs)	2.4579	2.48	-0.89
	$t_{off(max)}$ (μs)	11.721	12	-2.33
	f (kHz)	40	39.06	2.41

จากตารางที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า คุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด้วยโปรแกรม (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากต้นแบบจริง นั่นแสดงให้เห็นว่าการคำนวณมีความถูกต้อง นอกนั้น ยังได้ทำการวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงในขณะที่ทำการจ่าย Load สูง ถูกต้องและแม่นยำ มีค่าต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับซึ่งเป็นการวัดแรงดันกระแสที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET ในวงจรดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุด (85 VAC) โดยจ่าย Load 1.2 A



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าสูงสุด (264 VAC) โดยจ่าย Load 1.2 A

4.4 การออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4A

ในการออกแบบหน้าแปลงดังกล่าวจะมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร)

Symbols	Description	Value	Unit
-	Core vendor	EPCOS	-
-	Wire type	UEW Class 1 (JIS)	-
-	Bobbin	Herizontal	-
-	Core material	N27	-
D_c	Core density	4.75E-06	kg/mm ³
μ_i	Initial permeability	2000	-
D_p	Primary winding density	8.91E-06	kg/mm ³
D_s	Secondary winding density	8.91E-06	kg/mm ³
D_b	Bias winding density	8.91E-06	kg/mm ³
W_{bob}	Bobbin thickness	1	mm
W_{ins}	Insulation thickness	0.08	mm
d_b	Bias winding diameter	0.04	mm
$I_{p(max)Limit}$	Maximum primary current limit	5	A
$B_{(max)Limit}$	Maximum flux density limit	0.16	T
V_o	Output voltage	24	V
$I_{o(max)}$	Maximum output current	4	A
$D_{(min)Limit}$	Minimum duty cycle limit	0.4	-
$D_{(max)Limit}$	Maximum duty cycle limit	0.5	-
$V_{in(min)}$	Minimum input voltage	120.19	V

ตารางที่ 4.17 (ต่อ)

Symbols	Description	Value	Unit
$V_{in(max)}$	Maximum input voltage	373.296	V
$V_{d(max)}$	Maximum dropout voltage across diode	1	V
C_{rep1}	Safety creepage distance from primary	4	mm
C_{rep2}	Safety creepage distance from secondary	4	mm
f	Frequency	100	kHz
$V_{DS(max)Limit}$	Maximum Drain-Source voltage limit	1000	V
N_I	Number of primary parallel winding	2	turns
N_2	Number of secondary parallel winding	3	turns
T_{mar}	Transformer design margin	1.25	-
$g_{(min)Limit}$	Minimum gap length limit	0.1	mm
$g_{(max)Limit}$	Maximum gap length limit	1	mm
E	Half of center leg width *	-	mm
g	Air gap length *	-	mm
N_p	Primary turns *	-	turns
N_s	Secondary turns *	-	turns
d_p	Primary winding diameter *	-	mm
d_s	Secondary winding diameter *	-	mm
$I_{p(max)}$	Maximum primary current *	-	A

หม้อแปลงความถี่สูงดังกล่าวจะถูกนำมาใช้สำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 24 V / 4 A ที่ใช้กับแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายได้หลายระดับ นั่นคือสามารถใช้งานได้ทั่วโลก (Universal Input) เช่นเดียวกับการออกแบบแรก ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 100 kHz ซึ่งเหมาะสมกับแหล่งจ่ายไฟที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากความถี่ที่สูงขึ้นสามารถลดขนาดและน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงลงได้ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.4

ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ก็จะเป็นลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหน้าจอแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ขนาด $12\text{ V} / 2\text{ A}$ และ $5\text{ V} / 1.2\text{ A}$ ในตอนแรกเว้นแต่ค่าอัตราส่วนสูงสุดของเวลาในการ On ต่อเวลาทั้งหมด (Maximum Duty Cycle) จะถูกกำหนดไม่ให้สูงกว่า 0.5 และไม่ให้ต่ำกว่า 0.4 เนื่องจากค่าอัตราส่วนดังกล่าวที่สูงขึ้น จะช่วยให้กระแสสูงสุด $I_{p(max)}$ มีค่าลดลง ทำให้ MOSFET ที่ใช้มีราคาและการสูญเสียในรูปของความร้อนไม่สูงนัก แต่ถ้าหากเลือกใช้ MOSFET ที่มีพิกัดกระแส Drain สูงขึ้น ราคาและการสูญเสียในรูปของความร้อนก็จะสูงขึ้นตามลำดับ

4.4.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation)

การออกแบบโดยวิธีทั่วไปจะมีลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหน้าจอแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ขนาด $12\text{ V} / 2\text{ A}$ และ $5\text{ V} / 1.2\text{ A}$ ในตอนแรกทั้งหมด ซึ่งสามารถสรุปผลการออกแบบเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.18 ผลการออกแบบหน้าจอแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด

$24\text{ V} / 4\text{ A}$ โดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation)

	Manual
E	5.1
g	1
N_p	32
N_s	4
d_p	0.45
d_s	0.95
$I_{p(max)}$	4.44
Weight	62.67

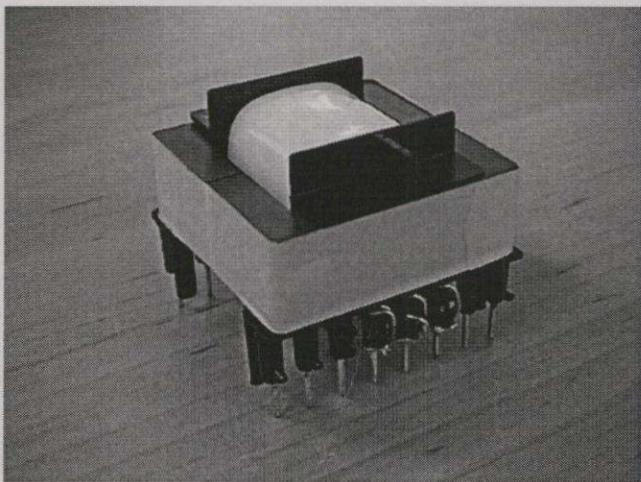
4.4.2 การออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอน

ขั้นตอนและวิธีการในการออกแบบหน้าจอแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ขนาด $24\text{ V} / 4\text{ A}$ ด้วยวิธีที่นำเสน�建議จะมีลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหน้าจอแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ขนาด $12\text{ V} / 2\text{ A}$ และ $5\text{ V} / 1.2\text{ A}$ ในตอนแรกเช่นกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.19 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4)

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	4.9301	5.1	5.1	5.1
g	0.5	1	0.9433	0.9433	1
N_p	100	26.4598	25.0396	26	26
N_s	5	5.5037	5.2083	5	5
d_p	0.4	0.4206	0.4206	0.4166	0.45
d_s	0.5	0.753	0.753	0.7757	0.8
I_{pmax}	5	4.9921	4.9921	4.8077	4.9464
Weight	-	55.6527	59.9194	60.0638	60.9317

ต้นแบบจริงที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A เป็นดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 4 A ด้วยวิธีที่นำเสนอ สามารถให้โครงสร้างที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติซึ่งสามารถนำไปสร้างได้จริง

ตารางที่ 4.20 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

ขนาด 24 V / 4 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คิดนำหนักของ W_{bob} และ etc.)

	Program (g)	Prototype (g)			
		No. 1	Error (%)	No. 2	Error (%)
W_{p1}	1.9522	2	-2.39	2	-2.39
W_{p2}	2.4221	2.4	0.92	2.5	-3.22
W_s	3.988	4.1	-2.73	4	-0.3
W_b	0.0015	very low	-	very low	-
W_c	52.5678	48.6	8.16	49	6.79
W_{total}^*	60.9317	58.4	4.34	57.8	5.14
W_{bob}	-	7.2	-	7.4	-
etc.	-	3	-	2.9	-

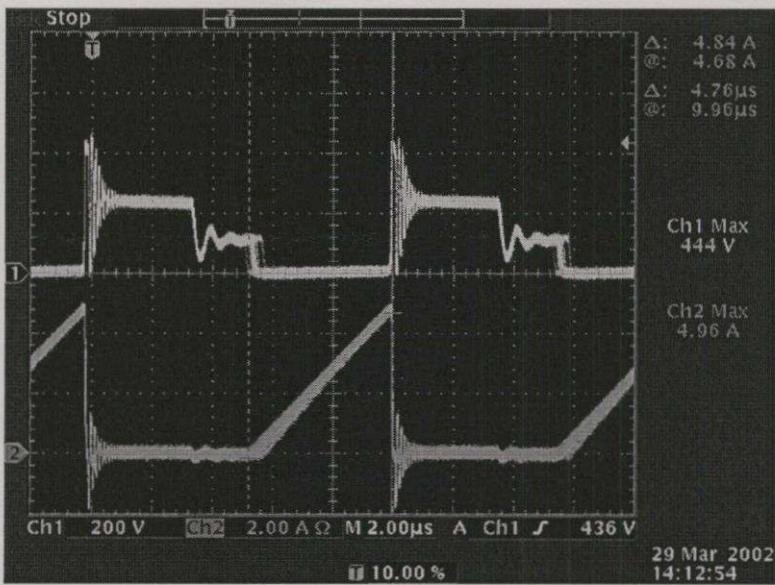
ตารางที่ 4.21 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

ขนาด 24 V / 4 A ขณะจ่าย Load 4 A

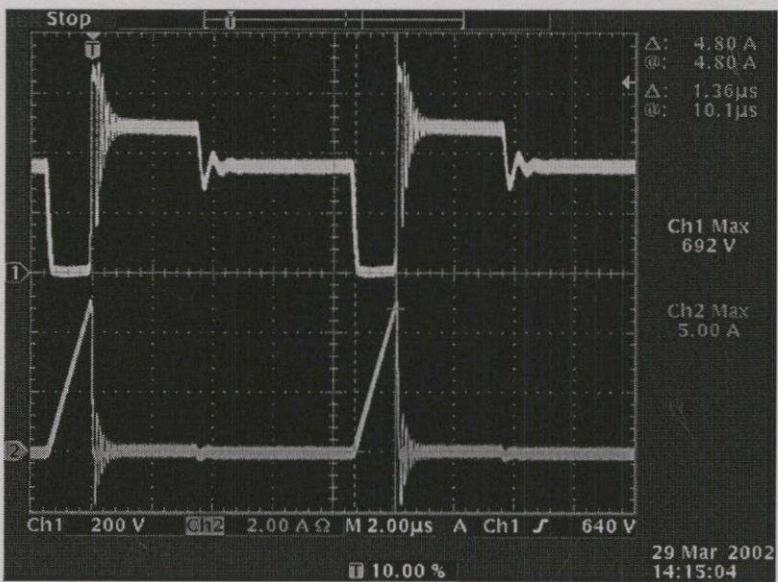
		Program	Prototype	Error (%)
85 VAC	$I_{p(max)} (A)$	4.9464	4.96	-0.27
	$t_{on(max)} (\mu s)$	5	4.76	5.04
	$t_{off(max)} (\mu s)$	3.7347	3.6	3.74
	$f(kHz)$	100	98.04	2.00
264 VAC	$I_{p(max)} (A)$	4.9464	5	-1.07
	$t_{on(max)} (\mu s)$	1.3004	1.36	-4.38
	$t_{off(max)} (\mu s)$	3.7347	3.6	3.74
	$f(kHz)$	100	100	0.00

จากตารางที่ 4.20 จะเห็นได้ว่า \bar{n} หนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (W_{total}) ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จำนวน 2 ตัว จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปปั่นงา โดยเฉลี่ยอย่างยิ่ง ค่าน้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์ (W_c) ซึ่งสามารถลดคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ของน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่วัดได้จากต้นแบบจริงที่ไม่นำน้ำหนักของบอบบิน (W_{bob}) และ น้ำหนักอื่นๆ (etc.) เช่น น้ำหนักของเทปปันวน มาคิดด้วย

จากตารางที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย ซึ่งสามารถลดคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากต้นแบบจริง นั่นแสดงให้เห็นว่าการคำนวณมีความถูกต้อง นอกจากนี้ ยังได้ทำการวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงในขณะที่ทำการจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับซึ่งเป็นการวัดแรงดันและกระแสที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET ในวงจรดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุด (85 VAC) โดยจ่าย Load 4 A



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET (บน) และกระแส Drain (ล่าง) ขณะแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายมีค่าสูงสุด (264 VAC) โดยจ่าย Load 4 A

4.5 การลดน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อม

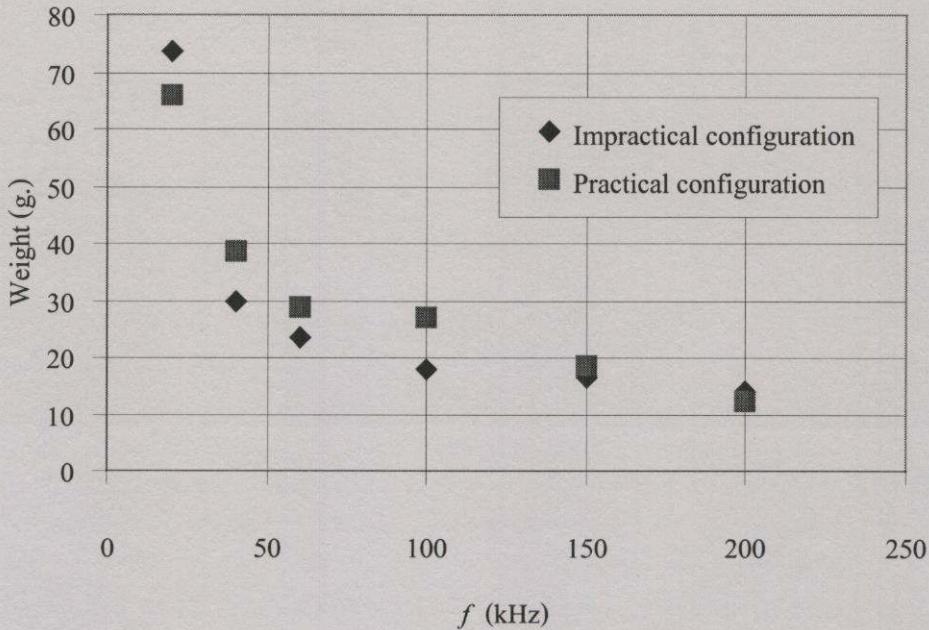
จากการทดสอบที่ผ่านมาดังนี้จะเห็นได้ว่า น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงจะมีขนาดและน้ำหนักที่ขึ้นกับพิกัดกำลังงานขาออกโดยตรง อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบสามารถปรับพารามิเตอร์บางตัว โดยที่ยังคงความสามารถในการจ่ายกำลังงานขาออกได้เหมือนเดิม ในงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ตัว ดังต่อไปนี้

4.5.1 ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

จากการที่ 3.15 จะเห็นได้ว่า ความถี่มีผลโดยตรงต่อกำลังงานขาออก ที่พิกัดกำลังงานขาออกเดียวกัน ความถี่ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนี่บวน (L_p) ลดลงนั่นคือจำนวนรอบที่ลดลง, ขนาดแกนเฟอร์โรคิตที่ลดลง และระยะช่องอากาศ (g) มีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า พารามิเตอร์เหล่านี้มีผลโดยตรงต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสิ้น ส่วนค่ากระแสสูงสุดของ Primary ($I_{p(max)}$) ในสมการที่ 3.15 จะมีค่าเท่าเดิม เนื่องจาก ความสัมพันธ์ระหว่างความเวลาในการ On สูงสุด ($t_{on(max)}$) ที่ลดลง และค่าความหนี่บวนที่ลดลง จะทำให้ค่ากระแสดังกล่าวมีค่าคงเดิม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของความถี่ (f) ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่ค่าต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบไปแล้วข้างต้น เพื่อทดสอบว่าพารามิเตอร์ความถี่มีผล อย่างไรต่อน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (Weight) โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f และ Weight ได้ดังรูปที่ 4.15 (ภาคผนวก ง)

จากการที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า ความถี่ที่สูงขึ้นจะทำให้น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงอย่างมากในช่วงแรก แต่ความถี่ที่สูงจนเกินไปจะไม่ทำให้น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงมากนัก ในทางปฏิบัติช่วงความถี่ที่เหมาะสมของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง จะอยู่ระหว่าง 40 kHz – 150 kHz ความถี่ที่ต่างจากนี้ไป สามารถกำเนิดสัญญาเสียงรบกวนต่อประสานทางการได้ขึ้นของมนุษย์ได้ เพราะช่วงความถี่สูงสุดที่ประสานหูของมนุษย์สามารถได้ยินจะอยู่ที่ 20 kHz ตัวความถี่ที่สูงจนเกินไปจะก่อให้เกิดการสูญเสียในแกน (Core Loss), การสูญเสียในขาด漉ว (Copper Loss) และการสูญเสียอื่นๆ ที่มากขึ้น นอกนั้นยังทำให้การออกแบบวงจรมีความยุ่งยากมากขึ้นไปตามลำดับ [2, 12]



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (f) และน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (Weight) ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A

สำหรับน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงในทางปฏิบัติ (Practical Configuration) ที่เห็นจากรูปที่ 4.15 นั้นคือผลของน้ำหนักที่ได้หลังจากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอในรอบสุดท้าย (Loop 4) ซึ่งเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ จะเห็นได้ว่า โดยส่วนใหญ่ค่าของน้ำหนักที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติจะสูงกว่าในทางอุดมคติ (Impractical Configuration) ที่เป็นผลของน้ำหนักที่ได้หลังจากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอในรอบแรก (Loop 1) อยู่เล็กน้อย ยกเว้นที่ความถี่ 20 kHz และ 200 kHz ซึ่งค่าของน้ำหนักที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติจะต่ำกว่า สาเหตุเกิดจากผลของน้ำหนักที่ได้จากการห้ามค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) ซึ่งจะอาศัยค่าของ K_1 ถึง K_5 เป็นค่าเฉลี่ยของแกนที่มีทั้งหมดที่มีอยู่ของผู้ผลิต และค่าน้ำหนักในทางอุดมคติจะเป็นค่าที่ได้หลังจากการเลือกใช้แกนเบอร์ใดเบอร์หนึ่งซึ่งมีค่า K_1 ถึง K_5 เนื่องตัวซึ่งอาจมีค่าที่สูงกว่าได้ จึงเป็นผลทำให้ค่าของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงในทางปฏิบัตินี้ค่าสูงกว่า ฉะนั้น ค่าของน้ำหนักที่ได้จากการห้ามค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) จะเป็นเพียงการแสดงแนวโน้มของน้ำหนักที่จะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเท่านั้น

นอกจากนี้ ความแตกต่างระหว่างค่าของน้ำหนักที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติและในทางอุดมคติสามารถลดลงได้ ถ้าหากแกนของผู้ผลิตใน Data Sheet มีหลากหลายมากขึ้น เนื่องจาก

จะทำให้ผลลัพธ์ของ E ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) มีค่าใกล้เคียงกับค่า E ที่มีอยู่จริงใน Data Sheet

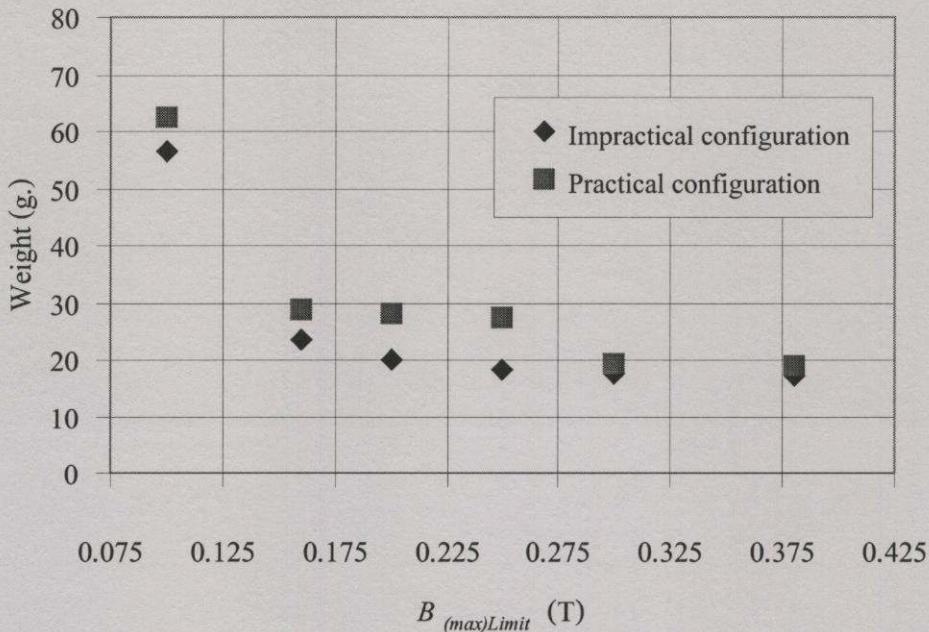
4.5.2 พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

จากสมการที่ 3.31 จะเห็นได้ว่า พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ($B_{(max)Limit}$) ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลคุณของจำนวนรอบของ Primary (N_p) และพื้นที่หน้าตัดแกนกลาง (A_e) มีค่าลดลง ส่วนผลคุณของค่าความเหนี่ยวนำ (L_p) และค่ากระแสสูงสุดของ Primary ($I_{p(max)}$) จะมีค่าเท่าเดิม สาเหตุก็มาจากการสมการที่ 3.31 ซึ่งผลคุณของค่าความเหนี่ยวนำและกำลังสองของกระแสสูงสุดของ Primary จะไม่เปลี่ยนแปลง เพราะความถี่ (f) และกำลังงานของการอกรูป ($P_{out(max)}$) ไม่เปลี่ยนแปลง

จากผลคุณของจำนวนรอบของ Primary และพื้นที่หน้าตัดแกนกลาง ที่ลดลง สามารถทำให้น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าลดลง ได้โดย การลดค่าพื้นที่หน้าตัดแกนกลาง จะทำให้น้ำหนักลดลงมากที่สุด การลดจำนวนรอบของ Primary ก็สามารถทำให้น้ำหนักลดลง ได้ปานกลาง อย่างไรก็ตาม การลดค่าทั้งสองจะมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ ลดลง ซึ่งจะทำให้สมการที่ 3.31 ขาดความสมดุลย์ การลดกระแสของอากาศ (g) จึงเป็นทางออกที่ดีที่จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำยังคงรักษาค่าเดิมเอาไว้ได้ เมื่อว่าการลดกระแสของอากาศ จะทำให้น้ำหนักมากขึ้น แต่ก็มีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ขนาด 12 V / 2 A ที่ค่าต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบไปแล้วข้างต้น เพื่อทดสอบว่าพารามิเตอร์พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด มีผล อย่างไรต่อหน้าหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (Weight) โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอดังนี้ ได้ผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $B_{(max)Limit}$ และ Weight ได้ดังรูปที่ 4.16 (ภาคผนวก ฯ)

จากรูปที่ 4.16 ผลที่ได้จากการปรับค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด จึงสามารถลดน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง ได้โดย ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ที่สูงขึ้นจะทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงอย่างมากในช่วงแรก แต่ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่สูงจนเกินไป จะไม่ทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงมากนัก ในทางปฏิบัติค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เหมาะสม ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์จะอยู่ที่ 0.16 T สำหรับแกนเฟอร์ไรต์ทั่วๆไป การใช้เฟอร์ไรต์ชนิดพิเศษที่มีการสูญเสียในแกนตัวจะสามารถใช้งานได้ที่ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดสูงขึ้น แต่ราคาที่จะสูงขึ้นกันจึงไม่เป็นที่นิยม [12]



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ($B_{(max)Limit}$) และ น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (Weight) ของหม้อแปลงความถี่สูงของ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงขนาด 12 V / 2 A

4.6 การสูญเสียในแกน (Core loss) และการสูญเสียในขดลวด (Copper loss)

เมื่อว่าในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงค่าความสูญเสียในแกนและความสูญเสียในขดลวด ทั้ง นี้สาเหตุก็เนื่องมาจากการเลือกค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ($B_{(max)Limit}$), ค่า ความถี่ (f) และ ค่า Circular Mils per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าพกพาของค่าความหนาแน่น กระแส (Current Density) ของขดลวดแต่ละชุด มีค่าที่เหมาะสมซึ่งจะเกิดความสูญเสียใน ลักษณะดังกล่าวต่ำมาก โดยทั่วไป ค่ากำลังงานสูญเสียในแกนสามารถคำนวณได้จากการคำ ค่าความสูญเสียในแกนต่อปริมาตรซึ่งคูณได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตแต่ละราย และค่าความสูญ เสียในขดลวดสามารถคำนวณได้จากการคำนวณสูญเสียจากค่าความต้านทานไฟฟ้าลับ (AC Resistance) ซึ่งมีค่าเป็นอัตราส่วนกับค่าความต้านทานไฟตรง (DC Resistance) ซึ่งเป็นวิธีการ คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดที่เกิดจากผลของ Skin Effect [4, 5, 12]

เพื่อเป็นการพิสูจน์ให้เห็นถึงค่าความสูญเสียที่ต่ำ จึงได้ทำการคำนวณค่าความสูญเสีย ในแกนและความสูญเสียในขดลวดของตัวแบบหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัวได้ดังตารางที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.22 ค่าความสูญเสียในแกนของต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่สร้างขึ้นมาทั้ง 3 ตัว
ขณะจ่าย load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าต่ำสุด (85 VAC)

	Core loss (W)
5 V / 1.2 A	0.14
12 V / 2 A	1.4
24 V / 4 A	5.8

ตารางที่ 4.23 ค่าความสูญเสียในDUCT ของต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่สร้างขึ้นทั้ง 3 ตัว
ขณะจ่าย load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าต่ำสุด (85 VAC)

	Primary copper loss (W)	Secondary copper loss (W)	Total copper loss (W)
5 V / 1.2 A	0.19	0.09	0.28
12 V / 2 A	0.37	0.18	0.55
24 V / 4 A	0.57	0.41	0.98

ตารางที่ 4.24 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ของต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัวที่สร้างขึ้นมา
ในขณะจ่าย Load สูงสุด

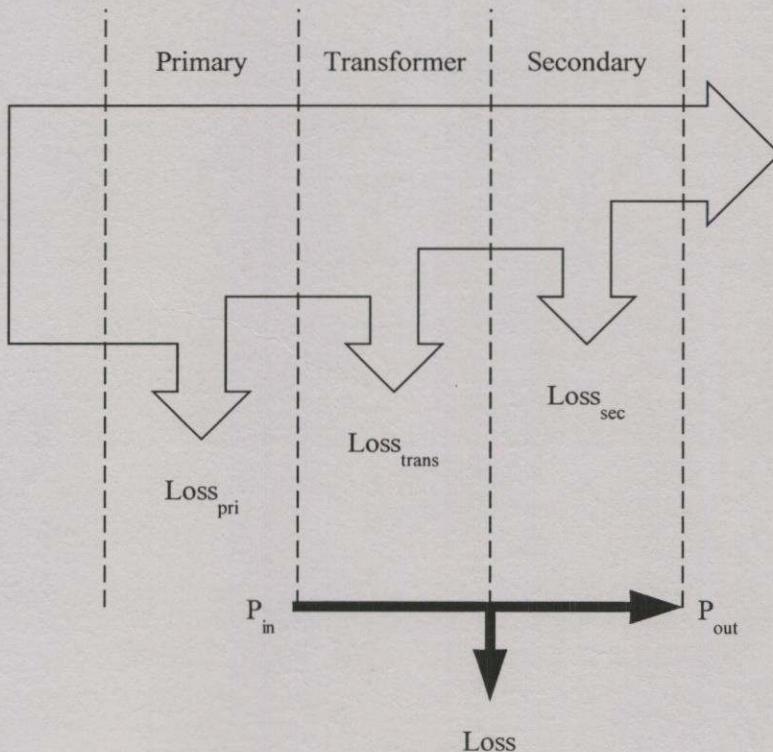
		Temperature (°C)					
		Ambient	Measurement		Rise		
			Winding	Core	Winding	Core	
5 V / 1.2 A	85 VAC	27.9	35.8	32.7	7.9	4.8	
	264 VAC	27.9	35.0	32.2	7.1	4.3	
12 V / 2 A	85 VAC	27.9	43.2	37.4	15.3	9.5	
	264 VAC	28.0	43.5	38.4	15.5	10.4	
24 V / 4 A	85 VAC	28.1	59.2	45.1	31.1	17.0	
	264 VAC	28.5	62.7	46.2	34.2	17.7	

จากตารางที่ 4.22 จะเห็นได้ว่า กำลังงานสูญเสียในแกนมีค่าไม่เกินสูงนักสำหรับต้นแบบของหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 แบบ และจากตารางที่ 4.23 จะเห็นได้ว่า กำลังงานสูญเสียในชุด漉คจะมีค่าน้อยมาก นั่นแสดงถึงค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนและชุด漉คสามารถตัดทิ้งไปได้ถ้าหากการเลือกค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด, ค่าความถี่ และ ค่า Circular Mils per Amp หรือ *CMA* ซึ่งเป็นค่าพกพาของค่าความหนาแน่นกระแสของชุด漉คแต่ละชุด มีค่าที่เหมาะสม [12]

นอกจากนี้ ยังได้ทำการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise) ของหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัว ดังตารางที่ 4.24 ซึ่งสามารถศูนย์ละเอียดได้จากการผ่อนวง流

ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงยังได้มีการกำหนดค่าเพื่อสำหรับการออกแบบ (Design Margin) เอาไว้เพื่อเป็นการยืนยันว่า หม้อแปลงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอจะสามารถจ่ายกำลังงานข้าอก去ได้เพียงพอต่อความต้องการของ Load สูงสุด

เพื่อเป็นการพิสูจน์ให้เห็นถึงค่าเพื่อสำหรับการออกแบบ จึงได้ทำการวัดกำลังงานขาเข้าของหม้อแปลงความถี่สูงและกำลังงานข้าอกของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง โดยที่การวัดกำลังงานขาเข้าของหม้อแปลงความถี่สูงจะใช้วิธีการอ่านค่าจากค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นกำลังงานใน 1 คานเวลา [15] ของหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัว ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งที่พิจารณากำลังงานขาเข้าหม้อแปลงความถี่สูงและกำลังงานข้าอกของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งสำหรับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.25 กำลังงานขาเข้าของต้นแบบหนึ่งแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัวที่สร้างขึ้นมาในขณะ
จ่าย Load สูงสุด

	85 VAC			264 VAC		
	P _{in} (W)	P _{out} (W)	Loss (%)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	Loss (%)
5 V / 1.2 A	7.063	6	15.05	7.145	6	16.03
12 V / 2 A	27.16	24	11.64	27.23	24	11.86
24 V / 4 A	111.7	96	14.06	115.6	96	16.96

การกำหนดค่าเพื่อสำหรับการออกแบบเอาไว้เท่ากับ 1.25 หมายถึงกำลังงานขาเข้าจะต้องมีค่ามากกว่ากำลังงานขาออกอยู่ที่ 20 % ซึ่งค่าดังกล่าวจะสูญเสียไปในรูปของกำลังงานสูญเสียที่หนึ่งแปลงความถี่สูงและวงจรเรียงกระแสทางค้าน Secondary ดังรูปที่ 4.17 และจากตารางที่ 4.24 จะเห็นได้ว่า ค่าเพื่อสำหรับการออกแบบมีค่าที่เหมาะสม หนึ่งแปลงความถี่สูงสามารถให้กำลังงานขาออกได้ตามที่ต้องการ

บทที่ 5

บทสรุป

สืบเนื่องจากการออกแบบหน้าแดปล์ความถี่สูง โดยทั่วๆ ไป (Manual Calculation) ดังตัวอย่างในหัวข้อที่ 4.2.1 “ไม่อาจทราบได้ว่า ผลการออกแบบที่จะได้มาบ้าง มีผลทำให้น้ำหนักโดยรวมของหน้าแดปล์มีค่าน้อยที่สุดด้วยเงื่อนไขที่กำหนดเอาไว้หรือไม่” จึงจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบซ้ำแล้วซ้ำอีก ซึ่งจะทำให้สูญเสียเวลาในการออกแบบไปเป็นอย่างมาก แต่ถ้าหากนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.3 เข้ามาประยุกต์ใช้ โปรแกรมจะสามารถค้นหาค่าของตัวแปรที่เหมาะสมในการออกแบบหน้าแดปล์ความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

กระบวนการ Interactive โดยมีขั้นตอนตั้งแต่รูปที่ 3.6 ถึง 3.8 ซึ่งเพิ่มเข้าไปในระบบ จะสามารถช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถแก้ไขและกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างอิสระในกรณีที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อาจไม่เป็นที่น่าพอใจ เช่น ค่าที่ได้อาจไม่มีขายอยู่จริงในห้องคลาส ก็จำเป็นที่จะต้องปรับปรุงค่าพารามิเตอร์โดยผู้ออกแบบเอง

โปรแกรมดังกล่าวช่วยสามารถทำให้ผู้ออกแบบทราบถึงแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักของหน้าแดปล์ความถี่สูงทางอ้อม โดยสามารถลดเวลาในการวิเคราะห์ลงได้ ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อน้ำหนักของหน้าแดปล์ความถี่สูงทางอ้อมเช่นความถี่ และพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด จะสามารถทำให้น้ำหนักของหน้าแดปล์ความถี่สูงลดลงได้เช่นกันดังรูปที่ 4.15 และ 4.16

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการทดสอบที่ได้จากการออกแบบหน้าแดปล์ความถี่สูงทั้ง 3 ตัวโดยวิธีที่นำเสนอและจากการสร้างต้นแบบจริงในบทที่ 4 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหน้าแดปล์เป็นที่น่าพอใจสามารถนำไปใช้งานจริงได้ น้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์, ขดลวด Primary, ขดลวด Secondary และน้ำหนักโดยรวมของต้นแบบที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักที่ได้จากการโปรแกรม ดังตารางที่ 5.1 จะมีคิดพลาดอยู่บ้างอันเนื่องมาจากการออกแบบหน้าแดปล์ความถี่สูงที่ได้จากการตรวจสอบในภายหลังพบว่า มิติต่างๆ ของแกนเฟอร์ไรต์มีค่าเพิ่ม (Tolerance) อยู่มาก นอกเหนือนี้ค่าความหนาแน่นที่ได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตก็เป็นเพียงค่าเฉลี่ยโดยประมาณท่านั้น จึงทำให้ผลการคำนวณของน้ำหนักจากการหาปริมาตรรวมของแกนเฟอร์ไรต์แล้วนำมาคูณกับความหนาแน่นของแกนเฟอร์ไรต์มีค่าพิดพลาดไป แม้ว่าจะนำค่าปริมาตรของแกนเฟอร์ไรต์ที่ได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตเองมาใช้ในการคำนวณก็ยังมีค่าไม่เท่ากันกับน้ำหนักที่ผู้ผลิตระบุไว้ใน Data Sheet

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด้วย (Program) และต้นแบบที่สร้างขึ้นจริง (Prototype)

	Program (g)	Prototype (g)	Error (%)
5 V / 1.2 A	12.3632	12.2	1.34
12 V / 2 A	28.8984	25.8	12.01
24 V / 4 A	60.9317	58.4	4.34

ส่วนค่าของน้ำหนักของคลัวด์ไบอัส ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำการวัดจริงได้ เมื่อจากมีค่าต่ามากและสุดท้ายคือ ค่าน้ำหนักของขอบบินและส่วนประกอบอื่นๆ เช่น น้ำหนักของเทป绝缘 และเทปที่คันเป็นระยะคืนคลานที่ปลอดภัย (Creepage Safety Distance) ตามมาตรฐานซึ่งมิได้กล่าวถึงในงานวิจัยขึ้นนี้ จะทำให้ค่าน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงผิดพลาดไปได้เช่นกัน

จากการวิเคราะห์น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการคำนวณในรอบแรก (Loop 1) และน้ำหนักสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณในรอบที่สี่ (Loop 4) ที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติจะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสามารถถกค่าได้ว่า ผลของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่น้อยที่สุดไม่อาจนำมาสร้างจริงได้เนื่องจากวัสดุต่างๆ เช่น แกนเฟอร์蕊ต์หรือคลัวด์ที่นำมาใช้ในการสร้างหม้อแปลงความถี่สูงไม่มีขายในห้องทดลอง จึงจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการ Interactive เข้ามาช่วยในการปรับค่าของตัวแปรต่างๆ ให้เป็นค่าที่มีอยู่จริง ซึ่งจะทำให้ผลของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าสูงขึ้นมาเล็กน้อย แต่ก็ยังคงเป็นจุดที่มีน้ำหนักน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการออกแบบโดยวิธีทั่วไป ซึ่งสามารถดูได้จากการที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอด้วย (Program) ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) และรอบสุดท้าย (Loop 4)

	Loop 1 (g)	Loop 4 (g)	Increment (g)
5 V / 1.2 A	11.9889	12.3632	0.3743
12 V / 2 A	23.3541	28.8984	5.5443
24 V / 4 A	55.6527	60.9317	5.279

วิธีการที่จะลดน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงในทางอ้อม คือ การปรับค่าความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์และค่าพิกัดฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่และค่าพิกัดฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่สูงขึ้นสามารถลดน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงได้ แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าที่ความถี่ที่สูงมาก ๆ ($150 - 300 \text{ kHz}$) และค่าพิกัดฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ค่าสูงมาก ๆ ($0.25 - 0.4 \text{ T}$) ก็จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหม้อแปลงมากนัก

นอกจากนี้ค่าความสูญเสียในแกนและความสูญเสียในขดลวดจะมีผลน้อยมาก ถ้าหากค่าความถี่ใช้งาน พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดและ ค่า Circular Mils per Amp หรือ *CMA* ซึ่งเป็นค่าผกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) มีค่าที่เหมาะสม

เมื่อทำการเปรียบวิธีการออกแบบที่นำเสนอกับวิธีการแบบโดยทั่วไปจะเห็นได้ว่า วิธีที่นำเสนอยังไห้โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบากว่าในการออกแบบโดยทั่วไปดังตารางที่ 5.3 เนื่องจากวิธีทั่วไปจะเป็นที่จะต้องทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆอยู่หลายตัวด้วยกัน ซึ่งบางตัวไม่อาจคาดคะเนได้ว่าจะมีผลกระทบต่อน้ำหนักโดยรวมอย่างไร นอกจากนี้ ขั้นตอนการเลือกแกนก็อาจสร้างปัญหาให้กับผู้ออกแบบได้ เช่นกันเนื่องจาก ผู้ออกแบบไม่อาจทราบได้ว่าแกนขนาดใดมีความเหมาะสมกับ SMPS ที่ต้องการ ถ้าหากเลือกแกนไม่ดีจะทำให้ไม่สามารถพันขดลวดลงไปได้ ซึ่งต้องวนกลับมาเลือกแกนใหม่

ตารางที่ 5.3 น้ำหนักที่ลดลงของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีทั่วไป (Manual) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่นำเสนอด (Program)

	Manual (g)	Program (g)	Reduction (g)
5 V / 1.2 A	12.65	12.3632	0.2868
12 V / 2 A	29.66	28.8984	0.7616
24 V / 4 A	62.67	60.9317	1.7383

ดังนั้นวิธีที่ได้นำเสนอจึงมีข้อดีเมื่อเทียบกับการออกแบบโดยวิธีทั่วไปซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบการออกแบบโดยวิธีทั่วไปและวิธีที่นำเสนอด้วย

หัวข้อ	วิธีทั่วไป	วิธีที่นำเสนอด้วย
ประสบการณ์, ความรู้และ ความเข้าใจใน SMPS ของผู้ ออกแบบ	สูงมาก	ปานกลาง (เพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นของตัว แปรต่างๆให้มีลักษณะเป็นไป ได้ในทางปฏิบัติ)
ความรวดเร็วในการออกแบบ	นาน	รวดเร็ว
การปรับปรุงพารามิเตอร์ข้อน หลังในระหว่างการออกแบบ	ต้องทำการคำนวณใหม่ทั้งหมด	กระบวนการ Interactive สามารถให้ผลลัพธ์ได้ทันที
การวิเคราะห์ผลกระบวนการของ พารามิเตอร์แต่ละตัวของ SMPS (เพื่อการศึกษาแนว โน้ม)	ได้แต่ต้องอาศัยการคำนวณ หลายครั้ง	กระบวนการ Interactive สามารถให้ผลลัพธ์ได้ทันที
น้ำหนักโดยรวมน้อยที่สุด	ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับประสบ การณ์ของผู้ออกแบบในการ เลือกค่าของตัวแปรต่างๆ	น้อยที่สุดทุกครั้งภายใต้เงื่อน ไขที่กำหนดโดยอาศัย กระบวนการ Interactive

5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบหน้าจอเปล่งความถี่สูงโดยวิธีที่นำเสนอนี้มิได้คำนึงถึงผลกระทบโดยตรงของค่าความสูญเสียของหน้าจอเปล่งความถี่สูงที่ประกอบไปด้วย ความสูญเสียในแกน และ ความสูญเสียในขดลวด ฉะนั้นแนวทางในการพัฒนาให้วิธีการดังกล่าวให้สามารถคำนึงถึงผลกระทบเหล่านี้ หรือแม้แต่การนำไปวิเคราะห์ผลทางอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหน้าจอเปล่งความถี่สูงที่จะทำการสร้างได้นั้นเป็นสิ่งที่น่าสนใจเดียว

นอกจากนี้ โครงสร้างของแกนเฟอร์ไรต์ยังสามารถพัฒนาให้สามารถนำไปออกแบบหน้าจอเปล่งความถี่สูงที่มีแกนเฟอร์ไรต์ในแบบอื่นๆ ได้หลายรูปแบบ และลักษณะวัสดุที่ใช้ในการพันช尼克อื่นที่เหมาะสมกับความต้องการในลักษณะต่างๆ เช่น ขดลวดแบบ Litz ที่เหมาะสมกับความถี่สูง, ลวดที่ใช้จำนวนสามชั้น (Triple Insulation) ที่สามารถพันลงไปในอบบินโดยไม่ต้องกำหนดระยะคีบคลานปลดภัยจากขอบของอบบินในแต่ละด้าน เป็นต้น

จากการที่ 5.3 จะเห็นได้ว่า น้ำหนักของหน้าจอเปล่งความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอง่ายคงลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีทั่วไป แม้ว่าจะมีค่าที่ค่อนข้างน้อยแต่แนวโน้มของน้ำหนักที่ลดลงไปได้จะมีค่ามากขึ้นตามขนาดและพิกัดกำลังที่มากขึ้น สาเหตุเนื่องจากโดยทั่วไปผู้ผลิต

แกนเฟอร์ไวร์ต์แต่ละรายจะผลิตแกนเฟอร์ไวร์สำหรับแกนขนาดเล็กที่มีหลายขนาดให้เลือกใช้ น้ำหนักของแกนขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะมีน้ำหนักที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งไม่เหมือนกับแกนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งแต่ละตัวจะมีขนาดและน้ำหนักที่ค่อนข้างแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด จะน้ำหนักอาจถูกกำหนดให้ต่ำกว่าตัวที่นำเสนอนี้จะมีประโยชน์มากในงานที่มีการออกแบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ที่มีกำลังสูง

ในงานวิจัยนี้ยังมีปัญหาในเรื่องของการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรต่างๆเพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการหารากที่เหมาะสมสมบูรณ์มีเงื่อนไขของการวนรอบ (Loop) ในแต่ละครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวนรอบแรก (Loop 1) เมื่อจากจำนวนตัวแปรจะมีมากที่สุด นั่นคือ 7 ค่า จึงทำให้เสถียรภาพของกระบวนการหารากที่เหมาะสมสมบูรณ์มีเงื่อนไขของการวนรอบ ในแต่ละครั้งลดลง ผู้ออกแบบจึงจำเป็นที่จะต้องคาดคะเนก่อนทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆด้วย

นอกจากนี้ค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันอาจให้ผลลัพธ์ของน้ำหนักและค่าของตัวแปรที่ปรับใหม่โดยโปรแกรมแตกต่างกันหรืออาจหาคำตอบไม่พบเลย เนื่องจากในบางครั้ง กระบวนการหารากที่เหมาะสมสมบูรณ์มีเงื่อนไขโดยวิธีตรง (Direct Method) อาจให้ค่าที่ต่ำที่สุดเฉพาะช่วง (Local Minimum) มิใช่ค่าที่ต่ำที่สุดจริง (Global Minimum) โดยจะขึ้นกับค่าเริ่มต้นของฟังก์ชัน ดังนั้นวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการ Interactive ที่อนุญาตให้ผู้ออกแบบมีส่วนร่วมในการตัดสินใจและเลือกปรับแต่งตัวแปรแต่ละตัวซึ่งจะช่วยให้กระบวนการหารากล้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น

แนวทางในการพัฒนาวิธีดังกล่าวสามารถใช้ในกระบวนการหารากที่เหมาะสมสมบูรณ์มีเงื่อนไขโดยวิธี Stochastic เข้ามาช่วยในการหาคำตอบที่ให้ค่าของสมการเป้าหมายต่ำที่สุดจริง ซึ่งจะจัดปัญหาของค่าเริ่มต้นดังกล่าวออกไปได้อย่างแท้จริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Petkov, "Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer." IEEE Trans. on Power Electronics., vol. 1, January 1996. pp. 33-42.
- [2] Raymond B. Ridley, Chen Zhou, and Fred C. Y. Lee. "Application of Nonlinear Design Optimization for Power Converter Components." IEEE Trans. on Power Electronics., vol. 5, no. 1, January 1990. pp. 29-40.
- [3] ON Semiconductor. "SWITCHMODE Power Supply Reference Manual." [Publication]. USA : ON Semiconductor. 2000.
- [4] สุวัฒน์ คั่น. เทคนิคและการออกแบบสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์วิชา. พ.ศ. 2538.
- [5] George C. Chryssis. High-Frequency Switching Power Supplies Theory & Design. 2nd edition. McGraw-Hill. 1989.
- [6] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย. "Design Optimization." [เอกสารประกอบการสอน วิชา Selected Topics in Electrical Engineering]. กรุงเทพมหานคร : บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2542.
- [7] T. Coleman, M. A. Branch and A. Grace. "Optimization Toolbox : For Use with MATLAB" [User's Guide]. Version 2. USA. : The Math Works Inc. 1999.
- [8] Philips Components. "Data Handbook MA01 : Soft Ferrites." [Data book]. Netherlands : Philips Components. 1995.
- [9] Epcos. "Ferrites and Accessories." [Data book]. Germany : Epcos AG. 2001.
- [10] Power Integrations. "TOPSwitch Flyback Design Methodology Application Note AN-16." [Application Note]. USA : Power Integrations, Inc. 1996.
- [11] Hitachi. "Thai Hitachi Enamel Wire Co.,Ltd." [Product Catalog]. Thailand : Thai Hitachi Enamel Wire Co.,Ltd. 2000.
- [12] Abraham I. Pressman. **Switching Power Supply Design**. 2nd edition. McGraw-Hill. 1998.
- [13] มนัส สังวรศิลป์, วรรตนา กัตรอนรกุล. คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์อินโฟเพรส. พ.ศ. 2543.
- [14] Kawatetsu. "Ferrite Cores for Power Supply EMI Prevention / EMC & Pulse Transformer." [Product catalog]. Japan : Kawatetsu Ferrite Corporation. 1999.

- [15] Tektronix. "Power-Electronics Measurements Made Easy with TDS Oscilloscopes." [Application Note]. USA : Tektronix, Inc. 1996.
- [16] ON Semiconductor. "NCP1200 PWM Current-Mode Controller for Low-Power Universal Off-line Supplies." [Data sheet]. USA : ON Semiconductor. May 2001.
- [17] ON Semiconductor. "Implementing the NCP1200 in Low-Cost AC/DC Converters." [Application note]. USA : ON Semiconductor. April 2001.

ภาคผนวก ก

แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ชั้นดี FLY-BACK

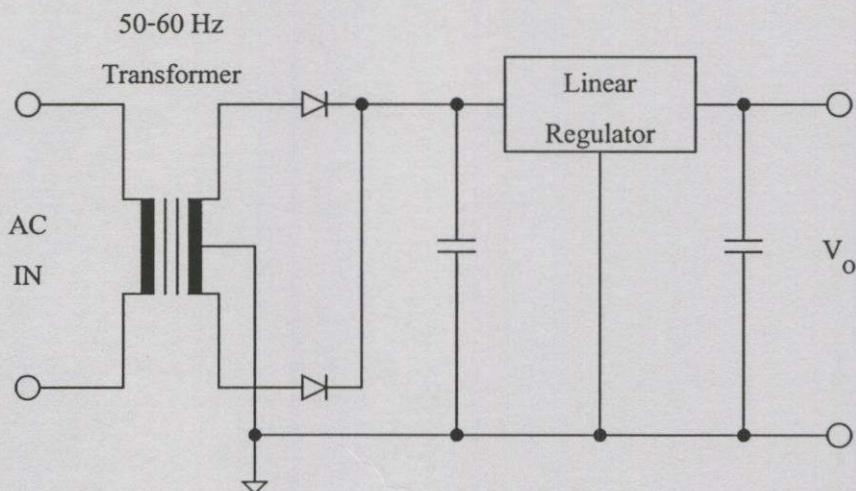
ก.1 ความแตกต่างระหว่างแหล่งจ่ายไฟแบบอื่นๆ กับแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK

แหล่งจ่ายไฟชนิดอื่นที่สามารถใช้แทนแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ ชนิด FLY-BACK สำหรับกำลังค่า ที่คือ แหล่งจ่ายไฟแบบลินีเยอร์ (Linear Supplies) และแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆ เช่น คอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK, คอนเวอร์เตอร์ชนิด Forward เป็นต้น

ก.1.1 แหล่งจ่ายไฟแบบลินีเยอร์ (Linear Supplies)

แหล่งจ่ายไฟแบบลินีเยอร์จะใช้คุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสลับ 50 – 60 Hz แปลงระดับแรงดันโดยใช้หม้อแปลง แล้วผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) จากนั้นจะเข้าสู่วงจรกรอง (Filter) และลินีเยอร์เรกเกอร์จูเลเตอร์ (Linear Regulator) ดังรูปที่ ก.1 แหล่งจ่ายไฟประเภทนี้มีราคาถูกและมีเสถียรภาพที่ดีแต่มีข้อเสียอื่นๆ อีกดังต่อไปนี้

- มีขนาดใหญ่
- มีน้ำหนักมาก
- มีประสิทธิภาพต่ำ
- ใช้ระดับแรงดันของแหล่งกำเนิดได้ไม่กว้างนัก



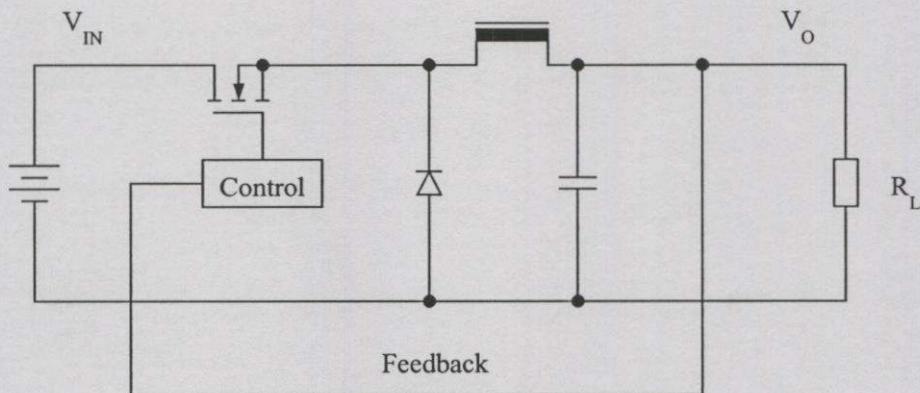
รูปที่ ก.1 วงจรพื้นฐานของแหล่งจ่ายไฟแบบลินีเยอร์ (Linear Supplies)

ก.1.2 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

คอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งนั้นมีหลักๆ จะมีดังต่อไปนี้

ก.1.2.1 คอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK

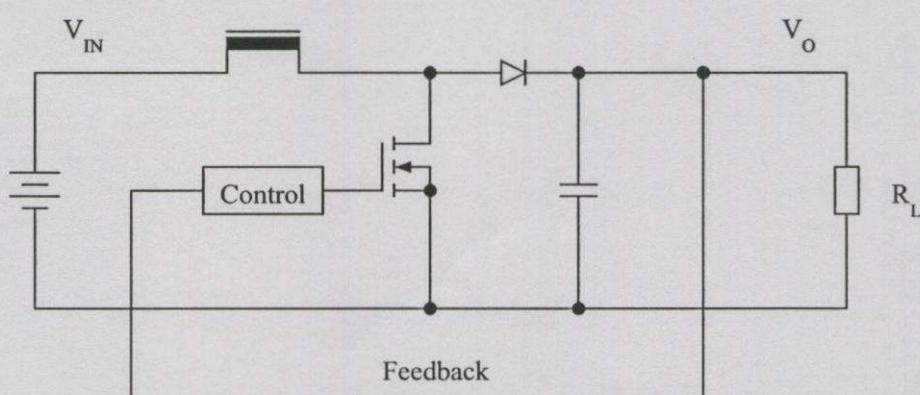
จากรูปที่ ก.2 เป็นวงจรหลักๆ ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK มักจะนำไปใช้ในการลดระดับแรงดันจากแหล่งกำเนิดที่เป็นแรงดันสูงไปยังแรงดันขาออกที่มีระดับแรงดันที่ต่ำกว่า



รูปที่ ก.2 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK

ก.1.2.2 คอนเวอร์เตอร์ชนิด BOOST

จากรูปที่ ก.3 เป็นวงจรหลักๆ ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ชนิด BOOST มักจะนำไปใช้ในการเพิ่มระดับแรงดันจากแหล่งกำเนิดที่เป็นแรงดันต่ำไปยังแรงดันขาออกที่มีระดับแรงดันที่สูงกว่า



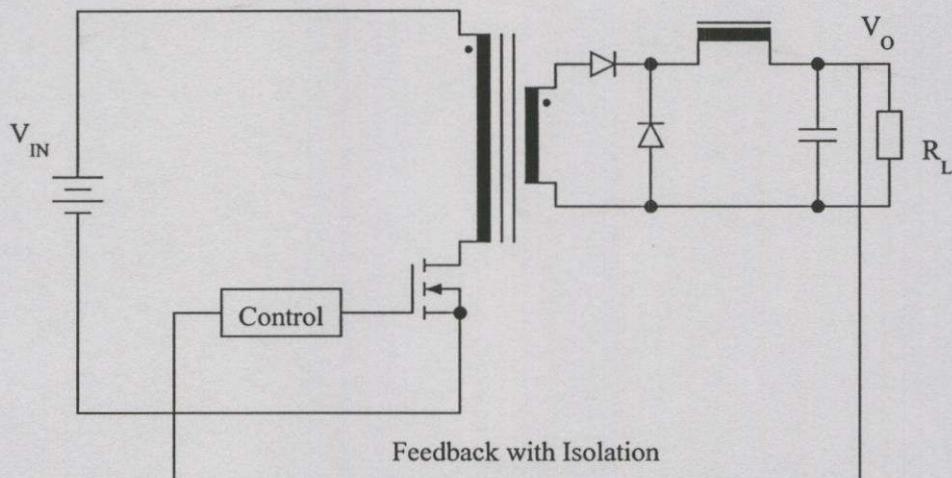
รูปที่ ก.3 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด BOOST

ก.1.2.3 คุณลักษณะ FORWARD

จากรูปที่ ก.4 เป็นวงจรหลักๆ ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์คุณลักษณะ FORWARD จากรูปจะเห็นได้ว่า มีลักษณะคล้ายกับวงจรของคุณลักษณะ BUCK เพียงแต่สามารถจ่ายไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันหลากหลายค่า, แรงดันที่เป็นบวกหรือลบ, แรงดันขาออกที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าแรงดันขาเข้าได้ โดยขึ้นอยู่กับหน้าอัปพลิเคชันที่ออกแบบเอาไว้ นอกจากนี้หน้าอัปพลิเคชันยังทำหน้าที่แบ่งแยกวงจรทางแหล่งจ่ายไฟหลัก (Primary) ออกจากทางขาออก (Secondary)

คุณลักษณะ FORWARD นี้หมายความว่า สำหรับระดับกำลังข้าออกตั้งแต่ 100 W ถึง 300 W แต่ ข้อเสียของคุณลักษณะ Forward ก็มีดังต่อไปนี้

- 1) ต้องการตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และไอดิโอดสำหรับแรงดันขาออกแต่ละตัวซึ่งในกรณีที่มีแรงดันขาออกหลากหลายค่าก็จะต้องใช้จำนวนตัวเหนี่ยวนำและไอดิโอดเท่ากับจำนวนแรงดันขาออกเหล่านั้น
- 2) ต้องใช้วงจรป้อนกลับที่มีการแยกกันทางไฟฟ้าเข้ามาช่วยควบคุมระดับแรงดันขาออกให้เป็นไปตามที่ต้องการ เช่น Photo Coupler



รูปที่ ก.4 วงจรพื้นฐานของคุณลักษณะ FORWARD

ก.1.2.4 คุณลักษณะที่มีสวิตช์หลายตัว (Multi Switch Converter)

คุณลักษณะ FORWARD นี้รวมถึงคุณลักษณะ PUSH-PULL, HALF-BRIDGE, FULL-BRIDGE, FLY-BACK ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว (2 Transistor FLY-BACK) และ FORWARD ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว (2 Transistor FORWARD) คุณลักษณะเหล่านี้ล้วนต้องการสวิตช์มากกว่า 2 ตัว ซึ่งมีวิธี

จรที่ซับซ้อนและราคาแพงเหมาสำหรับงานที่ต้องการกำลังตั้งแต่ 200 W ขึ้นไปจนถึงระดับกิโลวัตต์ ซึ่งไม่เหมาะสมกับงานกำลังต่ำราคากู

ก.1.2.5 คอนเวอร์เตอร์ชนิด Resonant และ Quasi-Resonant

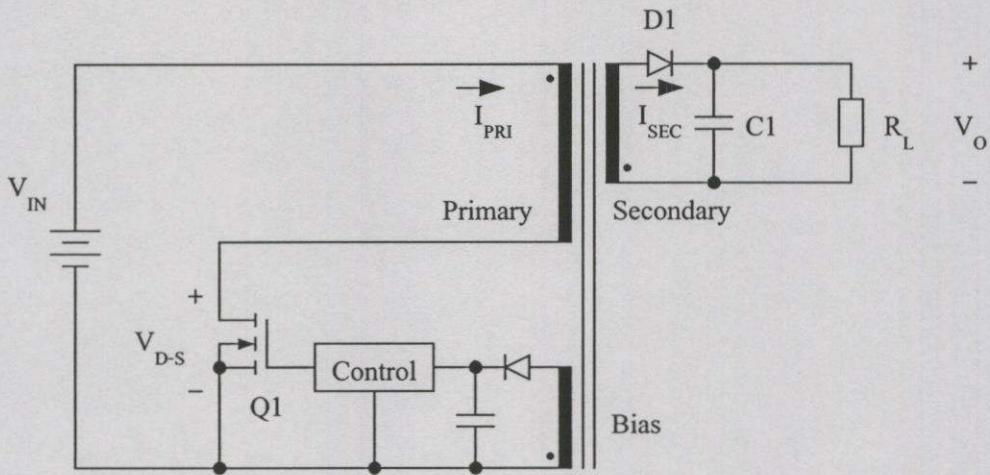
คอนเวอร์เตอร์ชนิด Resonant เป็นแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ้งที่อาศัยวงจร Resonant Tank ในการควบคุมพลังงานในรูปคลื่นที่เป็น Sinusoidal มากกว่าที่จะเป็นแบบ Pulse Width Modulated ซึ่งเป็นของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ้งอื่นๆทั่วไป ส่วนคอนเวอร์เตอร์ชนิด Quasi – Resonant จะอาศัยวงจร Resonant ในการควบคุมการ On และ Off อย่างราบเรียบ (Smooth Turn On and Turn Off edges) ในแต่ละจุดของรูปคลื่น โดยทั่วไปคอนเวอร์เตอร์เหล่านี้จะอาศัยความถี่ตั้งแต่ 100 kHz ขึ้นไป และต้องการจำนวนอุปกรณ์ที่มากกว่าคอนเวอร์เตอร์ชนิดอื่น

พิกัดการทวนแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตช์จะขึ้นอยู่กับหลักในการสวิตชิ้งว่าจะเป็นแบบสวิตชิ้งที่แรงดันศูนย์ (Zero - Voltage) หรือ สวิตช์ที่กระแสศูนย์ (Zero – Current) คอนเวอร์เตอร์เหล่านี้ไม่เหมาะสมกับงานกำลังต่ำเนื่องจากมีราคาที่สูง

ก.2 หลักการของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK

จากรูปที่ ก.5 เมื่อสวิตช์ Q1 ทำการ On ไดโอด D1 จะถูกไนอัลซั่นกลับและกระแส I_{pri} จะไหลเข้าสู่หน้าแปลงเพื่อทำการสะสมพลังงานในรูปสนามแม่เหล็กที่ขด Primary ของหน้าแปลงเมื่อ Q1 ทำการ Off ฟลักซ์แม่เหล็กที่สะสมอยู่ขด Primary จะเริ่มยุบตัวลงซึ่งจะไปตัดกับคลื่น Secondary ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำด้วยแรงดันที่มีทิศทางตรงข้ามกับที่กล่าวมาไว้ข้างต้น ไดโอด D1 จะนำกระแสและพลังงานที่สะสมในรูปของสนามแม่เหล็กจะถูกถ่ายไปยังวงจรของ Load ที่ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ C1 และ Load R_L โดยที่กระแสส่วนหนึ่งจะไหลเข้าไปสะสมพลังงานให้กับตัวเก็บประจุ C1 และส่วนที่เหลือจะไหลไปยัง Load R_L ในช่วงเวลาหนึ่ง กระแสทาง Secondary จะลดลงไปเรื่อยๆ ครั้นที่กระแสลดลงจนเป็นศูนย์ ตัวเก็บประจุ C1 จะทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับ Load R_L ต่อไป

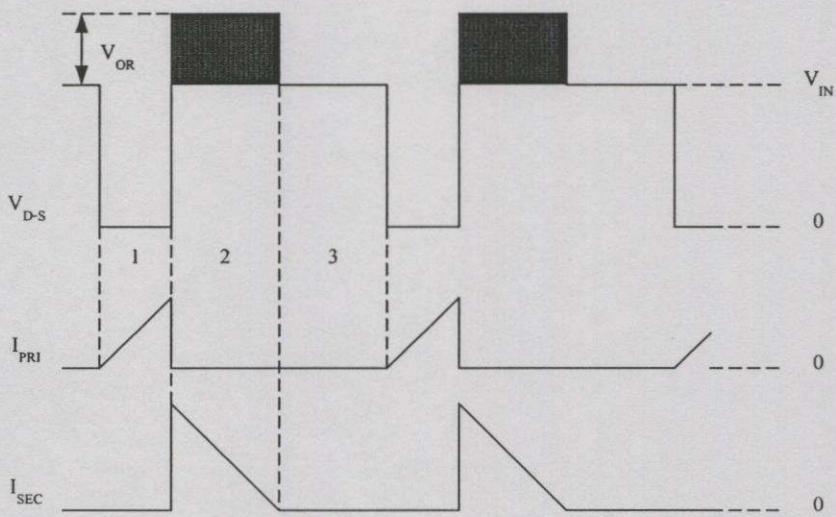
การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK จะถูกแบ่งออกเป็น 2 โหมด นั่นคือ โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode ; DCM) และ โหมดกระแสต่อเนื่อง (Continuous Current Mode ; CCM)



รูปที่ ก.5 วงจรพื้นฐานของคุณวอร์เตอร์ชินิค FLY-BACK

ก.2.1 โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (ทางอุคਮคติ)

ถ้าหากกระแสทาง Secondary มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ก่อนที่สวิตซ์ $S1$ จะทำการ On จะเรียกการทำงานนี้ว่า โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ในโหมดนี้จะมีการแบ่งช่วงเวลาที่สำคัญเป็น 3 ช่วงด้วยกัน ดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 รูปคลื่นของการกระแสและแรงดันของคุณวอร์เตอร์ชินิค FLY-BACK ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (DCM) ทางอุคਮคติ

ในช่วงเวลาแรก (1) กระแส Primary จะใหม่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ (Linear) เนื่องจากกระแสนี้จะไปสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในขด Primary ของหม้อแปลง แรงดันของขา Drain และ Source ของ

MOSFET จะมีค่าไกล์เคียงกับศูนย์ภายในช่วงเวลาที่ ไดโอด D2 จะป้องกันกระแส Secondary ไม่ให้เกิดการไฟต์ เมื่อจากเกิดสภาวะในอัสัยอนกลับภายในตัวไดโอด D2

ในช่วงเวลาที่ (2) เมื่อ MOSFET ทำการ Off พลังงานที่สะสมในรูปสถานะแม่เหล็กของขด Primary จะเห็นว่ามีให้เกิดแรงดันในทิศทางตรงข้ามกับ Dot ภายในขด Primary และ Secondary ในวงจรทางอุบัติกรรมแสงของขด Primary จะคล่องเป็นศูนย์ทันทีในขณะที่กระแสแสงของขด Secondary จะเริ่มไฟต์ทันทีเช่นกัน แรงดันที่ต่อกันร่วมของขด Secondary จะมีค่าเท่ากับพารามิเตอร์ของแรงดันขาออกและแรงดัน Forward ของไดโอด D2 ซึ่งแรงดันที่ต่อกันร่วมของขด Secondary นี้จะเกิดการสะสมท่อนไปยังขด Primary โดยอัตราส่วนจำนวนรอบของขด Primary ต่อ Secondary ของหม้อแปลง (Transformer Ration) ทำให้แรงดันที่ต่อกันร่วมของขด Drain และ Source ของ MOSFET มีค่าเท่ากับพารามิเตอร์ของแรงดันสะสมท่อนที่ขด Primary และแรงดันอินพุท แรงดันสะสมท่อนนี้เองที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของขด Primary ต่อ Secondary ของหม้อแปลง (Transformer Ration) เวลาออกแบบหม้อแปลงเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาแรงดันต่อกันร่วมของขด Drain และ Source ที่มีค่าสูงเกินพิกัดแรงดันที่ทนได้ของ MOSFET และแรงดันสะสมท่อนนี้ก็ช่วยในการจับระดับแรงขาออกของแหล่งจ่ายไฟทางด้าน Primary โดยอาศัยขดใบอัสของหม้อแปลงนั้นเอง พลังงานที่สะสมในขด Primary จะถูกถ่ายทอดไปยัง Load ภายในช่วงเวลาที่สองนี้เอง

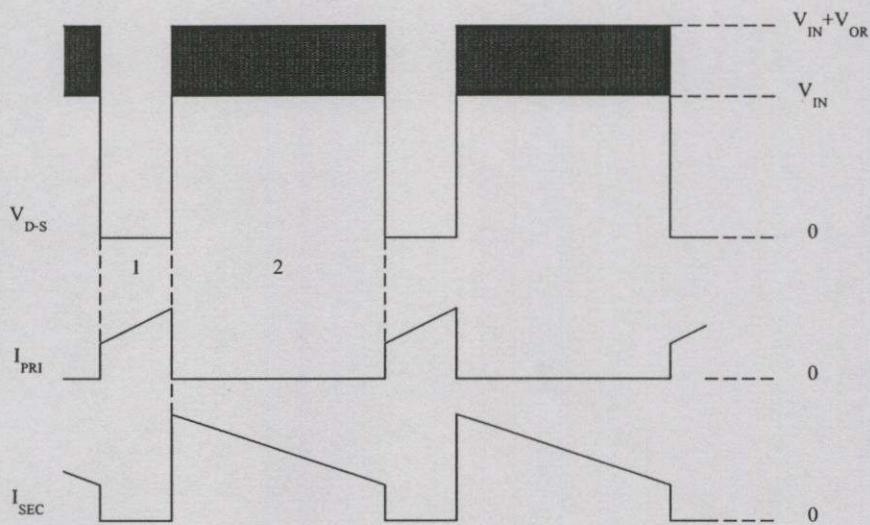
ในช่วงเวลาที่สาม (3) เมื่อสถานะแม่เหล็กภายในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงคล่องจนเป็นศูนย์ก็จะไม่เกิดกระแสไฟภายในขด Primary และขด Secondary จึงทำให้แรงดันที่สะสมท่อนไปยังขด Primary คล่องจนเป็นศูนย์เช่นกัน ฉะนั้น แรงดันที่ต่อกันร่วมของขด Drain และ Source ของ MOSFET จะมีค่าคล่องจนเหลือเท่ากับแรงดันอินพุท นอกจากรางดันที่ตัวเก็บประจุ C1 ก็จะทำการจ่ายพลังงานให้กับ Load R_L ในช่วงเวลาที่สาม

การทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ตัวควบคุมจะทำการปรับความเวลาในการ On ของ MOSFET เพื่อให้ถ่ายทอดพลังงานที่เพียงพอไปยัง Load โดยบังคับรักษาระดับแรงดันขาออกที่ต้องการเอาไว้

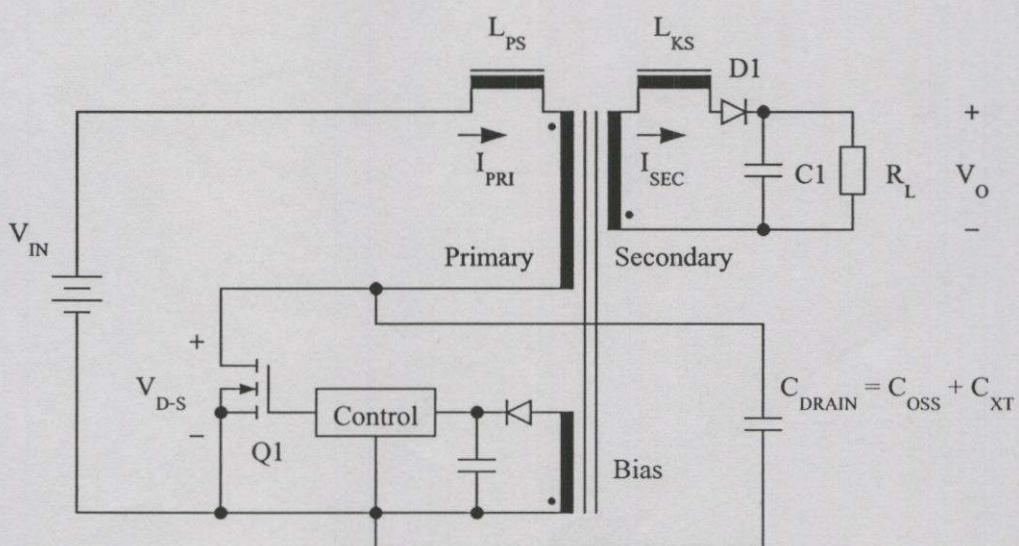
ก.2.2 โหมดกระแสต่อเนื่อง (ทางอุบัติ)

จากรูปที่ ก.7 จะอาศัยหลักการที่คล้ายกับโหมดกระแสต่อเนื่อง เพียงแต่กระแสทาง Secondary จะไม่คล่องจนเป็นศูนย์ ดังนั้น สำหรับการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องช่วงเวลาที่สาม (3) กระแสทาง Primary จะเริ่มต้นด้วยค่าๆหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากการแสงของขด Secondary ที่คล่องแต่ไม่เป็นศูนย์ โดยจะอาศัยอัตราส่วน จำนวนรอบของขด Primary ต่อ Secondary ของหม้อแปลง (Transformer Ration) สะสมท่อนไปยังขด Primary สำหรับแรงดันต่อกันร่วมที่ขด Drain และ Source ของ MOSFET ก็จะแตกต่างออกไป เนื่องจากไม่มีช่วงเวลาที่สาม (3) จึงทำให้แรงดันสะสมท่อนยังคงมีอยู่ต่อไปจนกระทั่งถึงช่วงที่ MOSFET ทำการ On อีกครั้ง

ในการรักษาระดับแรงดันขาออกให้มีค่าคงที่ กระแสสูงสุดที่พุ่งขึ้นมาทางขด Primary ในช่วง On จะต้องมีค่าสมดุลย์กับกระแสสูงสุดที่พุ่งลงทางขด Secondary ในช่วง Off จากการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่งในโหมดกระแสต่อเนื่องตัวควบคุมจะไม่มีการปรับค่าเวลาในการ On และ Off แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของ Load ก็ตามแต่จะทำการปรับค่าเริ่มต้นของกระแสทางขด Primary แทน



รูปที่ ก.7 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในโหมดกระแสต่อเนื่อง (CCM) ทางอุบัติ



รูปที่ ก.8 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในทางปฏิบัติ

ก.2.3 โหมดกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องในทางปฏิบัติ

จากรูปที่ ก.8 จะมีการคำนึงถึงค่าที่แฟรงอยู่ในวงจรในรูปของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ L_{kp} คือค่าความเหนี่ยวนำรับไฟลของหม้อแปลงทางขด Primary และ L_{ks} คือค่าความเหนี่ยวนำรับไฟลของหม้อแปลงทางขด Secondary ตัวเก็บประจุ C_{DRAIN} เป็นผลรวมของ C_{oss} และ C_{xt} ซึ่งเป็นค่าความจุของ MOSFET และค่าความจุแฟรงภายในคลาดของหม้อแปลง ค่าที่แฟรงอยู่เหล่านี้มีอยู่ในวงจรเชิงปฏิบัติของแหล่งจ่ายไฟสวิตช์คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK โดยทั่วไปซึ่งมีผลกระทบต่อสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟมาก

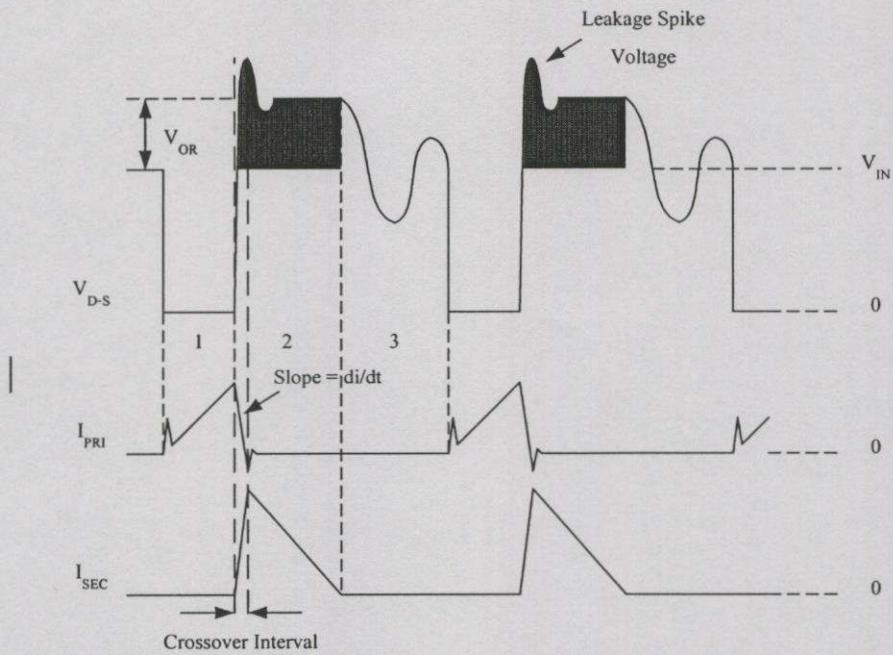
ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนด้านว่า การทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่องแบ่งออกเป็นสามส่วน ซึ่งในแต่ละส่วนจะมีผลกระทบอันเกิดจากค่าที่แฟรงอยู่เหล่านี้ดังที่จะกล่าวต่อไป

จากรูปที่ ก.9 ในช่วงเวลาแรก (1) MOSFET จะทำการ On นั้นคือ มีการขยายประจุของ C_{oss} และ C_{xt} พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุเหล่านี้ในรอบที่ผ่านมาก่อนหน้าจะถูกขยายพลังงานออกมาโดยก่อน MOSFET ในรูปของกระแสในช่วงเวลาเริ่มต้นของช่วงเวลาแรกนี้เองพลังงานที่ขยายออกมานี้จะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของแรงดันที่ตอกคร่อมตัวเก็บประจุเหล่านี้ ลักษณะค่าความจุของตัวเก็บประจุเหล่านี้มีมากก็จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อระดับแรงดันอินพุทที่มีค่าสูง ส่วนค่าความเหนี่ยวนำรับไฟลของขด Primary และ Secondary จะมีผลน้อยในช่วงเวลานี้ เนื่องจากหม้อแปลงไม่มีพลังงานสะสมในช่วงเวลา ก่อนหน้านี้ และกระแสของขด Secondary ลดลงจนเป็นศูนย์เรียบร้อยไปแล้ว

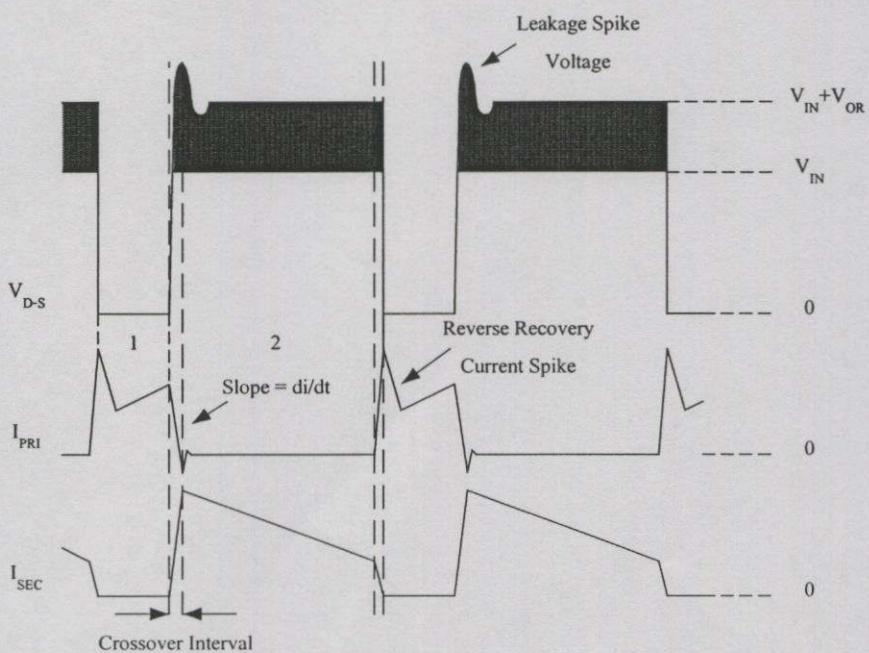
ในช่วงเวลาที่สอง (2) MOSFET จะทำการ Off พลังงานที่สะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงจะถูกถ่ายทอดไปยังขด Secondary ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำรับไฟลนี้เองจะมีผลกระทบวงจรในช่วงเวลาดังกล่าว เนื่องจาก L_{kp} และ L_{ks} พยายามที่จะด้านความเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ผ่านตัวมัน โดยที่ L_{kp} จะยังคงรักษากระแสที่ไฟลทาง Primary และ L_{ks} จะพยายามด้านทางกระแสที่เพิ่มขึ้นในขด Secondary พื้นที่ในส่วนนี้จึงเรียกว่าพื้นที่ครอสโอเวอร์ (Crossover Region) ค่าความชันของกระแสที่ลดลงทางฝั่ง Primary จะถูกกำหนดโดยค่าความเหนี่ยวนำรับไฟลของ Primary และแรงดันของวงจร ส่วนค่าความชันของกระแสที่เพิ่มขึ้นทางฝั่ง Secondary จะถูกกำหนดโดยค่าความเหนี่ยวนำรับไฟลของ Secondary และแรงดันของวงจร

กระแสที่ไฟลของขด Primary จะไฟลเข้าสู่ C_{oss} และ C_{xt} ซึ่งจะทำการสะสมประจุให้กับ C_{oss} และ C_{xt} และทำให้เกิดแรงดันสไปค์ (Spike) เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันสไปค์จะต้องมีค่าไม่เกินพิกัดแรงดันของ MOSFET

ในช่วงเวลาที่สาม (3) แรงดันสะท้อนจะมีค่าลดลงเป็นศูนย์แรงดันที่ตอกคร่อมขา Drain และ Source จะลดระดับลงไปเท่ากับแรงดันอินพุท



รูปที่ ก.9 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชินิค FLY-BACK ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (DCM) ในทางปฏิบัติ



รูปที่ ก.10 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชินิค FLY-BACK ในโหมดกระแสต่อเนื่อง (CCM) ในทางปฏิบัติ

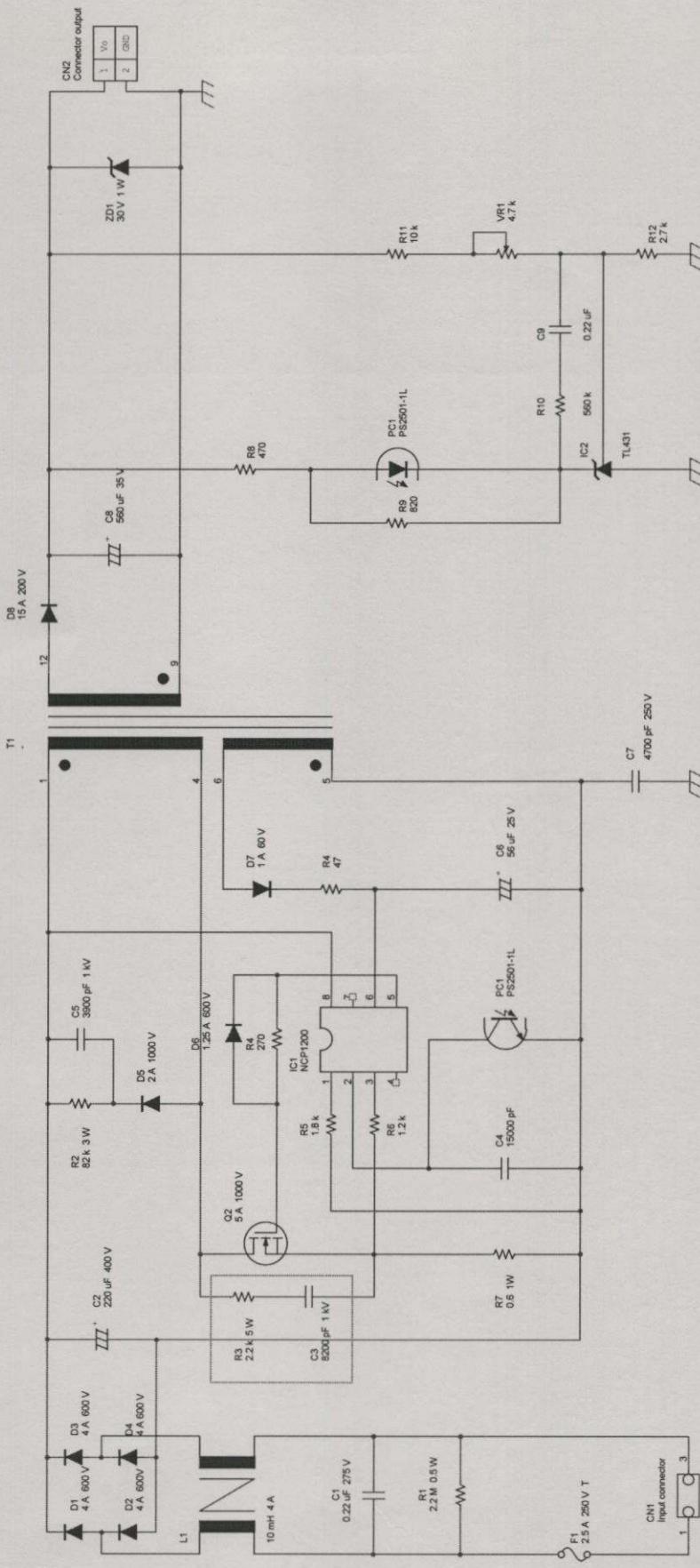
ในช่วงเวลาที่จะเกิดวงจรสมมูลย์ที่มีลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ (Resonant) โดยเกิดจากค่าความจุที่แฝงอยู่และค่าความหนี่ขั้นนำของขด Primary เองที่จะทำให้เกิดการกระเพื่อม (Oscillate) ของแรงดันจนกระทั่ง MOSFET ทำการ On อีกรอบหนึ่ง รูปคลื่นของแรงดันนี้จะไปทำการมอดูลेट (Modulate) กับแรงดันที่ต่อกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{oss} และ C_{xt} ที่จะไปทำให้เกิดการสูญเสียใน MOSFET ขณะทำการ On ในรอบถัดไป

การทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องก็เช่นกันผลของค่าที่แฝงอยู่ในวงก์มีลักษณะคล้ายกับการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ผลของวงจรเรียงกระแสของฝั่ง Secondary ในทางปฏิบัติยังมีความสำคัญอีกด้วย ในทางอุตสาหกรรม เราจะถือว่าแรงดันต่อกคร่อมในตัวไดโอดเรียงกระแสมีค่าเป็นศูนย์ และเวลาในการสวิตช์ของไดโอดมีค่าเร็วมากๆ แต่ในทางปฏิบัติค่าเหล่านี้มีผลที่รอยด์ต่อของ PN ของตัวไดโอดมีค่าของเวลาคืนตัว (Reverse Recovery Time ; t_r) ในกรณีของชอกก์ไดโอด (Schottky Diode) ค่าของเวลาคืนตัวนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความจุแฝงที่รอยด์ต่อ PN นี้ เวลาในการคืนตัวนี้จะมีผลให้เกิดกระแสไปค์ไฟล์ผ่านตัวไดโอดจนกว่าไดโอดจะทำการ Off ได้อย่างสมบูรณ์ กระแสไปค์นี้เองจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในตัวไดโอดและเป็นภาระให้กับ MOSFET ในช่วงเวลาการ On แม้ปลดล็อกของกระแสไปค์จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการคืนตัวของไดโอดสำหรับแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ที่อาศัยความถี่ตั้งแต่ 100 kHz ขึ้นไป แนะนำให้ใช้ไดโอดชนิด Ultrafast ซึ่งมีค่า $t_r < 50$ ns.

จากรูปที่ ก.10 ในช่วงเวลาแรก (1) MOSFET จะทำการ On ในขณะที่ยังมีกระแสไหลในขด Secondary นอกจากนี้ผลของกระแสไปค์ของไดโอดทางฝั่ง Secondary ทำให้กระแสต่อน On มีค่าสูงซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังงานสูญเสียอันเนื่องมาจากการลูกูณของกระแสและแรงดันจะมีค่าสูงกว่าในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง
ในช่วงเวลาที่สอง (2) หลักการจะเหมือนกับการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แต่ในช่วงเวลาที่สามนี้จะไม่เกิดขึ้นเหมือนกับการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

ภาคผนวก ข

วงจรที่ใช้ทดสอบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK



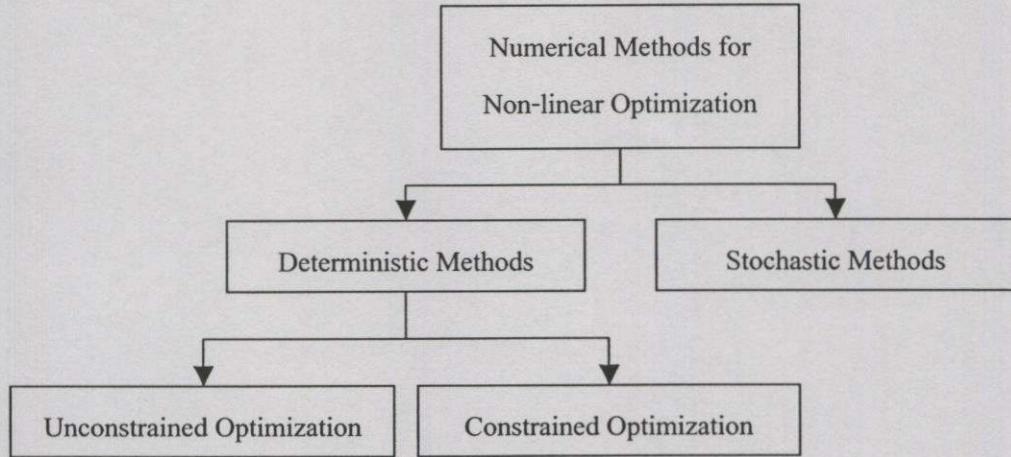
File	Test Circuit	Rev
8	none	00
Date:	Monday, March 11, 2002	Sheet 1 of 1

รูปที่ ๗.๑ วงจรที่ใช้ทดสอบหน่วยเบรกความตึงของกองเนอเรเตอร์ชนิด FLY-BACK

ภาคผนวก ค

ทฤษฎีการออกแบบด้วยกระบวนการทางค่าที่เหมาะสม

ก.1 ระเบียบวิธีทางตัวเลข (Numerical) สำหรับการออกแบบโดยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม



รูปที่ ก.1 ระเบียบวิธีทางตัวเลขสำหรับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบต่างๆ

ก.1.1 วิธี Deterministic

แนวความคิดของวิธี Deterministic จะอาศัยการเริ่มต้นด้วยค่าการออกแบบที่สมเหตุสมผล ค่าหนึ่งซึ่งสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์ที่จุดเริ่มต้นนี้ จากข้อมูลเหล่านี้การออกแบบจะลู่เข้าสู่ค่าใหม่ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นสมการดังนี้

$$x^{(q+1)} = x^{(q)} + \alpha_q d^{(q)} \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่ x คือเวคเตอร์ของตัวแปร, d เป็นทิศทางการเคลื่อนตัวในขอบเขตการออกแบบ (Search Direction), α เป็นจำนวน步幅นิคสเกลลาร์ซึ่งถูกเรียกว่า ขนาดการเคลื่อนตัว (Step Size) ในทิศทางการเคลื่อนตัวและ q จะแสดงจำนวนการคำนวณ (Iteration Number)

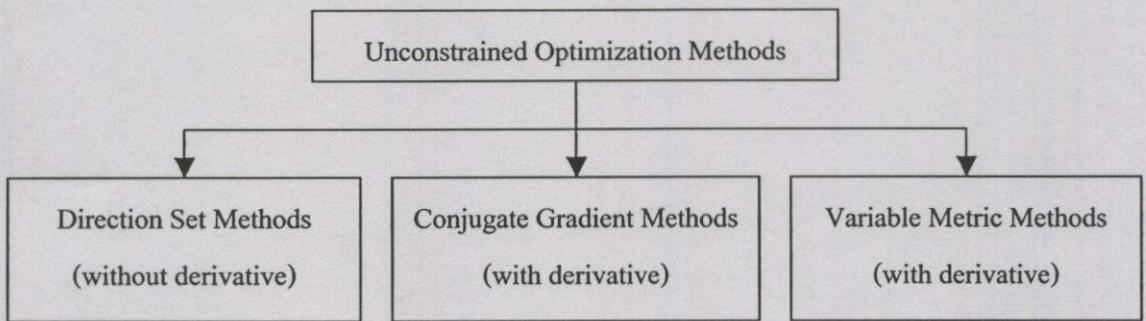
กระบวนการจะทำการคำนวณไปเรื่อยๆจนกระทั่งมีเงื่อนไขที่เหมาะสมหรือบรรลุเงื่อนไข การหยุดการคำนวณได้ จะเห็นได้ว่าเป้าหมายของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในลำดับการคำนวณใดๆนั้นเป็นการหาจุดที่ต่ำที่สุดของสมการเป้าหมาย $F(x)$ ซึ่งสามารถกำหนดในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$F(x^{(q)} + \alpha_q d^{(q)}) < F(x^{(q)}) \quad (\text{ก.2})$$

จากสมการที่ ค.2 สามารถประมาณค่าของเทอนที่อยู่ทางซ้ายด้วยอนุกรม泰勒 (Taylor Series Expansion) ของจุด $x^{(q)}$ ได้ดังนี้

$$F(x^{(q)} + \alpha_q(c^{(q)} \cdot d^{(q)}) < F(x^{(q)}) \quad (\text{ค.3})$$

โดยที่ $c^{(q)} = \nabla F(x^{(q)})$ ซึ่งเป็น Gradient ของ $F(x)$ ที่จุด $x^{(q)}$ และเทอนที่สองของสมการทางด้านซ้ายจะต้องเป็นค่าลบ เนื่องจาก $\alpha_q > 0$ นุ่มระหว่างเวคเตอร์ $c^{(q)}$ และ $d^{(q)}$ จะต้องทำนุ่มนิ่มน้ำ 90 องศาและ 270 องศา เพื่อที่จะทำให้สมการที่ ค.3 เป็นจริง ทั้งนี้จะมีบางทิศทางของ $d^{(q)}$ ที่จุดออกแบบและอัลกอริธึมของกระบวนการหารากที่เหมาะสมจะประมวลได้แตกต่างกัน



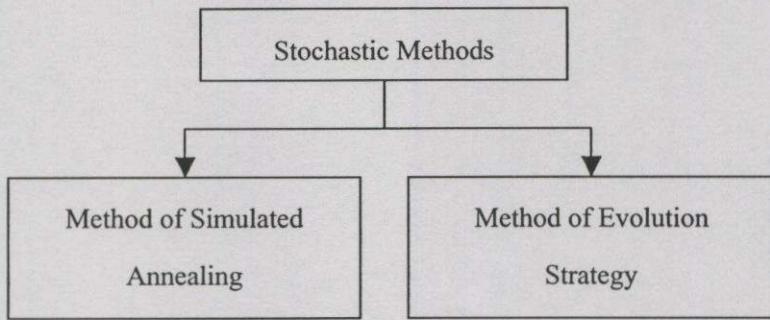
รูปที่ ค.2 กระบวนการหารากที่เหมาะสมแบบไม่มีเงื่อนไขแบบต่างๆ

วิธี Deterministic จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังที่เห็นจากรูปที่ ค.1 นั้นคือกระบวนการหารากที่เหมาะสมแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Optimization) และแบบมีเงื่อนไข (Constrained Optimization)

ลักษณะปัญหาของกระบวนการหารากที่เหมาะสมแบบไม่มีเงื่อนไขสามารถแก้ได้โดยอาศัยข้อมูล Derivative และไม่ต้องอาศัยข้อมูลดังกล่าว ดังรูปที่ ค.2

ค.1.2 วิธี Stochastic

วิธีของ Stochastic จะอาศัยพื้นฐานของความน่าจะเป็น (Probabilistic) มากกว่าการหารากโดยกรรมวิธีเชิงเส้น (Linear Search) ที่ซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลค่า Gradient พื้นฐานของวิธีการดังกล่าวจะอาศัยการเลือกจุดเริ่มต้นหลังจากนั้นจะทดลองสุ่มไปที่จุดใหม่ในทุกๆ ทิศทาง ณ จุดที่ทดลองสุ่มไปนั้น ถ้าสมการเป้าหมายมีค่าต่ำกว่าเดิม จะยอมรับจุดนั้นๆ ให้เป็นจุดที่เหมาะสม หรือไม่ก็สามารถยอมรับโดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็นบางอย่าง วิธีการนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองวิธีใหญ่ๆ ได้ดังรูปที่ ค.3



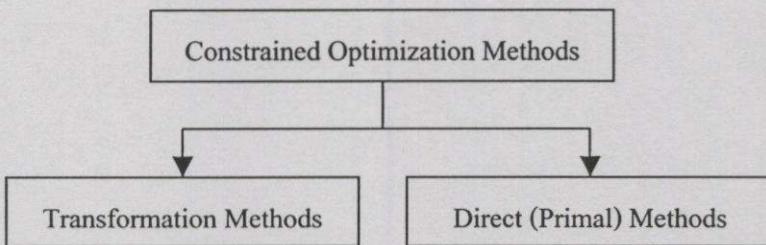
รูปที่ ค.3 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธี Stochastic แบบต่างๆ

สำหรับวิธีการ Simulated Annealing ดังรูปที่ ค.3 เหมาะสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ เช่น ระบบเทอร์โมไนโมิกส์ (Thermodynamics) การแข่งตัวของผลึกในของเหลว หรือการอ่อนตัวของเหล็ก

ส่วนวิธีการของ Evolution Strategy จะอาศัยพื้นฐานการเปลี่ยนแปลงแบบธรรมชาติ มีนักวิชาการหลายคนกล่าวว่าวิธีดังกล่าวจะสามารถหาค่าที่ต่ำที่สุดจริงๆได้ (Global Minimum) แต่จำนวนฟังก์ชันที่ถูกวิเคราะห์จะมีจำนวนมากซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างล้าหลังและค่าใช้จ่าย

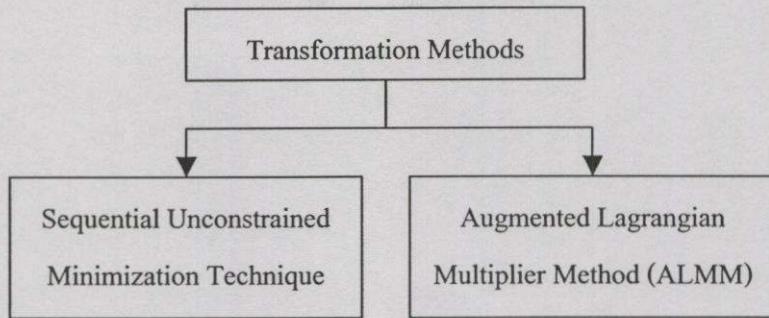
ค.1.3 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข

สำหรับปัญหาที่มีเงื่อนไขจะมีวิธีในการหาคำตอบได้ 2 วิธี ดังรูปที่ ค.4 โดยวิธีแรกจะอาศัยการแปลงรูป (Transformation) ของปัญหาให้กลายเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข ซึ่งได้แก่ วิธี Penalty Function และวิธี Multiplier (Augmented Lagrangian) ดังรูปที่ ค.4

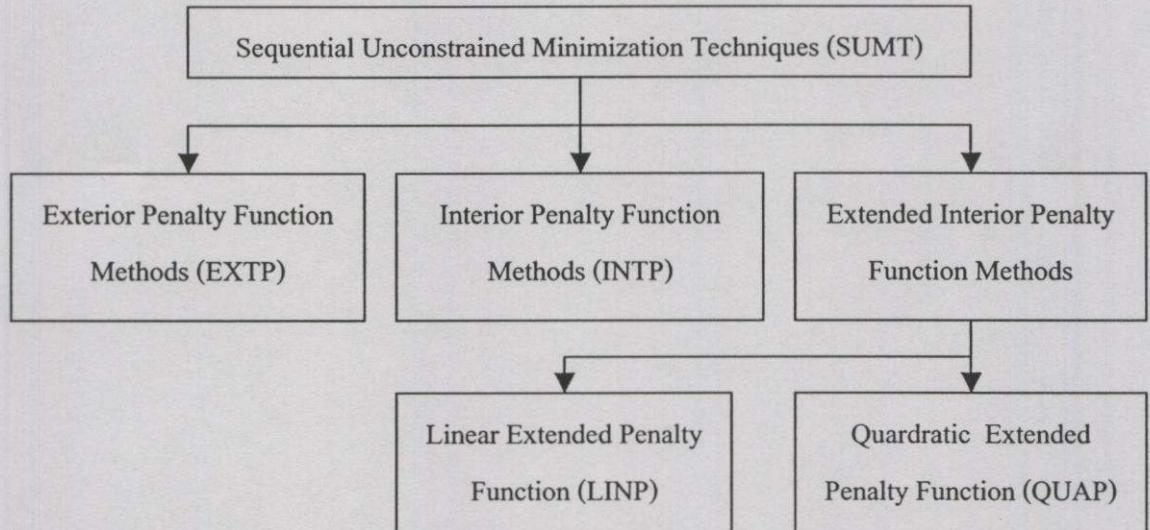


รูปที่ ค.4 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขแบบต่างๆ

จากรูปที่ ค.5 วิธี Penalty Function จะถูกเรียกว่า Sequential Unconstrained Minimization Techniques (SUMT) ซึ่งจะมีวิธีเปลี่ยนข้อต่างๆอีกดังรูปที่ ค.6 ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือ Augmented Lagrangian เป็นการพัฒนามาจากวิธี SUMT โดยลดความผุ่งยากบางอย่างออกไป

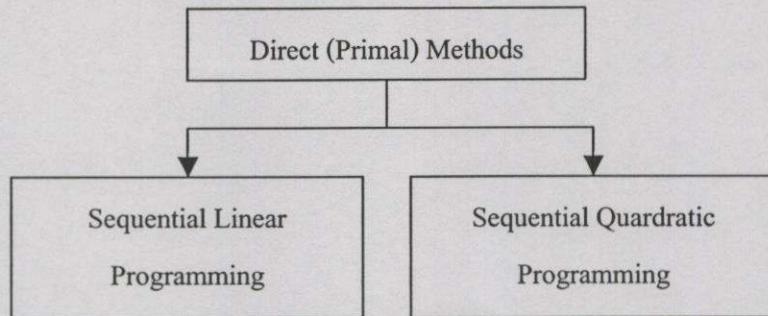


รูปที่ ค.5 วิธีการแปลงรูปในแบบต่างๆ



รูปที่ ค.6 เทคนิค Sequential unconstrained minimization ในแบบต่างๆ

จากรูปที่ ค.4 วิธีที่สองจะอาศัยการแก้ปัญหาโดยตรง (Direct) จากเงื่อนไขเดิมของปัญหา ดังนั้น รูปแบบของเงื่อนไขจะไม่เปลี่ยนไปจากเดิมในการคำนวณที่ซ้ำๆกัน (Iteration) ในแต่ละครั้ง วิธีที่สองนี้ค่อนข้างมีความแตกต่างจากวิธีแรกอยู่มาก เนื่องจากวิธีที่สองจะอาศัยรูปแบบการแก้ปัญหาเชิงเส้น (Linear Programming) หรือการแก้ปัญหาเชิงเส้นแบบบกกำลังสอง (Quadratic Programming) ดังแสดงได้ในรูปที่ ค.7 สมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมดจะถูกทำให้เป็นเชิงเส้นเพื่อแสดงเงื่อนไขของปัญหาย่อย (Subproblem) ในแต่ละรอบการคำนวณ คำตอบที่ได้จากปัญหาย่อยนี้เองจะเป็นตัวให้ทิศทางในการหาคำตอบ (Search Direction) ภายในขอบเขตของการออกแบบ (Design Space)



รูปที่ ก.7 วิธีตรงในแบบต่างๆ

จากรูปที่ ก.7 วิธีแรกจะเป็นการถูกเข้าหาอย่างง่ายแบบก้าวหน้า (Simple and Straight Forward Approach) ในการแก้ปัญหาแต่จะมีข้อเสียบางอย่างคือ ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ (Robustness) เท่าไนดัก จึงมีการพัฒนาวิธีที่สองคือ การแก้ปัญหาอย่างเชิงเส้นแบบยกกำลังสอง โดยที่สมการเป้าหมายจะถูกทำให้เป็นกำลังสองและสมการเงื่อนไขจะเป็นเส้นตรง (Linear) ซึ่งหมายถึง จะต้องมีคำตอบอยู่ส่วนเดียวไม่มีเงื่อนไขที่เหมาะสม

สำหรับรายละเอียดของกระบวนการหาที่เหมาะสม สามารถดูได้จาก [6]

ภาคผนวก ๙

ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงขนาด
12 V / 2 A ที่ความถี่ค่าต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ผลการลองแบบน้ำยาเบรกตามที่ถูกชุมแพตั้งแต่แรกจนเป็นส่วนต่อมา 12 V / 2 A ที่ความถี่ต่างๆ

$f = 20 \text{ kHz}$

$f = 40 \text{ kHz}$

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	5.5004	6.25	6.25	6.25
g	0.5	1	0.9302	0.9502	0.9628
N_p	100	79.7177	75.6229	76	76
N_s	5	14.3707	13.6326	13	13
d_p	0.4	0.3196	0.3196	0.3192	0.32
d_s	0.5	0.5322	0.5322	0.5457	0.55
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6558	1.6685
Weight		73.544	65.831	65.8575	65.927

Core select = No.19 EE/40/16/12

No.17 E34/14/9

No.14 E30/15/7

No.13 E25/4/10/7

$f = 100 \text{ kHz}$

$f = 200 \text{ kHz}$

No.12 E25/13/7 (EF 25)

No.11 E25/4/10/7

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.3451	3.6	3.6	3.6
g	0.5	0.5379	0.4601	0.473	0.473
N_p	100	43.1074	37.5594	38	38
N_s	5	7.771	6.7708	6	6
d_p	0.4	0.3196	0.3196	0.3186	0.32
d_s	0.5	0.5322	0.5322	0.567	0.6
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6447	1.6685
Weight		17.8524	26.9387	26.9576	27.1103

Core select = No.14 E30/15/7

No.12 E25/13/7 (EF 25)

No.11 E25/4/10/7

$f = 150 \text{ kHz}$

$f = 200 \text{ kHz}$

No.11 E25/4/10/7

No.10 E25/4/10/7

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.3309	3.75	3.75	3.75
g	0.5	0.3532	0.346	0.346	0.3571
N_p	200	29.4463	28.6167	29	29
N_s	50	5.1748	5.1587	5	5
d_p	0.4	0.3183	0.3196	0.3185	0.32
d_s	0.5	0.5369	0.5322	0.5424	0.55
$I_{p(max)}$	1	1.6379	1.664	1.6442	1.6685
Weight		16.6606	18.500	18.5128	18.5448

Core select = No.14 E30/15/7

No.13 E25/4/10/7

ภาคผนวก จ

ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด
12 V / 2 A ที่พิกัดฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดค่าต่างๆ

ตารางที่ 1.1 ผลการของแบบจำลองพลังงานที่ถูกของแต่ละจ่ายแบบตัวอย่างของความต้านทาน 12 V / 2 A ที่พิมพ์ฟลักซ์แม่เหล็กดูดกระแทก

$B_{(max)Limit} = 0.1 \text{ T}$						
$B_{(max)Limit} = 0.16 \text{ T}$						
$B_{(max)Limit} = 0.2 \text{ T}$						
	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4	
E	3	5.0888	6.25	6.25	6.25	E
g	0.5	1	0.8032	0.8052	0.8357	g
N_p	100	49.671	40.3322	41	41	N_p
N_s	5	8.9542	7.2707	7	7	N_s
d_p	0.4	0.3196	0.3196	0.32	0.4	d_p
d_s	0.5	0.5322	0.5322	0.5446	0.55	d_s
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6369	1.6685	$I_{p(max)}$
Weight		56.5802	62.2344	62.2668	62.3022	Weight

Core select =	No.19	E40/16/12	Core select =	No.14	E30/15/7
----------------------	-------	-----------	----------------------	-------	----------

$B_{(max)Limit} = 0.25 \text{ T}$						
$B_{(max)Limit} = 0.3 \text{ T}$						
$B_{(max)Limit} = 0.38 \text{ T}$						
	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4	
E	3	3.3451	3.6	3.6	3.6	E
g	0.5	0.3539	0.3042	0.3042	0.321	g
N_p	100	45.9812	40.0633	41	41	N_p
N_s	5	8.239	7.2222	7	7	N_s
d_p	0.4	0.3196	0.3196	0.3177	0.32	d_p
d_s	0.5	0.5322	0.5322	0.5437	0.55	d_s
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6685	1.6685	$I_{p(max)}$
Weight		18.0926	27.1325	27.1627	27.2067	Weight

Core select =	No.14	E30/15/7	Core select =	No.12	E25/13/7 (EF 25)
----------------------	-------	----------	----------------------	-------	------------------

ภาคผนวก ฉบับที่ ๑
ตารางแกนเฟอร์ไรต์ของผู้ผลิต

ตารางที่ ค.1 ตารางน้ำหนักของ "รีตอร์นบล็อก EPCCOS

Data Sheet

No.	Type	a	b	c	d	f	Ae	EI/A	le	Weight (no-gap) / set	E	a	b	D	E	K1 = D/2E	K2 = 2b/a	K3 = a/E	K4 = E'/E	K5 = E'/E	Calculation
		(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm ²)	(mm.)	(mm.)	(kg)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)
1	E6.3	6.3	2.9	2	3.6	1.85	1.4	3.300	3.7	12.2	0.12	0.700	1.00	1.85	2	1.05	1.35	1.429	3.364	1.571	(-)
2	E5	5.25	2.65	2	3.9	1.93	1.35	2.600	4.86	12.6	0.16	0.675	1.275	1.93	2	0.72	0.675	1.481	3.027	1.889	1.067
3	E8.8	9	4.1	2	5.2	2.03	1.9	5.000	3.1	15.5	0.5	0.950	1.650	2.03	2	2.07	1.9	1.053	2.461	1.737	2.179
4	E10/5.5	10.2	5.5	4.8	7.95	4.25	2.35	10.900	2.41	26.3	10.4	1.175	2.800	4.25	4.8	1.25	1.125	2.043	3.036	2.383	1.064
5	E13/7/4(EF12.6)	12.6	6.5	3.7	8.9	4.5	3.7	12.400	2.39	29.6	2	1.850	2.600	4.5	3.7	2	1.85	1.000	3.462	1.405	1.081
6	E14/8.4	14.3	7.8	4.3	10.5	5.2	4.3	15.500	2.19	33.9	2.8	2.150	3.100	5.2	4.3	2.6	1.9	1.000	3.355	1.442	1.209
7	E16/8.5(EF16)	16	8.2	4.7	11.3	5.7	4.7	20.100	1.87	37.6	3.6	2.350	3.300	5.7	4.7	2.5	2.35	1.000	3.455	1.404	1.064
8	E16/6.5	16	5.8	4.7	11.3	3.6	4.7	19.200	1.49	28.6	3	2.350	3.300	3.6	4.7	2.2	2.35	1.000	2.182	1.404	0.936
9	E19/8.5	19	8	4.8	14.3	5.7	4.8	22.500	1.76	39.6	4.4	2.400	4.750	5.7	4.8	2.3	2.35	1.000	2.400	1.979	0.938
10	E20/10/6(EF20)	20.4	10.1	5.9	14.1	7	5.9	32.100	1.44	46.3	7.3	2.950	4.100	7	5.9	3.1	3.15	1.000	3.415	1.390	1.051
11	E21/9.5	21.1	8.7	5	16	6	5	21.600	2.01	43.4	4.8	2.500	5.500	6	5	2.7	2.55	1.000	2.182	1.404	0.936
12	E25/13/7(EF25)	25	12.8	7.5	17.5	8.7	7.5	52.500	1.1	57.5	16	3.750	5.000	8.7	7.5	4.1	3.75	1.000	3.480	1.333	1.093
13	E25.4/10/7	25.4	9.78	6.5	18.8	6.48	6.5	38.800	1.27	49.2	9.6	3.250	6.150	6.48	6.5	3.3	3.3	1.000	2.107	1.892	1.015
14	E30/15/7	30	15.2	7.3	19.5	9.7	7.2	60.000	1.12	67	22	3.600	6.150	9.7	7.3	5.5	5.25	1.014	3.154	1.708	1.528
15	E32/16/9(EF32)	32	16.4	9.5	22.7	11.2	9.5	83.000	0.89	74	30	4.750	6.600	11.2	9.5	5.2	4.65	1.000	3.394	1.389	1.095
16	E32/16/11	32	16.4	11	22.7	11.2	9.5	97.000	0.76	74	37	4.750	6.600	11.2	11	5.2	4.65	1.158	3.394	1.389	1.095
17	E34/14/9	34.6	14.65	9.7	25.1	9.5	9.65	84.800	0.82	69.6	30	4.825	7.725	9.5	9.7	5.15	4.75	1.005	2.460	1.601	1.067
18	E36/18/11	36	18	11.5	24.5	12	10.2	120.000	0.68	81	50	5.100	7.150	12	11.5	6	5.75	1.127	3.357	1.402	1.176
19	E40/16/12	40.6	16.5	12.5	28.6	10.5	12.5	149.000	0.52	77	58	6.250	8.050	10.5	12.5	6	6	1.000	2.609	1.288	0.960
20	E42/21/15	42	21.2	15.2	29.5	14.8	12.2	178.000	0.54	97	88	6.100	8.650	14.8	15.2	6.4	6.25	1.246	3.422	1.418	1.049
21	E42/21/20	42	21.2	20	29.5	14.8	12.2	234.000	0.41	97	116	6.100	8.650	14.8	20	6.4	6.25	1.639	3.422	1.418	1.049
22	E47/20/16	46.9	19.6	15.6	31.8	12.2	15.6	233.000	0.38	89	106	7.800	8.100	12.2	15.6	7.4	7.55	1.000	3.012	1.038	0.949
23	E55/28/21	55	27.8	21	37.5	18.5	17.2	354.000	0.35	124	215	8.600	10.150	18.5	21	9.3	8.75	1.221	3.645	1.180	1.081
24	E55/28/25	55	27.8	25	37.5	18.5	17.2	420.000	0.3	124	256	8.600	10.150	18.5	25	9.3	8.75	1.453	3.645	1.180	1.081
25	E56/24/19	56.1	23.6	18.8	38.1	14.6	18.8	340.000	0.31	107	184	9.400	9.650	14.6	18.8	9	9	1.000	3.026	1.027	0.957
26	E65/3/27	65	32.8	27.4	44.2	22.2	20	535.000	0.27	147	394	10.000	12.100	22.2	27.4	10.6	10.4	1.370	3.669	1.210	1.060
27	E70/31/32	70.5	33.2	32	48	21.9	22	683.000	0.22	149	514	11.000	13.000	21.9	32	11.3	11.25	1.455	3.369	1.182	1.037
28	E80/38/20	80	38.5	20.2	58.9	27.9	20.2	390.000	0.47	184	358	10.100	19.350	27.9	20.2	10.6	10.55	1.000	2.884	1.916	1.050

Average	1.168	3.085	1.514	1.126	1.088
Max	2.043	3.669	2.383	2.179	2.000
Min	1.000	2.107	1.027	0.936	0.884

ตารางที่ 2. ตารางน้ำหนักของเหล็กข้อต่อ KAWATETSU

No.	Type	A	B	B	C	D	E min	F	Ac	E/A	lc	Weight (no-gap) / set	E	E	E	K1 = E/mm	K2 = D/E	K3 = 2ba	K4 = a/E	K5 = E'/E				
		(mm.)	(kg.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)	(mm.)														
1	EE-8.3	8.3	8	4	3.6	1.8	6.1	5.8	3	6.92	2.82	19.5	0.70	0.900	2.150	2.9	3.6	1.000	2.000	2.698	2.389	1.111	1.222	
2	EE-10.2	10.2	11	5.5	4.7	2.4	7.6	8.1	4.2	11.5	2.27	26.1	1.5	1.200	2.600	4.05	4.7	1.300	1.300	1.958	3.115	2.167	1.083	
3	EE-12.5	12.5	14.8	7.4	5	2.4	9	9.8	5.1	14.9	2.1	31.4	2.8	1.200	3.300	4.9	5	2.300	1.750	2.083	2.970	2.750	1.917	1.458
4	EE-13D	13	12	6	6.15	2.75	10	9	4.6	17.1	1.77	30.2	2.6	1.375	3.625	4.5	6.15	1.400	1.500	2.236	2.483	2.636	1.018	1.091
5	EE-16A	16	14.4	7.2	4.8	4	11.7	10	5.2	19.2	1.83	35.1	3.5	2.000	3.850	5	4.8	2.000	2.150	1.200	2.597	1.925	1.000	1.075
6	EE-16B	16	24.4	12.2	4.8	4	11.7	20	10.2	19.2	2.87	55.1	5.3	2.000	3.850	10	4.8	2.000	2.150	1.200	5.195	1.925	1.000	1.075
7	EE-16L	16	24.9	12.45	1.92	5.85	10	18.92	9.58	11.2	4.64	51.8	3.0	2.925	2.075	9.46	1.92	2.870	3.000	0.328	9.118	0.709	0.981	1.026
8	EE-19A	19	16	8	5	4.5	14.2	10.8	5.6	23.0	1.73	39.7	4.7	2.250	4.850	5.4	5	2.400	2.400	1.111	2.227	2.156	1.067	1.067
9	EE-19B	19	26.8	13.4	5	4.5	14.2	21.4	11	22.8	2.69	61.3	7.1	2.250	4.850	10.7	5	2.400	2.400	1.111	4.412	2.156	1.067	1.067
10	EE-19K	19.15	15.8	7.9	9.58	4.65	14.45	10.9	5.6	43.5	0.911	39.6	8.9	2.325	4.900	5.45	9.58	2.300	2.350	2.060	2.224	2.108	0.989	1.011
11	EE-20N	20	19.9	9.95	5.65	5.7	14.1	14	7.2	31.7	1.46	46.2	7.6	2.850	4.200	7	5.65	2.750	2.950	0.991	3.333	1.474	0.965	1.035
12	EE-22A	22	18.8	9.4	5.8	5.8	10.4	5.4	37.5	1.12	42.1	8.6	2.900	4.900	5.2	5.8	4.000	3.200	1.000	2.122	1.690	1.379	1.103	
13	EE-22B	22	29.2	14.6	5.8	5.8	15.6	20.6	10.6	36.3	1.73	62.8	12.1	2.900	4.900	10.3	5.8	4.000	3.200	1.000	4.204	1.690	1.379	1.103
14	EE-22K	22	29.3	14.65	5.75	5.75	16	21.2	10.8	34.6	1.84	63.6	11.7	2.875	5.125	10.6	5.75	3.850	3.000	1.000	4.137	1.783	1.339	1.043
15	EE-22S	25	20.3	10.15	6.4	6.4	18.6	13.2	6.75	40.6	1.22	49.7	10.5	3.200	6.100	6.6	6.4	3.400	3.200	1.000	2.164	1.906	1.063	1.000
16	EE-25K	25.4	18.92	9.46	6.29	6.35	18.55	12.44	6.41	39.1	1.23	48.2	9.7	3.175	6.100	6.22	6.29	3.050	3.425	0.991	2.039	1.921	0.961	1.079
17	EE-25.4A	25.4	19	9.5	6.35	6.35	18.6	12.4	6.4	40.1	1.2	48.1	10.0	3.175	6.125	6.2	6.35	3.100	3.400	1.000	2.024	1.929	0.976	1.071
18	EE-25.4B	25.4	32	16	6.35	6.35	18.6	25.2	12.9	40.2	1.84	74.1	15.1	3.175	6.125	12.6	6.35	3.100	3.400	1.000	4.114	1.929	0.976	1.071
19	EE-28S	28	21	10.5	7.2	18.6	12	6.2	87.3	0.565	49.3	23.2	3.600	5.700	6	10.7	4.300	4.700	1.486	2.105	1.583	1.194	1.306	
20	EE-28R	28	25.5	12.75	10.6	7.2	18.4	16.3	8.25	87.2	0.661	57.6	27.0	3.600	5.600	8.15	10.6	4.500	4.800	1.472	2.911	1.556	1.250	1.333
21	EE-28	28	33.6	16.8	10.7	7.2	18.5	24	12.3	87.2	0.844	73.6	34.1	3.600	5.650	12	10.7	4.500	4.750	1.486	4.248	1.569	1.250	1.319
22	EE-30A	30	26.4	13.2	10.7	19.5	15.8	8.2	109.0	0.53	58	33.5	5.350	4.400	7.9	10.7	5.000	5.250	1.000	3.591	0.822	0.935	0.981	
23	EE-30L	30	30	15	7.1	6.9	19.5	19.4	9.95	60.1	1.09	65.3	22.3	3.450	6.300	9.7	7.1	5.050	5.250	1.029	3.079	1.826	1.464	1.522
24	EE-30B	30	42.6	21.3	10.7	19.5	32	16.3	110.0	0.823	90.4	51.1	5.350	4.400	16	10.7	5.000	5.250	1.000	7.273	0.822	0.935	0.981	
25	EE-33K	33	28.3	14.15	12.7	9.7	23.5	18.9	9.65	117.0	0.574	67.2	40.9	4.850	6.900	9.45	12.7	4.500	4.750	1.309	2.739	1.423	0.928	0.979
26	EE-33B	33	46.6	23.3	12.7	9.7	23.1	37.6	19.1	118.0	0.884	104	62.7	4.850	6.700	18.8	12.7	4.200	4.950	1.309	5.612	1.381	0.866	1.021
27	EE-35K	35	30.2	15.1	11.75	24.5	17.8	9.1	124.0	0.514	67.2	47.0	5.875	6.375	8.9	11.75	6.000	5.250	1.000	2.792	1.085	1.021	0.894	
28	EE-35A	35	31	15.5	10	10	24.5	18.4	9.5	106.0	0.662	69.9	39.2	5.000	7.250	9.2	10	6.000	5.250	1.000	2.538	1.450	1.200	1.050
29	EE-35B	35	48.4	24.2	10	24.5	35.8	18.2	104.0	1.01	105	56.3	5.000	7.250	17.9	10	6.000	5.250	1.000	4.938	5.612	1.381	1.111	
30	EE-35C	35	48.4	24.2	11.7	10	24.5	35.8	18.2	121.0	0.863	105	65.8	5.000	7.250	17.9	11.7	6.000	5.250	1.000	5.281	1.308	1.205	1.111
31	EE-40E	40	33.5	16.75	11.65	26.8	20.7	10.65	142.0	0.544	77.2	57.6	5.825	7.575	10.35	11.65	6.100	6.600	1.000	2.733	1.300	1.047	1.133	
32	EE-40A	40	34	17	10.7	27.5	20	10.3	127.0	0.608	77.4	52.6	5.350	8.400	10	10.7	6.700	6.250	1.000	2.381	1.570	1.252	1.168	
33	EE-40B	40	54.6	27.3	11.7	27	39.8	20.3	145.0	0.808	117	88.2	5.850	7.650	19.9	11.7	7.000	6.500	1.000	5.203	1.308	1.197	1.111	
34	EE-40H	40	55.3	27.65	11.7	27	40.4	20.6	145.0	0.816	118	89.3	5.850	7.650	20.2	11.7	7.050	6.500	1.000	5.281	1.308	1.205	1.111	
35	EE-42A	42	42	21	15	12	29.5	29.6	151.1	0.542	97.1	89.7	6.000	8.750	14.8	15	5.900	6.250	1.250	3.383	1.458	0.983	1.042	
36	EE-42B	42	42	21	19.6	12	29.5	29.6	151.1	0.415	97.1	117.0	6.000	8.750	14.8	19.6	5.900	6.250	1.000	2.381	1.383	1.458	1.042	
37	EE-44E	44	37.6	18.8	15	11.7	31	23.2	11.8	190.0	0.458	87.4	5.850	9.650	11.6	15	7.000	6.500	1.000	5.203	1.308	1.197	1.111	

Data Sheet

Calculation

Data Sheet

Calculation

No.	Type	A (mm.)	2B (mm.)	B (mm.)	C (mm.)	D (mm.)	E min (mm.)	2F min (mm.)	F (mm.)	Ac (mm. ²)	E/A (mm. ⁻¹)	Ic (mm.)	Weight (no gap) / set (kg.)	E (mm.)	a (mm.)	b (mm.)	D (mm.)	E (mm.)	K1 = D/E (%)	K2 = 2b/a (%)	K3 = a/E (%)	K4 = E/E ' (%)	K5 = E''/E ' (%)
38	EE-44	44	60.6	30.3	15	11.7	31.2	45.8	23.3	185.0	0.721	133	127.0	5.850	9.750	22.9	15	7.000	6.400	1.282	4.697	1.197	
39	EE-50A	50	42.6	21.3	14.6	14.6	34.3	25	12.8	226.0	0.427	96.3	115.0	7.300	9.850	12.5	14.6	8.500	7.850	1.000	2.538	1.164	
40	EE-50B	50	66.6	33.3	14.6	14.6	34.3	48.8	24.8	222.0	0.649	144	166.0	7.300	9.850	24.4	14.6	8.500	7.850	1.000	4.954	1.164	
41	EE-55	55	55	27.5	20.7	17	37.2	37	18.9	353.0	0.35	123	226.0	8.500	10.100	18.5	20.7	8.600	8.900	1.218	3.663	1.188	
42	EE-60A	60	44.6	22.3	15.6	15.6	43.7	27.4	14	248.0	0.443	110	143.0	7.800	14.050	13.7	15.6	8.500	8.150	1.000	1.950	1.801	
43	EE-60B	60	72	36	15.6	15.6	43.7	55	28	244.0	0.678	166	207.0	7.800	14.050	27.5	15.6	8.000	8.150	1.000	3.915	1.801	
44	EE-80K	79.3	75	37.5	19.8	19.8	59.4	56	28.3	373.0	0.492	184	351.0	9.900	19.800	28	19.8	9.200	9.350	1.000	2.828	2.000	

Average	3.574	1.656	1.117	1.097
Max:	2.236	9.118	2.750	1.917
Min	0.328	1.950	0.709	0.866

ภาคผนวก ช
ตารางขดลวดแต่ละชนิด

ตารางที่ ช.1 ตารางข้อมูลค่าแต่ละชนิด

Table 3: Dimensions of Enamelled Round Wire (JIS)

Conductor		Class 0		Class 1		Resist ance Max. at 20°C (Ω/km)
Diameter (mm)	Tolerance (mm)	Film Thickness Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	Film Thickness Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	
3.20	±0.04	0.049	3.388	0.034	3.338	2.198
3.00	±0.03	0.049	3.178	0.034	3.128	2.489
2.90	±0.03	0.049	3.078	0.034	3.028	2.665
2.80	±0.03	0.049	2.978	0.034	2.928	2.861
2.70	±0.03	0.049	2.878	0.034	2.828	3.079
2.60	±0.03	0.049	2.778	0.034	2.728	3.324
2.50	±0.03	0.049	2.678	0.034	2.628	3.598
2.40	±0.03	0.048	2.574	0.033	2.526	3.908
2.30	±0.03	0.046	2.468	0.032	2.422	4.260
2.20	±0.03	0.046	2.368	0.032	2.322	4.662
2.10	±0.03	0.045	2.266	0.031	2.220	5.123
2.00	±0.03	0.044	2.162	0.030	2.118	5.656
1.90	±0.03	0.044	2.062	0.030	2.018	6.278
1.80	±0.03	0.042	1.956	0.029	1.914	7.007
1.70	±0.03	0.042	1.856	0.029	1.814	7.871
1.60	±0.03	0.041	1.754	0.028	1.712	8.906
1.50	±0.03	0.041	1.654	0.028	1.612	10.16
1.40	±0.03	0.039	1.548	0.027	1.508	11.70
1.30	±0.03	0.039	1.448	0.027	1.408	13.61
1.20	±0.03	0.037	1.342	0.026	1.304	16.04
1.10	±0.03	0.037	1.242	0.026	1.204	19.17
1.00	±0.03	0.036	1.138	0.025	1.102	23.33
0.95	±0.02	0.034	1.072	0.024	1.038	25.38
0.90	±0.02	0.033	1.020	0.023	0.986	28.35
0.85	±0.02	0.032	0.966	0.022	0.934	31.87
0.80	±0.02	0.031	0.914	0.021	0.882	36.08
0.75	±0.02	0.030	0.860	0.020	0.830	41.19
0.70	±0.02	0.028	0.804	0.019	0.776	47.47
0.65	±0.02	0.027	0.752	0.018	0.724	55.31
0.60	±0.02	0.026	0.698	0.017	0.672	65.26
0.55	±0.02	0.025	0.646	0.017	0.620	78.15
0.50	±0.01	0.025	0.586	0.017	0.560	91.43
0.45	±0.01	0.024	0.532	0.016	0.508	114.2
0.40	±0.01	0.023	0.480	0.015	0.456	145.3
0.37	±0.01	0.022	0.446	0.014	0.424	170.6
0.35	±0.01	0.021	0.424	0.014	0.402	191.2
0.32	±0.01	0.021	0.394	0.014	0.372	230.0
0.30	±0.01	0.021	0.374	0.014	0.352	262.9
0.29	±0.01	0.020	0.360	0.013	0.340	285.7
0.28	±0.01	0.020	0.350	0.013	0.330	307.3
0.27	±0.01	0.020	0.340	0.013	0.320	331.4
0.26	±0.01	0.020	0.330	0.013	0.310	358.4
0.25	±0.008	0.020	0.318	0.013	0.298	382.5
0.24	±0.008	0.020	0.308	0.013	0.288	416.2
0.23	±0.008	0.020	0.298	0.013	0.278	454.5
0.22	±0.008	0.019	0.286	0.012	0.266	498.4
0.21	±0.008	0.019	0.276	0.012	0.256	549.0
0.20	±0.008	0.019	0.266	0.012	0.246	607.6
0.19	±0.008	0.019	0.256	0.012	0.236	676.2
0.18	±0.008	0.019	0.246	0.012	0.226	757.2
0.17	±0.008	0.018	0.232	0.011	0.214	853.5
0.16	±0.008	0.018	0.222	0.011	0.204	969.5
0.15	±0.008	0.017	0.210	0.010	0.192	1,111
0.14	±0.008	0.017	0.200	0.010	0.182	1,286
0.13	±0.008	0.017	0.190	0.010	0.172	1,505
0.12	±0.008	0.017	0.180	0.010	0.162	1,786
0.11	±0.008	0.016	0.166	0.009	0.150	2,153
0.10	±0.008	0.016	0.156	0.009	0.140	2,647

Table 4: Dimensions of Enamelled Round Wire (JIS)

Conductor		Class 0		Class 1		Resist ance Max. at 20°C (Ω/km)
Diameter (mm)	Tolerance (mm)	Film Thickness Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	Diameter (mm)	Film Thickness Min. (mm)	
1.00	±0.012	0.017	1.062	0.95	0.017	22.49
0.95	±0.010	0.017	1.008	0.90	0.016	24.84
0.90	±0.010	0.016	0.956	0.85	0.015	27.71
0.85	±0.010	0.015	0.904	0.80	0.015	31.11
0.80	±0.010	0.015	0.852	0.75	0.014	35.17
0.75	±0.008	0.014	0.798	0.70	0.013	39.87
0.70	±0.008	0.013	0.746	0.65	0.012	45.84
0.65	±0.008	0.012	0.694	0.60	0.012	53.26
0.60	±0.008	0.012	0.644	0.55	0.008	62.64
0.55	±0.006	0.012	0.592	0.50	0.008	74.18
0.50	±0.006	0.012	0.542	0.45	0.011	89.95
0.45	±0.006	0.011	0.490	0.40	0.011	112.1
0.40	±0.005	0.011	0.439	0.37	0.010	141.7
0.37	±0.005	0.010	0.407	0.33	0.007	165.9
0.35	±0.005	0.010	0.387	0.30	0.007	185.7
0.30	±0.005	0.010	0.357	0.26	0.004	222.8
0.25	±0.005	0.010	0.337	0.20	0.003	254.0
0.20	±0.004	0.009	0.317	0.15	0.003	273.9
0.18	±0.004	0.009	0.314	0.13	0.003	294.1
0.15	±0.004	0.009	0.304	0.12	0.003	316.6
0.12	±0.003	0.008	0.285	0.11	0.003	341.8
0.10	±0.004	0.008	0.275	0.09	0.003	370.2
0.08	±0.004	0.008	0.265	0.07	0.003	402.2
0.06	±0.004	0.008	0.255	0.06	0.003	438.6
0.05	±0.004	0.008	0.243	0.05	0.003	480.1
0.04	±0.003	0.007	0.222	0.04	0.003	522.8
0.03	±0.003	0.007	0.221	0.03	0.003	557.2
0.02	±0.003	0.006	0.212	0.02	0.003	640.6
0.01	±0.003	0.006	0.202	0.01	0.003	715.0
0.005	±0.003	0.004	0.181	0.002	0.003	908.8
0.002	±0.003	0.004	0.169	0.001	0.003	1,037
0.001	±0.003	0.004	0.159	0.001	0.003	1,193
0.0005	±0.003	0.004	0.149	0.001	0.003	1,389
0.0002	±0.003	0.004	0.139	0.001	0.003	1,636
0.0001	±0.003	0.003	0.128	0.001	0.003	1,957
0.00005	±0.003	0.003	0.118	0.001	0.003	2,381
0.00002	±0.003	0.003	0.107	0.001	0.003	2,959
0.00001	±0.003	0.003	0.097	0.001	0.003	3,778
0.000005	±0.003	0.003	0.085	0.001	0.003	4,990
0.000002	±0.003	0.003	0.075	0.001	0.003	6,966
0.000001	±0.003	0.003	0.064	0.001	0.003	10,240
0.0000005	±0.003	0.003	0.052	0.001	0.003	15,670
0.0000002	±0.003	0.003	0.040	0.001	0.003	28,870
0.0000001	±0.003	0.003	0.034	0.001	0.003	42,780
0.00000005	±0.003	0.003	0.028	0.001	0.003	69,850

(6)

ตารางที่ ช.1 (ต่อ)

Table 5: Dimensions of Enamelled Round Wire (NEMA MW-1000)

AWG SIZE	Conductor Diameter			SINGLE		HEAVY	
	Nominal (mm)	Min. (mm)	Max. (mm)	Increase in Diameter Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	Increase in Diameter Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)
7	3.665	3.630	3.683			0.086	3.787
8	3.264	3.231	3.282			0.084	3.383
9	2.906	2.878	2.921			0.081	3.020
10	2.588	2.563	2.601			0.079	2.695
11	2.304	2.281	2.316			0.076	2.408
12	2.052	2.032	2.062			0.074	2.151
13	1.829	1.811	1.839			0.071	1.923
14	1.628	1.613	1.636	0.041	1.692	0.081	1.732
15	1.450	1.435	1.458	0.038	1.509	0.076	1.547
16	1.290	1.278	1.298	0.036	1.349	0.074	1.384
17	1.151	1.138	1.156	0.036	1.207	0.071	1.240
18	1.024	1.013	1.029	0.033	1.077	0.066	1.110
19	0.912	0.902	0.917	0.030	0.963	0.064	0.993
20	0.813	0.805	0.818	0.030	0.861	0.058	0.892
21	0.724	0.716	0.726	0.028	0.770	0.056	0.798
22	0.643	0.635	0.645	0.028	0.686	0.053	0.714
23	0.574	0.569	0.577	0.025	0.617	0.051	0.643
24	0.511	0.505	0.513	0.025	0.551	0.048	0.577
25	0.455	0.450	0.457	0.023	0.493	0.046	0.516
26	0.404	0.399	0.406	0.023	0.439	0.043	0.462
27	0.361	0.358	0.363	0.020	0.396	0.041	0.417
28	0.320	0.318	0.323	0.020	0.356	0.041	0.373
29	0.287	0.284	0.290	0.018	0.320	0.038	0.338
30	0.254	0.251	0.256	0.018	0.284	0.036	0.302
31	0.226	0.224	0.229	0.015	0.254	0.033	0.274
32	0.203	0.201	0.206	0.015	0.231	0.030	0.249
33	0.180	0.178	0.183	0.013	0.206	0.028	0.224
34	0.160	0.157	0.163	0.013	0.183	0.025	0.198
35	0.142	0.140	0.145	0.010	0.163	0.023	0.178
36	0.127	0.124	0.130	0.010	0.147	0.020	0.160
37	0.114	0.112	0.117	0.008	0.132	0.020	0.145
38	0.102	0.099	0.104	0.008	0.119	0.018	0.130
39	0.089	0.086	0.091	0.005	0.104	0.015	0.114
40	0.079	0.076	0.081	0.005	0.094	0.015	0.102
41	0.071	0.069	0.074	0.005	0.084	0.013	0.091
42	0.064	0.061	0.066	0.005	0.076	0.010	0.081
43	0.056	0.053	0.058	0.005	0.066	0.010	0.074
44	0.051	0.048	0.053	0.0025	0.061	0.010	0.069
45	0.0447			0.0025	0.0521	0.0076	0.0584
46	0.0399			0.0025	0.0470	0.0076	0.0533
47	0.0356			0.0025	0.0432	0.0076	0.0483
48	0.0315			0.0025	0.0381	0.0051	0.0432
49	0.0282			0.0025	0.0330	0.0051	0.0381
50	0.0251			0.0025	0.0305	0.0051	0.0356

Table 6: Dimensions of Enamelled Round Wire (BS)

	Conductor diameter			Grade 1		Grade 2	
	Nominal (mm)	Max. (mm)	Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	Increase in Diameter Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	Increase in Diameter Min. (mm)
	3.350	3.384	3.316				3.498
	3.150	3.182	3.118				3.294
	3.000	3.030	2.970				3.142
	2.800	2.828	2.772				2.938
	2.650	2.677	2.623				2.784
	2.500	2.525	2.475				2.631
	2.360	2.384	2.336				2.488
	2.240	2.262	2.218				2.366
	2.120	2.141	2.099				2.243
	2.000	2.020	1.980	2.092	0.049	2.120	0.073
	1.900	1.919	1.881	1.990	0.049	2.018	0.072
	1.800	1.818	1.782	1.888	0.048	1.916	0.071
	1.700	1.717	1.683	1.785	0.047	1.813	0.069
	1.600	1.616	1.584	1.683	0.046	1.711	0.068
	1.500	1.515	1.485	1.581	0.045	1.608	0.067
	1.400	1.414	1.386	1.479	0.044	1.506	0.066
	1.320	1.333	1.307	1.397	0.043	1.423	0.064
	1.250	1.263	1.237	1.325	0.042	1.351	0.063
	1.180	1.192	1.168	1.254	0.042	1.279	0.062
	1.120	1.131	1.109	1.192	0.041	1.217	0.061
	1.060	1.071	1.049	1.130	0.040	1.155	0.060
	1.000	1.010	0.990	1.068	0.039	1.093	0.059
	0.950	0.960	0.940	1.017	0.039	1.041	0.058
	0.850	0.859	0.841	0.913	0.037	0.937	0.055
	0.800	0.808	0.792	0.861	0.036	0.885	0.054
	0.750	0.758	0.742	0.809	0.035	0.832	0.052
	0.710	0.717	0.703	0.767	0.034	0.790	0.051
	0.670	0.677	0.663	0.726	0.033	0.749	0.050
	0.630	0.636	0.624	0.684	0.032	0.706	0.049
	0.600	0.606	0.594	0.563	0.031	0.675	0.047
	0.560	0.566	0.554	0.611	0.030	0.632	0.046
	0.530	0.536	0.524	0.579	0.029	0.601	0.045
	0.500	0.505	0.495	0.548	0.029	0.569	0.044
	0.450	0.455	0.445	0.495	0.027	0.516	0.041
	0.425	0.430	0.420	0.469	0.026	0.489	0.039
	0.400	0.405	0.395	0.442	0.025	0.462	0.038
	0.375	0.380	0.370	0.417	0.024	0.436	0.037
	0.355	0.359	0.351	0.395	0.024	0.414	0.036
	0.335	0.339	0.331	0.374	0.023	0.393	0.035
	0.315	0.319	0.311	0.352	0.022	0.371	0.034
	0.300	0.304	0.296	0.337	0.021	0.355	0.033
	0.280	0.284	0.276	0.315	0.021	0.334	0.032
	0.265	0.269	0.261	0.300	0.020	0.317	0.031
	0.250	0.254	0.246	0.284	0.020	0.301	0.031
	0.236	0.240	0.232	0.269	0.019	0.285	0.030
	0.224	0.227	0.221	0.256	0.019	0.272	0.030
	0.212	0.215	0.209	0.243	0.018	0.258	0.029
	0.200	0.203	0.197	0.230	0.018	0.245	0.028
	0.190	0.193	0.187	0.220	0.017	0.234	0.027
	0.180	0.183	0.177	0.209	0.017	0.222	0.027
	0.170	0.173	0.167	0.198	0.016	0.211	0.026
	0.160	0.163	0.157	0.187	0.016	0.199	0.025
	0.150	0.153	0.147	0.177	0.015	0.188	0.024
	0.140	0.143	0.137	0.166	0.015	0.176	0.024
	0.132	0.135	0.129	0.157	0.014	0.167	0.023
	0.125	0.128	0.122	0.149	0.013	0.159	0.022
	0.112	0.115	0.109	0.134	0.012	0.143	0.020
	0.100	0.103	0.097	0.121	0.011	0.129	0.019
	0.090	0.093	0.087	0.110	0.010	0.117	0.017
	0.080	0.083	0.077	0.098	0.009	0.105	0.016
	0.071	0.074	0.068	0.088	0.008	0.095	0.015
	0.063			0.078	0.007	0.085	0.013
	0.060			0.075	0.006	0.081	0.012
	0.056			0.070	0.006	0.076	0.012
	0.050			0.062	0.005	0.068	0.010

ภาคผนวก ๊ช

วิธีการวัดกำลังงานโดยหาค่าเฉลี่ยรูปคลื่นกำลังงาน

ในกรณีที่อุปกรณ์ไฟฟ้าใดๆ ที่กำลังทำการวัด มีรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ซับซ้อนมากๆ การหาค่าลังงานสัญเสียงของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ จะกระทำได้โดยใช้ Digital Oscilloscope ซึ่งจะอาศัยการจับรูปคลื่นแรงดันและกระแสทำการวิเคราะห์โดยใช้หลักการทำงานทางคณิตศาสตร์ดังนี้

รูปคลื่นของกำลังงาน ณ เวลาใดๆ จะเป็นผลมาจากการวัดระหว่างกระแสและแรงดันแบบบุคต่อบุคดังสมการต่อไปนี้

$$P(t) = i(t) \times v(t) \quad (\text{๗.1})$$

เมื่อได้รูปคลื่นของกำลังงาน ณ เวลาใดๆ ก็ให้ทำการหาค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นในความเวลาหนึ่งๆ จะทำให้ได้ค่ากำลังงานเฉลี่ยออกมานะ

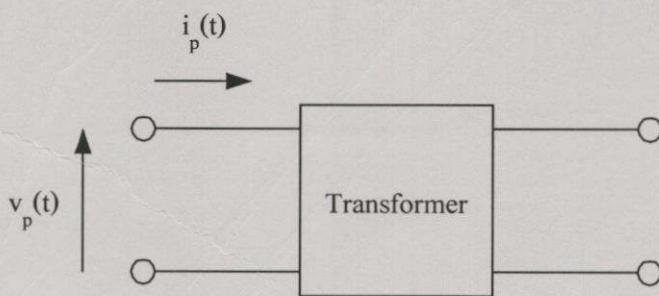
จาก

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

ดังนั้น

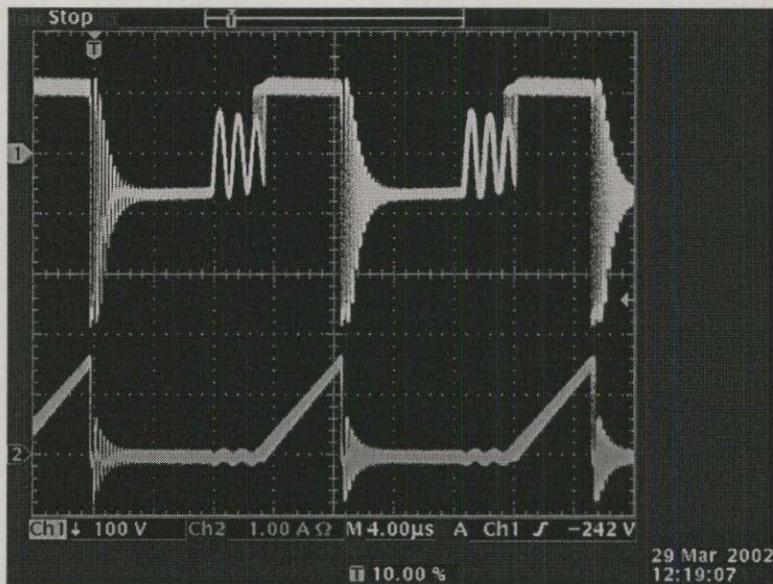
$$P_{av} = \frac{\text{Area}}{T} \cdot p(t) \quad (\text{๗.2})$$

โดยทั่วไป Digital Oscilloscope จะมีฟังก์ชันในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ซึ่งรวมไปถึงการหาค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นด้วย ะนั้นค่าเฉลี่ยที่อ่านได้จาก Digital Oscilloscope ในความเวลาหนึ่งๆ จะหมายถึงกำลังงานที่เกิดขึ้นบนด้วอยุปกรณ์ไฟฟ้าที่กำลังทำการวัด ทั้งนี้วิธีดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการหาค่าลังงานข้ามข้องหนื้มอแปลงความถี่สูงได้



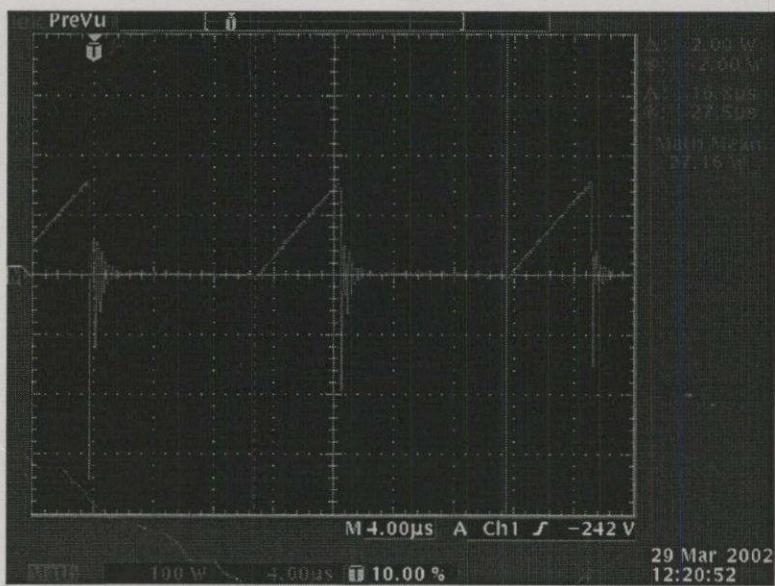
รูปที่ ๗.๑ ทิศทางในการวัดแรงดันและกระแสที่เข้าสู่หนื้มอแปลงความถี่สูง

นำไฟรับแรงดันเป็นแซนเดลที่ 1 จับที่แรงดัน และไฟรับกระแสเป็นแซนเดลที่ 2 จับที่กระแส ซึ่งมีทิศทางในการจับดังรูปที่ ๗.๑ จะได้รูปคลื่นที่มีลักษณะดังรูปที่ ๗.๒



รูปที่ ช.2 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดแรงดัน (บบ) และกระแส (ล่าง)

จากนั้นเข้าสู่ฟังก์ชันที่นำรูปสัญญาณของแซนเดลที่ 1 มาคูณกับแซนเดลที่ 2 ซึ่งผลลัพธ์ของรูปคลื่นที่ได้จะเป็นดังรูปที่ ช.3

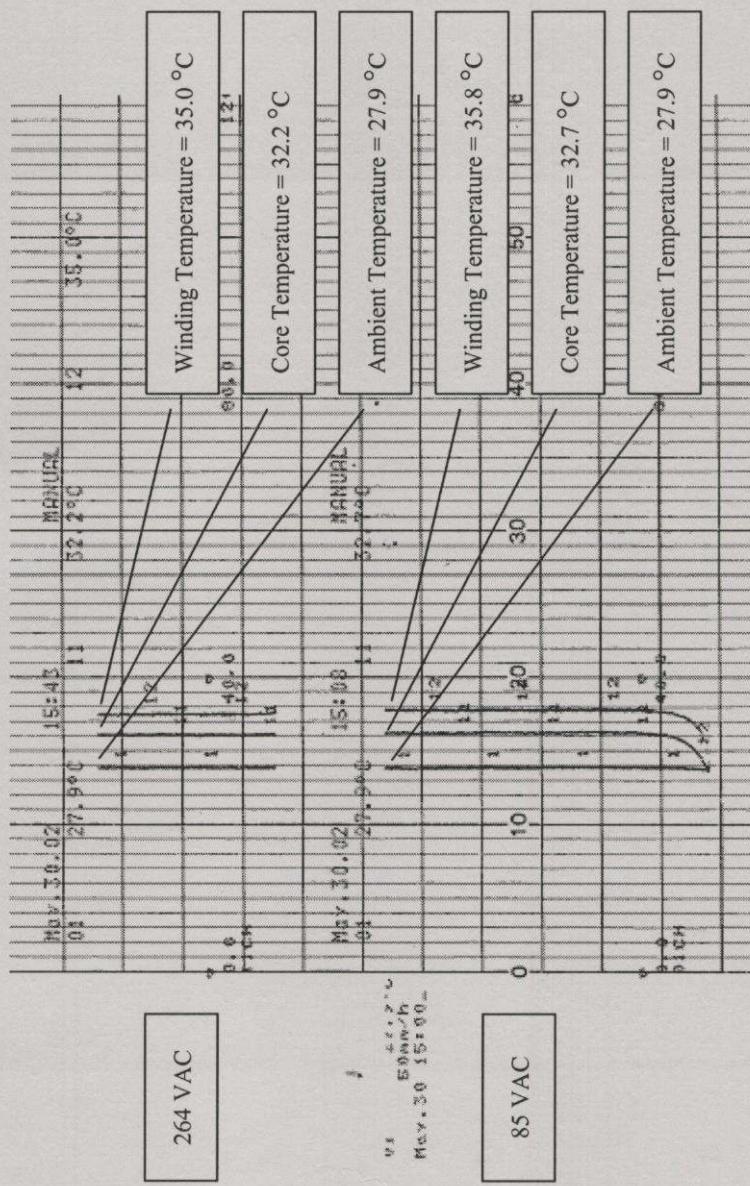


รูปที่ ช.3 รูปคลื่นที่ได้จากการคูณระหว่างแรงดันกับกระแส

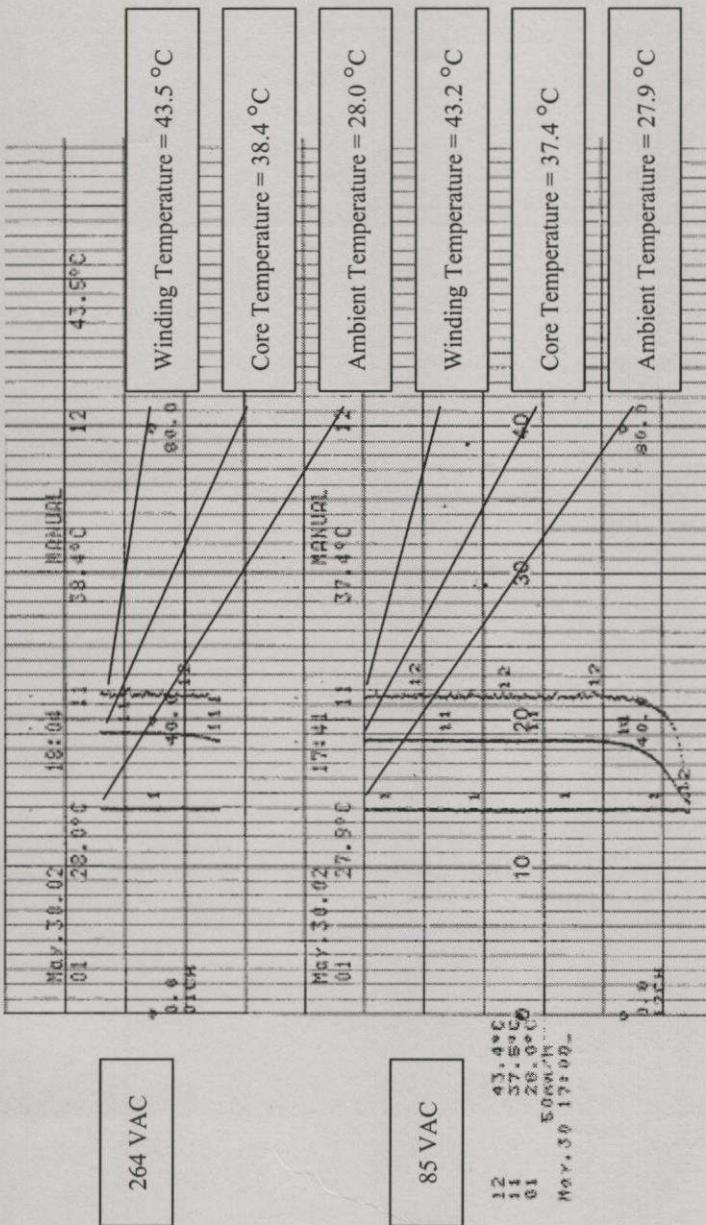
จากรูปที่ ช.3 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นที่อ่านได้จะมีค่าเท่ากับ 27.16 W ซึ่งเป็นค่ากำลังงานขาเข้าของหม้อแปลงความถี่สูงนั้นเอง

ภาคผนวก ณ

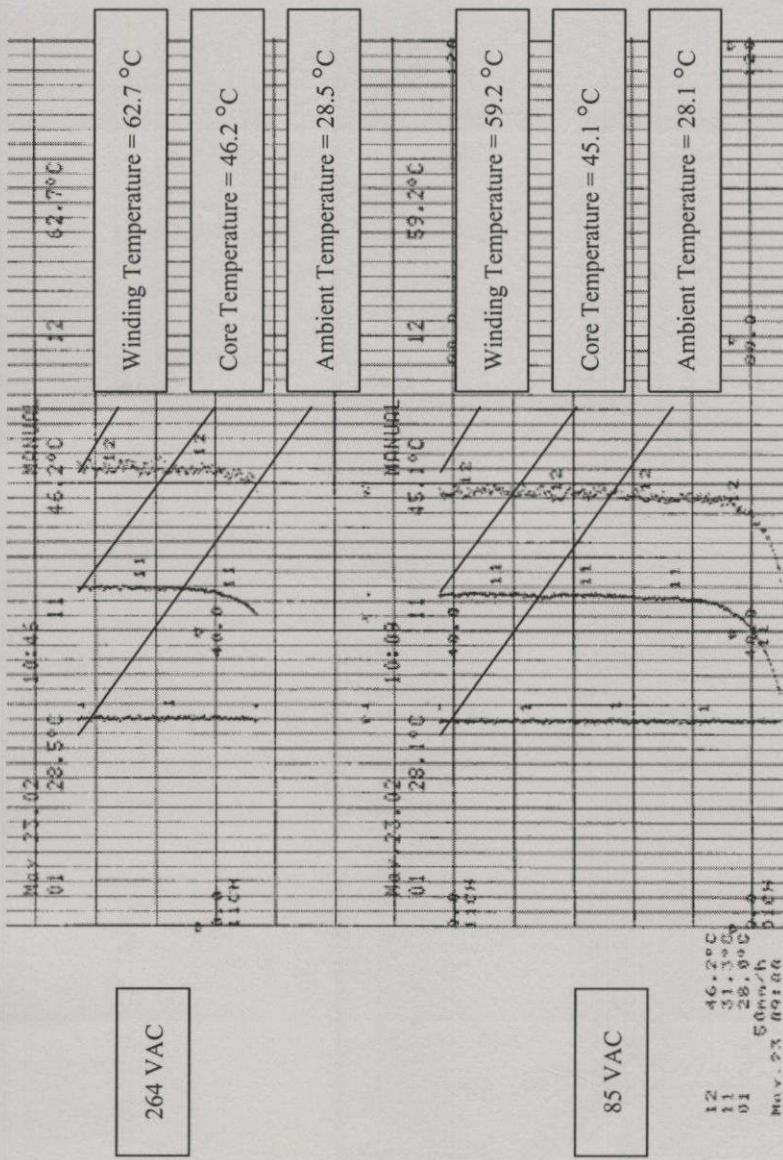
ผลการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของต้านแบบหน้ม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัว



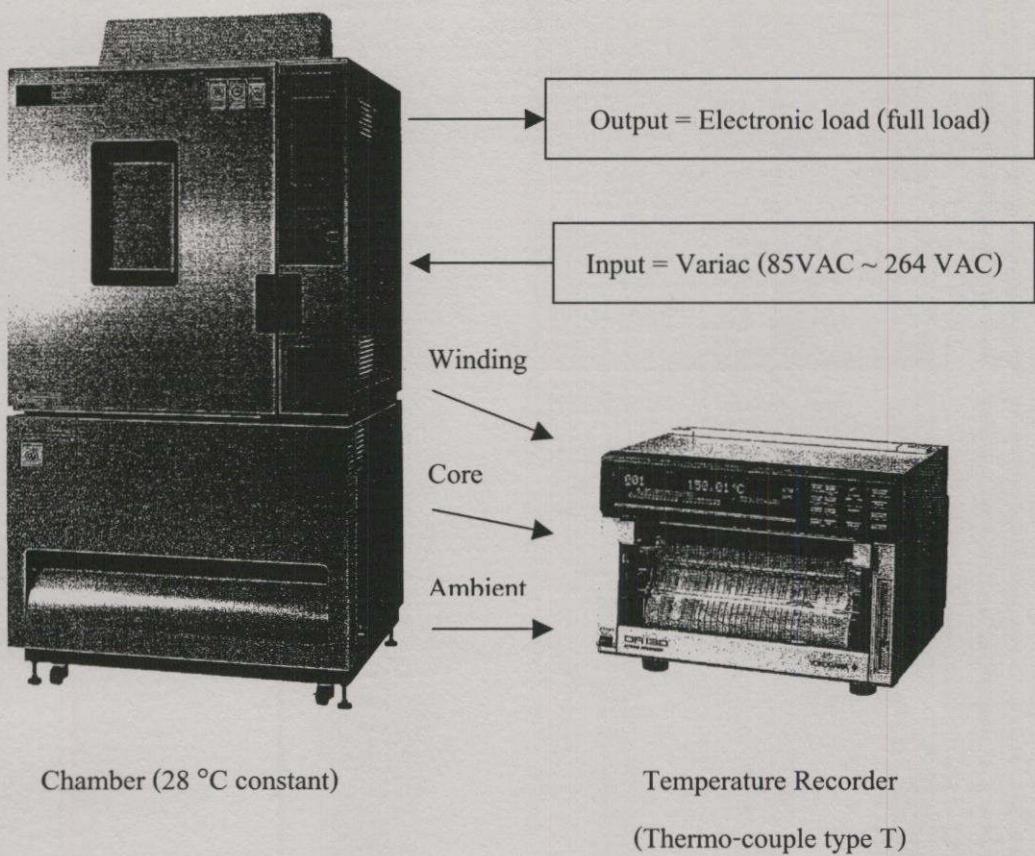
รูปที่ ๗.๑ ผลการวัดอุณหภูมิของหน้าแปลงความถี่ตู้ของแหล่งไฟแบบสั่นขนาด ๕ V / ๑.๒ A ขณะที่ Load สูงสุดที่แรงดันนาฬิกาสูงสุด และ ต่ำสุดตามลำดับ



รูปที่ ณ.2 ผลการวัดอุณหภูมิของหน้าแปลงความถี่ ไฟเบนส์ติ๊งขนาด 12 V / 2 A ขณะจำ似 Load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าสูงสุด และ ทำสูตรตามคำนวณ



รูปที่ ณ.3 ผลการวัดอุณหภูมิของหน่วยแปลงความถี่ซึ่งของแหล่งจ่ายไฟแบบสัตว์ชั่วขณะด้วย Load สูงๆที่แรงดันขาเข้าสูงสุด และ ต่ำสุดตามลำดับ



รูปที่ ว.4 ระบบที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของต้นแบบหม้อแปลงทั้ง 3 ตัว

ภาคผนวก ณ
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

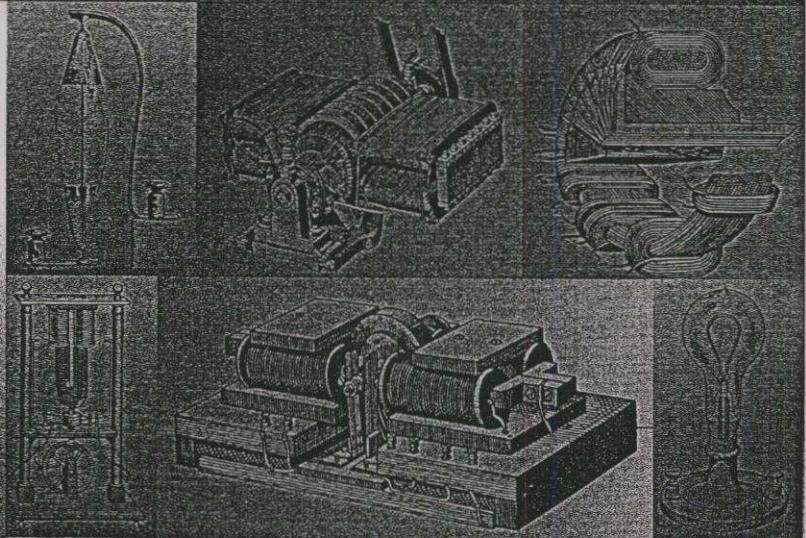
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



EECON
24

EECON-24 KMUTT



Volume 1

สาขางานทั่วไป

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อัลตร้าโซนิก (PE)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- งานวัสดุที่เกี่ยวข้องกับ
- วิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ห้ามนำเครื่องดื่มและอาหารเข้าสู่ห้องประชุม

22-23 พฤษภาคม 2544

โทร : 0-2739-2359 โทรสาร : 0-2326-9965

<http://www.ladkrabang.com>

การออกแบบหน้ามือแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

Minimum Weight Design of High-Frequency Transformer for FLY-BACK Converter

อภิวัช คำนวนภิจ แซ่บุพิ ฉัตรฤทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณพาการาดุรักษ์ กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการออกแบบหน้ามือแปลงความถี่สูงที่ใช้กับคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยใช้วิธีการคำนว่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข ร่วมกับการใช้อัลกอริธึมที่สูญออกแนวสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ในบทความนี้จะกำหนดค่าแปร์เพร์ในการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักหน้ามือแปลงเป็นค่ามิติของแกนเฟอร์ไรร์ จำนวนรอบในการพันขดลวด และขนาดของคลัวด์ โดยนำเสนองผลการออกแบบหน้ามือแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟสวิตช์ซิงก์ขนาด 24 V, 4 A, 35 kHz โครงสร้างหน้ามือแปลงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด ซึ่งได้ใช้วิธีที่นำเสนอในบทนี้ค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ และจากผลที่ได้จากการออกแบบนี้สามารถนำไปใช้ศึกษาจึงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมเข้า ค่าความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟสวิตช์ซิง

Abstract

The objective of this paper is to introduce the design of high-frequency transformers for a FLY-BACK converter which has minimum weight using numerical constrained optimization techniques combined with an interactive algorithm. In this paper, the dimension of ferrite core, number of turns and diameter of conductors which have the effect to the total weight of transformer are defined as design variables. The design of 24 V, 4 A, 35 kHz Switched Mode Power Supply (SMPS) is presented. The configuration of transformer having minimum weight obtained by this proposed technique is practical. Furthermore, this optimal results can be used for studying the design parameters which have indirect effect to the weight of transformer such as the operating frequency of SMPS.

Keywords: minimum weight design, high-frequency transformers,

FLY-BACK converter, numerical constrained optimization techniques, interactive algorithm.

1. บทนำ

ในการออกแบบ SMPS สำหรับอุปกรณ์ที่สำคัญก็คือ หน้ามือแปลงความถี่สูง ซึ่งมีหน้าที่ในการส่งผ่านพลังงานจากด้าน primary (แรงดัน

สูง) ไปยังด้าน secondary (แรงดันต่ำ) พบว่าโครงสร้างของหน้ามือแปลงความถี่สูงจะเป็นส่วนที่กำหนดขนาดของ SMPS ซึ่งมีขนาดประมาณ 25% ของขนาดโดยรวม และมีน้ำหนักประมาณ 30% ของน้ำหนักทั้งหมด [1] ในปัจจุบันการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะที่ต้องการจะต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook, PDA (personal digital assistant) โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น นับวันก็ยิ่งมีความต้องการในด้านความสะดวกและกล่องหัว นั่นก็คือ มีขนาดที่เล็กกะทัดรัด และน้ำหนักที่เบา เพื่อสะดวกในการพกพาโดยชั้นคงประสิทธิภาพให้ได้เหมือนเดิมหรือมากกว่า ฉะนั้นการที่จะทำการออกแบบ SMPS ให้มีขนาดและน้ำหนักเบา ก็คือ การออกแบบหน้ามือแปลงความถี่สูงให้มีขนาดและน้ำหนักน้อยที่สุด [2]

ในบทความนี้จะศึกษาถึงการออกแบบหน้ามือแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยนำหลักการของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข (numerical constrained optimization techniques) เข้ามาช่วยในการกำหนดค่าแปร์เพร์เพร์ ในการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักของหน้ามือแปลงความถี่สูงโดยตรงซึ่งได้แก่ มิติของแกนเฟอร์ไรร์ จำนวนรอบในการพันขดลวด และขนาดของคลัวด์ และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในด้านน้ำหนักของหน้ามือแปลงความถี่สูงสามารถนำไปปรับปรุงพารามิเตอร์ตัวอื่นที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมนั่นก็คือ ความถี่ที่การทำงานของ SMPS ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลอย่างไรต่อน้ำหนักของหน้ามือแปลงความถี่สูง และค่าความถี่ที่ได้มีความเหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ผลของการออกแบบหน้ามือแปลงความถี่สูงมีน้ำหนักน้อยที่สุด

ในปัจจุบันนี้โปรแกรมการคำนวณมากน้ำที่มีความสามารถในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม ได้ให้มาให้หลักการแล้วก็จะมีรูปแบบ และอัลกอริธึม (algorithm) ที่คล้ายกัน และในปัจจุบันได้มีอัลกอริธึมใหม่ ๆ เกิดขึ้นอย่างมากน้ำ แต่ยังประสบปัญหานี้ที่ต้องทำให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วมากอีกขั้นเท่านั้นเอง จุดประดับคือของบทความนี้จะไม่ได้เน้นอยู่ที่การอธิบายถึงหลักการของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมอย่างละเอียด แต่จะเป็นเพียงการแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมกับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronics) เพื่อให้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์และการออกแบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเท่านั้น ในบทความนี้จะใช้ประโยชน์จาก Optimization Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งจะเลือกใช้วิธี SQP (sequential quadratic programming) [3]

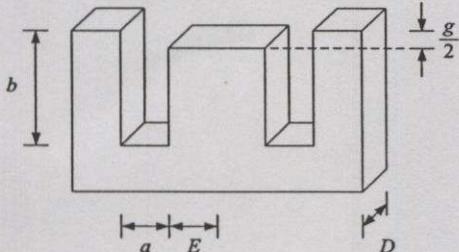
2. การออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK

ในการออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK [4-5] โดยใช้โปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสมจึงเป็นต้องทราบดึงพารามิเตอร์และตัวแปรค่าๆ เป็นจำนวนมาก เพื่อใช้เป็นข้อมูลอินพุตให้กับโปรแกรมซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การออกแบบลักษณะของปั๊มหัว

2.1.1 โครงสร้างของแกน

แกนที่นิยมใช้ในการออกแบบ SMPS ก็คือแกน EE ดังรูปที่ 1 ซึ่งข้อมูลนิติของโครงสร้างของแกนสามารถพิจารณาได้จาก catalog ของผู้ผลิตและบริษัท แต่โดยทั่วไปแล้วมักที่สำคัญของแกนจะมีอยู่ 4 ค่า คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของขากราด (E) ความหนาแกนกลาง (D) ความกว้างช่องพื้นที่คลุม (a) และความสูงครึ่งหนึ่งของช่องพื้นที่คลุม (b)



รูปที่ 1 มิติของแกนเพอร์วิตซ์

แต่โดยทั่วไปค่าของ E จะมีความสัมพันธ์กับ D ด้วยค่าคงที่ K_1 และค่าของ a จะมีความสัมพันธ์กับ b ด้วยค่าคงที่ K_2 ดังนี้

$$D = 2EK_1 \quad (1)$$

$$a = \frac{bK_2}{2} \quad (2)$$

โดยค่าของ K_1 จะมีค่าประมาณ 1~2 และ K_2 จะมีค่าประมาณ 1~3

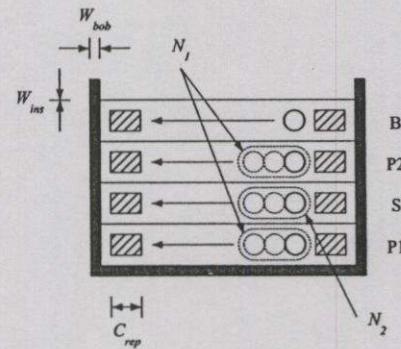
2.1.2 โครงสร้างการพันของขดลวด

ลักษณะการพันของขดลวดในหน้าแปลงความถี่สูงมีอยู่หลายวิธี แต่โดยทั่วไปจะมีลักษณะการพันที่เป็นแบบแนวนิวชิ โดยที่ขดแรกจะเป็นขด primary ครึ่งหนึ่ง (P1) ต่อมาเป็นขด secondary (S) และตามด้วยขด primary ที่เหลืออีกครึ่งหนึ่ง (P2) และทุกท้าทายเป็นขดใบอัลไฟเดิชให้กับวงจรควบคุมซึ่งอยู่ทาง primary (B) ดังรูปที่ 2 โดยที่ความหมายของสัญลักษณ์ดังนี้ ในรูปที่ 2 สามารถดูได้จากตารางที่ 1 โดยปกติการพันขดลวดที่คือจะพันให้เรียงชิดกัน (Perfect winding) แต่ในบางครั้งช่องพื้นที่คลุมที่มีขนาดใหญ่จึงใช้ลักษณะการพันแบบนี้ซึ่งว่าง ทั้งนี้

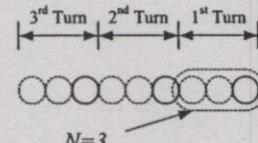
เพื่อลดค่า leakage inductance ที่เกิดขึ้นในหน้าแปลงความถี่สูง นอกจากนี้ในการพันขดลวดเพื่อที่จะลดค่าความต้านทานของขดลวดของครึ่งหนึ่งเป็นต้องใช้ขดของแต่ละชั้นที่ต้องมีขนาดต่างกัน แล้วพันให้ได้ครบตามจำนวนรอบนั้น ลักษณะการพันดังกล่าวแสดงได้ในรูปที่ 3 การพันตามขดลวดของแต่ละชั้นมากกว่า 3 เส้น นักไม่นิยมทำกัน เพราะจะพันขาดได้ถ้าหากหรืออาจทำให้ขดลวดสูงเกินกว่าที่จะพันบนบนอบบัน

2.1.3 พารามิเตอร์และตัวแปรในการออกแบบ

พารามิเตอร์และตัวแปรค่าๆ ที่จะใช้ในการออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักต่ำสุดนั้นจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 2 ลักษณะการพันของขดลวดแบบแนวนิวชิ



รูปที่ 3 การพันของขดลวดแบบแนวนิวชิ

จากการที่ 1 พารามิเตอร์และตัวแปรเหล่านี้ จะนำไปใช้ในการสร้างสมการเป้าหมาย (objective) ซึ่งเป็นสมการนำหน้ากองของหน้าแปลงและสมการเงื่อนไข (constraint) โดยที่พารามิเตอร์ที่กำหนดให้เป็นตัวแปรนี้ทั้งหมด 9 ตัวคือ E , a , g , N_p , N_s , N_b , d_p , d_s และ d_b พารามิเตอร์นอกจากที่กล่าวมาที่จะเป็นค่าคงที่ที่ผู้ออกแบบสามารถกำหนดขึ้นเองหรือปีกคู่ได้จาก specification ของผู้ผลิต ให้เข้าใจสาระ

2.2 สมการของการออกแบบหน้าแปลงความถี่สูง

2.2.1 สมการเป้าหมาย

ในการพิจารณานำหน้ากองของส่วนต่างๆ ของโครงสร้างหน้าแปลงความถี่สูงสามารถจำแนกได้เป็นดังนี้

1. นำหน้ากองของแกนเพอร์วิตซ์สามารถประมาณได้จากสมการที่ 3

$$W_c = 2EDD_c[2b + 2a + (2b - g) + 4E] \times 1000 \quad (3)$$

และจากสมการที่ 1 และ 2 นั้นคือค่า D และ b จะมีความสัมพันธ์กับ E และ a ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ SMPS

ชนิด FLY-BACK

Symbols	Description	Value	Unit
D_c	Core density	4.9×10^6	kg/mm ³
D_{wp}	Primary winding density	18.9×10^{-6}	kg/mm ³
D_{ws}	Secondary winding density	18.9×10^{-6}	kg/mm ³
D_{wb}	Bias winding density	18.9×10^{-6}	kg/mm ³
E	Half of center leg width	variable	mm
a	Window width	variable	mm
K_l	Core leg aspect ratio	1.209	-
K_2	Window aspect ratio	3.574	-
g	Air gap length	variable	mm
W_{bob}	Bobbin thickness	1	mm
W_{ins}	Insulation thickness	0.5	mm
N_p	Primary turns	variable	turns
N_s	Secondary turns	variable	turns
N_b	Bias turns	variable	turns
d_p	Primary winding diameter	variable	mm
d_s	Secondary winding diameter	variable	mm
d_b	Bias winding diameter	variable	mm
N_f	Number of primary parallel winding	2	turns
N_2	Number of secondary parallel winding	2	turns
f	Frequency	35000	Hz
V_o	Output voltage	24	V
$I_{o(max)}$	Maximum output current	4	A
D_{max}	Maximum duty cycle	0.5	-
$V_{in(min)}$	Minimum input voltage	144.25	V
$V_{in(max)}$	Maximum input voltage	195.16	V
μ_i	Initial permeability	2500	-
$V_{d(max)}$	Maximum dropout voltage across diode	1	V
$B_{m(Limit)}$	Maximum flux density	3800	Gauss
V_b	Bias voltage	10	V
C_{rep}	Safety creepage distance	4	mm
$V_{DS(max)}$	Maximum Drain-Source voltage	1000	V

2. นำหนักของคลัวค primary จากลักษณะการพันที่เป็นแบบ แขนงวิช นั้นคือ ชด primary จะพันไปรอบก้นชด secondary ด้านบนและ ด้านล่าง ทำให้การพิจารณานำหนักของคลัวค primary ชุดแรกที่ถูกพัน ลงไปประจำหนักได้จาก

$$W_{p1} = N_1 \times D_{wp} \times MLT_{p1} \times \frac{N_p}{2} \times A_{wp} \quad (4)$$

โดยที่ MLT_{p1} คือ ความยาวเฉลี่ยของคลัวคที่พันรอบแกน 1 รอบ ของ คลัวคชุดแรก ซึ่งจะหาได้จาก

$$MLT_{p1} = C_{bob} + \pi \cdot d_p \quad (5)$$

โดยที่ C_{bob} คือ ความยาวของเส้นรอบวงของแกนกลางที่ถูก spanning ด้วย น้ำหนักที่จะใช้ในการพัน นั้นคือ

$$C_{bob} = 2(2E + 2W_{bob}) + 2(D + 2W_{bob}) \quad (6)$$

และ A_{wp} คือ พื้นที่หน้าตัดของคลัวค

ตัวนนักของคลัวคที่สองที่พันลงไปหลังจากหันหน้าตัด ของ หน้าตัดได้จาก

$$W_{p2} = N_1 \times D_{wp} \times MLT_{p2} \times \frac{N_p}{2} \times A_{wp} \quad (7)$$

โดยที่ MLT_{p2} คือ ความยาวเฉลี่ยของคลัวคที่พันรอบแกน 1 รอบของ คลัวคชุดที่สอง หาได้โดย

$$MLT_{p2} = C_{bob} + 2\pi(d_p + 2W_{ins} + d_s + \frac{d_p}{2}) \quad (8)$$

3. นำหนักของคลัวค secondary คำนวณได้จาก

$$W_s = N_2 \times D_{ws} \times MLT_s \times N_s \times A_{ws} \quad (9)$$

โดยที่ MLT_s คือ ความยาวเฉลี่ยของคลัวคที่พันรอบแกน 1 รอบ ของ คลัวค Secondary ซึ่งจะหาได้จาก

$$MLT_s = C_{bob} + 2\pi(d_p + W_{ins} + \frac{d_s}{2}) \quad (10)$$

และ A_{ws} คือ พื้นที่หน้าตัดของคลัวค

4. นำหนักของคลัวค bias ถึงแม้ว่า bias มีจำนวนรอบที่น้อยและมี ขนาดคลัวคที่ไม่ใหญ่เกิน แต่เพื่อเป็นการเพิ่มความแม่นยำให้กับสมการนี้ หนักของหน้าตัดจะเปลี่ยนความถี่สูงซึ่งมีนำหนักของคลัวค bias มาคิดด้วย นั้นคือ

$$W_b = D_{wb} \times MLT_b \times N_b \times A_{wb} \quad (11)$$

โดยที่ MLT_b คือ ความยาวเฉลี่ยของคลัวคที่พันรอบแกน 1 รอบ ของ คลัวค Bias ซึ่งหาได้จาก

$$MLT_b = C_{bob} + 2\pi(d_p + 3W_{ins} + d_s + d_p + \frac{d_b}{2}) \quad (12)$$

และ A_{wb} คือ พื้นที่หน้าตัดของคลัวค

นอกจากสมการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ก็อาจรวมถึงนำหนักของ ส่วนประกอบอื่นๆ ที่เหลืออีก เช่น นำหนักของเทปปิดนิรภัย ซึ่งในบทความ นี้ จะถือว่าไม่มีผลต่อน้ำหนักโดยรวมของหน้าตัดจะเปลี่ยนความถี่สูงแต่ถ้า ใจ และเมื่อรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกันก็จะกล่าวเป็นสมการนำหนัก ของหน้าตัดจะเปลี่ยนความถี่สูงซึ่งเป็นพังค์ชันของคัวแปร 9 ตัว ดังนี้

$$W_{trans} = W_c + W_{p1} + W_{p2} + W_s + W_b \quad (13)$$

2.2.2 สมการเมื่อ้อนไฟ

การออกแบบหน้าแปลงความถี่สูงให้มีหน้าบักน้อยที่สุดนั้นจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้ ที่กำหนดเพื่อให้หน้าแปลงมีการทำงานที่ถูกต้องและมีความเป็นไปได้ในการสร้างจริง ซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้ ดังต่อไปนี้

1. ค่า primary inductance เมื่อจากพลังงานที่ถูกดึงมาจากหัวแม่ตัวนัน secondary จะถูกสะท้อนอยู่ในรูปพลังงานแม่เหล็กที่ของ primary ซึ่งมีผลต่อค่า inductance ของชุด primary ดังนั้นค่า inductance จะหาได้จาก

$$L_p \leq \frac{|V_{in}(\min)| D_{\max}|^2}{2.4 \times f \times V_o I_o(\max)} \quad (14)$$

โดยที่ L_p คือ ค่า primary Inductance โดยคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$L_p = N_p^2 \times AL \times 10^{-9} \quad (15)$$

ค่า AL คือค่า core factor ซึ่งประมาณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$AL = \frac{1.257 A_e}{l_{av}} \cdot \frac{\mu_i}{1 + \frac{g\mu_i}{l_{av}}} \quad (16)$$

ค่า l_{av} คือความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็ก

2. อัตราส่วน N_p / N_s ที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าเวลาในการ ON และ OFF ของกระแสที่ของ primary และ secondary เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ความถี่ใช้งานของ SMPS จึงจำเป็นต้องกำหนดอัตราส่วน N_p / N_s ให้เหมาะสม ดังนี้

$$\frac{N_p}{N_s} \geq \frac{D_{\max} V_{in}(\min)}{(V_d(\max) + V_o)(0.8 - D_{\max})} \quad (17)$$

3. อัตราส่วน N_p / N_s สูงสุด ในระหว่างที่ primary OFF และ secondary ON จะเกิดแรงดันสะท้อนมาข้างชุด Primary ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันคงคล่องที่ตัว MOSFET ในปริมาณที่สูง ซึ่งค่าแรงดันนี้จะมีผลมาจากการอัตราส่วน N_p / N_s จึงจำเป็นที่จะต้องจำกัดแรงดันสะท้อนนี้ไม่ให้มีค่าเกินกว่าพิกัดทวนแรงดันของ MOSFET ซึ่งจะหาได้จาก

$$\frac{N_p}{N_s} \leq \frac{V_{DS}(\max) - V_{in}(\max) - 0.3 V_{DS}(\max)}{(V_d(\max) + V_o)} \quad (18)$$

4. ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในแกน เพื่อป้องกันการอั่มคัวที่จะเกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะหน้าแปลงความถี่สูงซึ่งกำลังสูงสุดจะต้องมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดที่ผู้ผลิตกำหนดมาโดยจะหาได้จาก

$$B_m(Limit) \geq \frac{V_{in}(\min) D_{\max} \times 10^4}{A_e N_p f \times 10^{-6}} \quad (19)$$

5. พื้นที่ในการพับขดลวด จากรูปที่ 2 ในการพับขดลวดซึ่งเป็นจะต้องมีที่ว่างเพียงพอที่จะพับขดลวดให้เข้มรอบที่กำหนดให้ออกจากในบนบันทึก และซ่องพับขดลวดของแกนเฟอร์ไรต์พอดี ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนว คือ แนวตั้ง (vertical) และแนวนอน (horizontal) โดยหาได้จาก

$$\text{แนวตั้ง : } 2d_p + d_s + d_b + 4W_{ins} \leq a - W_{bob} \quad (20)$$

$$\text{แนวนอน : } \frac{N_1 N_p d_p}{2} \leq a K_2 - 2W_{bob} - 2C_{rep} \quad (21)$$

$$\text{และ } N_2 N_s d_s \leq a K_2 - 2W_{bob} - 2C_{rep} \quad (22)$$

สำหรับเงื่อนไขของพื้นที่สำหรับพับขดลวดนั้น จะถือว่าขดลวดมีความหนาของฉนวนรอบขดลวดค่ามากเมื่อเทียบกับพื้นที่ที่เป็นทองแดงจนสามารถจะตั้งไว้ได้

6. ขนาดขดลวดที่ใช้ในการพับที่เหมาะสมในการรองรับกระแสที่ไหลในชุด primary และ secondary ซึ่งสามารถกำหนดให้ออกสู่ในเกณฑ์ของ circular mils per amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าผูกพันของค่าความหนาแน่นกระแส current density ค่าของ CMA ที่เหมาะสมของชุด primary และ secondary สามารถหาได้ดังนี้

$$200 \leq CMA_p \leq 500 , \quad 200 \leq CMA_s \leq 500 \quad (23)$$

ซึ่ง CMA_p และ CMA_s เป็นค่า CMA ของชุด primary และ secondary ตามลำดับ โดยหาได้จาก

$$CMA_p = \frac{N_1 d_p^2}{I_{p(\max)rms}} \times \left(\frac{1000}{25.4} \right)^2 \quad (24)$$

$$CMA_s = \frac{N_2 d_s^2}{I_{s(\max)rms}} \times \left(\frac{1000}{25.4} \right)^2 \quad (25)$$

โดยที่ $I_{p(\max)rms}$ และ $I_{s(\max)rms}$ หาได้จาก

$$I_{p(\max)rms} = \frac{V_{in}(\min) D_{\max} \sqrt{D_{\max}}}{\sqrt{3} L_p f} \quad (26)$$

$$I_{s(\max)rms} = \frac{N_p}{N_s} \cdot I_{p(\max)rms} \quad (27)$$

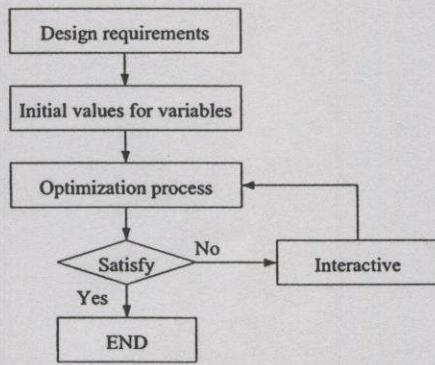
7. จำนวนวนรอบของชุด bias แรงดันที่เป็น bias ให้กับวงจรควบคุมของ SMPS จะได้มาจากการ bias โดยที่จำนวนวนรอบของชุด bias จะเป็นตัวกำหนดแรงดันคงคล่องกล่าว ซึ่งสามารถคำนวณจำนวนวนรอบได้ดังนี้

$$N_b \geq \frac{V_b N_s}{(V_d(\max) + V_o)} \quad (28)$$

8. ขอบเขตของคัวแปรในการออกแบบ เพื่อป้องกันภัยของคัวแปรหลังจากกระบวนการหาราคาที่เหมาะสมไม่ให้มีค่าเกินหรือต่ำกว่าความเป็นจริง จึงต้องกำหนดขอบเขตให้กับคัวแปรต่าง ๆ ด้วย

3. ขั้นตอนในการออกแบบหน้าแปลงความต้องสูง

จากสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมดที่กล่าวมาทั้งด้านจะถูกนำไปสร้างเป็นกระบวนการหาราคาที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MATLAB ขั้นตอนในการออกแบบหน้าแปลงความต้องสูงให้มีหน้าหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการออกแบบหน้าแปลงความต้องสูงให้มีหน้าหนักน้อยที่สุด

ข้อมูลอินพุททั้งหมดของโปรแกรมจะเป็น Design requirement จากนั้นจะเป็นขั้นตอนที่การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับคัวแปรทั้งหมดเพื่อนำไปสู่กระบวนการหาราคาที่เหมาะสม ต่อจากนั้นผลลัพธ์ของคัวแปรที่ได้จะถูกพิจารณาว่าสามารถนำไปสร้างจริงได้หรือไม่โดยพิจารณาว่า มิติของแกน คือ E , a ที่ได้มีอยู่จริงใน Data sheet ของผู้ผลิตเกณฑ์ฟอร์เร็ต หรือไม่ จำนวนรอบ N_p , N_s และ N_b เป็นเลขจำนวนเต็มหรือไม่ และขนาดลวด d_p , d_s และ d_b มีอยู่จริงในตารางขนาดหรือไม่ ซึ่งถ้าหากคัวแปรทั้งหมดเป็นไปตามข้อกำหนดที่กล่าวมา ก็จะทำการจบขั้นตอนการออกแบบหน้าแปลงความต้องสูง แต่ถ้าหากไม่เป็นไปตามข้อกำหนด โปรแกรมจะเข้าสู่ขั้นตอนการปรับค่าคัวแปรในกระบวนการออกแบบซึ่งเรียกว่า ขั้นตอน Interactive ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ปีกโอกาสให้ผู้ออกแบบสามารถที่จะพิจารณาหาอัลกอริズึมในการปรับค่าคัวแปรต่าง ๆ เพื่อที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ในขั้นตอนนี้ค่าคัวแปรที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติจะถูกปรับไปสู่ค่าใหม่ที่ใกล้เคียงค่าเดิมที่สามารถสร้างได้จริง หลังจากนั้นจะกลับเข้าสู่กระบวนการหาราคาที่เหมาะสมอีกครั้ง เพื่อให้คัวแปรที่เหลืออยู่บางส่วนได้ค่าที่เหมาะสมใหม่ และทำการปรับค่าคัวแปรใหม่ที่ได้ไปสู่ค่าใหม่ที่ใกล้เคียงซึ่งใช้การพิจารณาในลักษณะเดียวกันกับขั้นตอนขั้นตอนการปรับค่าคัวแปรทั้งหมดให้มีค่าที่เป็นไปได้ ซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างที่ทำให้หน้าแปลงความต้องสูงมีหน้าหนักน้อยที่สุดโดยยังคงอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

4. การออกแบบหน้าแปลงความต้องสูง

ในบทนี้จะนำเสนองานออกแบบหน้าแปลงความต้องสูงสำหรับ SMPS ที่มี Design requirements ดังตารางที่ 1 หลังจากที่ผ่านขั้นตอนของกระบวนการหาราคาที่เหมาะสมในรอบแรก (Loop 1) จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอน Interactive ที่เริ่มจากการปรับราค่า E , a ใหม่ (Loop 2) การปรับราค่า N_p , N_s ใหม่ (Loop 3) และการปรับราค่า d_p , d_s ใหม่ (Final loop) ค่าผลลัพธ์ของคัวแปรที่ได้จะเป็นค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ค่าคัวแปรที่ได้ในแต่ละรอบของกระบวนการออกแบบ โดยใช้แกนของผู้ผลิต Kawatetsu [6]

Variables	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Final
E (mm)	3.5518	5*	5*	5*
a (mm)	10.0216	7.25*	7.25*	7.25*
g (mm)	0.8985	0.5325	0.5491	0.6256
K_1	1.209	1*	1*	1*
K_2	3.574	4.938*	4.938*	4.938*
N_p (turns)	88.8763	54.2211	55*	55*
N_s (turns)	9.2433	5.6391	5*	5*
N_b (turns)	3.6973	2.2556	2	2
d_p (mm)	0.2905	0.2905	0.2905	0.32*
d_s (mm)	0.9007	0.9007	0.9634	1.024*
d_b (mm)	0.0503	0.0503	0.0503	0.0503
W_{trans} (g)	52.41	66.8918	67.1551	69.8871

* Interactive value

ตารางที่ 3 ค่าคัวแปรที่ได้ในแต่ละรอบของกระบวนการออกแบบ โดยใช้แกนของผู้ผลิต Philips [7]

Variables	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Final
E (mm)	3.7974	5.1*	5.1*	5.1*
a (mm)	10.7651	7.15*	7.15*	7.15*
g (mm)	1	0.434	0.4467	0.5521
K_1	1.253	1.52*	1.52*	1.52*
K_2	3.26	4.406*	4.406*	4.406*
N_p (turns)	86.3876	39.4815	40*	40*
N_s (turns)	8.9845	4.1062	4*	4*
N_b (turns)	3.5938	1.6425	2*	2*
d_p (mm)	0.2905	0.2905	0.2905	0.32*
d_s (mm)	0.9007	0.9007	0.9186	1.024*
d_b (mm)	0.0503	0.0503	0.0503	0.0503
W_{trans} (g)	59.1643	88.6735	88.8505	91.9709

* Interactive value

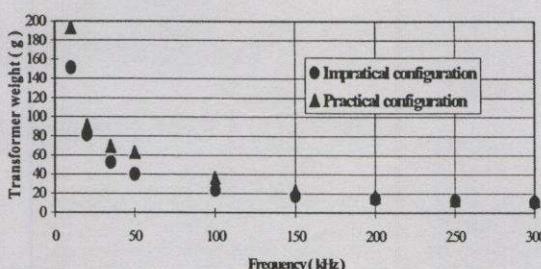
จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าของ E , a ซึ่งเป็นมิติของแกนฟอร์เร็ต หรือไม่มีอยู่จริงใน Data sheet ของผู้ผลิต จำนวนรอบ N_p , N_s และ N_b ไม่เป็นจำนวนเต็ม และ d_p , d_s ไม่มีอยู่จริงในตารางขนาด ส่วนค่า g และ d_b สามารถพิจารณาโดยการใช้สมการที่ 16 และ 28 คำนวณ จากการ

พิจารณาผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้ในรอบแรกซึ่งมีค่าที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ (impractical configuration) จะน้ำหนักรวมของหม้อแปลงเท่ากับ 52.4 g ฉะนั้นได้ว่าจำเป็นต้องมีการปรับค่าตัวแปรใหม่ซึ่งค่าที่ควรปรับเป็นอันดับแรกก็คือ ค่าของ E และ a เพราะจะมีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงมากที่สุด และมีความแปรผันมากที่สุด จากผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้หลังจากกระบวนการบรรบัดที่สอง ค่าของ N_p , N_s และ N_b จะเปลี่ยนไปตามลักษณะของแกนที่เหมาะสมกับแกนที่มีอยู่จริง ใน Data sheet และเมื่อพิจารณาให้น้ำหนักรวมของหม้อแปลงจะเห็นได้ว่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็น 66.9 g ดังนั้นตัวแปรที่ควรจะปรับต่อไปคือ N_p และ N_s หลังจากขั้นตอนนี้จะเห็นได้ว่าน้ำหนักรวมของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 67.2 g ในขั้นตอนสุดท้าย (final loop) ตัวแปรที่ควรจะปรับต่อไปคือ d_p และ d_s ซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างสุดท้ายที่เป็นไปได้ทางปฏิบัติ (practical configuration) น้ำหนักรวมของหม้อแปลงที่ได้จะเพิ่มขึ้นเป็น 69.9 g ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ต้องห้ามที่สุดที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

จากการวิจัยพบว่าในขั้นตอน Interactive จะต้องมีการปรับค่าของ E และ a ซึ่งอาจจะมีได้หลาย ๆ ขนาดขึ้นอยู่กับข้อมูลของผู้ผลิตแกน ดังนั้นในตารางที่ 4 จะแสดงให้เห็นว่าวิธีที่น่าสนใจนี้จะทำให้ได้ค่าน้ำหนักรวมของหม้อแปลงที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการเลือกขนาดแกนที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ตั้งของวิธีสามารถได้โครงสร้างที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่า W_{trans} (g) ที่ได้จากวิธีที่น่าสนใจกับการเลือกขนาดแกนที่ใกล้เคียงกันโดยใช้เกณฑ์ของผู้ผลิต Kawatetsu [2]

f kHz	Proposed		Trial	
	Core type	Weight	Core type	Weight
10	EE-50B	193.3845	EE-55	249.4171
20	EE-33B	91.1356	EE-40B	105.9934
35	EE-35B	69.8871	EE-35C	76.5334
50	EE-40B	63.2871	EE-35B	65.0317
100	EE-28	35.8406	EE-35A	40.9813
150	EE-30L	22.6384	EE-28R	27.0311
200	EE-22B	16.6353	EE-25.4B	20.4899
250	EE-19B	13.7005	EE-25.4B	19.419
300	EE-19B	12.4303	EE-25.4B	19.0306



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของความถี่และน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง

5. บทสรุป

บทความนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดโดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมร่วมกับการใช้อลอกอธินที่ผู้ออกแบบสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ จะเห็นได้ว่าในระหว่างขั้นตอนต่าง ๆ จำเป็นต้องมีการปรับค่าตัวแปรใหม่ซึ่งค่าที่ควรปรับเป็นอันดับแรกก็คือ ค่าของ E และ a เพราะจะมีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงมากที่สุด และมีความแปรผันมากที่สุด จากตารางที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่าในการออกแบบหัววิชีที่น่าสนใจนี้ เมื่อเลือกแกนของ Kawatetsu และ Philips ก็สามารถที่จะได้โครงสร้างหม้อแปลงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด และมีค่าที่น้ำหนักที่สูง ในการปฎิบัติได้เริ่มเดียวกัน แต่อาจจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของแกนที่ถูกกำหนดโดยผู้ผลิตแต่ละราย และจากผลที่ได้จากการออกแบบนี้จะสามารถนำไปใช้ศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมเช่น ค่าความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟสวิตซ์ จากกรุ๊ปที่ 5 จะเห็นได้ว่าความถี่ใช้งานที่สูงขึ้นจะสามารถลดน้ำหนักหม้อแปลงลงได้อย่างไรก็ตามจะพบว่าที่ความถี่ที่สูง (150-300 kHz) นั้นมีความถี่ใช้งานจะเพิ่มขึ้นก็จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหม้อแปลงไม่นักนัก

เอกสารอ้างอิง

- R. Petkov, "Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer," in *IEEE Transactions On Power Electronics Vol. 1*, January 1996, pp. 33-42.
- Raymond B. Ridley, Chen Zhou, and Fred C. Y. Lee, "Application of Nonlinear Design Optimization for Power Converter Components," *IEEE Transactions On Power Electronics Vol. 5, No. 1*, January 1990, pp. 29-40.
- T. Coleman, M. A. Branch and A. Grace, "Optimization Toolbox : For Use with MATLAB" User's Guide Version 2, 1999.
- Data Book and Design Guide, "TOPSwitch Flyback Design Methodology Application Note AN-16"*, Power Integrations, Inc., 1996-97, pp. 82-111.
- ศุภวนิ ศรี, "เทคนิคและการออกแบบสวิตซ์เพาเวอร์ชัพพลาย," เอกอัสดิ์ไทย, กรุงเทพมหานคร, 2 มิถุนายน 2538.
- Ferrite Cores for Power Supply EMI Prevention / EMC & Pulse Transformer*, Kawatetsu Ferrite Corporation, 1999.
- Data Handbook MA01 Soft Ferrites*, Philips Components, 1996.

ประวัติผู้เขียน

นายอภิวุฒิ คำนวนกิจ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2541 เริ่มเข้าสู่วงการออกแบบและพัฒนาแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ในเชิงอุตสาหกรรมหลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี เกษียร์ได้รับการฝึกอบรมที่บริษัท Tabuchi Electronics Industry Co.,Ltd. ที่ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2541, พ.ศ. 2542 และ พ.ศ. 2543

มีผลงานวิจัยทางวิชาการทางด้านการออกแบบหน้าแดปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเทคนิคการทำค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข ซึ่งได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 ประจำปี พ.ศ. 2544

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรฝ่ายออกแบบและพัฒนา บริษัท Thai Tabuchi Electric Co.,Ltd