



ชุดจำลองระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

SIMULATION OF D.C.HIGN VOLTAGE UNIT



นายสมภพ ไทอุ่นลา

SOMPHOP YATLA

นายอุดม แซ่เซี่ยม

UDOM SENGKEM

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2532

22.พ.ย. 2532

027013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

027019

ปริญญาโทปีการศึกษา 2532

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุตจำลองระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ผู้จัดทำ

1. นายสมภพ ไทญ์ลา 29.1320
2. นายอุดม แข่งเข็ม 29.1326

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศิริวัฒน์ โภธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทกัณฑ์ย่อ	.
บทที่ 1 บทนำ	3
บทที่ 2 การผลิตไฟฟ้าแรงสูงและการนำไปใช้ประโยชน์	5
บทที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแส (D.C. MOTOR)	10
บทที่ 4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C. GENERATOR)	24
บทที่ 5 ทรานส์ฟอร์มเมอร์ (TRANSFORMERS)	37
บทที่ 6 VOLTAGE MULTIPLIER	55
บทที่ 7 การทดลองและผลการทดลอง	65
กิตติกรรมประกาศ	70
หนังสืออ้างอิง	71

สารบัญรูป

	หน้า
1. ชุดจำลองระบบไฟฟ้าแรงสูง	4
2. วงจรสายส่งแรงสูงกระแสตรง	7
3. ขดลวดมีกระแสวางในสนามแม่เหล็ก	10
4. รูปคลื่นของแรงบิด	11
5. รูปตัดแสดงลักษณะสร้างของมอเตอร์ไฟตรง	12
6. แรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	13
7. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขั้ว	14
8. กราฟแสดงคุณลักษณะของมอเตอร์แบบขั้ว	16
9. การเปลี่ยนแปลงความเร็วและแรงบิดตามกระแส	18
10. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด	19
11. หลักการของมอเตอร์เบืองตัน	20
12. วงจรของมอเตอร์และวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ที่เขียนแทนด้วย ไฟฟ้าต้านกลับได้ค้วแบตเตอรี่	21
13. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขั้วแม่เหล็กหมุน	23
14. รูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น	25
15. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับชนิดอาร์มาเจอร์หมุน	26
16. แผ่นเหล็กบางเจาะร่องรอบนอก	27
17. ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบซิมเพล็กซ์แลพ	28
18. ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบแลพ	29
19. ขดลวด 2 ชั้น	30
20. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเบืองตัน	31
21. CIRCUIT MODEL	36
22. B - H CURVE ของสาร FERROMAGNETIC	38
23. HYSTERESIS LOSS	39
24. EDDY CURRENT AND THE EFFECT OF CORE LAMINATION	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
25. การแบ่งชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามลักษณะการวางแกนเหล็ก	41
26. แบบของการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า	43
27. MAGNETIC CIRCUIT OF IDEAL TRANSFORMER	46
28. การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับ IDEAL TRANSFORMER เมื่อไม่มีโหลด	47
29. การเปลี่ยนแปลงของ FLUX แม่เหล็ก	48
30. วงจรสร้างแรงดันสองเท่า	54
31. วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า	55
32. วงจรชั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงตามวงจรของ CREINACH	57
33. รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรชั้นบันไดขณะที่มีโหลด	58
34. วงจรการทดลองของชุดจำลองระบบไฟฟ้า	65



ชุดจำลองระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

สมภพ ใหญ่ลา , อุดม แข่งเข็ม
ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2532

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงโครงสร้างของระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ซึ่งประกอบด้วยโรงต้นกำลังซึ่งใช้ตัวขับ (PRIMOVER), เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (GENNERATOR) หม้อแปลงไฟฟ้า (TRANSFORMER), วงจรพหุคูณแรงดันซึ่งอาศัยหลักการพื้นฐานของวงจรพหุคูณค็อกครอฟต์วอลตัน (COCKCROFT WALTON VOLTAGE MULTIPLIER) ในการจำลองระบบไฟฟ้าแรงสูงนี้เพื่ออธิบายถึงระบบการผลิตและจำหน่ายกระแสไฟฟ้าที่มีใช้ทั่วไปและเพื่อการศึกษาถึงระบบไฟฟ้าแรงสูง เมื่อมีการจำหน่ายกระแสไฟฟ้าแล้วจะมีผลต่อระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างไรบ้าง

ในระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงนั้น การเกิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงนั้นใช้วงจรพหุคูณแรงดันซึ่งเกิดขึ้นตามกฎการทคสอง คือ

$$V_o = 2nV = \frac{I \cdot 1.2 \cdot n^3}{fC}$$

เมื่อ	V_o	เป็นแรงดันทางคานเอาต์พุทของระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
	V	เป็นแรงดันที่จ่ายให้กับวงจรพหุคูณ
	C	เป็นค่าความจุไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์
	f	เป็นความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า
	n	เป็นจำนวนชั้นของวงจรพหุคูณ

SIMULATION OF D.C. HIGH VOLTAGE UNIT

Somphop Yaila , Udom Sengkem
Siriwat Pootiwechakul Advisor
1989

Abstract

This thesis present the construction of High Voltage Unit. The High Voltage Unit employs the principle of Cockcroft Walton voltage multiplier. It consist of a primover , a generator which call that Power Plant, a transformer and voltage multiplier circuit. This simulation of High Voltage Unit for explain that generation and distribution of electrical current which used generally and studied with generated d.c. high voltage. This High Voltage Unit which generated d.c. high voltage according to the wellknow of voltage multiplier circuit experiment law :

$$V_o = 2nV - \frac{I_1 \cdot 2 \cdot n^3}{fC} ;$$

where V_o is output of High Voltage Unit , V is the input , C is Capacitance of each capacitor , I_1 is load current , f is the supply frequency and n is the number of stages.

บทที่ 1

บทนำ

ในการวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงนี้ มีการนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางทั้งในระบบการผลิตและระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ การพัฒนาอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ฯลฯ

ในการผลิตไฟฟ้าแรงสูงนั้นสามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (HIGH D.C. VOLTAGE)
2. ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับความถี่ปกติ (HIGH A.C. VOLTAGE OF POWER FREQUENCY)
3. ไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับความถี่สูง (HIGH A.C. VOLTAGE OF HIGH FREQUENCY)
4. ไฟฟ้าแรงสูงทรานเซียน-อิมพัลส์ ช่วงเวลาสั้น ๆ เช่น แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า (HIGH TRANSIENT OF IMPULSE VOLTAGES OF VERY SHORT DURATION SUCH AS LIGHTNING)
5. ไฟฟ้าแรงสูงทรานเซียน ช่วงเวลายาว เช่น สวิตชิง-เสริจ (TRANSIENT VOLTAGES OF LONGER DURATION SUCH AS SWITCHING SURGES)

ซึ่งในปริณิญาฉบับนี้ จะได้กล่าวถึงการออกแบบและการจำลองการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยอาศัยหลักการของวงจรแรงดันพหุคูณของค็อกครอฟ-วอลตัน (COCKCROFT - WALTON VOLTAGE MULTIPLIER CIRCUIT) ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

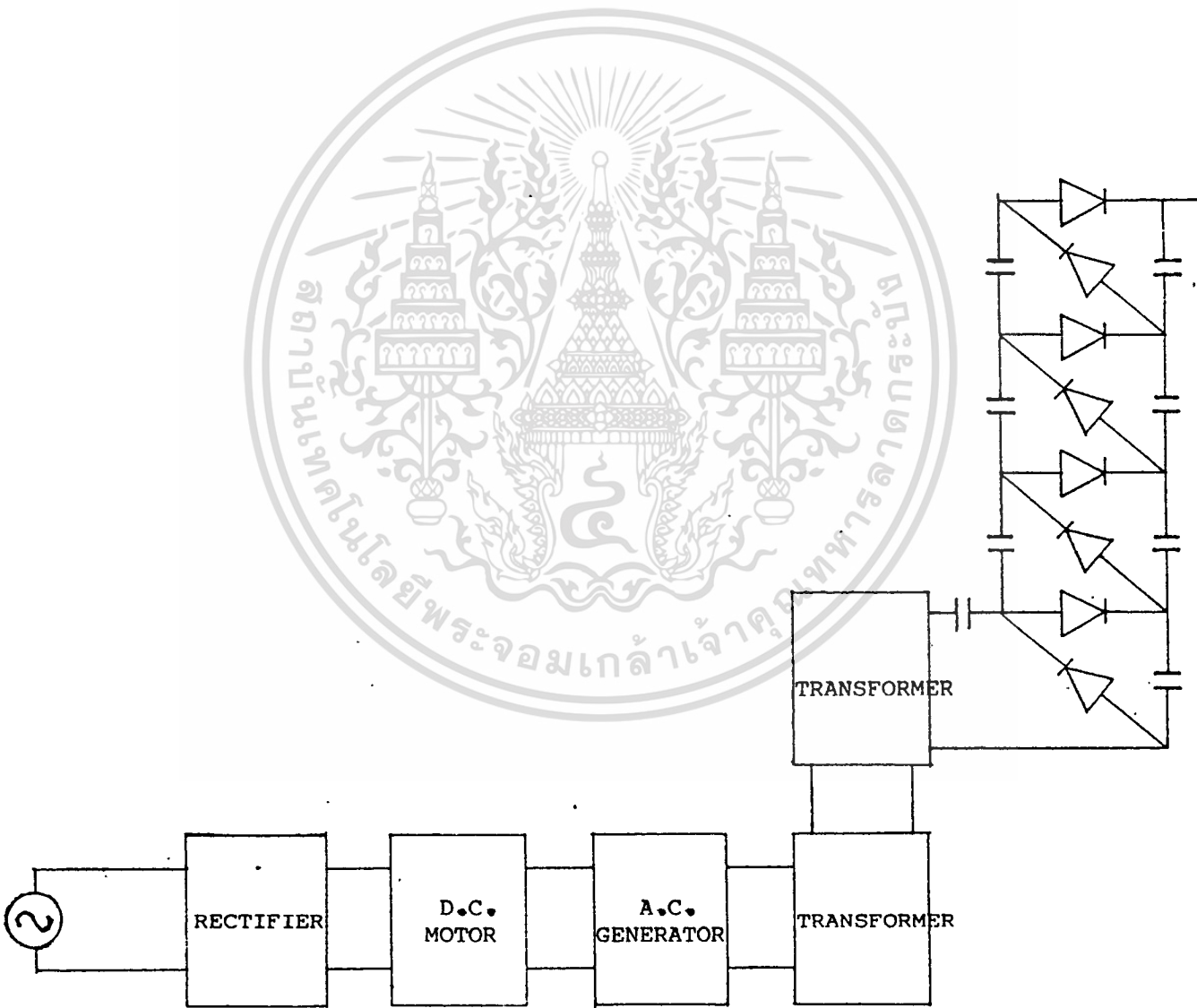
1. แวรีแอก (VARIAC) ที่รับค่าได้ 0 - 230 V.
2. วงจรบริดจ์-เร็คติไฟเออร์ (BRIDGE - RECTIFIER)
3. ดี.ซี. มอเตอร์ (D.C. MOTOR)
4. เอ.ซี. เย็นเนอร์เรเตอร์ (A.C. GENERATOR)
5. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 40/230 V. (TRANSFORMER)
6. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 230/3000 V. (TRANSFORMER)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. วงจรสร้างแรงดันพหุคูณแบบค็อกครอฟ-วอลตัน

(COCKCROFT- WALTION VOLTAGE MULTIPLIER CIRCUIT)

จุดประสงค์ของการจำลองระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเพื่อที่จะศึกษาถึงวิธีการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าคั้งที่กล่าวถึงมาแล้ว และการเกิดไฟฟ้าแรงสูงรวมถึงการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งจะต้องควบคุมระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าให้สามารถผลิตและจำหน่ายอย่างมีประสิทธิภาพ และนำหลักการสร้างไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงไปประยุกต์ใช้ในงานอื่น ๆ ได้ ซึ่งหลักการทำงานของระบบจะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดในบทต่อไป



รูป ชุดจำลองระบบไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตไฟฟ้าแรงสูงและการใช้ประโยชน์

ไฟฟ้าแรงสูงตามความหมายที่ระบุไว้ในมาตรฐานสากล หมายถึงแรงดันไฟฟ้าที่สูงตั้งแต่ 1000 โวลต์ขึ้นไป มนุษย์ได้คุ้นเคยกับไฟฟ้าแรงสูงในชีวิตประจำวันมาแล้วตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์โดยไม่รู้ตัว นั่นก็คือ ไฟฟ้าแรงสูงที่เป็นปรากฏการณ์ฟ้าผ่าตามธรรมชาติ อันเป็นผลของการเกิดดิสชาร์จหรือคายประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าสูงตั้งแต่ 10 ถึง 100 เมกกะโวลต์ จัดเป็นแรงดันสูงมากที่มนุษย์ยังไม่เคยสร้างได้สูงถึงขนาดนี้ แรงดันสูงที่มนุษย์สร้างขึ้นด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จำลองแรงดันฟ้าผ่า เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้า มีแรงดันสูงเพียง 6 เมกกะโวลต์ ส่วนแรงดันที่สูงที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการส่งพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบัน (2527) สูงเพียง 1500 กิโลโวลต์ แรงดันกระแสตรง และ 765 กิโลโวลต์แรงดันกระแสสลับ

การตั้งโรงจักรผลิตพลังงานไฟฟ้ามักจะถูกกำหนดด้วยแหล่งกำเนิดพลังงาน ความเหมาะสมกับสภาวะแวดล้อม และเป็นไปตามหลักเศรษฐศาสตร์ กล่าวคือ เราไม่สามารถเลือกตั้งโรงไฟฟ้าให้อยู่ใกล้กับศูนย์กลางผู้ใช้ไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการเสมอไป โดยทั่วไปมักจะตั้งโรงจักรผลิตที่ไกล ๆ แหล่งกำเนิดพลังงาน เช่น พลังงานน้ำตก ซึ่งอยู่ในภูมิประเทศที่เป็นภูเขาหรือเหมืองถ่านหินในภูมิภาคที่ห่างไกลย่านชุมชน นั่นคือจะต้องส่งพลังงานที่ผลิตได้ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล การส่งพลังงานไฟฟ้าปริมาณมาก ๆ และเป็นระยะทางไกล ๆ ย่อมจะเกิดกำลังงานสูญเสีย P_c เนื่องจากความต้านทาน R ในสายส่งกำลังงานสูญเสียดังกล่าวนี้จะแปรตามกำลังสองของกระแส I คือ $P_c = I^2 R$

การลดกำลังงานสูญเสียในสายส่งให้น้อยลง ทำได้โดยลดกระแสให้น้อยลงแต่ต้องเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น เพื่อให้สามารถส่งกำลังงานได้เท่าเดิม นี่คือเหตุผลที่ต้องใช้ระบบแรงดันสูงในการส่งพลังงาน (HIGH VOLTAGE TRANSMISSION SYSTEM) ผลดีของการส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันสูงก็คือ จะทำให้แรงดันตกในสายส่งลดน้อยลง ประสิทธิภาพของสายส่งดีขึ้น เสถียรภาพความเชื่อถือได้ต่อระบบสายส่งสูงขึ้น

ระดับแรงดันสูงที่ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้าอยู่ในปัจจุบันนี้ อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงด้วยกัน คือ

(1) แรงดันสูง (HIGH VOLTAGE = HV) หมายถึงแรงดันตั้งแต่ 1 KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นไปจนถึง 230 KV

(2) แรงดันสูงพิเศษ (EXTRA HIGH VOLTAGE=EHV) หมายถึงแรงดัน
สูงกว่า 230 KV จนถึง 765 KV

(3) แรงดันสูงอุตรา (ULTRA HIGH VOLTAGE = UHV) หมายถึงแรงดัน
สูงกว่า 765 KV ขึ้นไป

การใช้ประโยชน์แรงดันสูงกระแสดตรง

แรงดันสูงกระแสดตรงที่สร้างขึ้นมีที่ใช้ประโยชน์ คือ

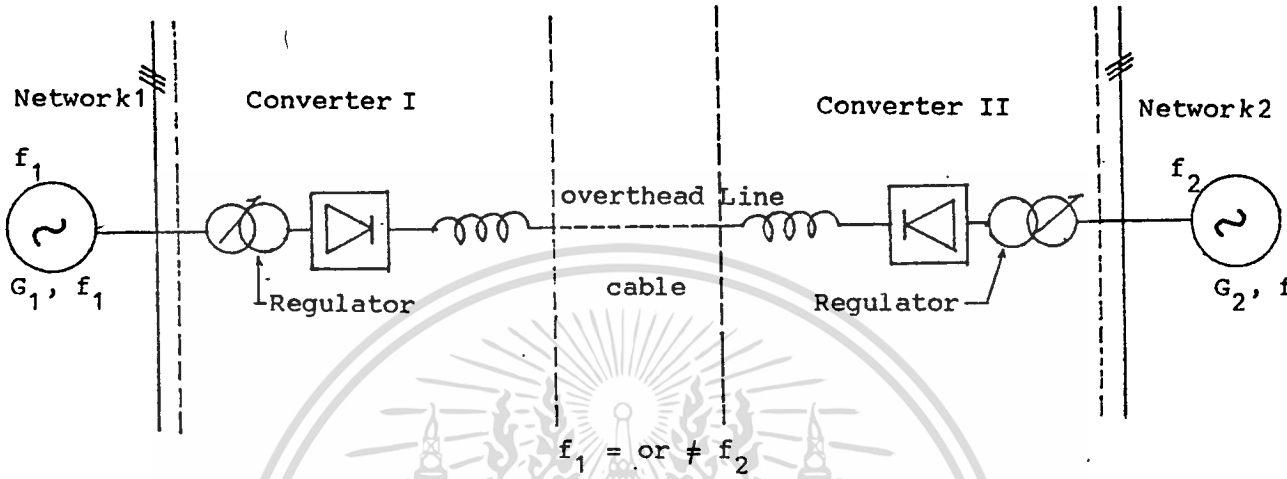
ใช้ส่งพลังงานไฟฟ้า

ใช้ทางฟิสิกส์ และทางการแพทย์

ใช้ทดสอบวัสดุฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

การสร้างแรงดันสูงกระแสดตรงสำหรับส่งพลังงานไฟฟ้านับเป็นประโยชน์สำคัญ
ประการแรก ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าการสร้างระบบสายส่งแรงสูงกระแสดตรงเพิ่มมากมาย
เพิ่มขึ้นสามเท่าตัวในช่วงระยะ 10 ปี เมื่อเทียบกับระบบแรงดันสูงกระแสดสลับจะเพิ่มขึ้นเท่า
ตัวในระยะ 10 ปี การพัฒนาระบบสายส่งแรงดันสูงกระแสดตรงจะเป็นส่วนสำคัญยิ่งของการ
ส่งพลังงานไฟฟ้าในอนาคต

วงจรหลักของระบบสายส่งแรงสูงกระแสดตรง ประกอบด้วยสถานีเปลี่ยน AC
เป็น DC และอีกสถานีหนึ่งเปลี่ยน DC กลับเป็น AC ในสถานีเปลี่ยนกระแสประกอบด้วย
หม้อแปลง แปลงแรงดัน อุปกรณ์เปลี่ยนกระแส (CONVERTER) ซึ่งอาจจะ เป็น
MERCURY - VALVE หรือ THYRISTOR ก็ได้ และรีแอคเตอร์ทำหน้าที่กรอง
คั้งในรูปที่ 1-2 (รายละเอียดดูในวิชา INVERTER ENGINEERING)



รูป 1 - 2 วงจรสายส่งแรงสูงกระแสตรง

ข้อดีของระบบสายส่งกระแสตรงก็คือ ไม่มีกำลังงานสูญเสียในฉนวนที่เกิดจากการสลับขั้วของรูปคลื่นแรงดัน ยิ่งกว่านั้นยังสามารถใช้ดินหรือน้ำทะเลเป็นสายกลับของระบบได้อีกด้วย

สายส่งแรงดันกระแสสลับระยะทางไกล ๆ จำเป็นต้องใช้คาปาซิเตอร์, รีแอคเตอร์ หรือเครื่องจักรกลเชิงโคโรน่า เพื่อชดเชยหรือแก้แฟคเตอร์กำลังงาน (POWER FACTOR) ถ้าเป็นสายส่งแรงดันกระแสตรงไม่จำเป็นต้องมีการชดเชย ด้วยเหตุนี้เองจึงสามารถใช้เคเบิลเป็นสายส่งพลังงานในระยะทางไกล ๆ ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายเคเบิลที่เดินในทะเล ซึ่งในลักษณะเช่นนั้นไม่อาจใช้ตัวชดเชยดังกล่าวได้

ในกรณีเชื่อมโยงระหว่างระบบใหญ่ ๆ ที่มีความถี่ของระบบแรงดันกระแสสลับต่างกันทำได้โดยเชื่อมด้วยสายส่งแรงสูงกระแสตรง ดังเช่น การเชื่อมโยงระบบส่งจ่ายระหว่างประเทศอังกฤษกับประเทศฝรั่งเศส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งพลังงานด้วยระบบแรงดันเท่ากันลักษณะสายส่งเหมือนกัน จะเกิด โครโน่าในระบบสายส่งกระแสสลับมากกว่าจึงทำให้เกิดคลื่นรบกวนต่อระบบสื่อสารมากกว่า

ข้อเสียของสายส่งแรงดันกระแสตรงก็คือ สถานีเปลี่ยนกระแส (CONVERTER STATION) นั้นราคาแพงมาก เฉพาะอุปกรณ์เปลี่ยนกระแสราคาประมาณ 30-40% การเปลี่ยนแปลงแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงทำไม่ได้อย่างระบบกระแสสลับ ที่สามารถแปลงแรงดันได้ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า การตัดวงจรโดยใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องมีคุณลักษณะพิเศษ เพราะกระแสไม่ลดลงเป็นศูนย์สองครั้งในหนึ่งไซเคิลเหมือนอย่างกระแสสลับ ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการตัดวงจรขณะที่มีโหลด ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ เทคนิคการฉนวนซึ่งยังมีปัญหาที่แก้ไม่ได้ การฉนวนแรงดันสูงกระแสตรงนั้นยุ่งยาก ความคงทนต่อแรงดันกระแสตรงของฉนวนแข็งและฉนวนเหลว ขึ้นอยู่กับแพคเกจจิ้งหลายประการ การค้นคว้าวิจัยในด้านนี้ยังมีน้อย ฉะนั้นความรู้ในด้านเทคนิคสายส่งแรงสูงกระแสตรงในปัจจุบันยังไม่มีที่มั่นใจได้ เหมือนอย่างระบบสายส่งแรงดันกระแสสลับ

ในห้องทดลองวิจัยโดยทั่วไปมักจะทำการทดลองหาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนด้วยแรงดันกระแสตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดลองกับฉนวนที่เป็นก๊าซ คุณลักษณะทางกายภาพ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่พลังงาน อาจวิเคราะห์ด้วยแรงดันกระแสตรงได้เช่นเดียวกัน สามารถหาผลการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากข้อของแรงดันได้อีกด้วยการใช้ประโยชน์สำหรับเครื่องพิเศษทางฟิสิกส์ เช่น ปฏิกรณ์เร่งอนุภาคเครื่องผลิตรังสีเอ็กซ์ ซึ่งได้จากการยิงอิเล็กตรอนที่ผ่านเครื่องเร่งอัตราเร็วลงบนแผ่นโลหะ (วุลแฟรม และทองแดงเป็นต้น) เครื่องอิเล็กโตรไมโครสโคป อุปกรณ์ดังกล่าวในปัจจุบันใช้แรงดันสูงอาจถึง 1000 KV ใช้ประโยชน์ในทางพลาสมาภาพ (PLASMA PHYSICS) คือ สร้างพลาสมาด้วยอุณหภูมิสูงเพื่อทำการพิวซ์นิวเคลียร์

ทางการแพทย์ใช้สำหรับเครื่องฉายรังสีต่าง ๆ เครื่องทำไอโซน ประโยชน์ทางด้านเทคนิค ใช้ทดลองเกี่ยวกับวัสดุเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ เช่น ทำครอสลิงโพลิทีลีน โดยการฉายรังสีลงบนวัสดุนั้น การพ่นสีโดยใช้อิเล็กโตรสแตติกส์ ใช้กับเครื่องกรองเขม่าควัน เป็นต้น

ทางด้านการศึกษาอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับระบบแรงดันกระแสตรง ก็มีความจำเป็นต้องทดสอบการฉนวนด้วยแรงดันกระแสตรง เช่น เกี่ยวกับการทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับ



แม้แต่อุปกรณ์บางอย่างที่ใช้กับแรงดันกระแสสลับยังต้องทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงก็มี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่มีค่าความจุไฟฟ้า (CAPACITANCE) สูง ๆ เช่น เคเบิลแรงสูง หรือ คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในระบบส่งจ่าย ในกรณีของเคเบิลแรงสูงจำต้องทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง เพราะว่าเคเบิลนั้นได้วางเสร็จเรียบร้อยแล้ว และมีความจุสูง ซึ่งไม่สามารถจะจัดหาตัวจ่ายกระแสสลับที่มีกำลังงานเพียงพอแก่การทดสอบได้ หากทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงสามารถทำได้ เพราะการทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรงใช้กำลังไฟน้อย เนื่องจากความต้านทานกระแสตรงของเคเบิลมีค่าสูงมาก การอัปเดตประจุจึงเป็นไปอย่างช้า ๆ จึงสามารถจัดหาตัวจ่ายกระแสตรงได้ง่ายกว่า



027019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

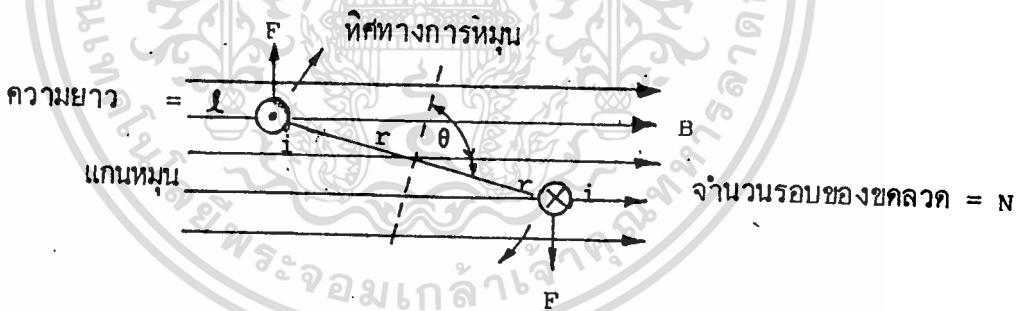
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

(D.C.MOTOR)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่แปรสภาพพลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานกลเพื่อใช้ในงานต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนในงานอุตสาหกรรม ขับเคลื่อนลิฟต์ เป็นต้น มอเตอร์ไฟฟ้าอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติ โดยหลักการที่ว่า ถ้าผ่านกระแสไฟฟ้าไปในเส้นลวดที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงกระทำต่อเส้นลวดนั้นให้เคลื่อนที่ไป ขนาดและทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า (i) ความยาวของเส้นลวด (l) และขนาดและทิศทางของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) และอาจหาได้ดังนี้

$$\vec{F} = i (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (5.1)$$

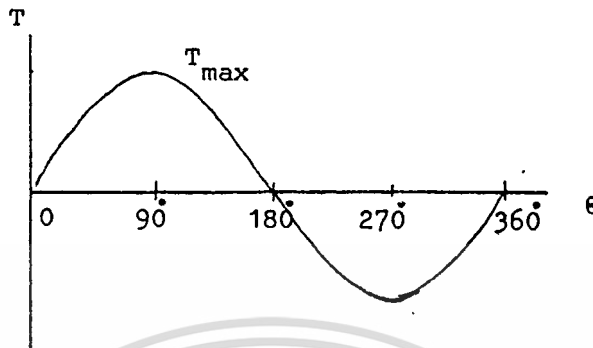
ด้วยแรงที่กระทำต่อเส้นลวดนี้หากเราจัดเส้นลวดให้เป็นขดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ให้หมุนได้รอบแกนกลาง ก็จะเกิดแรงบิดทำให้ขดลวดหมุนไปจากตำแหน่งเดิมได้



รูปที่ 5.1 ขดลวดที่มีกระแสวางในสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.1 แสดงการเกิดขึ้นของแรงบิดบนขดลวดที่มีกระแสวางในสนามแม่เหล็ก แรงบิดที่เกิดขึ้นอาจคำนวณได้ดังนี้ $T = 2NiBlr \sin \theta$ (5.2)

ถ้าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก B มีค่าสม่ำเสมอ แรงบิด T จะแปรตามมุมหมุน θ และจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\theta = 90^\circ$ มีค่าศูนย์เมื่อ $\theta = 0^\circ$ และ 180° มีทิศทางตรงข้าม เมื่อ $180^\circ < \theta < 360^\circ$ รูปคลื่นของแรงบิด T ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 รูปคลื่นของแรงบิด

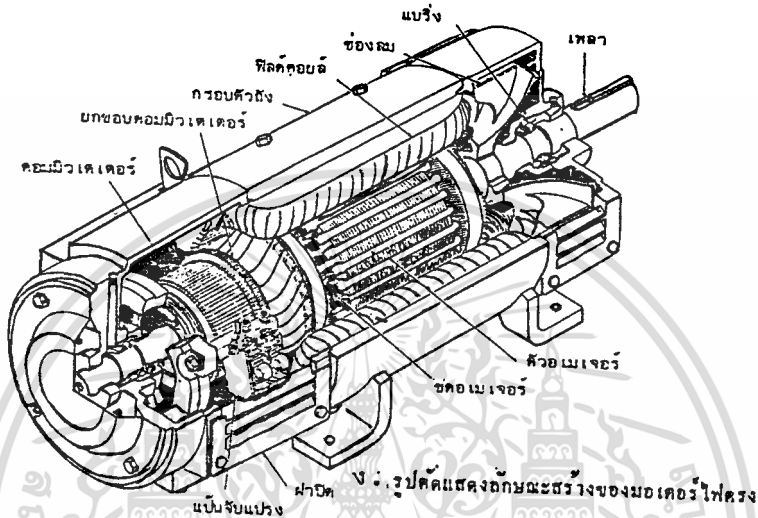
ถ้าพิจารณาในรูปของแรงบิด T แล้ว จะเห็นว่าขดลวดในรูปที่ 5.1 จะเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมไปอยู่ในตำแหน่งใหม่เมื่อ $\theta = 0$ และจะหยุดอยู่หนึ่ง ณ. ที่นั้น บางครั้งขดลวดอาจหมุนเวียนเลยไปจากตำแหน่งที่แรงบิดเป็นศูนย์ ทั้งนี้เพราะแรงเฉื่อยของขดลวด อย่างไรก็ตามเมื่อหมดแรงเฉื่อยแล้ว ขดลวดจะถูกแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นผลักให้กลับมาอยู่ในตำแหน่งที่แรงบิดเป็นศูนย์ในที่สุด การที่จะทำให้ขดลวดหมุนต่อไปรอบแกนหมุนอย่างต่อเนื่องได้นั้น จะต้องมีวิธีการที่เหมาะสม วิธีการที่ใช้กันในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ก็คือ การพลิกกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดในทันทีที่ขดลวดหมุนมาถึงตำแหน่งที่แรงบิดเป็นศูนย์ ทั้งนี้ก็เพื่อให้แรงบิดในทิศทางเดิม เพื่อผลักให้ขดลวดหมุนต่อไปได้ วิธีการทำให้กระแสกลับทิศทางดังกล่าวนี้เรียกว่า คอมมิวเตชัน (Commutation)

3.1 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีโครงสร้างเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ อาร์มาเจอร์ และ ขั้วแม่เหล็ก อาร์มาเจอร์เป็นส่วนที่หมุน ส่วนขั้วแม่เหล็กติดอยู่กับเฟรม ดังแสดงในรูปที่ 6.14 ซึ่งแสดงถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์กระแสไฟฟ้ากระแสตรง

วัสดุที่ใช้ทำแกนอาร์มาเจอร์ เป็นเหล็กแผ่นบางวางซ้อนกัน (Laminated

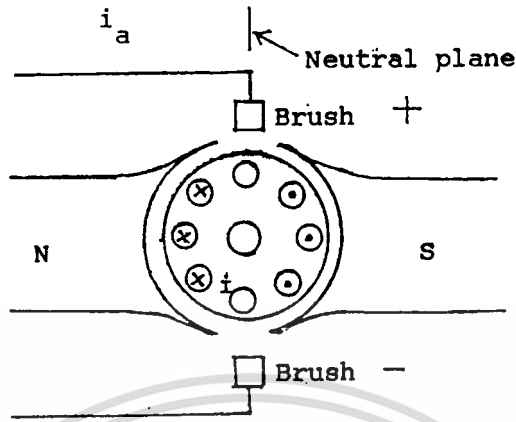
sheet steel) มีร่อง (slot) สำหรับวางขดลวดทองแดง แกนอาร์มาเจอร์ ยึดติดกับแกนหมุน (shaft) ทำด้วยเหล็ก คอมมิวเตเตอร์จะติดไว้ที่ปลายข้างหนึ่ง เฟรมของมอเตอร์ปรกติทำด้วยเหล็กหล่อ (Cast or wrought iron) ขั้วแม่เหล็กจะยึดติดอยู่ภายใน ในมอเตอร์ขนาดใหญ่ขั้วแม่เหล็กจะทำด้วยเหล็กแผ่นเช่นเดียวกับอาร์มาเจอร์



3.2 แรงบิดมอเตอร์

ตามที่ได้อธิบายมาแล้วในตอนต้นของบทนี้ว่า แรงบิดที่เกิดขึ้นที่ขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านและวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะสม่ำเสมอ (Uniform) จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่หมุนไป ซึ่งหาได้ตามสมการ (5.2) และเมื่อหมุนไป 180° แรงบิดจะกลับทิศทางทั้งนี้เพราะขดลวดหมุนเข้าไปอยู่ภายในสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตรงข้าม เพื่อที่จะให้มอเตอร์ สร้างแรงบิดในทิศทางเดียวตลอด จะต้องหาวิธีกลับทิศทางกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดโดยการใช้คอมมิวเตเตอร์ที่เหมาะสมก็จะทำให้สามารถกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์มาเจอร์ได้ขณะเมื่อขดลวดผ่านระนาบเป็นกลาง (Neutral plane)

ในมอเตอร์ที่ใช้งานจริง ช่องอากาศระหว่างอาร์มาเจอร์กับขั้วแม่เหล็กจะแคบมากจนทำให้สนามแม่เหล็กมีขนาดสม่ำเสมอ และมีทิศทางตั้งฉากกับขดลวดตลอดเวลา แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าคงที่ตลอดการหมุนโดยไม่ขึ้นกับมุมที่หมุนไป



รูปที่ 5.4 แรงบิดในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นถึงทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ เส้นลวดตัวนำที่อยู่ภายใต้ขั้วเหนือ จะมีทิศทางของกระแสไปทางเดียวกันทางหนึ่งและเส้นลวดตัวนำที่อยู่ภายใต้ขั้วใต้ จะมีทิศทางของกระแสไปทางเดียวกันในอีกทางหนึ่ง เป็นเช่นนี้ตลอดไปไม่ว่าอาร์มาเจอร์จะหมุนด้วยความเร็วเท่าใด ดังนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์มาเจอร์ จะมีค่าซึ่งหาได้จากสมการ (5.2)

โดย

$$\theta = 90^\circ$$

$$T = \frac{PZ_a \phi_a i_a}{2 \pi a} \quad (5.3)$$

Z_a = จำนวนเส้นลวดตัวนำทั้งหมด

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

i_a = กระแสอาร์มาเจอร์

a = จำนวนทางเดินของกระแสในอาร์มาเจอร์

ϕ_a = ฟลักซ์ภายในขั้วแม่เหล็กขั้วหนึ่ง

$\phi_a = B \times \text{Area under pole}$

$$= B \times \frac{2 \pi r L}{P} \quad (5.4)$$

สมการที่ 5.3 เขียนใหม่ได้ดังนี้

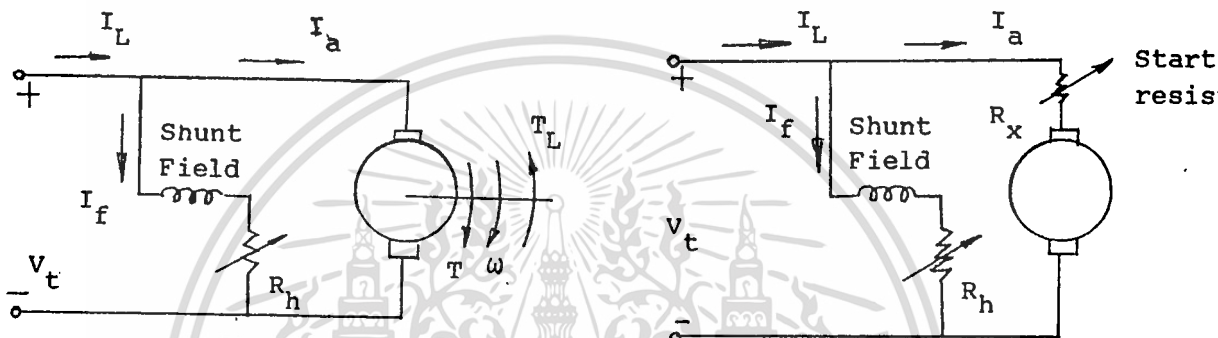
$$T = K_a \phi_a i_a \quad (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $K_a = \frac{PZa}{2\pi a} = \text{ค่าคงตัวของมอเตอร์}$

3.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชั๊นท์ (D.C. Shunt motor)

โครงสร้างภายในของ Shunt motor ประกอบด้วยทุ่นหรืออาร์มาเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็กต่อขนานกันอยู่คงรูป แต่ปกติจะมีตัวต้านทานช่วยสตาร์ท สอดแทรกไว้ในวงจรที่ต่ออนุกรมกับอาร์มาเจอร์ เพื่อช่วยให้มอเตอร์สามารถสตาร์ทได้สำเร็จ



รูปที่ 5.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชั๊นท์

รูปที่ 5.6 วงจรที่ใช้ในการเดินเครื่องมอเตอร์ไฟฟ้า

โดยทอร์ก (torque) ที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นสัดส่วนกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ฉะนั้นขณะเริ่มสตาร์ท จะต้องจัดให้มีปริมาณกระแสไหลผ่านขดลวดแม่เหล็กขนาน (Shunt coil) ให้มากที่สุด ข้อนี้กระทำได้โดยหาทางทำให้ความต้านทานของวงจรขดลวดแม่เหล็กขนานมีค่าต่ำสุด หรือลดค่าตัวต้านทานจากรีโอสแตท ให้มีค่าเป็นศูนย์ในวงจรแม่เหล็กนั่นเอง เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนเราจะเพิ่มความต้านทานเพื่อลดกระแสที่ไหลผ่านขดลวดแม่เหล็กลง สนามแม่เหล็กก็จะลดลงด้วย ผลก็คือ ทอร์ก (torque) จะลดลง แต่ต่อมาไม่นานปริมาณกระแสจะไหลผ่านอาร์มาเจอร์มากขึ้น ทำให้ทอร์กเกิดมากขึ้นตามม่อีก ทอร์กที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะแข็งแรงกว่าภาระหรือโหลด ทำให้หมุนขับโหลดนั้น ๆ ได้

โดยลักษณะสร้างจริง ๆ เราจะไม่จัดให้ความต้านทานในวงจรขดลวดแม่เหล็กขนานน้อยเกินไป เพราะกระแสจะไหลผ่านมาก เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าโดยไม่จำเป็น ลวดที่ใช้พันขดลวดแม่เหล็กขนานจึงนิยมใช้ลวดขนาดเล็ก แต่พันด้วยจำนวนรอบไว้สูง จำนวนกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ขณะไม่มีโหลดเลยกับขณะโหลดเต็มที่ของมอเตอร์ชนิดนี้มีค่าประมาณเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ,

ทั้งความเร็วรอบของอาร์มาเจอร์ยังขึ้นอยู่กับอำนาจสนามแม่เหล็กนั้นด้วย ฉะนั้นความเร็วรอบของมอเตอร์ ณ สภาวะโหลดต่าง ๆ จึงค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากมายเลย ถือได้ว่าหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ทุกสภาวะของโหลด ฉะนั้นแม้จะไม่มีโหลดเลยมอเตอร์ก็จะไม่หมุนเร็วเกินไปได้ ทอที่ได้อาจมาจากมอเตอร์ได้มาจากสองทางประกอบด้วยกันคือ จากขดลวดสนามแม่เหล็กและจากกระแสที่ไหลผ่านหุ้มอาร์มาเจอร์ มอเตอร์แบบนี้ให้ทอรับขณะสตาร์ท (Starting torque) ต่ำกว่ามอเตอร์แบบอนุกรม (Series motor) ขึ้นมอเตอร์ (Shunt motor) หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ ณ ทุกสภาวะโหลด เรียกว่าเป็น Constant - Speed Motor

3.4 คุณสมบัติของมอเตอร์แบบชัณฑ์

3.4.1 คุณสมบัติระหว่างแรงบิด (TORQUE-T) กับกระแสอาร์มาเจอร์โดยกำหนดให้ว่าเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) ที่เกิดขึ้นจากสนามกระตุ้นมีค่าคงที่ตลอดไปแม้ว่าเมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดมาก จะทำให้ ϕ ลดลงไปก็ตาม ดังนั้นในกรณีที่เป็นมอเตอร์แบบชาน จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ I_a คือ

$$T \propto \phi I_a \quad (\phi = \text{คงที่})$$

3.4.2 คุณสมบัติระหว่างความเร็ว (N) กับกระแสอาร์มาเจอร์ ซึ่งพิจารณาให้เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ คงที่ตลอดไป นั่นคือ จะได้ความเร็ว N เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ E_b ($S \propto E_b$) ในทางปฏิบัติมักให้ความเร็วที่ใช้งานกับโหลดคงที่ นั่นคือ E_b ต้องคงที่ด้วย แต่ทั้ง E_b และ ϕ ลดไปเมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้น แต่ E_b ลดลงไปมากกว่า ϕ แต่ในทางปฏิบัติแล้วมักใช้มอเตอร์แบบชัณฑ์ เมื่อต้องการความเร็วคงที่

3.4.3 คุณสมบัติระหว่างความเร็ว N กับแรงบิด T นี้ก็อาศัยจากหลักการที่ได้ในข้อ 1 และข้อ 2

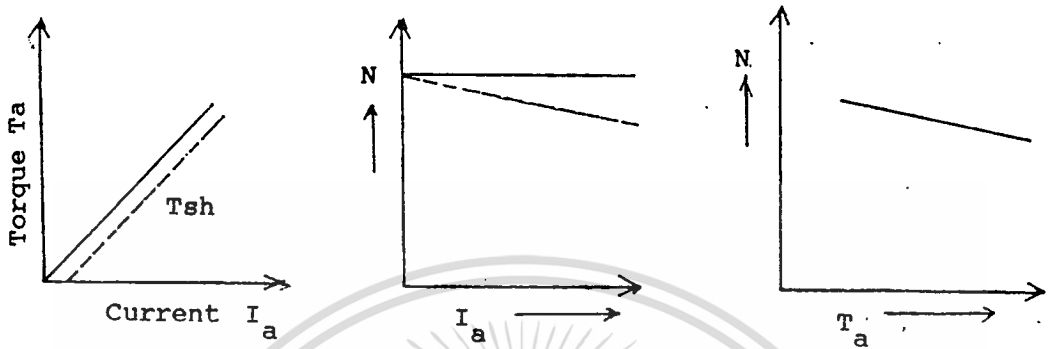


Fig.24.18 Characteristic of D.C. shunt motor

3.5 สมการของมอเตอร์ในสภาวะอยู่ตัว

ถ้ามอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ ω และมีโหลดคงที่สมการของมอเตอร์

จะเป็นดังนี้

$$V_t = R_a I_a + E_a \quad (5.6)$$

$$E_a = K_a \omega \quad (5.7)$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f + R_h} \quad (5.8)$$

$$T = K_a \omega I_a \quad (5.9)$$

$$T = B\omega + T_L \quad (5.10)$$

V_t = แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า

R_a = ความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์

E_a = แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (Counter or back emf)

ω = ความเร็วของมอเตอร์

I_f = กระแสในขดลวดสนาม

R_f = ความต้านขดลวดสนาม

R_h = ความต้านทานขดลวดของรีโอสตัท

$B\omega$ = ค่าคงตัวของความถี่

T_L = แรงบิดของโหลด (Load torque)

จากสมการ 5.6

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} \quad (5.11)$$

ขณะเริ่มต้นเดินเครื่องมอเตอร์ ความเร็วจะเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$E_a = 0$$

$$\text{และ } I_a = \frac{V_t}{R_a} \quad (5.12)$$

โดยทั่วไป R_a มีค่าน้อย จะทำให้ I_a ขณะเริ่มเดินเครื่อง (start) มีขนาดสูงมาก สำหรับมอเตอร์ขนาดเล็กกว่า 1/2 แรงม้า จะใช้กระแสไม่มากนัก อาจจะเดินเครื่องโดยป้อนแรงดันไฟฟ้าเต็มที่เข้ามอเตอร์ได้ แต่มอเตอร์ขนาดใหญ่กระแสเริ่มเดินเครื่องจะสูงมากเป็น 5-10 เท่าของกระแสเมื่อมีโหลดเต็มที่ ช่วงระยะเวลาที่มอเตอร์จะเร่งความเร็วขึ้นไปจนถึงความเร็วปรกติยาวนาน มอเตอร์อาจจะไหม้ถ้าไม่มีอุปกรณ์ตัดคอนป้องกันไว้ หรือถ้ามีอุปกรณ์ป้องกัน อุปกรณ์นั้นก็ตัดวงจรเสียก่อน ดังนั้นในทางปฏิบัติจำเป็นต้องต่อความต้านทานภายนอกแบบอันดับกับอาร์มาเจอร์ เพื่อจำกัดกระแสเริ่มเดินเครื่องให้อยู่ภายในค่าที่ปลอดภัย ดังแสดงในรูปที่ 5.6

กระแสเริ่มเดินเครื่อง

$$I_a (\text{start}) = \frac{V_t}{R_a + R_x} \quad (5.13)$$

$$R_x = \frac{V_t}{I_a (\text{start})} - R_a \quad (5.14)$$

ค่าของ R_x ขึ้นอยู่กับค่าของกระแสเริ่มเดินเครื่องที่ยอมให้มีได้ ความต้านทาน R_x ที่นำมาต่อต้องมีขนาดและความทนทานต่อกระแสไฟฟ้าที่จะผ่านได้ เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนเราจะลดค่า R_x ลง จนในที่สุดตัดออกไปจากวงจร

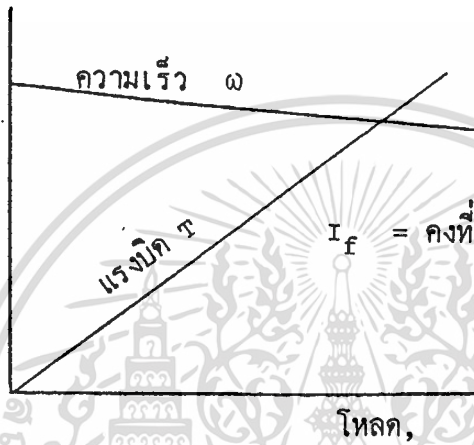
ในการศึกษาหรือใช้งาน มอเตอร์ไฟฟ้ามี่สิ่งที่เราสนใจอยู่สองสิ่ง คือ ความเร็ว แรงบิด มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นมอเตอร์ที่สามารถปรับและควบคุมความเร็วได้อย่างถูกต้องและในช่วงกว้าง ให้แรงบิดที่สูง จึงเหมาะสมสำหรับงานในอุตสาหกรรมที่ต้องการปรับและควบคุมดังกล่าว

ความเร็วของมอเตอร์

$$\omega = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \phi_a} \quad (5.15)$$

แรงบิดมอเตอร์

$$T = K_a \phi_a I_a \quad (5.16)$$



5.7 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและแรงบิดตามกระแส

ขณะที่มอเตอร์มีโหลตมากขึ้น แรงบิดจะเพิ่มขึ้น ความเร็วลดลงโดยดูได้จากสมการ (5.15) ทั้งนี้เนื่องจาก I_a มากขึ้นอย่างไรก็ดี เนื่องจากปฏิกิริยาอาร์มาเจอร์ฟลักซ์ ϕ_d จะลดลงเล็กน้อยจึงเป็นผลให้ความเร็วของมอเตอร์โดยรวมไม่ลดลงมากนัก มอเตอร์แบบนี้จึงเป็นมอเตอร์ชนิดที่มีความเร็วรอบเกือบคงที่ (Essentially constant speed motor) รูปที่ 5.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วและแรงบิดตามโหลต จากสมการที่ 5.15 และ 5.16 เราอาจหาความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ ω ได้ดังนี้

$$\omega = \frac{V_t - \frac{T}{K_a \phi_a} R_a}{K_a \phi_a} \quad (5.17)$$

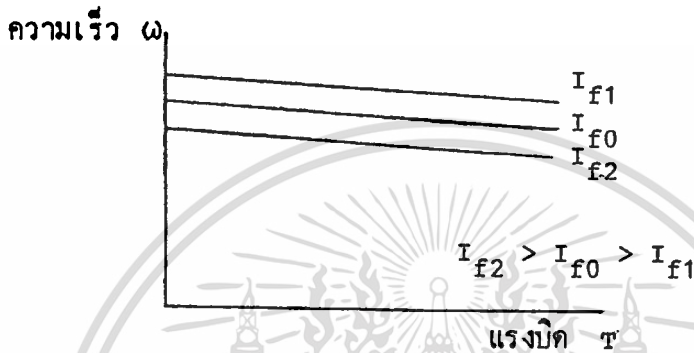
และพลังงานกลที่เปลี่ยนมาจากพลังงานไฟฟ้า คือ

$$P_e = T\omega = I_a E_a = V_t I_a - I_a^2 R_a \quad (5.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานส่วนนี้เป็นพลังงานภายใน (internal energy) หรือพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic energy) ที่แปรสภาพจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดอาจแสดงด้วยกราฟ ได้ดังในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด

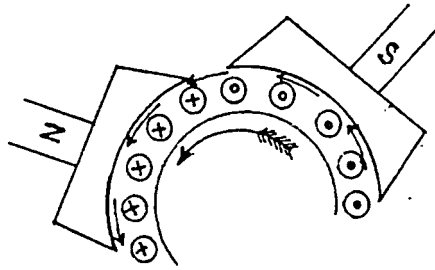
3.6 ทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง

เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงนี้ โดยหลักการขั้นพื้นฐานของโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไม่มีความแตกต่างกันในด้านโครงสร้างเลยนั่นคือ เครื่องกลไฟฟ้าเครื่องเดียวกันนี้สามารถนำไปใช้งานสลับกันได้

มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีหลายขั้วแม่เหล็ก เมื่อใส่ไฟเข้าไปที่สนามกระตุ้นยอมทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นที่ขั้วแม่เหล็ก และเมื่อบ่อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านเข้าไปในตัวนำที่อาร์มาเจอร์ก็จะทำให้เกิดแรงขึ้นในตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก นั่นคือทำให้อาร์มาเจอร์หมุน ในที่นี้ได้กำหนดให้กระแสไหลในตัวนำของอาร์มาเจอร์ที่อยู่ภายใต้ขั้วเหนือมีทิศทางของกระแสพุ่งเข้าไปข้างในคังทางลูกศรที่เป็นกากบาท ดังรูปที่ 2.1-1 ส่วนตัวนำที่อยู่ภายใต้ขั้วใต้ให้นั้ให้กระแสพุ่งออกมาข้างนอก คังหัวลูกศรที่เป็นจุด เมื่อเป็นเช่นนี้จึงทำให้สามารถหาทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำทุก ๆ ตัวที่อยู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็กทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้ได้ โดยใช้กฎมือขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเฟรมมิ่ง



รูป 2.1 - 1 หลักการของมอเตอร์โป่งตัน

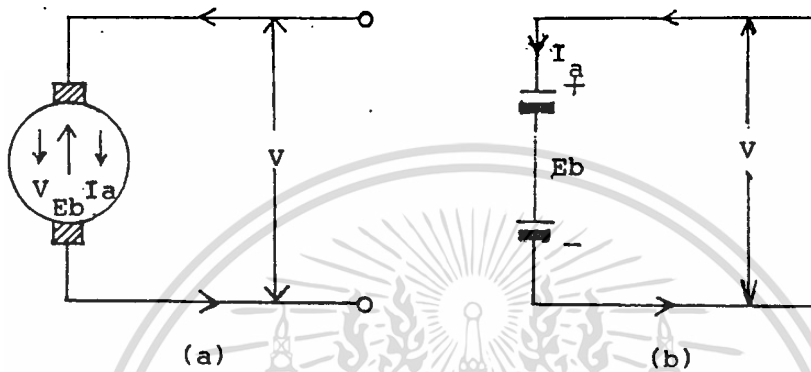
โดยทางมือขวาออกโดยให้หัวแม่มือ นิ้วชี้ และนิ้วกลางตั้งฉากซึ่งกันและกันจากนั้นให้นิ้วชี้ชี้ไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กคือชี้จากขั้วเหนือไปขั้วใต้ ให้นิ้วกลางชี้ไปตามทิศทางการไหลของกระแส ณ.ที่ตัวนำที่ต้องการหาทิศทางเคลื่อนที่นั้น ๆ นั่นคือ นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศทางเคลื่อนที่ของตัวนำนั้น ๆ จะพบว่าแรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำทุกตัว ภายใต้ขั้วแม่เหล็กเดียวกัน จะมีทิศทางไปในทางเดียวกัน และจะอยู่ในแนวเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงของอาร์มาเจอร์นั้น ๆ และพบว่าแรงที่เกิดขึ้นภายใต้ขั้วแม่เหล็กทุก ๆ ขั้วที่สลับกันไปนั้น จะมีทิศทางไปในทางเดียวกันทั้งสิ้น โดยแต่ละแรงจะอยู่ในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวงของอาร์มาเจอร์ นั่นคือภายใต้ขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้วก็จะเกิดแรงลัพธ์ขึ้นแรงหนึ่ง ดังนั้นจึงทำให้มอเตอร์หมุนไปได้จากแรงที่เกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้วถึง เรื่องแรงบิดของมอเตอร์ ข้อสังเกตอีกข้อหนึ่งก็คือ คอมมิวเตเตอร์ เป็นตัวทำหน้าที่เช่นเดียวกับที่ทำหน้าที่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นั่นคือเป็นตัวทำให้กระแสไหลผ่านตัวนำไปในทิศทางเดียวกันตลอดเวลาภายใต้ขั้วแม่เหล็กแต่ละขั้ว ซึ่งช่วยทำให้เกิดแรงบิดไปในทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่อง

ในตัวมอเตอร์นั้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปก็ย่อมจะมีตัวต้านเกิดขึ้น เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (back e.m.f = E_b) ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว จำนวนตัวนำทั้งหมดที่ต่ออนุกรมกัน ความเร็วรอบของมอเตอร์ จำนวนขั้วแม่เหล็กที่อยู่ภายใน และจำนวนแฉก (Path) ที่ขนานกัน ฉะนั้นเมื่อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเกิดขึ้น ย่อมจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปให้กับมอเตอร์นั้น เอาชนะแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับให้ได้ เพื่อต้องการบังคับกระแสให้ไหลผ่านไปในทิศทางที่สวนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ นั่นคือ กำลังไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปนี้สามารถเอาชนะกำลังไฟฟ้าต้านกลับได้ ฉะนั้นจึงทำให้ได้กำลังทางกลออกมาจากมอเตอร์ได้ ดังรูป

2.3-1



รูป 2.3 - 1 วงจรของมอเตอร์ และวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่เขียนแทนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับได้ด้วยแบตเตอรี่ E_b

3.7 ทฤษฎีการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์ (Voltage equation of motor)

จากกฎของสมการแรงเคลื่อน

$$V = E_b + I_a R_a \quad = \text{Voltage equation}$$

E_b = แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับหรือสวนทาง (back e.m.f.) โวลต์

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ (Terminal voltage) โวลต์

จากสมการข้างบนจะเห็นว่า

$$VI_a = I_a E_b + I_a^2 R_a$$

VI_a = กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอาร์มาเจอร์ (วัตต์)

= electrical power input to the armature (watt)

= กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอาร์มาเจอร์ ซึ่งสมมูลย์กับกำลังกลที่เกิดขึ้น P_m ในอาร์มาเจอร์ (วัตต์)

= electrical power equivalent of mechanical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

power developed in the armature (P_m) (watt)

$$I_a^2 R_a = \text{การสูญเสียกำลังงานอันเนื่องมาจากค่า ค.ต.ท. ในอาร์มาเจอร์ (วัตต์)}$$

$$= \text{Cu loss in armature (watt)}$$

ภาวะที่มีกำลังสูงสุด (CONDITION FOR MAXIMUM POWER = P_{max})

กำลังทางกลที่เกิดขึ้นในอาร์มาเจอร์

$$P_m = VI_a - I_a^2 R_a$$

$$P_m \text{ จะเกิดขึ้นได้เมื่อ } \frac{dP_m}{dI_a} = 0$$

$$\therefore \frac{dP_m}{dI_a} = V - 2I_a R_a = 0$$

$$\therefore I_a R_a = V/2$$

$$\text{ขณะที่ } V = E_b + I_a R_a \text{ และ } I_a R_a = V/2$$

$$V = E_b + V/2 \text{ นั่นคือ } E_b = V/2 \text{ ด้วย}$$

ดังนั้น P_{max} เมื่อ $E_b = V/2$ ในภาวะเช่นนี้ไม่เป็นจริงในทางปฏิบัติ

เพราะจะทำให้กระแสมีค่ามากเกินไปกว่ากระแสปกติในมอเตอร์ (ดูจากสมการ $I_a = V/2 R_a$) ยิ่งกว่านั้น input ที่ใส่เข้าไปเพียงครั้งเดียว ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียไปในรูปของความร้อนและยังรวมทั้งการสูญเสียอย่างอื่นที่เกิดขึ้นอีก ผทางกลและทางแม่เหล็ก ซึ่งต้องนำมาพิจารณาด้วย

แรงบิดที่เกิดขึ้นในอาร์มาเจอร์ (ARMATURE TORQUE OF A MOTOR)

T_m เป็นแรงบิดที่เกิดขึ้นจากอาร์มาเจอร์ เมื่อมอเตอร์วิ่งด้วยความเร็ว N

รอบต่อวินาที โดย T_n เป็น นิวตัน - เมตร

$$\therefore \text{งานที่ทำต่อวินาที} = T_m \times 2\pi N \text{ จูลส์}$$

$$\text{หรือ กำลังที่เกิดขึ้น } P_m = T_m \times 2\pi N \text{ วัตต์} \quad (1)$$

กำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเป็นกำลังกลในอาร์มาเจอร์ คือ

$$= E_b I_a \quad (2)$$

$$(1) = (2) \therefore T_m \times 2\pi N = E_b I_a$$

$$\therefore E_b = \phi ZN(P/a) = K_e \phi N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore T_m = \frac{1}{2\pi} K_e \phi I_a = K_t \phi I_a$$

เมื่อ $K_t = \frac{K_e}{2} =$ ค่าคงที่ของแรงบิด (Torque)

$$K_e = \frac{ZP}{a} =$$
 ค่าคงที่ทางไฟฟ้า

$$\therefore T_m = T \propto \phi I_a$$

แรงบิดที่แกน (SHAFT TORQUE = Tsh)

แรงบิดที่เกิดขึ้นในอาร์มาเจอร์นั้นไม่ได้นำไปใช้งานเลยทีเดียว ทั้งนี้เพราะต้องจ่ายให้กับการสูญเสียอันเนื่องมาจาก iron และ friction ในมอเตอร์

\therefore แรงบิดที่เอาไปใช้งานก็คือแรงบิดที่แกน (Tsh)

\therefore กำลังม้าที่ได้จากแกนหมุนของมอเตอร์ก็คือ B.H.P. นั่นเอง ซึ่งเป็นกำลังม้าที่ได้จากการเบรคมอเตอร์

$$B.H.P. (metric) = \frac{T_{sh} \times 2\pi N}{735.5}$$

$$T_{sh} = \frac{B.H.P \times 735.5}{2\pi N}$$

มอเตอร์ที่ออกแบบจะใช้แรงดัน 15V.DC. ที่กระแสเต็มพิกัด 20A.DC. ที่ความเร็วรอบ 1150 r.p.m.

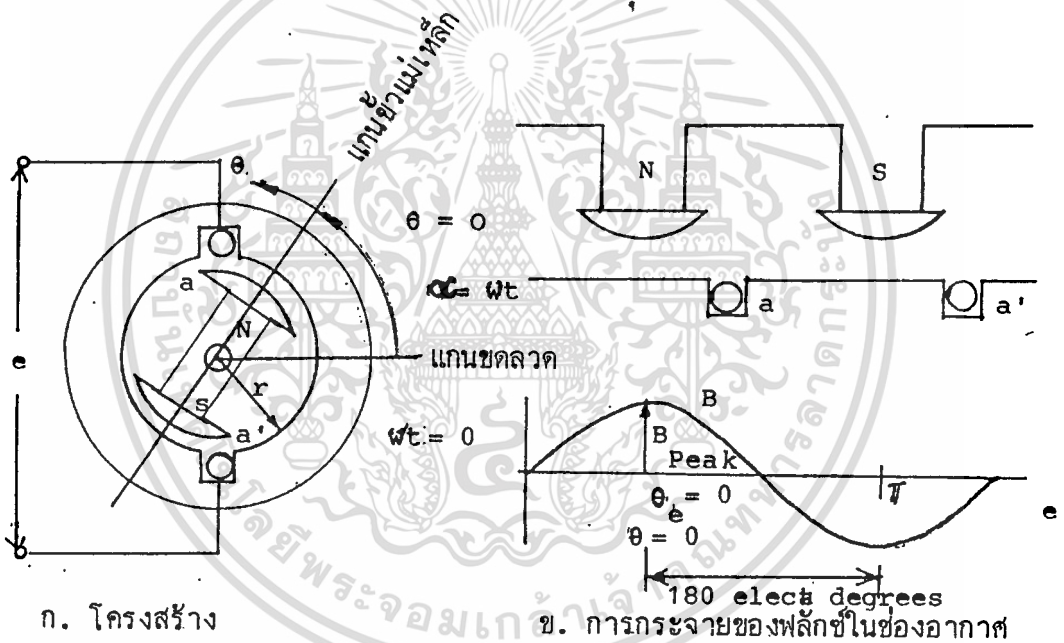
บทที่ 4

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(GENERATOR)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีองค์ประกอบที่สำคัญ 2 องค์ประกอบ คือ สนามแม่เหล็ก และขดลวดตัวนำ เมื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับขดลวดตัวนำ จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในขดลวด การเคลื่อนที่ที่ค้นพบว่าเหมาะสม คือ การเคลื่อนแบบหมุน จะให้ขดลวดหมุนและสนามอยู่นิ่ง หรือจะให้ขดลวดอยู่นิ่ง และสนามเปลี่ยนแปลงรอบขดลวด โดยการหมุนของขั้วแม่เหล็ก ก็ให้ผลเหมือนกัน

4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขั้วแม่เหล็กหมุน



รูปที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขั้วแม่เหล็กหมุน

รูปที่ 4.1 ก. แสดงโครงสร้างอย่างง่าย ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขั้วแม่เหล็กหมุน ตัวหมุน (ROTOR) เป็นขั้วแม่เหล็กถาวร หรือแม่เหล็กไฟฟ้าก็ได้ ส่วนตัวอยู่กับที่ (STATOR) ประกอบด้วยโครงเหล็กรูปทรงกระบอกกลวงมีร่อง (SLOT) สำหรับใส่เส้นลวดทองแดง ด้านทั้งสองของขดลวดจะพันอยู่ตรงกันข้ามกัน รูป 4.1 แสดงการกระจายของฟลักซ์ในช่องอากาศ (SPACE FLUX DISTRIBUTION) B ซึ่งสมมุติว่าเป็นรูปคลื่นไซน์

ดังนั้น
$$B = B_{peak} \cos \theta_e \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $B_{peak} =$ ค่าสูงสุดของ B
 $\theta_e =$ มุมทางไฟฟ้า

ฟลักซ์ในช่องอากาศภายใต้ขั้วแม่เหล็ก 1 ขั้วจะมีค่าดังนี้

$$\phi = \int B dA = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} B_{peak} \cos \theta_e l r d\theta_m \quad (4.2)$$

$l =$ ความยาวของขดลวดตามแกน

$r =$ รัศมี

$\theta_m =$ มุมทางเครื่องกล ในที่นี้เป็นอันเดียวกันกับ θ_e สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 2 ขั้ว

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \phi &= B_{peak} l r \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta_e d\theta_e \\ &= 2 B_{peak} l r \end{aligned} \quad (4.3)$$

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดที่มีขั้วแม่เหล็ก P ขั้ว

$$\theta_m = \frac{2}{p} \theta_e \quad (4.4)$$

$$\phi = \frac{4}{p} B_{peak} l r \quad (4.5)$$

ถ้าตัวหมุนด้วยความเร็ว ω rad/s จะมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ล่อขดลวด

ดังนั้น

$$\lambda = N\psi = N\phi \cos \omega t \quad (4.6)$$

เมื่อ $N =$ จำนวนรอบของขดลวด

จากกฎของฟาราเดย์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด คือ

$$e = - \frac{d\lambda}{dt} = \omega N \phi \sin \omega t - N \cos \omega t \frac{d\phi}{dt} \quad (4.7)$$

เทอมแรกขวามือของสมการ (4.7) แรงดันไฟฟ้าความเร็ว (SPEED VOLTAGE) เพราะเกิดขึ้นจากการหมุน ส่วนเทอมหลังเรียกแรงดันไฟฟ้าแบบหม้อแปลง (TRANSFORMER VOLTAGE)

ในกรณีที่ ϕ คงที่ เช่นกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ จะมีแต่เฉพาะเทอมแรก

นั่นคือ

$$E = \omega N \phi \sin \omega t$$

จัดเทอมต่าง ๆ ใหม่

$$e = \omega N \left(\frac{4}{p} B_{\text{peak}} l r \right) \sin \omega t$$

$$= (B_{\text{peak}} \sin \omega t) (2lN) \left(r \frac{2}{p} \omega \right)$$

$$e = B_{\text{coil}} l_t v \tag{4.8}$$

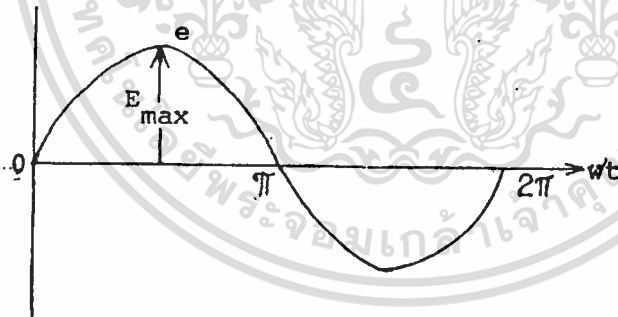
เมื่อ B_{coil} = ความหนาแน่นฟลักซ์ที่ขดลวดคั่นนำ a
 l_t = ความยาวของขดลวดทั้งหมดที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก
 v = ความเร็วโคจร (PERIPHERAL SPEED) ของตัวหมุน

จากสมการ (4.8) ค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้า คือ

$$E_{\text{max}} = \omega N \phi = 2 \pi f N \phi \tag{4.9}$$

เมื่อ f = ความถี่ Hz
 ค่าแรงดันไฟฟ้า อาร์.เอ็ม.เอส.

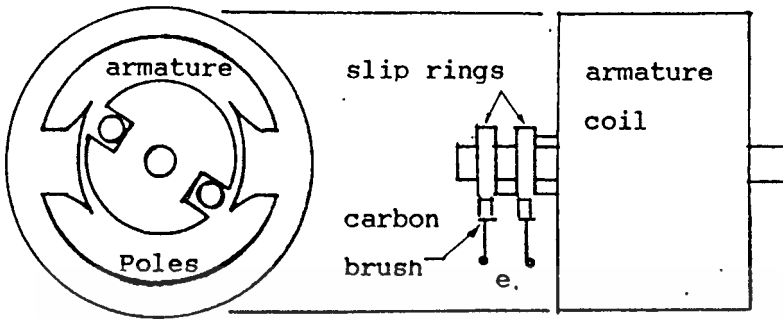
$$E_{\text{r.m.s.}} = \frac{1}{2} E_{\text{max}} = 4.44 f N \phi \tag{4.10}$$



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นรูปไซน์ ดังรูปที่ 4.2 เครื่องกำเนิดชนิดนี้จึงเรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (ALTERNATING CURRENT GENERATOR OR A. C. GENERATOR) และเป็นแบบที่ใช้งานทั่วไป

4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอาร์มาเจอร์หมุน



รูปที่ 4.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับชนิดอาร์มาเจอร์หมุน

ถ้าหมุนอาร์มาเจอร์ในสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.3 และสมมติว่าการกระจายของฟลักซ์ในช่องอากาศรอบ ๆ อาร์มาเจอร์ ทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์เป็นรูปไซน์ ผลที่ได้จะเป็นเช่นเดียวกับขั้วแม่เหล็กหมุน คือ จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้ากำเนิดเป็นรูปไซน์ การนำเอาไฟฟ้าจากขดลวดออกมา จำเป็นต้องผ่านวงแหวนสองวงที่ติดอยู่กับแกนของอาร์มาเจอร์ และสัมผัสกับแปรงถ่านซึ่งยึดอยู่กับที่วงแหวนนี้เรียกว่า วงแหวนสลิป (SLIP RING) แต่ถ้าต้องการจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าชนิดทางเดียว จำเป็นต้องใช้วงแหวนผ่าซีก 1 วง วงแหวนผ่าซีกนี้เรียกว่า คอมมิวเตเตอร์ (COMMUTATOR)

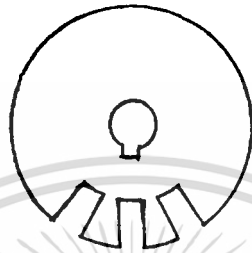
เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับโดยทั่วไป เป็นแบบขั้วแม่เหล็กหมุนเพราะมีข้อดีหลายอย่าง เช่น นำเอาขั้วอาร์มาเจอร์ออกมาโดยตรง โดยไม่ต้องผ่านวงแหวนสลิปเป็นต้น ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จำเป็นต้องใช้แบบอาร์มาเจอร์หมุน จึงจะให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าชนิดกระแสตรงออกมาได้ แม้ว่าในปัจจุบันเราอาจใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แปลงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงได้ ซึ่งเรียกว่า เรกติไฟเออร์ก็ตาม อุปกรณ์เหล่านี้ก็ยังมีราคาแพงโดยเฉพาะที่ต้องแปลงกระแสสูง ๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจึงมีราคาถูกกว่าและยังใช้กันอยู่

ขดลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จะมีจำนวนขดลวดมากกว่า 1 ขด พันไว้ในร่องรอบอาร์มาเจอร์ ทั้งนี้เพื่อให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้ากำเนิดมากขึ้นและ

มีรูปคลื่นเกือบเรียบเป็นเส้นตรง

4.3 ขดลวดอาร์มาเจอร์

อาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กบางซ้อนกัน เจาะเป็นร่องรอบนอก เพื่อวางขดลวดอาร์มาเจอร์



รูปที่ 4.5 แผ่นเหล็กบางเจาะร่องรอบนอก

ขดลวดอาร์มาเจอร์ในปัจจุบันเป็นแบบที่เรียกว่า DRUM-WINDING แบ่งออกเป็น 2 แบบ แบบแรกเรียกว่าแบบแลพ (LAP-WINDING) และอีกแบบเรียกว่าแบบเวฟ (WAVE WINDING) ความแตกต่างของทั้งสองแบบอยู่ที่การนำปลายทั้งสองของขดลวดมาต่อเข้ากับวงจรรายนอก

4.3.1 ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบแลพ

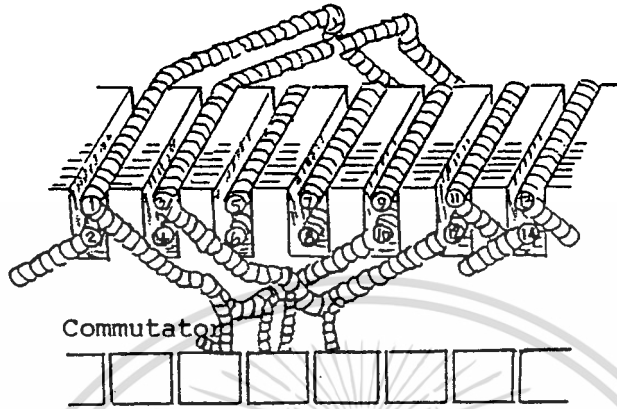
ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบแลพโดยทั่วไปมี 3 แบบย่อยคือ

ก. แบบซิมเพิลส์แลพ (SIMPLEX LAP WINDING)

ข. แบบคูเพิลส์แลพ (DUPLEX LAP WINDING)

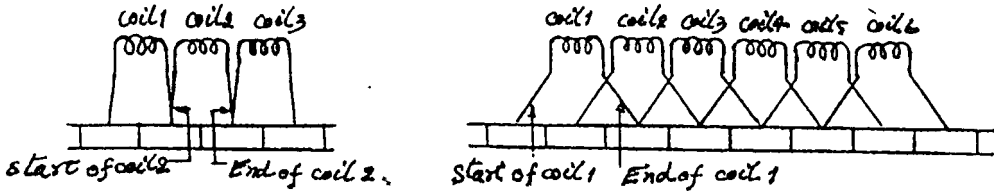
ค. แบบไตรเพิลส์แลพ (TRIPLEX LAP WINDING)

ก. ขดลวดแบบซิมเพิลส์แลพ คือ ขดลวดที่ปลายทั้งสองข้างของขดลวดแต่ละขดต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์บาร์ที่อยู่ติดกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ดังนั้นปลายหลังของขดลวดขดเล็ก จะต่ออยู่กับคอมมิวเตเตอร์บาร์อันเดียวกันกับปลายแรกของขดลวดที่สอง



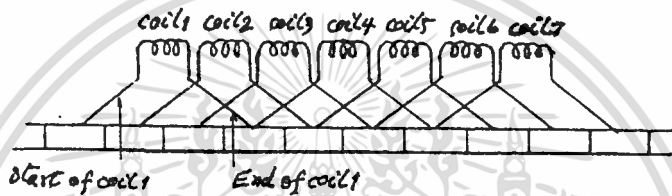
รูปที่ 4.6 ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบขิมเพล็กซ์แลพ

- ข. ขดลวดแบบคูเพล็กซ์แลพ คือ ขดลวดที่ปลายหลังของขดลวดแต่ละขดต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์บาร์ห่างจากปลายแรกไป 2 บาร์ ดังแสดงให้เห็นอย่างง่าย ๆ ในรูปที่ 4.8 ข. ดังนั้นปลายหลังของขดลวดขดที่หนึ่งจะต่ออยู่กับคอมมิวเตเตอร์บาร์ อันเดียวกันกับปลายแรกของขดลวดขดที่สาม
- ค. ขดลวดแบบไตรเพล็กซ์แลพ คือ ขดลวดที่ปลายหลังของขดลวดแต่ละขดต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์บาร์ ห่างจากปลายแรกไป 3 บาร์ ดังแสดงให้เห็นอย่างง่าย ๆ ในรูป 4.8 ค. ดังนั้นปลายหลังของขดลวดขดที่หนึ่ง จะต่ออยู่กับคอมมิวเตเตอร์บาร์อันเดียวกันกับปลายแรกของขดลวดขดที่สี่



ก. ซิมเพล็กซ์แลพ

ข. คูเพล็กซ์แลพ



ค. ไตรเพล็กซ์แลพ

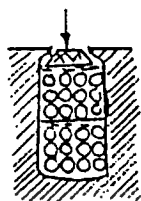
รูปที่ 4.8 ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบแลพ

คำต่าง ๆ ที่ใช้ในการพันขดลวดอาร์มาเจอร์

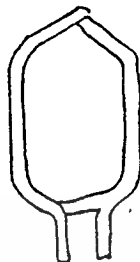
ขดลวด 2 ชั้น (TWO-LAYER WINDING) หมายถึง ขดลวดอาร์มา-
เจอร์ที่ในร่องอาร์มาเจอร์แต่ละร่องมี 2 ชั้น แต่ละชั้นอาจมีหน่วยของขดลวด (ELEMENT
OR COILSIDE) 1 หน่วย หรือมากกว่าก็ได้

ขดลวดขดหนึ่งจะมีจำนวนรอบของขดลวดหลายรอบ (TURNS) แต่ละรอบจะมี
เส้นลวดตัวนำ (CONDUCTOR) 2 เส้น อยู่ข้างละเส้น ดังรูปที่ 4.9

Wooden Wedges



ก. ร่อง



หน่วยของขดลวด
(winding element)

ข. ขดลวด 1 ชุด

รูปที่ 4.9 ขดลวด 2 ชั้น

พิทช์ของขั้วแม่เหล็ก (POLE PITCH) คือระยะที่วัดเป็นองศาระหว่างขั้วแม่เหล็กที่วางอยู่ใกล้กันซึ่งมีค่า 180 องศาไฟฟ้า

พิทช์ของขดลวด (COIL PITCH) หมายถึง ระยะห่างระหว่างหน่วยทั้งสองของขดลวด วัดเป็นองศาไฟฟ้า หรือ จำนวนหน่วยของขดลวดที่ห่างออกไป ถ้าพิทช์ของขดลวด = 180 องศาไฟฟ้า เรียกขดลวดอาร์มาเจอร์นี้ว่าเป็นแบบเต็มพิทช์ (FULL - pitch winding) แต่ถ้าพิทช์ของขดลวด < 180 องศาไฟฟ้า เรียกว่าแบบไม่เต็มพิทช์ (fractional pitch winding) ขดลวดอาร์มาเจอร์ส่วนใหญ่พันแบบไม่เต็มพิทช์

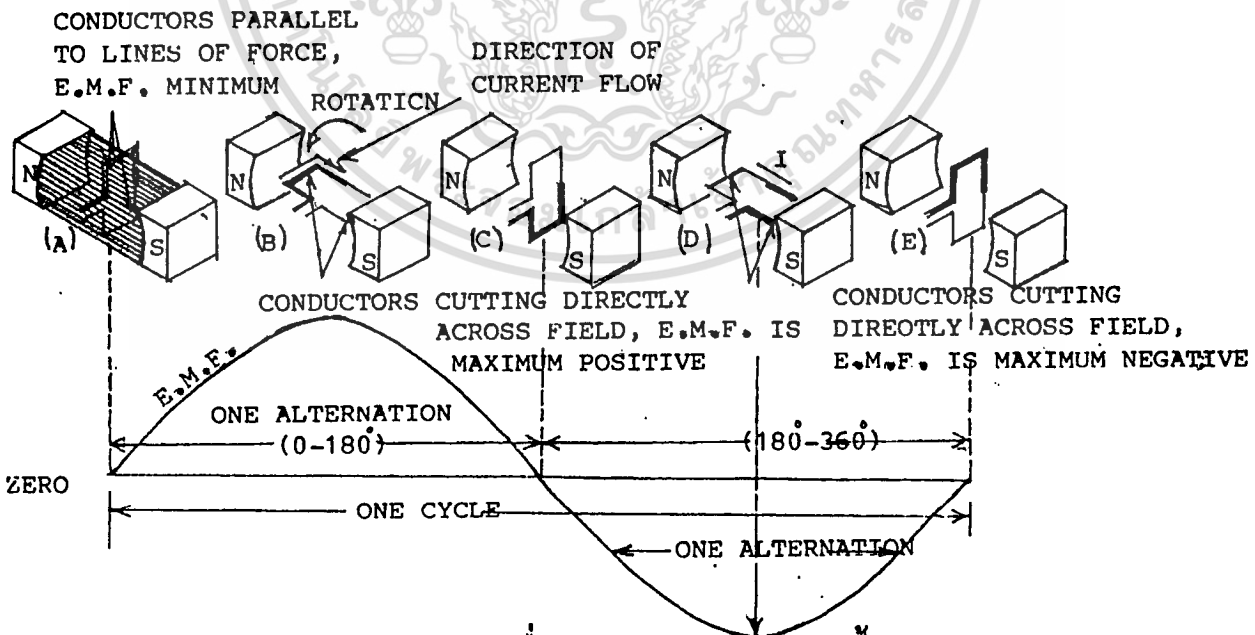
4.3.2 ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบเวฟ

ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบเวฟที่ใช้กันทั่วไปมี 3 แบบย่อย เช่นเดียวกับแบบแลพ คือ แบบซิมเพล็กซ์เวฟ แบบคูเพล็กซ์เวฟ และแบบไตรเพล็กซ์เวฟ ความแตกต่างระหว่างการพันแบบเวฟและการพันแบบแลพ อยู่ที่การต่อปลายของขดลวดเข้ากับคอมมิวเตเตอร์บาร์ แบบเวฟ ปลายทั้งสองจะอยู่ห่างกันมาก รูป 4.13 แสดงการพันแบบเวฟสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 4 ขั้ว ปลายทั้งสองของขดลวดจะต่อกับคอมมิวเตเตอร์บาร์ที่อยู่ตรงข้ามกันห่างกัน = 360 องศาไฟฟ้า

4.4 ทฤษฎีการทำงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กและขดลวดอาร์มาเจอร์ซึ่งมี

ขดลวดตัวนำพันอยู่บนขั้วอาร์มาเจอร์ ถ้าหมุนอาร์มาเจอร์ภายใต้สนามแม่เหล็กซึ่งมีการกระจายของฟลักซ์ในช่องอากาศรอบ ๆ อาร์มาเจอร์อย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 1-14 ซึ่งเป็นขดลวดตัวนำรอบเคียวหมุนอยู่ในสนามแม่เหล็กในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะสังเกตเห็นว่าในตำแหน่ง (A) นั้นขดลวดเส้นที่บิดำ จะเคลื่อนตัวขนานไปกับเส้นแรงแม่เหล็ก และอีกด้านหนึ่งของขดลวดก็เคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกัน แต่ในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งการเคลื่อนที่ของตัวนำในลักษณะเช่นนี้ขดลวดตัวนำจะไม่ตัดสนามแม่เหล็ก จึงไม่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด เมื่อขดลวดเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง (B) ตัวนำจะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กต่อวินาทีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และมันจะตัดเส้นแรงแม่เหล็กได้มากที่สุด เมื่อขดลวดเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่ง (B) ซึ่ง ณ.ตำแหน่งนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นจึงมีค่ามากที่สุด



รูป 1 - 14 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเบื้องต้น

เมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่จากตำแหน่ง (B) ไปสู่ตำแหน่ง (C) ขดลวดตัวนำก็จะตัดเส้นแรงแม่เหล็กต่อวินาทีได้น้อยลงไปเรื่อย ๆ ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นก็ลดลงจากค่าสูงสุดไปเรื่อย ๆ ในที่สุดขดลวดตัวนำจะเคลื่อนที่ขนานกับเส้นแรงแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่ง และจะไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวด (แรงเคลื่อนไฟฟ้าลดลงเป็นศูนย์) รูปไซน์เคอพจากรูปนั้นแสดงค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุก ๆ ขณะที่ขดลวดหมุนไป ซึ่งจะเห็นว่าเคอร์ฟจะมีช่วงจาก 0-180 องศาและจาก 180-360 องศา หรือมีการเปลี่ยนแปลงสองครั้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของรูปไซน์ เคอร์ฟทั้งสองครั้งนี้ใช้แทนหนึ่งรอบการหมุน

ทิศทาง การไหลของกระแสไฟฟ้าในระหว่างการเคลื่อนที่ของตัวนำจากตำแหน่ง (B) ไป (C) เมื่อต่อปลายขดลวดให้ครบวงจร สามารถทำได้โดยใช้กฎมือซ้ายของเครื่องกำเนิด (LEFT HAND RULE GENERATOR) ดังนั้นเมื่อใช้กฎนี้กับส่วนที่เป็นเส้นทึบของขดลวดที่ตำแหน่ง (B) จะเห็นว่าทิศทาง การไหลของกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามที่แสดงดังลูกศร. ในทำนองเดียวกันก็สามารถหาทิศทาง การไหลของกระแสไฟฟ้าในอีกด้านหนึ่งของขดลวดได้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในด้านทั้งสองของขดลวดจะมีทิศทางเสริมกัน เมื่อขดลวดหมุนไปยังตำแหน่ง (D) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในด้านทั้งสองของขดลวดจะกลับทิศทางไปในตอนแรก ทั้งนี้เพราะทิศทาง การเคลื่อนที่ของขดลวดเปลี่ยนไป นั่นคือในลักษณะนี้ด้านเส้นทึบของขดลวดจะเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบน ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสวนทางกับในตอนแรกและแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในทิศทางนี้จนถึงค่าสูงสุด ดังแสดงในรูป จะเห็นรูปไซน์เคอร์ฟ และเมื่อขดลวดหมุนต่อไปก็จะกลับไปสู่ตำแหน่ง (E) ซึ่งเป็นตำแหน่งเริ่มต้น ดังนั้นจึงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงผ่านไปจนครบหนึ่งรอบการหมุนขดลวดอาร์มาเจอร์ที่มีจำนวนรอบของขดลวดเป็นจำนวนมาก ด้วยความเร็วรอบคงที่ และหมุนอย่างต่อเนื่องกันไป เพื่อให้ได้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามต้องการ นั่นคือ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับขึ้น (A.C.VOLTAGE) มีค่าคงที่

ทฤษฎีการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (EQUATION OF INDUCE E.M.F.)

เมื่อ Z = จำนวนตัวนำหรือจำนวนขดลวดที่ต่ออนุกรมกันต่อเฟส
 $= 2T$ เมื่อ T คือจำนวนขดลวดต่อเฟส (1 รอบของขดลวดจะมีขดลวด

ขลวด 2 ด้าน หรือ 2 COIL SIDE)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

f = ความถี่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น Hz

∅ = จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว มีหน่วยเป็น Wb

$$K_d = \text{แฟกเตอร์การกระจายขลวด (DISTRIBUTION FACTOR)}$$

$$= \frac{\sin m \beta / 2}{m \sin \beta / 2}$$

K_c หรือ K_p = แฟกเตอร์ระยะห่างระหว่างขลวด (PITCH OR COIL

$$\text{SPAN FACTOR} = \cos \alpha / 2$$

K_f = FORM FACTOR = 1.11 เมื่อสมมุติให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า
เหนี่ยวนำเป็นรูปคลื่นไซน์เวฟ

N = ความเร็วรอบของโรเตอร์มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (R.P.M) ใน
1 รอบที่โรเตอร์หมุนไป (60/ N วินาที) ตัวนำแต่ละตัวที่หมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กด้วยจำนวน
ฟลักแม่เหล็กทั้งหมดมีค่า ∅P Weber

$$d\phi = \phi P$$

$$dt = 60 / N$$

∴ ค่าเฉลี่ยของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อ 1 ตัวนำ
(AVERAGE e.m.f)

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi P}{60 / N} = \frac{\phi NP}{60} \text{ Volt.}$$

เมื่อเราทราบค่า $f = \frac{PN}{120}$ หรือ $N = \frac{120f}{P}$

แทนค่า N ลงในสมการข้างบนจะได้ว่า

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยต่อตัวนำ

$$= \frac{\phi P}{60} \times \frac{120f}{P} = 2f\phi \text{ Volt.}$$

เมื่อจำนวนตัวนำเท่ากับ Z ตัวนำ ที่ต่ออนุกรมกันต่อเฟสจะได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$\text{เหนี่ยวนำต่อเฟส} = 2f \phi Z = 4f\phi T$$

ค่า R.M.S. ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟส

$$= 1.11 \times 4 f\phi T = 4.44 f\phi T \text{ Volt.}$$

∴ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟสที่แท้จริง

$$= 4.44 K_c K_d f \Phi T$$

$$= 4.44 K_d K_f \Phi f T \quad \text{Volts.}$$

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีจำนวน SLOT 36 SLOT จำนวน POLE 12 POLE และความเร็วใช้งานที่ความถี่ 50 Hz

∴ ความเร็วรอบที่ขั้วเครื่องกำเนิด

$$N = \frac{120f}{P}$$

$$= \frac{120 \times 50}{12} = 500 \text{ รอบต่อนาที}$$

การพันขดลวดจะพันแบบ LAP มีขดลวด 6 GROUP โดยแบ่งเป็น 3 COIL/GROUP

และพันเป็นแบบ FULL PITCH

∴ จะได้ $K_p = 1$

ให้ $m = \text{Slot/pole/phase}$

$$= 36/12/1$$

$$= 3$$

$$\beta = \text{มุมระหว่าง Slot} = \frac{180^\circ}{3} = 60$$

$$\therefore K_d = \frac{\sin m / 2}{m \sin \frac{\beta}{2}}$$

$$= \frac{\sin 3 \times 60/2}{3 \sin 60/2} = 0.667$$

จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$E = 4.44 K_d K_p \Phi f T$$

แต่ละ Slot มีตัวนำ = 120 ตัวนำ

$$\begin{aligned} \therefore \text{จำนวนตัวนำทั้งหมด} &= 36 \times 120 = 4320 \text{ ตัวนำ} \\ \text{จำนวน COIL}/\emptyset \text{ (T)} &= \frac{4320}{2} = 2160 \text{ COIL} \\ \text{และ } \emptyset &= 1.25 \times 10^{-4} \text{ Wb} \\ \therefore E &= 4.44 \times K_d K_p \emptyset f T \\ &= 4.44 \times 0.667 \times 1 \times 1.25 \times 10^{-4} \times 50 \times 2160 \\ &= 40 \text{ Volt.} \end{aligned}$$



บทที่ 5

ทรานฟอร์มเมอร์ (TRANSFORMER)

ทรานฟอร์มเมอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้โยกย้ายพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีก
วงจรหนึ่งโดยอาศัยสนามแม่เหล็กที่คล้องวงจรทั้งสองนั้น ทรานฟอร์มเมอร์อาศัยหลักการของ
วงจรแม่เหล็กในการแปลงพลังงานมันเป็นตัวอย่างอันดีของการเหนี่ยวนำ
โดยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

5.1 AC EXCITATION OF MAGNETIC CIRCUITS

เมื่อ D.C VOLTAGE คล่อม COIL ซึ่งพันรอบ MAGNETIC CORE
กระแสที่ไหลจะถูกจำกัดโดย RESISTANCE ของขดลวด VOLTAGE (RI) ที่คล่อม
ความต้านทานจะเท่ากับ VOLTAGE ที่ SUPPLY และวงจรรูป 2.1 A จะถูกแทนโดย
CIRCUIT MODEL ดังรูป 2.1 B

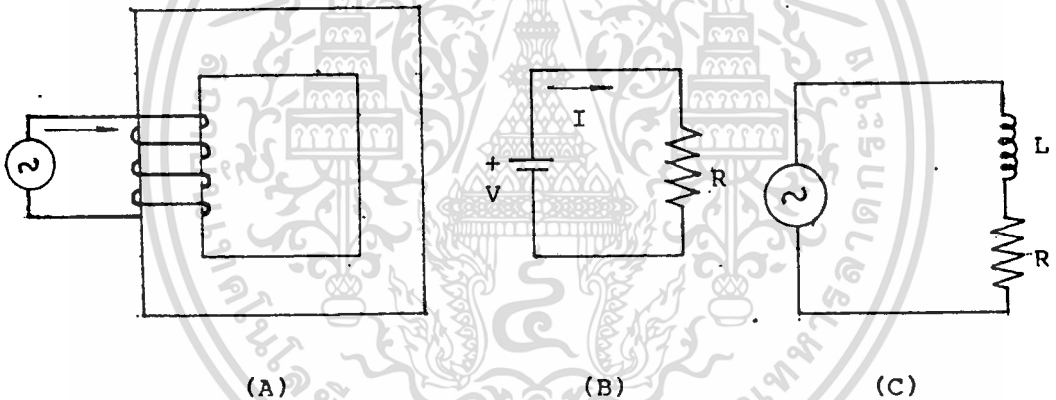


Fig.2.1 A. Circuit model B. DC model C. AC model

MAGNETIC FLUX (ϕ) จะถูกสร้างขึ้นใน CORE โดยขึ้นอยู่กับค่า
ต่าง ๆ ดังนี้ MAGNETIZING FORCE (H) มีหน่วยเป็น AMPERE-TURNS
PER METRE , คุณสมบัติของ CORE ซึ่งถูกกำหนดโดย B-H CURVE
และพื้นที่หน้าตัด (A) ของ CORE

ในทางตรงข้ามเมื่อ AC VOLTAGE คล่อม COIL ที่เหมือนกันกระแสจะ
ถูกจำกัดโดยค่า IMPEDANCE ของขดลวด VOLTAGE DROP เนื่องจาก
RESISTANCE น้อยมากและ VOLTAGE DROP เนื่องจาก INDUCTIVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REACTANCE จะประมาณเท่ากับ APPLIED VOLTAGE MAGNETIC FLUX
 ใน CORE ที่ต้องการเพื่อที่จะนำไปสร้าง VOLTAGE เหนี่ยวนำ ประมาณว่าเท่ากับ
 APPLIED VOLTAGE ใน CIRCUIT MODEL รูป 2.1 C ผลอันนี้จะถูกแทนโดย
 INDUCTANCE (L)

5.2 ทักคาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (INDUCED VOLTAGE)

จากพื้นฐานของการทดลองของฟาราเดย์ สรุปว่า VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำ
 ใน COIL หลาย ๆ COIL ที่คล้อง การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับจำนวน
 รอบ N ของ COIL และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ FLUX (ϕ)

$$V = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ λ เป็นจำนวนของ FLUX LINKAGE มีหน่วยเป็น WEBER-TURNS ตัวอย่างเช่น
 ถ้าใน 10 รอบของ COIL มี 8 รอบที่คล้อง FLUX 1 Wb และ 2 รอบคล้อง FLUX 0.9
 Wb FLUX LINKAGE ทั้งหมดเท่ากับ $(8 \times 1) + (0.9 \times 2)$ เท่ากับ 9.8 Wb - turn
 POLARITY ของ INDUCE VOLTAGE สามารถอธิบายโดย LENZ'S LAW ว่า
 " VOLTAGE " ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะมีทิศทางในทิศที่ตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของ FLUX
 LINKAGE ที่สร้างมันขึ้นมา

ถ้าเตรียม CLOSED PATH ไว้กระแสซึ่งเกิดจาก INDUCED VOLTAGE
 จะมีทิศทางในลักษณะเพิ่ม FLUX

โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่าง FLUX และกระแสเป็นแบบ NON-LINEAR
 อย่างไรก็ตามเราจะคิดว่า ความสัมพันธ์ของมันเป็น LINEAR โดยไม่มี ERROR ถ้า
 FLUX ในวงจรมแม่เหล็กเป็น SINE ดังนั้น

$$\phi = \phi_m \sin \omega t$$

INDUCED VOLTAGE ใน N รอบของ COIL เป็น

$$V = N \frac{d\phi}{dt} = N\omega \phi_m \cos \omega t \quad (2.2)$$

ค่า RMS ของ SINUSOIDAL จะเป็น

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega\phi_m}{\sqrt{2}}$$

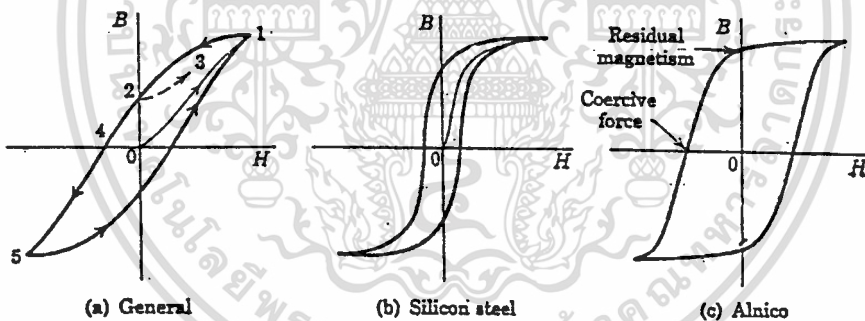
$$= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} Nf\phi_m$$

$$= 4.44 Nf\phi_m \quad (2.3)$$

สำหรับ A.C EXCITATION FLUX (ϕ_m) ขึ้นอยู่กับความถี่และ
 ขนาดของ APPLIED VOLTAGE ถ้าไม่คิด RESISTANCE DROP กระแสที่ไหลจะ
 เป็นตัวสร้าง FLUX ที่ระบุใน EQUATION (5.3)

5.3 HYSTERESIS

ในการเป็นแม่เหล็กของสสารพวก FERROMAGNETIC ผลที่เกิดขึ้น
 ทั้งหมดเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น เมื่อเอาสนามภายนอกออก สสารแม่เหล็กจะไม่สามารถกลับไปอยู่
 ในสถานะเริ่มต้นได้ ถ้าขึ้นเหล็กถูกทำให้อิ่มตัว (SATURATE) จุดที่ 1 ในรูป 22.4A
 และแล้วเอาสนามออก ($H = 0$) เงามโซของแม่เหล็กจะเลื่อนตามเส้นจาก 1 ไป 2
 ORDINATE ที่จุด 2 ถูกเรียกว่า RESIDUAL MAGNETISM



ถ้าค่า H ที่เป็นบวกถูกให้อีกครั้งหนึ่ง เงามโซก็จะเลื่อนตามทางจาก 2
 ไป 3 NEGATIVE MAGNETIZING FORCE (COERCIVE FORCE) ถูกต้อง
 การเพื่อจะทำได้ ความหนาแน่นของ FLUX เป็นศูนย์ที่จุด 4 H ที่เป็นลบจำนวนมาก จะ
 ทำให้เกิดการอิ่มตัว (SATURATE) ในทิศทางตรงกันข้าม (จุด 5) และเมื่อให้
 REVERSING MAGNETIZING FORCE จะทำให้เงามโซแม่เหล็กเลื่อนตามทางจาก
 5 ไป 1 ถ้า MAGNETIZING FORCE เกิดเนื่องมาจากไฟกระแสสลับวงรอบของทาง
 เกลียวจะเรียกว่า HYSTERESIS LOOP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่แผ่นโลหะถูกทำให้ร้อนโดยการหักงอไปมา สารแม่เหล็กถูกทำให้ร้อน เมื่อมันถูกทำให้เป็นแม่เหล็กครบเป็นวงรอบ ในกรณีทั้งสองพลังงานจะปรากฏในรูปของ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พลังงานที่ใส่เข้าไปให้กับตัวอย่างเริ่มต้นที่ยังไม่ได้รับการทำให้เป็นแม่เหล็ก จะเท่ากับพื้นที่ระหว่าง CURVE 0-1 และแกน B ตามรูป 22.5 ผลต่างของพื้นที่ทั้งสอง นี้จะแปลงไปเป็นความร้อนของกระบวนการผันกลับไปได้ตามแนวเส้นของวงรอบที่สมบูรณ์ พื้นที่ HYSTERESIS LOOP จะเท่ากับพลังงานที่สูญเสียไปในหนึ่งรอบสำหรับ SILICON STEEL LOOP จะพอม (22.4 B) และ HYSTERESIS จะน้อย สำหรับแม่เหล็กถาวร COERCIVE FORCE จะกว้างและ HYSTERESIS LOSS จะกว้าง (22.4 C) พื้นที่ของ LOOP จะเพิ่มอย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับความหนาแน่นของ ฟลักซ์ที่มากที่สุด สูตรอย่างง่ายสำหรับหาค่า HYSTERESIS ในหน่วยวัตต์ คือ

$$P_h = K_h f B_m^n$$

ที่ซึ่งค่า K_h เป็นค่าคงที่ N เปลี่ยนแปลงไปตามสสารที่ใช้ทำ CORE
 ประกติ N จะสมมติให้เท่ากับ 1.6
 สารแม่เหล็กบางชนิด HYSTERESIS LOOP เกือบจะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
 (รูป 22.6)

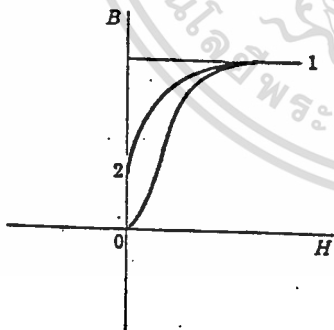


Figure 22.5 Hysteresis loss.

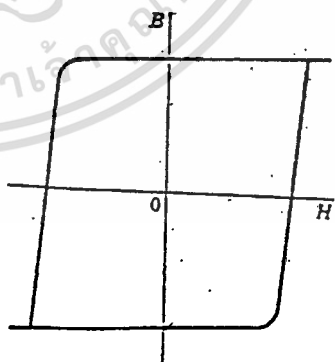


Figure 22.6 Square hysteresis loop.

5.4 EDDY CURRENT

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชุดแรก ๆ เกือบจะสามในสี่ของพลังงานกลที่ใส่เข้าไปจะ เปลี่ยนเป็นความร้อนในวงจรมแม่เหล็ก ส่วนเล็กน้อยของพลังงานที่สูญเสียนี้เนื่องมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HYSTERESIS แต่ส่วนใหญ่เกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักแม่เหล็กเหนี่ยวนำทำให้เกิด VOLTAGE ขึ้นใน CORE ของมันเองใน IRON CORE VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำนี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดกระแสเฉพาะที่เรียกว่า EDDY CURRENT และเป็นผลที่ให้พลังงาน $I^2R = V^2/R$ เปลี่ยนไปเป็นความร้อนดังแสดงในรูป 22.7A

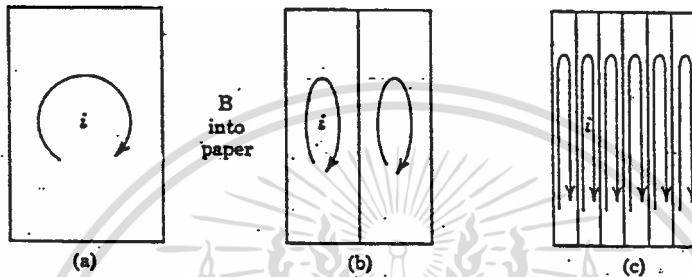


Figure 22.7 Eddy currents and the effect of core lamination.

การเปลี่ยนแปลงของฟลัก (มีทิศทางเข้าไปในกระดาษ) จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสุทธิตายภายใน CORE กำลังที่สูญเสียสามารถถูกทำให้ลดลงโดยการลดค่า V และเพิ่มค่า R ถ้าแทน IRON CORE ด้วยแผ่นบาง ๆ ดังในรูป 22.7 B ผลของ VOLTAGE ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะถูกทำให้ลดน้อยลง และความต้านทานของ EFFECTIVE PATH จะถูกทำให้เพิ่มขึ้น การทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ บางถึง 0.02 นิ้วและแต่ละชั้นจะมีฉนวนกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้นิกเกิล

กำลังที่สูญเสียเนื่องมาจาก EDDY CURRENT สามารถแทนโดย

$$P_c = K_c f^2 B^2 m$$

เพราะว่า VOLTAGE เหนี่ยวนำขึ้นโดยตรงกับค่า $f B m$ และการสูญเสียแปรตามกำลังสองของขนาด VOLTAGE เราคาดว่ากำลังที่สูญเสียจะแปรตามค่า $f^2 B^2 m$ ค่าคงที่ K_c ขึ้นอยู่กับ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุใช้ทำ core และความบางของแผ่น

5.5 โครงสร้าง (CONSTRUCTION)

ทรานส์ฟอร์มเมอร์เป็นตัวแปลงพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการทำงานสามารถ

อธิบายในเทอมของการแสดงพฤติกรรม วงจรแม่เหล็กซึ่งถูกกระตุ้นโดยไฟฟ้ากระแสสลับใน

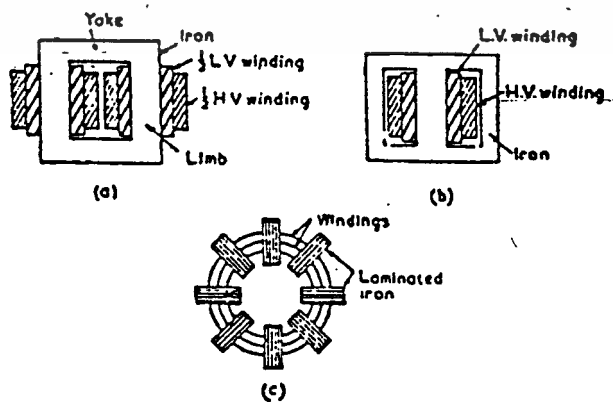
รูปแบบที่ธรรมดาที่สุด ทรานฟอร์เมอร์ประกอบไปด้วย สองขดลวดซึ่งมีจำนวนรอบหลาย ๆ รอบ หันอยู่บน CORE แม่เหล็กอันเดียวกัน แต่มีฉนวนแยกจากกัน การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ โวลเตจที่ให้ที่อินพุทหรือขดลวดปฐมภูมิ (PRIMARY) เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กใน CORE เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์โวลเตจจะถูกเหนี่ยวนำขึ้นทางด้านเอาต์พุท หรือ SECONDARY สิ่งจำเป็นก็คือ จะไม่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุทและเอาต์พุทของทรานฟอร์เมอร์ อาจใช้ฉนวนกันระหว่างวงจรหนึ่งกับวงจรอื่นโดยอนุญาตให้มีการแลกเปลี่ยนของพลังงาน ระหว่างกันได้

โดยการปรับแต่งจำนวนรอบของขดลวดทั้งสอง เราสามารถทำให้โวลเตจ เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ในอุปกรณ์เดียวกัน สามารถใช้เป็นทั้งการเพิ่มขึ้น (STEP-UP) หรือลดลง (STEP-DOWN) ก็ได้ นอกจากการแปลงโวลเตจหรือกระแส ทรานฟอร์เมอร์อาจจะใช้ในการแปลงอิมพีแดนซ์ เพื่อที่จะได้รับกำลังงานมากที่สุดส่งผ่าน IMPEDANCE MATCHING จากหลักการทำงานของทรานฟอร์เมอร์จะเห็นว่ามันเป็นอุปกรณ์ ที่ใช้ในการแปลงพลังงานที่สำคัญควรแก่การศึกษาอย่างระมัดระวัง

หม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 3 ชนิด โดยพิจารณาจากลักษณะของการวางหรือการจัดรูปของแกนเหล็ก แบ่งได้ดังนี้คือ

1. แบบ CORE TYPE เป็นแบบที่มีวงจรแม่เหล็กวงเดียว
2. แบบ SHELL TYPE เป็นแบบที่มีวงจรแม่เหล็ก 2 วงจร
3. แบบ BERRY TYPE เป็นแบบที่มีวงจรแม่เหล็ก กระจายออกไปโดยรอบ

การจัดรูปของแกนเหล็กทั้ง 3 แบบนี้ได้แสดงดังรูปข้างล่าง



รูป 2.1 การแบ่งชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้าตามลักษณะการวางแกนเหล็ก (core)

a) Core Type b) Shell Type c) Berry Type

แบบ CORE TYPE นั้นครึ่งหนึ่งของขดลวดทาง PRIMARY และ SECONDARY พันรอบขาแต่ละข้างของแกนเหล็ก การพันแบบนี้ลดการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก (FLUX LEAKAGE) ที่เกิดจากขดลวดทั้งสองลงไปถึงทำให้ได้เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้อง (LINKAGE FLUX OR MUTUAL FLUX) ขดลวดทั้งสองมากยิ่งขึ้นแต่ถ้าพันขดปฐมภูมิและทุติยภูมิ แยกกันไว้บนขาของแกนเหล็กแต่ละข้างแล้วทำให้เกิดการรั่วไหลของ FLUX มากยิ่งขึ้นซึ่งมีผลต่อการทำงานของหม้อแปลงอย่างจริงจัง ประกตินี้มักใช้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่

แบบ SHELL TYPE นี้มีขดลวดทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิพันไว้ที่แกนกลางของแกนเหล็ก ส่วนที่เหลืออีก 2 ขานี้ก็ทำหน้าที่เป็น LOW RELUCTANCE FLUX PATH

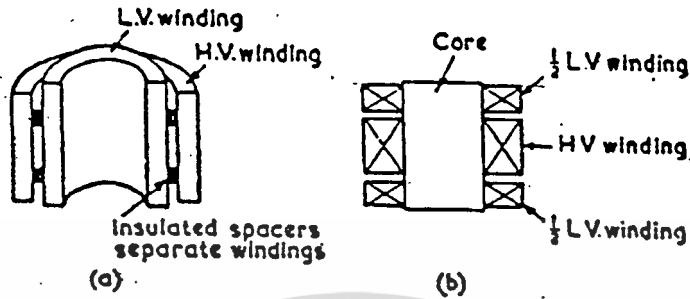
สำหรับ BERRY TYPE นี้มีแกนเหล็กวางอยู่เป็นวงรอบ ๆ ขดลวดแกนเหล็กนี้จำเป็นต้องมีโครงสร้างเป็นแบบ SHELL โดยมีแกนเหล็กกระจายออกไปรอบ ๆ ขดลวดเหล่านั้น

5.6 การพันขดลวด (WINDING)

การพันขดลวดของหม้อแปลงแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

5.6.1 แบบ CONCENTRIC ที่เป็นรูปทรงกระบอก (CONCENTRIC CYLINDER) คือรูปข้างล่าง การพันแบบนี้มีขดลวดแรงต่ำอยู่ภายใน ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาการทำฉนวนหุ้มเส้นลวดที่ใช้ทำขดลวดนั่นเอง ลวดที่ใช้ในการทำ COIL นั้นเป็นลวดทองแดงที่หุ้มฉนวน ฉนวนนี้อาจมีรอยขีดข่วนเนื่องจากการใส่ WINDING ฉะนั้นเมื่อให้ค่านแรงต่ำ (L.V. SIDE) อยู่ข้างในจึงปลอดภัยกว่าและยังระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย

5.6.2 แบบประกอบซ้อนกัน (SAND WICH) แบบนี้ช่วยในการลดเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหล (LEAKAGE FLUX) ให้ลดลงไป ขดลวดแรงคั่นต่ำแบ่งเป็น 2 ส่วน แต่ละครึ่งของขดลวดแรงคั่นต่ำนี้ประกบหัวท้ายของขดลวดแรงสูง



รูป 3.2 แบบของการพันขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า
 a) แบบ Concentric
 b) แบบ Sandwich

5.7 ทฤษฎีและหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า

5.7.1 หลักการของหม้อแปลง (TRANSFORMER'S PRINCIPLE)

หม้อแปลงประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด ที่พันอยู่บนแกนเหล็กดังรูปข้างล่างนี้ชุดที่ต่อไปยังแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่า ชุดปฐมภูมิ (PRIMARY WINDING) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกตลอดมอยู่ $V_p (V_1)$ โวลต์ อีกชุดหนึ่งที่ต่อไปยังภาระไฟฟ้า (LOAD) ที่เรียกว่า ชุดทุติยภูมิ (SECONDARY WINDING) โดยมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกตลอดที่โหลดเป็น $N_p (V_2)$ โวลต์ จำนวนของขดลวดทางปฐมภูมิและทุติยภูมิมีจำนวนรอบเป็น $N_p (N_1)$ รอบและ $N_s (N_2)$ ตามลำดับด้านที่ได้รับกำลังไฟฟ้าอาจจะเป็นด้านแรงต่ำหรือแรงสูงก็ได้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับการใช้งาน

เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p โวลต์ เข้าไปที่ขดปฐมภูมิจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_s ทางด้านทุติยภูมิขึ้นถึงแม้ว่าจะไม่มีโหลดมาต่อก็ตามในกรณีนี้

$$V_s = E_2 = V_2$$

5.7.2 อัตราส่วนของแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า

เมื่อมีโหลดมาต่อทางด้านทุติยภูมิ ทำให้เกิดกระแส I_s ไหลอยู่ทางด้านทุติยภูมิ และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกตลอดโหลดเท่ากับ $V_s (V_s \neq E_2)$ ส่วนทาง

ด้านปฐมภูมินั้นก็มีกระแส I_p และแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_p ออกมาจากแหล่งจ่ายเมื่อทำการ
 สังกะตุต่อไปก็พบว่า อัตราส่วน V_p/V_s นั้นมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของ N_p/N_s
 และมีค่าใกล้เคียงกับส่วนกลับของอัตราส่วน I_p/I_s นั่นก็คือ $V_p I_p$ มีค่าใกล้เคียง
 กับ $V_s I_s$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ I_s เกิดขึ้นทางทุติยภูมินั้นมีผลทำให้ I_p เปลี่ยน
 แปรด้วยนั่นคือ

$$V_p I_p \propto V_s I_s$$

เส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ) นี้คล้อง (LINK) ขดลวดของชุดปฐมภูมิและ
 ทุติยภูมิตั้งนั้นจึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นทั้ง 2 ขด (E_1 & E_2) ซึ่ง
 ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกันจำนวนรอบของขดลวดแต่ละขดจึงได้จาก
 ความสัมพันธ์ ตามกฎของการเหนี่ยวนำคังสมการ (2.1)

$$E = N \frac{d\phi}{dt}$$

เมื่อ E เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขณะใดขณะหนึ่ง
 N เป็นจำนวนรอบของขดลวดที่ได้รับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ เส้นแรงแม่เหล็ก
 ต่อหน่วยเวลา

นั่นคือ $\frac{d\phi}{dt}$ เป็นอัตราเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยเวลา
 $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_p}{N_s} = A =$ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลง
 A เรียกว่า TRANSFORMER RATIO

เมื่อ E_1 และ E_2 คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ
 ตามลำดับ N_p กับ N_s ก็คือจำนวนรอบของขดลวดทางปฐมภูมิและทุติยภูมิทั้ง 2 ข้างนั้น
 แตกต่างจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ ก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ฉะนั้นจึงไม่
 ทำให้เวกเตอร์ของ V_p และ V_s มีมุมแตกต่างไปจากเวกเตอร์ของ E_1 และ E_2 มากนัก
 ดังนั้นถ้าหากจะพิจารณาว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด
 โดยประมาณแล้วก็จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \text{TRANSFORMER RATIO}$$

ถ้าหากว่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากภายในหม้อแปลงนั้นมีจำนวนเล็กน้อยก็ตัดค่า

ที่เสียนั้นทิ้งไปได้ นั่นก็คืออาจจะพิจารณาได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับ (POWER OUTPUT) กับกำลังที่ใส่เข้าไป (POWER INPUT) มีค่าเท่ากันนั่นก็คือ

$$V_p I_p \cos \theta_p = V_s I_s \cos \theta_s$$

ค่า $\cos \theta_s$ นั้นหาได้จากชนิดของโหลดแต่เนื่องจากว่า power factor ของปฐมภูมิและทุติยภูมิ มีความแตกต่างกันเล็กน้อยดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า

หรือ

$$\frac{V_p I_p}{V_s} = \frac{V_s I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}$$

ได้

$$I_p N_p = I_s N_s$$

หม้อแปลงนี้จะทำหน้าที่ต่อเมื่อไฟที่ใส่เข้าไปทางค้ำปฐมภูมินั้นต้องเป็นไฟสลับ หรือไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะ (PULSE)

5.8 ทฤษฎีการทำงาน (THEORY OF OPERATION)

เพื่อความเข้าใจง่ายในทฤษฎีการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า จึงใคร่ที่จะเริ่มต้นจากทฤษฎีที่ได้วางแนวคิดที่เป็นพื้นฐานไว้ก่อน ฉะนั้นจึงจะกล่าวถึงหม้อแปลงไฟฟ้าตามความคิดค้น (IDEAL TRANSFORMER) หม้อแปลงชนิดนี้ไม่คิดการสูญเสียชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงดังนั้นจึงเป็นการวาดภาพพจน์ของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดนี้ขึ้นในความฝันเท่านั้น

5.8.1 หม้อแปลงตามความคิดค้น (IDEAL TRANSFORMER)

ทำให้เกิดมีหลักการทำงาน ดังนี้

เมื่อใส่ไฟ V_p เข้าไปทำให้เกิดกระแส I_p กระแสนี้ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด ϕ เส้นแรงแนี้จะเหนี่ยวนำขดลวดของมันเองและขดลวดของทุติยภูมิให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 และ E_2 ขึ้นพร้อม ๆ กัน นั่นคือ E_1 และ E_2 ที่เกิดขึ้นที่เป็นไปตามกฎของ LENZ และ FARADAY นั่นคือ $V_p = E_1$ และ $E_2 = V_2$ ในกรณีที่เป็น IDEAL TRANSFORMER เท่านั้นส่วนหม้อแปลงจริง ๆ นั้นมีหลักการทำงานดังรูปข้างล่างนี้ คือ

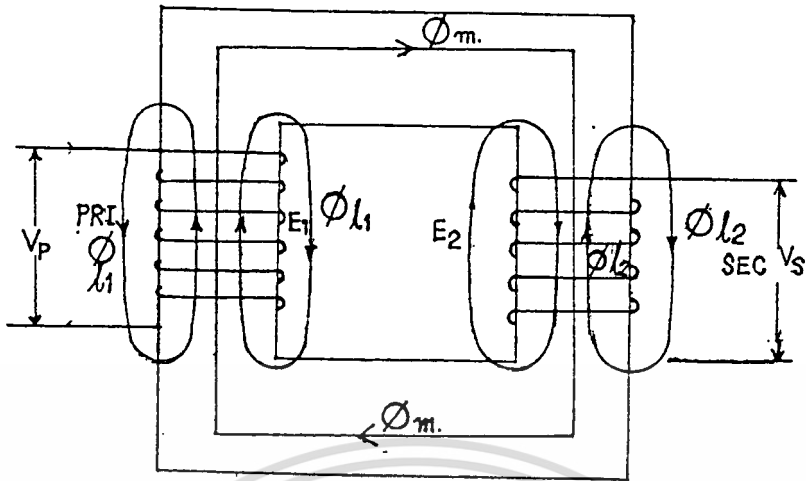


Fig. 5.8 Magnetic circuit of Ideal transformer

เมื่อใส่ไฟสลับ V_p เข้าไปที่ด้านปฐมภูมิทำให้มีกระแส I_p ไหลผ่านขดลวดนี้ ไปยังวงจรรภายนอก ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (ϕ_1) ขึ้นที่ขดลวด PRIMARY ϕ นี้ ประกอบไปด้วย MUTUAL FLUX (ϕ_{1m}) และ LEAKAGE FLUX ϕ_{l1} ขณะที่ ϕ_{1L} เปลี่ยนแปรไปตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ E.M.F. (ELECTROMOTIVE FORCE) ขึ้นภายในขดลวดปฐมภูมิและมีทิศทางตรงข้ามกับ V_p (ตามกฎของ LENZ) ให้ไฟที่จ่ายเข้าไปเป็น SINUSOIDAL WAVEFORM ฉะนั้น ϕ_1 เป็น SIN WAVE ด้วย (ไม่เกิด LOSS ต่าง ๆ และ LAG IMPRESSED VOLTAGE V_p ไป 90°) นั่นคือ

$$\phi_1 = \phi_{1max} \cos \omega t = \phi_{1m} + \phi_{1l}$$

ตามกฎของ LENZ ได้

$$C_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$C_1 = N_1 \omega \phi_{1max} \sin \omega t$$

$$E_{1max} = N_1 \omega \phi_{1max}$$

$$E_1 = N_1 2\pi f_1 \phi_{1max}$$

$$E_1 = 4.44 N_1 f_1 \phi_{1max}$$

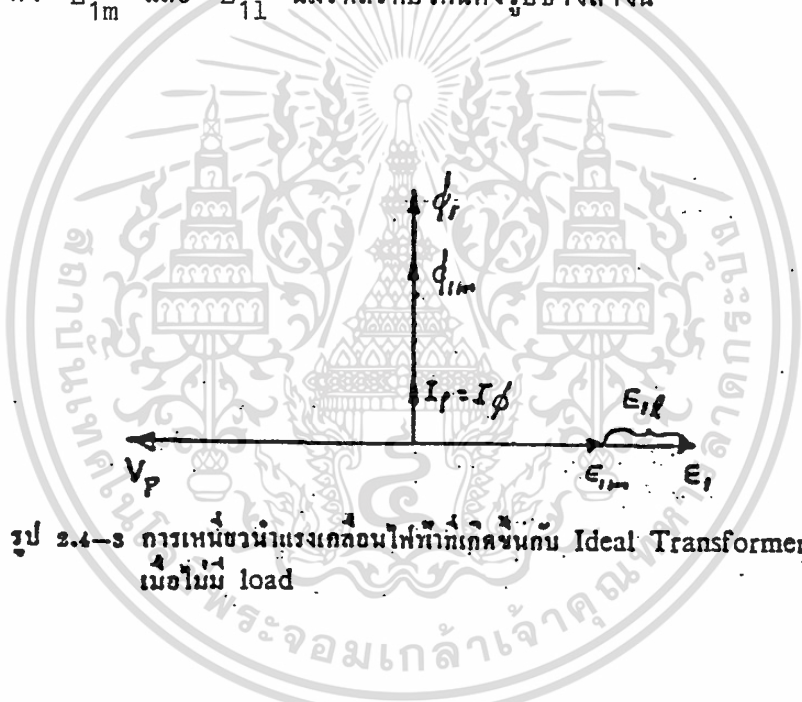
เมื่อ E_1 = EFFECTIVE VALUE หรือ R.M.S.-VALUE ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นใน PRIMARY และมีทิศทางตรงกันข้ามกับ V_p = BACK E.M.F.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- N_1 = จำนวนรอบของขดลวดทางปฐมภูมิ (รอบ)
 F_1 = ความถี่ของไฟสลับที่จ่ายให้กับขดลวดปฐมภูมิ (รอบ/นาที)
 ϕ_{1max} = FLUX ทั้งหมดที่เกิดขึ้นทางปฐมภูมิขณะที่มีค่าสูงสุด (WEBER)
 ϕ_{1max} = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่ขดปฐมภูมิ (PRIMARY MUTUAL FLUX)
 ϕ_m = เส้นแรงแม่เหล็กร่วมที่เกิดขึ้นทั้งทางปฐมภูมิและทุติยภูมิ (MUTUAL FLUX WEBER)

$= \phi_{1m}$
 แรงเคลื่อนไฟฟ้า E_1 นี้ประกอบด้วย E_{1m} และ E_{1l} ซึ่งเกิดจาก ϕ_{1m}

และ ϕ_{1l} ทั้ง E_{1m} และ E_{1l} นี้มีเฟสเดียวกันดังรูปข้างล่างนี้



รูป 2.4-3 การเห็นขานำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับ Ideal Transformer เมื่อไม่มี load

เพราะฉะนั้น $E_{1m} + E_{1l} = V_p$

เมื่อ E_{1m} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจาก MUTUAL FLUX

E_{1l} = การเหนี่ยวนำที่เกิดจาก SELF INDUCTANCE หรือ เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (LEAKAGE FLUX)

สำหรับทางด้านทุติยภูมินั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า E_2 ขึ้นในขณะเดียวกันกับที่ E_1 เกิดขึ้นและมีทิศทางไปทางเดียวกันด้วยแต่ E_2 นี้เกิดขึ้นจาก ϕ_m เท่านั้น ดังนั้นขนาดของ E_2 จึงขึ้นอยู่กับจำนวน N_2 และ ϕ_m ที่มาคล่องขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SECONDARY E_2 ที่เกิดขึ้นตามกฎของ FARADAY

$$E_2 = 4.44 N_2 f \phi_{m \max}$$

เมื่อ $E_2 =$ INDUCE EMF ทาง SECONDARY $= V_s$ (ไม่มีโหลด)

$\phi_{1m \max} =$ MAXIMUM MUTUAL FLUX ที่มา LINK หรือคล้องขด SECONDARY
 $= \phi_{1 \max}$ (สำหรับ IDEAL TRANSFORMER)

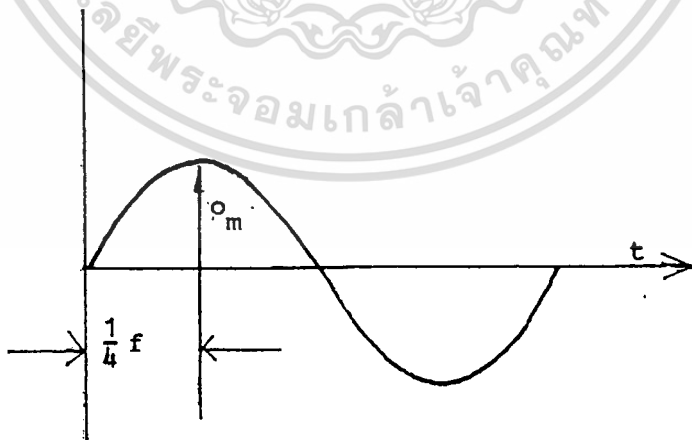
$N_2 =$ จำนวนรอบขดลวดทางขด SECONDARY

ขณะไม่มีโหลดนี้ก็จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสดังนี้

$$I_p = I_o \text{ (NO LOAD CURRENT)} = I\phi \text{ (MAGNETIZING CURRENT)}$$

โดยที่ $I\phi$ นี้ LAG V_p ไป 90 องศา และ INPHASE กับ ϕ_1, ϕ_m สำหรับหม้อแปลงอุดมคติขณะที่ทาง SECONDARY ไม่มี LOAD นั้น $I_p = I_o$ แต่เมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้น I_p ไม่เท่ากับ I_o แล้ว แต่ I_o ก็ยังคงที่อยู่ตลอดเวลาแม้ว่าโหลดทาง SECONDARY จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

ในการหาสมการเหนี่ยวนำ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงนี้สามารถหาได้จากค่าจำกัดความของ FARADAY ได้เช่นเดียวกันโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ FLUX ที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา จากการพิจารณาจากรูปของ SINE WAVE พบว่าการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กจากศูนย์ถึงค่าสูงสุด คือ ϕ_{MAX} ภายในเวลา $\frac{1}{4f}$ วินาที



รูป 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก

เพราะฉะนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงเวลา $\frac{1}{4f}$ สำหรับตัวนำ 1 รอบมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_{\max} / 4f$$

เพราะฉะนั้น E.M.F. / รอบ = $\phi_{\max} / 4f$
 = $4f \phi_{\max}$

ค่าเฉลี่ยของ E.M.F. สำหรับ N รอบ = $4Nf \phi_{\max}$

สำหรับ SINE WAVE นั้นมีค่า FORM FACTOR = 1.11

FORM FACOTR = 1.11 = $\frac{\text{R.M.S. VALUE}}{\text{AVERAGE VALUE}}$

เพราะฉะนั้น R.M.S. VALUE OF E.M.F. สำหรับ N รอบ = $4.44 f \phi_{\max}$

5.9 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

เนื่องจากหม้อแปลงที่ใช้ในระบบเป็นหม้อแปลงที่ใช้ความถี่ใช้งานปกติ (POWER FREQUENCY TRANSFORMER) คือความถี่ 50 Hz - ซึ่งในระบบนั้นใช้หม้อแปลง 2 ชุด คือ 40 V เป็น 230 V และ 230 V เป็น 3000 V แกนเหล็กที่ใช้จึงต้องใช้แกนเหล็กซิลิกอน โดยที่คุณสมบัติของแกนเหล็กซิลิกอนซึ่งมีค่าความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็ก (B) ที่เหมาะสมจะใช้ค่า B ประมาณ 1.2 เทสลา

พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (Afe)

$$\phi = Afe BC \quad (BC = \text{ค่าความเหนี่ยวนำ})$$

$$\therefore Afe = \frac{\phi}{BC}$$

จาก $P = E_1 I_1$

$$E_1 = 4.44 \phi f N_1$$

$$\therefore P = 4.44 \phi f N_1 I_1$$

$\frac{\phi}{\phi}$ คูณตลอด $\therefore P = 4.44 \phi^2 f \frac{N_1 I_1}{\phi}$

$$\phi^2 = \frac{1}{4.44} \times \frac{\phi}{N_1 I_1} \times \frac{P_1}{f}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{1}{4.44}} \times \sqrt{\frac{\phi}{N_1 I_1}} \times \sqrt{\frac{P_1}{f}}$$

$$\therefore Afe = \left[\frac{1}{BC} \times \left(\sqrt{\frac{1}{4.44}} \times \sqrt{\frac{\phi}{N_1 I_1}} \right) \right] \times \sqrt{\frac{P_1}{f}}$$

$$C = \left[\frac{1}{BC} \times \sqrt{\frac{1}{4.44}} \times \sqrt{\frac{\phi}{N_1 I_1}} \right]$$

$$\therefore Afe = C \times \sqrt{\frac{P_1}{f}} \quad ***$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Factor C

$$\text{จาก } \phi \approx A_{fe} \cdot BC$$

$$I_1 = A_1 S \quad (S = \text{ความหนาแน่นของกระแส})$$

$$\begin{aligned} \therefore C &= \frac{1}{BC} \sqrt{\frac{1}{4.74}} \sqrt{\frac{A_{fe} \cdot BC}{N_1 A_1 S}} \\ &= \frac{1}{BC} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \sqrt{\frac{BC}{S}} \sqrt{\frac{A_{fe}}{N_1 A_1}} \end{aligned}$$

$$N_1 A_1 = AC_{01} \quad [AC_{01} = \text{พื้นที่สำหรับพันขดลวด}]$$

$$\therefore C = \frac{1}{BC} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \sqrt{\frac{BC}{S}} \sqrt{\frac{A_{fe}}{AC_{01}}}$$

$$\frac{A_{fe}}{AC_{01}} \text{ สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นค่า } C \text{ จึงขึ้นอยู่กับ } BC, S, P$$

แล้วทำการชดเชยค่า C โดยใช้ค่า C ที่เหมาะสมถ้าหากแกนเหล็กไม่ค้อยก็ให้เลือกค่า C ที่สูงขึ้น แต่ถ้าแกนเหล็กดีก็ให้เลือกค่าน้อยลงได้

ค่าของ C มีค่าตั้งแต่ 7.25 - 7.75

$$\therefore A_{fe} = [7.25 \text{ ถึง } 7.75] \times \sqrt{\frac{P}{f}}$$

เลือกขนาดแกนเหล็ก (f)

$$f = \sqrt{A_{fe}}$$

$$f_{\min} = 0.82 \sqrt{A_{fe}}$$

การเลือกขนาดของแกนเหล็กให้เลือกค่า f ค่าสูงลงไปหาค่า f min เพื่อจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่า f

ความหนาของแกนเหล็ก (S)

$$S = \frac{A_{fe}}{f K_{fe}}$$

$$K_{fe} < 1$$

K_{fe} = ความหนาของฉนวน

$$S = \frac{\text{ความหนาของฉนวน}}{\text{ความหนาแน่นของเหล็ก} + \text{ฉนวน}}$$

ตาราง Kfe

ความหนาของฉนวน (m.m.)	Kfe สำหรับฉนวน		
	กระดาษ	เลคเกอร์	พอสเฟส
0.5	0.92	0.95	0.97
0.35	0.9	0.93	0.95

และ S ยังขึ้นอยู่กับฉนวนหุ้มสายว่าอยู่ใน Class ใดด้วยและทนอุณหภูมิได้เท่าใด

Class ต่าง ๆ ของฉนวนหุ้มสาย

ฉนวน	อุณหภูมิ	Class
PUF	105 °C	A
UEW	120 °C	E
PEW	130 °C	B
EIW	180 °C	H

จำนวนแผ่นเหล็ก

Z

$$= \frac{A_{fe}}{f \cdot \Delta}$$

= ความหนาของแผ่นเหล็ก 1 แผ่น

จำนวนรอบขดลวด

$$E = 4.4 fBC A_{fe}$$

$$N_1/V = \frac{10^4}{4.44 f \times BC \times A_{fe}}$$

$$\therefore N_1 = \frac{N_2}{V_1} \times U_1$$

ในการหา N_2/V ของ N_2 นั้นจะต้องคำนึงถึง Loss factor (fv) ด้วย

$$\therefore N_2' = \frac{N_1}{V} U_2 fv$$

เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำ [dCU]

$$S = I_{ACU} = \frac{I}{\pi d^2} = \frac{4I}{\pi d^2}$$

$$d_{CU} = \sqrt{\frac{4I}{\pi S}} = 1.13 \sqrt{\frac{I}{S}} \quad ***$$

หม้อแปลงขนาด 40/240 V 250 V.A. ความถี่ 50 Hz

กระแสทางด้านปฐมภูมิ $I_1 = \frac{250 \text{ V.A.}}{40 \text{ V}} = 6.25 \text{ A}$

กระแสทางด้านทุติยภูมิ $I_2 = \frac{250 \text{ V.A.}}{230 \text{ V}} = 1.09 \text{ A}$

ขนาดของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก = 16.77 ตร.ซ.ม.

จำนวนรอบของขดลวด

จาก $E = 4.44 \cdot f \cdot BC \cdot A_{fe}$

$$= 4.44 \times 50 \times 1.2 \times 16.77$$

$$N_1/V = \frac{10^4}{4.44 \times 50 \times 1.2 \times 16.77} = 2.23 \text{ V.}$$

$\therefore N_1 = 2.23 \times 40 = 90 \text{ รอบ}$

เปิดตาราง fv ที่ 500 V.A. = 1.04

$\therefore N_2 = 2.23 \times 240 \times 1.04 = 550 \text{ รอบ}$

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำ

ด้าน Primary = 2.13 ม.ม. หรือ 3.296 ตาราง ม.ม.

\therefore ใช้ลวด # 14 S.W.G.

ด้าน Secondary = 0.86 ม.ม. หรือ 0.527 ตาราง ม.ม.

ใช้ลวด # 21 S.W.G.

หม้อแปลงขนาด 230/3000 V , 3 kVA , 50 Hz

กระแสด้านปฐมภูมิ $I_1 = \frac{3000 \text{ VA}}{230 \text{ V}} = 13.04 \text{ A}$ กระแสด้านทุติยภูมิ $I_2 = \frac{3000 \text{ V.A.}}{3000 \text{ V}} = 1 \text{ A}$

ขนาดของพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก = 45 ตร.ซ.ม.

จำนวนรอบของขดลวด

จาก $E = 4.44 \cdot f \cdot BC \cdot A_{fe}$

$$= 4.44 \times 50 \times 1.2 \times 45$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_1/V = 10^4 = 1,112 \text{ V.}$$
$$4.44 \times 50 \times 1 \times 45 \times 0.9$$

$$\therefore N = 1.11 \times 230 = 255.81 \text{ รอบ}$$

$$\text{ใช้ } N_1 = 280 \text{ รอบ}$$

$$N_2 = 1.112 \times 3000 \times 1.09 = 3636.24 \text{ รอบ}$$

$$\text{ใช้ } N_2 = 3700 \text{ รอบ}$$

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำ

$$\text{ด้าน Primary} = 1.18 \text{ ต.ร.ม.ม.}$$

$$\text{ใช้ลวด \# 18 S.W.G.}$$

$$\text{ด้าน Secondary} = 0.167 \text{ ต.ร.ม.ม.}$$

$$\text{ใช้ลวด \# 26 S.W.G.}$$

ฉนวนที่กั้นระหว่างขดลวด

- ระหว่างชั้นของขดลวด
- ระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิ
- หุ้มภายนอก

1. ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด จะต้องรองฉนวนทุก ๆ จำนวนรอบที่มีแรงดันตกตลอด 25 V. (สำหรับฉนวนบาง) และทุก ๆ 60 V. (สำหรับฉนวนหนาพิเศษ)
2. ฉนวนกั้นระหว่างขดปฐมภูมิกับขดทุติยภูมิจะต้องทนแรงดันทดสอบได้
- 3 เท่าของแรงดันขดลวดที่ใช้
3. ฉนวนภายนอกใช้เท่ากับข้อ 2

บทที่ 6

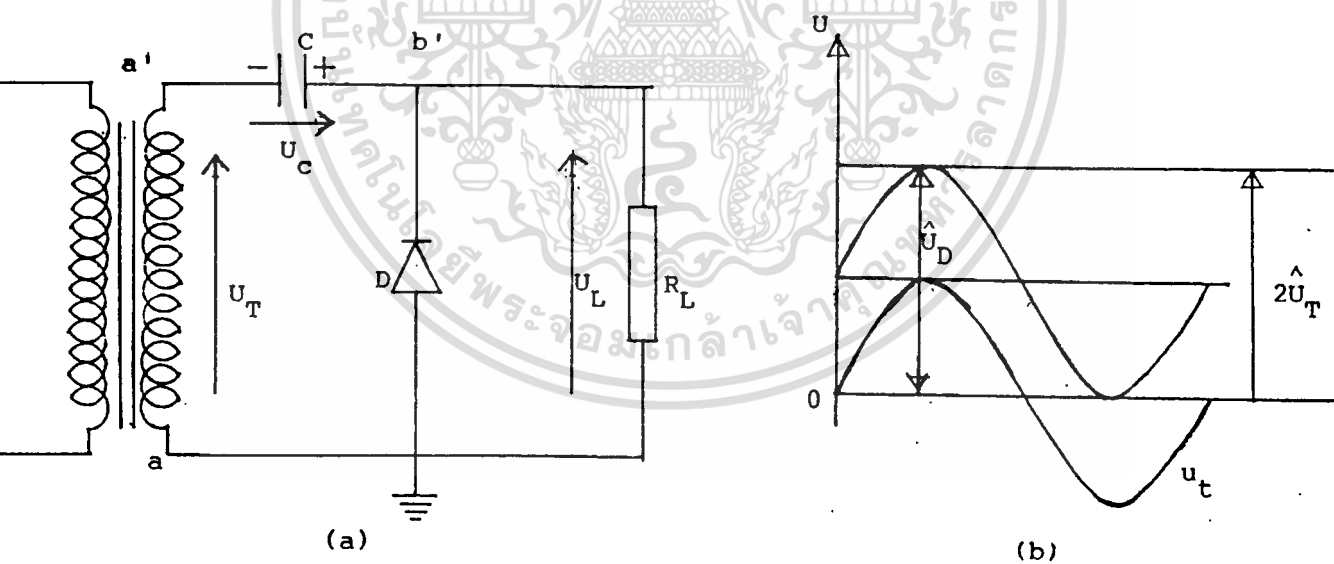
วงจรพหุคูณแรงดัน

(VOLTAGE MULTIPLIER CIRCUIT)

วงจรชั้นบันไดสร้างแรงดันกระแสตรง (CASCADE CIRCUIT FOR D.C. VOLTAGE) การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงสูงมาก ๆ ทำได้โดยอาศัยวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันสองเท่า จากรูป 1-26 a มาต่อซ้อนกันเข้าเป็นชั้นบันไดตามหลักการของวงจร CREINACH หรือ COCKCROFT WALTON

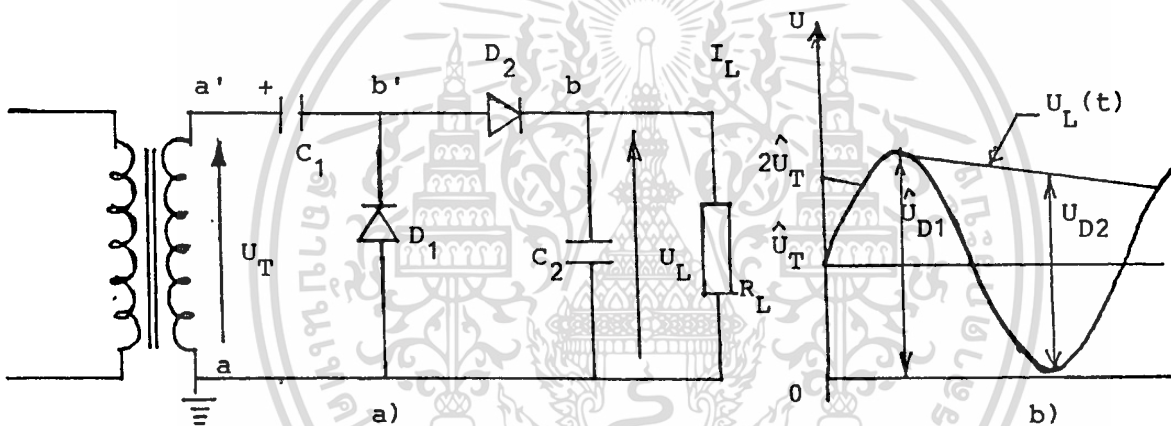
6.1 วงจรแรงดันสองเท่า (VOLTAGE DOUBLER CIRCUIT)

ตามวงจรของ VILLARD ดังแสดงในรูป 1-25 a ซึ่งประกอบด้วย ไดโอดและตัวเก็บประจุอย่างละตัวจะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันขึ้นเป็น 2 เท่าของค่ายอดแรงดันด้านจ่ายออกของหม้อแปลง ดังในรูป 1-25 b



รูป 1 - 25 วงจรสร้างแรงดันสองเท่า

จากรูป 1-25a เมื่อจุด a เป็นลบ (ครึ่งไซเกิ้ลลบ) ตัวเก็บประจุ C จะอัดประจุจนถึงค่าออกของแรงดันหม้อแปลงคือ $U_C = U_T$ เมื่อจุด a เป็นศูนย์ และเพิ่มขึ้น (ในครึ่งไซเกิ้ลบวก) จะทำให้แรงดันที่จุด b' ซึ่งเท่ากับผลรวมของแรงดันหม้อแปลงกับแรงดันคร่อม C ถ้าแรงดันหม้อแปลงเพิ่มจนถึงค่าออก U_T แรงดันที่จุด b ก็คือ U_L จะมีค่าสูงสุดเป็น 2 เท่า คือ $2 U_T$ ดังนั้นไดโอดจะต้องทนแรงดันได้อย่างน้อยเท่ากับ $2 U_T$ แรงดันที่ไดโอดจะแปรค่าตั้งแต่ 0 ถึง $2 U_T$ ฉะนั้นถ้าเอาแรงดันนี้ไปผ่านเรกติฟายเออร์และตัวเก็บประจุกรองกระแสดังในรูป 1-26a ก็จะทำให้ได้แรงดันกระแสสูงเป็น 2 เท่าของแรงดันค่าออกของหม้อแปลงด้านจ่ายกำลังออก



รูปที่ 1 - 26 วงจรสร้างแรงดันกระแสตรงแบบแรงดันสองเท่า

ในขณะที่ไม่มีโหลดจะให้แรงดันกระแสตรงคล่อมตัวเก็บประจุ C_2 ซึ่งมีโอกาสขึ้นถึง $2 U_T$ ฉะนั้นไดโอด D_1 และ D_2 จะต้องรับแรงดันสูงถึงสองเท่าเช่นเดียวกัน คือ

$$\hat{U}_{D1} = \hat{U}_{D2} = 2 \hat{U}_T$$

การอัดประจุ C_2 เป็นไปได้ดังนี้ คือ เมื่อตัวเก็บประจุ C_1 จะได้รับการอัดประจุเนื่องจากแรงดันหม้อแปลงผ่านไดโอด D_1 ($Q_1 = UC_1$) แรงดันคล่อมตัวเก็บประจุ C_1 (คือ U_{ba}) รวมเข้ากับแรงดันของหม้อแปลงที่ a

ถ้าเมื่อใด $U_b = U_{ba} + U_a$ มีค่าสูงกว่า U_b เนื่องจากแรงดันของ หม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้นไดโอด D_2 จะนำกระแสและ C_2 จะได้รับการอัดประจุจาก C_1 กระบวนการจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึงภาวะ อยู่ตัว ขณะที่ไม่มีโหลดศักย์ไฟฟ้าที่จุด b คือ แรงดันคล่อม C_2 จะเป็นสองเท่า คือ

$$U_b = 2\hat{U}$$

และที่จุด b จะมีศักย์ไฟฟ้า U_b มีค่าเป็น

$$U_b = \hat{U} (1 + \cos wt)$$

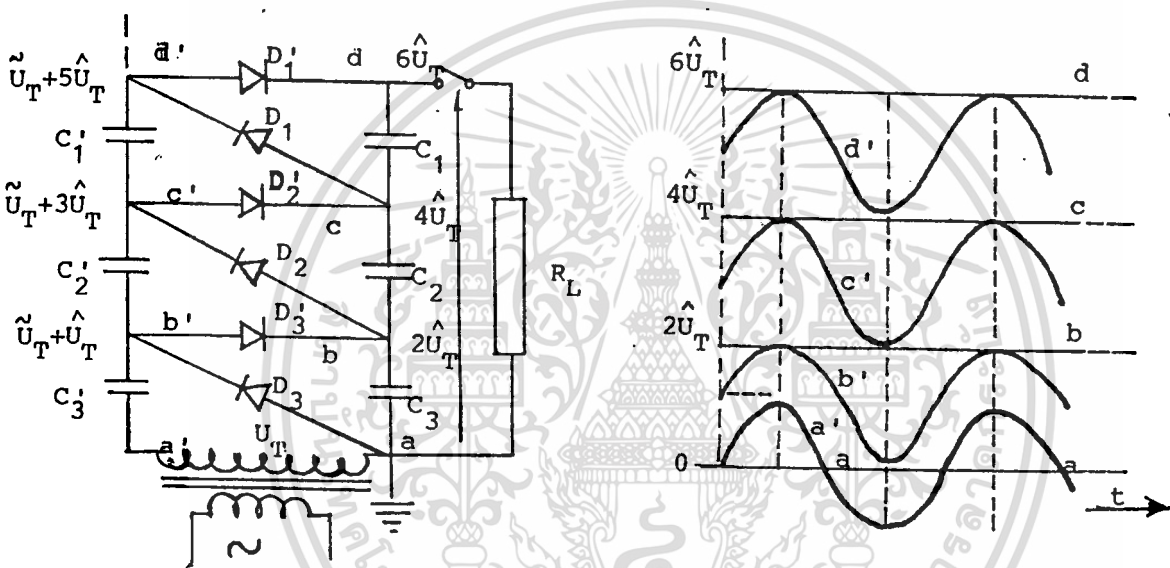
6.1.1 แรงดันวงจรขึ้นบันไดเมื่อไม่มีโหลด

ในรูป 1-27 แสดงถึงวงจรขึ้นบันไดที่ได้จากการเอาวงจรสร้างแรงดันกระแสตรง 2 เท่ามาต่อซ้อนกัน 3 ชั้น คือแต่ละชั้นจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว และไดโอด 2 ตัว โดยที่ตัวเก็บประจุตัวหนึ่งเป็นตัวเก็บพักประจุ และอีกตัวหนึ่งเป็นตัวกรอง ให้ได้แรงดันกระแสตรง ดังเช่นวงจร a a' b b' เป็นวงจรสร้างแรงดัน 2 เท่าหนึ่งชั้น $C_1 C_2 C_3$ และ $C_1 C_2 C_3$ เป็นตัวเก็บประจุพักประจุและตัวกรองกระแสตามลำดับ แต่ละชั้นจะสร้างแรงดันได้สองเท่าของค่ายอดแรงดันที่ได้จากหม้อแปลงตัวจ่ายคือเป็น $2 \hat{U}_T$ ชั้นของไดโอดที่ต่อไว้ในวงจร $D_1 D_2 D_3$ จะนำกระแสในช่วงคลื่นครึ่งบวก และ $D_1 D_2 D_3$ จะนำกระแสในช่วงคลื่นครึ่งลบ ศักย์ไฟฟ้าที่จุด b เมื่อเทียบกับดินจะเปลี่ยนแปลงระหว่างศูนย์กับ $2 \hat{U}_T$ และ C_3 จะได้รับแรงดันอัดประจุเป็น $2 \hat{U}_T$ ผ่าน ไดโอด D_3 จุด b จะมีศักย์ไฟฟ้าระหว่าง $2 \hat{U}_T$ กับศูนย์ ฉะนั้น C_2 จะได้รับแรงดันอัดประจุถึง $2 \hat{U}_T$ คือไฟฟ้าที่จุด C จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $2 \hat{U}_T$ ถึง $4 \hat{U}_T$ และ C_2 จะได้รับแรงดันอัดประจุผ่านไดโอด D_2 เท่ากับ $2 \hat{U}_T$ ซึ่งจะทำให้จุด C มีศักย์ไฟฟ้าสูงถึง $4 \hat{U}_T$ เมื่อเทียบกับดิน วงจรชั้นที่สามตัวเก็บประจุแต่ละตัวก็จะได้รับแรงดันอัดประจุถึง $2 \hat{U}_T$ เช่นกัน นั่นคือจุด d จะมีศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับดินจะเท่ากับ $6 \hat{U}_T$

จะเห็นได้ว่าการที่เราใช้หลาย ๆ ชั้นต่อกันจะช่วยให้สามารถสร้างแรงดันสูง มาก ๆ ได้ โดยที่ตัวเก็บประจุและไดโอด แต่ละตัวจะต้องทนแรงดันเพียงสองเท่าของค่า ยอดแรงดันหม้อแปลงตัวจ่าย ยกเว้นตัวเก็บประจุตัวล่างสุด (ในที่นี้คือ C_3) จะได้รับ แรงดันสูงสุดเพียง \hat{U}_T เท่านั้น แรงดัน ณ. จุดต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีโหลดแสดงอยู่ในเทอม ของเวลาจะไค้กึ่งในรูป 1-27 b

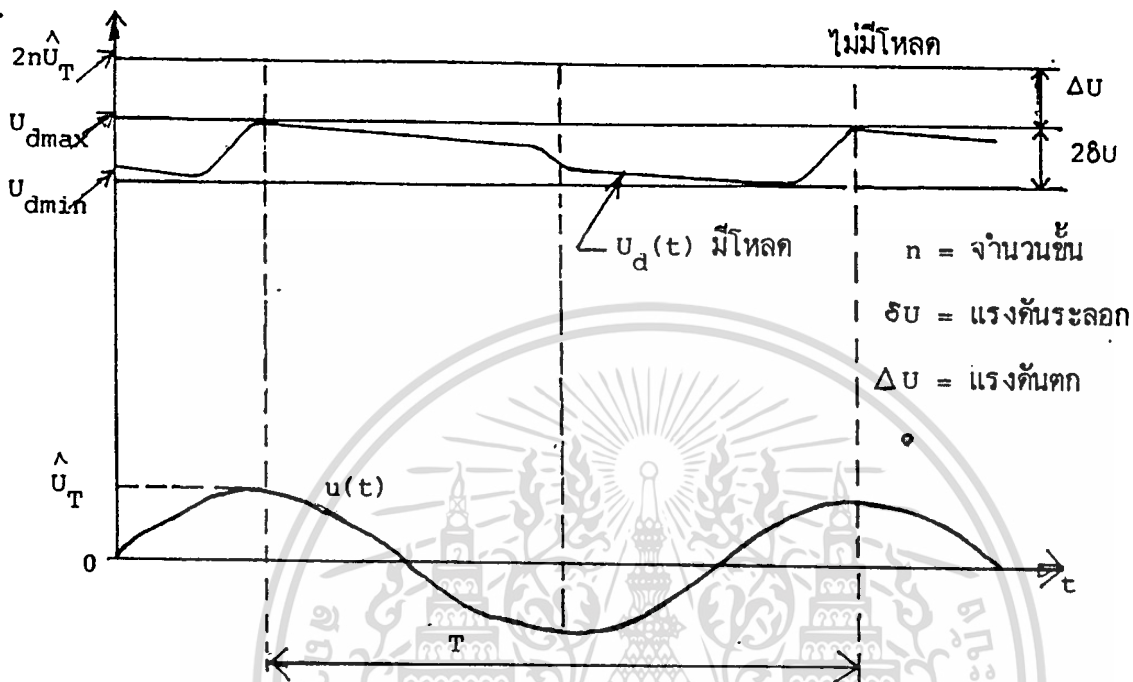
6.1.2 แรงดันวงจรขั้วบันไดเมื่อมีโหลด

วงจรขั้วบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงจะสามารถสร้างได้ประมาณสองเท่าของค่ายอดแรงดันด้านจ่ายออกของหม้อแปลงตัวจ่ายด้วยจำนวนชั้น ถ้าหากไม่มีโหลดหรือไม่มีแรงดันตก แต่เมื่อมีโหลดจะมีแรงดันตกในไดโอดในหม้อแปลงและในตัวเก็บประจุเอง ฉะนั้นในวงจรรูป 1-27 จะให้แรงดันที่จุด d น้อยกว่า $6 \hat{U}_T$



รูปที่ 1 - 27 วงจรขั้วบันไดสร้างแรงดันกระแสตรงตามวงจรของ Creihach

- a) รูปวงจรขั้วบันได
- b) รูปคลื่นแรงดัน ณ จุดต่าง ๆ ขณะไม่มีโหลด



รูป 1 - 28 รูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรชั้บับโคในขณะที่มีโหลด

ในรูป 1-28 แสดงรูปคลื่นแรงดันกระแสตรงที่เปลี่ยนไปตามเวลา $U_d(t)$ ของวงจรชั้บับโคเมื่อมีโหลดและไม่มีโหลด แรงดันที่ได้ที่ด้านปลายแรงสูงจะต่ำกว่าค่าอุดมการณ์เนื่องจากแรงดันตก ΔU และแรงดันระลอก δU

6.2 (1) การคำนวณหาแรงดันระลอก

แรงดันกระแสตรงที่ได้จากการเรคตีฟายจากแรงดันกระแสสลับโดยใช้ไดโอดเรียงกระแสและมีตัวเก็บประจุรองกระแสเพื่อให้ได้คลื่นเรียบ แต่คลื่นที่ได้ยังเป็นระลอก กังที่ได้กล่าวมาแล้วในวงจรพื้นฐาน แรงดันระลอกของวงจรชั้บับโคอาจหาได้เช่นเดียวกับวงจรที่มีไดโอดและตัวเก็บประจุอย่างละตัว (รูป 1-24) ซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

$$U = \frac{I_d}{2fC}$$

- เมื่อ I_d คือ กระแสตรงที่จ่ายให้โหลด
- f คือ ความถี่ของแรงดันกระแสสลับที่จะแปลงเป็นกระแสตรง
- C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุรองกระแส

ในกรณีวงจรชั้นบันได ดังรูป 1-27 ตัวเก็บประจุรองกระแส C_1 C_2 และ C_3 ซึ่งมีความจุไฟฟ้าทุกตัวเท่ากับ C สมมติว่าทุก ๆ ไชเกิลวงจรจ่ายกระแสให้กับ โหลดที่ปลายแรงสูงที่จุด d เท่ากับ I_d นั่นคือ C_1 จะจ่ายประจุออกไปเท่ากับ $Q = \frac{I_d}{f}$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกไป

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

ในขณะที่เดียวกัน C_2 ต้องจ่ายประจุให้กับโหลดเท่ากับ Q และถ่ายทอประจุให้ตัวเก็บประจุ C_1 เท่ากับ Q ฉะนั้น C_2 จะจ่ายประจุออกไปเท่ากับ $2Q = \frac{2I_d}{fC}$ จึงทำให้แรงดันตกไป

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

และ C_3 ก็ต้องถ่ายทอประจุไปให้โหลดเท่ากับ Q และให้กับ C_2 เท่ากับ Q และถ่ายทอให้ C_2 เท่ากับ Q ฉะนั้นแรงดันจะตกไปใน C_3 คือ

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

แรงดันตกในตัวเก็บประจุรองกระแสเหล่านี้ทำให้แรงดันระลอกทั้งหมดรวมเป็น

$$\begin{aligned} \delta U &= \delta U_1 + \delta U_2 + \delta U_3 \\ &= \frac{I_d}{2f} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{2}{C_2} + \frac{3}{C_3} \right) \end{aligned}$$

ถ้าตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ C

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

ถ้าวงจรชั้นบันไดมี n ชั้น จะได้แรงดันระลอกรวม

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

$$\delta U = \frac{I_d}{2fC} n \left(\frac{n+1}{2}\right)$$

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

จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุตัวล่างสุดเป็นตัวถ่ายเทออกหรือจ่ายประจุออกไปมากที่สุด จึงนับว่าเป็นตัวที่มีผลต่อแรงดันระลอกอย่างมีนัยยะนั้นความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุกรองกระแสตัวล่างสุดควรมีค่าสูงกว่าตัวถัดไป

6.2 (2) การคำนวณแรงดันตก ΔU

ในขณะที่วงจรจ่ายโวลตกกระแส I_d (หรือประจุ $Q = \frac{I_d}{f}$)

ทุก ๆ ไซเคิลจะมีการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุ (C_1, C_2, C_3) ไปให้กับตัวเก็บประจุกรองกระแส (C_1, C_2, C_3) จึงทำให้เกิดแรงดันตกในตัวเก็บประจุพัก (C_1, C_2, C_3) ในทำนองเดียวกันการถ่ายเทประจุจากตัวเก็บประจุกรองกระแสไปยังตัวเก็บประจุพัก (C_1, C_2, C_3) ก็ย่อมทำให้เกิดแรงดันตกเช่นกัน สรุปแล้วตัวเก็บประจุทุกตัวจะได้รับแรงดันอค์ประจุน้อยกว่าค่าอุดมการ ยกเว้นตัวเก็บประจุพักตัวล่างสุดที่มีโอกาสได้รับแรงดันอค์ประจุเท่ากับค่าอุดมของแรงดันจ่ายออกของหม้อแปลงตัวจ่าย

จากวงจรชั้นบันไดในรูป 1-27 ถ้าจ่ายโวลตกกระแส I_d ออกไปที่จุด d หรือประจุ Q ทุก ๆ ไซเคิล ในช่วงครึ่งไซเคิลบวกไดโอด D_1, D_2 และ D_3 นำกระแสตัวเก็บประจุ C_3 จะถ่ายเทประจุออกไปทั้งหมด $\frac{3I_d}{f}$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกใน C_3 ดังนั้น C_3 จะได้รับแรงดันอค์ประจุสูงสุดเพียง

แรงดันนี้ที่ C_2 จะได้รับประจุจาก C_3 แต่เมื่อ C_3 ถ่ายเทประจุให้ C_2 เท่ากับ $\frac{2I_d}{f}$ และให้โวลต $\frac{I_d}{f}$ จึงทำให้เกิดแรงดันตกใน C_3 เอง ฉะนั้น C_2 จะได้รับประจุจาก C_3 ด้วยแรงดันอค์ประจุเพียง

$$(UC_2)_{\max} = 2 U_T - \frac{3I_d}{fC} - \frac{3I_d}{fC}$$

ในครึ่งไซเคิลต่อมา C_2 จะต้องถ่ายเทประจุออกไปให้ C_2 จึงทำให้แรงดันตกไปอีก $\frac{2I_d}{fC}$ แรงดันของ C_2 จะเหลือเพียง

$$(UC_2)_{\min} = 2 U_T - \frac{6I_d}{fC} - \frac{2I_d}{fC}$$

ทำนองเดียวกับแรงดันที่ C_2 จะได้รับ

$$(U_{c_2})_{\max} = 2\hat{U}_T - \frac{6I_d}{fC} - \frac{2I_d}{fC}$$

$$\begin{aligned} (U_{c_2})_{\min} &= (U_{c_2})_{\max} - \frac{2I_d}{fC} \\ &= 6\hat{U}_T - \frac{8I_d}{fC} \end{aligned}$$

ฉะนั้นแรงดันตกทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของแรงดันตกในตัวเก็บประจุแต่ละตัว ถ้าวงจรชั้นบนไคมี n ชั้นจะได้

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

เมื่อตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันหมด คือ C แรงดันที่ผลิตออกมาได้ที่ปลายแรงสูงจะกระเพื่อมอยู่ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำ คือ

$$\begin{aligned} (U_d)_{\max} &= 2n\hat{U}_T - U \\ (U_d)_{\min} &= 2n\hat{U}_T - \Delta U - 2U \end{aligned}$$

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

$$\Delta U = \frac{I_d}{f \cdot C} \cdot \frac{2}{3} n^3$$

ฉะนั้นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรชั้นบนไคจึงหาค่าโดยประมาณได้จากสมการ

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

จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการลดแรงดันตกให้น้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเพิ่มแรงดันกระแสตรงได้ โดยการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้า หรือเพิ่มค่าความถี่ของแรงดันกระแสสลับที่จ่ายออกจากหม้อแปลงตัวจ่าย

6.3 จำนวนชั้นบนไคที่เหมาะสม

การสร้างแรงดันกระแสตรงด้วยวงจรชั้นบนไค เราอาจสร้างแรงดันให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่มจำนวนชั้น ในทางปฏิบัติถ้าหากกำหนดค่ากระแสโหลด I_d ให้ จากค่าความจุไฟฟ้าที่มี ความถี่ของตัวจ่ายที่กำหนดจะพบว่าถ้ายิ่งเพิ่มจำนวนชั้นสูงมากเกินไปจะทำให้แรงดันตกมาก แรงดันที่ได้ออกมาที่โหลดกลับลดลง แสดงว่าจำนวนชั้นของวงจรมีขีดจำกัด.

หาค่าที่เหมาะสมสามารถสร้างแรงดันได้สูงสุด ซึ่งหาได้จาก

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

เมื่อ U_d เป็นแรงดันกระแสตรงที่โหลด

n จำนวนชั้นที่เหมาะสม คือ

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

ฉะนั้น

$$(U_d)_{opt}$$

$$= \frac{4}{3} n_{opt} \hat{U}_T$$

$$= \frac{2}{3} (2n_{opt} \hat{U}_T)$$

นั่นคือ แรงดันกระแสตรงที่สร้างได้จะมีค่าเพียง 67% ของค่าทฤษฎีเท่านั้นและยิ่งกว่านั้นตามความเป็นจริงแล้ว ยังมีแรงดันตกเนื่องจากไดโอดอีก แรงดันที่ได้ออกมาจะยิ่งต่ำลงไปอีก

การออกแบบวงจรพหุคูณแรงดัน

จากสูตรของ COCKCROF WALTON VOLTAGE MULTIPLIER CIRCUIT

$$V_o = 2nV - \frac{I_1}{fC} \frac{2}{3} n^3$$

V_o = แรงดันทางด้านเอาต์พุทของระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

V = แรงดันที่จ่ายให้กับวงจรพหุคูณ

C = ค่าความจุไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์

f = ความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

n = จำนวนชั้นของวงจรพหุคูณ

จากการคำนวณใช้

$$V = 3000 \text{ V.}$$

$$C = 1 \text{ } \mu\text{F}$$

$$I_1 = 2 \text{ mA}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$n = 3 \text{ stage}$$

$$V_o = 2 \times 3 \times 3000 - \frac{2 \times 10^{-3} \times 2 \times 3^3}{50 \times 10^{-6} \times 3} \text{ V}$$

$$= 18000 - 720 = 17280 \text{ V}$$

แต่แรงดันที่ออกมาทางด้านเอาต์พุทจะมีเพียง 67% เท่านั้น

.∴ แรงดันเอาต์พุตที่ได้ประมาณ 11.57 K.V.

เพราะว่าจะมีแรงดันตกคล่อมอยู่ภายในระบบหลายภาคด้วยกัน เช่นที่หม้อแปลงไฟฟ้าและใน
ตัวคาปาซิเตอร์และในตัวไดโอด

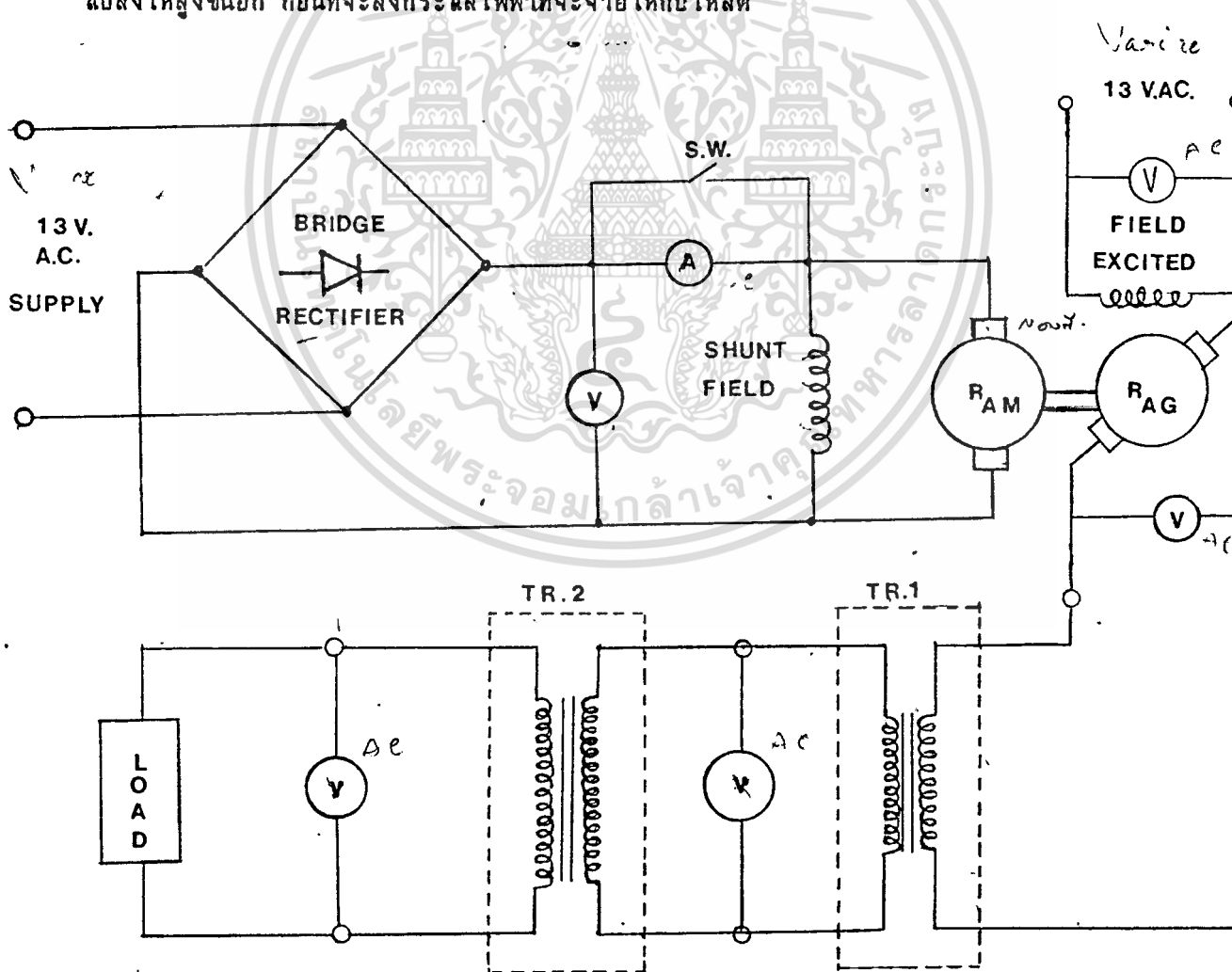


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การทดลองและผลที่ได้จากการทดลอง

ในการทดลองของชุดจำลองระบบไฟฟ้าแรงสูงนี้ เพื่อศึกษาถึงระบบการผลิต และจำหน่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด เมื่อทำการจ่ายโหลดออกไป จะทำให้ระบบสามารถจ่ายโหลดได้มากน้อยเพียงใด โดยให้แรงดันที่เครื่องกำเนิดผลิตออกมานั้นมีค่าเกือบคงที่ เพราะความเร็วรอบและความถี่ของระบบจะต้องมีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ทำการจ่ายโหลด เพราะเครื่องต้นกำเนิดที่ใช้เป็นมอเตอร์ไฟตรงแบบซันด์ซึ่งมีความเร็วคงที่และโหลดที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นโหลด ความต้านทาน จากรูปวงจรการทดลองนี้จะประกอบด้วย เครื่องต้นกำเนิด เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส หม้อแปลงไฟฟ้า 2 ชุด เพื่อทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตมาจากเครื่องกำเนิดแปลงให้สูงขึ้นอีก ก่อนที่จะส่งกระแสไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับโหลด



แปลงไฟแรงขึ้นก่อนจ่ายโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าในโรงเรียนเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผลการทดลองของชุดจำลองระบบไฟฟ้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. วาริแอด (Variac) 0 - 230 V. 10 A 2 ตัว
2. วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ (BRIDGE - RECTIFIER)
3. ดี.ซี. ชันต์มอเตอร์ (D.C. SHUNT MOTOR) 1/4 แรงม้า 12 โวลท์ 1150 รอบ/นาที
4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส (A.C.GENERATOR) 18 V.A. 40 V. 50 Hz
5. หม้อแปลงขนาด 1.2 K.V.A. 24/80 V.
6. หม้อแปลงขนาด 3 K.V.A. 80/1000 V.
7. A.C. VOLTMETER 0 - 300 V. 4 ตัว
8. D.C. VOLTMETER 0 - 30 V.
9. A.C. AMMETER 0 - 500 m.A.
10. D.C. AMMETER 0 - 15 A.

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับแรงดันไฟสลับจากวาริแอด ผ่านชุดบริดจ์เรกติไฟเออร์ ที่ 13 โวลท์ เข้าสู่มอเตอร์
กระแสตรงแบบชันต์ โดยก่อนที่จ่ายไฟสลับเข้ามอเตอร์นั้นจะต้อง สับสวิชชี่ปิดวงจรคล่อมมอม
มิเตอร์ก่อน เพราะในช่วงสตาร์ทมอเตอร์กระแสจะสูง และเริ่มเดินเครื่องที่ความเร็วรอบ
520 rpm. 13
2. จ่ายแรงดันไฟสลับ 14 โวลท์เข้าสู่สนามกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. ควบคุมให้ความเร็วรอบของเครื่องต้นกำลังให้มีความเร็วรอบคงที่เพื่อให้เครื่องกำเนิด มี
ความเร็วประมาณ 520 รอบ/นาที จะได้ความถี่ประมาณ 50 เฮิรท
4. วัดแรงดันเอาท์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่ต่อโหลด
5. สับสวิชชี่ต่อวงจรของหม้อแปลงตัวที่ 1 เข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และวัดแรงดันเอาท์พุท
ของหม้อแปลงตัวที่ 1 และจากเครื่องกำเนิด

6. สับสวิทซ์ต่อวงจรของหม้อแปลงตัวที่ 2 เข้ากับระบบวัดแรงดัน เอาร์ทพุท ของหม้อแปลงตัวที่ 2
7. บันทึกค่าต่าง ๆ ลงในตารางผลการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นค่าขณะไม่จ่ายโหลด
8. ค่อยๆ โหลดความต้านทานเข้ากับระบบซึ่งใช้โหลดทั้งหมด 167.1 กิโลโห์ม แล้วค่อย ๆ ลดความต้านทานลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความต้านทาน 83.7 กิโลโห์ม
9. บันทึกค่าของแรงดันเอาร์ทพุทของระบบ โหลดความต้านทาน กระแสของเครื่องกำเนิดขณะจ่ายโหลด แรงดันที่เครื่องกำเนิด กระแสที่ผ่านโหลด ลงในตารางผลการทดลอง

ผลจากการทดลอง

ขณะระบบ No - Load

แรงดันที่จ่ายให้ PRIMOVER 11.5 V.D.C.
 แรงดันที่ EXCITED FIELD 14 V.A.C.
 แรงดันออกจากเครื่องกำเนิด 43 V.A.C.
 แรงดันของเครื่องกำเนิดเมื่อต่อกับหม้อแปลง TR2 = 24.5 V.
 กระแสของเครื่องกำเนิดเมื่อต่อกับหม้อแปลง TR2 = 360 mA.
 กระแสของ Primover เมื่อเครื่องกำเนิดต่อโหลด TRI = 13 A.
 แรงดันเอาร์ทพุทของ TR1 = 85 V.
 แรงดันเอาร์ทพุทของ TR2 = 1000 V.
 ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดคกที่ ที่ 520 r.p.m.

ขณะระบบ On - Load

VOLTAGE OUTPUT VOLT	Load R2 K Ω	IGEN m.A.	VGEN VOLT	ILOAD m.A.	V.A. OUTPUT V.A.
610	167.1	440	10	3.651	2.227
600	165.1	430	9.5	3.634	2.180
600	163.1	430	9.5	3.678	2.207
600	162.1	430	9.5	3.701	2.221
600	159.6	435	9.5	3.696	2.217
600	157.6	440	9.5	3.807	2.284

VOLTAGE OUTPUT VOLT	Load R2 K Ω	IGEN m.A.	VGEN VOLT	ILOAD m.A.	V.A. OUTPUT V.A.
600	155.1	440	9.5	3.868	2.321
600	154.1	440	9.5	3.894	2.336
600	153.1	435	9.5	3.919	2.351
590	152.1	425	9.3	3.879	2.289
565	150.9	425	9.2	3.744	2.115
560	146.9	425	9	3.812	2.135
560	144.6	425	9	3.865	2.164

สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลองเมื่อควบคุมความเร็วของเครื่องต้นกำลังให้มีความเร็วรอบคงที่ เพื่อให้ความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคงที่ก็จะทำให้ความถี่ของระบบคงที่ตามไปด้วย ซึ่งจะได้ความเร็วรอบ 520 รอบ/นาที ความถี่ 50 เฮิรตซ์ จะได้แรงดันที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ 43 โวลต์ แต่เมื่อต่อเข้ากับหม้อแปลงตัวที่ 1 แรงดันของเครื่องกำเนิดจะลดลงเหลือ 24 โวลต์ และเอาท์พุทของหม้อแปลงตัวที่ 1 จะเหลือ 80 โวลต์ เมื่อต่อเข้ากับหม้อแปลงตัวที่ 2 แรงดันเอาท์พุทของหม้อแปลงจะได้ 1000 โวลต์ จะสังเกตเห็นได้ว่า เครื่องกำเนิดเมื่อต่อเข้ากับหม้อแปลงทั้งสองตัวแล้ว แรงดันจะตกลงมาจาก 43 โวลต์ เหลือเพียง 10 โวลต์ เมื่อต่อโหลดความต้านทาน 167.1 กิโลโอห์ม ซึ่งจะมีแรงดันตกคล่อมที่หม้อแปลงทั้งสองตัว

ในขณะที่โหลดความต้านทานขนาด 167.1 กิโลโอห์มต่อกับระบบแรงดันที่วัดจากเอาท์พุทของระบบจะเหลือเพียง 600 กว่าโวลต์ จะได้กระแสที่ไหลคมีค่าเพียง 3.651 มิลลิแอมป์ แต่เมื่อลดโหลดความต้านทานลงเหลือ 144.6 กิโลโอห์ม หรือประมาณครึ่งหนึ่งของกระแสไหลจะเพิ่มขึ้นเป็น 3.865 มิลลิแอมป์ และดูผลจากตารางจะจ่ายโหลดนั้น แรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่อนข้างจะคงที่คืออยู่ในช่วง 10 - 9 โวลต์ และกระแสอยู่ในช่วง 400 - 460 มิลลิแอมป์

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในโครงการนี้ไม่ใช่ซิงโครไนท์ เจเนอเรเตอร์

ดังนั้น เมื่อจ่ายโหลดจึงทำให้แรงดัน เอาท์พุทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลง และเนื่องจากตัวขับ
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไม่มีความสมดุลย์กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้น ในการหาพิกัดของเครื่อง
กำเนิดไฟฟ้า จึงต้องดูพิกัดของกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งพิกัดกระแสของเครื่องกำเนิด
ไฟฟ้ามีค่า 440 m.A. ดังนั้น ในการจ่ายโหลดจะต้องจ่ายได้ไม่เกินพิกัดกระแสของเครื่องกำเนิด
ไฟฟ้าถ้าหากว่าตัวขับกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความสมดุลย์กันแล้ว เราสามารถหาพิกัดของระบบได้
โดยการจ่ายโหลดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง ความเร็วรอบของตัวขับลดลง และจุดนี้คือพิกัดของระบบ
แต่ในโครงการนี้ ตัวขับและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สมดุลย์กัน ดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น เราจะหา
พิกัดของระบบโดยดูจากความเร็วรอบของตัวขับไม่ได้ จึงจำเป็นต้องดูจากพิกัดกระแสของ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องชุดจำลอง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง
(SIMULATION OF HIGH VOLTAGE) สามารถสำเร็จได้ด้วยดีโดยคณะผู้จัดทำ
ได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือในด้านการให้คำปรึกษาอธิบาย จาก อาจารย์ศิริวัฒน์
โพธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ตลอดจนถึงคณาจารย์ที่สอนทางด้านวิชา HIGH
VOLTAGE ENGINEERING ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ
ที่นี้ด้วย นอกจากนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านผู้แต่งตั้งตำราที่คณะผู้จัดทำใช้ในการอ้างอิง
ในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ตั้งได้แสดงไว้ในหน้าถัดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. ค.ร.สำราญ สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 434 หน้า, 2528
2. ค.ร.จรรยา บุญยบาล , "หลักการแปลงภาพพลังงานไฟฟ้า" , คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 236 หน้า, 2523
3. ค.ร.พีระศักดิ์ วรสุนทรโรสด, "เครื่องจักรไฟฟ้า 1" , สถาบันเทคโน
โลยีพระจอมเกล้า , 251 หน้า, 2520
4. K.B. Raina, k.c Single, YK Anand, Transmission
and Distribution of Electrical Power, Tata -
Mc Graw-Hill Publishing Co.,Ltd. 1985
5. Kuffle, E., Abdullah, M, High Voltage Engineering,
Pergamon Press , 1977
6. Naidu, M.S. Kamaraju, V, High Voltage Engineering,
Tata Mc Graw-Hill Publishing Co.,Ltd.1982
7. Nathan R.Grossner, Transformer for Electronic -
Circuit, Mc Graw-Hill Book Company, 1982
8. A. Text Book of Electrical Technology by B.L.Theraia,
Niraj Prakashan, Ram Nagar, New Delhi, 1968.