

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟตรงแรงดันสูงเคลื่อนย้ายได้สะดวกขนาด 5 mA 100 kV
แรงดันระลอก 2 %



นายนริศ ชัชธรานนท์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1137-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PORTABLE HIGH VOLTAGE DC SOURCE WITH A 5-mA 100-kV
2% RIPPLE FACTOR

Mr. Naris Chattranont



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1137-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟตรงแรงดันสูงเคลื่อนย้ายได้

สะดวก ขนาด 5 mA 100 kV แรงดันระลอก 2%

โดย

นาย นริศ ชัชรานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์)

นริศ ชัชธรานนท์ : การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดไฟตรงแรงดันสูงเคลื่อนย้ายได้สะดวกขนาด 5 mA 100 kV แรงดันระลอก 2%. (Design and Construction of a portable high voltage DC source 5 mA 100 kV 2% ripple factor) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์, 58หน้า. ISBN 974-03-1137-7.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึง การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 100 kV จ่ายกระแสได้ 5 mA และมีแรงดันระลอกไม่เกิน 2% แรงดันด้านเข้าใช้แรงดัน 220 โวลต์ ผ่านหม้อแปลงซึ่งจะลดแรงดันลงเหลือ 60 โวลต์ วงจรเรียงกระแสจะทำการแปลงไฟสลับเป็นไฟตรงที่ 84 โวลต์ วงจรสวิตช์แบบฟูล บริดจ์จะทำการแปลงไฟตรงเป็นไฟสลับที่ความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันไฟสลับจ่ายออก 84 โวลต์ นี้ผ่านเข้าหม้อแปลงเพื่อแปลงแรงดันจากจ่ายออก 84 โวลต์ เป็นจ่ายออก 12.5 กิโลโวลต์ เพื่อนำไปจ่ายให้วงจรทวีแรงดัน ซึ่งจะแปลงแรงดันจาก 12.5 กิโลโวลต์ เป็นแรงดันไฟตรง 100 กิโลโวลต์ เพื่อจ่ายให้โหลดโดยจ่ายกระแสได้ 5 มิลลิแอมแปร์ โดยมีแรงดันระลอกไม่เกิน 2%

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

4170360621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: HIGH VOLTAGE DC SOURCE/ HIGH VOLTAGE TRANSFORMER/
MULTIPLIER.

NARIS CHATTRANONT:DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PORTABLE HIGH
VOLTAGE DC SOURCE WITH A 5 mA 100 kV 2% Ripple Factor.THESIS ADVISOR
: Komsan Petchrak,Dr.Sc. Techn. 58 pp. ISBN 974-03-1137-7.

This thesis presents a design and construction of a portable high voltage DC source 100 kV. It can supplies current of 5 mA with ripple factor less than 2%. The input voltage 220 V is reduce to 60 V by using transformer. Rectifier converts 60 V AC to 84 V DC. After that, fullbridge switching circuit converts 84 V DC to 84 V AC peak at 20 kHz. The high voltage and high frequency transformer step-up this voltage to 12.5 kV and applies to multiplier circuit. It converts 12.5 kV AC to 100 kV DC to supply load with current 5 mA with ripple factor of less than 2%.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering
Field of study Electrical Engineering
Academic year 2001

Student's signature.....

Adviser's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างยิ่งจากท่านอาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโดยได้ให้คำแนะนำต่อข้าพเจ้ามาตลอด รวมทั้งท่านกรรมการทุกท่าน นอกจากนี้ยังมีบุคคลอื่น ๆ อีกมากที่ได้สนับสนุนข้าพเจ้าให้สามารถทำผลงานชิ้นนี้ออกมาได้ อาจจะไม่เอ่ยนามของผู้ให้ความสนับสนุนได้ไม่หมดแต่ข้าพเจ้ารำลึกถึงบุญคุณของท่านเสมอ ข้าพเจ้าขอเอ่ยนามเพียงบางส่วนดังนี้

ท่านอาจารย์ ประสิทธิ์ พิเศษพัฒน์ ได้ให้ข้อคิดในการทำงานและการดำเนินชีวิต
คุณสัมพันธ์ ดวงเพชร หัวหน้าแผนกที่ได้ให้โอกาสอย่างเต็มที่แก่ข้าพเจ้าในการทำวิทยานิพนธ์
คุณจิรัช วงจันทร์ ได้ให้ข้อคิดในแง่ผลงานกับมนุษย์สัมพันธ์
คุณถาวร สุวรรณกิจ ที่ได้ช่วยสอนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้แก่ข้าพเจ้าซึ่งได้ช่วยให้ข้าพเจ้ามีประสบการณ์และความรู้ที่หลากหลาย ๆ ด้าน
คุณพินิจ ศิริธร สำหรับความช่วยเหลืออย่างจริงใจของเพื่อนแท้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาคไฟฟ้าและตึกวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เพื่อนที่การไฟฟ้านครหลวงทุกคน และผู้ที่ข้าพเจ้ามิได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ข้าพเจ้าขอขอบคุณผู้ที่ให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา คุณอุษณีย์ สุวรรณภรณ์ สำหรับความเป็นห่วงเสมอแม้งานจะมีอุปสรรคตลอดมา และพ่อแม่ผู้ให้จิตวิญญาณและสนับสนุนลูกเสมอ

นริศ ชัชธรานนท์

เมษายน 2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไปและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ผลงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. เทคนิคการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง.....	3
2.1 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง.....	3
2.1.1 แรงดันวงจรขึ้นบันไดเมื่อไม่มีโหลด.....	3
2.1.2 แรงดันวงจรขึ้นบันไดเมื่อมีโหลด.....	4
2.1.2.1 การคำนวณแรงดันระลอก.....	5
2.1.2.2 การคำนวณหาแรงดันตก.....	6
2.1.2.3 จำนวนขึ้นบันไดที่พอเหมาะ.....	8
3. หม้อแปลงกำลังความถี่สูง.....	9
3.1 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
3.2 ส่วนประกอบของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง.....	11
3.3 แกนเฟอร์ไรต์.....	12
3.3.1 ลักษณะและขนาดมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์.....	12
3.3.2 เส้นโค้งฮิสเตอรีซิส.....	13
3.3.3 ค่าความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์.....	13
3.4 การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง.....	15
3.5 การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม.....	15
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ.....	16
4. เพาเวอร์มอสเฟตและวงจรสวิตช์.....	19

4.1	เพาเวอร์มอสเฟต.....	19
4.1.1	ลักษณะสมบัติที่สภาวะคงที่ของมอสเฟต.....	20
4.1.2	ลักษณะสมบัติขณะทำการสวิตช์.....	22
4.1.3	พารามิเตอร์ในการทำงานของมอสเฟต.....	23
4.1.4	การออกแบบวงจรขับเคลื่อน.....	26
4.1.4.1	วงจรถูกขับเคลื่อน.....	26
4.2	วงจรถูกขับเคลื่อน.....	32
4.2.1	วงจรถูกขับเคลื่อนแบบฟลายแบค (Flyback).....	32
4.2.2	วงจรถูกขับเคลื่อนแบบพุช-พูล (Push-Pull).....	32
4.2.3	วงจรถูกขับเคลื่อนแบบฟูลบริดจ์ (Fullbridge)	33
5.	หลักการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง.....	34
5.1	การออกแบบวงจรถูกขับเคลื่อนโดยใช้โปรแกรม Pspice.....	34
5.1.1	วงจรถูกขับเคลื่อนเพื่อหาค่าพารามิเตอร์.....	35
5.1.2	ผลการ Simulation.....	35
5.2	วงจรถูกขับเคลื่อนสร้างแรงดันสูงกระแสตรง.....	36
5.2.1	วงจรถูกขับเคลื่อน.....	36
5.2.2	วงจรถูกขับเคลื่อนแบบฟูลบริดจ์.....	37
5.2.3	การออกแบบหม้อแปลงกำลังความถี่สูง.....	40
5.2.4	การออกแบบวงจรถูกขับเคลื่อน.....	45
6.	การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	48
7.	สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	54
	รายการอ้างอิง.....	56
	ประวัติผู้เขียน.....	57

5.1 คุณสมบัติของมอสเฟต IRFP460.....	39
5.2 แสดงขนาดของแกน EC90.....	42
5.3 คุณสมบัติของเนื้อสาร PC40.....	42
5.4 แสดงขนาดสายและคุณสมบัติ.....	44



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 a) วงจรขึ้นบันได.....	4
2.1 b) รูปคลื่นขณะไม่มีโหลด.....	4
2.2 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงขณะมีโหลด.....	4
3.1 พัลส์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไหลผ่านขดลวดแกนอากาศ.....	9
3.2 สนามแม่เหล็กมากขึ้นเมื่อใส่วัสดุแม่เหล็ก.....	10
3.3 สนามแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กวงปิด.....	10
3.4 แสดงแกนเฟอร์ไรต์รูปแบบต่าง ๆ.....	12
3.5 แสดงลักษณะเส้นโค้งฮิสเตอรีซิสของเนื้อสาร 3C8 และ 3C6A.....	13
3.6 เส้นโค้งฮิสเตอรีซิส.....	14
3.7 กราฟแสดงความสูญเสียของเนื้อสาร 3C8 และ 3C6A.....	14
3.8 แสดงวงจรมุมของหม้อแปลง.....	16
4.1 n-channel depletion type MOSFET.....	19
4.2 p-channel depletion type MOSFET.....	19
4.3 transfer characteristic.....	20
4.4 โมเดลที่ steady state ของ MOSFET.....	21
4.5 วงจรมุมของมอสเฟตขณะทำการสวิตซ์.....	21
4.6 แสดงรูปสัญญาณขณะมอสเฟตทำการสวิตซ์.....	21
4.7 Output Characteristic ของมอสเฟต.....	22
4.8 Transfer Characteristic ของมอสเฟต.....	22
4.9 กราฟแสดงค่า Transconductance ของมอสเฟต.....	23
4.10 Linear Characteristic ของมอสเฟต.....	23
4.11 ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับอุณหภูมิรอยต่อ.....	24
4.12 ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับกระแสครอน.....	24
4.13 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับอุณหภูมิที่ตัวถัง.....	24
4.14 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย.....	25
4.15 ค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับแรงดัน V_{DS}	25
4.16 ค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับแรงดัน V_{GS}	26
4.17 การใช้งานมอสเฟตเป็นสวิตซ์แบบคอมมอนซอร์ส.....	27

4.18 การขับมอสเฟตด้วย TTL.....	27
4.19 การใช้ IC ที่จ่ายกระแสได้สูงต่อระหว่าง TTL กับมอสเฟต.....	29
4.20 a) การขับมอสเฟตด้วย CMOS.....	29
4.20 b) การใช้ CMOS ขนานกันเพื่อจ่ายกระแสเกตได้สูงขึ้น.....	29
4.21 การขับมอสเฟตด้วยออปแอมป์.....	30
4.22 การขับเกตโดยใช้ Opto-coupler.....	31
4.23 วงจรสวิตช์แบบ Flyback.....	31
4.24 วงจรสวิตช์แบบ Push Pull.....	32
4.25 วงจรสวิตช์แบบ Full Bridge.....	33
5.1 วงจรที่ใช้ในการ simulation.....	35
5.2 รูปคลื่นแรงดันขาออกของวงจรที่แรงดัน.....	35
5.3 วงจรสวิตช์.....	35
5.4 แสดง Block diagram การทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง.....	36
5.5 แสดงวงจร Rectifier.....	36
5.6 วงจรสวิตช์.....	38
5.7 แสดงค่ากระแสและแรงดันของมอสเฟต.....	39
5.8 ลักษณะของแกน EC90.....	41
5.9 บอบบี้.....	43
5.10 หม้อแปลงที่พันสำเร็จแล้ว.....	45
5.11 แสดงแผ่นตัวเก็บประจุด้านหน้า.....	46
5.12 แสดงแผ่นตัวเก็บประจุด้านหลัง.....	46
6.1 วงจรสวิตช์และวงจรเรียงกระแส.....	48
6.2 วงจรสวิตช์.....	49
6.3 วงจรที่แรงดัน.....	49
6.4 รูปคลื่นแรงดันที่ 115 kV ขณะไม่มีโหลด.....	50
6.5 แรงดันระลอกที่ 115 kV ขณะไม่มีโหลด.....	50
6.6 รูปคลื่นแรงดันที่ 58 kV ขณะไม่มีโหลด.....	51
6.7 รูปคลื่นแรงดันที่ 90 kV ขณะไม่มีโหลด.....	50
6.8 ค่าแรงดัน 100 kV ที่ half load.....	51
6.9 แรงดันระลอก ที่ half load.....	52
6.10 แรงดัน 90 kV ที่ half load.....	52
6.11 แสดงค่าแรงดันระลอกที่ 100 kV full load.....	51
6.12 ค่าแรงดัน 103 kV full load.....	53
6.13 ค่าแรงดันระลอกที่ 103 kV full load.....	53

6.14 ค่าแรงดัน 68 kV ที่ full load.....	53
6.15 ค่าแรงดัน 53 kV ที่ full load.....	54



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไปและที่มาของปัญหา

ในห้องทดลองวิจัยด้านไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปเรามักจะทำการทดลองหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าฉนวนมีค่าความจุไฟฟ้าสูง ค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีความเชื่อถือได้สูงเนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะมีความเรียบมาก (แรงดันระลอกน้อย) ส่วนฉนวนที่มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ เช่น ก๊าซหรือฉนวนแข็งแผ่นบาง จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องทดสอบที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้เรียบ (แรงดันระลอกน้อย) เพื่อให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีความน่าเชื่อถือได้สูง ตามมาตรฐาน IEC กำหนดไว้ว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ทดสอบวัสดุฉนวนมี ripple factor สูงสุดไม่เกิน 3%

เนื่องจากในห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูงไม่มีการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดเล็กซึ่งสามารถจ่ายแรงดันได้สูงจึงมีแนวคิดว่าจะทดลองสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงที่มีขนาดเล็กขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบฉนวนซึ่งจะเป็นประโยชน์ในงานวิจัยและพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.2 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 แรงดันไฟฟ้าของเครื่องทดสอบ 100 kV
- 1.2.2 จ่ายกระแสให้กับโหลด 5 mA
- 1.2.3 แรงดันระลอกไม่เกิน 2%

1.3 ผลงานการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้างานวิจัยในอดีตพบว่าในปี 1988 Kyosan Electric Mfg. Co. Ltd. ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงขึ้นมาโดย Juichi Tanaka และ Itsuo Yuzurihara [1] สามารถสร้างแรงดันสูงกระแสตรงได้ ± 70 kV กระแส 0.15 A ที่ความถี่ 20 kHz น้ำหนัก 200 กิโลกรัม และผลงานของ Dr. Igor A. Krichtafovitch [10] ที่ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงโดยใช้แนวคิดแบบโมดูลสามารถสร้างแรงดันได้ 20 kV จ่ายกระแสได้ 100 mA ในขนาด 9*5*4 นิ้วเท่านั้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ

- 1.4.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงจากงานวิจัยในอดีต
- 1.4.2 ออกแบบและวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

- 1.4.3 ออกแบบและสร้างวงจรสวิตช์ความถี่สูง
- 1.4.4 ออกแบบและสร้างหม้อแปลงความถี่สูง
- 1.4.5 ออกแบบและสร้างวงจรชุดทวีแรงดัน
- 1.4.6 ทดสอบการทำงานของวงจรทั้งหมด
- 1.4.7 ประเมินผล สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เรียนรู้เทคนิค ปัญหาในการทำวงจรสวิตช์
- 1.5.2 เรียนรู้เทคนิค การออกแบบ การคำนวณและพันหม้อแปลงแรงดันสูง ความถี่สูง
- 1.5.3 เรียนรู้เทคนิค ปัญหาในการออกแบบชุดวงจรทวีแรงดัน
- 1.5.4 ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์เมื่อนำมาใช้กับวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าสูง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

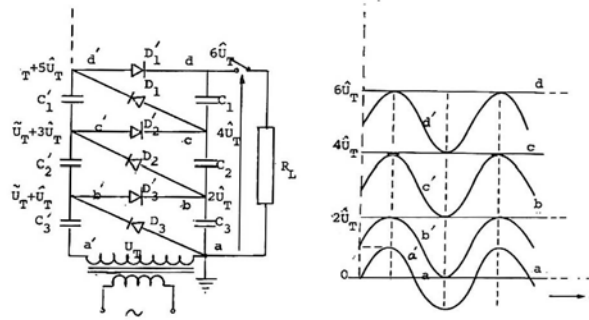
เทคนิคการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

2.1 การสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

วงจรสร้างแรงดันสูงกระแสตรงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ วงจรขั้นบันไดสร้างแรงดันสูงกระแสตรง (Cascade circuit for DC High Voltage) ตามหลักการของ Cockcroft Walton

2.1.1 แรงดันวงจรขั้นบันไดเมื่อไม่มีโหลด

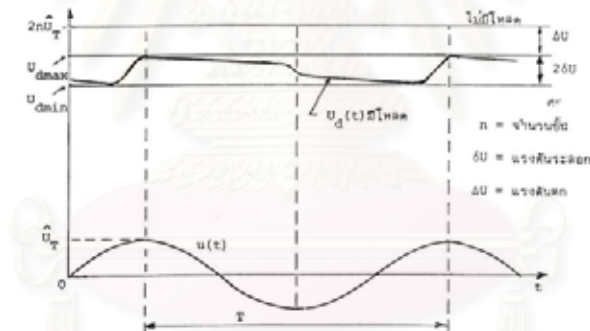
รูป 2.1 a แสดงถึงวงจรขั้นบันไดที่ได้จากการเอาวงจรสร้างแรงดันกระแสตรง 2 เท้ามาต่อซ้อนกัน 3 ชั้นคือ แต่ละชั้นจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัวและไดโอด 2 ตัว โดยที่ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งเป็นตัวเก็บพักประจุและอีกตัวหนึ่งเป็นตัวกรองให้ได้แรงดันกระแสตรง ดังเช่น วงจร a, a', b, b' เป็นวงจรสร้างแรงดัน 2 เท้าหนึ่งชั้น C'_1, C'_2, C'_3 , และ C_1, C_2, C_3 เป็นตัวพักประจุและตัวกรองกระแสตามลำดับ วงจรแต่ละชั้นจะสร้างแรงดันได้สองเท่าของค่ายอดแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงตัวจ่ายคือเป็น $2U_T$ ของไดโอดที่ต่อในวงจร D'_1, D'_2, D'_3 จะนำกระแสในช่วงคลื่นครึ่งบวกและ D_1, D_2, D_3 จะนำกระแสในช่วงคลื่นครึ่งลบ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด b' เมื่อเทียบกับดินจะเปลี่ยนแปลงระหว่างศูนย์กับ $2U_T$ และ C_3 ได้รับแรงดันอัดประจุเป็น $2U_T$ ผ่านไดโอด D'_3 จุด b มีศักย์ไฟฟ้าคงที่ $2U_T$ และแรงดันอัดประจุให้ C'_2 ผ่านไดโอด D_2 จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $2U_T$ กับศูนย์ ฉะนั้น C_2 จะได้รับแรงดันอัดประจุถึง $2U_T$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุด c จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง $2U_T$ ถึง $4U_T$ และ C_2 จะได้รับแรงดันอัดประจุผ่านไดโอด D'_2 เท่ากับ $2U_T$ ซึ่งทำให้จุด C มีศักย์ไฟฟ้าสูงถึง $4U_T$ เมื่อเทียบกับดิน วงจรชั้นที่สาม ตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะได้รับแรงดันอัดประจุถึง $2U_T$ เช่นกัน นั่นคือจุด d จะมีศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับดินเท่ากับ $2U_T$ จะเห็นได้ว่าการที่เราใช้หลาย ๆ ชั้นต่อกันจะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันสูงมาก ๆ ได้ โดยที่ตัวเก็บประจุและไดโอดแต่ละตัวทนแรงดันเพียงสองเท่าของค่ายอดแรงดันหม้อแปลงตัวจ่าย ยกเว้นตัวเก็บประจุตัวล่างสุด ๆ (ในที่นี้คือ C_3) ได้รับแรงดันสูงสุดเพียง U_T เท่านั้น แรงดัน ณ จุดต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีโหลดแสดงในรูปของเวลาได้ดังรูป 2.1b



รูป 2.1 a) วงจรขั้วบันได b) รูปคลื่นขณะไม่มีโหลด

2.1.2 แรงดันวงจรขั้วบันไดเมื่อมีโหลด

วงจรขั้วบันไดสร้างแรงดันกระแสตรง สามารถสร้างได้ประมาณสองเท่าของค่ายอดแรงดันด้านจ่ายออกของหม้อแปลงตัวจ่ายคุณด้วยจำนวนขั้วถ้าหากไม่มีโหลดหรือไม่มีแรงดันตก แต่เมื่อมีโหลดจะมีแรงดันตกในไดโอด ในหม้อแปลงและในตัวเก็บประจุเอง ดังนั้นวงจรในรูป 2.1 จะได้แรงดันที่จุด d น้อยกว่า $6U_T$



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงขณะมีโหลด

ในรูป 2.2 แสดงถึงรูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $U_d(t)$ ของวงจรขั้วบันไดเมื่อมีโหลด แรงดันที่ได้จะต่ำกว่าค่าอุดมคติ เนื่องจากแรงดันตก ΔU และแรงดันระลอก δU

2.1.2.1 การคำนวณหาแรงดันระลอก

แรงดันกระแสตรงที่ได้จากการเรกติฟายจากแรงดันกระแสสลับโดยใช้ไดโอดเรียงกระแสและมีตัวเก็บประจูกองกระแสเพื่อให้ได้คลื่นเรียบ แต่คลื่นที่ได้ก็ยังเป็นระลอกซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

$$\delta U = \frac{I_d}{2fC} \quad (2.1)$$

เมื่อ I_d คือ กระแสตรงที่จ่ายให้โหลด

f คือ ความถี่ของแรงดันกระแสสลับ

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุรอกกระแส

ในกรณีวงจรชั้นบันไดดังในรูป 2.1 ตัวเก็บประจุรอกกระแส C_1 , C_2 และ C_3 ซึ่งมีความจุไฟฟ้าทุกตัวเท่ากับ C สมมติว่าทุก ๆ ไชเคิลวงจรจ่ายกระแสให้กับโหลดที่ปลายแรงสูงจุด d เท่ากับ I_d นั่นคือ C_1 จ่ายประจุออกไปเท่ากับ $Q = \frac{I_d}{f}$ จึงจะทำให้เกิดแรงดันตกไป

$$\delta U_1 = \frac{I_d}{2fC_1}$$

ในขณะเดียวกัน C_2 ต้องจ่ายประจุให้กับโหลดเท่ากับ Q และถ่ายประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 เท่ากับ Q ฉะนั้น C_2 จ่ายประจุออกไปเท่ากับ $2Q = \frac{2I_d}{f}$ ทำให้แรงดันตกไป

$$\delta U_2 = \frac{2I_d}{2fC_2}$$

และ C_3 ถ่ายทอดประจุไปให้โหลดเท่ากับ Q และให้กับ C_2 เท่ากับ $2Q$ และถ่ายทอดให้ C_2 เท่ากับ Q ดังนั้นแรงดันตกใน C_3 คือ

$$\delta U_3 = \frac{3I_d}{2fC_3}$$

แรงดันตกในตัวเก็บประจุรอกกระแสเหล่านี้ทำให้แรงดันระลอกทั้งหมดเป็น

$$\delta U = \delta U_1 + \delta U_2 + \delta U_3$$

$$\frac{I_d}{2f} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{2}{C_2} + \frac{3}{C_3} \right)$$

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทุกตัวมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ C

$$\text{ดังนั้น } \delta U = \frac{I_d}{2fC} (1 + 2 + 3)$$

ถ้าวงจรชั้นบันไดมี n ชั้น จะได้แรงดันระลอกรวม

$$\begin{aligned}
\delta U &= \frac{I_d}{2fC} (1 + 2 + 3 + \dots + n) \\
&= \frac{I_d}{2fC} \frac{n}{2}(n + 1) \\
\delta U &= \frac{n}{4}(n + 1) \frac{I_d}{fC} \quad (2.2)
\end{aligned}$$

จะเห็นว่าตัวเก็บประจุตัวล่างสุด เป็นตัวที่จ่ายประจุออกไปมากที่สุด จึงนับได้ว่าเป็นตัวที่มีผลต่อแรงดันระลอกอย่างยิ่ง ฉะนั้นความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุรอง กระแสตัวล่างสุดควรมีค่าสูงกว่าตัวถัดไป

2.1.2.2 การคำนวณแรงดันตก ΔU

ในขณะที่วงจรถ่ายไหลดกระแส I_d (หรือประจุ $Q = \frac{I_d}{f}$) ทุก ๆ ไชเคิล จะมีการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ C_1', C_2', C_3' ไปให้ตัวเก็บประจุรอง กระแส C_1, C_2, C_3 จึงทำให้เกิดแรงดันตกในตัวเก็บประจุพัก C_1', C_2', C_3' ในทำนองเดียวกัน การถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุรองกระแสไปยังตัวเก็บประจุพัก C_1', C_2', C_3' ก็ย่อมทำให้เกิดแรงดันตกเช่นกัน สรุปแล้วตัวเก็บประจุทุกตัวจะได้รับแรงดันอัดประจุน้อยกว่าอุดมคติยกเว้นตัวเก็บประจุพักตัวล่างสุดที่มีโอกาสได้รับแรงดันอัดประจุเท่ากับค่ายอดของแรงดันด้านขาออกของหม้อแปลง

จากวงจรรูปร่างในรูป 2-1 ถ้าจ่ายไหลดกระแส I_d ออกไปที่จุด d หรือประจุ Q ทุก ๆ ไชเคิล ในช่วงครึ่งไชเคิลบวกไดโอด D_1', D_2' และ D_3' นำกระแสตัวเก็บประจุ C_3' จะถ่ายเทประจุออกไป $\frac{3I_d}{f}$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกใน C_3 ดังนั้น C_3 จะได้รับแรงดันอัดประจุสูงสุดเพียง

$$2\hat{U}_T - \frac{3I_d}{fC}$$

แรงดันนี้ C_2' จะได้รับประจุจาก C_3 แต่เมื่อ C_3 ถ่ายเทประจุให้ C_2' เท่ากับ $\frac{2I_d}{f}$ และให้ไหล $\frac{I_d}{f}$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกใน C_3 เอง ฉะนั้น C_2' จะได้รับประจุจาก C_3 ด้วยแรงดันอัดประจุเพียง

$$(U_{C_2'})_{\max} = 2\hat{U}_T - \frac{3I_d}{fC} - \frac{3I_d}{fC}$$

ในครึ่งไซเคิลต่อมา C_2' จะต้องถ่ายเทประจุออกไปให้ C_2 จึงทำให้แรงดันตกไปอีก $2I_d$ แรงดันของ C_2' จะเหลือเพียง

$$(U_{C_2'})_{\min} = 2\hat{U}_T - \frac{6I_d}{fC} - \frac{2I_d}{fC}$$

ทำนองเดียวกับแรงดันที่ C_2 จะได้รับ

$$(U_{C_2})_{\max} = 2\hat{U}_T - \frac{6I_d}{fC} - \frac{2I_d}{fC}$$

$$(U_{C_2})_{\min} = (U_{C_2})_{\max} - \frac{2I_d}{fC}$$

$$= 6\hat{U}_T - \frac{8I_d}{fC}$$

ฉะนั้นแรงดันตกทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของแรงดันตกในตัวเก็บประจุแต่ละตัว ถ้าวงจรขึ้นบันไดมี n ชั้น จะได้

$$\Delta U = \frac{I_d}{fC} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right) \quad (2.3)$$

เมื่อตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันหมด คือ C แรงดันที่ผลิตออกมาได้ที่ปลายแรงสูงจะกระเพื่อมอยู่ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด คือ

$$(U_d)_{\max} = 2n\hat{U}_T - \Delta U$$

$$(U_d)_{\min} = 2n\hat{U}_T - \Delta U - 2\delta U$$

ถ้าจำนวนชั้นของวงจรขึ้นบันไดมีมากพอ คือ $n^3 > n^2$ เช่น $n > 3$ ค่าแรงดันตกอาจคำนวณค่าโดยประมาณจากความสัมพันธ์

$$\Delta U \cong \frac{I_d}{fC} \left(\frac{2}{3}n^3 \right)$$

ฉะนั้นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรขึ้นบันไดจึงหาค่าโดยประมาณได้จากสมการ

$$U_d = 2n\hat{U}_T - \frac{2}{3}n^3 \frac{I_d}{fC}$$

จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการลดแรงดันตกให้น้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งคือเพิ่มแรงดันกระแสตรงได้โดยการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าหรือเพิ่มความถี่ของแรงดันกระแสสลับที่จ่ายออกจากหม้อแปลงตัวจ่าย

2.1.2.3 จำนวนชั้นบันไดที่พอเหมาะ

การสร้างแรงดันกระแสตรงด้วยวงจรชั้นบันได เราอาจสร้างแรงดันให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่มจำนวนชั้น ในทางปฏิบัติถ้าหากกำหนดค่ากระแสโหลด I_d ความจุไฟฟ้าและความถี่ของแหล่งจ่ายมาให้ จะพบว่าถ้ายิ่งเพิ่มจำนวนชั้นสูงมากเกินไป จะทำให้แรงดันตกมาก แรงดันที่ได้ออกมาที่โหลดกลับต่ำลง แสดงว่าจำนวนชั้นของวงจรมีขีดจำกัดหรือมีค่าที่พอเหมาะที่สามารถสร้างแรงดันได้สูงสุด ซึ่งหาได้จาก

$$\frac{dU_d}{dn} = 0$$

เมื่อ U_d เป็นแรงดันกระแสตรงที่โหลด

จำนวนชั้นที่พอเหมาะคือ

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{f \cdot c \cdot \hat{U}_T}{I_d}}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} (U_d)_{opt} &= \frac{4}{3}n_{opt} \hat{U}_T \\ &= \frac{2}{3}(2n_{opt} \hat{U}_T) \end{aligned}$$

นั่นคือแรงดันกระแสตรงที่สร้างได้จะมีค่าเพียง 67% ของค่าตามทฤษฎีเท่านั้น และยิ่งกว่านั้นตามความเป็นจริงแล้ว ยังมีแรงดันตกเนื่องจากไดโอดอีก แรงดันที่ได้ออกมาจะยิ่งต่ำลงไปอีก

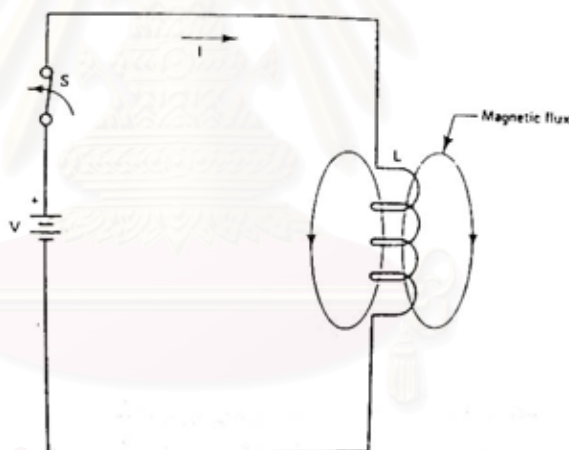
บทที่ 3

หม้อแปลงกำลังความถี่สูง

หม้อแปลงกำลังความถี่สูงเป็นอุปกรณ์หลักตัวหนึ่งในการออกแบบวงจรสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงกระแสตรงขนาดเล็ก ก่อนที่เราจะออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงได้นั้น จะต้องทราบถึงทฤษฎีและองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาประยุกต์ในการออกแบบได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะได้กล่าวดังต่อไปนี้

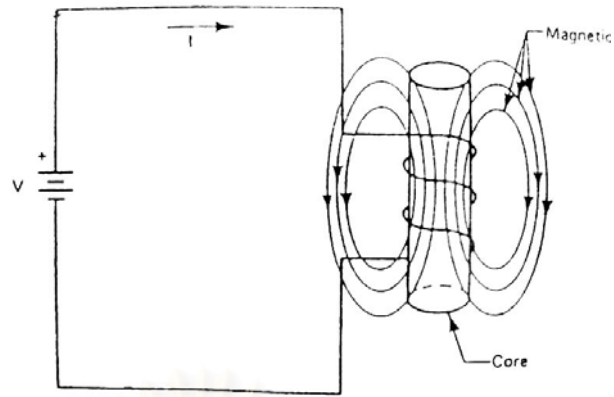
3.1 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

พิจารณาวงจรไฟฟ้าในรูป 3.1 มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า V สวิตช์ S และโหลด L ในที่นี้เป็นขดลวดแกนอากาศ ถ้าสวิตช์ S ปิดวงจรจะมีกระแส I ไหลผ่านขดลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เราเรียกองค์ประกอบนี้ว่า ฟลักซ์ (Flux) และเรียกเส้นของสนามแม่เหล็กว่า Flux Linkage



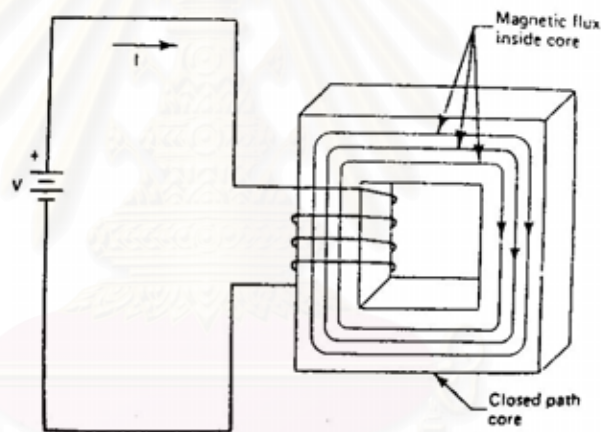
รูปที่ 3.1 ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไหลผ่านขดลวดแกนอากาศ

ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นยังไม่หนาแน่น แต่ถ้าเราใส่แท่งวัสดุแม่เหล็ก (Magnetic Material) เข้าไประหว่างขดลวด ดังรูป 3.2 จะเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นในแท่งวัสดุแม่เหล็กนั้น และสร้างฟลักซ์ให้เกิดมากขึ้น



รูปที่ 3.2 สนามแม่เหล็กมากขึ้นเมื่อใส่วัสดุแม่เหล็กเข้าไป

ถ้าแท่งวัสดุแม่เหล็กเป็นแกนตามแนวเส้นทางของฟลักซ์ สนามแม่เหล็กจะวิ่งไปภายในแกน ดังรูป 3.3 ทำให้สนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 3.3 สนามแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กวงปิด

ระดับของฟลักซ์ที่เกิดขึ้นเรียกว่า ความหนาแน่นของฟลักซ์ (Flux Density) หรือ การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic Induction) ใช้สัญลักษณ์ B หน่วย เทสลา

ในการทำงานเดียวกัน แรงแม่เหล็ก (Magnetic Force) นี้จะเป็นตัวทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเรียกว่าความแรงของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength, H) หน่วย Oersteds

ความแรงสนามแม่เหล็กหาได้จากสูตร

$$H = \frac{0.4\pi NI}{L} \quad (3.1)$$

N = จำนวนรอบของขดลวด

l = กระแสที่ไหลในขดลวด

L_l = ความยาวของแกน

ความสัมพันธ์ระหว่าง ฟลักซ์แม่เหล็กและแรงแม่เหล็ก เราเรียกว่าความซึมซาบของแม่เหล็ก (Permeability) μ

กำหนดให้

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.2)$$

3.2 ส่วนประกอบของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

หม้อแปลงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นและจ่ายกำลังให้กับวงจรทวีแรงดันเพื่อจ่ายโหลด มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

แกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) การเหนี่ยวนำแม่เหล็กบนแกนเฟอร์ไรต์จะมีผลทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่เกิดในแกนอากาศมาก เฟอร์ไรต์มีจุดอิ่มตัวสูงในช่วง 3000 ถึง 4000 เกาส์ และมีความสูญเสียต่ำที่ความถี่สูง ๆ เฟอร์ไรต์จึงเหมาะที่จะนำมาทำหม้อแปลงความถี่สูงมากกว่าแกนเหล็ก

บ็อบบิ้น (Bobbin)

บ็อบบิ้นหรือแบบรองพัน ในวิทยานิพนธ์นี้ทำมาจากกระดาษฉนวนซึ่งทนความร้อนได้สูง บ็อบบิ้นช่วยให้การพันขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์สะดวกขึ้นและป้องกันการลัดวงจรระหว่างขดลวดกับแกนเฟอร์ไรต์

ลวดทองแดงอาบน้ำยา (Enameled Copper Wire)

การพันขดลวดทั้งขดปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง ใช้ลวดทองแดงอาบน้ำยาพันบนบ็อบบิ้นเพื่อให้ได้จำนวนรอบตามต้องการ ลวดทองแดงเคลือบฉนวนที่ใช้มีหลายชนิด คือ เคลือบฉนวนหนาหรือบาง ขนาดของลวดทองแดงที่ใช้พันนั้นขึ้นอยู่กับกระแส ความถี่และผลข้างเคียงอื่น ๆ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

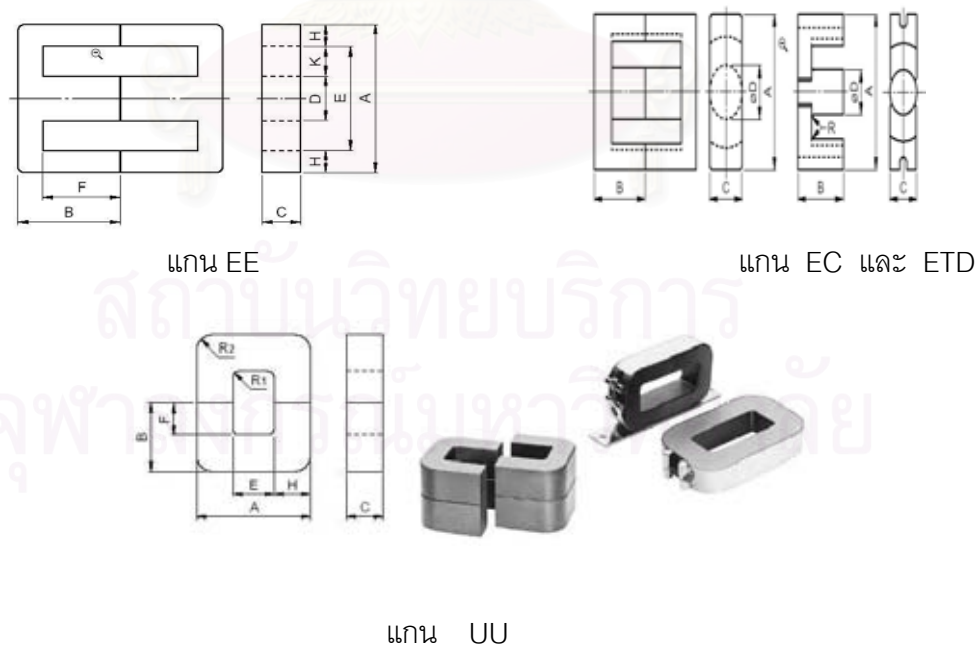
เทปฉนวน

เทปฉนวนใช้พันสำหรับเป็นตัวรองระหว่างชั้นขดลวดในหม้อแปลงความถี่สูงและมีหน้าที่สำคัญในการแยกส่วนทางไฟฟ้าระหว่างขด primary และขด secondary ด้วยวัสดุที่ใช้ทำเทปฉนวนอาจเป็นไมลาร์ (Mylar) หรือโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.05-0.1 mm.

3.3 แกนเฟอร์ไรต์

3.3.1 ลักษณะและขนาดมาตรฐานของแกนเฟอร์ไรต์

ถึงแม้จะมีวัสดุแม่เหล็กหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงได้นั้น แต่วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นแกนมากที่สุดคือ เฟอร์ไรต์ เนื่องจากมีความสูญเสียที่ความถี่สูง แกนเฟอร์ไรต์ถูกผลิตออกมาหลายขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานเดียวกัน เช่น EI, EE, EC, ETD เป็นต้น ปกติผู้ผลิตจะทำแกนเฟอร์ไรต์ออกมาในลักษณะคู่ประกบ เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับขั้วบับิ้น การประกบแกนเฟอร์ไรต์บนขั้วบับิ้นจะทำให้ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นวงบรรจบได้ ตัวอย่างขนาดของแกนเฟอร์ไรต์แบบต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 3.4



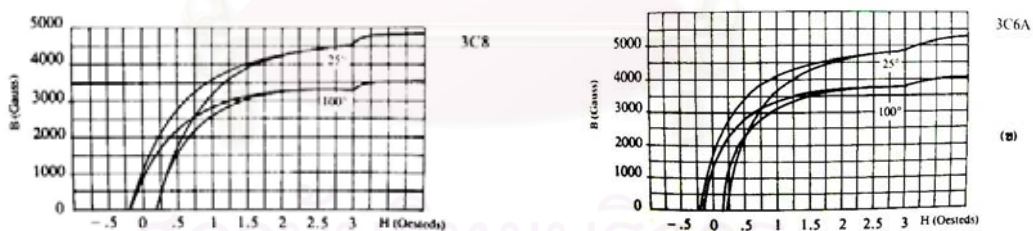
รูปที่ 3.4 แกนเฟอร์ไรต์รูปแบบต่างๆ

3.3.2 ลักษณะสมบัติของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์

ชนิดของเนื้อสารที่ใช้ทำแกนเฟอร์ไรต์ต่างชนิดกันจะให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรต์แตกต่างกันด้วยถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันทุกประการก็ตาม ในแผนข้อมูลเนื้อสารที่ให้มาเกี่ยวกับแกนเฟอร์ไรต์นั้น จะต้องมียาวละเอียดคุณสมบัติเนื้อสารแสดงไว้เสมอ ข้อมูลสำคัญที่ควรจะทำความเข้าใจและศึกษาไว้ก็คือ เส้นโค้งฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Curve) และค่าสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)

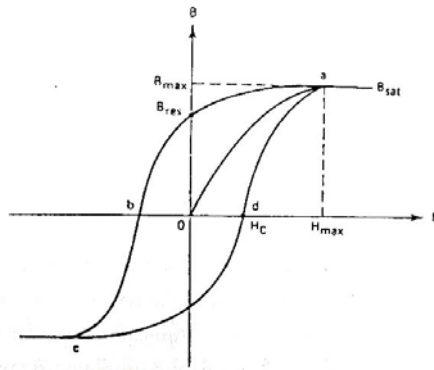
3.3.2.1 เส้นโค้งฮิสเตอรีซิส

เส้นโค้งฮิสเตอรีซิสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก (H) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดในรูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอรีซิสของเนื้อสารชนิด 3C8 และ 3C6A ของผู้ผลิต Ferroxcube จากรูปจะเห็นว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก H มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มสนามแม่เหล็ก H ก็ตาม จุดดังกล่าวเรียกว่า แกนเริ่มมีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Saturation)



รูปที่ 3.5 ลักษณะเส้นโค้งฮิสเตอรีซิสของเนื้อสาร 3C8 และ 3C6A

โดยปกติผู้ผลิตจะแสดงกราฟของเส้นโค้งฮิสเตอรีซิสเพียงครั้งเดียวเนื่องจากอีกครึ่งหนึ่งของเส้นโค้งฮิสเตอรีซิสจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการเพียงแต่จะมีลักษณะกลับทิศเท่านั้น ดังแสดงในรูป 3.6

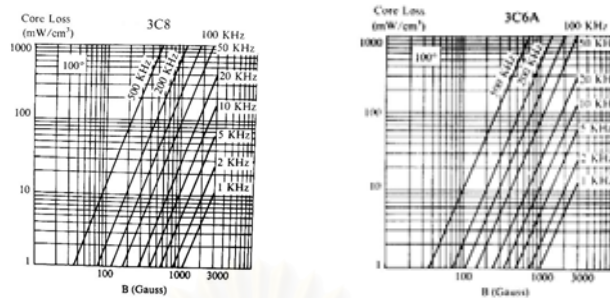


รูปที่ 3.6 เส้นโค้งฮิสเตอร์รีซิส

การใช้งานแกนเฟอร์ไรต์ในหม้อแปลงกำลังความถี่สูงจะต้องระวังไม่ทำให้แกนเฟอร์ไรต์เกิดการอิ่มตัวขึ้นได้ ดังนั้นโดยทั่วไปในการออกแบบหม้อแปลงกำลังความถี่สูงจึงควรกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในแกนขณะทำงาน มีค่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดก่อนอิ่มตัวของแกนเฟอร์ไรต์เพื่อความปลอดภัย

3.3.2.2 ค่าความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ (Core Loss)

ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์จะทำให้แกนเฟอร์ไรต์ร้อน ซึ่งมีสาเหตุหลัก 2 ประการคือ ความสูญเสียที่เกิดจากลักษณะฮิสเตอร์รีซิสของแกน (Hysteresis Loss) และความสูญเสียจากกระแสไหลวนภายในแกนเฟอร์ไรต์ (Eddy current loss) ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 kHz การสูญเสียจากกระแสไหลวนในแกนจะมีค่าน้อยสำหรับแกนที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ดังนั้นความสูญเสียที่ก่อให้เกิดความร้อนในแกนอาจพิจารณาได้จากความสูญเสียทางฮิสเตอร์รีซิสอย่างเดียว ตัวอย่างกราฟแสดงค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ปกติค่ากำลังสูญเสียระบุเป็นมิลลิวัตต์ต่อหนึ่งลูกบาศก์เซนติเมตร (mW/cm^3) และมีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กความถี่ รวมถึงอุณหภูมิขณะใช้งานของแกนเฟอร์ไรต์



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสูญเสียของเนื้อสาร 3C8 และ 3C6A

3.4 การกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดในแกนหม้อแปลง

ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแกนหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและขนาดของแกน จากกฎของฟาราเดย์จะได้ว่า

$$\Delta B = \frac{V \cdot T}{N_p \cdot A_e} \times 10^8 \quad (3.3)$$

ΔB คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนหน่วยเกาส์

V คือ แรงดันที่ตกคร่อมขดปฐมภูมิ เป็นโวลต์

N_p คือ จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ

A_e คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนหน่วยตารางเซนติเมตร

T คือ เวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้น หน่วยวินาที

จะเห็นได้ว่ายิ่งจำนวนรอบของขดปฐมภูมิมี่ค่าลดลง ค่าความหนาแน่น ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะยิ่งมีค่ามาก ซึ่งการลดจำนวนรอบของขดปฐมภูมิมี่ค่าลดลงจะทำให้สามารถใช้ลวดทองแดงขนาดใหญ่ขึ้นได้ และสามารถทนกระแสได้สูงทำให้หม้อแปลงให้กำลังได้สูงขึ้น

อย่างไรก็ตาม หากค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว จะทำให้แรงดันตกคร่อมขดปฐมภูมิมี่ค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แรงดันอินพุตจะไปตกคร่อมที่เพาเวอร์มอสเฟตขณะที่กำลังนำกระแสสูงๆ แทน ทำให้เพาเวอร์มอสเฟตพังเสียหายได้และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียภายในแกนสูงอีกด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นในแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงขณะทำงาน จึงมีข้อที่ควรคำนึงถึง 2 ประการคือ

1) แกนเฟอร์ไรต์ ต้องไม่เกิดอิ่มตัวขณะทำงาน

2) ที่ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นในแกนขณะทำงานจะต้องเกิดความสูญเสียในแกนเฟอร์ไรต์ต่ำสุด

3.5 การเลือกขนาดแกนเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

การใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่เกินไป สำหรับหม้อแปลงกำลังความถี่สูงจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น ส่วนการใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเล็กเกินไป ขดลวดและแกนเฟอร์ไรต์จะร้อน กำลังงานสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับแกนเฟอร์ไรต์ขนาดต่าง ๆ พิจารณาได้จากขนาดหน้าตัดของแกน A_e และขนาดช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบิ้น (A_w) ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์ คำนวณค่ากำลังงานจากสมการดังนี้

$$P = \frac{1.4 * \Delta B_{\max} \cdot f \cdot A_e \cdot A_w}{D} \times 10^{-3} \quad (3.4)$$

ΔB_{\max} = ค่าความหนาแน่นฟลักซ์หน่วยเกาส์

f = ความถี่การทำงานของแกนเฟอร์ไรต์ หน่วยเฮิรตซ์

A_e = พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์ หน่วยตารางเซนติเมตร

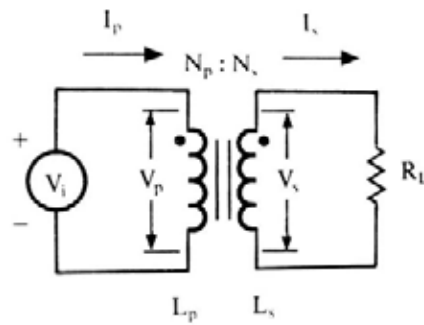
A_w = พื้นที่ช่องสำหรับพันขดลวดของบอบบิ้น หน่วยตารางเซนติเมตร

D = ค่าความหนาแน่นกระแสในขดปฐมภูมิ หน่วย เซอร์คูลาร์มิลต่อแอมป์ ปกติใช้ช่วง 500-1000 cml/A

P = กำลังงานสูงสุดที่ได้จากแกนเฟอร์ไรต์ เป็นวัตต์

3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

หม้อแปลงกำลังความถี่สูงมีความสัมพันธ์ของขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิเป็นไปตามทฤษฎีหม้อแปลงทั่วไป ผลของจำนวนรอบและค่าของแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรจากรูปที่ 3.8 เป็นดังนี้



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลง

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (3.5)$$

และ

$$\frac{N_p}{N_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \quad (3.6)$$

N_p = รอบขดปฐมภูมิ

N_s = จำนวนรอบทุติยภูมิ

V_s = คือ แรงดันตกคร่อมขดทุติยภูมิ

V_p = คือแรงดันตกคร่อมขดปฐมภูมิ

L_p = คือค่าความเหนี่ยวนำของขดปฐมภูมิ

L_s = คือค่าความเหนี่ยวนำของขดทุติยภูมิ

I_p = คือค่ากระแสที่ไหลผ่านขดปฐมภูมิ

I_s = คือค่ากระแสที่ไหลผ่านขดทุติยภูมิ

แรงดัน V_p เป็นค่าแรงดันตกคร่อมขดปฐมภูมิขณะใดขณะหนึ่งซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์แม่เหล็กภายในแกนของหม้อแปลงเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิไม่ใช่ค่าแรงดันอินพุต V_i โดย V_p จะมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$V_p = N_p \cdot Ae \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right) \cdot 10^{-8} \quad (3.7)$$

และค่า V_p ที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า V_i แต่ถ้าแกนเฟอร์ไรต์เกิดการอิ่ม

ตัว อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ($\frac{dB}{dt}$) มีค่าน้อยมากหรือเป็นศูนย์ แรงดัน

ตกคร่อม V_p จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนเกิดการลัดวงจร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

เพาเวอร์มอสเฟตและวงจรสวิตช์

ในการสร้างรูปคลื่นแรงดันความถี่สูงเพื่อจ่ายให้กับหม้อแปลงกำลังความถี่สูงนั้น ต้องใช้วงจรสวิตช์และอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่เหมาะสม ในวิทยานิพนธ์นี้วงจรถูกใช้คือวงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์และใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ รายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆเป็นดังนี้

4.1 เพาเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET)

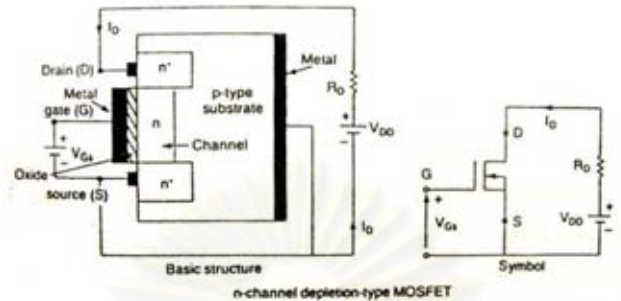
เพาเวอร์มอสเฟต (MOSFET Power Transistor) สามารถทำงานได้ดีความถี่สูงตั้งแต่ 50-กิโลเฮิร์ตซ์ไปจนถึงประมาณ 200 หรือ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ เนื่องจากใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะค่อนข้างสั้นและการพัฒนาในปัจจุบันมีแนวโน้มจะทำให้เพาเวอร์มอสเฟตทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้นไปอีก ในส่วนวงจรขับของเพาเวอร์มอสเฟตนั้นสามารถทำได้ง่ายโดยอาจขับเพาเวอร์มอสเฟตให้ทำงานได้จากไอซีควบคุมได้โดยตรง

โครงสร้างของเพาเวอร์มอสเฟตจะเป็นไปได้ทั้งลักษณะ N-Channel และ P-Channel อย่างไรก็ตาม ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเพาเวอร์มอสเฟตชนิด N-Channel เท่านั้น

มอสเฟตมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ

1) Depletion MOSFETs

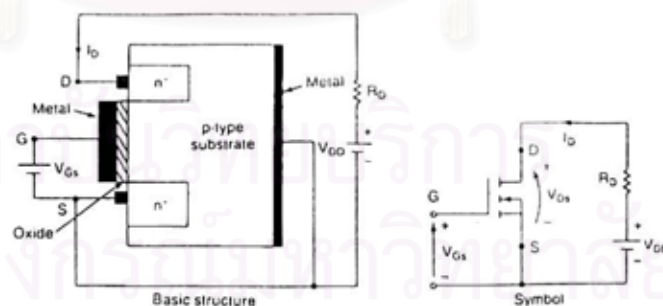
Depletion MOSFETs แบบ N-Channel จะมีโครงสร้างที่เป็นสารซิลิคอน p-type ดังรูป 4.1 และได้ปด้วยซิลิคอนแบบ n^+ ซึ่งมีความต้านทานต่ำ เกตแยกทาง ไฟฟ้าออกจาก channel ด้วยชั้นออกไซด์บาง ๆ ขาทั้งสามของมอสเฟตมีชื่อเรียกว่า เกต (gate) เดรน (drain) และซอร์ส (source) แรงดันระหว่างเกตกับซอร์สนั้นจะเป็นบวกหรือลบก็ได้ ถ้า V_{GS} เป็นลบ อิเล็กตรอนบางส่วนในพื้นที่ของ N-Channel จะถูกผลักออกไปและจะเกิดบริเวณปลอดพาหะที่ด้านล่างของชั้นออกไซด์เป็นผลทำให้ channel แคบลง ความต้านทานระหว่างเดรนกับซอร์ส (R_{DS}) สูงขึ้น ถ้า V_{GS} มีค่าเป็นลบมากพอที่จะทำให้ channel ปลอดพาหะอย่างสมบูรณ์ คือ R_{DS} มีค่าสูงมากขึ้นจนไม่มีกระแสไหลจากเดรนไปยังซอร์ส $f_{DS} = 0$ แล้วแรงดัน V_{GS} ดังกล่าวเรียกว่า pinch-off voltage, V_p เมื่อ V_{GS} มีค่าเป็นบวก channel เริ่มกว้างขึ้น I_{DS} เพิ่มขึ้นเนื่องจาก R_{DS} มีค่าลดลง สำหรับ depletion MOSFET แบบ P-Channel ขั้วของ V_{DS} , I_{DS} และ V_{GS} ตรงข้ามกับ N-Channel



รูปที่ 4.1 n-channel depletion type MOSFET

2) Enhancement MOSFETs

Enhancement MOSFETs แบบ N-Channel นั้นไม่มี Channel ดังรูป 4.2 ถ้า V_{GS} เป็นบวก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จาก p-type substrate ไปสะสมที่บริเวณผิวของออกไซด์ ถ้า V_{GS} มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ threshold voltage, V_T แล้ว อิเล็กตรอนสะสมจะมีปริมาณมากพอที่จะทำให้เกิด N-Channel เสมือนขึ้นและเกิดกระแสไหลออกจากครอนไปยังซอร์สได้ สำหรับ P-Channel enhancement MOSFET ขั้วของ V_{DS} , I_{DS} และ V_{GS} ตรงข้ามกับ N-Channel



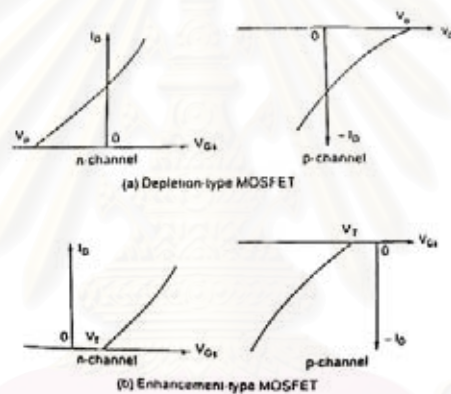
รูปที่ 4.2 n-channel enhancement type MOSFET

4.1.1 ลักษณะสมบัติที่สภาวะคงที่ (Steady State) ของมอสเฟต

มอสเฟตเป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยแรงดันมีค่าอินพุตอิมีพีแดนซ์สูงมาก จึงใช้กระแสขั้วต่ำ พารามิเตอร์ที่สำคัญของมอสเฟตคือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance)

Transfer characteristic ของมอสเฟตแบบ N-Channel และ P-Channel แสดงในรูป 4.3 รูป 4.4 เป็นลักษณะสมบัติทางเอ๊าท์พุตของ enhancement MOSFET แบบ N-Channel มีการทำงานใน 3 บริเวณคือ

- (1) บริเวณ Cut-off เมื่อ $V_{GS} \leq V_T$
- (2) บริเวณอิมิตัวหรือ Pinch-off เมื่อ $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$
- (3) บริเวณเชิงเส้นเมื่อ $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$



รูปที่ 4.3 Transfer characteristic ของ MOSFET

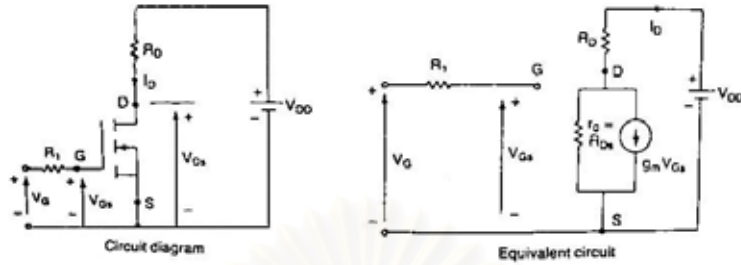
ในบริเวณเชิงเส้น กระแส I_D เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดัน V_{DS} ส่วนในบริเวณอิมิตัว กระแสเดรนจะมีค่าคงที่แม้ว่าแรงดัน V_{DS} จะเพิ่มขึ้นก็ตาม มอสเฟตทั้ง Depletion-type และ Enhancement-type มีโมเดลที่ steady state ดังรูป 4.4 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์, g_m หาได้ดังนี้

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \quad (V_{DS} \text{ คงที่}) \quad (4.1)$$

ความต้านทานด้านเอ๊าท์พุท (R_{DS}) หาได้จาก

$$R_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \quad (4.2)$$

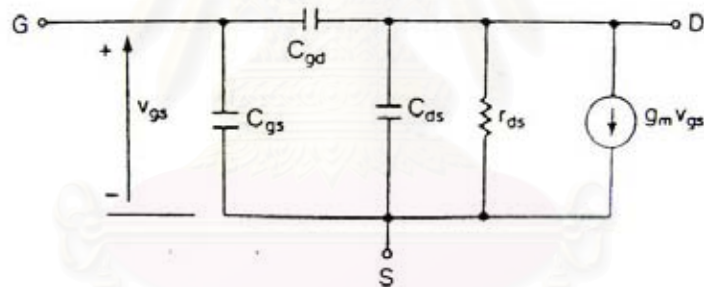
R_{DS} ในบริเวณ Pinch-off จะมีค่าสูงเป็นเมกกะโอห์มและในบริเวณเชิงเส้นจะมีค่าเป็นมิลลิโอห์ม



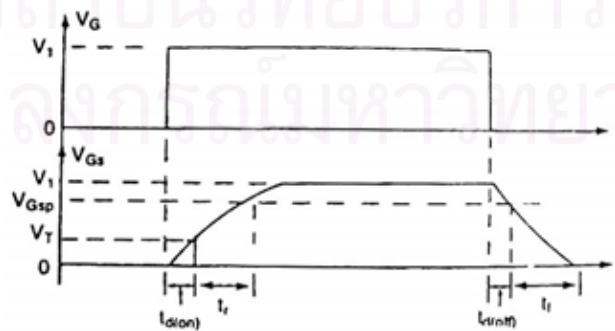
รูปที่ 4.4 โมเดลที่ Steady state ของ MOSFET

4.1.2 ลักษณะสมบัติขณะทำการสวิตช์

ถ้าไม่มีสัญญาณที่เกต Enhancement-type MOSFET โครงสร้างของ เกตจะมีค่าความจุไฟฟ้าแฝงกับซอร์ส C_{GS} และกับเดรน C_{GD} โมเดลขณะทำการสวิตช์ของ Enhancement-type MOSFET แสดงดังรูป 4.5 รูปสัญญาณในการสวิตช์แสดงดังรูป 4.6



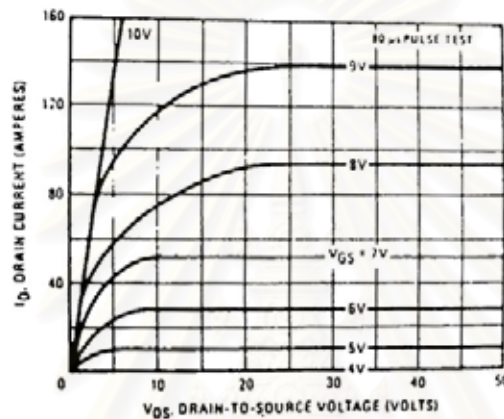
รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลของมอสเฟตขณะทำการสวิตช์



รูปที่ 4.6 แสดงรูปสัญญาณขณะมอสเฟตทำการสวิตช์

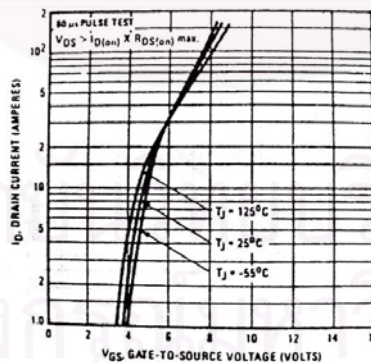
4.1.3 พารามิเตอร์ในการทำงานของมอสเฟต

Output characteristic เป็นกราฟของ I_D เทียบกับ V_{DS} ที่ค่า V_{GS} ต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 4.7 จากกราฟแรงดัน threshold voltage V_T มีค่าเท่ากับ 4 V และในการทำให้แรงดัน V_{GS} คงที่ทำให้กระแส I_D เกือบคงที่ที่บริเวณ pinch-off เนื่องจากความต้านทานในขณะทำงาน on-state resistance ($R_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_d}$) มีค่าเกือบคงที่



รูปที่ 4.7 OUTPUT CHARACTERISTIC ของมอสเฟต

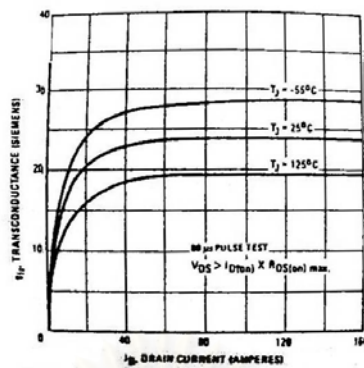
Transfer characteristic เป็นกราฟของ I_D กับ V_{GS} แสดงในรูป 4.8



รูปที่ 4.8 Transfer Characteristic ของมอสเฟต

Transconductance, g_m เป็นค่าที่ได้จาก Transfer characteristic ดังรูป

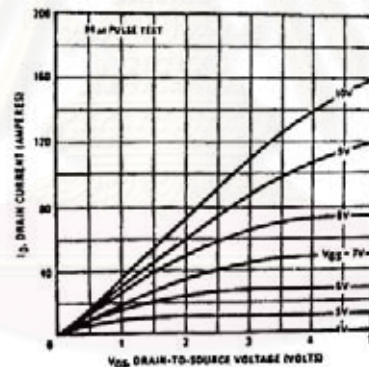
4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่า Transconductance ของ มอสเฟต

ลักษณะสมบัติเชิงเส้น (Linear characteristic)

เป็นลักษณะสมบัติทางเอาท์พุทที่ค่า V_{DS} ต่ำ ๆ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการนำไปใช้ในงานสวิตช์ จากการที่ V_{DS} มีค่าต่ำในบริเวณเชิงเส้นจึงมักจะกำหนดเป็นลักษณะสมบัติอิมิตัว (Saturation characteristic) ดังรูป 4.10

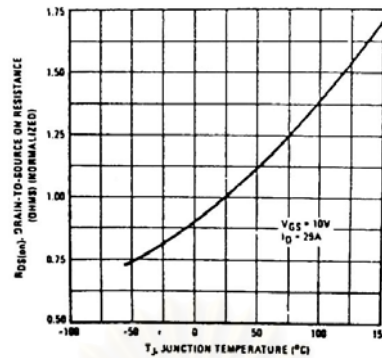


รูปที่ 4.10 Linear Characteristic ของมอสเฟต

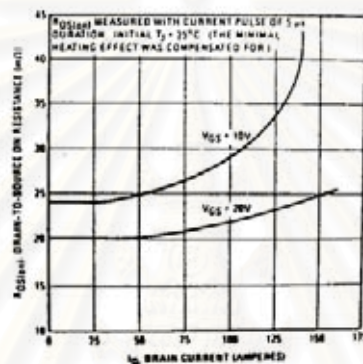
ความต้านทานขณะทำงาน On-state resistance R_{DS}

ค่า R_{DS} แสดงถึงความสูญเสียในขณะมอสเฟตนำกระแส R_{DS} จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิที่รอยต่อ T, เพิ่มขึ้น ดังรูป 4.11 การเพิ่มขึ้นของ R_{DS} ที่ค่า I_D และ V_{DS} ต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 4.12 ไม่เป็นเชิงเส้น กำลังสูญเสีย

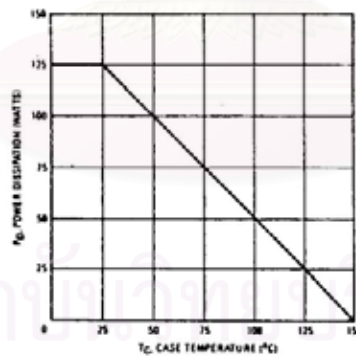
$$P_D = I_D^2 \cdot R_{DS} = V_{DS} \cdot I_D \text{ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิตัวถังเพิ่มขึ้นดังรูป 4.13}$$



รูป 4.11 ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับอุณหภูมิที่ร่อยต่อ



รูป 4.12 ค่าความต้านทานขณะทำงานเทียบกับกระแสเดรน

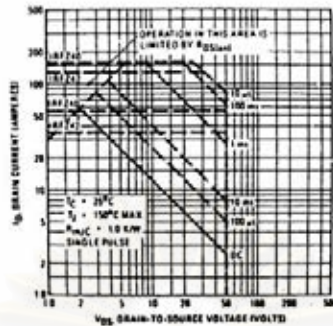


รูป 4.13 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเทียบกับอุณหภูมิที่ตัวถัง

พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัย Safe Operating Area, SOA

ดังรูป 4.14 แสดงถึงค่า I_D สูงสุดกับค่าของ V_{DS} สูงสุดในขณะมอสเฟต สวิตช์ปิดวงจรและสวิตช์เปิดวงจรโดยเป็นขีดจำกัดทางอุณหภูมิ สำหรับมอสเฟตจะไม่เกิดปรากฏการณ์ Second Breakdown แต่จะมีข้อจำกัดของกระแส I_D ที่ค่า V_{DS} ต่ำ ๆ เนื่องจากความต้านทานในขณะทำงานเพิ่มขึ้น สำหรับการทำงานในช่วง

สั้น ๆ ขอบเขตของ SOA จะกว้างขึ้น คือ V_{DS} และ I_D มีค่ามากขึ้นนั่นเอง โดยปกติ SOA กำหนดไว้ที่ $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$



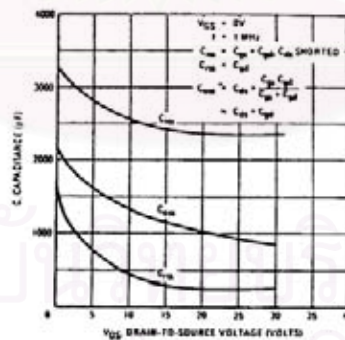
รูปที่ 4.14 พื้นที่การทำงานที่ปลอดภัยสูงสุด

ค่าความจุไฟฟ้าทางด้านอินพุทและเอาต์พุท

บริษัทผู้ผลิตจะกำหนดค่าของ

- (1) ความจุไฟฟ้าทางด้านอินพุท $C_{iss} = C_{gd} // C_{gs}$
- (2) ความจุไฟฟ้าใช้งานทางด้านเอาต์พุท $C_{oss} = C_{ds} // C_{gd}$
- (3) ความจุไฟฟ้า C_{gd}

ความจุไฟฟ้าเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแรงดัน V_{ds} ดังรูป 4.15



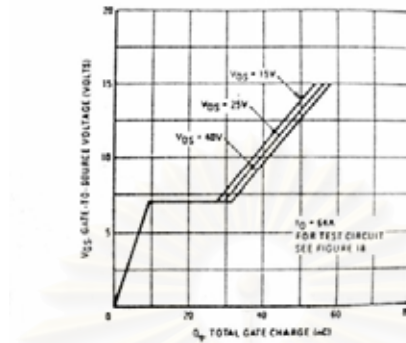
รูปที่ 4.15 ค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับแรงดัน V_{DS}

ประจุไฟฟ้าเกท Q_g

ในช่วงสวิตช์ปิดและเปิดวงจร ความจุไฟฟ้าทางด้านอินพุทจะอัดและคายประจุ การสะสมประจุไฟฟ้าที่ความจุไฟฟ้าทางอินพุทขึ้นอยู่กับแรงดัน V_{GS} ดังรูป 4.16 ความสูญเสียในการสวิตช์เนื่องจากแรงดันเกตมีค่าดังนี้

$$P_G = Q_g \cdot V_{GS} \cdot f_s \quad (4.3)$$

f_s คือ ความถี่ในการสวิตช์ หน่วย เฮิรตซ์



รูปที่ 4.16 ค่าความจุไฟฟ้าเทียบกับแรงดัน

4.1.4 การออกแบบวงจรขับเกต

จากลักษณะสมบัติที่ดีของมอสเฟตกำลัง ทำให้สามารถทำงานที่ความถี่สูงมาก ๆ ได้ ในการออกแบบต้องมีข้อควรระวังเกี่ยวกับปัญหาการออสซิลเลทเมื่อใช้ในงานความถี่สูง ๆ 2 ประการคือ

ประการแรก ความยาวของตัวนำที่ต่อไปยังขั้วมอสเฟตจะต้องสั้นที่สุดโดยเฉพาะที่ขาเกต ถ้าไม่สามารถที่จะใช้ตัวนำสั้นได้จะต้องใช้เฟอร์ไรต์บีด (Ferrite Bead) หรือตัวต้านทานค่าต่ำ ๆ ต่ออนุกรมกับขาเกตของมอสเฟต

ประการที่สอง เนื่องจากมอสเฟตมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก ดังนั้นแหล่งจ่ายของวงจรขับต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก เพื่อป้องกันการป้อนกลับแบบบวก ซึ่งทำให้เกิดออสซิลเลทได้

ค่าโดยประมาณของเวลาขาขึ้นและขาลงหาได้จากสมการ

$$t_r \text{ หรือ } t_f = 2.2 R_g \cdot C_{iss} \quad (4.4)$$

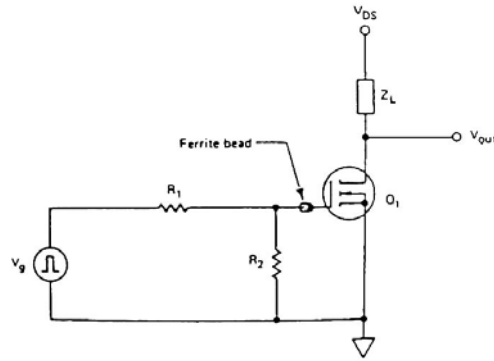
t_r คือ Rise time ของมอสเฟต, ns

t_f คือ Fall time ของมอสเฟต, ns

R_g คือ อิมพีแดนซ์ของวงจรขับ Ω

C_{iss} คือ ความจุไฟฟ้าด้านอินพุทของมอสเฟต, pF

ตามรูป 4.17 $R_2 \gg R_g$ ซึ่ง R_2 ใช้ในการ turn off มอสเฟต

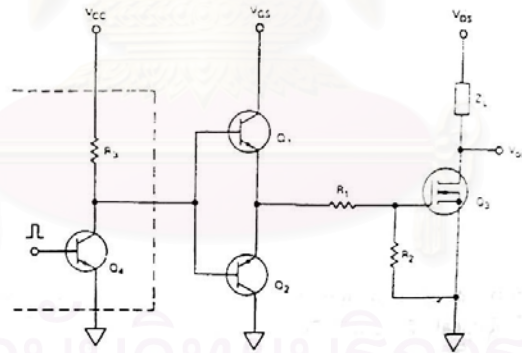


รูปที่ 4.17 การใช้งานมอสเฟตเป็นสวิตช์แบบคอมมอนซอร์ส

4.1.4.1 วงจรขับเคลื่อน

a) การขับมอสเฟตด้วย TTL

แม้ว่าเราสามารถที่จะขับมอสเฟตจากเอาต์พุตของ TTL ได้โดยตรง แต่ไม่นิยมใช้กัน เนื่องจากทรานซิสเตอร์ใน TTL ทำงานในบริเวณเชิงเส้นเป็นเวลานานกว่าจะถึงจุดอิ่มตัว ทำให้มอสเฟตไม่สามารถทำงานในจุดที่ดีที่สุดได้ในการปรับปรุงจะต้องเพิ่มวงจรบัฟเฟอร์เข้าไปเพื่อให้กระแสซอร์สและซิงก์ไหลได้เร็วขึ้น วงจรอย่างง่ายที่ใช้คือ Emitter-follower แบบ complementary ดังรูป 4.18



รูปที่ 4.18 การขับมอสเฟตด้วย TTL

ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 ต้องมีค่าเกนสูง เพื่อที่จะจ่ายกระแสให้มอสเฟตเนื่องจากผลของ Miller effect ได้ในขณะที่มอสเฟตปิดและเปิดวงจร กระแสที่ไหลในทรานซิสเตอร์แต่ละตัวขณะสวิตช์ปิดและเปิดวงจรคือกระแสประจุ Icharge หาได้จาก

$$I_{charge} = \frac{C_{gs} \cdot V_{gs}}{t_r} \tag{4.5}$$

$$\text{และ } C_{gs} = C_{iss} - C_{rss}$$

C_{gs} คือ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างเกตกับซอร์ส , pF

C_{iss} คือ ค่าความจุไฟฟ้าอินพุต, pF

C_{rss} คือ ค่า Reverse transfer capacitance, pF

V_{gs} คือ แรงดันระหว่างเกตกับซอร์ส, V

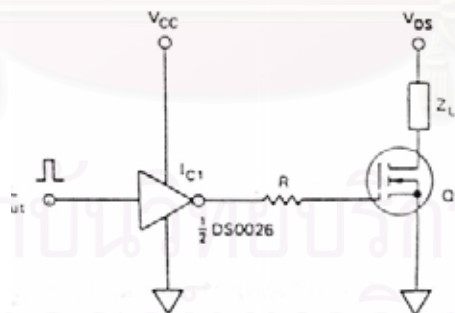
t_r คือ เวลาขาขึ้นของพัลส์อินพุต, nS

ถ้าสมมติให้ความจุไฟฟ้าระหว่างเกตกับเดรนคายประจุด้วยเวลาที่เท่ากัน $t_r = t_f$ กระแสคายประจุหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_{dis} = \frac{C_{rss} \cdot V_{ds}}{t_r} \quad (4.6)$$

เมื่อ V_{ds} คือแรงดันระหว่างเดรนกับซอร์ส

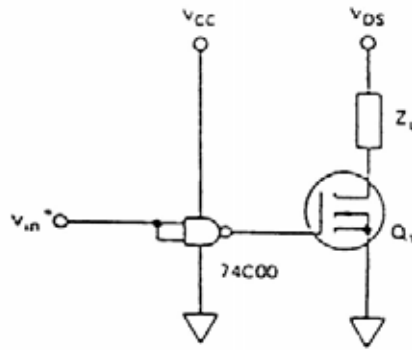
การขับมอสเฟตอีกวิธีหนึ่งคือ ใช้ IC พิเศษที่สามารถจ่ายกระแสได้สูง แทนทรานซิสเตอร์ดังรูป 4.19



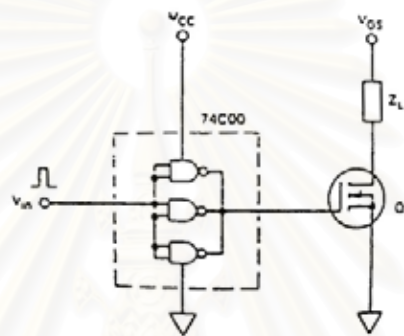
รูปที่ 4.19 การใช้ IC ที่จ่ายกระแสได้สูงต่อระหว่าง TTL กับมอสเฟต

b) การขับมอสเฟตด้วย CMOS

ด้วยเหตุที่มอสเฟตมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูงทำให้สามารถใช้ CMOS ขับได้โดยตรงดังรูป 4.20a ซึ่งจะได้เวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (fall time) ประมาณ 60 ns. การลดเวลาในการสวิตช์ลงอีกจะต้องใช้บัฟเฟอร์ชนิด Emitter-follower ดังรูป 4.18 หรือใช้ CMOS ขนาดเล็กกว่า 1 ชุด ดังรูป 4.20b



รูปที่ 4.20 a) การขับมอสเฟตด้วย CMOS



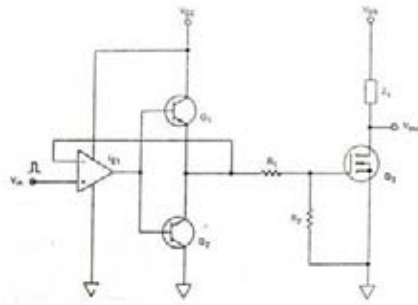
รูปที่ 4.20 b) การใช้ CMOS ขนานกันเพื่อจ่ายกระแสเกตได้สูงขึ้น

c) การขับมอสเฟตด้วยออปแอมป์ (Op-Amp)

มอสเฟตสามารถขับได้โดยตรงจากภาคเอาต์พุทของออปแอมป์ แต่ออปแอมป์ต้องสามารถจ่ายกระแสได้สูง เนื่องจากออปแอมป์ที่จ่ายกระแสได้สูงกลับมีสลัวเรท (Slew rate) ต่ำ ทำให้แบนด์วิดท์ในการทำงานน้อยกว่า 25 kHz

ในการทำให้ค่าแบนด์วิดท์และสลัวเรทดีขึ้นเพื่อขับมอสเฟตได้ดีนั้นจะต้องใช้บัฟเฟอร์ชนิด Emitter-follower วงจรขับที่ใช้ออปแอมป์โดยทั่วๆ ไปแสดงดังรูป 4.21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



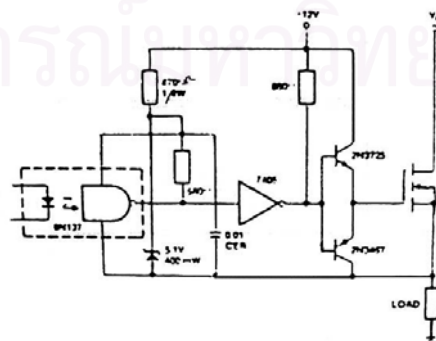
รูปที่ 4.21 การขับมอสเฟตด้วยออปแอมป์

d) วงจรขับที่ไม่ได้อ้างอิงกับกราวนด์

ในการขับให้มอสเฟตทำงานจนอิ่มตัวนั้น จะต้องมีแรงดันตกคร่อมระหว่างซอร์สกับกราวนด์ที่มากพอ ถ้าโหลดต่อระหว่างซอร์สกับกราวนด์และวงจรขับต่อระหว่างเกตกับกราวนด์ แรงดันที่เกตจะลดลงขณะที่มอสเฟตทำงาน จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ต้องใช้วงจรขับเกตที่อ้างอิงกับซอร์ส ซึ่งมี 3 วิธีดังนี้

- 1) โดยการใช Opto coupler
- 2) โดยให้หม้อแปลงความถี่สูง
- 3) โดยใช้ ดีซี-ดีซี ซอบเปอร์ที่มีหม้อแปลงแยกกันทางไฟฟ้า

Opto coupler ใช้ในการแยกกราวด์ระหว่างซอร์สกับทางด้านอินพุทของ Opto coupler นอกจากการ Opto coupler gate (ที่เข้ากันได้กับ TTL) จะมีเวลาหน่วง 50 ns. เวลาขาขึ้น (Rise time) และเวลาขาลง (fall time) 25 ns. ทำให้ใช้งานที่ความถี่เป็นเมกะเฮิรตซ์ได้ แต่จะต้องมีวงจรขยายที่ภาคอินพุท ดังรูป 4.22



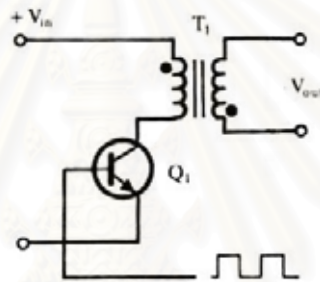
รูปที่ 4.22 วงจรขับเกตโดยใช้ Opto coupler

4.2 วงจรสวิตช์

ในการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันสูง ความถี่สูงนั้น ต้องอาศัยวงจรสวิตช์ซึ่งมีอยู่หลายชนิด แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการใช้หลัก ๆ อยู่ 3 ชนิด คือ

4.2.1 วงจรสวิตช์แบบฟลายแบค (Fly back)

วงจรสวิตช์แบบฟลายแบคเหมาะกับวงจรที่มีกำลังขาออกในช่วง 50-150 วัตต์ และมีข้อเสียคือแรงดันขาออกที่ได้จะมีแรงดันกระเพื่อม (Ripple) ค่อนข้างสูง และถ้าใช้กับแรงดันขาเข้าสูงเช่น นำมาใช้กับแรงดัน 220 โวลต์ เพาเวอร์มอสเฟตจะต้องทนแรงดันได้สูงถึงประมาณ 800 –1000 โวลต์ ซึ่งมีราคาแพงและหาได้ยาก วงจรสวิตช์แบบฟลายแบคแสดงดังรูป 4.23

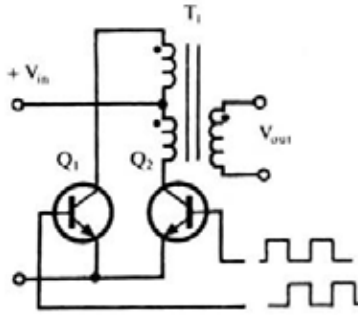


รูปที่ 4.23 วงจรสวิตช์แบบ flyback

การทำงานของวงจรเป็นดังนี้ ทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำงานโดยนำกระแส (on) และหยุดนำกระแส (off) สลับกันไป เมื่อ Q_1 นำกระแสจะมีกระแสไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงและพลังงานจะส่งผ่านไปยังด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง แต่หม้อแปลงจะทำงานเพียงซีกเดียวของ B-H curve เท่านั้น จึงให้กำลังขาออกน้อย

4.2.2 วงจรสวิตช์แบบpush-พูล (Push-pull)

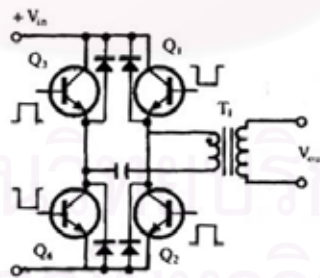
วงจรสวิตช์แบบpush-พูล สามารถจ่ายกำลังได้ตั้งแต่ 500 วัตต์ขึ้นไป แต่มีข้อเสียคือ มักจะเกิดความไม่สมมาตรของฟลักส์แม่เหล็กซึ่งจะมีผลให้เกิดความเสียหายต่อเพาเวอร์มอสเฟตได้ง่าย การแก้ปัญหาทำได้โดยใช้เทคนิคการควบคุมด้วยกระแส จากรูป 4.24 Q_1, Q_2 จะสลับกันนำกระแส ดังนั้นจึงมีการส่งกำลังไปยังด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงตลอดเวลา กระแสด้านขาออกจึงค่อนข้างเรียบ



รูปที่ 4.24 วงจรสวิตช์แบบ push pull

4.2.3 วงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์ (Full bridge)

จากรูป 4.25 มีเพาเวอร์ทรานส์เฟอเมอร์ในวงจรทั้งหมดถึง 4 ตัว แต่จะสลับกันทำงานเป็นคู่ ๆ โดย Q1 นำกระแสพร้อม Q4 และ Q2 นำกระแสพร้อม Q3 กระแสที่ไหลผ่านด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีลักษณะเช่นเดียวกับวงจรสวิตช์แบบฮาล์ฟบริดจ์ (Half-bridge) แต่ข้อได้เปรียบของฟูลบริดจ์ก็คือ ขณะทำงานที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับค่าแรงดันขาเข้า กระแสที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิจึงมีค่าต่ำกว่า วงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์จึงสามารถจ่ายกำลังได้สูงกว่าวงจรที่ต้องการกำลังสูง ๆ ตั้งแต่ 500-1000 วัตต์ จึงนิยมใช้วงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์



รูปที่ 4.25 วงจรสวิตช์แบบ Full bridge

บทที่ 5

หลักการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงที่อาศัยหลักการของวงจรในบทที่ผ่านมา มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพิจารณาเลือกอุปกรณ์ต่างๆ

5.1 การออกแบบวงจรเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม PSPICE

การออกแบบเริ่มจากกำหนดพิกัดของเครื่อง คือ สร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 kV จ่ายกระแสได้ 5 mA แรงดันระลอกไม่เกิน 2% เพื่อนำมาหาค่ายอดแรงดันของหม้อแปลงที่จ่ายเข้าวงจรทวีแรงดัน ในการสร้างวงจรทวีแรงดันนี้ จะใช้วงจรทวีแรงดัน 5 ชั้น เนื่องจากต้องการให้วงจรทวีแรงดันมีขนาดเล็ก

พิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้มีดังนี้

ไดโอดแรงสูง HV30-07 ซึ่งเป็นไดโอดที่ใช้กับวงจรฟลายแบคของโทรทศน์รุ่นเก่า ทำงานได้ดีที่ความถี่ 15-25 kHz ทนแรงดันได้ 30 kV กระแส 70 mA ตัวเก็บประจุแรงสูง ใช้ $0.1 \mu\text{F}$ 2 kV วิธีการคำนวณหาค่ายอดแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังความถี่สูง เริ่มจากการหาค่าตัวเก็บประจูดังนี้ ใช้แรงดันระลอก 2%

$$C = \frac{n(n+1)}{4} \frac{I_d}{f\delta U}$$

$n = 5$ ชั้น $I_d = 5\text{mA}$ $f = 20\text{ kHz}$ $\delta U = 2\text{ kV}$

แทนค่า $C = \frac{5 \times 6}{4} \times \frac{5 \times 10^{-3}}{20 \times 10^3 \times 2 \times 10^3}$

$$= 0.938 \text{ nF}$$

ได้ค่าตัวเก็บประจุน้อยที่สุด 0.938 nF

$$\text{ต่อไปหาค่า } \Delta U \text{ จาก } \Delta U = \frac{I_d}{fc} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{n}{6} \right)$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการได้

$$\Delta U = \frac{5 \times 10^{-3}}{20 \times 10^3 \times 0.938 \times 10^{-9}} \times \left(\frac{2}{3} \times 5^3 + \frac{1}{2} \times 5^2 - \frac{5}{6} \right)$$

$$= 25.32 \text{ kV}$$

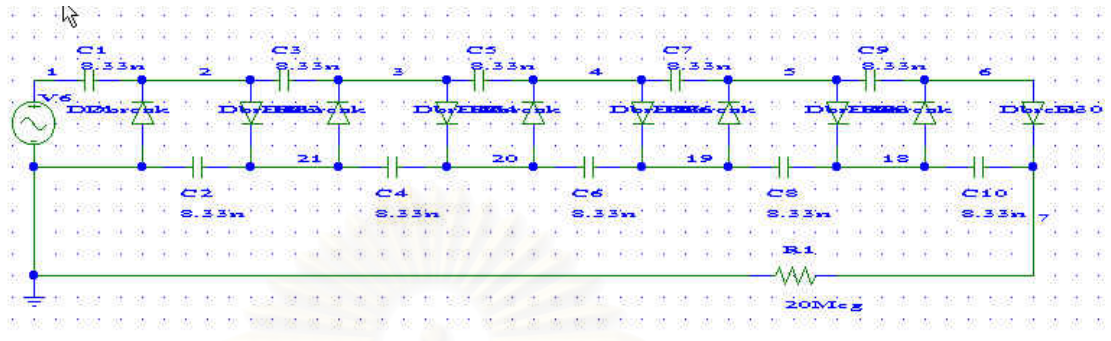
หาค่ายอดแรงดันด้านทุติยภูมิจาก

$$\hat{U}_T = \frac{U_d + \Delta U}{2n}$$

$$= \frac{100 \text{ kV} + 25.32 \text{ kV}}{10} = 12.53 \text{ kV}$$

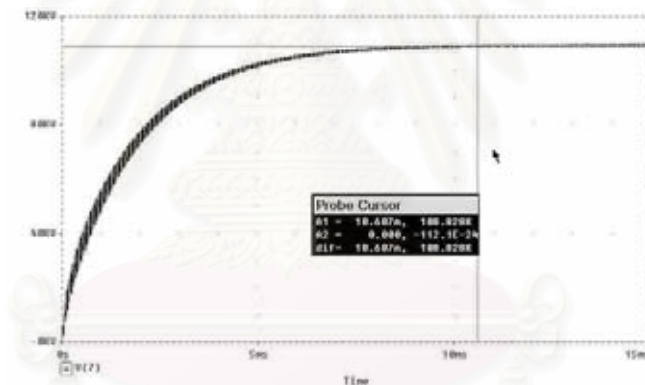
5.1.1 วงจรที่ใช้จำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

รูปที่ 5.1 วงจรที่ใช้ในการ simulation

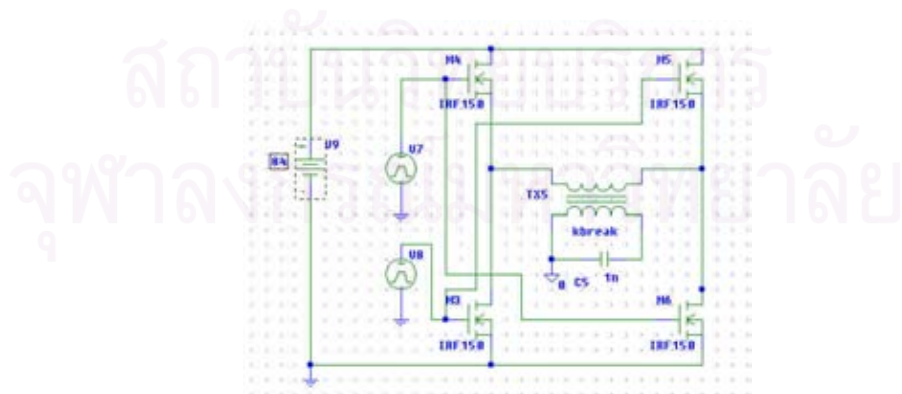


แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 20 kHz ค่ายอดแรงดัน 12.53 kV

5.1.2 ผลการ Simulation



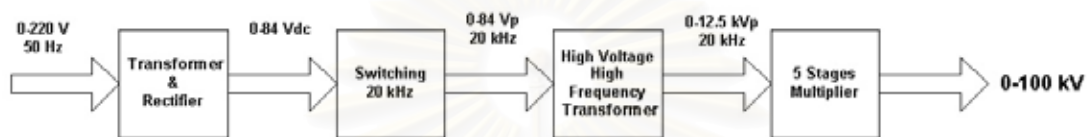
รูปที่ 5.2 รูปคลื่นแรงดันขาออกของวงจรทีวีแรงดัน



รูปที่ 5.3 วงจรสวิตช์

5.2 วงจรเครื่องสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

ในการสร้างแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 100 kV นั้นประกอบด้วยวงจรหลายส่วน คือ วงจรเรียงกระแส วงจรสวิตช์ความถี่สูง หม้อแปลงความถี่สูง แรงดันสูงและชุดวงจรทวีแรงดัน เนื่องจากแรงดันที่ต้องการมีค่าสูง (100 kV) และต้องการให้มีขนาดเล็ก เทคนิคการฉนวน และการออกแบบจุดต่อต่าง ๆ ในส่วนแรงดันสูงจึงมีความสำคัญอย่างมาก จึงต้องมีการออกแบบวงจรในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อหารูปแบบที่ดีที่สุดที่สอดคล้องในขนาดที่เหมาะสม วงจรเครื่องสร้างแรงดันสูงกระแสตรงแสดงเป็นไดอะแกรมได้ดังรูป 5.4



รูปที่ 5.4 Block diagram การทำงานของเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรง

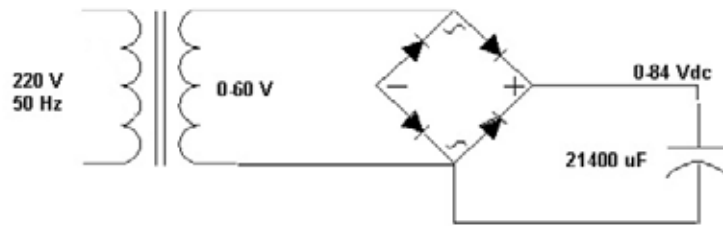
องค์ประกอบของเครื่องสร้างแรงดันสูงกระแสตรง

โครงสร้างหลักที่สำคัญของเครื่องสร้างแรงดันสูงกระแสตรง มีดังนี้

1. วงจรเรียงกระแส
2. วงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge)
3. วงจรสร้างสัญญาณทริก
4. หม้อแปลงกำลังความถี่สูง
5. ชุดวงจรทวีแรงดัน

5.2.1 วงจรเรียงกระแส

เนื่องจากในพิกัดของเครื่องต้องสามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันได้ในช่วงกว้าง 0-100 kV จึงเลือกใช้วงจรฟูลเวฟบริดจ์เรกติไฟเออร์ วงจรเรียงกระแสเป็นดังรูป 5.5



รูปที่ 5.5 วงจร Rectifier

การเลือกพิกัดอุปกรณ์คำนวณได้ดังนี้

- ด้านกำลังขาออก

$$\begin{aligned} P_{out} &= 100kV \times 5mA \\ &= 500 \text{ watt} \end{aligned}$$

สมมุติวงจรสวิตช์ หม้อแปลงกำลังความถี่สูงและวงจรทวิแรงดันมีประสิทธิภาพรวมกัน 80% ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{500}{0.8} \\ &= 625 \text{ watt} \end{aligned}$$

กระแสผ่านหม้อแปลงที่แรงดันสูงสุด 60 โวลท์

$$\begin{aligned} I_e &= \frac{625}{60} \\ &= 10.4 \text{ Amp} \end{aligned}$$

ดังนั้นขนาดพิกัด VARIAC , หม้อแปลง และไดโอด ต้องมากกว่า 10.4 Amp ใช้ VARIAC ขนาด 15 Amp หม้อแปลง 220/60 volt 15 A ไดโอดบริดจ์ 15 A 400 V การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสเพื่อที่เราจะยอมให้เกิดขึ้นได้ แรงดันไฟฟ้าตรงที่ดีที่สุดคือ ไม่มีแรงดันกระแสเพื่อเรา แต่ในทางปฏิบัติแทบจะเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากตัววงจรนี้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันตั้งแต่ 0-84 volt จึงยอมให้มีแรงดันกระแสเพื่อเราได้ 5 โวลท์ที่กระแสสูงสุด 10.4 แอมแปร์ ดังนั้น

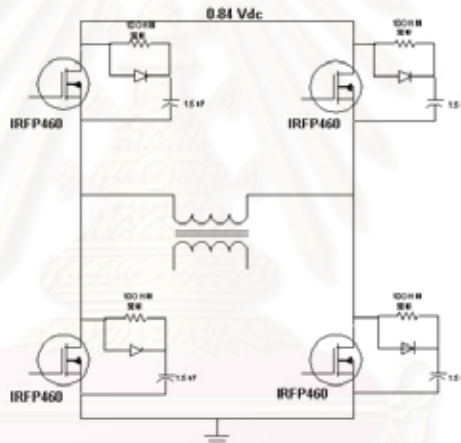
$$\begin{aligned} C &\geq \frac{I \cdot \Delta t}{\Delta V_{ripple}} \quad \Delta t = 10 \text{ ms} \\ &\geq \frac{10.4 \times 10 \times 10^3}{5} \quad \mu F \\ &= 20,800 \quad \mu F \end{aligned}$$

ตัวเก็บประจุที่ใช้คือ 33,000 μF ขนาดกัน 4 ตัวและขนาดกัน 8,200 μF 1 ตัว รวมเป็น 21,400 μF

5.2.2 วงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์ (Full-Bridge)

วงจรที่เป็นหัวใจสำคัญของเครื่องสร้างแรงดันสูงกระแสตรงมี 3 ส่วนคือ วงจรสวิตช์ หม้อแปลงกำลังความถี่สูง และวงจรทรีแรงดัน วงจรทั้ง 3 ส่วนต้องทำงานประสานกันอย่างดี ถ้ามีส่วนใดส่วนหนึ่งมีปัญหาหรือไม่สามารถจ่ายได้ตามที่วงจรอีกส่วนหนึ่งต้องการก็จะทำให้ไม่สามารถสร้างแรงดันสูงได้ตามที่คาดการณ์ไว้ ในการสร้างวงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์จึงจะต้องพิจารณาการจัดวางให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อยที่สุด เพื่อลดผลของสไปต์ที่จะสร้างปัญหากับตัววงจรสวิตช์เองและกับวงจรส่วนอื่น ๆ ด้วย

วงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์แสดงไว้ดังรูป 5.6 โดยมีส่วนประกอบและการพิจารณาเลือกดังนี้



รูปที่ 5.6 วงจรสวิตช์

5.2.2.1 เพาเวอร์มอสเฟต (Power MOSFET)

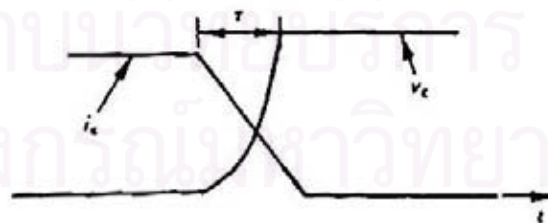
ที่เลือกใช้เพาเวอร์มอสเฟตเนื่องจากซัพง่าย มีช่วงเวลาในการเปลี่ยนสถานะสั้น ในวงจรสวิตช์แบบฟูลบริดจ์นี้ มอสเฟตควรทนแรงดันได้ไม่ต่ำกว่า 84 โวลท์ ($60 \times \sqrt{2}$) กระแสไม่ต่ำกว่า 10 แอมแปร์ ในวงจรเลือกมอสเฟตเบอร์ IRFP460 โดยมีคุณสมบัติตามตาราง 5.1 มอสเฟต IRFP460 พิกัดแรงดัน 500 โวลท์ 20 แอมแปร์ ที่พิจารณานำมาใช้เนื่องจากต้องการเพิ่มความทนทานให้กับวงจร

ตาราง 5.1 คุณสมบัติของมอสเฟต IRFP460

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{DS}	Drain-source Voltage ($V_{GS} = 0$)	500	V
V_{DGR}	Drain-gate Voltage ($R_{GS} = 20 \text{ k}\Omega$)	500	V
V_{GS}	Gate- source Voltage	± 30	V
I_D	Drain Current (continuous) at $T_C = 25^\circ\text{C}$	18.4	A
I_D	Drain Current (continuous) at $T_C = 100^\circ\text{C}$	11.6	A
$I_{DM}(\bullet)$	Drain Current (pulsed)	73.6	A
P_{TOT}	Total Dissipation at $T_C = 25^\circ\text{C}$	220	W
	Derating Factor	1.75	W/ $^\circ\text{C}$
$dv/dt(1)$	Peak Diode Recovery voltage slope	3.5	V/ns
T_{stg}	Storage Temperature	-65 to 150	$^\circ\text{C}$
T_j	Max. Operating Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$

5.2.2.2 วงจรสับเบอ์ (Snubber)

วงจรสับเบอ์ เป็นส่วนที่เพิ่มเข้ามาในวงจรสวิตช์ เพื่อลดกำลังงานสูญเสียและป้องกันการเสียหายที่เกิดขึ้นกับเพาเวอร์มอสเฟตในวงจรขณะทำงานปกติ วงจรสับเบอ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ วงจรสับเบอ์ช่วงหยุดนำกระแส (turn off snubber) ก่อนที่เพาเวอร์มอสเฟตจะหยุดนำกระแสนั้น กระแสจะลดลงอย่างช้า ๆ ในขณะที่แรงดันเพิ่มขึ้นสู่ค่าแรงดันอินพุทอย่างรวดเร็ว ดังรูป 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงค่ากระแสและแรงดันของมอสเฟต

การทำงานของวงจร RCD สับเบอ์เป็นดังนี้ คือ เมื่อเพาเวอร์มอสเฟตเริ่มหยุดนำกระแส แรงดันที่ขาเดรนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีกระแสบางส่วนไหลผ่านตัวเก็บประจุ C และไดโอด D ของวงจรสับเบอ์ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C

ด้วย แรงดันที่ตกคร่อม C ทำให้แรงดันที่เดรนของเพาเวอร์มอสเฟตเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ดังนั้นถ้าให้ C มีค่ามากพอ การเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ขาเดรนจะถูกหน่วงออกไปเพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านเพาเวอร์มอสเฟตลดลงจนมีค่าน้อย ๆ ได้ทันเพื่อลดกำลังสูญเสียในตัวเพาเวอร์มอสเฟต

ขณะที่เพาเวอร์มอสเฟตเริ่มนำกระแสอีกครั้ง C จะคายประจุผ่านตัวต้านทาน R ทิ้งไป แรงดันตกคร่อม C จึงลดต่ำลงและสามารถทำงานได้ในช่วงต่อไป ค่าของ C และ R ที่เหมาะสมหาได้จาก

$$C = \frac{I_{p(pk)} \times t_{off}}{2V_{in}} \quad (5.1)$$

$I_{p(pk)}$ คือ ค่ากระแสสูงสุดขณะเริ่มหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต จากหัวข้อที่ผ่านมาค่า $I_{p(pk)}$ ที่หาได้คือ 10.4 Amp

t_{off} คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต ตามข้อมูล IRFP460 $t_{off} = 21\text{nS}$

V_{in} คือ ค่าแรงดันอินพุทใช้ค่าสูงสุด 84 V

แทนค่า

$$C = \frac{10.4 \times 21 \times 10^{-9}}{2 \times 84} = 1.3\text{nF}$$

$$R = \frac{t_{on(min)}}{2.3C} \quad (5.2)$$

t_{on} คือ ช่วงเวลานำกระแสของเพาเวอร์มอสเฟต จากข้อมูล $t_{ON} = 29\text{ ns}$

$$R = \frac{29 \times 10^{-9}}{2.3 \times 1.3 \times 10^{-9}} = 9.7\Omega$$

ค่าที่นำมาใช้คือ C ขนาด $1.5\mu\text{F}$ ชนิดไมลาร์

R ขนาด 10 โอห์ม 50 วัตต์

นอกจากนี้ในวงจรสวิตช์นี้ต้องลดผลของความเหนี่ยวนำและความต้านทานของแหล่งจ่ายให้มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากถ้าเกิดสไปคส์จากความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย จะมีผลให้เกิดสไปคส์ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงสูงมาก ถึงแม้ว่าเพาเวอร์มอสเฟตจะขับได้ง่ายกว่าเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์เนื่องจากเกิดดึงกระแสน้อยแต่ถ้ามีสัญญาณรบกวนหรือ สไปคส์ที่เกิดก็จะมีผลต่อการสวิตช์สูงมาก

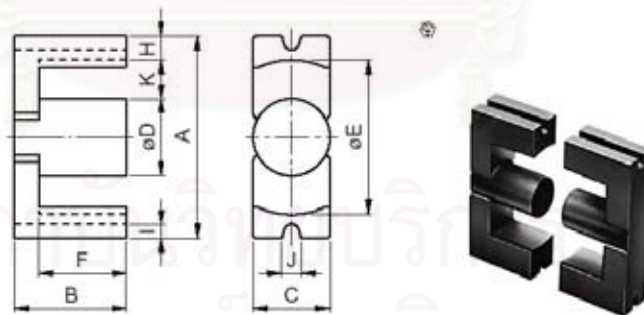
5.2.3 การออกแบบหม้อแปลงกำลังความถี่สูง

หม้อแปลงกำลังความถี่สูงนี้เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญตัวหนึ่งในวงจรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงนี้ เนื่องจากเป็นตัวส่งผ่านพลังงานจากด้านปฐมภูมิ ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าต่ำ ไปยังด้านทุติยภูมิซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าด้วยความถี่สูง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบหม้อแปลงคือ ขนาดของแกน บอบบิ้น ความถี่ที่ใช้และการฉนวน

5.2.3.1. การเลือกแกนหม้อแปลง

การเลือกใช้แกนของหม้อแปลงต้องพิจารณาขนาดช่องว่างในการพันและจุดอิ่มตัวของวัสดุที่ใช้ทำแกนเป็นสำคัญ แกนที่เหมาะสมกับความถี่สูง ๆ คือ แกนเฟอร์ไรต์ เนื่องจากเกิดความสูญเสียที่ความถี่สูง ซึ่งถ้าเป็นแกนเหล็กต้องเป็นเนื้อเหล็กพิเศษและบางมาก มีราคาแพงกว่าแกนเฟอร์ไรต์มาก ปัญหาต่อมาคือจะเลือกใช้แกนเฟอร์ไรต์รูปแบบใดเนื่องจากแกนเฟอร์ไรต์มีผู้ผลิตหลายรายในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น EI, EE, ETD, EC, POT, UU เป็นต้น แกนที่มีช่องพันใหญ่ที่พอจะหาได้ในประเทศคือ EE 80, UU80 และ EC 90

ข้อพิจารณาต่อมาคือ ลักษณะในการพัน ถ้าพันแยกขดทุติยภูมิและปฐมภูมิ ขดละขาของแกนจะทำให้การฉนวนง่ายขึ้นและมีการระบายความร้อนที่ดี แต่ฟลักซ์รั่วจะมาก ถ้าพันขดทุติยภูมิและปฐมภูมิที่ขากกลางของแกน การฉนวนจะยากขึ้น การระบายความร้อนแยกว่าแต่มีฟลักซ์รั่วน้อย ส่งผ่านพลังงานได้ดีกว่า ในที่นี้เลือกการพันที่แกนกลางของแกนจึงตัดแกน UU 80 ออกไป และเลือกแกนขนาด EC 90 เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่า EE 80 แกนแสดงในรูป 5.8



รูปที่ 5.8 ลักษณะของแกน EC 90

ตาราง 5.2 ขนาดของแกน EC90

Part No.	AL ² (μH/NF) ±25%	Dimensions (mm)											
		A	B-2	C	D	E	F-2	H	I	J	K	K-2 ¹ (mm ²)	
PE22 EC70-Z	3950												
PC40 EC70-Z	4890	70±1.7	69±1	16.4±0.5	16.4±0.5	43.3min.	45.5±1	12.75±0.4	5.2±0.2	4.75±0.3	14.1	639	
PE22 EC90-Z	6340												
PC40 EC90-Z	7940	90±1.8	90±1.3	30±1	30±1	68.5min.	71±1	10±0.6	5.5±0.2	6±0.3	20	1420	
PE22 EC120-Z	8450												
PC40 EC120-Z	8090	120±2	101±1.3	30±1	30±1	93.3min.	71±1	12.5±0.7	5.5±0.2	6±0.3	32.5	2307	

* Measuring condition: T=23°C, f=1kHz, Hm=0.4A/m

Part No.	Core factor G/(mm ²)	C ₂ ×10 ⁻⁴ (mm ²)	A ₀ (mm ²)	L ₀ (mm)	V ₀ (mm ³)	Weight (g)
PE22 EC70-Z	0.5266563	0.18635	282	149	41920	250
PC40 EC70-Z						
PE22 EC90-Z	0.3561571	0.05690	626	223	139560	635
PC40 EC90-Z						
PE22 EC120-Z	0.3448813	0.04464	773	266	205810	986
PC40 EC120-Z						

เนื้อของวัสดุที่ใช้ทำแกนนี้คือ PC 40 ของ TDK มีกราฟคุณสมบัติของแกนดังตาราง 5.3

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติของเนื้อสาร PC40

MATERIAL CHARACTERISTICS (Typical)

Material			PE22	PC40
Initial permeability	μi	[23°C]	1800	2300
Curie temperature	T _c	°C	>200	>200
Saturation magnetic flux density H=1194A/m	B _s	[23°C] [100°C]	mT 510 410	500 380
Remanent flux density	B _r	[23°C]	mT	170
Coercive force	H _c	[23°C]	A/m	16
Core loss	P _{cv}	25kHz, 200mT	[100°C]	80
		100kHz, 200mT	[100°C]	520
Electrical resistivity	ρ	Ω·m	3	6.5
Approximate density	d _{app}	kg/m ³	4.8×10 ³	4.8×10 ³
Thermal expansion coefficient	α	1/K	12×10 ⁻⁶	12×10 ⁻⁶
Thermal conductivity	κ	W/mK	5	5
Specific heat	C _p	J/kg · K	600	600
Bending strength	σ _b	N/mm ²	9×10 ⁷	9×10 ⁷
Young's modulus	E	N/mm ²	1.2×10 ¹¹	1.2×10 ¹¹
Magnetostriction	λ _s		-0.6×10 ⁻⁶	-0.6×10 ⁻⁶

* 1(mT)=10(G), 1(A/m)=0.012566(Oe)

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเนื้อ PC 40 มีจุดอิ่มตัวประมาณ 4,200 เกาส์ ในการออกแบบหม้อแปลงจะใช้ที่ค่าครึ่งหนึ่งของจุดอิ่มตัวคือ 2,100 เกาส์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.3.2. การสร้างบอบบี้ (Bobbin)

บอบบี้ทำให้การพันทำได้ง่ายและในที่นี้ยังทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันการลัดวงจรของขดลวดแรงสูงกับแกนเฟอร์ไรต์ด้วยวัสดุที่นำมาใช้ทำบอบบี้มีหลายแบบแต่ที่นิยมใช้กันคือ กระจกฉนวน เนื่องจากมีความเป็นฉนวนสูง ทนความร้อนได้ดี ใช้กระจกฉนวนหนา 1 มม. 2 แผ่น ประกบกันทำเป็นบอบบี้ ดังรูป 5.9



รูปที่ 5.9 บอบบี้

5.2.3.3. การหาจำนวนรอบของขดลวดและการพัน

จำนวนรอบของขดลวดด้านปฐมภูมิหาได้จากสูตร

$$N = \frac{E_{peak} \times 10^8}{4B_{max} Af} \quad (5.3)$$

E_{peak} คือ แรงดันสูงสุดด้านปฐมภูมิ = 84 volt

B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดใช้ 2,000 เกาส์

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกน จากตาราง 5.2 คือ 6.26 cm²

f คือ ความถี่ใช้งาน = 20 kHz

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned} \text{จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ} &= \frac{84 \times 10^8}{4 \times 2000 \times 6.26 \times 20 \times 10^3} \\ &= 7 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิหาได้จากสูตร

$$N_2 = \frac{V_2}{V_1} N_1$$

V_2 คือ แรงดันด้านทุติยภูมิ = 12,530 โวลต์

V_1 คือ แรงดันด้านปฐมภูมิ = 84 โวลต์

N_1 คือ จำนวนรอบด้านปฐมภูมิ = 7 รอบ

แทนค่า

$$N_2 = \frac{12,530}{84} \times 7$$

$$= 1044 \text{ รอบ}$$

การพันขดลวดจะพันรอบปฐมภูมิอยู่ด้านใน พันรอบทุติยภูมิอยู่ด้านนอก โดยใช้ไมลาร์คั่นเป็นชั้น ๆ

การเลือกขนาดของขดลวด ใช้ความหนาแน่นกระแส 500 cmil/A ดังนั้นกระแสในขดลวด 10.4 แอมป์ จะใช้ขนาดขดลวด = $500 \times 10.4 = 5,200 \text{ cmil}$ ดูขนาดสายจากตาราง 5.4

ตาราง 5.4 แสดงขนาดสายและคุณสมบัติ

ตารางที่ 10.1 แสดงขนาดมาตรฐาน AWG และข้อมูลอื่นๆ ของลวดทองแดงอ่อน

เบอร์ AWG (D. & S.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d)		ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	ค่าความต้านทานที่ 100°C (R ₁₀₀) Ω/ft	ความถี่เรโซแนนซ์ (MHz)
	inch	mm				
44	0.00198	0.0503	0.06604	0.00199	11,180	0.071
43	0.00222	0.0564	0.07366	0.00220	8,899	0.079
42	0.00249	0.0633	0.08128	0.00214	7,073	0.087
41	0.00280	0.0711	0.09144	0.00197	5,594	0.096
40	0.00314	0.0798	0.1041	0.00180	4,448	0.111
39	0.00353	0.0897	0.1143	0.00163	3,519	0.122
38	0.00397	0.1008	0.1295	0.00149	2,783	0.138
37	0.00445	0.1130	0.1448	0.00136	2,215	0.154
36	0.00500	0.1270	0.1626	0.00127	1,754	0.172
35	0.00566	0.1422	0.1778	0.00119	1,398	0.188
34	0.0063	0.1600	0.1981	0.00111	1,105	0.209
33	0.0071	0.1803	0.2235	0.00105	8,700	0.236
32	0.0080	0.2032	0.2489	0.00101	6,853	0.261
31	0.0089	0.2281	0.2743	0.00096	5,537	0.287
30	0.0100	0.2540	0.3048	0.00092	4,436	0.319
29	0.0113	0.2870	0.3404	0.00087	3,413	0.356
28	0.0126	0.3200	0.3759	0.00084	2,762	0.395
27	0.0142	0.3607	0.4191	0.00082	2,175	0.438
26	0.0159	0.4039	0.4699	0.00081	1,735	0.491
25	0.0179	0.4547	0.5232	0.00081	1,369	0.547
24	0.0200	0.5105	0.5817	0.00081	1,060	0.608
23	0.0226	0.5740	0.6462	0.00081	838	0.679
22	0.0253	0.6426	0.7174	0.00081	665	0.754
21	0.0285	0.7239	0.8032	0.00081	529	0.841
20	0.0320	0.8128	0.8966	0.00081	423	0.937
19	0.0359	0.9119	1.003	0.00081	340	1.048
18	0.0403	1.024	1.118	0.00081	270	1.188
17	0.0453	1.151	1.247	0.00081	213	1.350
16	0.0508	1.290	1.389	0.00081	169	1.52
15	0.0571	1.450	1.557	0.00081	134	1.627
14	0.0641	1.628	1.737	0.00081	106	1.815
13	0.0720	1.829	1.943	0.00081	84	2.030
12	0.0808	2.052	2.172	0.00081	67	2.270
11	0.0907	2.304	2.431	0.00081	54	2.540
10	0.1019	2.588	2.720	0.00081	44	2.842

จากตารางสายลวดขนาด 5,200 cmil ประมาณเบอร์ AWG 13 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางโตยากแก่การพันจึงใช้ลวดเบอร์ AWG 19 พันขนาดกัน 4 เส้นแทน

ด้านทุติยภูมินั้นที่ด้านขาออกต้องการกำลังงาน 500 วัตต์ ถ้าประสิทธิภาพของชุดทวีแรงดันคือ 80% ดังนั้นกำลังที่หม้อแปลงต้อง

จ่ายคือ 625 วัตต์ หม้อแปลงต้องจ่ายได้มากกว่า 625 วัตต์ คิดไว้ที่ 1,000 วัตต์ ที่จ่ายอดแรงดัน 12,530 โวลท์ ได้ค่ากระแส 120 มิลลิแอมแปร์ จากค่ากระแสที่ได้นำมาหาขนาดสายจากตาราง 5.4 ได้ขนาดสายเบอร์ AWG29

การพันต้องพันเป็นชั้น ๆ และคั่นแต่ละชั้นด้วยไมลาร์ แรงดันต่อรอบของขดลวดด้านทุติยภูมิคือ

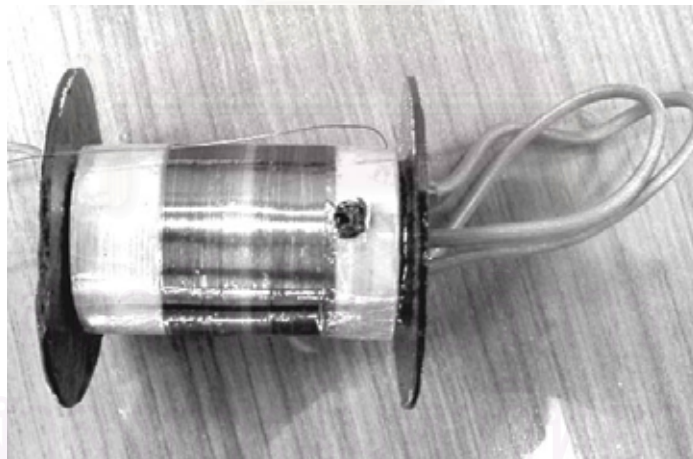
$$\text{แรงดันต่อรอบ} = 12530 / 940 \approx 12$$

ต้องการให้แต่ละชั้นมีแรงดันไม่เกิน 500 โวลท์ ดังนั้นรอบต่อชั้นคือ

$$\text{รอบต่อชั้น} = 500 / 12 = 42 \text{ รอบ}$$

เพื่อให้ง่ายต่อการนับจึงใช้ 50 รอบต่อชั้น ดังนั้นจำนวนชั้นของขดลวดทุติยภูมิคือ $940 / 50 \approx 19$ ชั้น

ไมลาร์ที่นำมาใช้รองในแต่ละชั้นมีความหนา 0.4 มม. ระหว่างชั้นของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิใช้คั่นด้วยแผ่นกระดาษฉนวนชั้นเล็ก ๆ ตามแนวยาวของแกนเพื่อให้เกิดช่องว่างที่น้ำมันสามารถจะไหลผ่านได้สะดวกเพื่อช่วยในการระบายความร้อนและเป็นฉนวนอีกชั้นหนึ่ง ขดลวดที่พันบนบอบบิ้นสมบูรณ์แล้วแสดงในรูป 5.11



รูปที่ 5.10 แสดงหม้อแปลงที่พันสำเร็จ

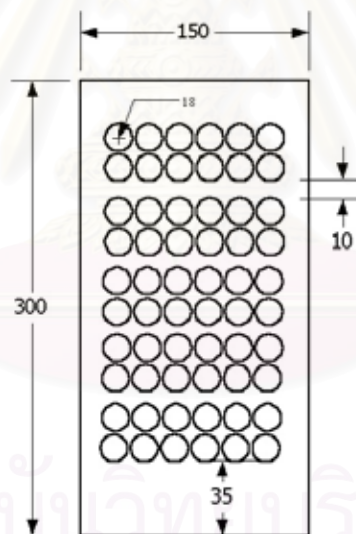
5.2.4 การออกแบบวงจรถูทวิแรงดัน

วงจรถูทวิแรงดันเป็นวงจรที่ยากแก่การออกแบบมาก เนื่องจากมีแรงดันที่สูงและต้องออกแบบให้ได้ในปริมาตรที่เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดขนาดอุปกรณ์ในชุดทวิแรงดัน ประกอบด้วย ไดโอดและตัวเก็บประจุเท่านั้น **ไดโอด** ใช้ไดโอดเบอร์ HV30-07 ทนแรงดัน 30 kV กระแส 70 mA

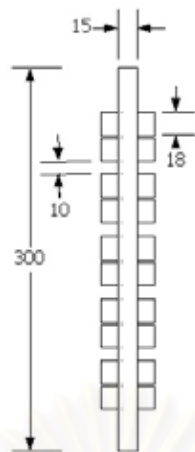
ตัวเก็บประจุ ชนิดโพลีโพรไพลีน ขนาด $0.1 \mu\text{F}$ แรงดัน 2 kV เนื่องจากด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีค่ายอตรงดัน 12530 โวลต์ ตัวเก็บประจุต้องทนแรงดันได้ 2 เท่าของค่ายอคือ 25 kV จึงใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมกัน 12 ตัว

ขั้นตอนต่อมาคือเลือกชนิดของการฉนวน ฉนวนต้องมีค่าการฉนวนพอสมควรและง่ายในการถอดทดลองบ่อยครั้ง จึงเลือกใช้น้ำมันหม้อแปลงเป็นฉนวน ค่าแรงดันที่ใช้ในการออกแบบคือ 30 kV/cm

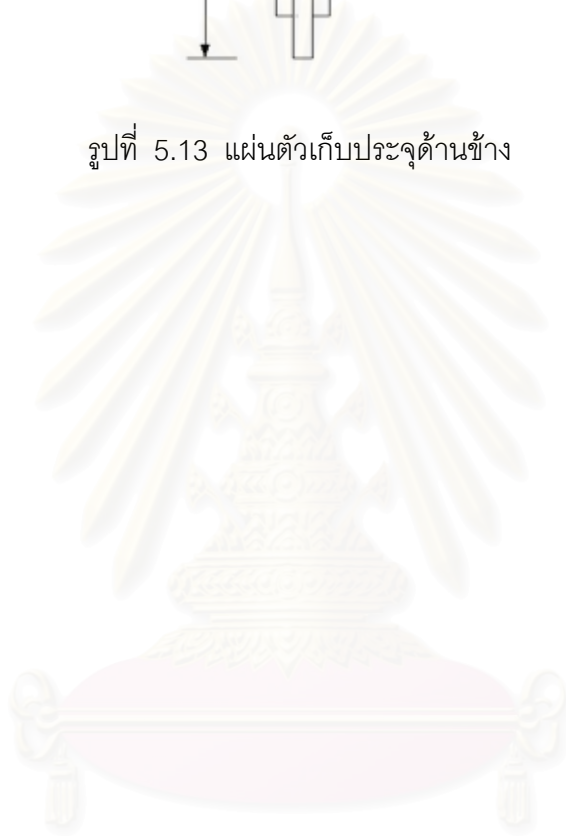
แผ่นตัวเก็บประจุแสดงในรูป 5.12 และ 5.13



รูปที่ 5.12 แผ่นตัวเก็บประจุด้านหน้า



รูปที่ 5.13 แผนตัวเก็บประจุด้านข้าง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

เป้าหมายหลักของการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงนี้คือ สร้างแรงดันไฟฟ้าแรงสูงให้ได้ 100 kV สามารถจ่ายกระแสได้ 5 mA โดยมีแรงดันระลอกไม่เกิน 2% หรือไม่เกิน 2 kV เครื่องกำเนิดแรงดันสูงกระแสตรงที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ในประเทศ โดยทดลองใช้อุปกรณ์ที่มีราคาต่ำ ในการทดสอบตัวเครื่องจะใช้การทดสอบของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าที่โหลดเต็มพิกัด(20 Mohm)เครื่องสามารถจ่ายกระแสและแรงดันได้ โดยมีแรงดันระลอกไม่เกิน 2%

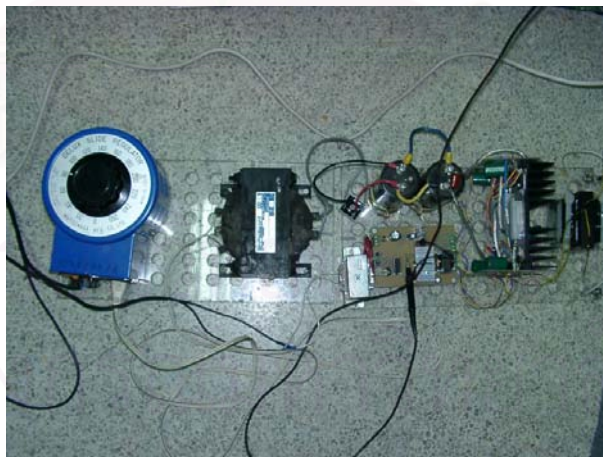
การทดสอบมีดังนี้

1. ทดสอบเครื่องสร้างแรงดันสูงที่ไร้โหลด
2. ทดสอบเครื่องสร้างแรงดันสูงที่โหลด 50%
3. ทดสอบเครื่องสร้างแรงดันสูงที่โหลด 100%

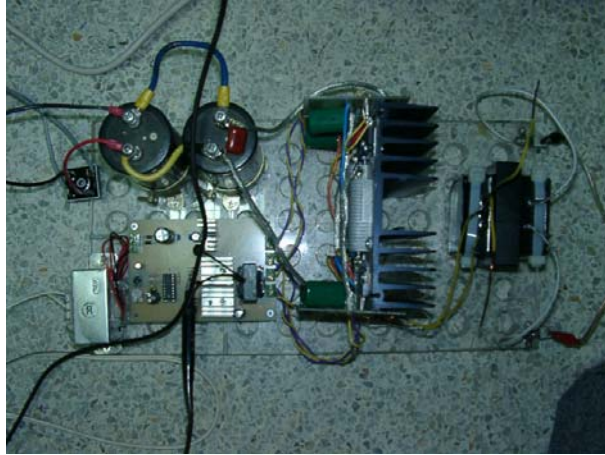
การวัดใช้ Voltage Divider อัตราส่วน 1098: 1 แต่เมื่อต่อเข้ากับออสซิลโลสโคป อัตราส่วนจะเปลี่ยนไปจึงต้องทำการวัดเทียบกับโพรบแรงสูงที่ 10 kV ได้อัตราส่วนใหม่คือ 2028 : 1

6.1 การทดสอบที่ไร้โหลด

รูป 6.1 – 6.3 แสดงวงจรแต่ละส่วน



รูป 6.1 วงจรสวิตช์และวงจรเรียงกระแส



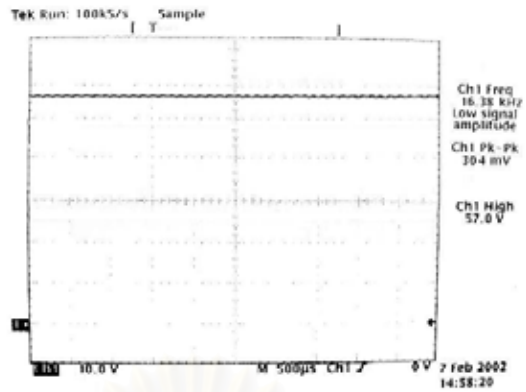
รูป 6.2 วงจรสวิตช์



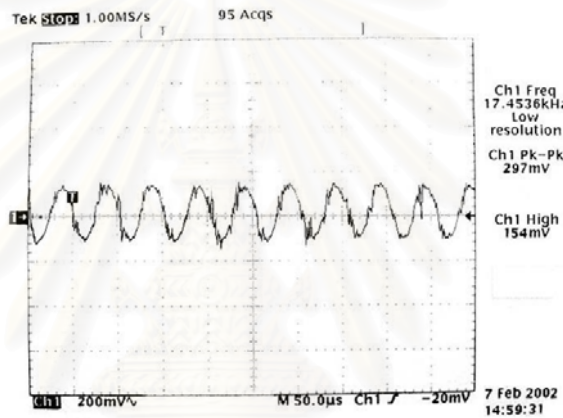
รูปที่ 6.3 วงจรทีวีแรงดัน

ในการทดสอบใช้ Voltage divider วัดเข้าออสซิลโลสโคป อัตราส่วน 2028:1
แสดงผลออกมา ได้รูปคลื่นดังนี้

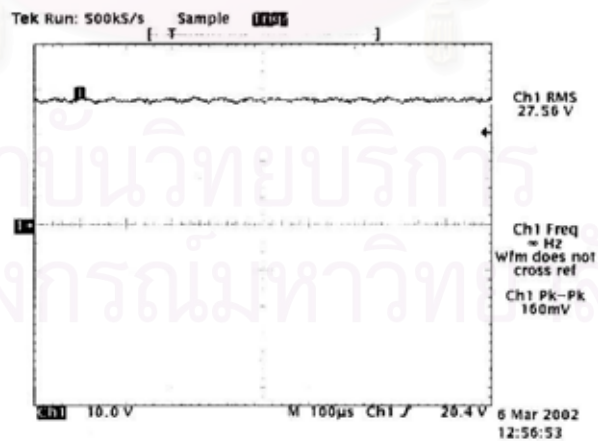
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



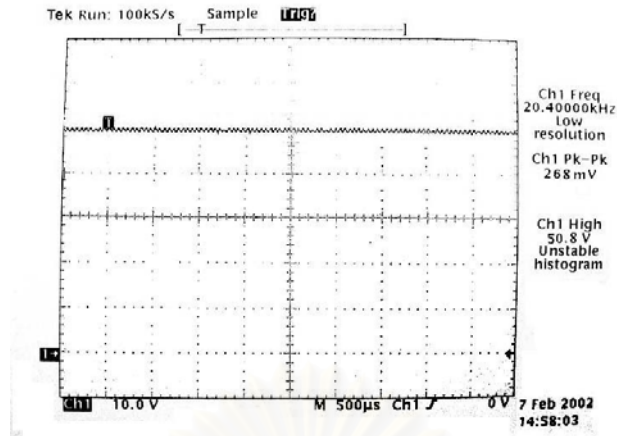
รูปที่ 6.4 รูปคลื่นแรงดัน 115 kV ขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 6.5 แรงดันระลอกที่ 115 kV ขณะไม่มีโหลด



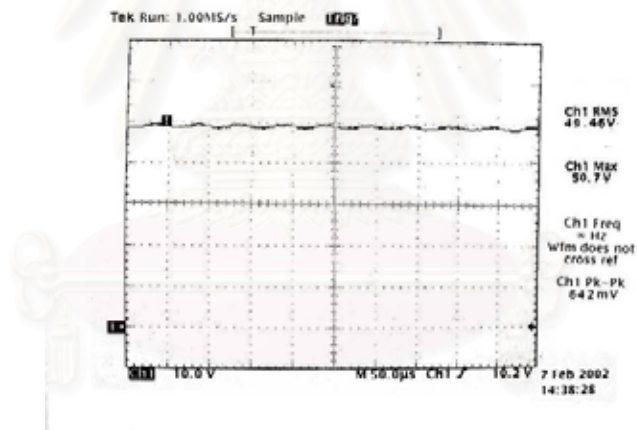
รูปที่ 6.6 รูปคลื่นแรงดันที่ 58 kV ขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 6.7 รูปคลื่นแรงดันที่ 90 kV ขณะไม่มีโหลด

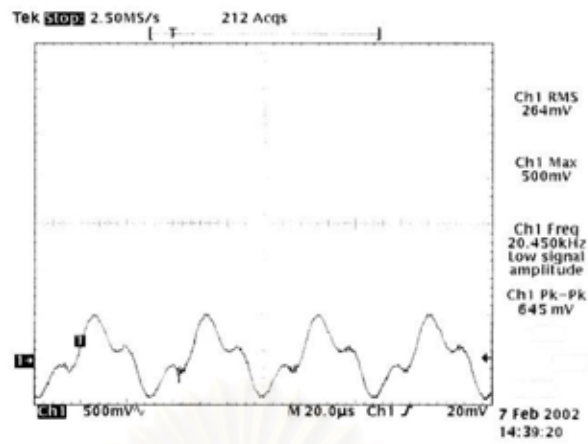
6.2 การทดสอบที่โหลด 50%

ที่โหลด 50% ใช้ความต้านทานขนาด $40\text{ M}\Omega$ การทดสอบได้แรงดัน 100 kV ตามรูป 6.8

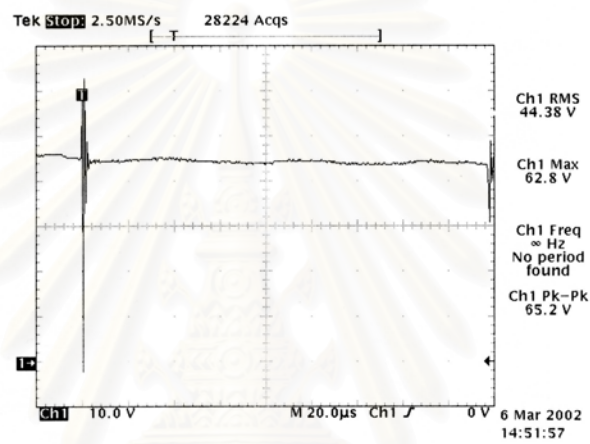


รูปที่ 6.8 ค่าแรงดัน 100 kV ที่โหลด 50%

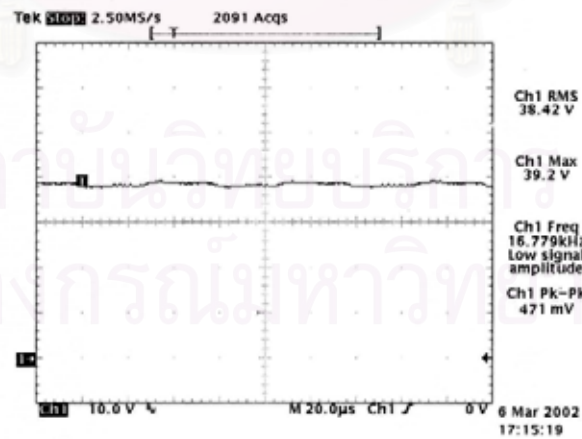
ค่าแรงดันระลอกเป็นไปตามรูป 6.9



รูปที่ 6.9 ค่าแรงดันระลอกที่ half load



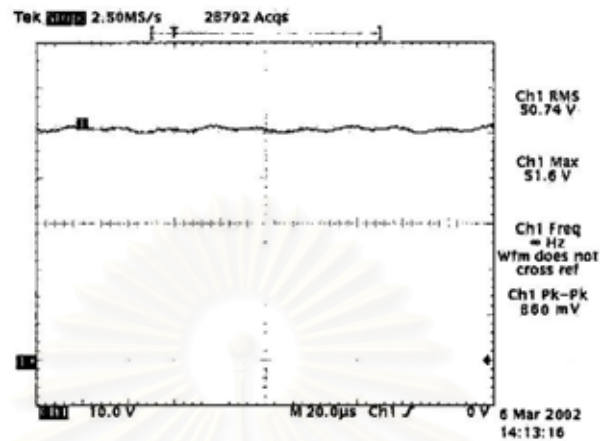
รูปที่ 6.10 แรงดัน 90 kV ที่ half load



รูปที่ 6.11 แสดงค่าแรงดัน 78 kV ที่ half load

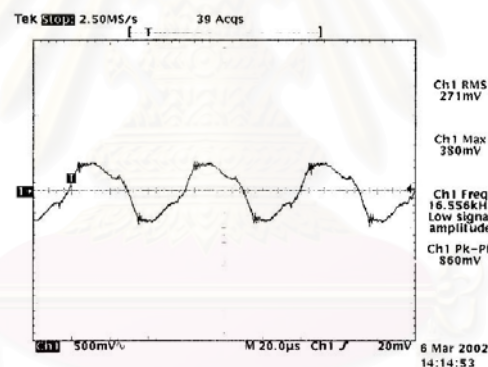
6.3 การทดสอบที่โหลด 100%

ที่โหลด 100% ใช้ความต้านทานขนาด $20\text{ M}\Omega$ ทดสอบได้แรงดัน 103 kV ตามรูป 6.12

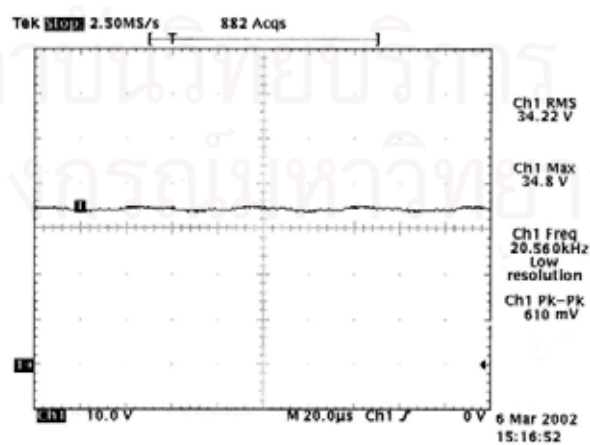


รูปที่ 6.12 ค่าแรงดัน 103 kV ที่โหลด 100%

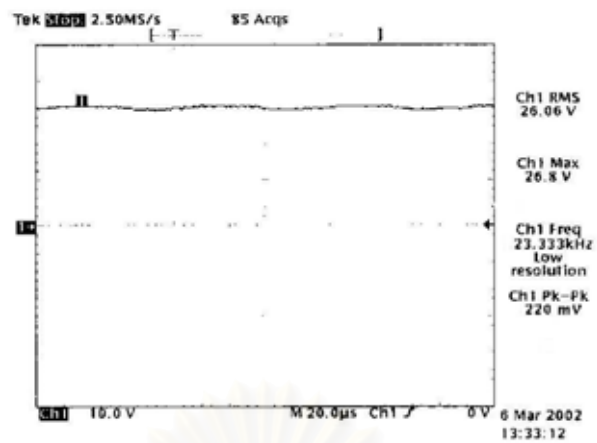
ค่าแรงดันระลอกเป็นไปตามรูป 6.13



รูปที่ 6.13 ค่าแรงดันระลอกที่ 103 kV full load



รูปที่ 6.14 แสดงค่าแรงดัน 68 kV full load



รูปที่ 6.15 แสดงค่าแรงดัน 53 kV ที่ full load



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

เครื่องสร้างแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 100 kV 5 mA ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นนี้ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ที่สามารถจัดซื้อได้ภายในประเทศ แม้ว่าจะมีอุปกรณ์บางตัวมีราคาแพง เช่น ไดโอด แกนเฟอไรต์ เพาเวอร์มอสเฟต โครงการนี้ได้ใช้เทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในหลายแขนงวิชา เช่น วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง อิเล็กทรอนิกส์กำลัง อิเล็กทรอนิกส์

7.1. สรุปผลการวิจัย

ตัวเครื่องสามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดได้ 5 mA โดยมีแรงดันกระแสเพื่อไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ แต่ยังมีปัญหาเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นในวงจรสวิตช์และในตัวหม้อแปลง เนื่องจากพลังงานต่อปริมาตรมีค่าค่อนข้างสูงในส่วนของวงจรวจรทวิแรงดันยังมีขนาดที่ใหญ่อยู่เนื่องจากออกแบบโดยใช้แพ็คเกจอร์ความปลอดภัยอยู่บางส่วน

7.2. ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบสร้างเครื่องสร้างแรงดันสูงกระแสตรงนี้ยังมีปัญหาที่ต้องพัฒนาต่อไปอีกดังนี้

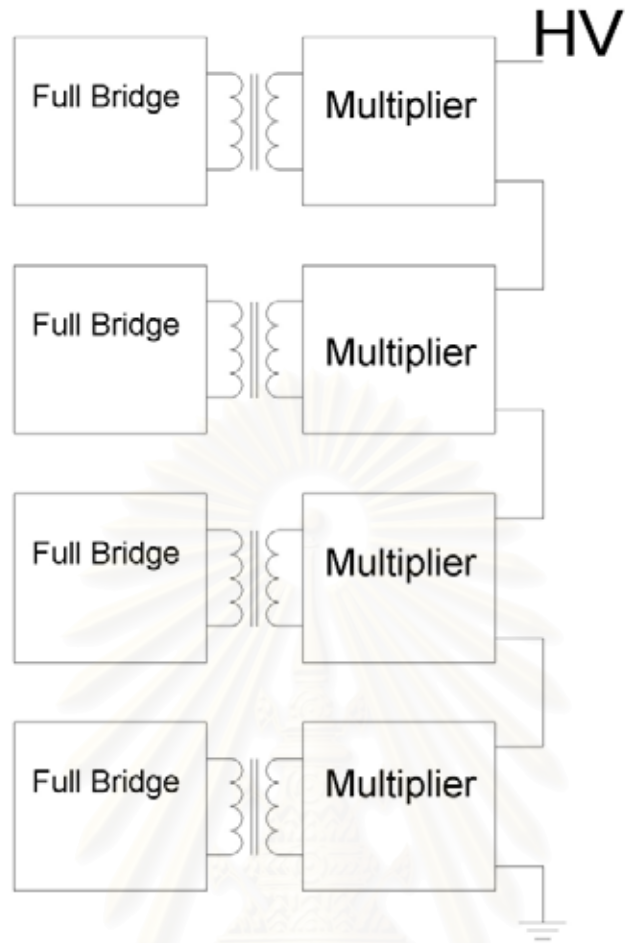
7.2.1 น้ำหนักตัวเครื่อง

น้ำหนักส่วนใหญ่อยู่ที่วงจรเรียงกระแสที่จ่ายให้กับวงจรสวิตช์ และวงจรวจรทวิแรงดัน ในส่วนของวงจรเรียงกระแส นั้น หม้อแปลงมีน้ำหนักมาก เหตุผลที่ใช้เนื่องจากให้ความเป็นเชิงเส้นดีกว่าเพราะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันจาก 0-100 kV และไม่ต้องการให้สวิตช์ที่แรงดันสูง ถ้าจะพัฒนาตัวเครื่องควรจะพัฒนาที่จุดนี้ โดยเปลี่ยนเป็นวงจรสวิตช์ในส่วนของวงจรวจรทวิแรงดันนั้น น้ำหนักส่วนมากคือ น้ำมัน การออกแบบตัววงจรให้เล็กลงและออกแบบกล่องใส่ให้ใช้น้ำมันน้อย จะลดขนาดลงได้อีกมาก

7.2.2 ความร้อนที่เกิดขึ้นกับวงจรสวิตช์และหม้อแปลง

ความร้อนในวงจรสวิตช์และหม้อแปลงมีค่าสูงเป็นปัญหาต่อโครงการนี้มาก วงจรสวิตช์มีความสูญเสียจากการสวิตช์ประมาณ 50 วัตต์และหม้อแปลงมีความสูญเสียประมาณ 45 วัตต์ เมื่อทดสอบที่โหลดเต็มพิกัดต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 15 นาที ความร้อนสะสมในตัวหม้อแปลงมีค่าสูงมากเนื่องจากจำนวนชั้นมากความร้อนไม่สามารถระบายออกจากภายในได้อย่างสะดวกทำให้ฉนวนไหม้ ถึงแม้จะได้มีการแก้ไขหลายครั้งแต่ก็ไม่สามารถขจัดปัญหาความร้อนได้สมบูรณ์

ในการลดความร้อนนั้นสามารถทำได้โดยใช้วงจรสวิตช์ 4 ชุด หม้อแปลง 4 ตัว จ่ายวงจรทีวีแรงดัน 4 ชุด และอนุกรมด้านขาออกของวงจรทีวีแรงดันดังรูป 7.1 ก็จะทำให้วงจรสวิตช์และหม้อแปลงมีความร้อนลดลงได้มากแต่วิธีนี้การฉนวนของหม้อแปลงในแต่ละชั้นต้องเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆและอาจเกิดมอดดูเลชั่นของแรงดันระลอกได้หรืออีกวิธีหนึ่งคือใช้การสวิตช์แบบเรโซแนนซ์ ซึ่งเทคนิคแบบนี้มีความสูญเสียน้อยมากเป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพสูง ปัญหาด้านการฉนวนถือเป็นปัญหาหลักในงานวิจัยนี้ การพัฒนาตัวเครื่องในอนาคตนั้นต้องพัฒนาด้านการออกแบบฉนวนให้ดีขึ้น



รูป 7.1 แสดงแนวคิดการอนุกรมวงจรด้านแรงสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] luichi Tanaka and Itsuo Yuzurihara, **The High Frequency Drive Of a Multi-stage Rectifier Circuit**, IEEE Trans. On Power Electronic, Vol. 256, No. 6, 1988, pp. 568-572.
- [2] M.D. Bellar, E.H.Watanabe and A.C. Mesquita, **Analysis Of The Dynamic And Steady State Performance Of Cockcroft-Walton Cascade Rectifiers**, IEEE Trans. On Power Electronic, Vol. 756, No. 38, 1990, pp. 139-142.
- [3] R. Petkov, **Design Issues Of The High-Power High Frequency Transformer**, IEEE Trans. On Industry App., Vol. 235, No. 56, 1995, pp. 425-428.
- [4] William Dunbar And Jose A. Rugama, **Applying AVIP To High Voltage Power Supply Designs**, IEEE Trans. On Industry App., Vol. 24, No. 6, 1990, pp. 756-759.
- [5] Imbaby I. Mahmoud and S.A. Kamel, **Using a Simulation Technique For Switched-Mode High Voltage Power Supplies Performance Study**, IEEE Trans. On Industry App., Vol. 56, No. 11, 1998, pp. 471-473.
- [6] Ray-Shyang Lai and Khai D.T. Ngo, **A PWM Method For Reduction Of Switching Loss in a Full-Bridge Inverter**, IEEE Trans. On Power Electronic, Vol. 23, No. 10, 1995, pp. 138-141.
- [7] Chris Iannello, Shiguo Huo and Issa Vataseh, **A Full Bridge ZCS PWM Converter For High Voltage and High Power Applications**, IEEE Trans. On Power Electronic, Vol. 54, No. 26, 2000, pp. 453-456.
- [8] G.G. Karady and M. Muralidhar, **High Voltage Lightweight DC/DC Converter**, IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 23, No. 12, 1991, pp. 256-258.
- [9] E. Kuffel and M. Abdullah, **High Voltage Engineering**, New York, Pergamon Press, 1970.
- [10] Dr. Igor A. Krichtafovitch, **Modular High Voltage Power supplies Design**, IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 56, No. 65, 1999, pp. 367-370.
- [11] **Microsim Pspice Evaluation version 7.1**, Microsim Corp., 1995.
- [12] M S Naidu and V Kamaraju, **High Voltage Engineering second Edition**, Wiley&Sons, 1994.
- [13] สำรวย สังข์สะอาด. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2528
- [14] สุวัฒน์ ดัน. **เทคนิคและการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย**. เอนเทลไทย. 2537
- [15] สมบูรณ์ มาลานนท์. **แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง**. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. 2539.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นริศ ชัชธรานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2516 จบปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี 2538 เข้าทำงานที่การไฟฟ้านครหลวงตั้งแต่วันที่ 2539 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง วิศวกรไฟฟ้า 5 แผนกวิจัยระบบไฟฟ้า ฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย