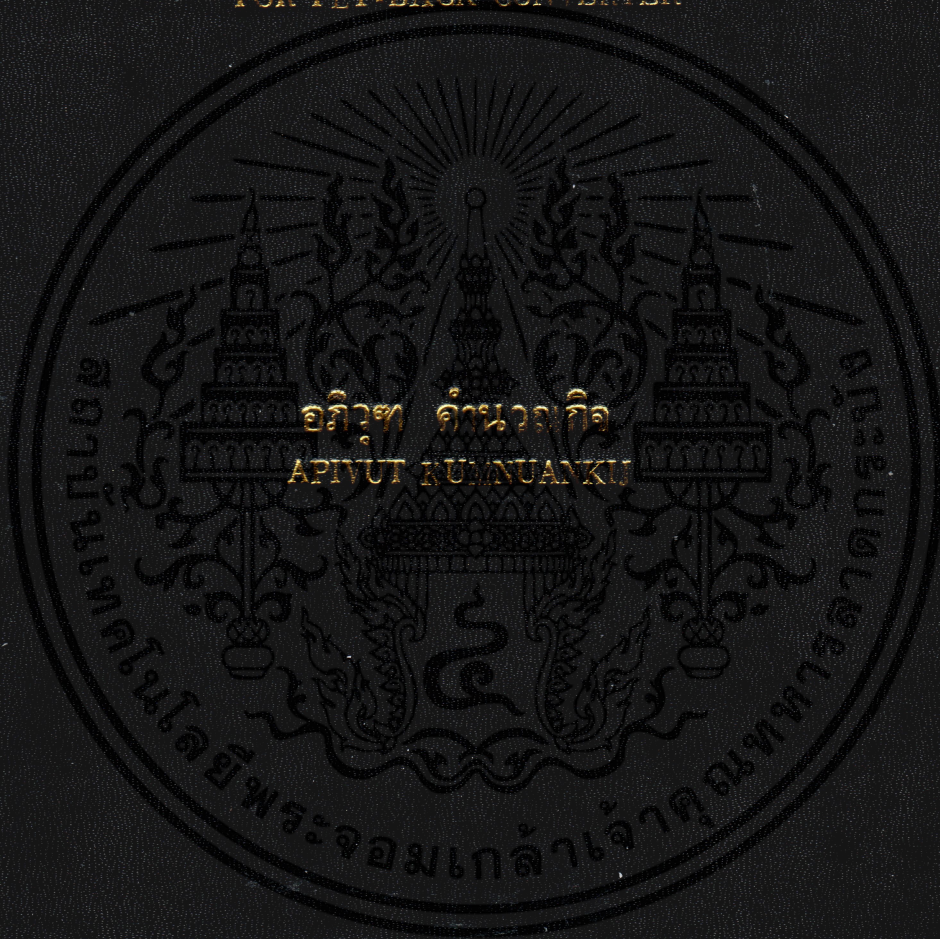


การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด
FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

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



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-921-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบห่อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด
FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

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



อภิวุฒ กำนวนกิจ

APIVUT KUMNUANKIJ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....47521.....
วัน, เดือน, ปี 19 ส.ค. 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อ พ.ศ. 2545 ง่ายถึงเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-648-921-6

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



**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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2002
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ISBN 974-648-921-6




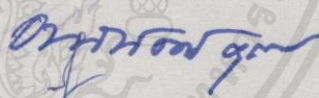


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
COPYRIGHT 2002
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

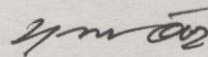
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด
MINIMUM WEIGHT DESIGN OF HIGH-FREQUENCY TRANSFORMER FOR FLY-BACK CONVERTER

ชื่อนักศึกษา นายอภิภูท คำนวนกิจ
รหัสประจำตัว 41061052
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชัชวดี นัทรอุทัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.พิชิต	ลำยอง	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
ดร.อานันท์วัฒน์	คุณากร	
ผศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์	ชันเงิน	
ผศ.ดร.ชัชวดี	นัทรอุทัย	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 พฤษภาคม 2545 เวลา 14.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อดิษฐ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่... 16 ...เดือน... สิงหาคม ... พ.ศ. 2545
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้กับคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข ร่วมกับการใช้อัลกอริทึมที่ผู้ออกแบบสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ตัวแปรในการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักหม้อแปลงเป็นค่ามิติของแกนเฟอร์ไรต์ (แบบ EE), ระยะช่องอากาศ, จำนวนรอบในการพันขดลวด, ขนาดของขดลวด และค่ากระแสสูงสุดทางด้านปฐมภูมิ ในงานวิจัยนี้มิได้ศึกษาถึงผลของค่าความสูญเสียของหม้อแปลงความถี่สูงโดยตรง แต่จะทำการกำหนดค่าเพื่อสำหรับการออกแบบที่เหมาะสม งานวิจัยนี้นำเสนอผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิดซิ่งที่มีขนาดแรงดันและกระแสขาออก 5 V / 1.2 A, 12 V / 2 A และ 24 V / 4 A ซึ่งมีความถี่ใช้งานอยู่ที่ 40 kHz, 60 kHz และ 100 kHz ตามลำดับ โครงสร้างหม้อแปลงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุดซึ่งได้จากวิธีที่นำเสนอนี้จะมีค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ และจากผลที่ได้จากการออกแบบนี้สามารถนำไปใช้ศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมนั่นคือ ค่าความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟสวิดซิ่ง และค่าพิกัดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบคุณ ผ.ศ. ดร. ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการดำเนินงานวิจัย และการแก้ไขอุปสรรคที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ช่วยเหลือการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทความรู้ให้แก่ผู้วิจัย อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ ตลอดจนบิดา มารดาของผู้ทำวิจัยที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยตลอดมา

อภิวุฑ์ คำนวนกิจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 หม้อแปลงความถี่สูง.....	6
2.1 คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK.....	6
2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูงและคำจำกัดความ.....	8
2.2.1 โครงสร้างของแกน.....	8
2.2.2 โครงสร้างการพันของขดลวด.....	9
2.3 พารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง.....	11
บทที่ 3 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด.....	13
3.1 หลักการของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขเบื้องต้น.....	13
3.2 สมการเป้าหมายของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง.....	14
3.2.1 น้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์.....	14
3.2.2 น้ำหนักของขดลวด Primary.....	14
3.2.3 น้ำหนักของขดลวด Secondary.....	15
3.2.4 น้ำหนักของขดลวดไบอัส.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 สมการเงื่อนไขต่างๆ และขอบเขตของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง.....	17
3.3.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด Primary.....	17
3.3.2 คาบเวลาในการ On และ Off ที่เหมาะสม.....	18
3.3.3 แรงดันตกคร่อมสูงสุดที่ขา 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 เอ็มไฟล์ฟังก์ชันและสมการเป้าหมาย (Objective Function).....	34
3.6.2 เอ็มไฟล์ฟังก์ชันและสมการเงื่อนไข (Constraints Function).....	34
3.6.3 เอ็มไฟล์ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ.....	34
3.6.4 เอ็มไฟล์ฐานข้อมูลของแกนเฟอร์ไรต์.....	34
3.6.5 เอ็มไฟล์ฐานข้อมูลของลวดทองแดงชนิดต่างๆ.....	35
3.6.6 เอ็มไฟล์ชุดคำสั่งในการวิเคราะห์และแสดงผลการออกแบบ.....	35
บทที่ 4 ตัวอย่างการออกแบบและการทดลอง.....	36
4.1 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูง.....	36
4.1.1 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ขนาด 12 V / 2 A.....	36
4.1.2 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ขนาด 5 V / 1.2 A.....	36
4.1.3 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ขนาด 24 V / 4 A.....	36
4.2 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ขนาด 12 V / 2 A.....	37
4.2.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป.....	40
4.2.2 การออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A.....	59
4.3.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป.....	61
4.3.2 การออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	62
4.4 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A.....	66
4.4.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป.....	68
4.4.2 การออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ.....	68
4.5 การลดน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อม.....	73
4.5.1 ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง.....	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 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK.....	87
ภาคผนวก ข วงจรที่ใช้ในการทดสอบหม้อแปลงความถี่สูง.....	98
ภาคผนวก ค ทฤษฎีการออกแบบด้วยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม.....	100
ภาคผนวก ง ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบ สวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่ความถี่ค่าต่างๆ.....	106
เอกสารนี้ ภาคผนวก จ ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก สวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่พิกัดฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดค่าต่างๆ.....	108
ภาคผนวก ฉ ตารางแกนเฟอร์ไรต์ของผู้ผลิต.....	110

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ช ตารางขดลวดแต่ละชนิด.....	114
ภาคผนวก ซ วิธีการวัดกำลังงานโดยหาค่าเฉลี่ยรูปคลื่นกำลังงาน.....	117
ภาคผนวก ฉ ผลการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของดินแบบหม้อแปลงความถี่สูง ทั้ง 3 ตัว.....	120
ภาคผนวก ญ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	133



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร).....	37
4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A โดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation).....	45
4.3 ค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A.....	46
4.4 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบแรก (Loop 1).....	48
4.5 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่ 2 (Loop 2).....	50
4.6 น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A โดยโครงสร้างของแกนขนาดต่างๆ.....	50
4.7 ผลลัพธ์ของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่ 3 ที่ได้จากจำนวนรอบในกรณีต่างๆกัน.....	51
4.8 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่ 3 (Loop 3).....	53
4.9 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4).....	55
4.10 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คือน้ำหนักของ W_{bob} และ etc.).....	56
4.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ขณะจ่าย Load 2A.....	56
4.12 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร).....	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A โดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation).....	61
4.14 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4).....	62
4.15 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ขนาด 5 V / 1.2 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คิดน้ำหนักของ W_{bob} และ etc.).....	63
4.16 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ขนาด 5 V / 1.2 A ขณะจ่าย Load 1.2 A.....	64
4.17 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่ง จ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A (เครื่องหมาย * แสดงถึงตัวแปร).....	66
4.18 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A โดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation).....	68
4.19 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4).....	69
4.20 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ขนาด 24 V / 4 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คิดน้ำหนักของ W_{bob} และ etc.).....	70
4.21 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ขนาด 24 V / 4 A ขณะจ่าย Load 4 A.....	70
4.22 ค่าความสูญเสียในแกนของคั่นแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่สร้างขึ้นมาทั้ง 3 ตัว ขณะจ่าย load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าต่ำสุด.....	77
4.23 ค่าความสูญเสียในขดลวดของคั่นแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่สร้างขึ้นมาทั้ง 3 ตัว ขณะจ่าย load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าต่ำสุด.....	77
4.24 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ของคั่นแบบหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัวที่สร้างขึ้นมา ในขณะ จ่าย Load สูงสุด.....	77
4.25 กำลังงานขาเข้าและขาออกของคั่นแบบหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัว ที่สร้างขึ้นมาในขณะที่จ่าย Load สูงสุด.....	79

เอกสารที่สร้างขึ้นมาในขณะที่จ่าย Load สูงสุด. เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในโปรแกรมให้โปรแกรมเมอร์คำนวณค่า
ไปว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
5.1	เปรียบเทียบน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (Program) และต้นแบบที่สร้างขึ้นจริง (Prototype).....	81
5.2	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (Program) ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) และ รอบสุดท้าย (Loop 4).....	81
5.3	น้ำหนักที่ลดลงของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีทั่วไป (Manual) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่นำเสนอ (Program).....	82
5.4	เปรียบเทียบการออกแบบโดยวิธีทั่วไปและวิธีที่นำเสนอ.....	83
จ.1	ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่ความถี่ค่าต่างๆ.....	107
จ.1	ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่พิกัดพิกัดแม่เหล็กสูงสุดค่าต่างๆ.....	109
ฉ.1	ตารางแกนเฟอร์ไรต์ของผู้ผลิต EPCOS.....	111
ฉ.2	ตารางแกนเฟอร์ไรต์ของผู้ผลิต KAWATETSU.....	112
ช.1	ตารางขดลวดแต่ละชนิด.....	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย.....	5
2.1 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK.....	7
2.2 ย่านพิกัดกำลังขาออกและ โวลต์เตจของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK เมื่อเทียบกับคอนเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆ.....	7
2.3 มิติโครงสร้างของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE.....	8
2.4 ลักษณะการพันขดลวดแบบแซนวิช.....	10
2.5 การพันขดลวดแบบขนานกัน.....	10
2.6 การพันขดลวดในกรณีที่มีหลายเลเยอร์ (Layer).....	10
3.1 คาบเวลาการทำงานในแบบ CCM.....	19
3.2 คาบเวลาการทำงานในแบบ DCM.....	19
3.3 ขั้นตอนการออกแบบโดยรวมของระบบที่สร้างขึ้น.....	26
3.4 ขั้นตอนการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นต่างๆ ของแกนและขดลวด.....	27
3.5 ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้งหมด และสมการย่อยต่างๆ 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 ดันแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิงทั้ง 3 ขนาดที่สร้างขึ้น โดยที่ จากทางด้านซ้ายไปขวา จะเป็นขนาด 5 V / 1.2 A, 12 V / 2 A และ 24 V / 4 A ตามลำดับ.....	37
4.2 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ แบบสวิตชิงขนาด 12 V / 2 A ในรอบแรก (Loop 1).....	47
4.3 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ แบบสวิตชิงขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่สอง (Loop 2).....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

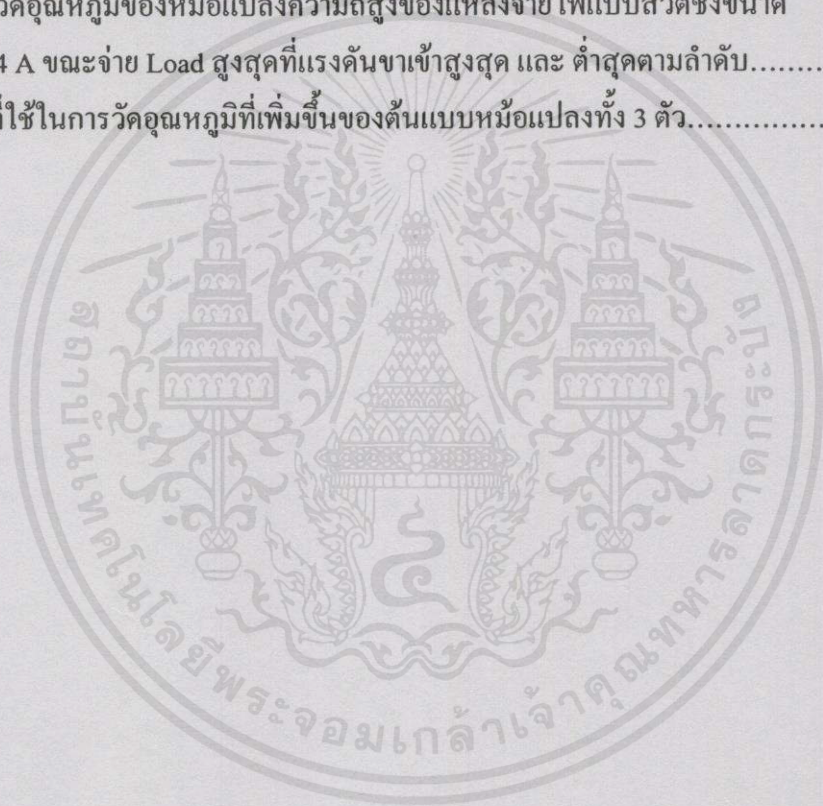
รูปที่	หน้า
4.4 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่สาม (Loop 3).....	52
4.5 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบสุดท้าย (Loop 4).....	54
4.6 ดัชนีแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด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

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ($B_{(max)Limit}$) และ น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (Weight) ของหม้อแปลงความถี่สูง ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซึ่งขนาด 12 V / 2 A.....	76
4.17 ตำแหน่งที่พิจารณากำลังงานขาเข้าหม้อแปลงความถี่สูงและกำลังงานขาออกของ แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้.....	78
ก.1 วงจรพื้นฐานของแหล่งจ่ายไฟแบบลิเนียร์ (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) ทางอุดมคติ.....	92
ก.7 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในโหมดกระแส ต่อเนื่อง (CCM) ทางอุดมคติ.....	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 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม โดยวิธี 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 (บน) และกระแส (ล่าง).....	119
ช.3	รูปคลื่นที่ได้จากผลคูณระหว่างแรงดันกับกระแส.....	119
ฉ.1	ผลการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ขณะจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าสูงสุด และ ต่ำสุดตามลำดับ.....	121
ฉ.2	ผลการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ขณะจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าสูงสุด และ ต่ำสุดตามลำดับ.....	122
ฉ.3	ผลการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A ขณะจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันขาเข้าสูงสุด และ ต่ำสุดตามลำดับ.....	123
ฉ.4	ระบบที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของต้นแบบหม้อแปลงทั้ง 3 ตัว.....	124



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

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

การที่จะได้มาซึ่งเป้าหมายที่ต้องการจึงได้มีการนำเอาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เข้ามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด หรือเพื่อต้องการศึกษาแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่างๆ ว่ามีผลกระทบต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงอย่างไร

สืบเนื่องมาจากการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงโดยทั่วไป ไม่อาจทราบได้ว่า ผลการออกแบบที่จะได้มานั้น มีผลทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงมีค่าน้อยที่สุดด้วยเงื่อนไขที่กำหนดเอาไว้หรือไม่ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบซ้ำแล้วซ้ำอีก ซึ่งจะทำให้สูญเสียเวลาในการออกแบบไปเป็นอย่างมาก แต่ถ้าหากนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขที่สร้างขึ้น โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เข้ามาประยุกต์ใช้ โปรแกรมจะสามารถค้นหาค่าของตัวแปรที่เหมาะสมในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

กระบวนการ Interactive ที่เพิ่มเข้าไปในระบบจะสามารถช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถแก้ไข และกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างอิสระในกรณีที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์อาจไม่เป็นที่น่าพอใจ เช่น ค่าที่ได้อาจไม่มีขายอยู่จริงในท้องตลาด ก็จำเป็นต้องปรับปรุงค่าพารามิเตอร์โดยผู้ออกแบบเอง

โปรแกรมดังกล่าวยังสามารถทำให้ผู้ออกแบบทราบถึงแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อม โดยสามารถลดเวลาในการวิเคราะห์หลังได้ ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อมเช่นความถี่ และ

พิถีพิถันความหนาแน่นพลาสมาแม่เหล็กสูงสุด โดยจะสามารถทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงได้เช่นกัน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยนำหลักการของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข (Numerical Constrained Optimization Techniques) เข้ามาช่วยในการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง โดยตรงซึ่งได้แก่ มิติของแกนเฟอร์ไรต์, ระยะช่องอากาศ, จำนวนรอบในการพันขดลวด, ขนาดของขดลวด และกระแสสูงสุดทางค้ำ Primary ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในด้านน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงสามารถนำไปปรับปรุงพารามิเตอร์ตัวอื่นที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมนั่นคือ การทำงานของ SMPS และค่าพิถีพิถันความหนาแน่นของพลาสมาแม่เหล็กสูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลอย่างไรต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง และค่าใดมีความเหมาะสมที่จะทำให้ผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงมีน้ำหนักน้อยที่สุด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การออกแบบด้วยวิธีเดิมต้องอาศัยความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์ของผู้ออกแบบเป็นอย่างมากในการเลือกใช้วัสดุ, ปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หรือประมาณการอย่างคร่าวๆ จากข้อมูลใน Data Sheet ของผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีอาจให้ผลลัพธ์ของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงหลังจากการออกแบบให้มีค่าน้อยที่สุดได้ จึงแตกต่างจากวิธีที่นำเสนอซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข โดยที่ขั้นตอนดังกล่าวจะมีการวิเคราะห์ว่าตัวแปรแต่ละตัวมีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงแตกต่างกันอย่างไร โดยจะวิเคราะห์แนวโน้มและให้ความสำคัญต่อตัวแปรที่มีผลต่อน้ำหนักมากที่สุดก่อน จากนั้นจะทำการปรับค่าของตัวแปรต่างๆ ให้ได้ผลลัพธ์เป็นน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด ซึ่งถ้าหากได้ผลลัพธ์ในการออกแบบไม่เป็นที่น่าพอใจ หรือค่าที่ได้อาจไม่มีขายอยู่จริงในท้องตลาด ผู้ออกแบบก็สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆ ในขั้นตอน Interactive

นอกจากนี้ขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวมานั้น ได้ถูกสร้างโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีประสิทธิภาพในการคำนวณที่แม่นยำและรวดเร็ว จึงสะดวกต่อผู้ออกแบบในการปรับแต่งพารามิเตอร์บางตัวเพื่อให้ผลการออกแบบดีที่สุดตามที่ผู้ออกแบบต้องการได้ หรือใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาและวิเคราะห์ว่าพารามิเตอร์แต่ละตัวมีผลอย่างไรต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

โครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูงที่มีผลต่อน้ำหนักจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นแกนเฟอร์ไรต์ และส่วนของขดลวดที่ใช้ในการพัน ตัวแปรต่างๆ ที่ประกอบอยู่ในโครงสร้างนี้มีทั้งหมด 7 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ E , g , N_p , N_s , d_p , d_s และ $I_{p(max)}$ จะถูกนำมาสร้างเป็นสมการเป้าหมายที่ป็นน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง จากนั้นจะทำการวิเคราะห์เงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงเช่น ความหนาแน่น ฟลักซ์สูงสุดของแกนเฟอร์ไรต์, จำนวนรอบการที่เหมาะสมของขด Primary และ Secondary เป็นต้น ซึ่งมีทั้งหมด 7 เงื่อนไข

จากนั้นได้มีการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข เข้ามาประยุกต์ใช้ในการปรับค่าตัวแปรที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงทั้งหมด มาทำการหาค่าที่ดีที่สุดที่จะทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงน้อยที่สุดด้วยเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นได้

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

ขั้นตอนดังกล่าวจะถูกนำไปสร้างโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้น้ำหนักน้อยที่สุด และจะยังช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์และศึกษาแนวโน้มของพารามิเตอร์ใดๆ ว่ามีผลกระทบต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงได้อย่างไรอย่างรวดเร็ว

ในปัจจุบันมีโปรแกรมการคำนวณมากมายที่มีความสามารถในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม แต่โดยในหลักการแล้วก็จะมีรูปแบบ และอัลกอริธึม (Algorithm) ที่คล้ายกัน และถึงแม้ว่าในปัจจุบันได้มีอัลกอริธึม ใหม่ ๆ เกิดขึ้นอย่างมากมาย แต่จุดประสงค์ก็เพื่อทำให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้นเท่านั้นเอง จุดประสงค์ของบทความนี้จะไม่ได้เน้นอยู่ที่การอธิบายถึงหลักการของการหาค่าที่เหมาะสมอย่างละเอียด แต่จะเป็นเพียงการแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม กับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์และการออกแบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จะใช้ประโยชน์จาก Optimization Toolbox ของ โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งจะเลือกใช้วิธี SQP (Sequential Quadratic Programming) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข โดยวิธีตรง (Direct Method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีได้คำนึงถึงผลกระทบโดยตรงของค่าความสูญเสียของหม้อแปลงความถี่สูงที่ประกอบไปด้วย ความสูญเสียในแกน และ ความสูญเสียในขดลวด แต่จะทำการกำหนดค่าเพื่อสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมเอาไว้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืนยันว่าหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ จะสามารถจ่ายกำลังงานได้เพียงพอต่อความต้องการของ Load สูงสุดที่ต้องถูกจ่ายโดยแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง

ลักษณะของแกนเฟอร์ไรต์ที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบ EE เนื่องจากแกนลักษณะดังกล่าวมีหลายขนาดให้เลือกอยู่มากมายในท้องตลาด และมีโครงสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับแกนในลักษณะอื่น

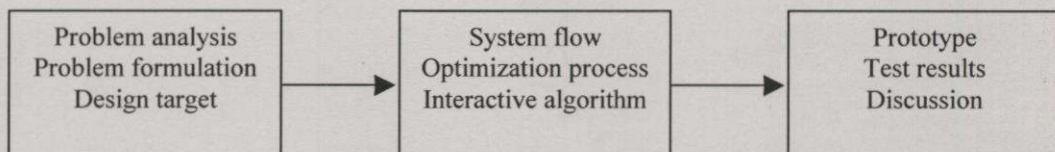
ลักษณะการพันของขดลวดจะเป็นแบบแซนนิช กล่าวคือขดแรกจะเป็นขด Primary ครึ่งหนึ่ง ต่อมาเป็นขด Secondary และตามด้วยขด Primary ที่เหลืออีกครึ่งหนึ่ง และสุดท้ายเป็นขดไบอัสไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุมซึ่งอยู่ทาง Primary ทั้งนี้เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance) ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงความถี่สูง ลักษณะลวดที่ใช้ในการพันจะเป็นลวดตัวนำแบบธรรมดาที่ไม่มีการตีเกลียวของกลุ่มลวดตัวนำขนาดเล็กๆรวมกันอยู่เช่นขดลวดแบบ Litz และขอมให้มีการขนานลวดตัวนำดังกล่าวเพื่อเพิ่มการรองรับกระแสของลวดตัวนำให้มากขึ้นได้ไม่เกินกว่า 3 เส้น

ตัวแปรในการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักหม้อแปลงเป็นค่ามิตติของแกนเฟอร์ไรต์ จำนวนรอบในการพันขดลวด และขนาดของขดลวด โดยนำเสนอผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงที่มีขนาดแรงดันและกระแสขาออก 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 ที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมเช่น ค่าความถี่การทำงานของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิง และค่าพิถีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนเฟอร์ไรต์ และสุดท้าย น้ำหนักของเทปฉนวนจะไม่ถูกนำมาคิดรวมเข้ากับน้ำหนักรวมของหม้อแปลงความถี่สูงแต่อย่างใด

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนของการศึกษาโดยที่สามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนดังรูปที่ 1.1 ซึ่งในส่วนแรกจะมีการวิเคราะห์ถึงปัญหาว่าการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดนั้นจะต้องคำนึงถึงตัวแปรใดบ้าง, การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหา และเป้าหมายของการออกแบบ จากนั้นในส่วนที่สองจะทำการออกแบบ

ขั้นตอนและระบบของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข นอกจากนั้นยังได้เพิ่มขั้นตอนที่ผู้ออกแบบสามารถทำการปรับปรุงและแก้ไขค่าของตัวแปรแต่ละตัวได้ ส่วนสุดท้ายจะมีการสร้างต้นแบบเพื่อทำการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าห้มีผลแปลงความถี่สูงที่ได้ออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอสามารถนำไปสร้างและใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยมีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย

ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งคำจำกัดความของของตัวแปรแต่ละตัวห้มีผลแปลงความถี่สูงที่มีผลต่อน้ำหนัก ซึ่งจะแบ่งเป็นสองส่วน โดยในส่วนแรกจะเป็นการอธิบายถึงแกนเฟอร์ไรต์ และในส่วนที่สองจะเป็นการอธิบายถึงขดลวดที่ใช้พัน

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

ในบทที่ 4 จะเป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองทางกายภาพ และทางไฟฟ้าของห้มีผลแปลงความถี่สูงต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ ซึ่งจะทำการสร้างต้นแบบเป็นห้มีผลแปลงความถี่สูงที่มีพิกัดกำลังงานขาออกต่างกัน 3 แบบด้วยกัน นอกจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่สามารถลดน้ำหนักของห้มีผลแปลงความถี่สูงได้ทางอ้อม รวมทั้งผลของค่าความสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในห้มีผลแปลงความถี่สูงว่ามีผลอย่างไรต่อห้มีผลแปลงความถี่สูงต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นมา

ในบทที่ 5 เป็นการสรุปงานวิจัยทั้งหมดโดยอ้างอิงจากผลการทดลอง, ข้อเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบโดยวิธีทั่วไปและวิธีที่นำเสนอ รวมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หม้อแปลงความถี่สูง

2.1 คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK

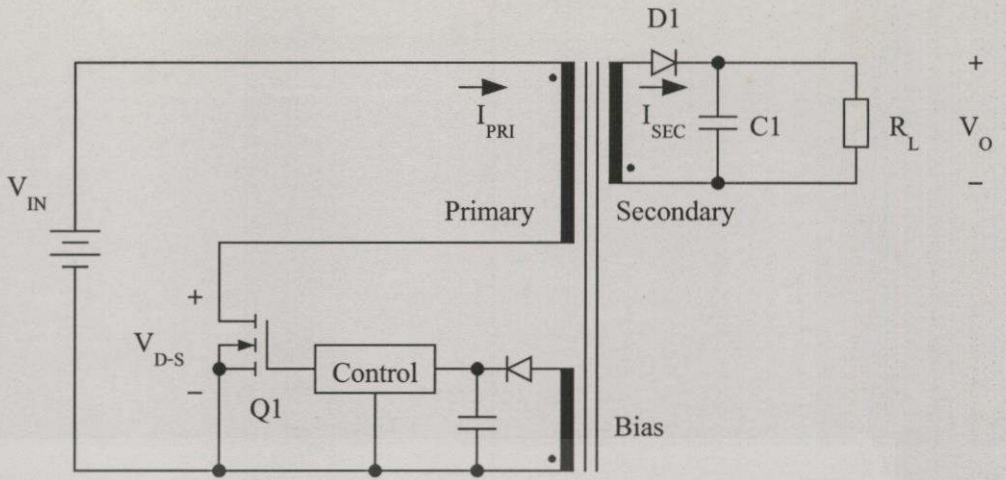
วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK สามารถดูได้จากรูปที่ 2.1 ซึ่งเหมาะกับแหล่งจ่ายไฟที่มีการต่อตรงเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ (Off-Line) และมีการแบ่งแยกออกจากกันทางไฟฟ้า (Isolate) ระหว่าง แหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันขาออกกระแสตรง

นอกจากนี้คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ยังมีจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่น้อย, สามารถต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดันสูงได้หลายระดับ, มีการป้อนกลับของระดับแรงดันขาออกโดยธรรมชาติ, สามารถจ่ายแรงดันขาออกได้ทางเดียว (Single Output) หลายๆค่าในเวลาเดียวกัน (Multiple Output), ระดับแรงดันขาออกที่จ่ายสามารถมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันขาเข้า, และสามารถจ่ายแรงดันขาออกที่เป็นบวกหรือลบก็ได้

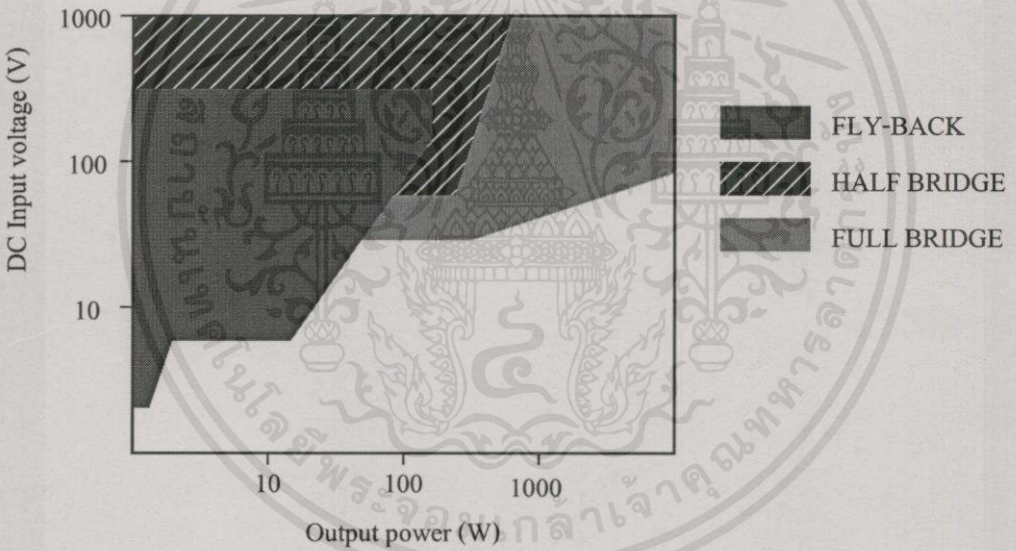
โดยส่วนใหญ่แหล่งจ่ายไฟสวิตซ์ซึ่งมีการต่อตรงเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ (Off-Line) จะต้องทำการแบ่งแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่ทางแหล่งกำเนิดแรงดันสูง (Primary) และแรงดันขาออก (Secondary) ออกจากกันเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยของประเทศนั้นๆหรือของสากลซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้หม้อแปลงในการแปลงระดับแรงดันและแบ่งแยกวงจรทาง Primary และ Secondary ออกจากกัน นอกจากนี้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซึ่งยังต้องการตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เพื่อใช้ในการเก็บสะสมพลังงานและยังเป็นตัวกรองความถี่ต่ำให้ผ่านไป (Low-Pass Filter) ทั้งนี้ก็เพื่อทำการแปลงรูปคลื่นแรงดันที่มีการกระเพื่อม (Pulse Width Modulation) ให้กลายเป็นแรงดันกระแสตรง คอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดีในย่านกำลังงานต่ำ เนื่องจากมีหม้อแปลงซึ่งทำหน้าที่เก็บสะสมพลังงาน, แบ่งแยกวงจรทาง Primary ออกจาก Secondary และแปลงระดับแรงดันได้ภายในหม้อแปลงตัวเดียวกัน

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

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK



รูปที่ 2.2 ย่านพิกัดกำลังขาออกและ โวลต์เตจของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK เมื่อเทียบกับคอนเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆ

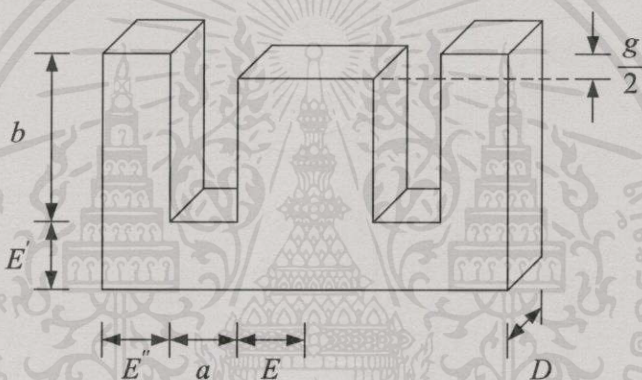
ข้อดีอื่นๆของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ก็คือ แรงดันป้อนกลับ (Feedback Voltage) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันขาออกซึ่งสามารถตรวจสอบระดับแรงดันขาออกนี้ได้โดยตรงจากขดป้อนกลับ (Feedback Winding) ของหม้อแปลง นั่นคือ แรงดันที่อยู่ทางฝั่ง Secondary จะถูกควบคุมโดยแรงดันทางฝั่ง Primary โดยปราศจากการใช้ Photo Coupler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

มีการแยกกันทางไฟฟ้า หรือแม้แต่แรงดันขาออกหลายค่า (Multiple Output) และแรงดันบวกหรือลบก็สามารถใช้ประโยชน์จากการควบคุมทาง Primary ได้เช่นกัน (ภาคผนวก ก)

2.2 โครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูงและคำจำกัดความ

2.2.1 โครงสร้างของแกน

แกนที่นิยมใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ก็คือแกน EE ดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและยังมีหลายขนาดให้เลือกแตกต่างกันไป ซึ่งข้อมูลมิติของโครงสร้างของแกนสามารถพิจารณาได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตแต่ละบริษัท แต่โดยทั่วไปแล้วมิติที่สำคัญของแกนจะมีอยู่ 4 ค่า คือความกว้างครึ่งหนึ่งของขากลาง (E) ความหนาแกนกลาง (D) ความกว้างช่องพันขดลวด (a) และความสูงครึ่งหนึ่งของช่องพันขดลวด (b)



รูปที่ 2.3 มิติโครงสร้างของแกนเฟอร์ไรต์แบบ EE

แต่โดยทั่วไปค่าของ E จะมีความสัมพันธ์กันกับ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่า จำนวนตัวแปรที่แสดงมิติของแกนสามารถลดลงได้โดยอาศัยค่าคงที่ K เพื่อความสะดวกของงานวิจัยนี้ นอกจากจะทำการลดตัวแปร D และ b ลงโดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการข้างต้นแล้ว จะได้มีการทำการลดตัวแปร a, E' และ E'' ลงอีกโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

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

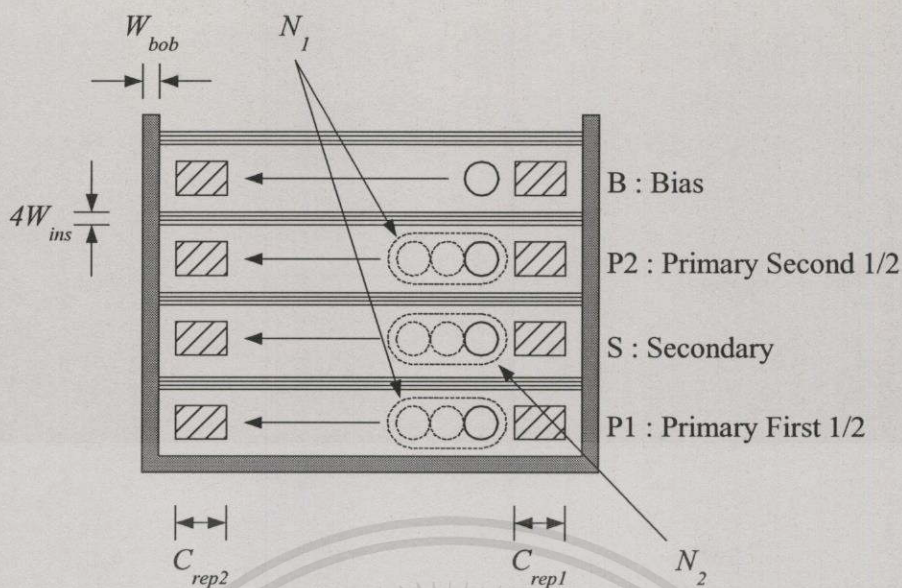
$$E' = EK_4 \quad (2.4)$$

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

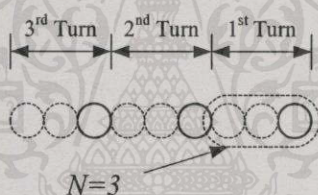
ค่าคงที่ K ใดๆจะอาศัยการคำนวณหาค่าเฉลี่ยจาก Data Sheet ของผู้ผลิตแกนแต่ละราย สำหรับสมการที่ 2.1 ถึง 2.5 จะถูกใช้ในการประมาณค่าของมิติต่างของแกนเฟอร์ไรต์ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดโดยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) เท่านั้น ส่วนกระบวนการในรอบต่อไป จะใช้ค่า ที่มาจาก Data Sheet ของผู้ผลิตแกนแต่ละราย ตามเบอร์ของแกนที่ถูกเลือกภายหลังจากกระบวนการในรอบแรก (Loop 1) เสร็จสิ้น ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้ในหัวข้อที่ 3.4

2.2.2 โครงสร้างการพันของขดลวด

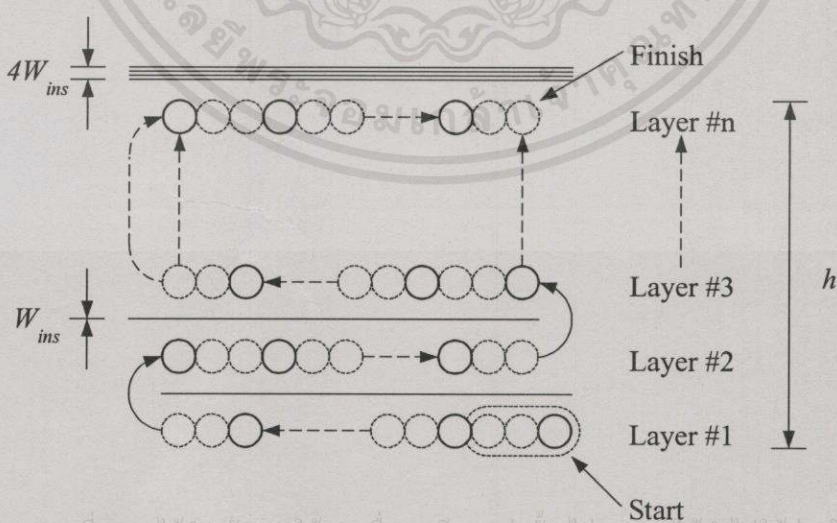
ลักษณะการพันขดลวดในหม้อแปลงความถี่สูงมีอยู่หลายวิธี แต่โดยทั่วไปจะมีลักษณะการพันที่เป็นแบบแซนวิช โดยที่ขดแรกจะเป็นขด Primary ครั้งหนึ่ง (P1) ต่อมาเป็นขด Secondary (S) และตามด้วยขด Primary ที่เหลืออีกครั้งหนึ่ง (P2) และสุดท้ายเป็นขดไบอัส ไฟเลี้ยงให้กับวงจรควบคุมซึ่งอยู่ทาง Primary (B) ดังรูปที่ 2.4 ทั้งนี้เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหล (Leakage Inductance) ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงความถี่สูง ความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ในรูปที่ 2.4 สามารถดูได้จากตารางที่ 2.1 โดยปกติการพันขดลวดที่ดีควรจะพันให้เรียงชิดติดกัน (Perfect Winding) แต่ในทางปฏิบัติ บางครั้งช่องพันขดลวดที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะพันขดลวดให้เต็มพอดีได้ในชั้นนั้นๆ จะใช้ลักษณะการพันแบบมีช่องว่าง (Space Winding) เพื่อให้การคับปลิง (Coupling) ระหว่างขดเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์มากที่สุด นอกจากนี้ในการพันขดลวดเพื่อที่จะลดค่าความต้านทานของลวดทองแดงบางครั้งจำเป็นต้องใช้ลวดทองแดงมาพันขนานกัน แล้วพันให้ได้ครบตามจำนวนรอบนั้น ลักษณะการพันดังกล่าวแสดงได้ในรูปที่ 2.5 การขนานลวดทองแดงมากกว่า 3 เส้น มักไม่นิยมทำกันเพราะจะพันขดลวดได้ลำบากหรืออาจทำให้ขดลวดสูงเกินกว่าที่จะพันบนบอบบิ้น [4, 5]



รูปที่ 2.4 ลักษณะการพันขดลวดแบบแซนวิช



รูปที่ 2.5 การพันลวดแบบขนานกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 การพันขดลวดในกรณีที่มีหลายเลเยอร์ (Layer)

ในงานวิจัยนี้จะอาศัยการพันขดลวดแบบแซนวิชที่เรียงชิดติดกัน (Perfect Winding) และมีการยอมให้มีการพันขดลวดทองแดงแบบขนานกันได้ไม่เกิน 3 เส้น นอกจากนี้ หากการพันขดลวดขดใดที่จำเป็นที่จะต้องมีการพันหลายเลเยอร์ (Layer) ก็จำเป็นที่จะต้องมีการพันเทปฉนวน 1 รอบ กั้นไว้ในแต่ละเลเยอร์ด้วยดังรูปที่ 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) ซึ่งเป็นสมการนำหน้าของหม้อแปลงและสมการเงื่อนไข (Constraint Function) โดยที่พารามิเตอร์ที่กำหนดให้เป็นตัวแปรทั้งหมด 7 ตัวด้วยกัน ได้แก่ E, g, N_p, N_s, d_p, d_s และ $I_{p(max)}$ ส่วนพารามิเตอร์ที่นอกเหนือจากที่กล่าวมา ก็จะเป็นค่าคงที่ที่ผู้ออกแบบสามารถกำหนดขึ้นเองหรือเปิดดูได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตแต่ละราย ได้อย่างอิสระ

บทที่ 3

การออกแบบหาค่าที่เปลี่ยนความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

3.1 หลักการของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขเบื้องต้น

โดยทั่วไปปัญหาในการออกแบบด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม จะเป็นการหาเซตของตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบ $x = (x_1, \dots, x_n)$ ซึ่งจะมีค่าหนึ่งที่เหมาะสม ในเบื้องต้นจะเป็นการหาค่าต่ำที่สุดหรือสูงที่สุดของระบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า 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

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

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

ประสิทธิภาพและความแม่นยำในการหาค่าตอบของปัญหาจะไม่เพียงขึ้นกับขนาดของปัญหาที่มีจำนวนตัวแปรและจำนวนเงื่อนไขที่มากแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมด เมื่อสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) จะถูกเรียกว่า Linear Programming (LP) สำหรับสมการเป้าหมายที่มีลักษณะที่เป็นฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic Function) จะถูกเรียกว่า Quadratic Programming (QP) ซึ่งทั้งสองลักษณะจะมีขั้นตอนวิธีการหาค่าตอบที่แน่นอนและง่าย แต่สำหรับปัญหาที่ไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น Nonlinear Programming (NP) ซึ่งจะมีสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขที่ไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Nonlinear Function) จะมีวิธีการหาค่าตอบที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่า โดยทั่วไปจำเป็นที่จะต้องมีการหาค่าตอบโดยการกระโดด (Search

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

ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขเข้ามาช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทั้งหมด 7 ตัวเพื่อให้โครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูง มีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด ซึ่งจะเห็นได้ว่า สมการเป้าหมายคือสมการของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรทั้งหมด 7 ตัว โดยมีสมการเงื่อนไขต่างๆ นั่นคือ เงื่อนไขในการออกแบบที่กำหนด โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ประโยชน์จาก Optimization Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขของตัวแปรทั้งหมดซึ่งจะเลือกใช้วิธี SQP (Sequential Quadratic Programming) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขโดยวิธีตรง (Direct Method) [6, 7] (ภาคผนวก ข)

3.2 สมการเป้าหมายของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง

ในการพิจารณาน้ำหนักของส่วนต่างๆ ของโครงสร้างหม้อแปลงความถี่สูงสามารถจำแนกได้เป็นดังนี้

3.2.1 น้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์

การคำนวณน้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

และจากสมการที่ 2.1 – 2.5 นั่นคือค่า 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 นั่นคือ ขด Primary จะพันประกบกับขด Secondary ด้านบนและด้านล่าง ทำให้การพิจารณาน้ำหนักของขดลวด Primary ชุดแรกที่ถูกพันลงไปจะหาน้ำหนักได้จาก

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

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ MLT_{p1} คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันรอบแกน 1 รอบ ของขดลวดชุดแรก ซึ่ง จะหาได้จาก

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

โดยที่ C_{bob} คือ ความยาวของเส้นรอบวงของแกนกลางที่ถูกสวมด้วยขอบบิ้นที่จะใช้ในการ พัน นั่นคือ

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

และ A_p คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด Primary ไม่รวมฉนวนซึ่งหาได้จาก

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

ส่วนขดลวดชุดที่สองที่พันลงไปหลังจากพันขด Secondary จะหาน้ำหนักได้จาก

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

โดยที่ MLT_{p2} คือ ความยาวเฉลี่ยขดลวดที่พันรอบแกน 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 น้ำหนักของขดลวด Secondary

การคำนวณน้ำหนักของขดลวด 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
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้า
ซึ่งจะหาได้จาก
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด Secondary ไม่รวมฉนวนซึ่งหาได้จาก

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

3.2.4 น้ำหนักของขดลวดไบอัส

ถึงแม้ขดไบอัส มีจำนวนรอบที่น้อยและมีขนาดลวดที่ไม่ใหญ่นัก ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องนำมาคิดก็ได้ แต่ถ้าหากผู้ออกแบบมีความต้องการที่จะพิจารณาถึงน้ำหนักของขดไบอัส ก็สามารถหาได้จากสมการน้ำหนักของขดไบอัส 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 ของขดลวดไบอัส 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 พื้นที่หน้าตัดของขดลวดไบอัส ไม่รวมฉนวนซึ่งหาได้จาก

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

นอกจากสมการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ก็อาจรวมถึงน้ำหนักของส่วนประกอบอื่นๆ ที่เหลืออีก เช่น น้ำหนักของเทปฉนวน ซึ่งในบทความนี้ จะถือว่าไม่มีผลต่อน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงแต่อย่างใด และเมื่อรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกันก็จะกลายเป็นสมการน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปร 7 ตัว ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ $W_{trans} = W_c + W_{p1} + W_{p2} + W_s + W_b$ ขนาดให้นำไปใช้ประโยชน์ได้ (3.18) ถ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 สมการเงื่อนไขต่างๆ และขอบเขตของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดนั้นจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดเพื่อให้หม้อแปลงมีการทำงานที่ถูกต้องและมีความเป็นไปได้ในการสร้างจริง ซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด Primary

เนื่องจากพลังงานที่ถูกถ่ายทอควายังด้าน Secondary จะถูกสะสมอยู่ในรูปพลังงานแม่เหล็กที่ขด Primary โดยสามารถเขียนสมการการถ่ายทอกำลังงานได้ดังนี้

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

โดยที่ L_p คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด Primary โดยคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

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

ค่า AL คือค่า core factor ซึ่งประมาณได้จากสมการต่อไปนี้ [8, 9]

$$AL = \frac{1.257 A_e \cdot \mu_r}{I_{av} \left(1 + \frac{g\mu_r}{l_{av}} \right)} \quad (3.21)$$

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 ในการออกแบบหม้อแปลง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่านำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดโดยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรูปแรก (Loop
 ไม่มีการใช้ค่าทางอื่นอีกหนึ่งห้ามให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 1) เท่านั้น ส่วนกระบวนการในรอบต่อไป จะใช้ค่า ที่มาจาก Data Sheet ของผู้ผลิตแกนแต่ละราย
 ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้ในบทที่ 4.1

3.3.2 คาบเวลาในการ On และ Off ที่เหมาะสม

ให้คาบเวลาในการ On และ Off ของกระแสที่ขด Primary และ Secondary เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ตามลำดับ ณ ความถี่ใช้งานของ SMPS โดยจะยังคงสภาพของการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Current Mode : DCM) เนื่องจากเป็นการทำงานที่มีเสถียรภาพที่ดีกว่า โหมดกระแสต่อเนื่อง (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 ด้วยคุณสมบัติของหม้อแปลงนั้นคือความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของด้าน Primary กับ Secondary จะมีความสัมพันธ์ด้วย Transformer Ratio

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

ฉะนั้น พารามิเตอร์ของตัวแปรทางฝั่ง Secondary จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรทางฝั่ง Primary ได้ดังนี้

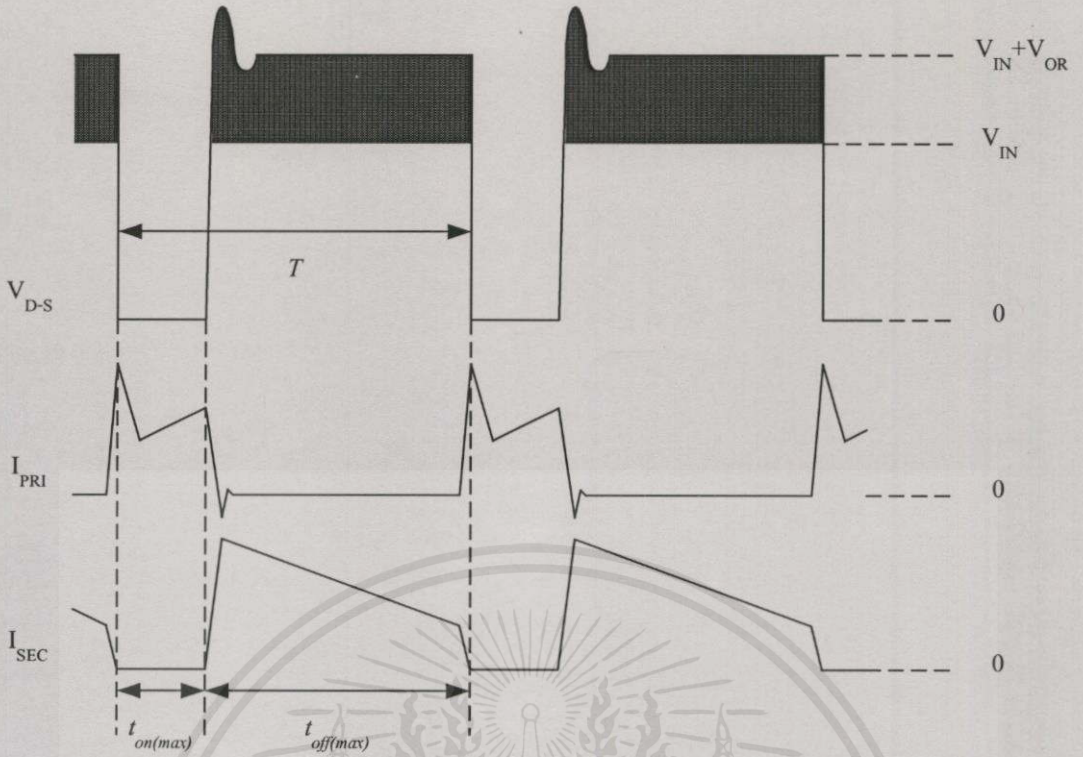
$$I_{s(max)} = ratio \cdot I_{p(max)} \quad (3.27)$$

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

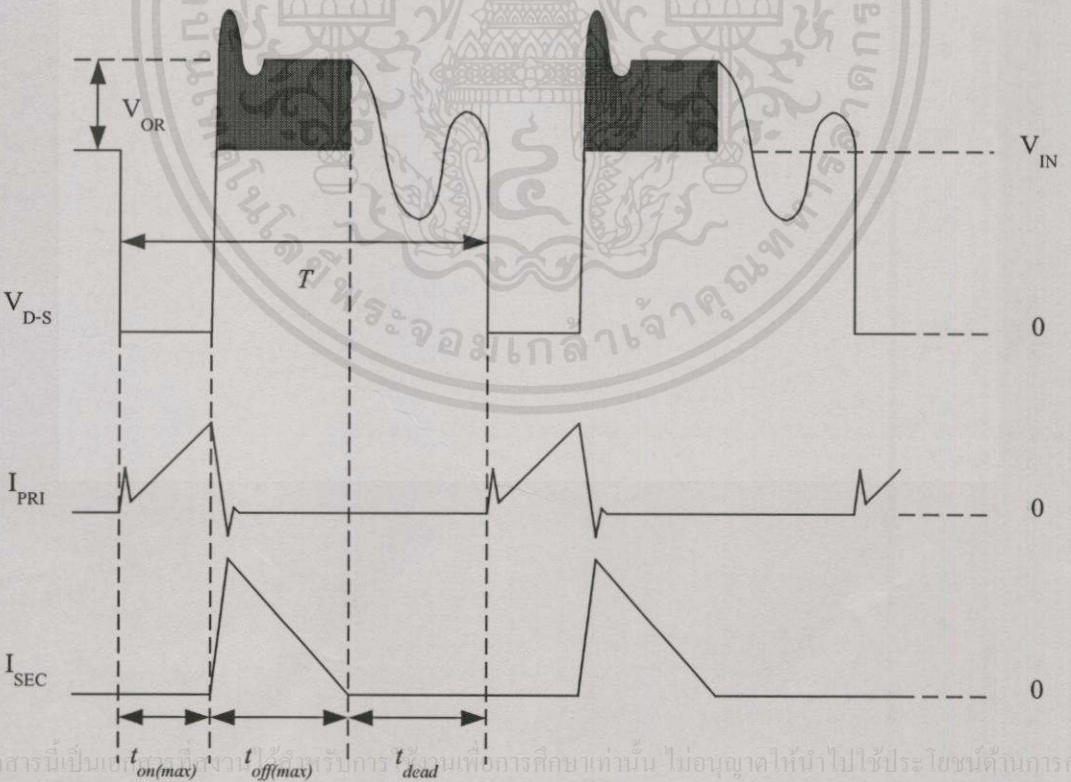
จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 ค่า $t_{on(max)}$ และ $t_{off(max)}$ จะมีค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อ SMPS ทำการจ่าย Load สูงสุดตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ เพื่อคงสภาพการทำงานในโหมด DCM เวลาเผื่อ (Dead time : t_{dead}) โดยทั่วไปจะกำหนดอยู่ที่ 20% ของคาบเวลารวมทั้งหมด [4] ฉะนั้นเราสามารถกำหนดเงื่อนไขของคาบเวลาในการ On และ Off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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกส่งไป $t_{on(max)} + t_{off(max)} \leq \frac{0.8}{f}$ เจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (3.29)



รูปที่ 3.1 คาบเวลาการทำงานในแบบ CCM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 คาบเวลาการทำงานในแบบ DCM

โดยทั่วไป คาบเวลาในการ On จะถูกกำหนดอยู่ที่ประมาณ 30% - 40% ของคาบเวลารวมทั้งหมด แต่ในงานวิจัยนี้ ผู้ออกแบบสามารถที่จะกำหนดคาบเวลาดังกล่าวได้โดยกำหนดจากค่า $D_{(max)Limit}$ 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 แรงดันตกคร่อมสูงสุดที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET

ในระหว่างที่ฝั่ง Primary ทำการ Off และ Secondary ทำการ On จะเกิดแรงดันสะท้อน (V_{OR}) มายังขด Primary ดังที่เห็นในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET ในปริมาณที่สูง [4, 5, 10] จึงจำเป็นที่จะต้องจำกัดแรงดันสะท้อนนี้ไม่ให้มีค่าเกินกว่าพิกัดทนแรงดันของ 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 แรงดันสะท้อนดังกล่าว โดยค่าแรงดันสะท้อนนี้มีผลมาจาก อัตราส่วน *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 ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกน

เพื่อป้องกันการอิ่มตัวที่จะเกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงความถี่สูงจ่ายกำลังสูงสุดจะต้องมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดที่ผู้ผลิตกำหนดมาโดยจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ลัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) เท่านั้น แต่ในกระบวนการรอบถัดไปจะใช้ค่าที่มาจาก Data Sheet ของผู้ผลิตแกนแต่ละรายตามเบอร์ของแกนที่ถูกเลือกภายหลังจากกระบวนการในรอบแรก (Loop 1) เสร็จสิ้น ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้ในหัวข้อที่ 3.4

3.3.5 พื้นที่ในการพันขดลวด

จากรูปที่ 2.2, 2.3 และ 2.4 โครงสร้างของหม้อแปลงที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ก็คือการนำขดลวดต่างๆ, ระยะคืบคลานที่ปลอดภัย (Safety Creepage Distance), เทปฉนวน และ บอบบี้บรรจุลงไปในช่องว่างการพันของแกนได้ จะเห็นได้ว่าระยะ a มีความสำคัญมากที่สุด ในขดลวดแต่ละขดถ้าหากมีการพันที่มีจำนวนรอบมาก จำนวนเลเยอร์ (Layer) ก็จะมากตามไปด้วย ทำให้ระยะความสูงของขดลวดแต่ละขด (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

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

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า LAY_p , LAY_s และ LAY_b คือจำนวนเลขเอร์ของขดลวด Primary, ขด Secondary และขดไบอัสตามลำดับ โดยการปัดเศษจำนวนเลขเอร์ของขดลวดแต่ละขดที่คำนวณได้จริง เป็นเลขจำนวนเต็ม นั่นคือ

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

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

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

ค่า lay_{p1} , lay_{p2} , lay_s และ lay_b คือจำนวนเลขเอร์ของขดลวด Primary ขดแรก, ขด Primary ขดที่สอง, ขด Secondary และขดไบอัสที่คำนวณได้จริงตามลำดับ 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 เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดรวมจนวนของลวดทองแดงในแต่ละขด เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดรวมจนวนของขดลวดในแต่ละชนิดจะสามารถประมาณค่าได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำคังตัวอย่างของลวดชนิดต่างๆต่อไปนี้ [11] นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นใครทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 (ภาคผนวก ข) ซึ่งจะถูกใช้ในการประมาณค่าของ Od_p , Od_s และ Od_b ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) จนถึงรอบที่สาม (Loop 3) เท่านั้น ส่วนกระบวนการในรอบสุดท้าย (Loop 4) จะใช้ค่าที่มาจาก Data Sheet ของขดลวดแต่ละชนิดตามขนาดลวดที่ถูกเลือกภายหลังจากกระบวนการในรอบที่สาม (Loop 3) เสร็จสิ้น ซึ่งรายละเอียดสามารถศึกษาได้ในหัวข้อที่ 3.4

สำหรับขดใบออสซึ่งเป็นขดที่ไม่ค่อยมีความสำคัญมากนัก ค่า d_b และ N_b จะไม่ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรเนื่องจากจะสามารถลดความซับซ้อนของสมการและกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม

แบบมีเงื่อนไขในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงลงได้ ค่า d_b และ N_b จึงถูกกำหนดเป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ออกแบบสามารถกำหนดได้อย่างอิสระเหมือนกับพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 2.1

3.3.6 ขนาดขดลวดที่ใช้ในการพันที่เหมาะสม

ในการรองรับกระแสที่ไหลในขด Primary และ Secondary ซึ่งสามารถกำหนดให้อยู่ในเทอมของ Circular Mills per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าผกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (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 โดยหาได้

จาก

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $I_{s(\max)rms} = ratio \cdot I_{p(\max)rms}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.62) ถ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชุดไบอัสเป็นชุดที่ไม่มีกระแสในปริมาณสูงไหลผ่าน จึงไม่มีความจำเป็นในการที่จะกำหนดให้เป็นเงื่อนไข ซึ่งจะสามารถลดความซับซ้อนของสมการและกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในการออกแบบหรือแปลงความถี่สูงลงได้

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

3.3.7 ขอบเขตของตัวแปรในการออกแบบ

เพื่อป้องกันค่าของตัวแปรหลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมไม่ให้มีค่าเกินหรือต่ำกว่าความเป็นจริง จึงต้องกำหนดขอบเขตให้กับตัวแปรต่าง ๆ ด้วยดังนี้

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

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

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

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

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

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

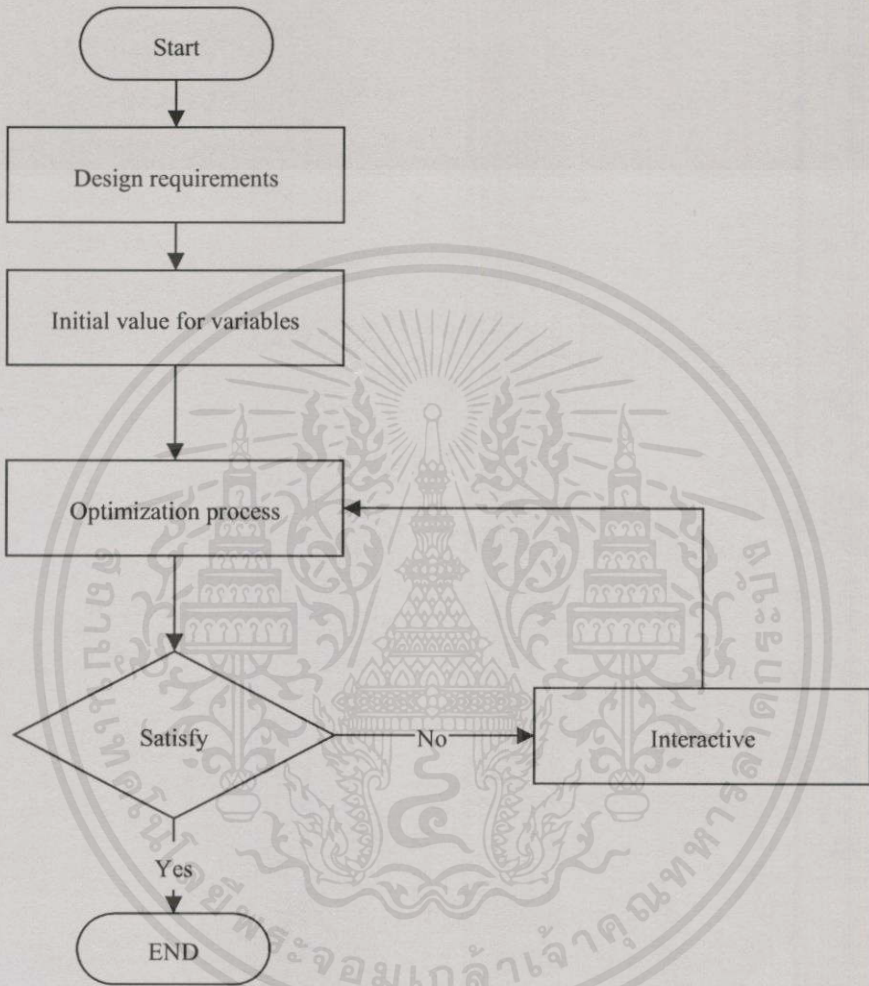
$$0.01 \leq I_{p(\max)} \leq I_{p(\max)Limit} \quad (3.69)$$

การกำหนดค่าขอบเขตเหล่านี้ ผู้ออกแบบสามารถกำหนดให้เป็นค่าอื่นได้อย่างอิสระแต่การเลือกค่าขอบเขตที่กว้างมากเกินไปอาจมีผลเสียต่อเสถียรภาพของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

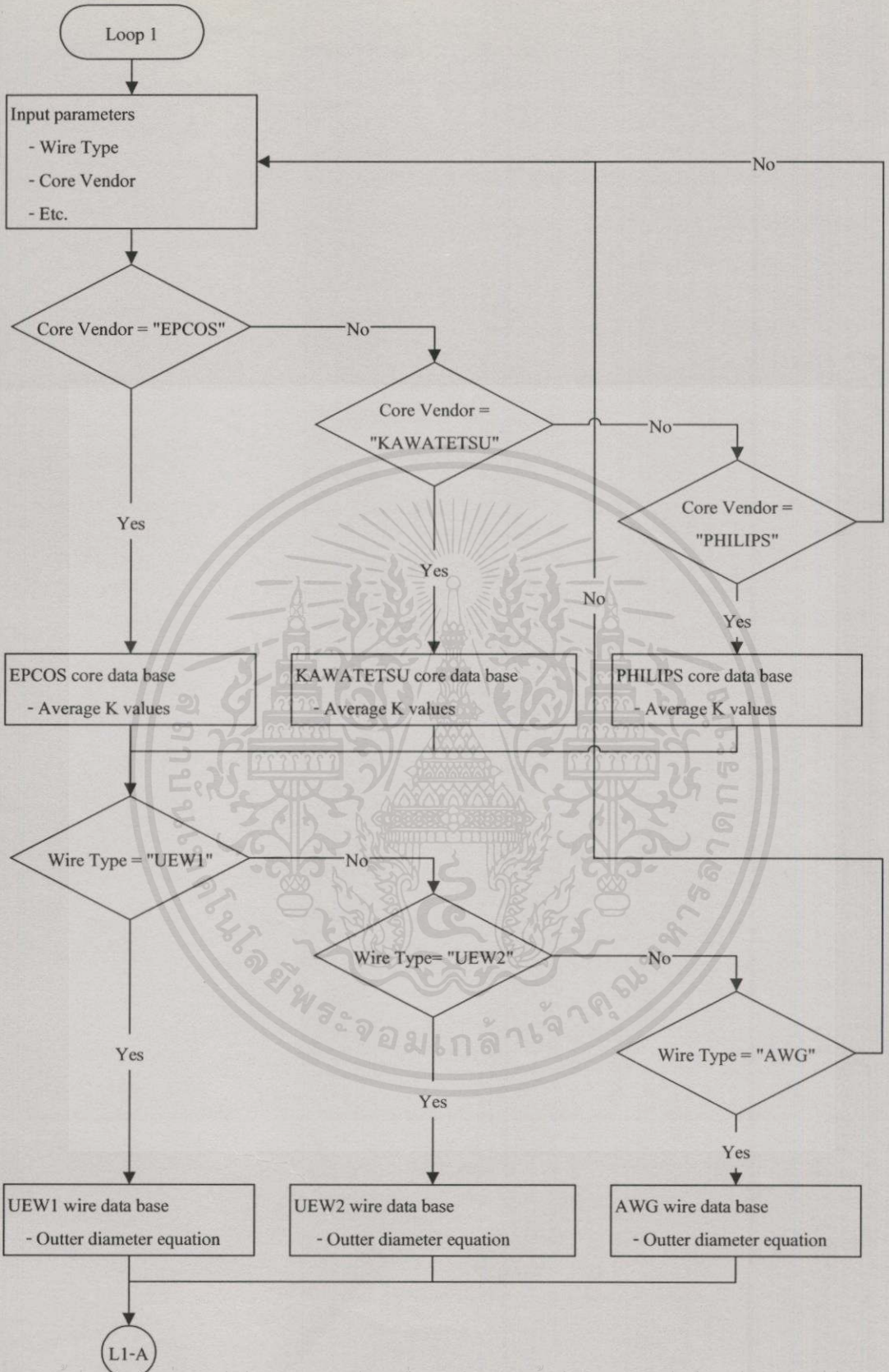
3.4 ขั้นตอนของระบบที่สร้างขึ้น

จากสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกนำไปสร้างเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MATLAB ขั้นตอนในการออกแบบหือแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดมีขั้นตอนต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



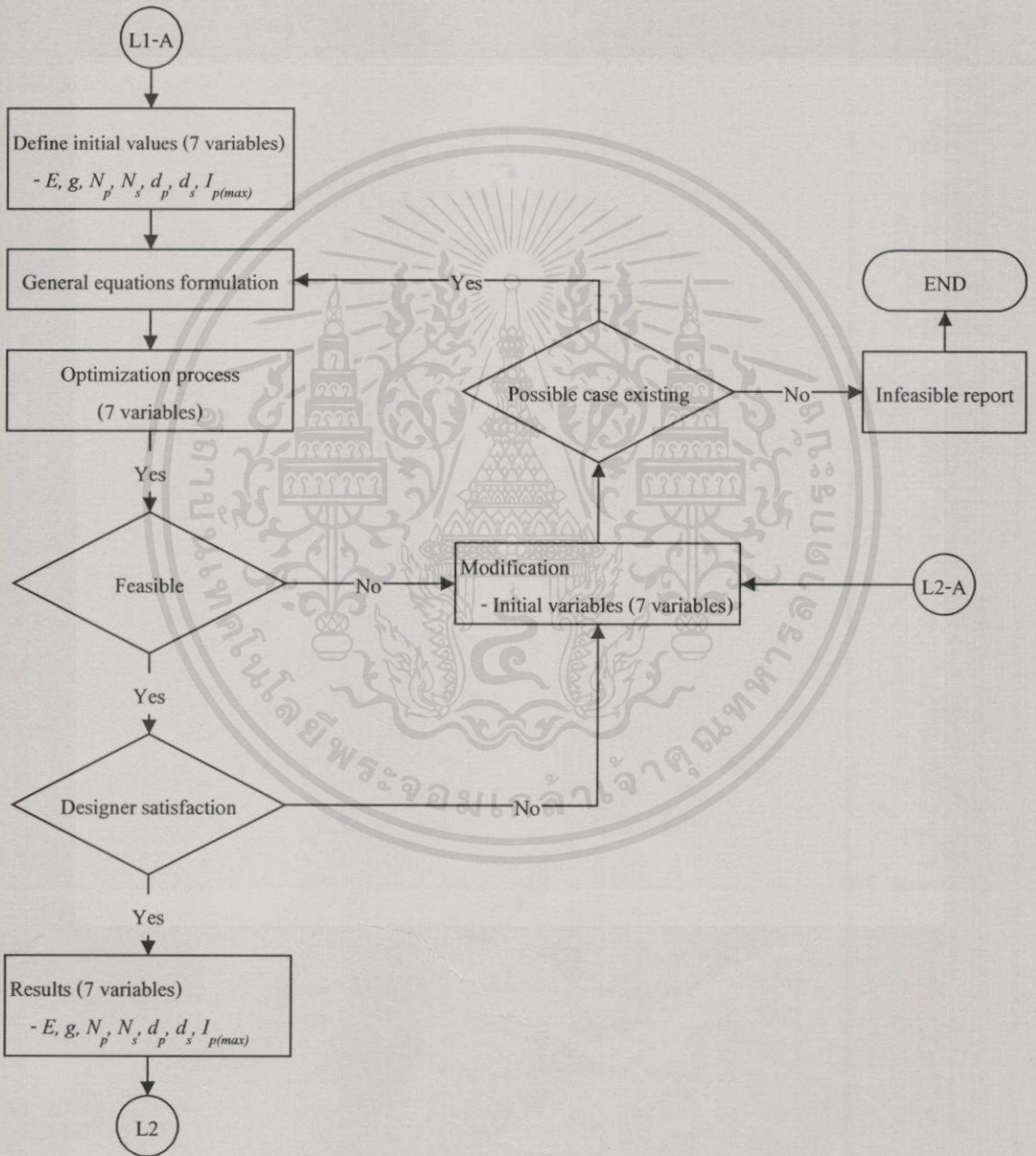
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการออกแบบโดยรวมของระบบที่สร้างขึ้น

ในขั้นตอนแรก ข้อมูลอินพุตทั้งหมดจะเป็น Design Requirement ของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะมีการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นต่างๆ ของแกนและขดลวด ซึ่งจะต้องทราบว่าเป็นของผู้ผลิตรายใดเป็นต้น สำหรับแผนผังของขั้นตอนดังกล่าวสามารถดูได้จากรูปที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นต่างๆ ของแกนและขดลวด

จากนั้นจะเป็นขั้นตอนที่มีการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้งหมด และสมการย่อยต่างๆ เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบแรก (Loop 1) ถ้าหากโปรแกรมไม่สามารถหาค่าผลลัพธ์ได้หรือผู้ออกแบบยังไม่พอใจกับคำตอบของตัวแปรที่ถูกปรับใหม่โดยโปรแกรม ก็จำเป็นที่จะต้องทำการปรับค่าเริ่มต้นใหม่อีกครั้งแล้ววนกลับเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งจะวนซ้ำอย่างนี้เรื่อยไป หากผู้ออกแบบไม่สามารถพบคำตอบที่น่าพอใจ โปรแกรมก็จะหยุดการทำงาน แผนผังของขั้นตอนดังกล่าวสามารถดูได้จากรูปที่ 3.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้งหมด และสมการย่อยต่างๆ เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบแรก (Loop 1)

ต่อจากนั้นผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) จะถูกพิจารณาว่าสามารถนำไปสร้างจริงได้หรือไม่โดยพิจารณาว่า มิติของแกน คือ E ที่ได้นั้นมีอยู่จริงใน Data Sheet ของผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรต์หรือไม่, จำนวนรอบ N_p และ N_s เป็นเลขจำนวนเต็มหรือไม่ และขนาดลวด d_p และ d_s มีอยู่จริงในตารางขนาดลวดหรือไม่ ถ้าหากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดดังกล่าว โปรแกรมก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงค่าตัวแปรในการออกแบบซึ่งเรียกว่าขั้นตอน Interactive ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เปิดโอกาสให้ผู้ออกแบบสามารถที่จะพิจารณาหาอัลกอริทึมในการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ เข้าสู่ค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ในขั้นตอนนี้ค่าตัวแปรที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติบางส่วนจะถูกปรับไปสู่ค่าใหม่ที่ใกล้เคียงค่าเดิมที่สามารถสร้างได้จริง หลังจากนั้นจะกลับเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมอีกครั้ง เพื่อให้ตัวแปรที่เหลืออยู่บางส่วนได้ค่าที่เหมาะสมใหม่ และทำการปรับค่าตัวแปรใหม่ที่ได้ไปสู่ค่าใหม่ที่ใกล้เคียงซึ่งใช้การพิจารณาในลักษณะเดียวกันกับข้างต้นจนสามารถปรับตัวแปรทั้งหมดให้มีค่าที่เป็นไปได้ ซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างที่ทำให้หม้อแปลงความถี่สูงมีน้ำหนักน้อยที่สุดโดยยังคงอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด สำหรับขั้นตอน Interactive นี้จะอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 3.6

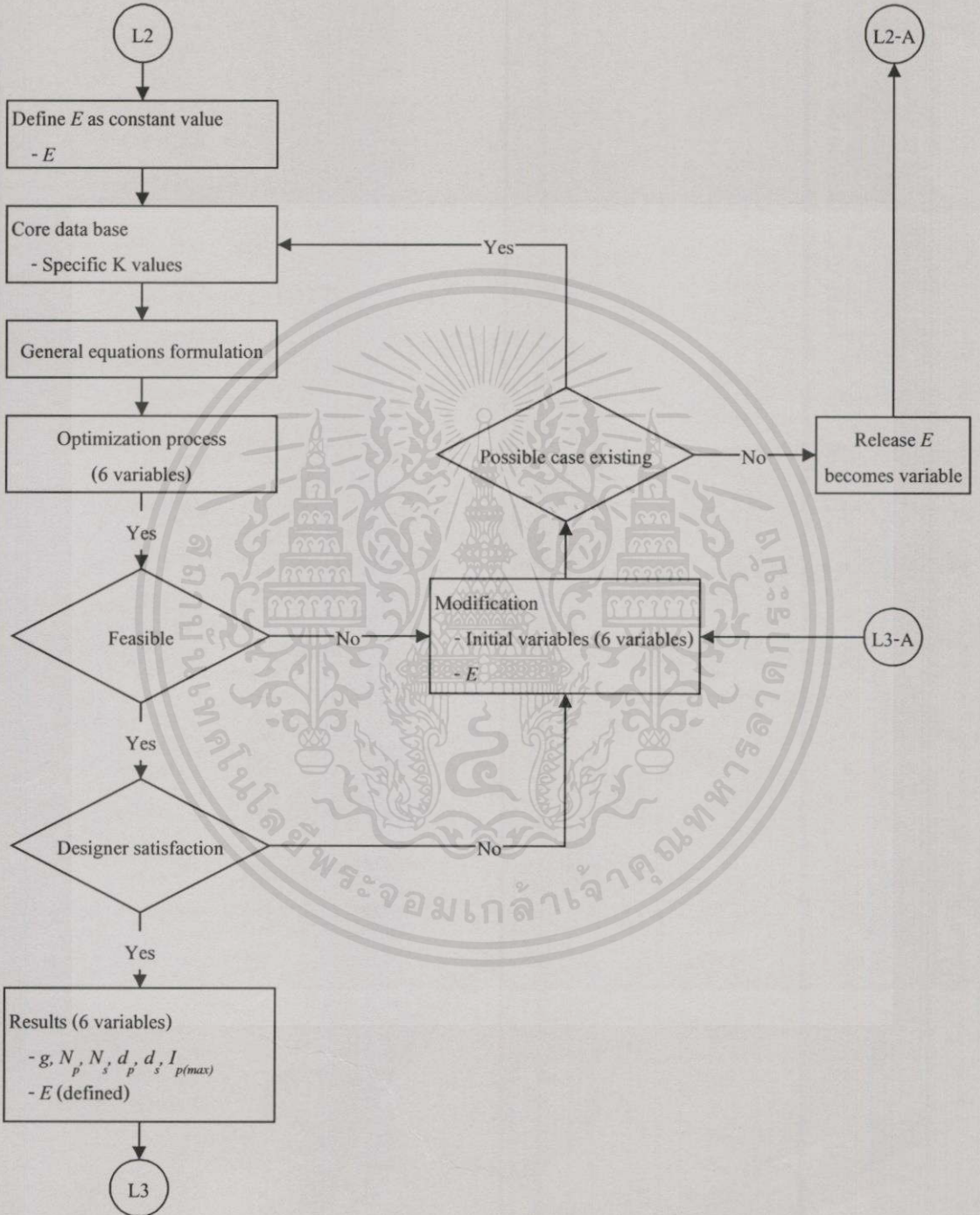
3.5 กระบวนการ Interactive

ก่อนที่โปรแกรมจะเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบที่ 2 (Loop 2) ผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) จะถูกนำมาพิจารณาว่าสามารถนำไปสร้างจริงได้หรือไม่ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ได้แก่ E , N_p , N_s , d_p และ d_s จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขใน Loop 1 ตัวแปรที่มีผลต่อน้ำหนักและโครงสร้างต่างๆ ของหม้อแปลงความถี่สูงที่จะต้องนำมาพิจารณาในอันดับแรกนั่นคือ มิติของแกนเฟอร์ไรต์ (E) ซึ่งจะถูกนำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับ Data Sheet ของผู้ผลิตแต่ละรายว่ามีอยู่จริงหรือไม่ ถ้าหากไม่ตรงกันก็ให้เลือกปรับแกนที่มีมิติ E ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้ จากนั้น ค่าของ E จะไม่ถูกโปรแกรมเปลี่ยนแปลงค่าได้อีก เนื่องจากจะต้องมีการวนกลับไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขนั้นอีกครั้ง ซึ่งโปรแกรมจะทำการปรับค่าตัวแปรที่เหลือให้เหมาะสมกับค่า E ที่ถูกผู้ออกแบบเลือกมา โดยยังยึดเป้าหมายของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงให้มีค่าน้อยที่สุด

ถ้าหากโปรแกรมไม่สามารถปรับตัวแปรที่เหลือให้เข้ากับ E ที่เลือกมาได้ โปรแกรมก็จะบอกว่า Infeasible นั่นคือ ไม่สามารถหาค่าตอบของตัวแปรที่เหลือภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดได้ จึงจะต้องทำการเลือกแกนใหม่อีกครั้งซึ่งจะมีการกระทำเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าจะพบแกนที่เหมาะสม

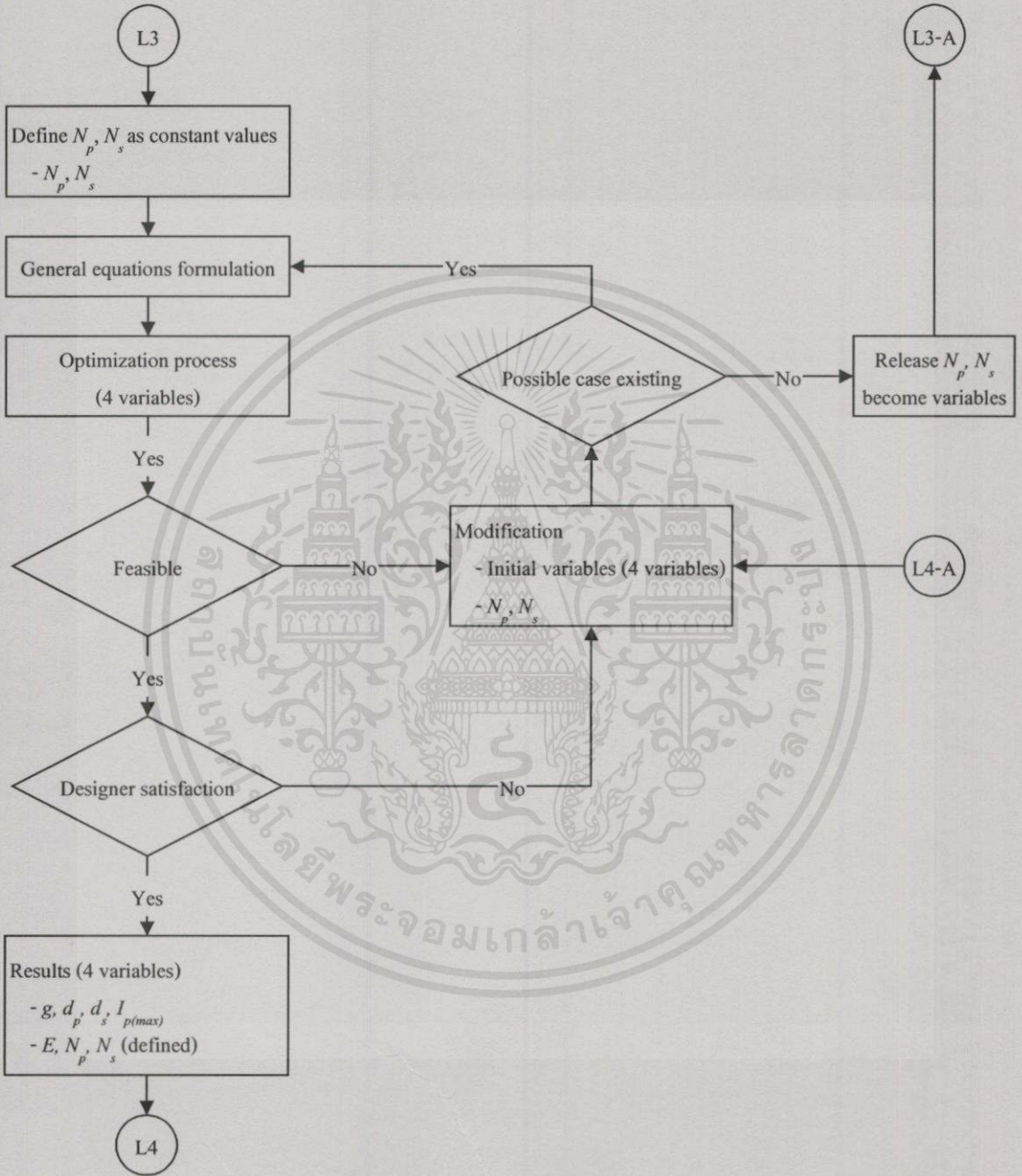
หลักในการเลือกแกนที่ดีคือ การเลือกจากแกนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขใน Loop 1 โดยเลือกจากแกนขนาดเล็กกว่าไปจนถึงแกนที่มีขนาดใหญ่กว่า และควรเลือกแกนที่สามารถให้น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงมี

ค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการศึกษาของผู้ออกแบบเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โปรแกรมต้องสามารถปรับตัวแปรที่เหลือให้มีความเหมาะสมกับแกนดังกล่าวได้ ตัวอย่างของการเลือกแกนใน Loop ที่ 2 สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 4.1



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการกำหนดและปรับปรุงค่า E เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบที่สอง (Loop 2)

ใน Loop ที่ 3 หลังจากที่ผู้ออกแบบได้ทำการเลือกเกณฑ์ที่ต้องการแล้ว ผลลัพธ์ของตัวแปรจะเปลี่ยนไปจากเดิม เพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์ที่เลือกโดยยังคงเป้าหมายของน้ำหนักโดยรวมให้มีค่าน้อยที่สุด ตัวแปรชุดต่อไปที่จะทำการปรับปรุงก็คือ จำนวนรอบ N_p และ N_s



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการกำหนดและปรับปรุงค่า N_p และ N_s เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่า

ที่เหมาะสมในรอบที่สาม (Loop 3)

เอกสารนี้เป็นที่สงวนลิขสิทธิ์และสามารถนำมาใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติจำนวนรอบจำเป็นที่จะต้องเป็นจำนวนเต็ม กล่าวคือ ไม่มีทศนิยม ฉะนั้นผู้ ออกแบบจึงจำเป็นที่จะต้องปรับจำนวนให้มีค่าเหมาะสม ซึ่งในกรณีที่ผลลัพธ์ของ N_p และ N_s ไม่ เป็นเลขจำนวนเต็มก็ให้ทำการปัดขึ้นหรือปัดลง โดยสามารถแบ่งเป็นกรณีได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 กรณีต่างๆ ในการปรับค่าของ N_p และ N_s

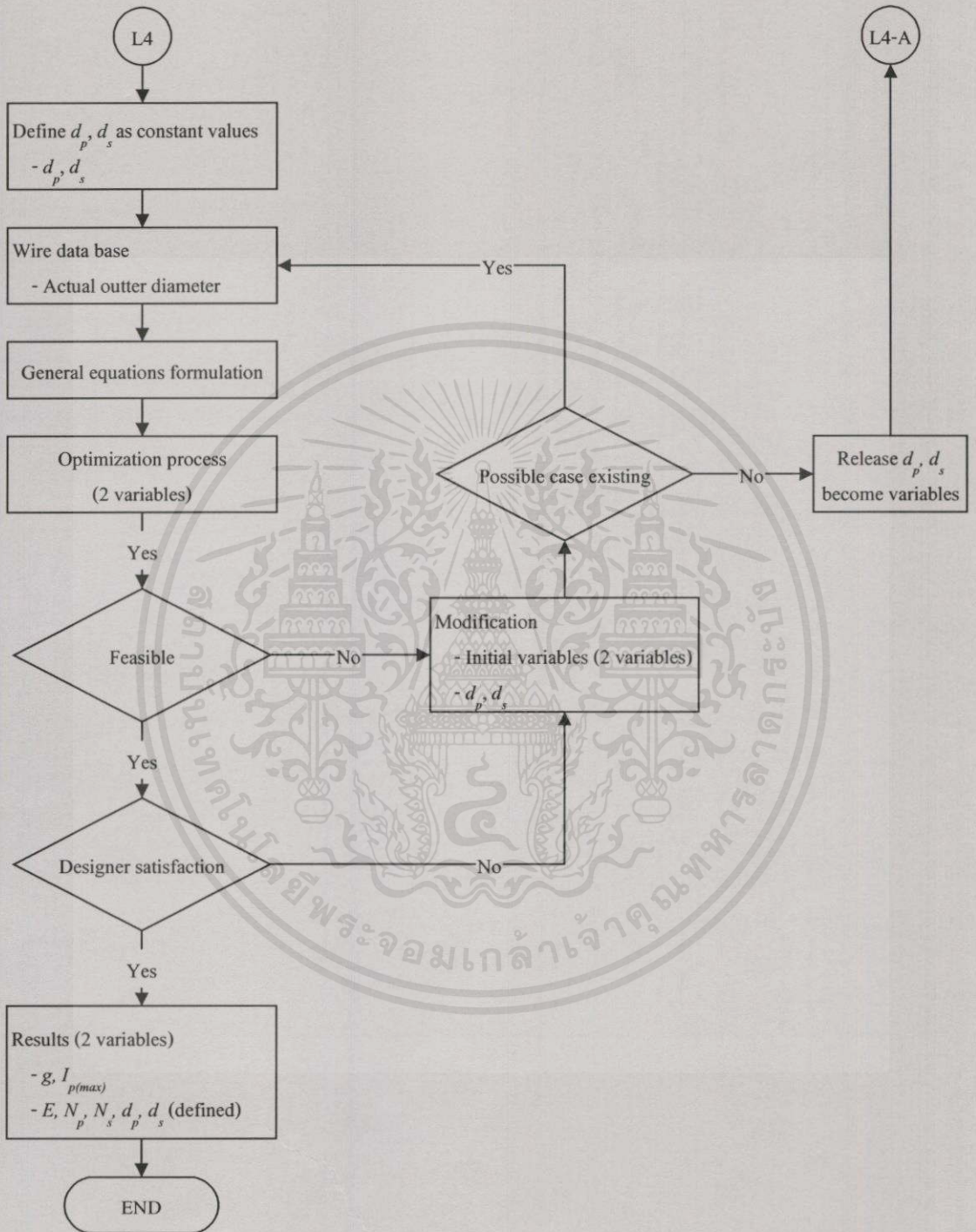
	N_p	N_s
Case 1	Round towards plus integer	Round towards plus integer
Case 2	Round towards plus integer	Round towards minus integer
Case 3	Round towards minus integer	Round towards plus integer
Case 4	Round towards minus integer	Round towards minus integer

จากนั้นก็ให้ผู้ออกแบบทำการกำหนดค่าใหม่ของ N_p และ N_s เช่นเดียวกับการกำหนดค่า ของ E ใน Loop ที่ 2 และวนกลับไปสู่ขั้นตอนกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขอีกครั้ง เพื่อหาว่ากรณีใดที่สามารถเป็นไปได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดและให้น้ำหนักโดยรวมน้อยที่สุด แต่ ถ้าหากโปรแกรมไม่สามารถหาค่าตัวแปรที่เหลือภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดได้นั้นคือ กรณีที่เลือกมา นั้นไม่สามารถนำมาสร้างในทางปฏิบัติให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ ก็ให้กลับไป Loop 2 แล้วทำการเลือกแกนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นไปอีก

จาก Loop ที่ผ่านๆมา จะเห็นได้ว่า จำนวนตัวแปรลดลงไปเรื่อยๆ เนื่องจากผู้ออกแบบได้ทำ การกำหนดค่าของตัวแปรเอาไว้แล้วถึง 4 ตัวด้วยกัน ซึ่งใน Loop 4 ตัวแปรที่จะทำการปรับชุดต่อไป ก็คือ d_p และ d_s ซึ่งผู้ออกแบบสามารถดูได้จากตารางลวดของผู้ผลิต แล้วทำการเลือก โดยทั่วไปจะ ต้องเลือกลวดที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากเงื่อนไขของ Circular Mills per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่า ผกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) โดยให้เลือกลวดที่มีขนาดใหญ่กว่าถัดไป แล้ววนกลับไปสู่ขั้นตอนของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขอีกครั้ง หากโปรแกรมไม่ สามารถหาค่าตัวแปรที่เหลือภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดได้นั้นคือ กรณีที่เลือกมานั้นไม่สามารถนำมา สร้างในทางปฏิบัติให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ ก็ให้กลับไป Loop 3 และ Loop 2 ตาม ลำดับ

สุดท้าย ผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้ทั้งหมดจะสามารถนำไปสร้างได้ในทางปฏิบัติภายใต้เงื่อนไข เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า โทร. 02-111-1111 หรือ อีเมล: service@... $I_{p(max)}$ จะยังมีได้

ถูกทำการปรับปรุงค่าเช่นเดียวกับตัวแปรอื่นๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้น เนื่องจากในทางปฏิบัติ ตัวแปรเหล่านี้สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระมากกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการกำหนดและปรับปรุงค่า d_p และ d_s เพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม
ในรอบสุดท้าย (Loop 4)

3.6 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบหรือแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

ในงานวิจัยนี้ ได้นำประโยชน์ของทูลบ็อกของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Toolbox) ที่มีอยู่ใน โปรแกรม MATLAB มาใช้ เป็นเครื่องมือช่วยในส่วนของ การวิเคราะห์ระเบียบวิธีทางตัวเลข (Numerical) ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข (Constrained Optimization) เท่านั้น ส่วนองค์ประกอบอื่น เช่น ส่วนอินเตอร์เฟส (Interface) ระหว่างกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขกับผู้ออกแบบ และส่วนฐานข้อมูล (Data Base) เป็นต้น จำเป็นต้องสร้างขึ้นมาจาก เอ็มไฟล์ (M-file) เพื่อใช้ในการรับและส่งค่าให้กับทูลบ็อกของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม และเอ็มไฟล์ด้วยตัวเอง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้ [7, 13]

3.6.1 เอ็มไฟล์ฟังก์ชันและสมการเป้าหมาย (Objective Function)

เป็นเอ็มไฟล์ที่บรรจุสมการเป้าหมายที่ต้องการให้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข หาค่าของฟังก์ชันนั้นๆ ให้มีค่าต่ำสุด ในที่นี้ คือ สมการน้ำหนักของหม้อแปลง โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่นำมาประกอบกันเป็นสมการจะมาจากเอ็มไฟล์ที่ใช้เก็บค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ 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 คือเลขจำนวนเต็มบวกใดๆ

3.6.3 เอ็มไฟล์ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรต่างๆ

เป็นเอ็มไฟล์ที่เก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ, สมการ และค่านิยามของพารามิเตอร์ทุกๆ ตัว นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วน Interface หลักระหว่างโปรแกรมและผู้ออกแบบให้สามารถกำหนดและปรับปรุงค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ และ ลำดับขั้นการวนรอบของกระบวนการ Interactive ที่ จะทำการปรับปรุงค่าตัวแปร

3.6.4 เอ็มไฟล์ฐานข้อมูลของแกนเฟอร์ไรต์

เป็นเอ็มไฟล์ที่ใช้เก็บค่ามิติต่างๆ ของแกนเฟอร์ไรต์จากผู้ผลิตต่างๆ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถดึงค่าไปได้ทั้งหมด โดยการเลือกเพียงตัวเลขในหลักแรกของแต่ละแถว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาท่านนั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.5 เอ็มไฟล์ฐานข้อมูลของลวดทองแดงชนิดต่างๆ

เป็นเอ็มไฟล์ที่ใช้เก็บค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกจริงๆ ของขดลวดที่จะนำไปใช้ในการพันชนิดต่างๆ ซึ่งผู้ออกแบบสามารถดึงค่าไปได้ทั้งหมดโดยการเลือกเพียงตัวเลขในหลักแรกของแต่ละแถว

3.6.6 เอ็มไฟล์ชุดคำสั่งในการวิเคราะห์และแสดงผลการออกแบบ

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและการทดสอบ

4.1 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ 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 มักใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และดิจิทัลขนาดเล็กต่างๆ ไป เช่น เครื่องเล่น CD และ MP3 ขนาดพกพา หรือแม้กระทั่งที่ชาร์จแบตเตอรี่ของโทรศัพท์มือถือ และกล้องถ่ายรูปดิจิทัล เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A มีพิกัดกำลังขาออกที่มีขนาดต่ำ (Low Power)

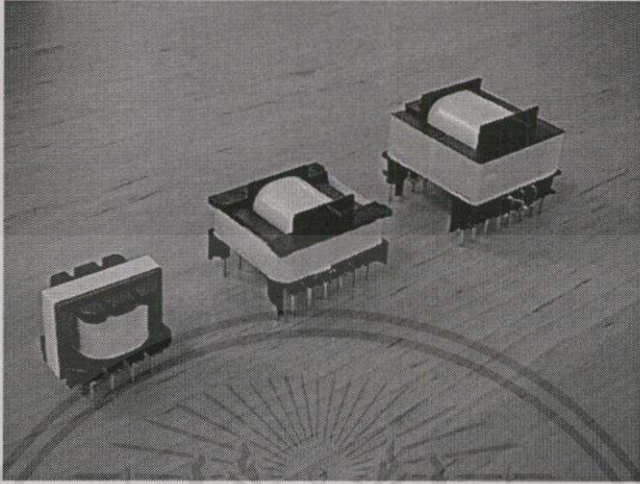
4.1.3 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A ความถี่ใช้งาน 100 kHz

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการนี้ขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงความถี่สูงที่เลือกมาทำการออกแบบจะมีขนาดและพิกัดกำลังขาออกครอบคลุมตั้งแต่ขนาดเล็ก กำลังงานต่ำไปจนถึงขนาดใหญ่ กำลังงานสูง นอกจากนี้จะทำ

การสร้างจริงตามผลที่ได้จากการออกแบบ โดยวิธีที่นำเสนอ เพื่อแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่สามารถใช้งานได้จริงตามความต้องการของผู้ออกแบบ โดยที่ต้นแบบของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสามตัวที่สร้างขึ้นจะเป็นไปตามรูปที่ 4.1



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

4.2 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซึ่งขนาด 12V / 2A

ในการออกแบบหม้อแปลงดังกล่าวจะมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบ ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซึ่งขนาด 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

หม้อแปลงความถี่สูงดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่ใช้กับแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายได้หลายระดับ นั่นคือสามารถใช้งานได้ทั่วโลก (Universal Input) ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งมีค่าอยู่ที่ 60 kHz ซึ่งนับว่าไม่สูงมากนักเหมาะกับแหล่งจ่ายไฟขนาดกลาง

บอบบิ้นที่เลือกใช้จะเป็นแบบแนวนอน (Horizontal) เนื่องจากต้องการลดความสูงของหม้อแปลงลงเพื่อให้ประกอบอยู่ใน โครงสร้างของแหล่งจ่ายไฟที่มีขนาดเล็กได้ และเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟนี้สามารถใช้งานได้ทั่วโลก มาตรฐานความปลอดภัยจึงต้องใช้มาตรฐานสากล จึงทำให้ระยะคืบคลานปลอดภัย (Creepage Safety Distance) มีค่าเท่ากับ 4 mm. เท่ากันทั้งสองด้าน [4, 12]

ค่าพิถีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดจะเลือกใช้ที่ค่า 0.16 T เนื่องจากค่าดังกล่าวจะทำให้ผลของค่าความสูญเสียในแกน (Core Loss) มีค่าต่ำจนสามารถละทิ้งไปได้ ค่า Circular Mills per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าผกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) ค่าสุดท้ายก็เช่นกัน จะเลือกใช้ค่า 300 mil/A เนื่องจากค่าดังกล่าวจะทำให้ผลของค่าความสูญเสียในขดลวด (Copper Loss) มีค่าต่ำจนสามารถละทิ้งไปได้เช่นกัน [12]

เพื่อความแน่ใจว่าหม้อแปลงความถี่สูงดังกล่าวจะสามารถถ่ายทอดกำลังงานที่เพียงพอต่อความต้องการของ Load จึงอาศัยค่าเผื่อในการออกแบบ (Transformer Design Margin) มีค่าเท่ากับ 1.25 ซึ่งโดยปกติค่าเผื่อดังกล่าวจะอยู่ที่ 1.2 ~ 1.3

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

ที่สูงเกินไปจะทำให้กระแสทาง Secondary มีค่าสูงซึ่งจะเกิดความสูญเสียที่วงจรเรียงกระแสทางด้าน Secondary ที่สูงเช่นกัน และค่าที่ต่ำเกินไปจะมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของวงจรในการควบคุมแรงดันขาออกให้มีค่าคงที่ ขณะที่แรงดันจากแหล่งจ่ายมีค่าสูงสุดและมีค่า Load ต่ำสุด เนื่องจากอัตราส่วนของช่วงเวลาดังกล่าว จะมีค่าต่ำมากซึ่งวงจรควบคุมบางชนิดที่อาศัยความถี่คงที่จะไม่สามารถควบคุมคาบเวลาในการ On ที่ต่ำๆ ได้ จึงทำให้แรงดันขาออกมีค่าสูงขึ้นเกินความต้องการ

4.2.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation)

รายละเอียดของการออกแบบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [4, 5, 12] ทั้งนี้ได้มีการปรับปรุงขั้นตอนการออกแบบในบางช่วงเพื่อความสอดคล้องกับการออกด้วยวิธีที่นำเสนอ ทั้งนี้ยังคงอาศัยบรรทัดฐานเดิมอยู่ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

จากสมการกำลังงานขาออกสูงสุดในสมการที่ 3.19 แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ลงไปจะได้สมการใหม่ดังนี้

จาก

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

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} นั่นก็คือ 5.834×10^{-6} แล้วแทนค่าลงในสมการที่ 4.2 ได้ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ดังนั้น

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

แทนค่าสมการที่ 4.4 ลงในสมการที่ 4.1 จะได้ว่า

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

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

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

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

จาก

ดังนั้น

$$5.834 \times 10^{-6} + t_{off(\max)} \leq \frac{0.8}{60 \times 10^3} \quad (4.7)$$

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

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

จาก

ดังนั้น

$$\frac{L_s I_{s(\max)}}{12 + 1} \leq 7.499 \times 10^{-6} \quad (4.8)$$

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

จากสมการอัตราส่วน *ratio* ในสมการที่ 3.26 ถึง 3.24 สามารถแทนค่าพารามิเตอร์ทางฝั่ง Secondary ด้วยพารามิเตอร์ทางฝั่ง Primary ลงในสมการที่ 4.8 ได้ดังนี้

จาก

ดังนั้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (4.9)

$$7.194 \geq ratio$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแรงดันที่ปรากฏอยู่ระหว่างขา 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 ของผู้ผลิตโดยจะเลือกแกนเบอร์ 12 นั่นคือ 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 นั่นคือ 8 ซึ่งจะได้

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

เลือกค่า N_s มีค่าเท่ากับ 10

จากสมการปริมาณกระแสที่ไหลในขดลวดในเทอมของ Circular Mills per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าผกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (Current density) ในสมการที่ 3.57 ถึง 3.62 จะได้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ทำการเลือกขดลวดที่จะใช้ในการพันขด Primary และ Secondary มีค่าเท่ากับ 0.32 และ 0.65 ตามลำดับ

จากสมการความสูงของขดลวดในสมการที่ 3.37 ถึง 3.39 และ สมการที่ 3.41 ถึงสมการที่ 3.47 สามารถหาความสูงของขดลวดแต่ละขดได้ดังนี้

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

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

จากสมการพื้นที่ในการพันขดลวดในสมการที่ 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำเอกสารนี้ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ จะเห็นได้ว่า สมการที่ 4.18 มีค่ามากกว่าค่า a ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 นั่นหมายถึงไม่สามารถใช้แกนเฟอร์ไรต์เบอร์ดังกล่าวได้ ฉะนั้นต้องทำการเลือกแกนใหม่อีกครั้ง 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* ที่เลือกเอาไว้ในตอนต้น นั่นคือ 8 จะได้

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

เลือกค่า N_s มีค่าเท่ากับ 9

จากสมการปริมาณกระแสที่ไหลในขดลวดในเทอมของ Circular Mills per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าผกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (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

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

เอกสารนี้เป็นการเลือกขดลวดที่จะใช้ในการพันขด Primary และ Secondary มีค่าเท่ากับ 0.32 และ 0.65 ตามลำดับ เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความสูงของขดลวดในสมการที่ 3.37 ถึง 3.39 และ สมการที่ 3.41 ถึงสมการที่ 3.47 สามารถหาความสูงของขดลวดแต่ละขดได้ดังนี้

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

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

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

เพราะฉะนั้น ผลลัพธ์ของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ถึง 4.25 สามารถสรุปได้เป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ซึ่งมีเอกสารอีกฉบับเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การออกแบบด้วยวิธีที่น่าเสนอ

จากขั้นตอนการออกแบบในรูปที่ 3.3 นั้น ความต้องการของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 4.1 จะถูกป้อนเข้าสู่โปรแกรมเพื่อใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขทั้งหมด จากนั้นผู้ออกแบบจำเป็นต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้ง 7 ตัว ซึ่งแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 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

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

จะเห็นได้ว่าโปรแกรมได้ทำการปรับค่าของตัวแปรทั้งหมด โดยที่มีเป้าหมายอยู่ที่น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงมีค่าน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขที่กล่าวไว้ข้างต้นทั้งหมด จากนั้นผู้ออกแบบต้องทำการพิจารณาผลลัพธ์ของตัวแปรเหล่านี้ว่าพอใจหรือไม่ ซึ่งในที่นี้จะเห็นได้จากค่าของ E , d_p , d_s ไม่มีอยู่จริงใน Data Sheet ของผู้ผลิต และจำนวนรอบ N_p และ N_s ก็ไม่สามารถนำไปสร้างจริงได้ เนื่องจากจำนวนรอบที่ได้เป็นตัวเลขที่ไม่ลงตัว ส่วนค่า g และ $I_{p(max)}$ นั้นไม่มีปัญหาแต่อย่างใด เพราะค่า g สามารถปรับอย่างอิสระได้ในภายหลังและ $I_{p(max)}$ ก็เป็นค่าของกระแสที่ไหลในวงจรที่แท้จริงทาง Primary มิใช่ค่าพิกัด ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องทำการปรับค่า E , d_p , d_s , N_p และ N_s ใหม่ในกระบวนการ Interactive

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	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	
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

Ipmax (A.) ----> 1.6640

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

Transformer weight (g.) ----> 23.3541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 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 ได้กำหนดให้ผู้ออกแบบทำการปรับค่า E ก่อน นั่นคือ ค่าทางมิติของแกนเฟอร์ไรต์ซึ่งมีผลโดยตรงต่อน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าทั้งหมด โดยการปรับนั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องใช้ฐานข้อมูลของแกนที่เลือกใช้ หรืออาจเปิดดูได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแกนเบอร์ 12 และเบอร์ 14 ที่มีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ซึ่งผู้ออกแบบจำเป็นต้องตรวจสอบว่าแกนใดที่สามารถใช้ได้ ในทางปฏิบัติ โดยทำการเปลี่ยนค่าของ E จากตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระ โดยโปรแกรมให้กลายเป็นค่าคงที่ใดๆที่โปรแกรมไม่สามารถปรับค่าได้ ในที่นี้จะทำการปรับให้เป็นแกนเบอร์ 12 ก่อน จากนั้นก็สั่งให้โปรแกรมวนกลับเข้าไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขอีกครั้งเพื่อตรวจสอบว่า แกนที่ผู้ออกแบบเลือกไปนั้นสามารถใช้งานได้หรือไม่ โดยยังไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับค่าอื่นๆ ที่เหลืออยู่นั้นก็คือ N_p , N_s , d_p และ d_s

จากการตรวจสอบพบว่า แกนเบอร์ 12 ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ในทางปฏิบัติ เนื่องจากไม่สามารถอยู่ภายใต้เงื่อนไขบางข้อที่ผู้ออกแบบได้กำหนดเอาไว้ในสมการเงื่อนไขได้ (Infeasible) ผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องเลือกแกนเบอร์ใหม่นั้นคือแกนเบอร์ 14

จากการตรวจสอบของโปรแกรมพบว่า แกนเบอร์ 14 สามารถใช้งานได้ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมซึ่งมีการปรับค่าตัวแปรใหม่ทั้งหมด โดยยกเว้นค่า E จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.3

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
 แบบสวิตซ์ขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่สอง (Loop 2)

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมี
 เงื่อนไขในรูปที่สอง (Loop 2) โดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถสรุปค่าของตัวแปรต่างๆ
 ที่ได้จากโปรแกรมเป็นดังตารางที่ 4.5 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซึ่งขนาด 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 น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซึ่งขนาด 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้อ้างอิงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่และแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 กำหนดให้ผู้ออกแบบปรับเปลี่ยนค่านั้น คือ N_p และ N_s เนื่องจากจำนวนรอบการพัน มีผลต่อค่าทางไฟฟ้า, พื้นที่ว่างในการพัน และที่สำคัญ คือ น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง จึงสมควรที่ผู้ออกแบบจะต้องทำการปรับค่าเหล่านี้ก่อนค่า d_p และ d_s การปรับค่าของ N_p และ N_s จะอาศัยหลักที่ว่า จำนวนรอบจะต้องเป็นเลขจำนวนเต็มเสมอ ดังที่กล่าวเอาไว้ในบทที่ 3 การปรับจะแบ่งเป็น 4 กรณี ซึ่งการตรวจสอบว่ากรณีใดสามารถให้ผลการสร้างมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ โดยให้น้ำหนักรวมที่น้อยที่สุด และเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆที่กำหนดในสมการเงื่อนไขนั้น สามารถทำในลักษณะที่คล้ายกับการเลือกแกน นั่นคือ ผู้ออกแบบทดลองป้อนค่าใหม่ของ N_p และ N_s ในแต่ละกรณีแล้วส่งให้โปรแกรมวนกลับเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขอีกครั้งแล้วดูจากผลลัพธ์ของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้ ซึ่งผลลัพธ์จะเป็นดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลลัพธ์ของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบ สวิตซ์ซึ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่ 3 ที่ได้จากจำนวนรอบในกรณีต่างๆกัน

	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 กรณีที่สามารถทำให้การสร้างเป็นไปได้ในทางปฏิบัติที่ให้น้ำหนักรวมที่น้อยที่สุดและเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนด ในสมการเงื่อนไขนั้น คือ กรณีที่ 2 ซึ่งผู้ออกแบบจะปรับค่า N_p และ N_s ใหม่ ให้มีค่าเท่ากับ 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

I_{pmax} (A.) ----> 1.6534

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

Transformer weight (g.) ----> 28.8044

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 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 จะมีผลต่อเงื่อนไขที่การพันขดลวดรวมทั้งเงื่อนไขของปริมาณกระแสที่ไหลในขดลวดเท่านั้น 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 ที่ใหญ่ขึ้นอาจทำให้ขดลวดพันลงไปในช่วงว่างของแกนล้นออกมา แต่โดยส่วนใหญ่จะไม่เกิดปัญหานี้ นอกเสียจากว่าพื้นที่ที่เหลื่อในการพันขดลวดเหลื่ออยู่น้อยมากๆ ถ้าหากเกิดปัญหานี้จริง โปรแกรมจะเป็นตัวบอกว่าไม่มีขดลวดที่เลือกจาก Data Sheet ที่สามารถพันลงไปในช่วงว่างการพันของแกนได้ ซึ่งผู้ออกแบบต้องกลับไปทำการวนรอบครั้งที่ 3 (Loop 3) อีกครั้ง เพื่อเลือกจำนวนรอบของ N_p และ N_s ที่น้อยลง แล้วทำตามขั้นตอนเดิมซ้ำอีกครั้ง แต่การลดจำนวนรอบจะทำให้ค่าผลลัพธ์ของ d_p และ d_s มีค่าสูงขึ้นอีก ซึ่งก็อาจทำให้ไม่สามารถพันขดลวดลงไปได้เช่นกัน เพราะฉะนั้นการเลือกแกนใหม่ให้ใหญ่ขึ้นในการวนรอบครั้งที่ 2 (Loop 2) น่าจะเป็นการแก้ปัญหาที่ดีที่สุด

ผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิต
ชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบที่สุกดท้าย (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

          max
Iter  F-count  f(x)    constraint  Step-size  Directional  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

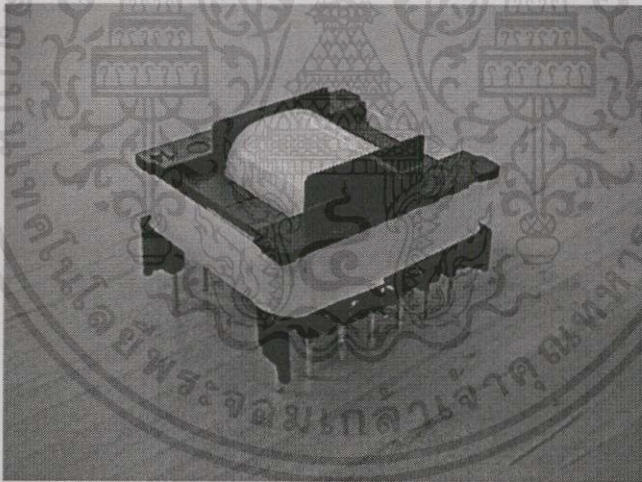
```

รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์ที่หน้าจอแสดงผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟ
แบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในรอบสุกดท้าย (Loop 4)

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมี
เงื่อนไขในรอบที่สุกดท้าย (Loop 4) โดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถสรุปค่าของตัวแปร
ต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรมเป็นดังตารางที่ 4.9 ได้ดังนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่สร้างขึ้น

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ด้วยวิธีที่นำเสนอ สามารถให้โครงสร้างที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติซึ่งสามารถนำไปสร้างได้จริง ส่วนการทดสอบลักษณะทางกายภาพและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A จะเป็นดังตารางที่ 4.10 ไม่วารณิ โคๆท่งสิน อักท่งหามมิ โห้คดแบลงเมือหา และดองอังก้องถึงเจ้าของเอกสารทุกกรท่งมทกรนาไปช และ 4.11

ตารางที่ 4.10 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่ง

ขนาด 12 V / 2 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คือน้ำหนักของ 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 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่ง

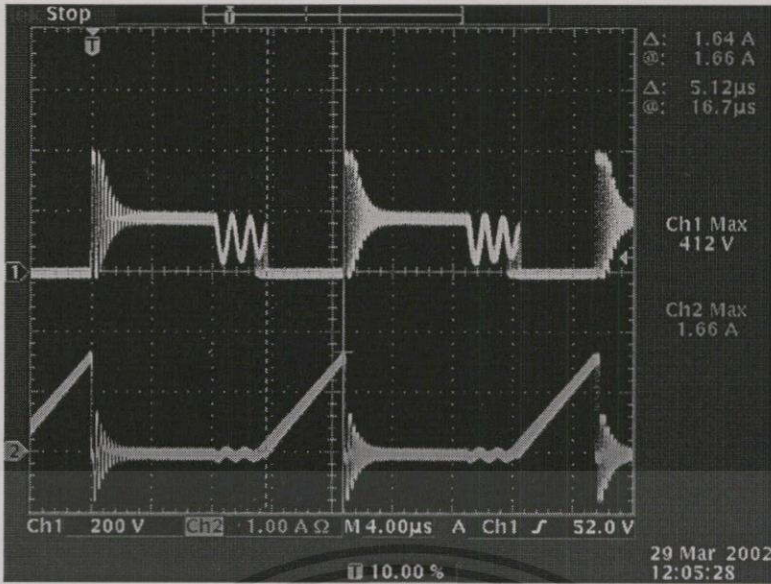
ขนาด 12 V / 2 A ขณะจ่าย Load 2A

		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

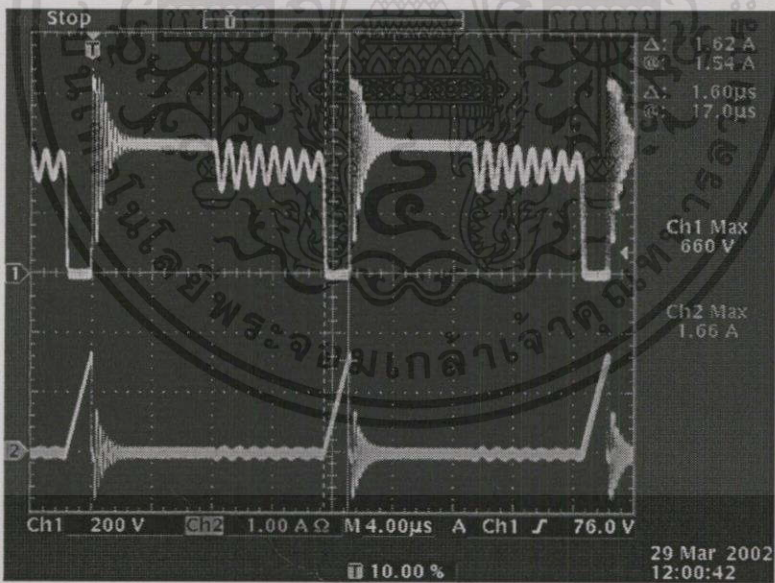
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหาและต้องแจ้งแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (W_{total}) ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จำนวน 2 ตัว จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปบ้างโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าน้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์ (W_c) ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ของน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่วัดได้จากต้นแบบจริงที่ไม่นำน้ำหนักของบอบบิน (W_{bob}) และ น้ำหนักอื่นๆ (etc.) เช่น น้ำหนักของเทปฉนวน มาคิดด้วย

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากต้นแบบจริง นั้นแสดงให้เห็นว่าการคำนวณมีความถูกต้อง นอกจากนี้ ยังได้ทำการวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงในขณะที่ทำการจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับซึ่งเป็นการวัดแรงดันและกระแสที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET ในวงจรดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



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



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

เอกสารนี้เป็น 2 A สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ขนาด 5 V/1.2A

ในการออกแบบหม้อแปลงดังกล่าวจะมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆในการออกซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ขนาด 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

หม้อแปลงความถี่สูงดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ที่ใช้กับแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายได้หลายระดับ นั่นคือสามารถใช้งานได้ทั่วโลก (Universal Input) เช่นเดียวกับการออกแบบแรก ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 40 kHz ซึ่งมีค่าไม่ต่ำจนทำให้เกิดเสียงรบกวนแก่ประสาทการได้ยินของมนุษย์ได้ อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟดังกล่าวเหมาะกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ซึ่งตัวแหล่งจ่ายไฟก็ควรมีขนาดเล็กเช่นกัน บอบบิ้นที่เลือกใช้จะเป็นแบบแนวตั้ง (Vertical) กล่าวคือ ขั้วที่ใช้ในการพันขดลวดของ Primary และ Secondary จะอยู่ด้านเดียวกัน ทำให้ลดพื้นที่ของแผ่น PCB ลงได้

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

ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ จะมีลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด 12V/2A ในตอนแรกทั้งหมด

4.3.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation)

การออกแบบโดยวิธีทั่วไปจะมีลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ในตอนแรกทั้งหมด ซึ่งสามารถสรุปผลการออกแบบเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.13 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอ

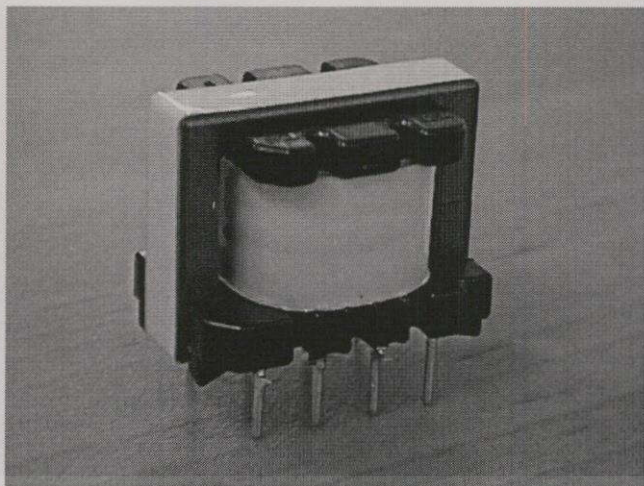
ขั้นตอนและวิธีการในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่ง ขนาด $5 \text{ V} / 1.2 \text{ A}$ ด้วยวิธีที่นำเสนอจะมีลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด $12 \text{ V} / 2 \text{ A}$ ในตอนแรกเช่นกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.14 ผลลัพธ์การปรับค่าของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด $5 \text{ V} / 1.2 \text{ A}$ 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 แต่เนื่องจากไม่สามารถหาแกนเบอร์ดังกล่าวในท้องตลาดได้ จึงอาศัยแกนเบอร์ 17 (EE25.4A) แทน จึงทำให้ผลลัพธ์ของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ต้นแบบจริงที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด $5 \text{ V} / 1.2 \text{ A}$ 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 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 5 V / 1.2 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คือน้ำหนักของ 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	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทางนามของคณะบดีและต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

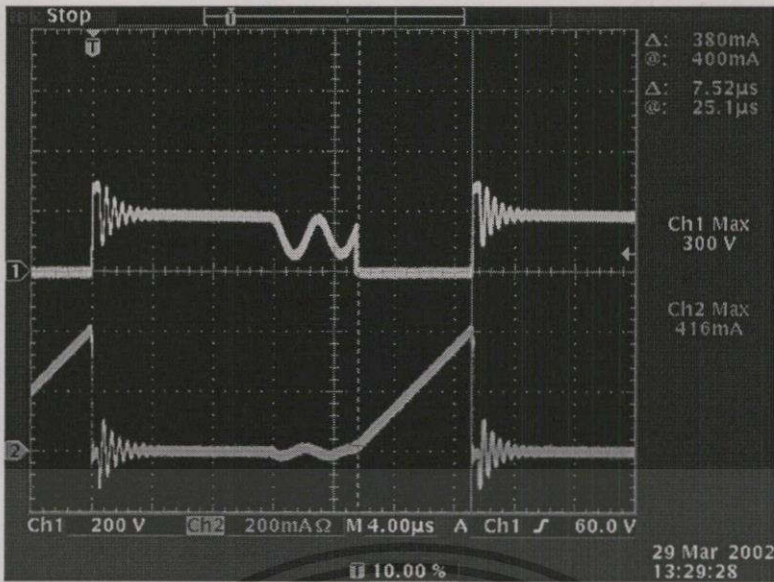
จากตารางที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (W_{total}) ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จำนวน 2 ตัว จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปบ้างโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าน้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์ (W_c) ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ของน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่วัดได้จากต้นแบบจริงที่ไม่นำน้ำหนักของขบอบบิน (W_{bob}) และ น้ำหนักอื่นๆ (etc.) เช่น น้ำหนักของเทปฉนวน มาคิดด้วย

ตารางที่ 4.16 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซึ่งขนาด 5 V / 1.2 A ขณะจ่าย Load 1.2 A

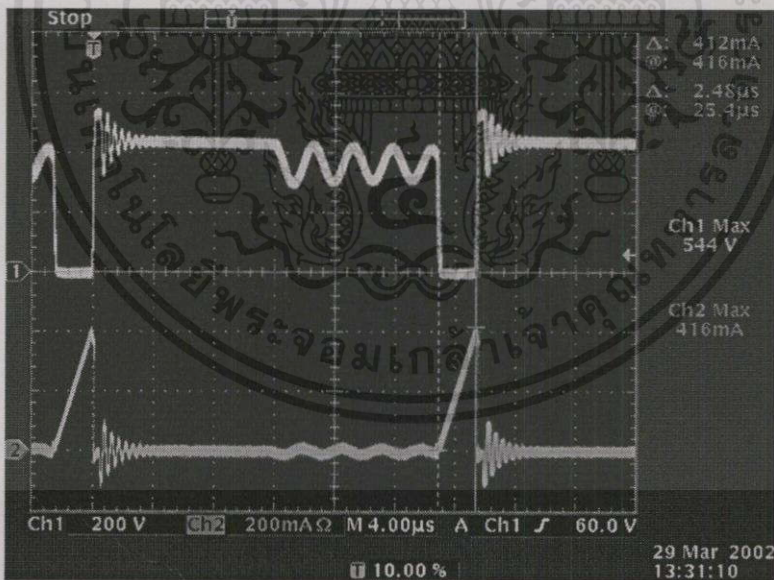
		Program	Prototype	Error (%)
85 VAC	$I_{p(max)}$ (A)	0.4171	0.416	0.26
	$t_{on(max)}$ (μ s)	7.5	7.52	-0.27
	$t_{off(max)}$ (μ s)	11.721	12	-2.33
	f (kHz)	40	39.68	0.81
264 VAC	$I_{p(max)}$ (A)	0.4171	0.416	0.26
	$t_{on(max)}$ (μ s)	2.4579	2.48	-0.89
	$t_{off(max)}$ (μ s)	11.721	12	-2.33
	f (kHz)	40	39.06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

จากตารางที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากต้นแบบจริง นั่นแสดงให้เห็นว่าการคำนวณมีความถูกต้อง นอกจากนี้ ยังได้ทำการวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงในขณะที่ทำการจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับซึ่งเป็นการวัดแรงดันและกระแสที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET ในวงจรดังรูปที่ 4.10 และ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4A

ในการออกแบบหม้อแปลงดังกล่าวจะมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 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	-
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_1	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

หม้อแปลงความถี่สูงดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 24 V / 4 A ที่ใช้กับแรงดันขาเข้าของแหล่งจ่ายได้หลายระดับ นั่นคือสามารถใช้งานได้ทั่วโลก (Universal Input) เช่นเดียวกับการออกแบบแรก ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 100 kHz ซึ่งเหมาะกับแหล่งจ่ายไฟที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากความถี่ที่สูงขึ้นสามารถลดขนาดและน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงลงได้ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.4

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

4.4.1 การออกแบบโดยวิธีทั่วไป (Manual Calculation)

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

ตารางที่ 4.18 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด $24\text{ V} / 4\text{ A}$ 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 การออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ

ขั้นตอนและวิธีการในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด $24\text{ V} / 4\text{ A}$ ด้วยวิธีที่นำเสนอจะมีลักษณะเดียวกันกับการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายแบบสวิตชิ่งขนาด $12\text{ V} / 2\text{ A}$ 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 ลักษณะทางกายภาพของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่ง

ขนาด 24 V / 4 A ที่สร้างขึ้น (เครื่องหมาย * ไม่คติน้ำหนักของ 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 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่ง

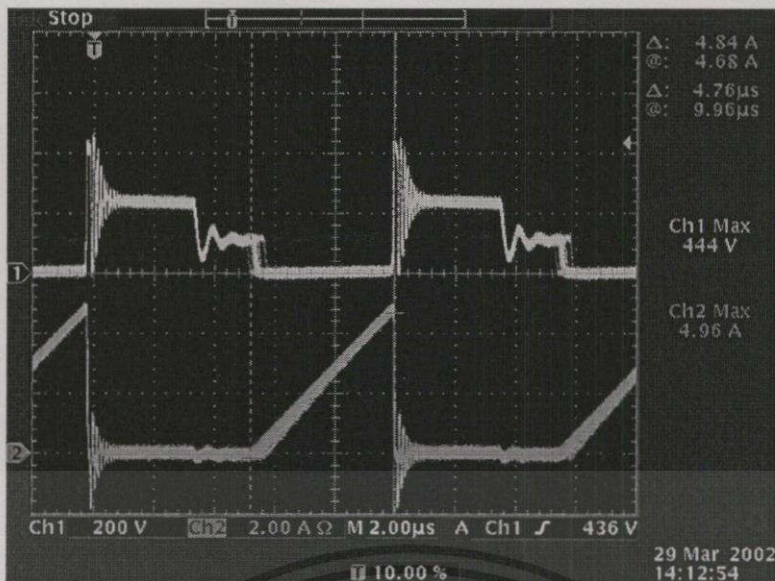
ขนาด 24 V / 4 A ขณะจ่าย Load 4 A

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

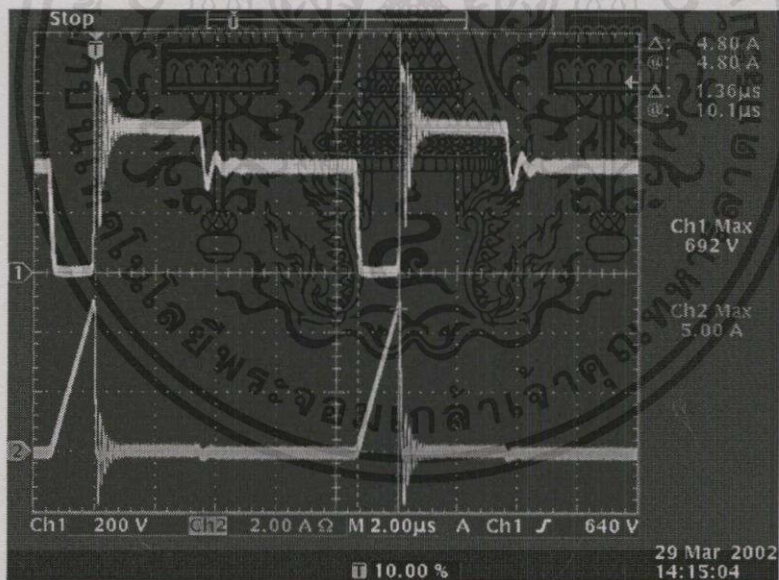
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (W_{total}) ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จำนวน 2 ตัว จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปบ้างโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าน้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์ (W_c) ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ของน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่วัดได้จากต้นแบบจริงที่ไม่นำน้ำหนักของบอบบิน (W_{bob}) และ น้ำหนักอื่นๆ (etc.) เช่น น้ำหนักของเทปฉนวน มาคิดด้วย

จากตารางที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (Program) และที่ได้จากต้นแบบ (Prototype) จะมีค่าคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย ซึ่งสามารถคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error) ที่ได้จากโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากต้นแบบจริง นั้นแสดงให้เห็นว่าการคำนวณมีความถูกต้อง นอกจากนี้ ยังได้ทำการวัดรูปคลื่นทางไฟฟ้าของหม้อแปลงความถี่สูงในขณะทำการจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับซึ่งเป็นการวัดแรงดันและกระแสที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET ในวงจรดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



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



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การลดน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อม

จากผลการทดสอบที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงจะมีขนาดและน้ำหนักที่ขึ้นกับพิกัดกำลังงานขาออกโดยตรง อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบสามารถปรับพารามิเตอร์บางตัว โดยที่ยังคงความสามารถในการจ่ายกำลังงานขาออกได้เหมือนเดิม ในงานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ตัว ดังต่อไปนี้

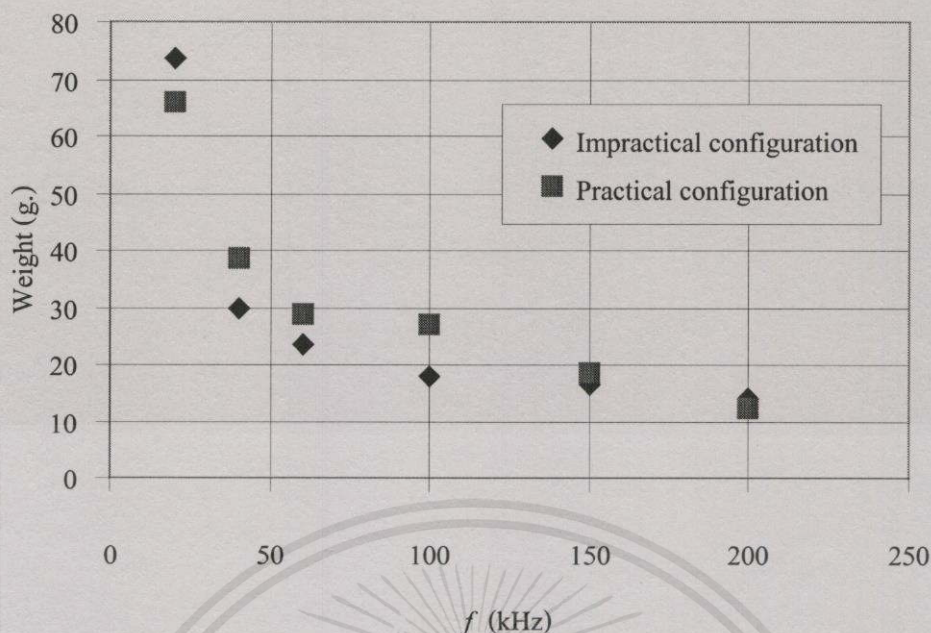
4.5.1 ความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง

จากสมการที่ 3.15 จะเห็นได้ว่า ความถี่มีผลโดยตรงต่อกำลังงานขาออก ที่พิกัดกำลังงานขาออกเดียวกัน ความถี่ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ (L_p) ลดลงนั่นคือจำนวนรอบที่ลดลง, ขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่ลดลง และระยะช่องอากาศ (g) มีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า พารามิเตอร์เหล่านี้มีผลโดยตรงต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทั้งสิ้น ส่วนค่ากระแสสูงสุดของ Primary ($I_{p(max)}$) ในสมการที่ 3.15 จะมีค่าเท่าเดิม เนื่องจาก ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาในการ On สูงสุด ($t_{on(max)}$) ที่ลดลง และค่าความเหนี่ยวนำที่ลดลง จะทำให้ค่ากระแสดังกล่าวมีค่าคงเดิม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของความถี่ (f) ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง ขนาด 12 V / 2 A ที่ค่าต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบไปแล้วข้างต้น เพื่อทดสอบว่าพารามิเตอร์ความถี่มีผลอย่างไรต่อน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (Weight) โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งได้ผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง f และ Weight ได้ดังรูปที่ 4.15 (ภาคผนวก ง)

จากจากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า ความถี่ที่สูงขึ้นจะทำให้น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงอย่างมากในช่วงแรก แต่ความถี่ที่สูงจนเกินไปจะไม่ทำให้น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงมากนัก ในทางปฏิบัติช่วงความถี่ที่เหมาะสมของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง จะอยู่ระหว่าง 40 kHz – 150 kHz ความถี่ที่ต่ำจนเกินไป จะสามารถกำเนิดสัญญาณเสียงรบกวนต่อประสาทการได้ยินของมนุษย์ได้ เพราะช่วงความถี่สูงสุดที่ประสาทหูของมนุษย์สามารถได้ยินจะอยู่ที่ 20 kHz ส่วนความถี่ที่สูงจนเกินไปจะก่อให้เกิดการสูญเสียในแกน (Core Loss), การสูญเสียในขดลวด (Copper Loss) และการสูญเสียอื่นๆ ที่มากขึ้น นอกจากนั้นยังทำให้การออกแบบวงจรมีความยุ่งยากมากขึ้นไปตามลำดับ [2, 12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกร ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

สำหรับน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงในทางปฏิบัติ (Practical Configuration) ที่เห็นจากรูปที่ 4.15 นั้นคือผลของน้ำหนักที่ได้หลังจากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอในรอบสุดท้าย (Loop 4) ซึ่งเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ จะเห็นได้ว่า โดยส่วนใหญ่ค่าน้ำหนักที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติจะสูงกว่าในทางอุดมคติ (Impractical Configuration) ที่เป็นผลของน้ำหนักที่ได้หลังจากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอในรอบแรก (Loop 1) อยู่เล็กน้อย ยกเว้นที่ความถี่ 20 kHz และ 200 kHz ซึ่งค่าน้ำหนักที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติจะต่ำกว่า สาเหตุเกิดจากผลของน้ำหนักที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) ซึ่งจะอาศัยค่าของ K_1 ถึง K_5 เป็นค่าเฉลี่ยของแกนที่มีทั้งหมดที่มีอยู่ของผู้ผลิต และค่าน้ำหนักในทางอุดมคติจะเป็นค่าที่ได้หลังจากมีการเลือกใช้แกนเบอร์ใดเบอร์หนึ่งซึ่งมีค่า K_1 ถึง K_5 เฉพาะตัว ซึ่งอาจมีค่าที่สูงกว่าได้ จึงเป็นผลทำให้ค่าน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงในทางปฏิบัติมีค่าสูงกว่า ฉะนั้น ค่าน้ำหนักที่ได้จากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) จะเป็นเพียงการแสดงแนวโน้มของน้ำหนักที่จะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเท่านั้น

นอกจากนี้ ความแตกต่างระหว่างค่าน้ำหนักที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติและในทางอุดมคติสามารถลดลงได้ ถ้าหากแกนของผู้ผลิตใน Data Sheet มีหลากหลายมากขึ้น เนื่องจาก

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

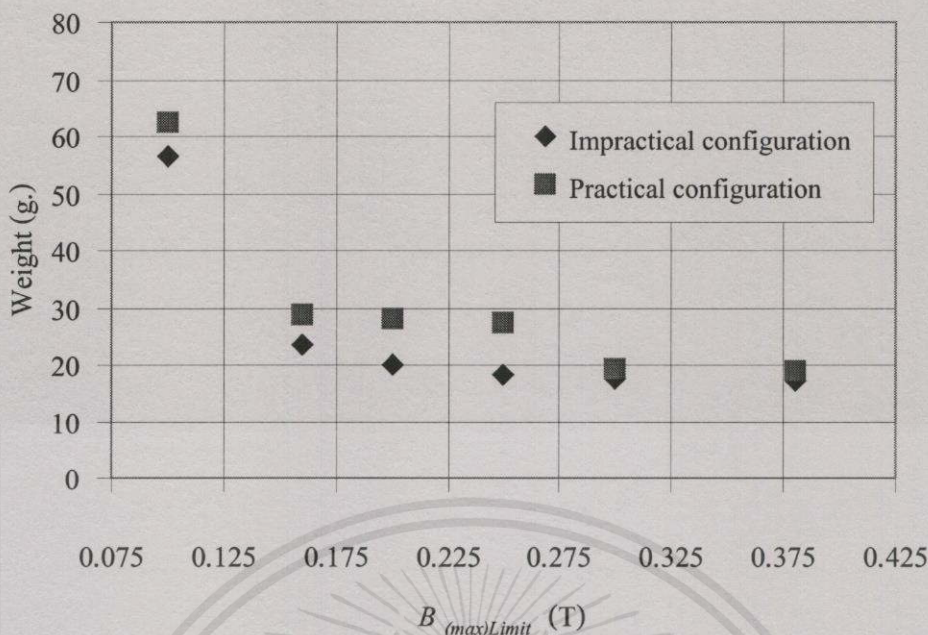
4.5.2 พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด

จากสมการที่ 3.31 จะเห็นได้ว่า พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ($B_{(max)Limit}$) ที่สูงขึ้นจะทำให้ผลคูณของจำนวนรอบของ Primary (N_p) และพื้นที่หน้าตัดแกนกลาง (A_e) มีค่าลดลง ส่วนผลคูณของค่าความเหนี่ยวนำ (L_p) และค่ากระแสสูงสุดของ Primary ($I_{p(max)}$) จะมีค่าเท่าเดิม สาเหตุก็มาจากสมการที่ 3.31 ซึ่งผลคูณของค่าความเหนี่ยวนำและกำลังสองของกระแสสูงสุดของ Primary จะไม่เปลี่ยนแปลงเพราะความถี่ (f) และกำลังงานขาออกสูงสุด ($P_{out(max)}$) ไม่เปลี่ยนแปลง

จากผลคูณของจำนวนรอบของ Primary และพื้นที่หน้าตัดแกนกลาง ที่ลดลง สามารถทำให้น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าลดลงได้ โดย การลดค่าพื้นที่หน้าตัดแกนกลาง จะทำให้น้ำหนักลดลงมากที่สุด การลดจำนวนรอบของ Primary ก็同样ทำให้น้ำหนักลดลงได้ปานกลาง อย่างไรก็ตามการลดค่าทั้งสองจะมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำลดลงซึ่งจะทำให้สมการที่ 3.31 ขาดความสมดุล การลดระยะช่องอากาศ (g) จึงเป็นทางออกที่ดีที่จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำยังคงรักษาค่าเดิมเอาไว้ได้ แม้ว่าการลดระยะช่องอากาศ จะทำให้น้ำหนักมากขึ้น แต่ก็มีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ที่ค่าต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบไปแล้วข้างต้น เพื่อทดสอบว่าพารามิเตอร์พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด มีผลอย่างไรต่อน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูง (Weight) โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งได้ผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $B_{(max)Limit}$ และ Weight ได้ดังรูปที่ 4.16 (ภาคผนวก จ)

จากรูปที่ 4.16 ผลที่ได้จากการปรับค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด จึงสามารถลดน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงได้โดย ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ที่สูงขึ้นจะทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงอย่างมากในช่วงแรก แต่ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่สูงจนเกินไป จะไม่ทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงมากนัก ในทางปฏิบัติค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เหมาะสมของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งจะอยู่ที่ 0.16 T สำหรับแกนเฟอร์ไรต์ต่างๆไป การใช้เฟอร์ไรต์ชนิดพิเศษที่มีการสูญเสียในแกนต่ำจะสามารถใช้งานได้ที่ค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดสูงขึ้น แต่ราคาก็จะสูงขึ้นเช่นกันจึงไม่เป็นที่นิยม [12]



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

4.6 การสูญเสียในแกน (Core loss) และการสูญเสียในขดลวด (Copper loss)

แม้ว่าในงานวิจัยนี้มีได้กล่าวถึงค่าความสูญเสียในแกนและความสูญเสียในขดลวด ทั้งนี้สาเหตุก็เนื่องมาจากการเลือกค่าพิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ($B_{(max)Limit}$), ค่าความถี่ (f) และ ค่า Circular Mills per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าผกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) ของขดลวดแต่ละขด มีค่าที่เหมาะสมซึ่งจะเกิดความสูญเสียในลักษณะดังกล่าวต่ำมาก โดยทั่วไป ค่ากำลังงานสูญเสียในแกนสามารถคำนวณได้จากกราฟค่าความสูญเสียในแกนต่อปริมาตรซึ่งดูได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตแต่ละราย และค่าความสูญเสียในขดลวดสามารถคำนวณได้จากกำลังงานสูญเสียจากค่าความต้านทานไฟสลับ (AC Resistance) ซึ่งมีค่าเป็นอัตราส่วนกับค่าความต้านทานไฟตรง (DC Resistance) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดที่เกิดจากผลของ Skin Effect [4, 5, 12]

เพื่อเป็นการพิสูจน์ให้เห็นถึงค่าความสูญเสียที่ต่ำ จึงได้ทำการคำนวณค่าความสูญเสียในแกนและความสูญเสียในขดลวดของต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 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 ค่าความสูญเสียในขดลวดของต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่สร้างขึ้นทั้ง 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

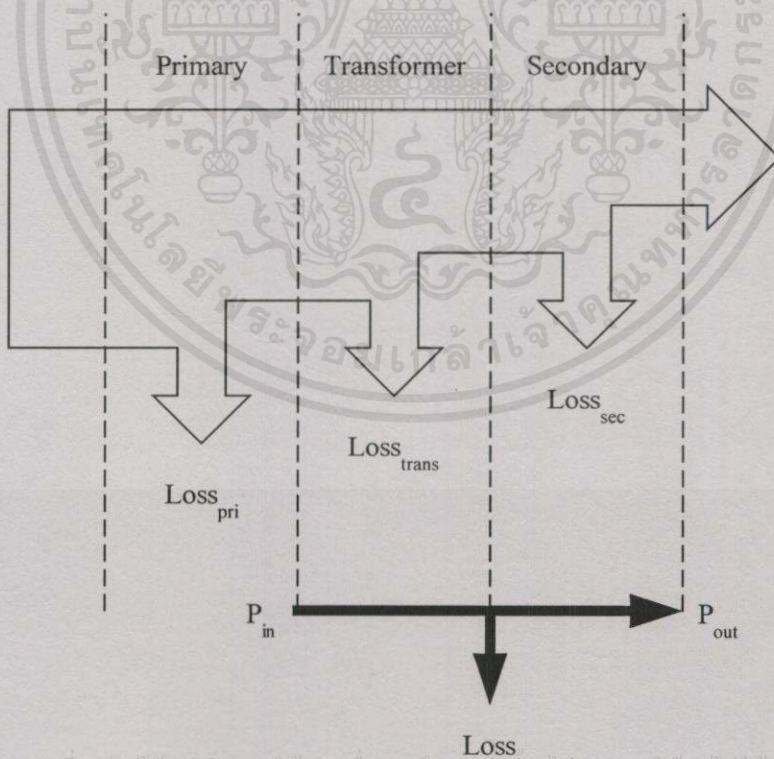
		Temperature (°C)				
		Ambient	Measurement		Rise	
			Winding	Core	Winding	Core
5 V / 1.2 A	85 VAC	27.9	35.8	32.7	7.9	4.8
	264 VAC	27.9	35.0	32.2	7.1	4.3
12 V / 2 A	85 VAC	27.9	43.2	37.4	15.3	9.5
	264 VAC	28.0	43.5	38.4	15.5	10.4
24 V / 4 A	85 VAC	28.1	59.2	45.1	31.1	17.0
	264 VAC	28.5	62.7	46.2	34.2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

จากตารางที่ 4.22 จะเห็นได้ว่า กำลังงานสูญเสียในแกนมีค่าไม่เกินสูงนักสำหรับต้นแบบของหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 แบบ และจากตารางที่ 4.23 จะเห็นได้ว่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดจะมีค่าน้อยมาก นั่นแสดงถึงค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนและขดลวดสามารถตัดทิ้งไปได้ถ้าหากการเลือกค่าพิคัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด, ค่าความถี่ และ ค่า Circular Mills per Amp หรือ *CMA* ซึ่งเป็นค่าผกผันของค่าความหนาแน่นกระแสของขดลวดแต่ละขด มีค่าที่เหมาะสม [12]

นอกจากนี้ ยังได้ทำการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Temperature Rise) ของหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัว ดังตารางที่ 4.24 ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากภาคผนวก ฉ

ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงยังได้มีการกำหนดค่าเพื่อสำหรับการออกแบบ (Design Margin) เอาไว้เพื่อเป็นการยืนยันว่า หม้อแปลงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอจะสามารถจ่ายกำลังงานขาออกได้เพียงพอต่อความต้องการของ Load สูงสุด

เพื่อเป็นการพิสูจน์ให้เห็นถึงค่าเพื่อสำหรับการออกแบบ จึงได้ทำการวัดกำลังงานขาเข้าของหม้อแปลงความถี่สูงและกำลังงานขาออกของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิดซิ่ง โดยที่การวัดกำลังงานขาเข้าของหม้อแปลงความถี่สูงจะใช้วิธีการอ่านค่าจากค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นกำลังงานใน 1 คาบเวลา [15] ของหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัว ดังรูปที่ 4.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งที่พิจารณากำลังงานขาเข้าหม้อแปลงความถี่สูงและกำลังงานขาออกของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิดซิ่งสำหรับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.25 กำลังงานขาเข้าของดินแบบหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัวที่สร้างขึ้นมาในขณะจ่าย 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 % ซึ่งค่าดังกล่าวจะสูญเสียไปในรูปของกำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงความถี่สูงและวงจรเรียงกระแสทางด้าน Secondary ดังรูปที่ 4.17 และจากตารางที่ 4.24 จะเห็นได้ว่า ค่าเพื่อสำหรับการออกแบบมีค่าที่เหมาะสม หม้อแปลงความถี่สูงสามารถให้กำลังงานขาออกได้ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

สืบเนื่องมาจากการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงโดยทั่วไป (Manual Calculation) ดังตัวอย่างในหัวข้อที่ 4.2.1 ไม่อาจทราบได้ว่า ผลการออกแบบที่จะได้มานั้น มีผลทำให้น้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงมีค่าน้อยที่สุดด้วยเงื่อนไขที่กำหนดเอาไว้หรือไม่ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบซ้ำแล้วซ้ำอีก ซึ่งจะทำให้สูญเสียเวลาในการออกแบบไปเป็นอย่างมาก แต่ถ้าหากนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขที่สร้างขึ้นโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.3 เข้ามาประยุกต์ใช้ โปรแกรมจะสามารถค้นหาค่าของตัวแปรที่เหมาะสมในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

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

โปรแกรมห้ยังสามารถทำให้ผู้ออกแบบทราบถึงแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อม โดยสามารถลดเวลาในการวิเคราะห์หลังได้ ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงทางอ้อมเช่นความถี่ และพิคัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด จะสามารถทำให้น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงลดลงได้เช่นกันดังรูปที่ 4.15 และ 4.16

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการทดสอบที่ได้จากการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัวโดยวิธีที่น่าเสนอ และจากการสร้างต้นแบบจริงในบทที่ 4 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงเป็นที่น่าพอใจสามารถนำไปใช้งานจริงได้ น้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์, ขดลวด Primary, ขดลวด Secondary และน้ำหนักโดยรวมของต้นแบบที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรม ดังตารางที่ 5.1 จะมีผิดพลาดอยู่บ้างอันเนื่องมาจากน้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์ จากการตรวจสอบในภายหลังพบว่า มิติต่างๆของแกนเฟอร์ไรต์มีค่าเผื่อ (Tolerance) อยู่มาก นอกจากนั้นค่าความหนาแน่นที่ได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตก็เป็นเพียงค่าเฉลี่ยโดยประมาณเท่านั้น จึงทำให้ผลการคำนวณของน้ำหนักจากการหาปริมาตรรวมของแกนเฟอร์ไรต์แล้วนำมาคูณกับความหนาแน่นไม่ตรงกับค่าจริง ออกทั้งน้ำหนักหม้อแปลงเบาเกินไปและต้องอ้างอิงองฉัของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ของแกนเฟอร์ไรต์มีค่าผิดพลาดไป แม้ว่าจะนำค่าปริมาตรของแกนเฟอร์ไรต์ที่ได้จาก Data Sheet ของผู้ผลิตเองมาใช้ในการคำนวณก็ยังมีค่าไม่เท่ากันกับน้ำหนักที่ผู้ผลิตระบุไว้ใน Data Sheet

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (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

ส่วนค่าของน้ำหนักของขดลวดไบอัส ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำการวัดจริงได้ เนื่องจากมีค่าต่ำมากและสุดท้ายคือ ค่าน้ำหนักของบอบบินและส่วนประกอบอื่นๆ เช่น น้ำหนักของเทปฉนวนและเทปที่คั่นเป็นระยะคืบคลานที่ปลอดภัย (Creepage Safety Distance) ตามมาตรฐานซึ่งมีได้กล่าวถึงในงานวิจัยชิ้นนี้ จะทำให้ค่าน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงผิดพลาดไปได้เช่นกัน

จากการวิเคราะห์น้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการคำนวณในรอบแรก (Loop 1) และน้ำหนักสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณในรอบที่สี่ (Loop 4) ที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติจะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ผลของน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่น้อยที่สุดไม่อาจนำมาสร้างจริงได้เนื่องจากวัสดุต่างๆ เช่น แกนเฟอร์ไรต์หรือขดลวดที่นำมาใช้ในการสร้างหม้อแปลงความถี่สูงไม่มีขายในท้องตลาด จึงจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการ Interactive เข้ามาช่วยในการปรับค่าของตัวแปรต่างๆ ให้เป็นค่าที่มีอยู่จริง ซึ่งจะทำให้ผลของน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงมีค่าสูงขึ้นมาเล็กน้อย แต่ก็ยังคงเป็นจุดที่มีน้ำหนักน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการออกแบบโดยวิธีทั่วไป ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอ (Program) ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขในรอบแรก (Loop 1) และ รอบสุดท้าย (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 การปรับค่าความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งและค่าพิคคัพลักซ์แม่เหล็กสูงสุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่และค่าพิคคัพลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่สูงขึ้นสามารถลดน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงได้ แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าที่ความถี่ที่สูงมาก ๆ (150 – 300 kHz) และค่าพิคคัพลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ค่าสูงมาก ๆ (0.25 – 0.4 T) ก็จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักหม้อแปลงมากนัก

นอกจากนี้ค่าความสูญเสียในแกนและความสูญเสียในขดลวดจะมีผลน้อยมาก ถ้าหากค่าความถี่ใช้งาน, พิกัดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดและ ค่า Circular Mills per Amp หรือ CMA ซึ่งเป็นค่าผกผันของค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) มีค่าที่เหมาะสม

เมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการออกแบบที่นำเสนอกับวิธีการแบบโดยทั่วไปจะเห็นได้ว่า วิธีที่นำเสนอจะให้โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบากว่าในการออกแบบโดยทั่วไปดังตารางที่ 5.3 เนื่องจากวิธีทั่วไปจำเป็นต้องทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆอยู่หลายตัวด้วยกัน ซึ่งบางตัวไม่อาจคาดคะเนได้ว่าจะมีผลกระทบต่อน้ำหนักโดยรวมอย่างไร นอกจากนี้ ขั้นตอนการเลือกแกนก็อาจสร้างปัญหาให้กับผู้ออกแบบได้เช่นกันเนื่องจาก ผู้ออกแบบไม่อาจทราบได้ว่าแกนขนาดใดมีความเหมาะสมกับ SMPS ที่ต้องการ ถ้าหากเลือกแกนไม่ดั่งจะทำให้ไม่สามารถพันขดลวดลงไปได้ ซึ่งต้องวนกลับมาเลือกแกนใหม่

ตารางที่ 5.3 น้ำหนักที่ลดลงของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบ โดยวิธีทั่วไป (Manual) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่นำเสนอ (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบการออกแบบโดยวิธีทั่วไปและวิธีที่นำเสนอ

หัวข้อ	วิธีทั่วไป	วิธีที่นำเสนอ
ประสบการณ์, ความรู้และความเข้าใจใน SMPS ของผู้ออกแบบ	สูงมาก	ปานกลาง (เพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆให้มีลักษณะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ)
ความรวดเร็วในการออกแบบ	นาน	รวดเร็ว
การปรับปรุงพารามิเตอร์ย้อนหลังในระหว่างการออกแบบ	ต้องทำการคำนวณใหม่ทั้งหมด	กระบวนการ Interactive สามารถให้ผลลัพธ์ได้ทันที
การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์แต่ละตัวของ SMPS (เพื่อการศึกษาแนวโน้ม)	ได้ แต่ต้องอาศัยการคำนวณหลายๆ ครั้ง	กระบวนการ Interactive สามารถให้ผลลัพธ์ได้ทันที
น้ำหนักโดยรวมน้อยที่สุด	ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบในการเลือกค่าของตัวแปรต่างๆ	น้อยที่สุดทุกครั้งภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดโดยอาศัยกระบวนการ Interactive

5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงโดยวิธีที่นำเสนอนี้มีได้คำนึงถึงผลกระทบโดยตรงของค่าความสูญเสียของหม้อแปลงความถี่สูงที่ประกอบไปด้วย ความสูญเสียในแกน และ ความสูญเสียในขดลวด ฉะนั้นแนวทางในการพัฒนาให้วิธีการดังกล่าวให้สามารถคำนึงถึงผลกระทบเหล่านี้หรือแม้แต่การนำไปวิเคราะห์ผลทางอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลงความถี่สูงที่จะทำการสร้างได้นั้นเป็นสิ่งที่น่าสนใจทีเดียว

นอกจากนี้โครงสร้างของแกนเฟอร์ไรต์ยังสามารถพัฒนาให้สามารถนำไปออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่มีแกนเฟอร์ไรต์ในแบบอื่นๆ ได้หลายรูปแบบ และลักษณะลวดที่ใช้ในการพันชนิดอื่นที่เหมาะสมกับความต้องการในลักษณะต่างๆ เช่น ขดลวดแบบ Litz ที่เหมาะสมกับความถี่สูง, ลวดที่ใช้ฉนวนสามชั้น (Triple Insulation) ที่สามารถพันลงไปโนบอบบิ้นโดยไม่ต้องกำหนดระยะคืบคานปลอดภัยจากขอบของบอบบิ้นในแต่ละด้าน เป็นต้น

จากตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีที่นำเสนอจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีทั่วไป แม้ว่าจะมีค่าที่ค่อนข้างน้อยแต่แนวโน้มของน้ำหนักที่ลดลงไปได้จะมีค่ามากขึ้นตามขนาดและพิคกิ้งกำลังที่มากขึ้น สาเหตุเนื่องจากโดยทั่วไปผู้ผลิต

แกนเฟอร์ไรต์แต่ละรายจะผลิตแกนเฟอร์ไรต์สำหรับแกนขนาดเล็กที่มีหลายขนาดให้เลือกใช้ น้ำหนักของแกนขนาดเล็กๆ เหล่านั้นจะมีน้ำหนักที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งไม่เหมือนกับแกนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งแต่ละตัวจะมีขนาดและน้ำหนักที่ค่อนข้างแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่าวิธีที่นำเสนอนี้จะมีประโยชน์มากในงานที่มีการออกแบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งที่มีกำลังสูง

ในงานวิจัยนี้ยังมีปัญหาในเรื่องของการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรต่างๆ เพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขของการวนรอบ (Loop) ในแต่ละครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวนรอบแรก (Loop 1) เนื่องจากจำนวนตัวแปรจะมีมากที่สุด นั่นคือ 7 ค่า จึงทำให้เสถียรภาพของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขของการวนรอบ ในแต่ละครั้งลดลง ผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องคาดคะเนก่อนทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ ด้วย

นอกจากนี้ค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันอาจให้ผลลัพธ์ของน้ำหนักและค่าของตัวแปรที่ปรับใหม่ โดยโปรแกรมแตกต่างกันหรืออาจจะหาคำตอบไม่พบเลย เนื่องจากในบางครั้ง กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข โดยวิธีตรง (Direct Method) อาจให้ค่าที่ต่ำที่สุดเฉพาะช่วง (Local Minimum) มิใช่ค่าที่ต่ำที่สุดจริง (Global Minimum) โดยจะขึ้นกับค่าเริ่มต้นของฟังก์ชัน ดังนั้นวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการ Interactive ที่อนุญาตให้ผู้ออกแบบมีส่วนร่วมในการตัดสินใจและเลือกปรับแต่งตัวแปรแต่ละตัวซึ่งจะช่วยให้กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากขึ้น

แนวทางในการพัฒนาวิธีดังกล่าวสามารถใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข โดยวิธี Stochastic เข้ามาช่วยในการหาคำตอบที่ให้ค่าของสมการเป้าหมายต่ำที่สุดจริง ซึ่งจะขจัดปัญหาของค่าเริ่มต้นดังกล่าวออกไปได้อย่างแท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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. เทคนิคและการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย. 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]. Natherlands : 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 สัจจวรศิลป์, วรรัตน์ กัทธอมรกุล. **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.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

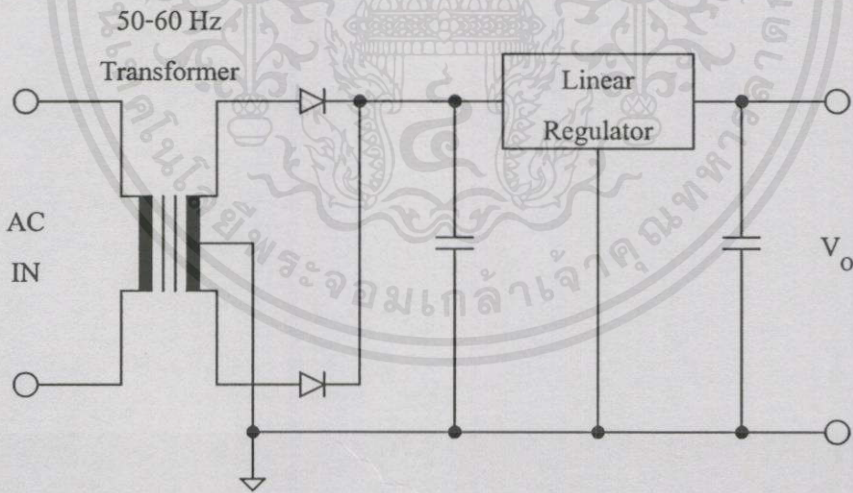
ก.1 ความแตกต่างระหว่างแหล่งจ่ายไฟแบบอื่นๆ กับแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ ชนิด FLY-BACK

แหล่งจ่ายไฟชนิดอื่นที่สามารถใช้แทนแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ ชนิด FLY-BACK สำหรับกำลังต่ำ ก็คือ แหล่งจ่ายไฟแบบลิเนียร์ (Linear Supplies) และแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิดอื่นๆ เช่น คอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK, คอนเวอร์เตอร์ชนิด Forward เป็นต้น

ก.1.1 แหล่งจ่ายไฟแบบลิเนียร์ (Linear Supplies)

แหล่งจ่ายไฟแบบลิเนียร์จะใช้คุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแรงดันสูงกระแสสลับ 50 – 60 Hz แปลงระดับแรงดันโดยใช้หม้อแปลง แล้วผ่านวงจรเรียงกระแส (Rectifier) จากนั้นจะเข้าสู่วงจรกรอง (Filter) และลิเนียร์เรกกูเลเตอร์ (Linear Regulator) ดังรูปที่ ก.1 แหล่งจ่ายไฟประเภทนี้มีราคาถูกและมีเสถียรภาพที่ดีแต่มีข้อเสียอื่นๆอีกดังต่อไปนี้

- มีขนาดใหญ่
- มีน้ำหนักมาก
- มีประสิทธิภาพต่ำ
- ใช้ระดับแรงดันของแหล่งกำเนิดได้ไม่กว้างนัก



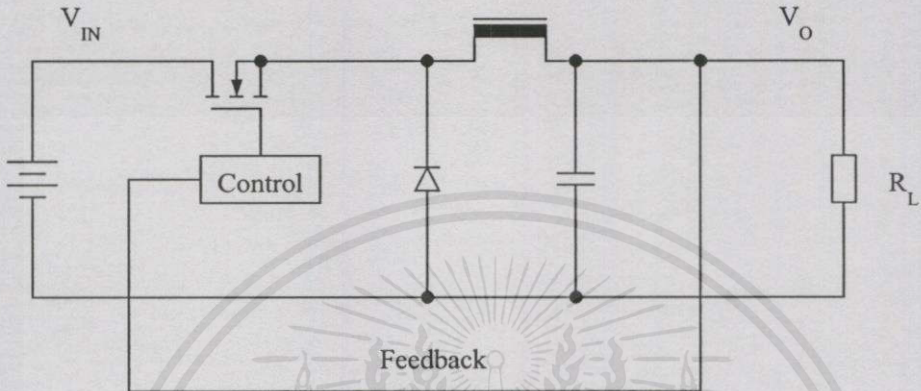
รูปที่ ก.1 วงจรพื้นฐานของแหล่งจ่ายไฟแบบลิเนียร์ (Linear Supplies)

ก.1.2 แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง

เอกสารนี้เขียนขึ้นสำหรับใช้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ

ก.1.2.1 คอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK

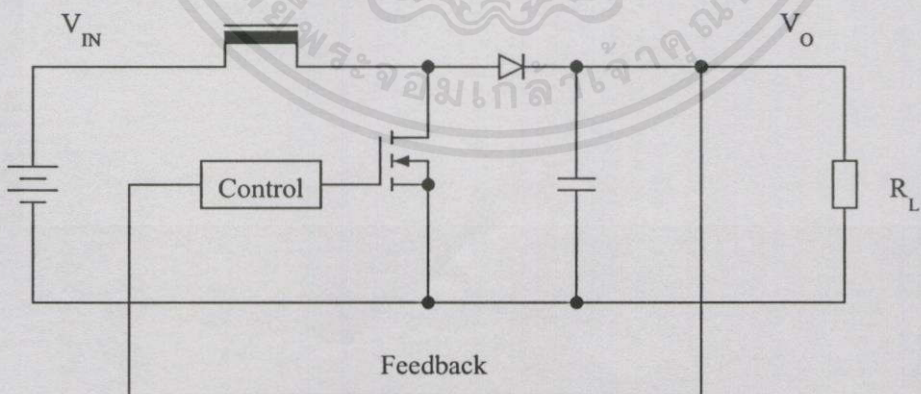
จากรูปที่ ก.2 เป็นวงจรหลักๆของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK มักจะนำไปใช้ในการลดระดับแรงดันจากแหล่งกำเนิดที่เป็นแรงดันสูงไปยังแรงดันขาออกที่มีระดับแรงดันที่ต่ำกว่า



รูปที่ ก.2 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK

ก.1.2.2 คอนเวอร์เตอร์ชนิด BOOST

จากรูปที่ ก.3 เป็นวงจรหลักๆของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิด BOOST มักจะนำไปใช้ในการเพิ่มระดับแรงดันจากแหล่งกำเนิดที่เป็นแรงดันต่ำไปยังแรงดันขาออกที่มีระดับแรงดันที่สูงกว่า



รูปที่ ก.3 เป็นวงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด BOOST เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

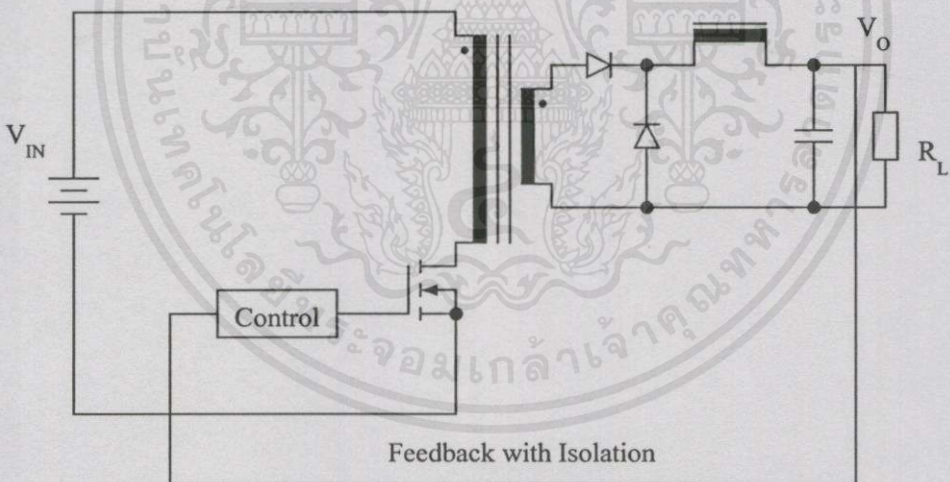
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1.2.3 คอนเวอร์เตอร์ชนิด FORWARD

จากรูปที่ ก.4 เป็นวงจรหลักๆของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิด FORWARD จากวงจรจะเห็นได้ว่า มีลักษณะคล้ายกับวงจรของคอนเวอร์เตอร์ชนิด BUCK เพียงแต่สามารถจ่ายไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันหลายค่า, แรงดันที่เป็นบวกหรือลบ, แรงดันขาออกที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าแรงดันขาเข้าได้ โดยขึ้นอยู่กับหม้อแปลงที่ออกแบบเอาไว้ นอกจากนี้หม้อแปลงยังทำหน้าที่แบ่งแยกวงจรทางแหล่งกำเนิด (Primary) ออกแรงดันขาออก (Secondary)

คอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้เหมาะสำหรับระดับกำลังขาออกตั้งแต่ 100 W ถึง 300 W แต่ข้อเสียของคอนเวอร์เตอร์ชนิด Forward ก็มีดังต่อไปนี้

- 1) ต้องการตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และ ไดโอด สำหรับแรงดันขาออกแต่ละตัวซึ่งในกรณีที่มีแรงดันขาออกหลายๆค่าก็จะต้องใช้จำนวนตัวเหนี่ยวนำและไดโอดเท่ากับจำนวนแรงดันขาออกเหล่านั้น
- 2) ต้องใช้วงจรป้อนกลับที่มีการแยกกันทางไฟฟ้าเข้ามาช่วยควบคุมระดับแรงดันขาออกให้เป็นไปตามที่ต้องการ เช่น Photo Coupler



รูปที่ ก.4 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FORWARD

ก.1.2.4 คอนเวอร์เตอร์ที่มีสวิตช์หลายตัว (Multi Switch Converter)

คอนเวอร์เตอร์ประเภทนี้จะรวมถึงคอนเวอร์เตอร์ชนิด พูช-พูล (PUSH-PULL), ฮาล์ฟบริดจ์ (HALF-BRIDGE), ฟูลบริดจ์ (FULL-BRIDGE), FLY-BACK ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว (2 Transistor FLY-BACK) และ FORWARD ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว (2 Transistor FORWARD) คอนเวอร์เตอร์เหล่านี้ล้วนต้องการสวิตช์มากกว่า 2 ตัว ซึ่งมีวง

จรที่ซับซ้อนและราคาแพงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังตั้งแต่ 200 W ขึ้นไปจนถึงระดับกิโลวัตต์ ซึ่งไม่เหมาะกับงานกำลังต่ำราคาถูก

ก.1.2.5 คอนเวอร์เตอร์ชนิด Resonant และ Quasi-Resonant

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

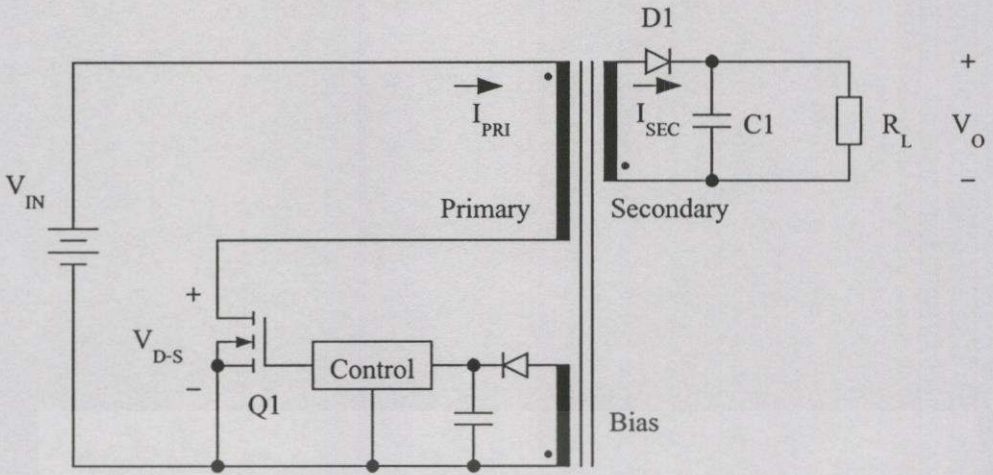
พิถีพิถันการทนแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตชิ่งจะขึ้นอยู่กับหลักในการสวิตชิ่งว่าจะ เป็นแบบสวิตชิ่งที่แรงดันศูนย์ (Zero - Voltage) หรือ สวิตชิ่งที่กระแสศูนย์ (Zero - Current) คอนเวอร์เตอร์เหล่านี้ไม่เหมาะกับงานกำลังต่ำเนื่องจากมีราคาที่สูง

ก.2 หลักการของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK

จากรูปที่ ก.5 เมื่อสวิตช์ Q1 ทำการ On ไคโอด D1 จะถูกไบอัสย้อนกลับและกระแส I_{pri} จะไหลเข้าสู่หม้อแปลงเพื่อทำการสะสมพลังงานในรูปสนามแม่เหล็กที่ขด Primary ของหม้อแปลง เมื่อ Q1 ทำการ Off ฟลักซ์แม่เหล็กที่สะสมอยู่ขด Primary จะเริ่มยุบตัวลงซึ่งจะไปตัดกับขดลวด Secondary ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำด้วยแรงดันที่มีทิศทางตรงข้ามกับที่กล่าวเอาไว้ข้างต้น ไคโอด D1 จะนำกระแสและพลังงานที่สะสมในรูปของสนามแม่เหล็กจะถูกถ่ายไปยังวงจรของ Load ที่ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ C1 และ Load R_L โดยที่กระแสส่วนหนึ่งจะไหลเข้าไปสะสมพลังงานให้กับตัวเก็บประจุ C1 และส่วนที่เหลือจะไหลไปยัง Load R_L ในช่วงเวลานี้เอง 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)

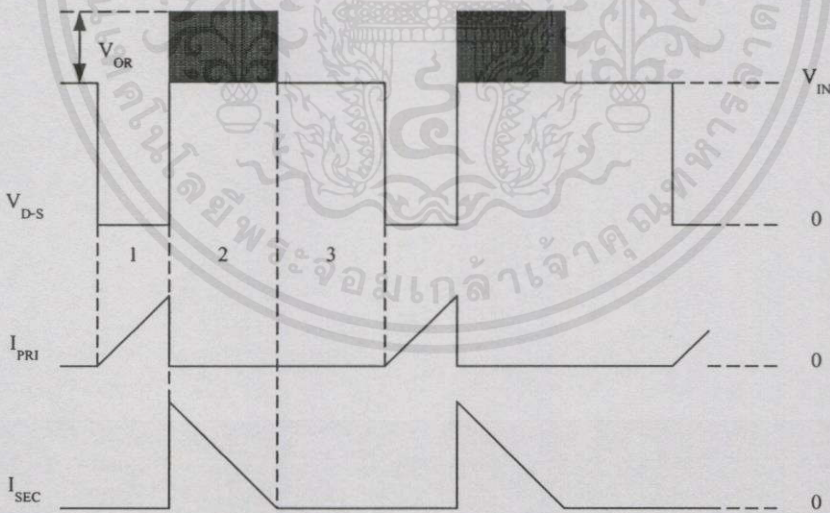
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK

ก.2.1 โหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (ทางอุดมคติ)

ถ้าหากกระแสทาง Secondary มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ก่อนที่สวิตช์ S1 จะทำการ On จะเรียกการทำงานนี้ว่าโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ในโหมดนี้จะมีการแบ่งช่วงเวลาที่สำคัญเป็น 3 ช่วงด้วยกัน ดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง (DCM) ทางอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ในช่วงเวลาแรก (1) กระแส Primary จะไหลเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ (Linear) เนื่องจากกระแสนี้จะไปสร้างฟลักซ์แม่เหล็กในขด Primary ของหม้อแปลง แรงดันของขา Drain และ Source ของ

MOSFET จะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ภายในช่วงเวลานี้ ไดโอด D2 จะป้องกันกระแส Secondary ไม่ให้เกิดการไหล เนื่องจากเกิดสภาวะไบอัสย้อนกลับภายในตัวไดโอด D2

ในช่วงเวลาที่ (2) เมื่อ MOSFET ทำการ Off พลังงานที่สะสมในรูปสนามแม่เหล็กของขด Primary จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในทิศทางตรงข้ามกับ Dot ภายในขด Primary และ Secondary ในวงจรทางอุดมคติกระแสของขด Primary จะลดลงเป็นศูนย์ทันทีในขณะที่กระแสของขด Secondary จะเริ่มไหลทันทีเช่นกัน แรงดันที่ตกคร่อมขด Secondary จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันขาออกและแรงดัน Forward ของไดโอด D2 ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมขด Secondary นี้จะเกิดการสะท้อนไปยังขด Primary โดยอัตราส่วนจำนวนรอบของขด Primary ต่อ Secondary ของหม้อแปลง (Transformer Ratio) ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันสะท้อนที่ขด Primary และแรงดันอินพุท แรงดันสะท้อนนี้เองที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกค่าอัตราส่วนจำนวนรอบของขด Primary ต่อ Secondary ของหม้อแปลง (Transformer Ratio) เวลาออกแบบหม้อแปลงเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาแรงดันตกคร่อมขา Drain และ Source ที่มีค่าสูงเกินพิกัดแรงดันที่ทนได้ของ MOSFET และแรงดันสะท้อนนี้ก็ช่วยในการจับระดับแรงขาออกของแหล่งจ่ายไฟทางด้าน Primary โดยอาศัยขดไบอัสของหม้อแปลงนั่นเอง พลังงานที่สะสมในขด Primary จะถูกถ่ายทอดไปยัง Load ภายในช่วงเวลาที่สองนี้เอง

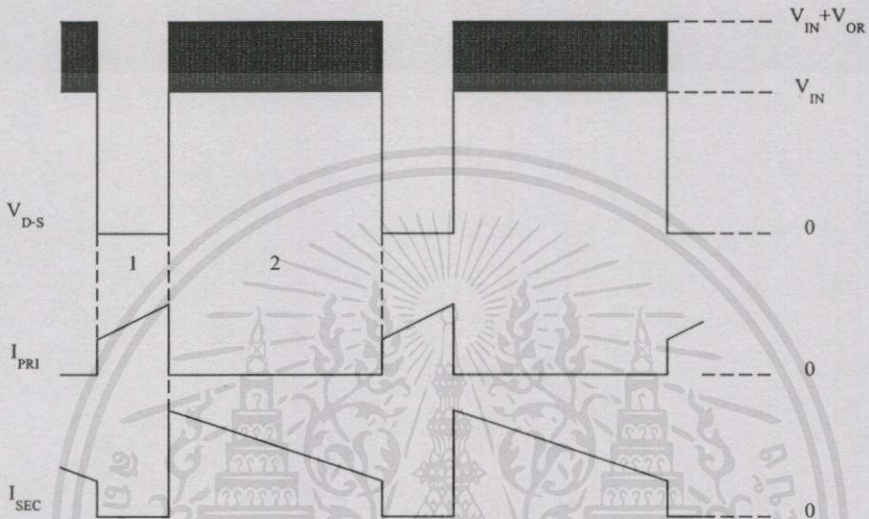
ในช่วงเวลาที่สาม (3) เมื่อสนามแม่เหล็กภายในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงลดลงจนเป็นศูนย์ก็จะไม่เกิดกระแสไหลภายในขด Primary และขด Secondary จึงทำให้แรงดันที่สะท้อนไปยังขด Primary ลดลงจนเป็นศูนย์เช่นกัน ฉะนั้น แรงดันที่ตกคร่อมขา Drain และ Source ของ MOSFET จะมีค่าลดลงจนเหลือเท่ากับแรงดันอินพุท นอกจากนี้ตัวเก็บประจุ C1 ก็จะทำกรจ่ายพลังงานให้กับ Load R_L ในช่วงเวลานี้เอง

การทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง ตัวควบคุมจะทำการปรับคาบเวลาในการ On ของ MOSFET เพื่อให้ถ่ายทอดพลังงานที่เพียงพอไปยัง Load โดยยังคงรักษาระดับแรงดันขาออกที่ต้องการเอาไว้

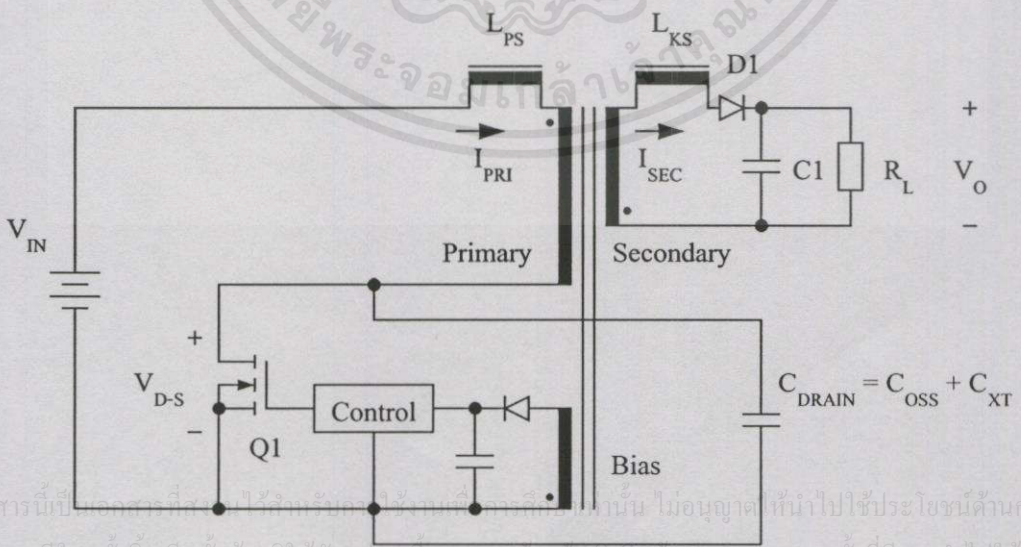
ก.2.2 โหมดกระแสต่อเนื่อง (ทางอุดมคติ)

จากรูปที่ ก.7 จะอาศัยหลักการที่คล้ายกับโหมดกระแสต่อเนื่อง เพียงแต่กระแสทาง Secondary จะไม่ลดลงจนเป็นศูนย์ ดังนั้น สำหรับการดำเนินงานในโหมดกระแสต่อเนื่องช่วงเวลาที่สาม (3) กระแสทาง Primary จะเริ่มต้นด้วยค่าหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากกระแสของขด Secondary ที่ลดลงแต่ไม่เป็นศูนย์ โดยจะอาศัยอัตราส่วน จำนวนรอบของขด Primary ต่อ Secondary ของหม้อแปลง (Transformer Ratio) สะท้อนไปยังขด Primary สำหรับแรงดันตกคร่อมที่ขา Drain และ Source ของ MOSFET ก็จะแตกต่างออกไป เนื่องจากไม่มีช่วงเวลาที่สาม (3) จึงทำให้แรงดันสะท้อนยังคงมีอยู่ต่อไปจนกระทั่งถึงช่วงที่ MOSFET ทำการ On อีกครั้ง

ในการรักษาระดับแรงดันขาออกให้มีค่าคงที่ กระแสสูงสุดที่พุ่งขึ้นมาทางขด Primary ในช่วง On จะต้องมามีค่าสมดุลกับกระแสสูงสุดที่พุ่งลงทางขด Secondary ในช่วง Off จากการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งในโหมดกระแสต่อเนื่องตัวควบคุมจะไม่มี การปรับคาบเวลาในการ On และ Off แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของ Load ก็ตามแต่จะทำการปรับค่าเริ่มต้นของกระแสทางขด Primary แทน



รูปที่ ก.7 รูปคลื่นของกระแสและแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในโหมดกระแส ต่อเนื่อง (CCM) ทางอุดมคติ



รูปที่ ก.8 วงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ตั้งแต่เริ่มแรกและสงวนลิขสิทธิ์ไว้แน่นอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการตีพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องอรองรงใจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2.3 โหมคระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องในทางปฏิบัติ

จากรูปที่ ก.8 จะมีการคำนึงถึงค่าที่แฝงอยู่ในวงจรในรูปของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ L_{kp} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงทางขด Primary และ L_{ks} คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงทางขด Secondary ตัวเก็บประจุ C_{DRAIN} เป็นผลรวมของ C_{oss} และ C_{xt} ซึ่งเป็นค่าความจุของ MOSFET และค่าความจุแฝงภายในขดลวดของหม้อแปลง ค่าที่แฝงอยู่เหล่านี้มีอยู่ในวงจรเชิงปฏิบัติของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK โดยทั่วไปซึ่งมีผลกระทบต่อสมรรถนะของแหล่งจ่ายไฟมาก

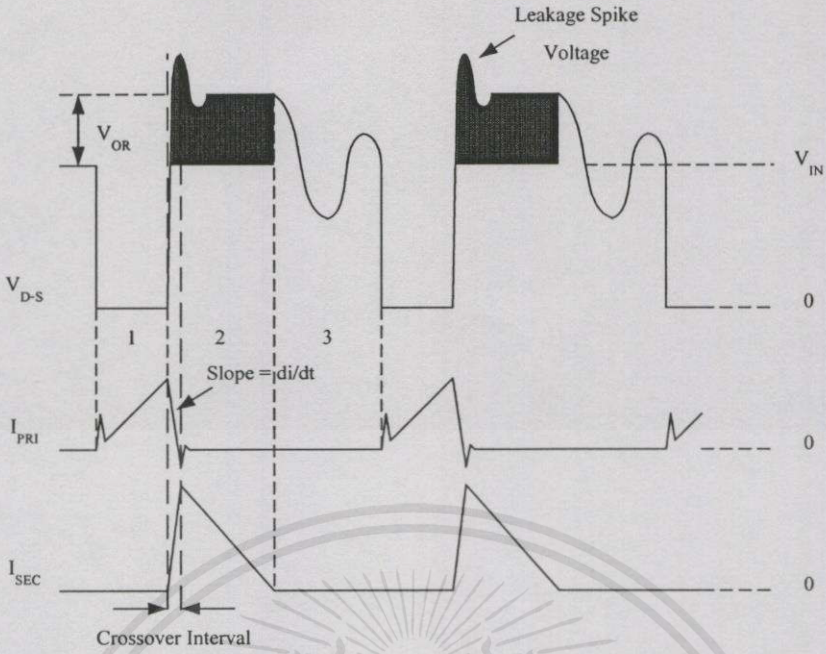
ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในตอนต้นว่า การทำงานในโหมคระแสไม่ต่อเนื่องแบ่งออกเป็นสามส่วน ซึ่งในแต่ละส่วนจะมีผลกระทบอันเกิดจากค่าที่แฝงอยู่เหล่านี้ดังที่จะกล่าวต่อไป

จากรูปที่ ก.9 ในช่วงเวลาแรก (1) MOSFET จะทำการ On นั่นคือ มีการคายประจุของ C_{oss} และ C_{xt} พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุเหล่านี้ในรอบที่ผ่านมาจะถูกลดพลังงานออกมาโดยก่อน MOSFET ในรูปของกระแสในช่วงเวลาเริ่มต้นของช่วงเวลานี้เองพลังงานที่คายออกมานี้จะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเหล่านี้ ถ้าหากค่าความจุของตัวเก็บประจุเหล่านี้มีมากก็จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อระดับแรงดันอินพุทที่มีค่าสูง ส่วนค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของขด Primary และ Secondary จะมีผลน้อยในช่วงเวลานี้ เนื่องจากหม้อแปลงไม่มีพลังงานสะสมในช่วงเวลาก่อนหน้านี้ และกระแสของขด Secondary ลดลงจนเป็นศูนย์เรียบร้อยแล้ว

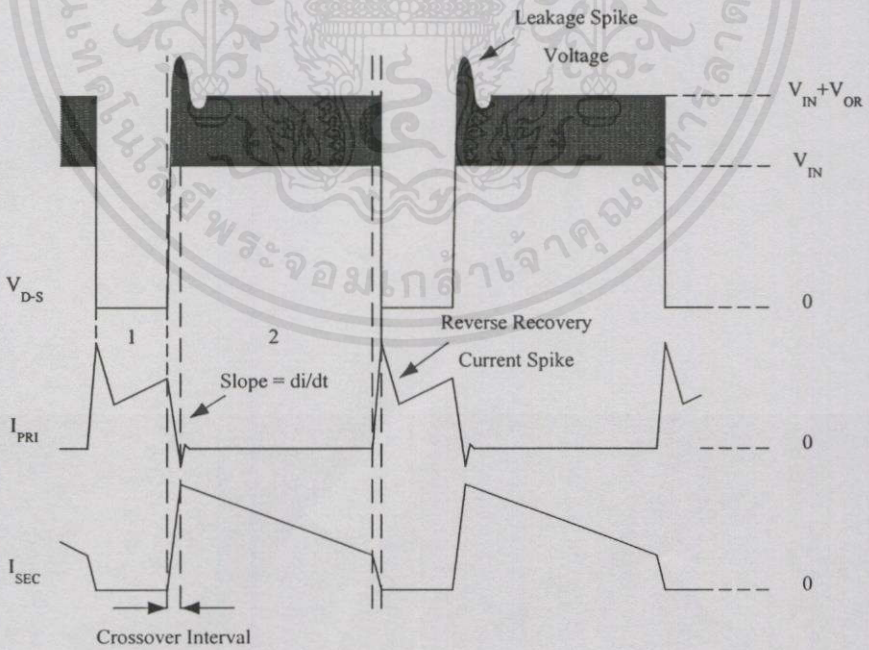
ในช่วงเวลาที่สอง (2) MOSFET จะทำการ Off พลังงานที่สะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงจะถูกถ่ายทอดไปยังขด Secondary ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลนี้เองจะมีผลกระทบวงจรในช่วงเวลาดังกล่าว เนื่องจาก L_{kp} และ L_{ks} พยายามที่จะต้านความเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ผ่านตัวมัน โดยที่ L_{kp} จะยังคงรักษากระแสที่ไหลทาง Primary และ L_{ks} จะพยายามต้านทานกระแสที่เพิ่มขึ้นในขด Secondary พื้นที่ในส่วนนี้จึงเรียกว่าพื้นที่ครอสโอเวอร์ (Crossover Region) ค่าความชันของกระแสที่ลดลงทางฝั่ง Primary จะถูกกำหนดโดยค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของ Primary และแรงดันของวงจร ส่วนค่าความชันของกระแสที่เพิ่มขึ้นทางฝั่ง Secondary จะถูกกำหนดโดยค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของ Secondary และแรงดันของวงจร

กระแสที่ไหลของขด Primary จะไหลเข้าสู่ C_{oss} และ C_{xt} ซึ่งจะทำการสะสมประจุให้กับ C_{oss} และ C_{xt} และทำให้เกิดแรงดันสไปค์ (Spike) เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันสไปค์จะต้องมีค่าไม่เกินพิกัดแรงดันของ MOSFET ทั้งนี้ห้ามมิให้คลื่นเปลี่ยนเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงเวลาที่สาม (3) แรงดันสะท้อนจะมีค่าลดลงเป็นศูนย์แรงดันที่ตกคร่อมขา Drain และ Source จะลดระดับลงไปที่เท่ากับแรงดันอินพุท



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



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

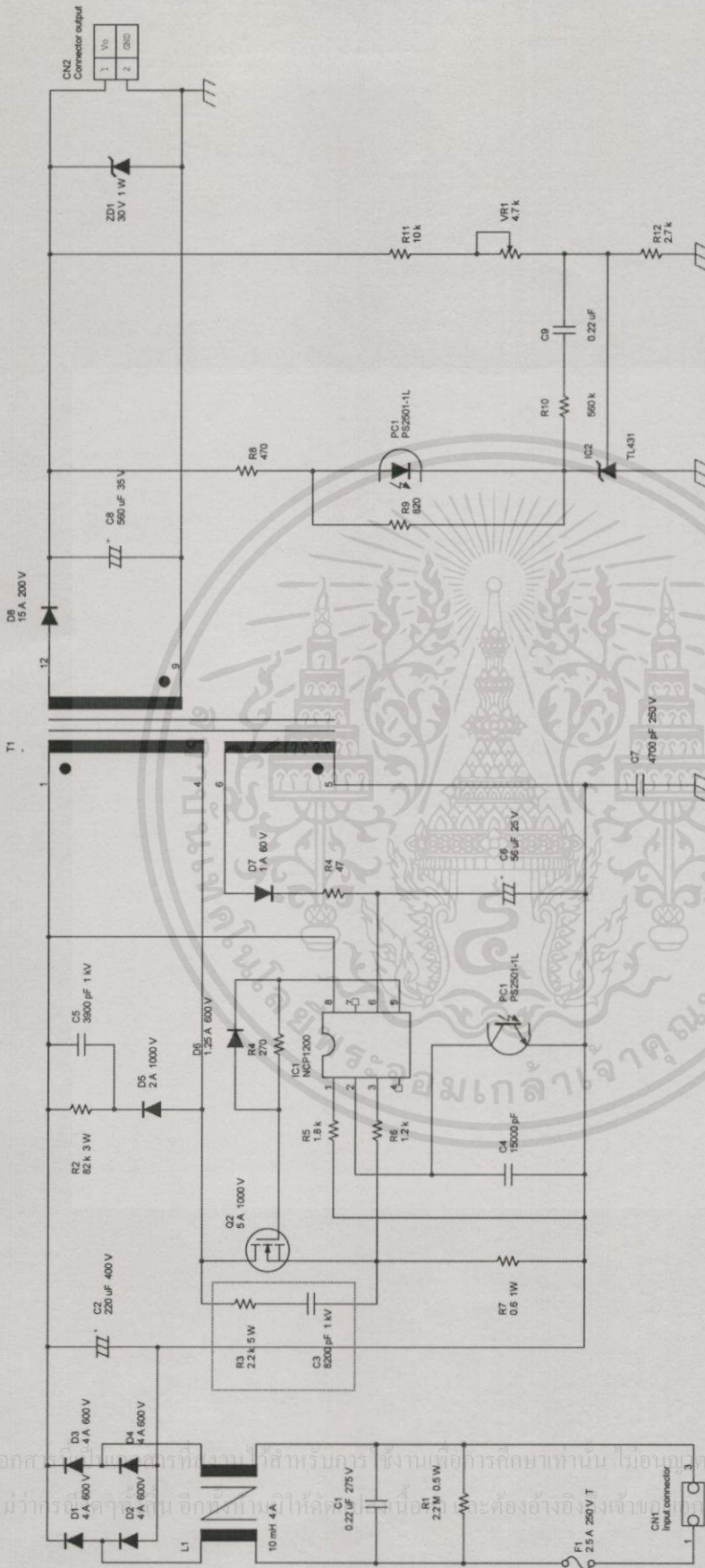
ในช่วงเวลานี้จะเกิดวงจรสมมูลที่มีลักษณะของวงจรเรโซแนนซ์ (Resonant) โดยเกิดจากค่าความจุที่แฝงอยู่และค่าความเหนี่ยวนำของขด Primary เองที่จะทำให้เกิดการกระเพื่อม (Oscillate) ของแรงดันจนกระทั่ง MOSFET ทำการ On อีกครั้งหนึ่ง รูปคลื่นของแรงดันนี้จะไปทำการมอดูเลต (Modulate) กับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{oss} และ C_{xt} ที่จะไปทำให้เกิดการสูญเสียใน MOSFET ขณะทำการ On ในรอบถัดไป

การทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องก็เช่นกันผลของค่าที่แฝงอยู่ในวงจรก็มีลักษณะคล้ายกับการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ผลของวงจรเรียงกระแสของฝั่ง Secondary ในทางปฏิบัติยังมีความสำคัญอีกด้วย ในทางอุดมคติ เราจะถือว่าแรงดันตกคร่อมในตัวไดโอดเรียงกระแสมีค่าเป็นศูนย์ และเวลาในการสวิตช์ของไดโอดมีค่าเร็วมากๆ แต่ในทางปฏิบัติค่าเหล่านี้มีผลที่รอยต่อของ PN ของตัวไดโอดมีค่าของเวลาคืนตัว (Reverse Recovery Time ; t_{rr}) ในกรณีของขอกก็ไดโอด (Schottky Diode) ค่าของเวลาคืนตัวนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความจุแฝงที่รอยต่อ PN นี้ เวลาในการคืนตัวนี้จะมีผลให้เกิดกระแสสไปค์ไหลผ่านตัวไดโอดจนกว่าไดโอดจะทำการ Off ได้อย่างสมบูรณ์ กระแสสไปค์นี้เองจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในตัวไดโอดและเป็นภาระให้กับ MOSFET ในช่วงเวลาการ On แอมพลิจูดของกระแสสไปค์จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการคืนตัวของไดโอด สำหรับแหล่งจ่ายแบบสวิตช์ที่อาศัยความถี่ตั้งแต่ 100 kHz ขึ้นไป แนะนำให้ใช้ไดโอดชนิด Ultrafast ซึ่งมีค่า $t_{rr} < 50$ ns.

จากรูปที่ ก.10 ในช่วงเวลาแรก (1) MOSFET จะทำการ On ในขณะที่ยังมีกระแสไหลในขด Secondary นอกจากนั้นผลของกระแสสไปค์ของไดโอดทางฝั่ง Secondary ทำให้กระแสตอน On มีค่าสูงซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังงานสูญเสียอันเนื่องมาจากผลคูณของกระแสและแรงดันจะมีค่าสูงกว่าในโหมดการทำงานแบบกระแสไม่ต่อเนื่อง

ในช่วงเวลาที่สอง (2) หลักการจะเหมือนกับการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง แต่ในช่วงเวลาที่สามนั้นจะไม่เกิดขึ้นเหมือนกับการทำงานในโหมดกระแสไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



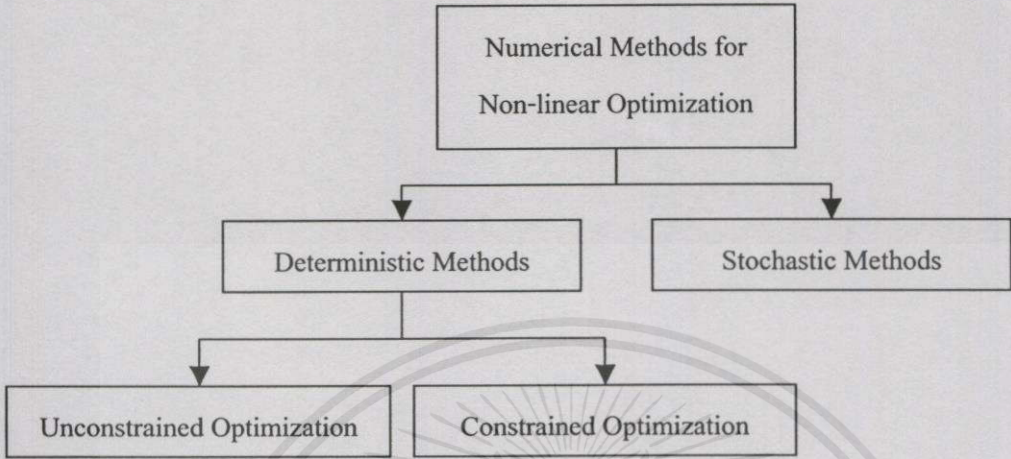
File		Test Circuit
Size	B	Document Number
Rev	00	none
Date	Monday, March 11, 2002	Sheet 1 of 1

รูปที่ ข.1 วงจรที่ใช้ทดสอบหือแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 ระเบียบวิธีทางตัวเลข (Numerical) สำหรับการออกแบบโดยกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม



รูปที่ ค.1 ระเบียบวิธีทางตัวเลขสำหรับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบต่างๆ

ค.1.1 วิธี Deterministic

แนวความคิดของวิธี Deterministic จะอาศัยการเริ่มต้นด้วยค่าการออกแบบที่สมเหตุสมผลค่าหนึ่งซึ่งสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์ที่จุดเริ่มต้นนี้ จากข้อมูลเหล่านี้การออกแบบจะลู่เข้าสู่ค่าใหม่ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$x^{(q+1)} = x^{(q)} + \alpha_q d^{(q)} \tag{ค.1}$$

โดยที่ x คือเวกเตอร์ของตัวแปร, d เป็นทิศทางเคลื่อนตัวในขอบเขตการออกแบบ (Search Direction), α เป็นจำนวนบวกชนิดสเกลาร์ซึ่งถูกเรียกว่า ขนาดการเคลื่อนตัว (Step Size) ในทิศทางเคลื่อนตัวและ q จะแสดงจำนวนการคำนวณ (Iteration Number)

กระบวนการจะทำการดำเนินไปเรื่อยๆจนกระทั่งมีเงื่อนไขที่เหมาะสมหรือบรรลุเงื่อนไขการหยุดการคำนวณใดๆ จะเห็นได้ว่าเป้าหมายของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในลำดับการคำนวณใดๆนั้นเป็นการหาจุดที่ต่ำที่สุดของสมการเป้าหมาย $F(x)$ ซึ่งสามารถกำหนดในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

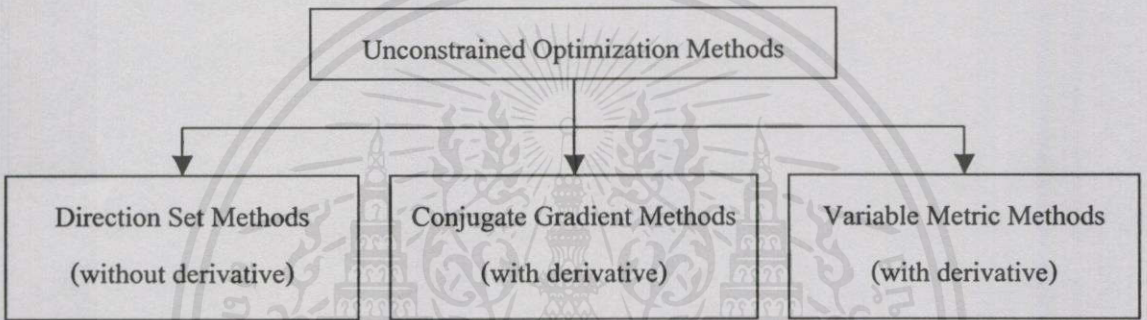
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกงานอันนี้ไปจะดัดแปลงแก้ไขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(x^{(q)} + \alpha_q d^{(q)}) < F(x^{(q)}) \tag{ค.2}$$

จากสมการที่ ค.2 สามารถประมาณค่าของเทอมที่อยู่ทางซ้ายด้วยอนุกรมเทเลอร์ (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 $x^{(q)}$ และเทอมที่สองของสมการทางด้านซ้ายจะต้องเป็นค่าลบ เนื่องจาก $\alpha_q > 0$ มุมระหว่างเวกเตอร์ $c^{(q)}$ และ $d^{(q)}$ จะต้องทำมุม 90 องศาและ 270 องศา เพื่อที่จะทำให้สมการที่ ค.3 เป็นจริง ทั้งนี้จะมีบางทิศทางของ $d^{(q)}$ ที่จุดออกแบบและอัลกอริธึมของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมจะประมวลได้แตกต่างกัน



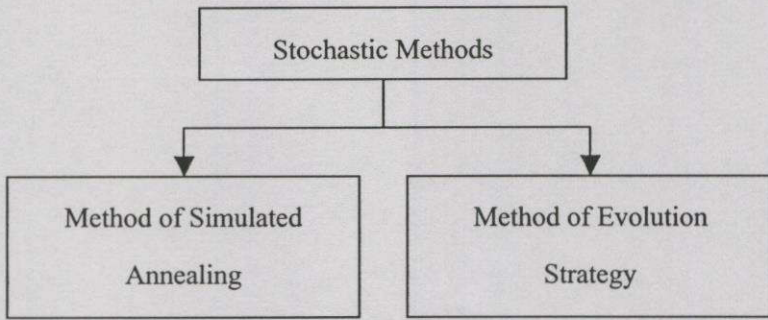
รูปที่ ค.2 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่มีเงื่อนไขแบบต่างๆ

วิธี Deterministic จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆดังที่เห็นจากรูปที่ ค.1 นั่นคือ กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Optimization) และแบบมีเงื่อนไข (Constrained Optimization)

ลักษณะปัญหาของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่มีเงื่อนไขสามารถแก้ได้โดยอาศัยข้อมูล Derivative และไม่ต้องอาศัยข้อมูลดังกล่าว ดังรูปที่ ค.2

ค.1.2 วิธี Stochastic

วิธีของ Stochastic จะอาศัยพื้นฐานของความน่าจะเป็น (Probabilistic) มากกว่าการหาค่า โดยกรรมวิธีเชิงเส้น (Linear Search) ที่ซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลค่า Gradient พื้นฐานของวิธีการดังกล่าวจะอาศัยการเลือกจุดเริ่มต้นหลังจากนั้นจะทดลองสุ่มไปที่จุดใหม่ในทุกๆทิศทาง ณ จุดที่ทดลองสุ่มไปนั้น ถ้าสมการเป้าหมายมีค่าต่ำกว่าเดิม จะยอมรับจุดนั้นๆให้เป็นจุดที่เหมาะสม หรือไม่ก็สามารถยอมรับ โดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็นบางอย่าง วิธีการนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองวิธีใหญ่ได้ดังรูปที่ ค.3



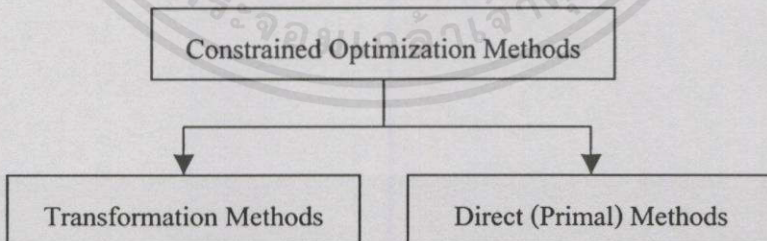
รูปที่ ค.3 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธี Stochastic แบบต่างๆ

สำหรับวิธีการ Simulated Annealing ดังรูปที่ ค.3 เหมาะสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ เช่น ระบบเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) การแข็งตัวของผลึกในของเหลว หรือการอ่อนตัวของเหล็ก

ส่วนวิธีการของ Evolution Strategy จะอาศัยพื้นฐานการเปลี่ยนแปลงแบบธรรมชาติ มีนักวิชาการหลายคนกล่าวว่าวิธีดังกล่าวจะสามารถหาค่าที่ต่ำที่สุดจริงๆ ได้ (Global Minimum) แต่จำนวนฟังก์ชันที่ถูกระหัดจะมีจำนวนมากซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

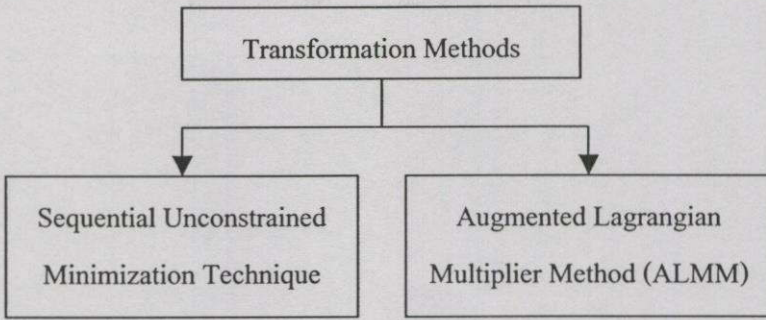
ค.1.3 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข

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

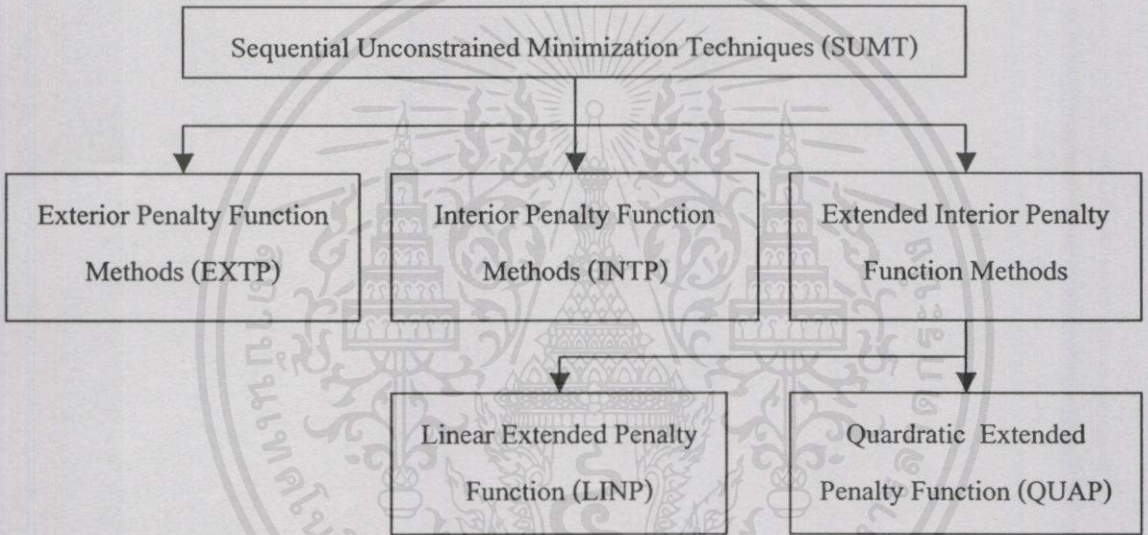


รูปที่ ค.4 กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไขแบบต่างๆ

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



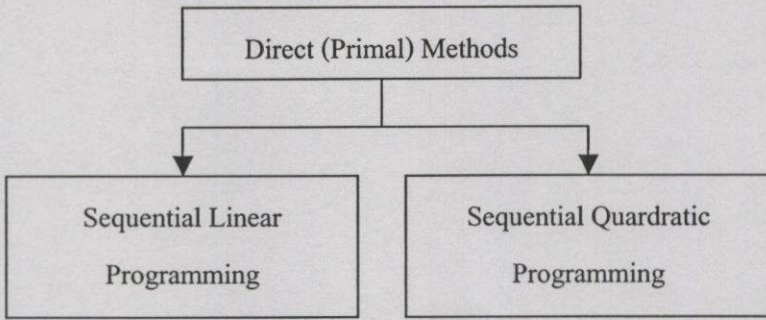
รูปที่ ค.5 วิธีการแปลงรูปในแบบต่างๆ



รูปที่ ค.6 เทคนิค Sequential unconstrained minimization ในแบบต่างๆ

จากรูปที่ ค.4 วิธีที่สองจะอาศัยการแก้ปัญหาโดยตรง (Direct) จากเงื่อนไขเดิมของปัญหาดังนั้น รูปแบบของเงื่อนไขจะไม่เปลี่ยนไปจากเดิมในการคำนวณที่ซ้ำๆกัน (Iteration) ในแต่ละครั้ง วิธีที่สองนี้ค่อนข้างมีความแตกต่างจากวิธีแรกอยู่มาก เนื่องจากวิธีที่สองจะอาศัยรูปแบบการแก้ปัญหาเชิงเส้น (Linear Programming) หรือการแก้ปัญหาเชิงเส้นแบบยกกำลังสอง (Quadratic Programming) ดังแสดงได้ในรูปที่ ค.7 สมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมดจะถูกทำให้เป็นเชิงเส้นเพื่อแสดงเงื่อนไขของปัญหาย่อย (Subproblem) ในแต่ละรอบการคำนวณ คำตอบที่ได้จากปัญหาย่อยนี้เองจะเป็นตัวให้ทิศทางในการหาคำตอบ (Search Direction) ภายในขอบเขตของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการออกแบบ (Design Space)

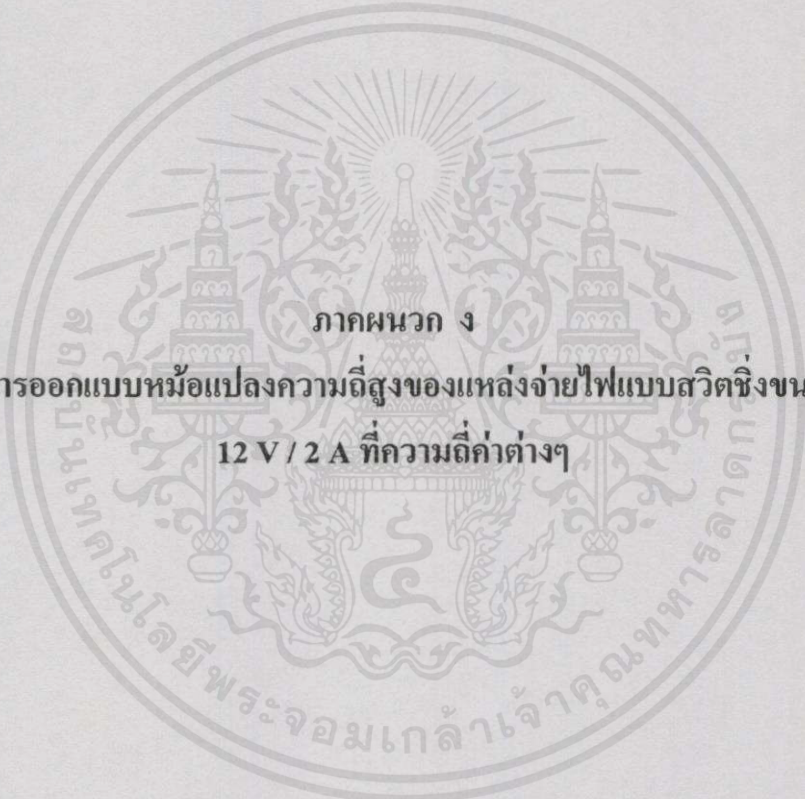
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 วิธีตรงในแบบต่างๆ

จากรูปที่ ก.7 วิธีแรกจะเป็นการลู่เข้าอย่างง่ายแบบก้าวหน้า (Simple and Straight Forward Approach) ในการแก้ปัญหาแต่จะมีข้อเสียบางอย่างคือ ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ (Robustness) เท่าใดนัก จึงมีการพัฒนาวิธีที่สองคือ การแก้ปัญหาข้อย่อยเชิงเส้นแบบยกกำลังสอง โดยที่สมการเป้าหมายจะถูกทำให้เป็นกำลังสองและสมการเงื่อนไขจะเป็นเส้นตรง (Linear) ซึ่งหมายถึงจะต้องมีคำตอบอยู่เสมอเมื่อมีเงื่อนไขที่เหมาะสม

สำหรับรายละเอียดของกระบวนการหาที่เหมาะสม สามารถดูได้จาก [6]



ภาคผนวก ง
ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด
12 V / 2 A ที่ความถี่ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงขนาด 12 V / 2 A ที่ความถี่ต่างๆ

$f = 20$ kHz

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	5.5004	6.25	6.25	6.25
g	0.5	1	0.9502	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

$f = 100$ kHz

	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	0.4601	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

$f = 40$ kHz

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.9125	4.825	4.825	4.825
g	0.5	1	0.8347	0.8423	0.8518
N_p	100	78.7758	66.4376	67	67
N_s	5	14.2009	11.9767	12	12
d_p	0.4	0.3196	0.3196	0.3192	0.32
d_s	0.5	0.5322	0.5322	0.5334	0.55
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6573	1.6685
Weight		29.8724	38.2948	38.3266	38.5164

Core select = No.17 E34/14/9

$f = 150$ kHz

	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	1.642	1.6685
Weight		16.6606	18.500	18.5128	18.5448

Core select = No.12 E25/13/7 (EF 25)

$f = 60$ kHz

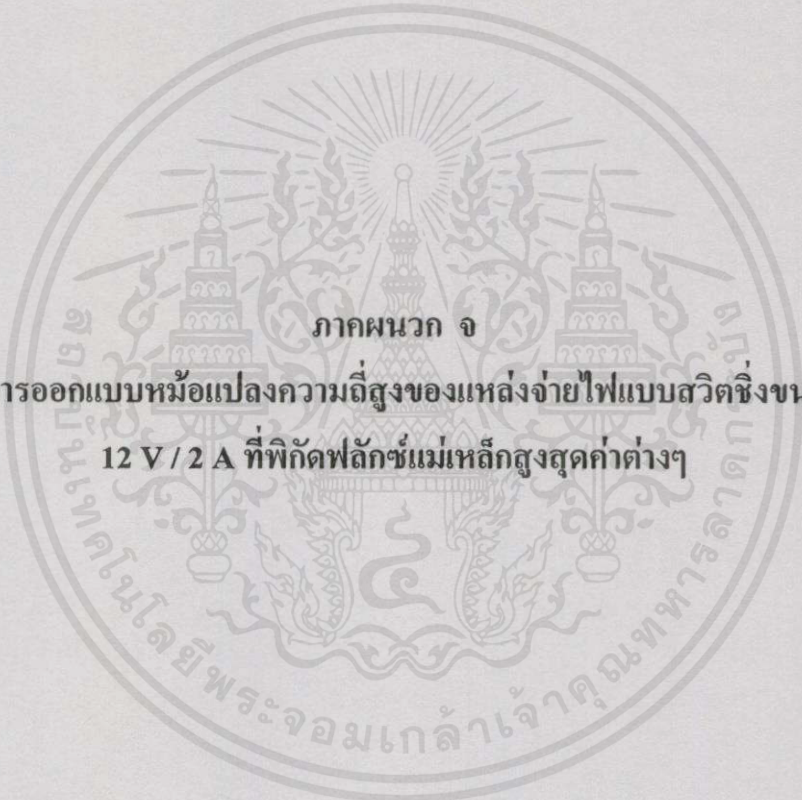
	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.579	3.6	3.6	3.6
g	0.5	0.7931	0.7876	0.7876	0.8003
N_p	100	62.7648	62.599	63	63
N_s	5	11.1588	11.2847	11	11
d_p	0.4	0.3621	0.3196	0.3191	0.32
d_s	0.5	0.5359	0.5322	0.5399	0.55
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6534	1.6685
Weight		23.3541	28.7869	28.8044	28.8984

Core select = No.14 E30/15/7

$f = 200$ kHz

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.1568	3.25	3.25	3.25
g	0.5	0.292	0.3556	0.3556	0.361
N_p	200	24.7228	29.0408	30	30
N_s	50	4.3063	5.2352	5	5
d_p	0.4	0.3179	0.3196	0.317	0.32
d_s	0.5	0.5386	0.5322	0.549	0.55
$I_{p(max)}$	1	1.6289	1.664	1.6198	1.6222
Weight		14.1135	12.2887	12.3251	12.3475

Core select = No.13 E25.4/10/7



ภาคผนวก จ
ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด
12 V / 2 A ที่พิกัดฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 ผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงขนาด 12 V / 2 A ที่พิกัดปลั๊กแม่เหล็กสูงชุดค่าต่างๆ

$B_{(max)Limit} = 0.1 T$

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	5.0888	6.25	6.25	6.25
g	0.5	1	0.8052	0.8052	0.8357
N_p	100	49.671	40.3322	41	41
N_s	5	8.9542	7.2707	7	7
d_p	0.4	0.3196	0.3196	0.3183	0.32
d_s	0.5	0.5322	0.5322	0.5446	0.55
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6369	1.6685
Weight		56.5802	62.2344	62.2668	62.3022

Core select = No. 19 E40/16/12

$B_{(max)Limit} = 0.16 T$

	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

Core select = No. 14 E30/15/7

$B_{(max)Limit} = 0.2 T$

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.4464	3.6	3.6	3.6
g	0.5	0.5672	0.4928	0.498	0.5137
N_p	200	55.8181	50.0792	51	51
N_s	5	9.9528	9.0278	9	9
d_p	0.4	0.319	0.3196	0.3185	0.32
d_s	0.5	0.5343	0.5322	0.5361	0.55
$I_{p(max)}$	1	1.6528	1.664	1.6421	1.6685
Weight		20.1681	28.0094	28.0485	28.1566

Core select = No. 14 E30/15/7

$B_{(max)Limit} = 0.25 T$

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.3451	3.6	3.6	3.6
g	0.5	0.359	0.3042	0.3042	0.321
N_p	100	45.9812	40.0633	41	41
N_s	5	8.289	7.2222	7	7
d_p	0.4	0.3196	0.3196	0.3177	0.32
d_s	0.5	0.5322	0.5322	0.5437	0.55
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.626	1.6685
Weight		18.0926	27.1325	27.1627	27.2067

Core select = No. 14 E30/15/7

$B_{(max)Limit} = 0.3 T$

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.3451	3.75	3.75	3.75
g	0.5	0.2413	0.2379	0.2379	0.2505
N_p	100	38.3177	38.1556	39	39
N_s	5	6.9075	6.8783	6	6
d_p	0.4	0.3196	0.3196	0.3178	0.32
d_s	0.5	0.5322	0.5322	0.573	0.6
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.628	1.6685
Weight		17.6008	19.2356	19.2768	19.4254

Core select = No. 12 E25/13/7 (EF 25)

$B_{(max)Limit} = 0.38 T$

	Initial	Loop 1	Loop 2	Loop 3	Loop 4
E	3	3.3451	3.75	3.75	3.75
g	0.5	0.1406	0.1376	0.1376	0.1479
N_p	100	30.2508	30.1228	31	31
N_s	5	5.4533	5.4302	5	5
d_p	0.4	0.3196	0.3196	0.3173	0.32
d_s	0.5	0.5322	0.5322	0.5586	0.6
$I_{p(max)}$	1	1.664	1.664	1.6169	1.6685
Weight		17.0775	18.6511	18.6812	18.8502

Core select = No. 12 E25/13/7 (EF 25)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.	Data Sheet													Calculation								
	Type	a (mm.)	b (mm.)	c (mm.)	d (mm.)	e (mm.)	f (mm.)	Ac (mm ²)	EVA (mm ⁻¹)	le (mm.)	Weight (no-gap) / set (g.)	E (mm.)	a (mm.)	b (mm.)	D (mm.)	E (mm.)	KI = D/2E (°)	K2 = 2b/a (°)	K3 = αE (°)	K4 = E / E / K 5 = E / E (°)	(°)	
1	E6.3	6.3	2.9	2	3.6	1.85	1.4	3.100	3.7	12.2	0.12	0.700	1.100	1.85	2	1.05	1.429	3.364	1.571	1.500	1.500	1.929
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	1.481	3.027	1.889	1.067	1.067	1.000
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	2.461	1.737	2.179	2.179	2.000
4	E10.5/5.5	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	2.043	3.036	2.383	1.064	1.064	0.957
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	3.462	1.405	1.081	1.081	1.000
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	3.355	1.442	1.209	1.064	0.884
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	3.455	1.404	1.064	1.064	1.000
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	2.182	1.404	0.936	1.000	0.979
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	2.400	1.979	0.958	1.000	0.979
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	3.415	1.390	1.051	1.051	1.068
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	2.182	2.200	1.080	1.080	1.020
12	E25/13/7 (EF 25)	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	3.480	1.333	1.093	1.093	1.000
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	2.107	1.892	1.015	1.015	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	3.154	1.708	1.528	1.528	1.458
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	3.394	1.389	1.095	1.095	0.979
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	3.394	1.389	1.095	1.095	0.979
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	2.460	1.601	1.067	1.067	0.984
18	E36/18/11	36	18	11.5	24.5	12	10.2	120.000	0.68	81	30	5.100	7.150	12	11.5	6	5.75	3.357	1.402	1.176	1.176	1.127
19	E40/16/12	40.6	16.5	12.5	28.6	10.5	12.5	149.000	0.52	77	38	6.250	8.050	10.5	12.5	6	6	2.609	1.288	0.960	0.960	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	3.422	1.418	1.049	1.049	1.025
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	3.422	1.418	1.049	1.049	1.025
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	3.012	1.038	0.949	0.949	0.968
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	3.645	1.180	1.081	1.081	1.017
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	3.645	1.180	1.081	1.081	1.017
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	3.026	1.027	0.957	0.957	0.957
26	E65/32/27	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	3.669	1.210	1.060	1.060	1.040
27	E70/33/32	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	3.369	1.182	1.027	1.027	1.023
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	2.884	1.916	1.050	1.050	1.045

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

No.	Type	Data Sheet															Calculation								
		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)	le (mm.)	Weight (no-pap) / set (g.)	E (mm.)	a (mm.)	b (mm.)	D (mm.)	E (mm.)	K1 = D/2E (°)	K2 = 2b/a (°)	K3 = e/E (°)	K4 = E'/E (°)	K5 = E''/E (°)		
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	1.100	2.000	2.698	2.389	1.111	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	1.083	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	1.917	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	1.018	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	1.000	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	1.000	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	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	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	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	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	0.965	1.035
12	EE-22A	22	18.8	9.4	5.8	5.8	15.6	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	1.379	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	1.379	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	1.339	1.043
15	EE-25S	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	1.063	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	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	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	0.976	1.071
19	EE-28S	28	21	10.5	10.7	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	1.194	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	1.250	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	1.250	1.319
22	EE-30A	30	26.4	13.2	10.7	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	0.935	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	1.464	1.522
24	EE-30B	30	42.6	21.3	10.7	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	0.935	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	0.928	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	0.866	1.021
27	EE-33K	35	30.2	15.1	11.75	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	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	1.200	1.050
29	EE-35B	35	48.4	24.2	10	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	1.450	1.200	1.200	1.050
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	1.170	4.938	1.450	1.200	1.200	1.050
31	EE-40E	40	33.5	16.75	11.65	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	1.047	1.133
32	EE-40A	40	34	17	10.7	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	1.252	1.168
33	EE-40B	40	54.6	27.3	11.7	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	1.197	1.111
34	EE-40H	40	55.3	27.65	11.7	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	1.205	1.111
35	EE-42A	42	42	21	15	12	29.5	29.6	15.1	179.0	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	0.983	1.042
36	EE-42B	42	42	21	19.6	12	29.5	29.6	15.1	234.0	0.415	97.1	117.0	6.000	8.750	14.8	19.6	5.900	6.250	1.633	3.383	1.458	0.983	0.983	1.042
37	EE-44E	44	37.6	18.8	15	11.7	31	23.2	11.8	190.0	0.458	87.1	87.4	5.850	9.650	11.6	15	7.000	6.500	1.282	2.404	1.650	1.197	1.197	1.111

No.	Type	Data Sheet											Calculation												
		A (mm.)	2B (mm.)	B (mm.)	C (mm.)	D (mm.)	E min (mm.)	2F min (mm.)	F (mm.)	Ae (mm. ²)	EVA (mm. ⁻¹)	le (mm.)	Weight (nogap) / set (g.)	E (mm.)	a (mm.)	b (mm.)	D (mm.)	E' (mm.)	E'' (mm.)	K1 = D/2E (°)	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	1.667	1.197	1.197	1.094
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	1.349	1.164	1.164	1.075
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	1.349	1.164	1.164	1.075
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	1.012	1.012	1.047
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	8.300	8.150	1.000	1.950	1.801	1.064	1.064	1.045
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	1.026	1.026	1.045
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	9.950	1.000	2.828	2.000	0.929	0.929	1.005

Average

Max

Min

1.209

2.236

0.328

3.574

9.118

1.950

1.656

2.750

0.709

1.117

1.917

0.866



สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หมายให้คิดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ตารางขลวดแต่ละชนิด

Table 3: Dimensions of Enameled Round Wire

Conductor		Class 0		Class 1		Resistance 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 Enameled Round Wire

Conductor		Class 2		Class 3		Resistance 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)	
1.00	+0.012	0.017	1.062			22.49
0.95	+0.010	0.017	1.008			24.84
0.90	+0.010	0.016	0.956			27.71
0.85	+0.010	0.015	0.904			31.11
0.80	+0.010	0.015	0.852			35.17
0.75	+0.008	0.014	0.798			39.87
0.70	+0.008	0.013	0.746			45.84
0.65	+0.008	0.012	0.694			53.26
0.60	+0.008	0.012	0.644	0.008	0.632	62.64
0.55	+0.006	0.012	0.592	0.008	0.581	74.18
0.50	+0.006	0.012	0.542	0.008	0.531	89.95
0.45	+0.006	0.011	0.490	0.007	0.479	112.1
0.40	+0.005	0.011	0.439	0.007	0.429	141.7
0.37	+0.005	0.010	0.407	0.007	0.397	165.9
0.35	+0.005	0.010	0.387	0.007	0.377	185.7
0.32	+0.005	0.010	0.357	0.007	0.347	222.8
0.30	+0.005	0.010	0.337	0.007	0.327	254.0
0.28	+0.004	0.009	0.324	0.006	0.315	273.9
0.28	+0.004	0.009	0.314	0.006	0.305	294.1
0.27	+0.004	0.009	0.304	0.006	0.295	316.6
0.26	+0.004	0.009	0.294	0.006	0.285	341.8
0.25	+0.004	0.009	0.284	0.006	0.275	370.2
0.24	+0.004	0.009	0.274	0.006	0.265	402.2
0.23	+0.004	0.009	0.264	0.006	0.255	438.6
0.22	+0.004	0.008	0.252	0.005	0.243	480.1
0.21	+0.003	0.008	0.241	0.005	0.232	522.8
0.20	+0.003	0.008	0.231	0.005	0.222	577.2
0.19	+0.003	0.008	0.221	0.005	0.212	640.6
0.18	+0.003	0.008	0.211	0.005	0.202	715.0
0.17	+0.003	0.007	0.199	0.005	0.191	803.2
0.16	+0.003	0.007	0.189	0.005	0.181	908.8
0.15	+0.003	0.006	0.177	0.004	0.169	1,037
0.14	+0.003	0.006	0.167	0.004	0.159	1,193
0.13	+0.003	0.006	0.157	0.004	0.149	1,389
0.12	+0.003	0.006	0.147	0.004	0.139	1,636
0.11	+0.003	0.005	0.135	0.003	0.128	1,957
0.10	+0.003	0.005	0.125	0.003	0.118	2,381
0.09	+0.003	0.005	0.113	0.003	0.107	2,959
0.08	+0.003	0.005	0.103	0.003	0.097	3,778
0.07	+0.003	0.004	0.091	0.003	0.085	4,990
0.06	+0.003	0.004	0.081	0.003	0.075	6,966
0.05	+0.003	0.004	0.069	0.003	0.064	10,240
0.04	+0.002	0.003	0.056	0.002	0.052	15,670
0.03	+0.002	0.003	0.044	0.002	0.040	28,870
0.025	+0.002	0.003	0.037	0.002	0.034	42,780
0.020	+0.002	0.003	0.030	0.002	0.028	69,850

6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

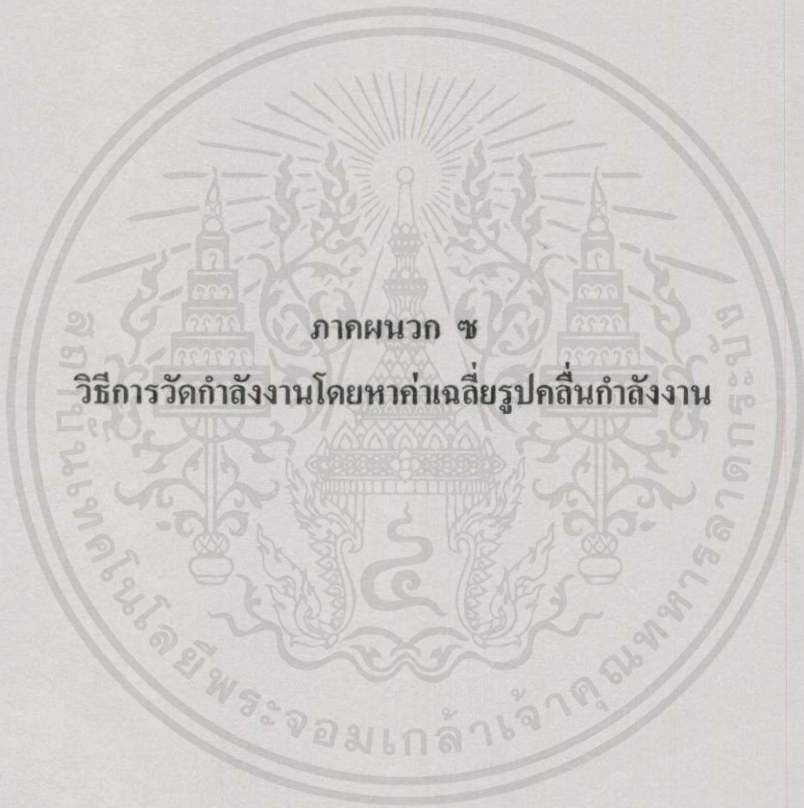
Table 5: Dimensions of Enameled Round Wire (NEMA MW-1000)

Table 6: Dimensions of Enameled Round Wire (BS)

AWG Size	Conductor Diameter			SINGLE		HEAVY		Conductor diameter			Grade 1		Grade 2	
	Nominal (mm)	Min. (mm)	Max. (mm)	Increase in Diameter Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	Increase in Diameter Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	Nominal (mm)	Max. (mm)	Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	Increase in Diameter Min. (mm)	Overall Diameter Max. (mm)	Increase in Diameter Min. (mm)
7	3.665	3.630	3.683			0.086	3.787	3.350	3.384	3.316			3.498	0.083
8	3.264	3.231	3.282			0.084	3.383	3.150	3.182	3.118			3.294	0.082
9	2.906	2.878	2.921			0.081	3.020	3.000	3.030	2.970			3.142	0.081
10	2.588	2.563	2.601			0.079	2.695	2.800	2.828	2.772			2.938	0.080
11	2.304	2.281	2.316			0.076	2.408	2.650	2.677	2.623			2.784	0.078
12	2.052	2.032	2.062			0.074	2.151	2.240	2.262	2.218			2.366	0.075
13	1.829	1.811	1.839			0.071	1.923	2.120	2.141	2.099			2.243	0.074
14	1.628	1.613	1.636	0.041	1.692	0.081	1.732	2.000	2.020	1.980	2.092	0.049	2.120	0.073
15	1.450	1.435	1.458	0.038	1.509	0.076	1.547	1.900	1.919	1.881	1.990	0.049	2.018	0.072
16	1.290	1.278	1.298	0.036	1.349	0.074	1.384	1.800	1.818	1.782	1.888	0.048	1.916	0.071
17	1.151	1.138	1.156	0.036	1.207	0.071	1.240	1.700	1.717	1.683	1.785	0.047	1.813	0.069
18	1.024	1.013	1.029	0.033	1.077	0.066	1.110	1.600	1.616	1.584	1.683	0.046	1.711	0.068
19	0.912	0.902	0.917	0.030	0.963	0.064	0.993	1.500	1.515	1.485	1.581	0.045	1.608	0.067
20	0.813	0.805	0.818	0.030	0.861	0.058	0.892	1.400	1.414	1.386	1.479	0.044	1.506	0.066
21	0.724	0.716	0.726	0.028	0.770	0.056	0.798	1.320	1.333	1.307	1.397	0.043	1.423	0.064
22	0.643	0.635	0.645	0.028	0.686	0.053	0.714	1.250	1.263	1.237	1.325	0.042	1.351	0.063
23	0.574	0.569	0.577	0.025	0.617	0.051	0.643	1.180	1.192	1.168	1.254	0.042	1.279	0.062
24	0.511	0.505	0.513	0.025	0.551	0.048	0.577	1.120	1.131	1.109	1.192	0.041	1.217	0.061
25	0.455	0.450	0.457	0.023	0.493	0.046	0.516	1.060	1.071	1.049	1.130	0.040	1.155	0.060
26	0.404	0.399	0.406	0.023	0.439	0.043	0.462	1.000	1.010	0.990	1.068	0.039	1.093	0.059
27	0.361	0.358	0.363	0.020	0.396	0.041	0.417	0.950	0.960	0.940	1.017	0.039	1.041	0.058
28	0.320	0.318	0.323	0.020	0.356	0.041	0.373	0.900	0.909	0.891	0.965	0.038	0.990	0.057
29	0.287	0.284	0.290	0.018	0.320	0.038	0.338	0.850	0.859	0.841	0.913	0.037	0.937	0.055
30	0.254	0.251	0.256	0.018	0.284	0.036	0.302	0.800	0.808	0.792	0.861	0.036	0.885	0.054
31	0.226	0.224	0.229	0.015	0.254	0.033	0.274	0.750	0.758	0.742	0.809	0.035	0.832	0.052
32	0.203	0.201	0.206	0.015	0.231	0.030	0.249	0.710	0.717	0.703	0.767	0.034	0.790	0.051
33	0.180	0.178	0.183	0.013	0.206	0.028	0.224	0.670	0.677	0.663	0.726	0.033	0.749	0.050
34	0.160	0.157	0.163	0.013	0.183	0.025	0.198	0.630	0.636	0.624	0.684	0.032	0.706	0.049
35	0.142	0.140	0.145	0.010	0.163	0.023	0.178	0.600	0.606	0.594	0.653	0.031	0.675	0.047
36	0.127	0.124	0.130	0.010	0.147	0.020	0.160	0.560	0.566	0.554	0.611	0.030	0.632	0.046
37	0.114	0.112	0.117	0.008	0.132	0.020	0.145	0.530	0.536	0.524	0.579	0.029	0.601	0.045
38	0.102	0.099	0.104	0.008	0.119	0.018	0.130	0.500	0.505	0.495	0.548	0.029	0.569	0.044
39	0.089	0.086	0.091	0.005	0.104	0.015	0.114	0.475	0.480	0.470	0.522	0.028	0.543	0.042
40	0.079	0.076	0.081	0.005	0.094	0.015	0.102	0.450	0.455	0.445	0.495	0.027	0.516	0.041
41	0.071	0.069	0.074	0.005	0.084	0.013	0.091	0.425	0.430	0.420	0.469	0.026	0.489	0.039
42	0.064	0.061	0.066	0.005	0.076	0.010	0.081	0.400	0.405	0.395	0.442	0.025	0.462	0.038
43	0.056	0.053	0.058	0.005	0.066	0.010	0.074	0.375	0.380	0.370	0.417	0.024	0.436	0.037
44	0.051	0.048	0.053	0.0025	0.061	0.010	0.069	0.355	0.359	0.351	0.395	0.024	0.414	0.036
45	0.0447			0.0025	0.0521	0.0076	0.0584	0.335	0.339	0.331	0.374	0.023	0.393	0.035
46	0.0399			0.0025	0.0470	0.0076	0.0533	0.315	0.319	0.311	0.352	0.022	0.371	0.034
47	0.0356							0.300	0.304	0.296	0.337	0.021	0.355	0.033
48	0.0315							0.280	0.284	0.276	0.315	0.021	0.334	0.032
49	0.0282							0.265	0.269	0.261	0.300	0.020	0.317	0.031
50	0.0251							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	0.063	0.063	0.078	0.007	0.085	0.013
								0.060	0.060	0.060	0.075	0.006	0.081	0.012
								0.056	0.056	0.056	0.070	0.006	0.076	0.012
								0.050	0.050	0.050	0.062	0.005	0.068	0.010

๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

วิธีการวัดกำลังงานโดยหาค่าเฉลี่ยรูปคลื่นกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่อุปกรณ์ไฟฟ้าใดๆที่กำลังทำการวัด มีรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ซับซ้อนมากๆ การหาค่าพลังงานสูญเสียของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ จะกระทำได้โดยใช้ Digital Oscilloscope ซึ่งจะอาศัยการจับรูปคลื่นแรงดันและกระแสมาทำการวิเคราะห์โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

รูปคลื่นของกำลังงาน ณ เวลาใดๆ จะเป็นผลมาจากผลคูณระหว่างกระแสและแรงดันแบบจุดต่อจุดดังสมการต่อไปนี้

$$P(t) = i(t) \times v(t) \quad (\text{ซ.1})$$

เมื่อได้รูปคลื่นของกำลังงาน ณ เวลาใดๆ ก็ให้ทำการหาค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นในคาบเวลาหนึ่งๆ จะทำให้ได้ค่ากำลังงานเฉลี่ยออกมา

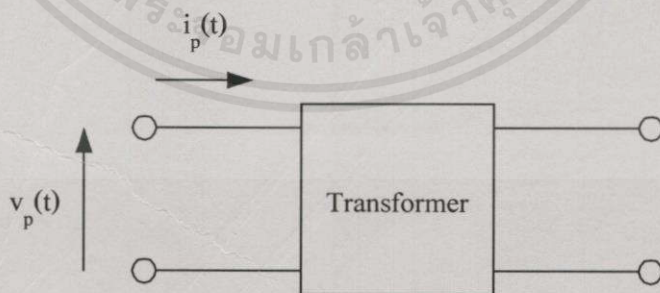
จาก

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

ดังนั้น

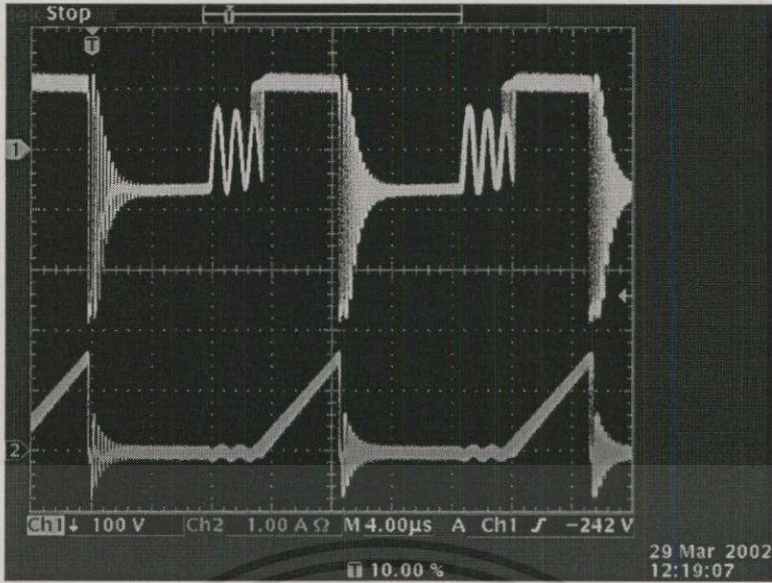
$$P_{av} = \frac{\text{Area } p(t)}{T} \quad (\text{ซ.2})$$

โดยทั่วไป Digital Oscilloscope จะมีฟังก์ชันในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ซึ่งรวมไปถึงการหาค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นด้วย ฉะนั้นค่าเฉลี่ยที่อ่านได้จาก Digital Oscilloscope ในคาบเวลาหนึ่งๆ จะหมายถึงกำลังงานที่เกิดขึ้นบนตัวอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กำลังทำการวัด ทั้งนี้วิธีดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการหาค่าพลังงานขาเข้าของหม้อแปลงความถี่สูงได้



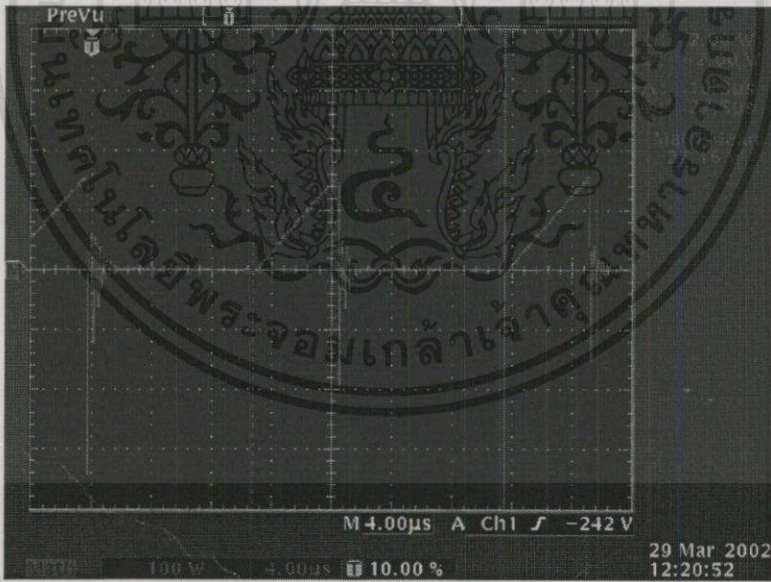
รูปที่ ซ.1 ทิศทางในการวัดแรงดันและกระแสที่เข้าสู่หม้อแปลงความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 นำโพรบแรงดันเป็นแชนเนลที่ 1 จับที่แรงดัน และโพรบกระแสเป็นแชนเนลที่ 2 จับที่กระแส ซึ่งมีทิศทางในการจับดังรูปที่ ซ.1 จะได้รูปคลื่นที่มีลักษณะดังรูปที่ ซ.2



รูปที่ ซ.2 รูปคลื่นที่ได้จากการวัดแรงดัน (บน) และกระแส (ล่าง)

จากนั้นเข้าสู่ฟังก์ชันที่นำรูปสัญญาณของแชนแนลที่ 1 มาคูณกับแชนแนลที่ 2 ซึ่งผลลัพธ์ของรูปคลื่นที่ได้จะเป็นดังรูปที่ ซ.3

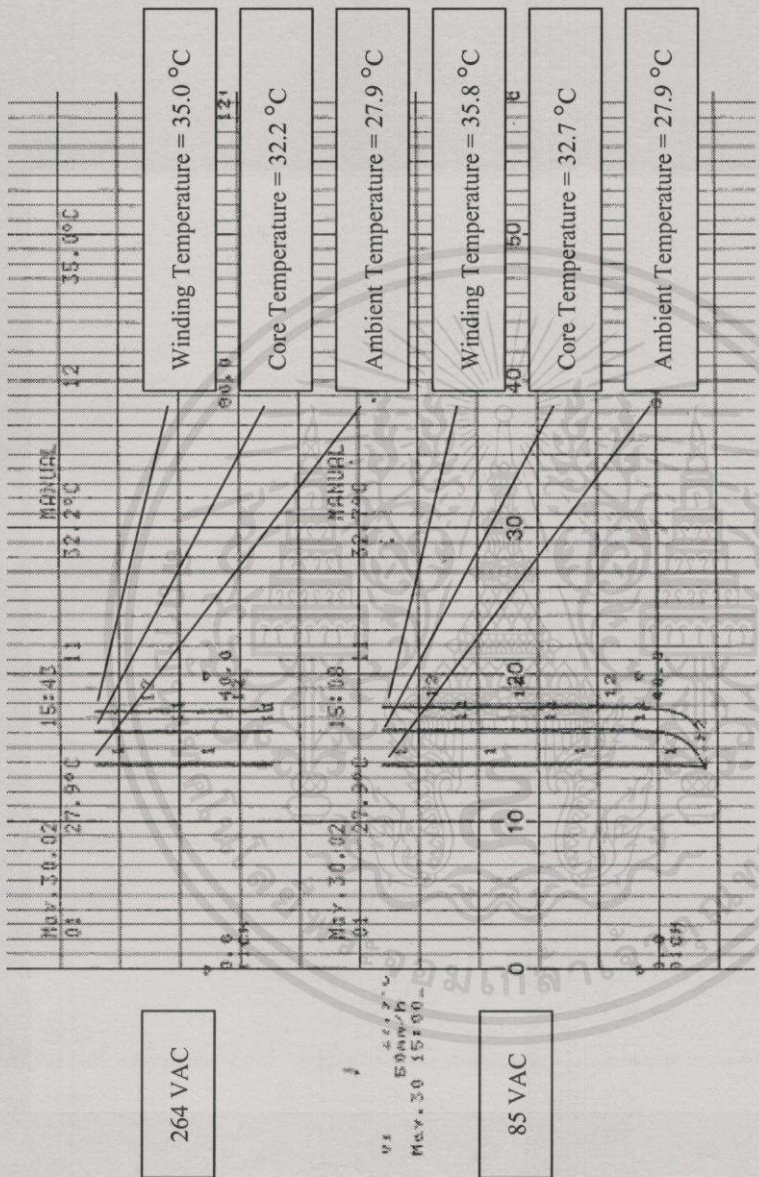


รูปที่ ซ.3 รูปคลื่นที่ได้จากผลคูณระหว่างแรงดันกับกระแส

จากรูปที่ ซ.3 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นที่อ่านได้จะมีค่าเท่ากับ 27.16 W ซึ่งเป็นค่ากำลังงานขาเข้าของหม้อแปลงความถี่สูงนั่นเอง

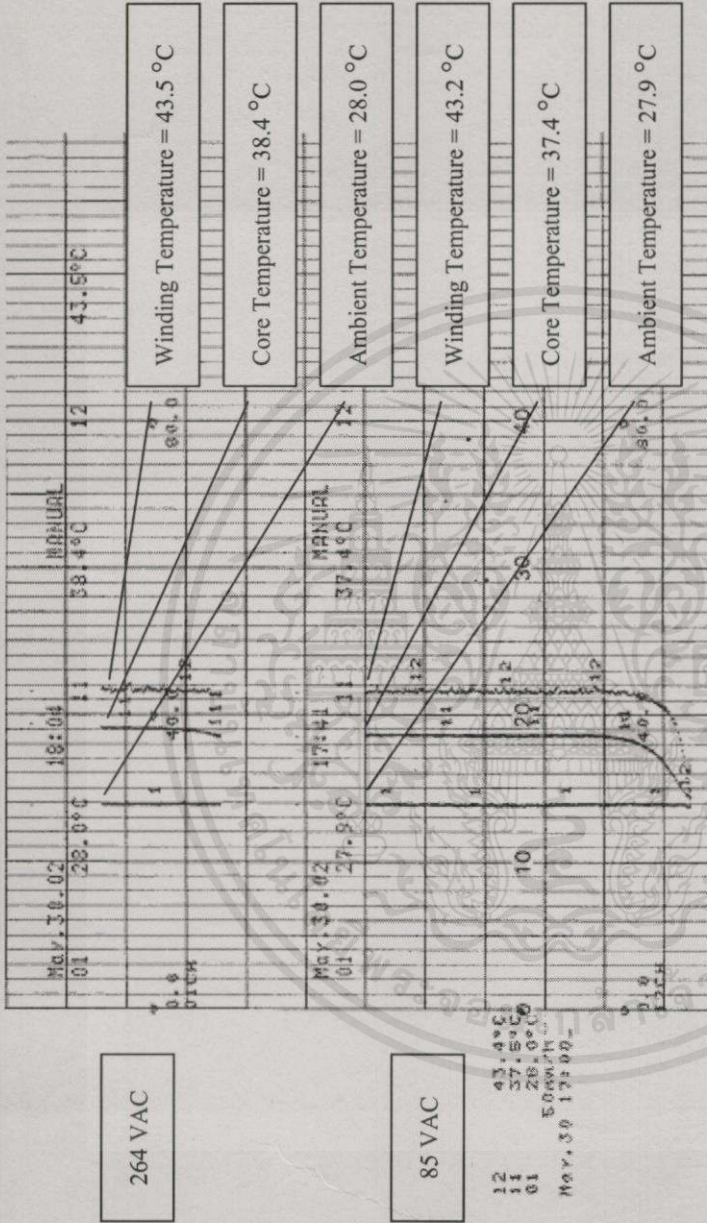
ภาคผนวก ฉ
ผลการวัดคุณธรรมที่เพิ่มขึ้นของต้นแบบหม้อแปลงความถี่สูงทั้ง 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีถารนำไปใช้



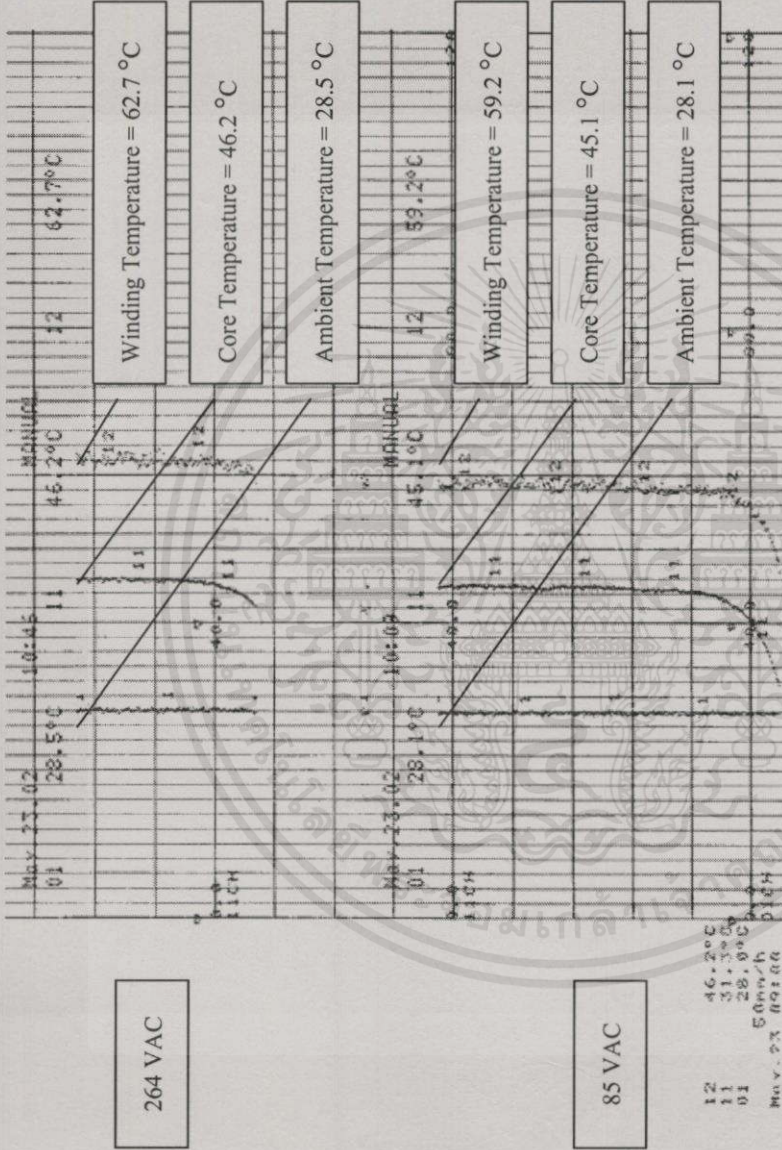
รูปที่ ๓.1 ผลการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตติงขนาด 5 V / 1.2 A ขณะจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันเข้าสูงสุด และต่ำสุดตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไป ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



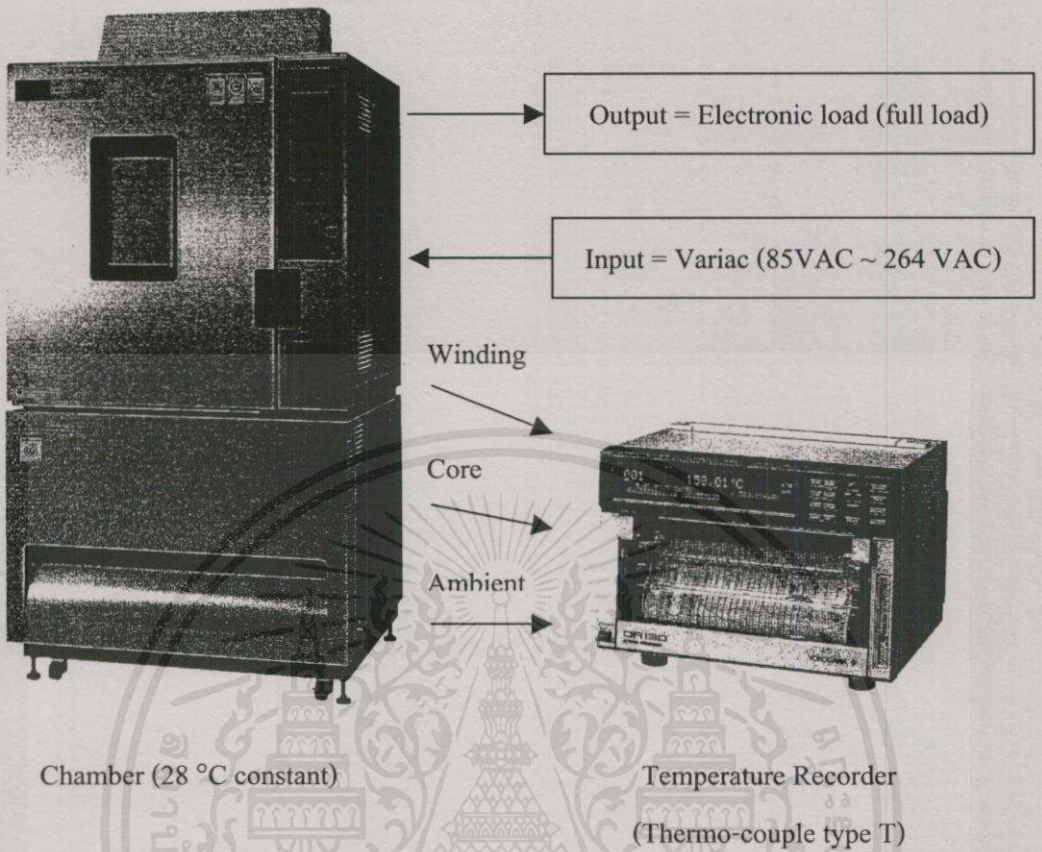
รูปที่ ๓.2 ผลการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งขนาด 12 V / 2 A ขณะจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันเข้าสูงสุด และต่ำสุดตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.3 ผลการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตติงขนาด 24 V / 4 A ขณะจ่าย Load สูงสุดที่แรงดันขาสูงสุด และต่ำสุดตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๔ ระบบที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของต้นแบบหม้อแปลงทั้ง 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



Volume 1

สาขาบทความ

- ☉ ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- ☉ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ☉ ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- ☉ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

สนับสนุนโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

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

<http://www.ladkrabang.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด

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

อภิวิฑู คำนวนกิจ ชัยวุฒิ ฉัตรฤทัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นกรนำเสนอแนวทางการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงที่ใช้กับคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข ร่วมกับการใช้อัลกอริทึมที่ผู้ออกแบบสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ ในบทความนี้จะกำหนดตัวแปรในการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักหม้อแปลงเป็นค่ามิติของแกนเฟอร์ไรต์ จำนวนรอบในการพันขดลวด และขนาดของขดลวด โดยนำเสนอผลการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่งขนาด 24 V, 4 A, 35 kHz โครงสร้างหม้อแปลงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุดซึ่งได้จากวิธีที่นำเสนอจะมีค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ และจากผลที่ได้จากการออกแบบนี้สามารถนำไปใช้ศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมเช่น ค่าความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟสวิตชิ่ง

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 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญก็คือ หม้อแปลงความถี่สูง ซึ่งมีหน้าที่ในการส่งผ่านพลังงานจากด้าน primary (แรงดัน

สูง) ไปยังด้าน secondary (แรงดันต่ำ) พบว่าโครงสร้างของหม้อแปลงความถี่สูงจะเป็นส่วนที่กำหนดขนาดของ SMPS ซึ่งมีขนาดประมาณ 25% ของขนาดโดยรวม และมีน้ำหนักประมาณ 30% ของน้ำหนักทั้งหมด [1] ในปัจจุบันการออกแบบผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook, PDA (personal digital assistant) โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น นับวันก็ยิ่งมีความต้องการในด้านความสะดวกและคล่องตัว นั่นคือ มีขนาดที่เล็กกะทัดรัด และน้ำหนักที่เบา เพื่อสะดวกในการพกพาโดยยังคงประสิทธิภาพให้ได้เหมือนเดิมหรือมากยิ่งขึ้น ฉะนั้นการที่จะทำการออกแบบ SMPS ให้มีขนาดและน้ำหนักเบา ก็คือการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีขนาดและน้ำหนักน้อยที่สุด [2]

ในบทความนี้จะศึกษาถึงการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดโดยนำหลักการของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข (numerical constrained optimization techniques) เข้ามาช่วยในการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการออกแบบที่มีผลต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงโดยตรงซึ่งได้แก่ มิติของแกนเฟอร์ไรต์ จำนวนรอบในการพันขดลวด และขนาดของขดลวด และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในด้านน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงสามารถนำไปปรับปรุงพารามิเตอร์ตัวอื่นที่มีผลต่อน้ำหนักโดยทางอ้อมนั่นคือ ความถี่การทำงานของ SMPS ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลอย่างไรต่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง และค่าความถี่ใดมีความเหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ผลของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงมีน้ำหนักน้อยที่สุด

ในปัจจุบันมีโปรแกรมการคำนวณมากมายที่มีความสามารถในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม แต่โดยในหลักการแล้วก็จะมีรูปแบบและอัลกอริทึม (algorithm) ที่คล้ายกัน และถึงแม้ว่าในปัจจุบันได้มีอัลกอริทึมใหม่ ๆ เกิดขึ้นอย่างมากมาย แต่จุดประสงค์ก็เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั่นเอง จุดประสงค์ของบทความนี้จะไม่ได้เน้นอยู่ที่การอธิบายถึงหลักการของการหาค่าที่เหมาะสมอย่างละเอียด แต่จะเป็นเพียงการแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมกับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronics) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์และการออกแบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเท่านั้น ในบทความนี้จะใช้ประโยชน์จาก Optimization Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมซึ่งจะเลือกใช้วิธี SQP (sequential quadratic programming) [3]

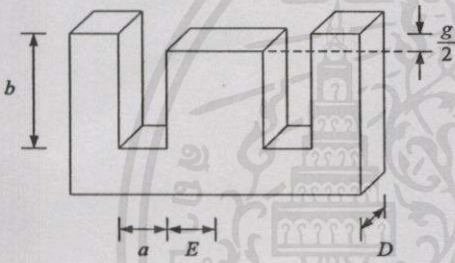
2. การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK

ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK [4-5] โดยใช้โปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสมจำเป็นต้องทราบถึงพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก เพื่อใช้เป็นข้อมูลอินพุตให้กับโปรแกรม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การออกแบบลักษณะของปัญหา

2.1.1 โครงสร้างของแกน

แกนที่นิยมใช้ในการออกแบบ SMPS ก็คือแกน EE ดังรูปที่ 1 ซึ่งข้อมูลมิติของโครงสร้างของแกนสามารถพิจารณาได้จาก catalog ของผู้ผลิตแต่ละบริษัท แต่โดยทั่วไปแล้วมิติที่สำคัญของแกนจะมีอยู่ 4 ค่า คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของขากลาง (E) ความหนาแกนกลาง (D) ความกว้างช่องพันขลวด (a) และความสูงครึ่งหนึ่งของช่องพันขลวด (b)



รูปที่ 1 มิติของแกนเฟอร์ไรต์

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

$$D = 2EK_1 \tag{1}$$

$$b = \frac{aK_2}{2} \tag{2}$$

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

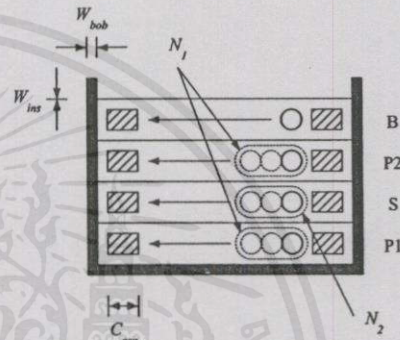
2.1.2 โครงสร้างการพันของขลวด

ลักษณะการพันขลวดในหม้อแปลงความถี่สูงมีอยู่หลายวิธี แต่โดยทั่วไปจะมีลักษณะการพันที่เป็นแบบแซนวิช โดยที่ขดแรกจะเป็นขด primary ครึ่งหนึ่ง (P1) ต่อมาเป็นขด secondary (S) และตามด้วยขด primary ที่เหลืออีกครึ่งหนึ่ง (P2) และสุดท้ายเป็นขดไบอัสไทล์เชิงให้กับวงจรควบคุมซึ่งอยู่ทาง primary (B) ดังรูปที่ 2 โดยที่ความหมายของสัญลักษณ์ต่าง ๆ ในรูปที่ 2 สามารถดูได้จากตารางที่ 1 โดยปกติการพันขลวดที่ดีควรจะให้เรียงชิดติดกัน (Perfect winding) แต่ในบางครั้งช่องพันขลวดที่มีขนาดใหญ่จะใช้ลักษณะการพันแบบมีช่องว่าง ทั้งนี้

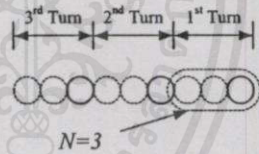
เพื่อลดค่า leakage inductance ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงความถี่สูง นอกจากนี้ในการพันขลวดเพื่อที่จะลดค่าความต้านทานของลวดทองแดงบางครั้งจำเป็นต้องใช้ลวดทองแดงมาพันขนานกัน แล้วพันให้ได้ครบตามจำนวนรอบนั้น ลักษณะการพันดังกล่าวแสดงได้ในรูปที่ 3 การขนานลวดทองแดงมากกว่า 3 เส้น มักไม่นิยมทำกันเพราะจะพันขลวดได้ลำบากหรืออาจทำให้ขลวดสูงเกินกว่าที่จะพันบนบอบบิ้น

2.1.3 พารามิเตอร์และตัวแปรในการออกแบบ

พารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ ที่จะใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักต่ำสุดนั้นจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 2 ลักษณะการพันขลวดแบบแซนวิช



รูปที่ 3 การพันขลวดแบบขนานกัน

จากตารางที่ 1 พารามิเตอร์และตัวแปรเหล่านี้ จะนำไปใช้ในการสร้างสมการเป้าหมาย (objective) ซึ่งเป็นสมการน้ำหนักของหม้อแปลงและสมการเงื่อนไข (constraint) โดยที่พารามิเตอร์ที่กำหนดให้เป็นตัวแปรทั้งหมด 9 ตัว คือ E, a, g, N_p , N_s , N_b , d_p , d_s และ d_b พารามิเตอร์นอกจากที่กล่าวมา ก็จะเป็นค่าคงที่ที่ผู้ออกแบบสามารถกำหนดขึ้นเองหรือเปิดดูได้จาก specification ของผู้ผลิตได้อย่างอิสระ

2.2 สมการของการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

2.2.1 สมการเป้าหมาย

ในการพิจารณาน้ำหนักของส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างหม้อแปลงความถี่สูงสามารถจำแนกได้เป็นดังนี้

1. น้ำหนักของแกนเฟอร์ไรต์สามารถประมาณได้จากสมการที่ 3

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

และจากสมการที่ 1 และ 2 นั่นคือค่า 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_1	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_1	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. น้ำหนักของขดลวด primary จากลักษณะการพันที่เป็นแบบ แขนวิช นั่นคือ ขด primary จะพันประกบกับขด secondary ด้านบนและ ด้านล่าง ทำให้การพิจารณาน้ำหนักของขดลวด primary จุดแรกที่ถูกต้องลงไปจะหาน้ำหนักได้จาก

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

โดยที่ MLT_{p1} คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันรอบแกน 1 รอบ ของขดลวดจุดแรก ซึ่งจะหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

$$MLT_{p1} = C_{bob} + \pi \cdot d_p \quad (5) \text{ ดังอย่างถึง } W_{trans} = W_c + W_{p1} + W_{p2} + W_s + W_b \quad (13)$$

โดยที่ C_{bob} คือ ความยาวของเส้นรอบวงของแกนกลางที่ถูกสวมด้วยบอบบิ้นที่จะใช้ในการพัน นั่นคือ

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

และ A_{wp} คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด

ส่วนขดลวดจุดที่สองที่พันลงไปหลังจากพันขด secondary จะหาน้ำหนักได้จาก

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

โดยที่ MLT_{p2} คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันรอบแกน 1 รอบของขดลวดจุดที่สอง หาได้จาก

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

3. น้ำหนักขดลวด secondary คำนวณได้จาก

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

โดยที่ MLT_s คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันรอบแกน 1 รอบ ของขดลวด Secondary ซึ่งจะหาได้จาก

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

และ A_{ws} คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด

4. น้ำหนักขดลวด bias ถึงแม้ว่า bias มีจำนวนรอบที่น้อยและมีขนาดลวดที่ไม่ใหญ่นัก แต่เพื่อเป็นการเพิ่มความแม่นยำให้กับสมการน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งมีน้ำหนักของขด bias มากทีเดียว นั่นคือ

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

โดยที่ MLT_b คือ ความยาวเฉลี่ยของขดลวดที่พันรอบแกน 1 รอบ ของขดลวด 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 พื้นที่หน้าตัดของขดลวด

นอกจากสมการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ก็อาจรวมถึงน้ำหนักของส่วนประกอบอื่นๆ ที่เหลืออีก เช่น น้ำหนักของเทปฉนวน ซึ่งในบทความนี้ จะถือว่าไม่มีผลคือน้ำหนักโดยรวมของหม้อแปลงความถี่สูงแต่อย่างใด และเมื่อรวมสมการทั้งหมดเข้าด้วยกันก็จะกลายเป็นสมการน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปร 9 ตัว ดังนี้

2.2.2 สมการเงื่อนไข

การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดนั้นจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดเพื่อให้หม้อแปลงมีการทำงานที่ถูกต้องและมีความเป็นไปได้ในการสร้างจริง ซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ค่า primary inductance เนื่องจากพลังงานที่ถูกถ่ายโอนมายังด้าน secondary จะถูกสะสมอยู่ในรูปพลังงานแม่เหล็กที่ขด primary ซึ่งมีผลต่อค่า inductance ของขด primary ดังนั้นค่า inductance จะหาได้จาก

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

โดยที่ L_p คือ ค่า primary Inductance โดยคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$L_p = N_p^2 \times AL \times 10^{-9} \tag{15}$$

ค่า AL คือค่า core factor ซึ่งประมาณได้จากสมการต่อไปนี้

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

ค่า l_{av} คือความยาวเฉลี่ยของเส้นทางเดินแม่เหล็ก

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

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

3. อัตราส่วน N_p / N_s สูงสุด ในระหว่างที่ primary OFF และ secondary ON จะเกิดแรงดันสะท้อนมายังขด Primary ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงดันคร่อมที่ตัว MOSFET ในปริมาณที่สูง ซึ่งค่าแรงดันนี้จะมีผลมาจาก อัตราส่วน N_p / N_s จึงจำเป็นต้องจำกัดแรงดันสะท้อนนี้ไม่ให้มีค่าเกินกว่าที่กีดทนแรงดันของ MOSFET ซึ่งจะหาได้จาก

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

4. ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุดในแกน เพื่อป้องกันการอิ่มตัวที่จะเกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นขณะหม้อแปลงความถี่สูงจ่ายกำลังสูงสุดจะต้องมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ โดยจะหาได้จาก

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

5. พื้นที่ในการพันขดลวด จากรูปที่ 2 ในการพันขดลวดจำเป็นจะต้องมีที่ว่างเพียงพอที่จะพันขดลวดให้เต็มรอบที่กำหนดให้อยู่ภายในอบบิ้น และช่องพันขดลวดของแกนเฟอร์ไรต์พอดี ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนว คือ แนวตั้ง (vertical) และแนวนอน (horizontal) โดยหาได้จาก

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

$$\text{แนวนอน : } \frac{N_1 N_p d_p}{2} \leq aK_2 - 2W_{bob} - 2C_{rep} \tag{21}$$

$$\text{และ } N_2 N_s d_s \leq aK_2 - 2W_{bob} - 2C_{rep} \tag{22}$$

สำหรับเงื่อนไขของพื้นที่สำหรับพันขดลวดนั้น จะถือว่าขดลวดมีความหนาของฉนวนรอบขดลวดต่ำมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ที่เป็นทองแดงจนสามารถละทิ้งไปได้

6. ขนาดขดลวดที่ใช้ในการพันที่เหมาะสมในการรองรับกระแสที่ไหลในขด primary และ secondary ซึ่งสามารถกำหนดให้อยู่ในเทอมของ circular mils per amp หรือ CMA ซึ่งเป็ค่าผกผันของค่าความหนาแน่นกระแส current density ค่าของ CMA ที่เหมาะสมของขด primary และ secondary สามารถหาได้ดังนี้

$$200 \leq CMA_p \leq 500, \quad 200 \leq CMA_s \leq 500 \tag{23}$$

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

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

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

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

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

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

7. จำนวนรอบของขด bias แรงดันที่เป็น bias ให้กับวงจรควบคุมของ SMPS จะได้จากขด bias โดยที่จำนวนรอบของขด bias จะเป็นตัวกำหนดแรงดันดังกล่าว ซึ่งสามารถคำนวณจำนวนรอบได้ดังนี้

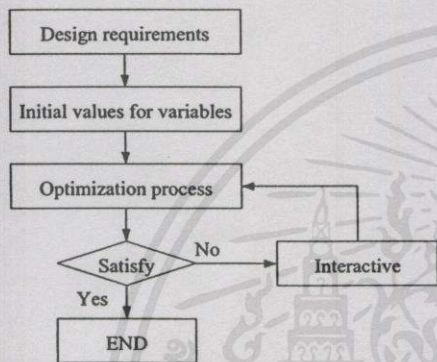
$$N_b \geq \frac{V_b N_s}{(V_d(max) + V_o)} \tag{28}$$

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

8. ขอบเขตของตัวแปรในการออกแบบ เพื่อป้องกันค่าของตัวแปรหลังจากกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมไม่ให้มีค่าเกินหรือต่ำกว่าความเป็นจริง จึงต้องกำหนดขอบเขตให้กับตัวแปรต่าง ๆ ด้วย

3. ขั้นตอนในการออกแบบห้อยแปลงความถี่สูง

จากสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกนำไปสร้างเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MATLAB ขั้นตอนในการออกแบบห้อยแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการออกแบบห้อยแปลงความถี่สูงให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด

ข้อมูลอินพุตทั้งหมดของโปรแกรมจะเป็น Design requirement จากนั้นจะเป็นขั้นตอนที่การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรทั้งหมดเพื่อนำไปสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสม ต่อจากนั้นผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้จะถูกพิจารณาว่าสามารถนำไปสร้างจริงได้หรือไม่โดยพิจารณาว่า มิติของแกน คือ E, a ที่ได้มีอยู่จริงใน Data sheet ของผู้ผลิตแกนเฟอร์ไรต์หรือไม่ จำนวนรอบ N_p, N_s และ N_b เป็นเลขจำนวนเต็มหรือไม่ และขนาดลวด d_p, d_s และ d_b มีอยู่จริงในตารางขนาดลวดหรือไม่ ซึ่งถ้าหากตัวแปรทั้งหมดเป็นไปตามข้อกำหนดที่กล่าวมา ก็จะทำให้การจบขั้นตอนการออกแบบห้อยแปลงความถี่สูง แต่ถ้าหากไม่เป็นไปตามข้อกำหนดโปรแกรมก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการปรับค่าตัวแปรในการออกแบบซึ่งเรียกว่าขั้นตอน Interactive ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เปิดโอกาสให้ผู้ออกแบบสามารถที่จะพิจารณาหาอัลกอริทึมในการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ เข้าสู่ค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ในขั้นตอนนี้ค่าตัวแปรที่ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติบางส่วนจะถูกปรับไปสู่ค่าใหม่ที่ใกล้เคียงค่าเดิมที่สามารถสร้างได้จริง หลังจากนั้นจะกลับเข้าสู่กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมอีกครั้ง เพื่อให้ตัวแปรที่เหลืออยู่บางส่วนได้ค่าที่เหมาะสมใหม่ และทำการปรับค่าตัวแปรใหม่ที่ได้ไปสู่ค่าใหม่ที่ใกล้เคียงซึ่งใช้การพิจารณาในลักษณะเดียวกันกับข้างต้นจนสามารถปรับตัวแปรทั้งหมดให้มีค่าที่เป็นไปได้ ซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างที่ทำให้ห้อยแปลงความถี่สูงมีน้ำหนักน้อยที่สุดโดยยังคงอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

4. การออกแบบห้อยแปลงความถี่สูง

ในบทความนี้จะนำเสนอการออกแบบห้อยแปลงความถี่สูงสำหรับ SMPS ที่มี Design requirements ดังตารางที่ 1 หลังจากที่ผ่านมาขั้นตอนของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมในรอบแรก (Loop 1) จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอน Interactive ที่เริ่มจากการปรับค่า E, a ใหม่ (Loop 2) การปรับค่า N_p, N_s ใหม่ (Loop 3) และการปรับค่า d_p, d_s ใหม่ (Final loop) ค่าผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้จะเป็นค่าที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรที่ได้ในแต่ละรอบของกระบวนการออกแบบโดยใช้แกนของผู้ผลิต 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 ค่าตัวแปรที่ได้ในแต่ละรอบของกระบวนการออกแบบโดยใช้แกนของผู้ผลิต 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

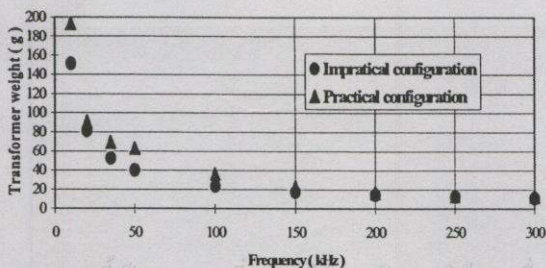
จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าของ E, a ซึ่งเป็นมิติของแกนเฟอร์ไรต์ไม่มีอยู่จริงใน Data sheet ของผู้ผลิต, จำนวนรอบ N_p, N_s และ N_b ไม่เป็นจำนวนเต็ม และ d_p, d_s ไม่มีอยู่จริงในตารางลวด ส่วนค่า g และ d_b สามารถพิจารณาโดยใช้สมการที่ 16 และ 28 ตามลำดับ จากการ

พิจารณาผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้ในรอบแรกซึ่งจะมีค่าที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ (impractical configuration) จะมีน้ำหนักรวมของหม้อแปลงเท่ากับ 52.4 g จะเห็นได้ว่าจำเป็นต้องมีการปรับค่าตัวแปรใหม่ซึ่งค่าที่ควรปรับเป็นอันดับแรกก็คือ ค่าของ E และ a เพราะจะมีผลค่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงมากที่สุด และมีความแปรผันมากที่สุด จากผลลัพธ์ของตัวแปรที่ได้หลังจากกระบวนการรอบที่สอง ค่าของ N_p , N_s และ N_b จะเปลี่ยนไปตามลักษณะของแกนที่เหมาะสมกับแกนที่มีอยู่จริงใน Data sheet และเมื่อพิจารณาน้ำหนักรวมของหม้อแปลงจะเห็นได้ว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 66.9 g ดังนั้นตัวแปรที่ควรจะปรับต่อไปคือ N_p และ N_s หลังจากขั้นตอนนี้จะเห็นได้ว่าน้ำหนักรวมของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 67.2 g ในขั้นคอนสตรัคชันสุดท้าย (final loop) ตัวแปรที่ควรจะปรับต่อไปคือ d_p และ d_s ซึ่งจะทำให้ได้โครงสร้างสุดท้ายที่เป็นไปได้ทางปฏิบัติ (practical configuration) น้ำหนักรวมของหม้อแปลงที่ได้จะเพิ่มขึ้นเป็น 69.9 g ซึ่งเป็นน้ำหนักที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

จากงานวิจัยพบว่าในขั้นตอน Interactive จะต้องมีการปรับค่าของ E และ a ซึ่งอาจจะมีได้หลาย ๆ ขนาดขึ้นอยู่กับข้อมูลของผู้ผลิตแกน ดังนั้นในตารางที่ 4 จะแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอจะทำให้ได้ค่าน้ำหนักรวมของหม้อแปลงที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทางเลือกขนาดแกนที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ทั้งสองวิธีสามารถได้โครงสร้างที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่า W_{trans} (g) ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับการเลือกขนาดแกนที่ใกล้เคียงกันโดยใช้แกนของผู้ผลิต 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



5. บทสรุป

บทความนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดโดยนำเสนอการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมร่วมกับการใช้อัลกอริทึมที่ผู้ออกแบบสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ จะเห็นได้ว่าในระหว่างขั้นตอนต่าง ๆ จำเป็นต้องมีการปรับค่าตัวแปรใหม่ซึ่งค่าที่ควรปรับเป็นอันดับแรกก็คือ ค่าของ E และ a เพราะจะมีผลค่อน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูงมากที่สุด และมีความแปรผันมากที่สุด จากตารางที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่าในการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอเมื่อเลือกแกนของ Kawatetsu และ Philips ก็สามารถที่จะได้โครงสร้างหม้อแปลงที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด และมีค่าที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติได้เช่นเดียวกัน แต่อาจจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของแกนที่ถูกกำหนดโดยผู้ผลิตแต่ละราย และจากผลที่ได้จากการออกแบบนี้ยังสามารถนำไปใช้ศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่มีผลค่อน้ำหนักโดยทางอ้อมเช่น ค่าความถี่ใช้งานของแหล่งจ่ายไฟสวิทช์จิ่ง จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าความถี่ใช้งานที่สูงขึ้นจะสามารถลดน้ำหนักหม้อแปลงลงได้ อย่างไรก็ตามจะพบว่าที่ความถี่ที่สูง ๆ (150-300 kHz) ถึงแม้ความถี่ใช้งานจะเพิ่มขึ้นก็จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหม้อแปลงไม่มากนัก

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Petkov, "Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer," in *IEEE Transactions 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 Transactions On Power Electronics Vol. 5*, No. 1, January 1990, pp. 29-40.
- [3] T. Coleman, M. A. Branch and A. Grace, "Optimization Toolbox : For Use with MATLAB" User's Guide Version 2, 1999.
- [4] *Data Book and Design Guide*, "TOPSwitch Flyback Design Methodology Application Note AN-16", Power Integrations, Inc., 1996-97, pp. 82-111.
- [5] สุวัฒน์ คั่น, "เทคนิคและการออกแบบสวิทช์จิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย," เอลเทลไทย, กรุงเทพมหานคร, 2 มิถุนายน 2538.
- [6] *Ferrite Cores for Power Supply EMI Prevention / EMC & Pulse Transformer*, Kawatetsu Ferrite Corporation, 1999.
- [7] *Data Handbook MA01 Soft Ferrites*, Philips Components, 1996.

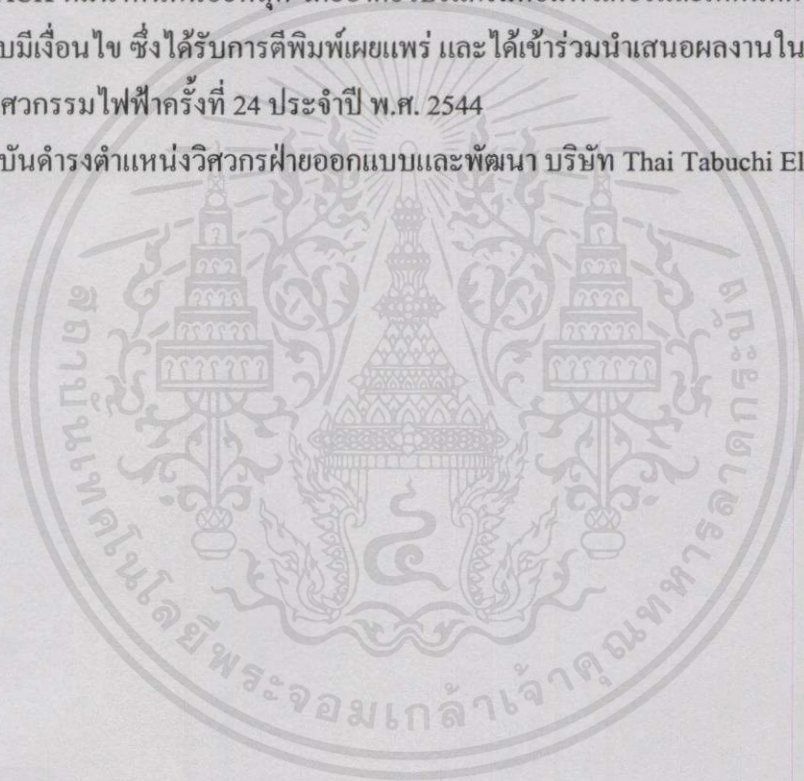
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของความถี่และน้ำหนักของหม้อแปลงความถี่สูง จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายอภิวุฒ กำนวนกิจ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2541 เริ่มเขาสู่วงการออกแบบและพัฒนาแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่งในเชิงอุตสาหกรรมหลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี เคยได้รับการฝึกอบรมที่บริษัท Tabuchi Electronics Industry Co.,Ltd. ที่ประเทศญี่ปุ่นในปี พ.ศ. 2541, พ.ศ. 2542 และ พ.ศ. 2543

มีผลงานวิจัยทางวิชาการทางด้านการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงของคอนเวอร์เตอร์ชนิด FLY-BACK ที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบมีเงื่อนไข ซึ่งได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ และได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24 ประจำปี พ.ศ. 2544

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรฝ่ายออกแบบและพัฒนา บริษัท Thai Tabuchi Electric Co.,Ltd



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้