

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 3 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่าน
และสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง
SELF - EXCITED BRUSHLESS 3 - PHASE SYNCHRONOUS GENERATOR



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2532

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขึงโครน์ส 3 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่าน และสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง
นักศึกษา	จรรยา หอศิวัลย์ 28.126-020
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2532

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงการศึกษาถึงความเป็นไปได้ ของการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขึงโครน์ส 3 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่านและสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง โดยการนำเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดโรเตอร์ทรงกระบอก(cylindrical rotor) ที่มีใช้งานอยู่ โดยทั่วๆไปมาดัดแปลง โดยที่สเตเตอร์(stator)จะมีขดลวดอยู่ 3 ชุดคือ ขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก(main armature winding) สำหรับจ่ายกำลังไฟให้กับโหลด(load) ขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย(auxiliary armature winding) สำหรับจ่ายกำลังไฟให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น(excitation winding) และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น(exciting magnetic field) และควบคุมขนาดศักดาไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ ส่วนที่โรเตอร์จะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก(field winding) ต่อกับไดโอด(diode)เพื่อกำหนดทิศทางการไหลของกระแส ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่มีจำนวนเท่ากับขั้วแม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์

Thesis Title	SELF - EXCITED BRUSHLESS 3 - PHASE SYNCHRONOUS GENERATOR
Name	JAROON HAWSIWALAI 28.126-020
Thesis Advisor	ASSOC. PROF. DR. BIRASAK VARASUNDHAROSOTH
Level of Study	MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
Academic Year	1989

ABSTRACT

This paper presents the studying of using self-excited brushless three-phase synchronous generator. By modifying a conventional cylindrical-rotor machine, there are three sets of windings on the stator : main armature winding for feeding power to load, auxiliary armature winding for feeding power to excitation winding and excitation winding for setting up the exciting magnetic field and controlling the output voltage at armature winding. On the rotor there are field windings which each of them connects with diode to specify the direction of flowing of current to have the same number of magnetic poles as the armature winding.

กิตติกรรมประกาศ

หากมีความดีอันเกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบให้กับ พ่อ และ แม่
ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ ที่ให้คำแนะนำในการ
ทำวิทยานิพนธ์นี้ จนลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ

รศ.ดร. วิวัฒน์ กิราเนนท์

อาจารย์ พิชิต ล้ายอง

ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

อีกหลายท่าน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขิงโครนัส	3
2.1 องค์ประกอบทางไฟฟ้า	3
2.1.1 ขดลวดอาร์เมเจอร์	3
2.1.2 ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	4
2.2 ระบบการสร้างสนามแม่เหล็ก	5
2.2.1 รูปร่างของโรเตอร์	6
2.2.2 การสร้างสนามแม่เหล็ก	6
2.3 เรกิวเลชั่นของตักดา	13
บทที่ 3 แนวความคิดและทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขิงโครนัส 3 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่านและสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง	15
3.1 แนวความคิด	15
3.2 การวิเคราะห์	17
บทที่ 4 การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขิงโครนัส 3 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่านและสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง	24
4.1 การออกแบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	24
4.2 การออกแบบขดลวดที่สเตเตอร์	27 ,
4.2.1 การออกแบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	27
4.2.2 การออกแบบขดลวดอาร์เมเจอร์	35
4.3 การหาจำนวนตัวนำของแต่ละขดลวด	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1	การหาจำนวนตัวนำของขดลวดที่สเตเตอร์	41
4.3.2	การหาจำนวนตัวนำของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	44
บทที่ 5	การสร้างคิกดาและการควบคุมคิกดาและความถี่	47
5.1	การสร้างคิกดา	49
5.1.1	คิกดาเริ่มต้น	49
5.1.2	แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงคอยล์รีเลย์	49
5.1.3	วงจรเรกติฟายเออร์ของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย	50
5.2	วงจรรักษาคิกดาอัตโนมัติ	50
5.2.1	ไอซี TL494	52
5.2.2	แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร	54
5.2.3	วงจรซอฟต์แวร์สตาร์ท	55
5.2.4	วงจรควบคุมคิกดาและกระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	56
5.2.5	วงจรกำลัง	57
5.3	วงจรป้องกันคิกดาและความถี่ สูงหรือต่ำเกินไป	59
5.3.1	วงจรป้องกันคิกดาสูงหรือต่ำเกินไป	59
5.3.2	วงจรป้องกันความถี่สูงหรือต่ำเกินไป	61
บทที่ 6	ผลการทดลอง	65
6.1	ผลของวิธีการสร้างสนามแม่เหล็ก	67
6.1.1	เมื่อป้อนคิกดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่ต่ออนุกรมทั้ง 4 ขด	71
6.1.2	เมื่อป้อนคิกดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	72
6.1.3	เมื่อป้อนคิกดากระแสไฟตรงเป็นพัลส์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	73
6.2	ผลของจำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	75
6.2.1	รูปคลื่นคิกดาของอาร์เมเจอร์ขณะไม่มีโหลด	75
6.2.2	รูปคลื่นคิกดาของอาร์เมเจอร์เมื่อจ่ายโหลดรีซิสทีฟ	77

6.3.1	โรเตอร์ R3 และ สเตเตอร์ S3	81
6.3.2	โรเตอร์ R4 และ สเตเตอร์ S3	82
6.4	ผลการทดลองของโรเตอร์ R4 และ สเตเตอร์ S4 เมื่อทำงาน แบบสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ด้วยตัวเอง	84
6.4.1	คุณลักษณะขณะ ไม่มีโหลด	84
6.4.2	เมื่อจ่าย โหลดวิธีสัฟแบบสมดุลย์	88
6.4.3	เมื่อจ่าย โหลดผสมวิธีสัฟ-อินดักทีฟแบบสมดุลย์	90
6.4.4	เมื่อจ่าย โหลดวิธีสัฟเพียงเฟสเดียว	95
6.4.5	เมื่อจ่าย โหลดผสมวิธีสัฟ-อินดักทีฟเพียงเฟสเดียว	98
บทที่ 7	บทสรุป	101
7.1	ผลของวิธีการสร้างสนามแม่เหล็ก	101
7.2	ผลของจำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	101
7.3	ผลของจำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	102
7.4	การเปรียบเทียบผลที่ได้ ในทางปฏิบัติกับทฤษฎี	102
7.5	คุณลักษณะของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้น	103
7.5.1	ขณะ ไม่มีโหลด	104
7.5.2	เมื่อจ่าย โหลดวิธีสัฟเต็มพิกัด	104
7.5.3	เมื่อจ่าย โหลดผสมวิธีสัฟ-อินดักทีฟเต็มพิกัด	104
7.6	สรุปและเสนอแนะ	105
เอกสารอ้างอิง		107
ภาคผนวก		108
ภาคผนวก ก	อนุกรมฟูเรียร์	109
ภาคผนวก ข	ข้อมูล TL494	111
ภาคผนวก ค	ข้อมูล MC3425	118
ภาคผนวก ง	ข้อมูล LM2907	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ขนาดฮาร์โมนิคเมื่อเทียบกับขนาดรูปคลื่นไซน์พื้นฐาน	26 - 27
ตารางที่ 4.2 ขนาดฮาร์โมนิคที่จำนวนขดลวดต่างๆ	30
ตารางที่ 4.3 ขนาดฮาร์โมนิคเทียบกับขนาดรูปคลื่นไซน์พื้นฐาน ที่แอมป์-เทิร์นเดียวกัน	30 - 31
ตารางที่ 4.4 ขนาดฮาร์โมนิคที่จำนวนขดลวดต่างๆ	33 - 34
ตารางที่ 4.5 ขนาดฮาร์โมนิคเทียบกับขนาดรูปคลื่นไซน์พื้นฐาน ที่แอมป์-เทิร์นเดียวกัน	34
ตารางที่ 4.6 แฟคเตอร์การกระจาย(K_d)	38 - 39
ตารางที่ 4.7 แฟคเตอร์ระยะขดลวด(K_p)	39
ตารางที่ 4.8 แฟคเตอร์ระยะขดลวด(K_p)	39 - 40
ตารางที่ 4.9 แฟคเตอร์การพันขดลวด($K_w = K_d K_p$)	40

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การพันขดลวดแบบคอนเซนทริก- เซน	3
รูปที่ 2.2 การพันขดลวดแบบแลกเปลี่ยน	4
รูปที่ 2.3 การพันขดลวดแบบเวฟ	4
รูปที่ 2.4 การพันขดลวดแบบคอนเซนเทรต	5
รูปที่ 2.5 การพันขดลวดแบบกระจาย	5
รูปที่ 2.6 การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไทรสเตอร์อยู่กับที่	7
รูปที่ 2.7 การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไดโอดอยู่กับที่และมีตัวสร้างสนามแม่เหล็ก กระตุ้นแบบ 3 เฟส	9
รูปที่ 2.8 การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไดโอดหมุนและมีตัวสร้างสนามแม่เหล็ก กระตุ้นแบบ 3 เฟส	11
รูปที่ 2.9 การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไดโอดหมุนและมีตัวสร้างสนามแม่เหล็ก กระตุ้นแบบ 3 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก	12
รูปที่ 3.1 ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นในสนามแม่เหล็กรูปชายน์	16
รูปที่ 3.2 วงจรเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะสร้างขึ้น	18
รูปที่ 4.1 สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ในห้องอากาศ	24
รูปที่ 4.2 แอมป์-เทอรันของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์	25
รูปที่ 4.3 แอมป์-เทอรันของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่เป็นจำนวนคี่	28
รูปที่ 4.4 แอมป์-เทอรันของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่เป็นจำนวนคู่	31
รูปที่ 4.5 การพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีระยะขดลวด 18 สล็อต	36
รูปที่ 4.6 การพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีระยะขดลวด 12 สล็อต	37
รูปที่ 4.7 แผนภูมิการพันขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้ง 2 ชุด	45
รูปที่ 4.8 แผนภูมิการพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	46
รูปที่ 5.1 การทำงานของวงจรรักษาคิกดาอ์โตโมติ	47
รูปที่ 5.2 แผนภูมิการต่อวงจรควบคุม	48
รูปที่ 5.3 วงจรจ่ายไฟเลี้ยงคอยล์รีเลย์	50

รูปที่ 5.4	วงจรรักษาดักดาอัตโนมัติ	51
รูปที่ 5.5	บล็อกไดอะแกรม(block diagram) ของ TL494	53
รูปที่ 5.6	ไทมิงไดอะแกรม(timing diagram)	53
รูปที่ 5.7	วงจรจ่ายไฟเลี้ยงวงจรรักษาดักดาอัตโนมัติ	54
รูปที่ 5.8	วงจรขอฟท์สตาร์ท	55
รูปที่ 5.9	วงจรควบคุมศักดาและกระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	56
รูปที่ 5.10	วงจรกำลัง	58
รูปที่ 5.11	บล็อกไดอะแกรมของ ไอซี MC3425	60
รูปที่ 5.12	วงจรป้องกันศักดาสูงหรือต่ำเกินไป	62
รูปที่ 5.13	วงจรป้องกันความถี่สูงหรือต่ำเกินไป	63
รูปที่ 6.1	สเตเตอร์ S4	68
รูปที่ 6.2	โรเตอร์ R4	68
รูปที่ 6.3	วงจรควบคุม	69
รูปที่ 6.4	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะทำการทดลอง	69
รูปที่ 6.5	การต่อวงจรอย่างสมบูรณ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้น	70
รูปที่ 6.6	รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์	71
รูปที่ 6.7	รูปคลื่นศักดาเฟส a	71
รูปที่ 6.8	รูปคลื่นศักดาเฟส b และ c	71
รูปที่ 6.9	รูปคลื่นศักดาของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	71
รูปที่ 6.10	รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	72
รูปที่ 6.11	รูปคลื่นศักดาคร่อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	72
รูปที่ 6.12	รูปคลื่นศักดาเฟส a	72
รูปที่ 6.13	รูปคลื่นศักดาเฟส b และ c	72
รูปที่ 6.14	รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	73
รูปที่ 6.15	รูปคลื่นศักดาคร่อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	73
รูปที่ 6.16	รูปคลื่นศักดาเฟส a	73
รูปที่ 6.17	รูปคลื่นศักดาเฟส b และ c	73
รูปที่ 6.18	คุณลักษณะการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า	74

รูปที่ 6.19	รูปคลื่นตักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	75
รูปที่ 6.20	รูปคลื่นตักดาพร้อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	75
รูปที่ 6.21	รูปคลื่นตักดาเฟส a เปรียบเทียบรูปช่ายน์	76
รูปที่ 6.22	รูปคลื่นตักดาเฟส b และ c	76
รูปที่ 6.23	รูปคลื่นตักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	76
รูปที่ 6.24	รูปคลื่นตักดาพร้อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	76
รูปที่ 6.25	รูปคลื่นตักดาเฟส a เปรียบเทียบรูปช่ายน์	77
รูปที่ 6.26	รูปคลื่นตักดาเฟส b และ c	77
รูปที่ 6.27	รูปคลื่นตักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	77
รูปที่ 6.28	รูปคลื่นตักดาพร้อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	77
รูปที่ 6.29	รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส a	78
รูปที่ 6.30	รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส b	78
รูปที่ 6.31	รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส c	78
รูปที่ 6.32	รูปคลื่นตักดาและกระแสป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	79
รูปที่ 6.33	รูปคลื่นตักดาพร้อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	79
รูปที่ 6.34	รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส a	79
รูปที่ 6.35	รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส b	79
รูปที่ 6.36	รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส c	80
รูปที่ 6.37	รูปคลื่นกระแสสร้างสนามแม่เหล็กและตักดาที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก	80
รูปที่ 6.38	รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส a	80
รูปที่ 6.39	รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส b	81
รูปที่ 6.40	รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส c	81
รูปที่ 6.41	รูปคลื่นตักดาและกระแสป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	81
รูปที่ 6.42	รูปคลื่นตักดาพร้อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	81
รูปที่ 6.43	รูปคลื่นตักดาเฟส a เปรียบเทียบรูปช่ายน์	82
รูปที่ 6.44	รูปคลื่นตักดาเฟส b และ c	82
รูปที่ 6.45	คุณลักษณะการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า	83
รูปที่ 6.46	ภาวะการสร้างตักดาที่อาร์เมเจอร์	84

รูปที่ 6.47	รูปคลื่นตึกดาและกระแสของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	84
รูปที่ 6.48	รูปคลื่นตึกดาพร้อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	84
รูปที่ 6.49	สเปกตรัมของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	84
รูปที่ 6.50	รูปคลื่นตึกดาเฟส a	85
รูปที่ 6.51	รูปคลื่นตึกดาเฟส b และ c	85
รูปที่ 6.52	สเปกตรัมของตึกดาเฟส b	85
รูปที่ 6.53	คุณลักษณะการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า	86
รูปที่ 6.54	การควบคุมการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ความเร็วต่างๆ ของวงจรรักษาตึกดาอัตโนมัติ	87
รูปที่ 6.55	รูปคลื่นตึกดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	88
รูปที่ 6.56	รูปคลื่นตึกดาพร้อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	88
รูปที่ 6.57	สเปกตรัมของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	88
รูปที่ 6.58	รูปคลื่นตึกดาและกระแสเฟส a	88
รูปที่ 6.59	รูปคลื่นตึกดาและกระแสเฟส b	89
รูปที่ 6.60	รูปคลื่นตึกดาและกระแสเฟส c	89
รูปที่ 6.61	สเปกตรัมของตึกดาเฟส b	89
รูปที่ 6.62	สเปกตรัมของกระแสเฟส b	89
รูปที่ 6.63	การเปลี่ยนแปลงตึกดาและกระแสของเฟส b จากภาวะไม่มีโหลด สู่ภาวะมีโหลด	90
รูปที่ 6.64	การเปลี่ยนแปลงตึกดาและกระแสของเฟส b จากภาวะมีโหลด สู่ภาวะไม่มีโหลด	90
รูปที่ 6.65	คุณลักษณะเมื่อจ่าย โหลดวิธีสปีนแบบสมดุลย์	91
รูปที่ 6.66	รูปคลื่นตึกดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	90
รูปที่ 6.67	รูปคลื่นตึกดาพร้อม ไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	90
รูปที่ 6.68	สเปกตรัมของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	92
รูปที่ 6.69	รูปคลื่นตึกดาและกระแสเฟส a	92
รูปที่ 6.70	รูปคลื่นตึกดาและกระแสเฟส b	92
รูปที่ 6.71	รูปคลื่นตึกดาและกระแสเฟส c	92

รูปที่ 6.72	สเปกตรัมของศักดาเฟส b	93
รูปที่ 6.73	สเปกตรัมของกระแสเฟส b	93
รูปที่ 6.74	การเปลี่ยนแปลงศักดาและกระแสของเฟส b จากภาวะไม่มีโหลด สู่ภาวะมีโหลด	93
รูปที่ 6.75	การเปลี่ยนแปลงศักดาและกระแสของเฟส b จากภาวะมีโหลด สู่ภาวะไม่มีโหลด	93
รูปที่ 6.76	คุณลักษณะเมื่อจ่าย โหลดสมรวิชัย-อินดักทีฟแบบสมดุลย์	94
รูปที่ 6.77	รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	95
รูปที่ 6.78	รูปคลื่นศักดาคร่อมไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	95
รูปที่ 6.79	สเปกตรัมของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	95
รูปที่ 6.80	รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส b	95
รูปที่ 6.81	รูปคลื่นศักดาเฟส a และ b	96
รูปที่ 6.82	สเปกตรัมของศักดาเฟส b	96
รูปที่ 6.83	สเปกตรัมของกระแสเฟส b	96
รูปที่ 6.84	คุณลักษณะเมื่อจ่าย โหลดรีซิสทีฟเฟสเดียว	97
รูปที่ 6.85	รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น	98
รูปที่ 6.86	รูปคลื่นศักดาคร่อมไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	98
รูปที่ 6.87	สเปกตรัมของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก	98
รูปที่ 6.88	รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส b	98
รูปที่ 6.89	รูปคลื่นศักดาเฟส a และ b	99
รูปที่ 6.90	สเปกตรัมของศักดาเฟส b	99
รูปที่ 6.91	สเปกตรัมของกระแสเฟส b	99
รูปที่ 6.92	คุณลักษณะเมื่อจ่าย โหลดสมรวิชัย-อินดักทีฟเฟสเดียว	100
รูปที่ 7.1	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก ที่ได้จากการทดลองกับทางทฤษฎี	103

บทที่ 1

บทนำ

แปรงถ่านและสลีปรिंग(slip ring)ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เป็นส่วนที่ต้องได้รับการออกแบบอย่างพิถีพิถันเพราะมีการสัมผัสกันตลอดเวลา ทำให้เกิดความร้อนและการสึกหรอ ซึ่งอาจมีผลต่อเนื่องทำให้อายุการใช้งานของส่วนอื่นสั้นลงได้ อีกทั้งยังไม่มีเหมาะสมสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมบางอย่าง เช่น บริเวณที่มีการกักความร้อนของสารเคมี เป็นต้น ดังนั้นแปรงถ่านและสลีปรिंगจึงเป็นส่วนที่ต้องได้รับการดูแลอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเวลาเกี่ยวกับการบำรุงรักษาในส่วนนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดไม่มีแปรงถ่านจึงได้รับการพัฒนาขึ้นมา แต่อย่างไรก็ตามเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้จะต้องมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น(exciter)เพิ่มเข้ามา ทำให้มีโครงสร้างที่ใหญ่และซับซ้อนมากขึ้น ข้อดีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดไม่มีแปรงถ่านจะสิ้นสุดลง เมื่อมีพิกัดต่ำกว่า 10 kVA ลงมา จึงมีแนวความคิดในอันที่จะสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดไม่มีแปรงถ่านและไม่มีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น[1] ซึ่งต่อไปจะเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสชนิดไม่มีแปรงถ่านและสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง ที่มีขนาดเล็กชนิด 3 เฟส ขึ้นมา โดยคำนึงถึงการใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่มีค่อนข้างหนักกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดกลางและขนาดใหญ่ ทั้งในแง่ของการจ่ายหรือเปลี่ยนแปลงโหลดและสภาวะแวดล้อมต่างๆ อีกทั้งยังมักขาดการดูแลรักษา ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นคุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กควรจะมีก็คือโครงสร้างที่ง่าย แข็งแรง และต้องการการดูแลรักษาน้อย แต่ยังคงต้องคงความเชื่อถือได้สูง เป้าหมายของวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการสร้างและการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส 3 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่านและสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเองนี้ ซึ่งประกอบด้วย หลักการทำงาน การวิเคราะห์ในเชิงคณิตศาสตร์และการออกแบบ รวมถึงการสร้างวงจรรักษาศักดาอัตโนมัติ และวงจรป้องกันศักดาและความถี่สูงหรือต่ำเกินไป โดยได้นำเอาเครื่องจักรไฟฟ้าขนาด 2 kVA ชนิดโรเตอร์ทรงกระบอกมาดัดแปลงเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส พิกัดศักดา 220/380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที เพื่อใช้ในการศึกษาคุณลักษณะต่างๆ นอกจากนั้นยังได้แสดงภาพถ่ายรูปคลื่นศักดา และกระแสในสภาวะต่างๆ อีกทั้งความสัมพันธ์ของคุณลักษณะที่สำคัญในไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงกราฟอีกด้วย ผู้เขียนจึงหวังว่า จากคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นมานั้น คงเป็นแนวทางสำหรับการใช้งานในประเภทที่ไม่ต้องการดูแลรักษามากนักได้ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ลมเป็นตัวขับเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานของชุมชนในชนบท เป็นต้น



บทที่ 2

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วโครนัส

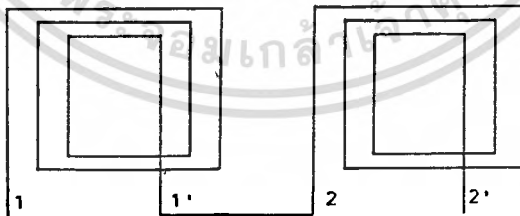
ในการศึกษาถึงรายละเอียดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วโครนัส จะต้องแบ่งการพิจารณาออกเป็นหลายๆด้านด้วยกันเช่น ความแข็งแรงของวัสดุ ฉนวน อุตุนิยมวิทยา วงจรแม่เหล็กและวงจรไฟฟ้า เป็นต้น ความมีอิทธิพลของปัจจัยต่างๆอาจเปลี่ยนแปลงไปได้ขึ้นกับ ขนาดการใช้งาน และการออกแบบ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับทางด้านแม่เหล็กและไฟฟ้า รวมถึงการใช้งานในบางส่วนเท่านั้น เพื่อให้มีความเข้าใจถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ ในอันที่จะเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาสำหรับบทต่อไป

2.1 องค์ประกอบทางไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วโครนัส จะมีองค์ประกอบทางด้านไฟฟ้าที่สำคัญ 2 ส่วนด้วยกันคือ

2.1.1 ขดลวดอาร์เมเจอร์ เป็นขดลวดที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟให้กับโหลด ในปัจจุบันมีการพัฒนาขึ้นใช้กันอยู่ 3 วิธี คือ

(ก) การพันแบบคอนเซนทริก-เชน(concentric-chain winding)

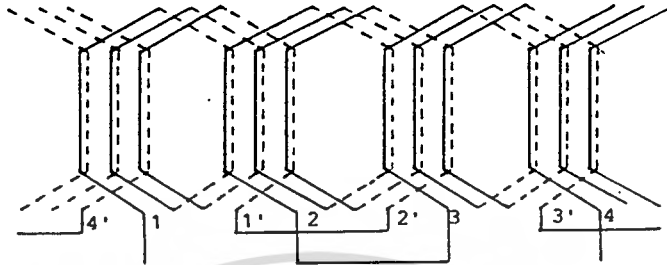


รูปที่ 2.1 การพันขดลวดแบบคอนเซนทริก-เชน

การพันแบบนี้ จะเป็นแบบชั้นเดียว(single layer) คือแต่ละสล็อตจะมีเพียง ด้านคอยล์(coil side) เดียว ขดลวดแต่ละชุดประกอบด้วยขดลวดที่มีรูปทรงและขนาดที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

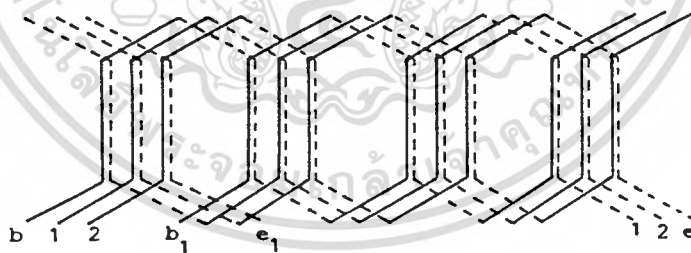
(ข) การพันแบบแลป(lap winding)



รูปที่ 2.2 การพันขดลวดแบบแลป

การพันแบบนี้โดยปกติจะเป็นแบบ 2 ชั้น (two layer) คือแต่ละสล็อตจะมี 2 ด้านคอยล์ จำนวนตัวนำที่อยู่ในแต่ละสล็อตจะเป็นเลขคู่ ขดลวดแต่ละชุดจะประกอบด้วยขดลวดที่มีรูปทรงและขนาดที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

(ค) การพันแบบเวฟ(wave winding)



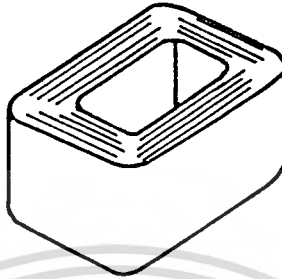
รูปที่ 2.3 การพันขดลวดแบบเวฟ

มีลักษณะการพันตามรูปที่ 2.3 ส่วนคุณลักษณะอื่นจะเหมือนกับแบบแลป

2.1.2 ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เป็นขดลวดสำหรับป้อนกระแสไฟตรงเข้าไปเพื่อทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่แน่นอน ลักษณะการพันจะขึ้นกับรูปร่างวงจรแม่เหล็กที่มีอยู่ ดังนั้นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

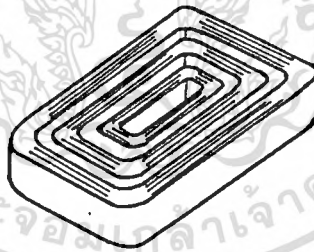
(ก) การพันแบบคอนเซนเทรต(concentrated winding)



รูปที่ 2.4 การพันขดลวดแบบคอนเซนเทรต

จะมีรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับพันรอบแกนเหล็กที่ยื่นออกมา ดังรูปที่ 2.4

(ข) การพันขดลวดแบบกระจาย(distributed winding)



รูปที่ 2.5 การพันขดลวดแบบกระจาย

จะประกอบด้วยขดลวดหลายชุดสำหรับใส่ในช่องสลิต ดังรูปที่ 2.5

2.2 ระบบการสร้างสนามแม่เหล็ก(excitation system)

โดยทั่วไปขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จะอยู่ที่สเตเตอร์หรือที่โรเตอร์ก็ได้ ถ้าขดลวดอาร์เมเจอร์อยู่ที่สเตเตอร์และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่บนโรเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ก็เรียกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ว่า แบบสนามแม่เหล็กหมุน(rotating field) แต่ถ้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กอยู่ที่สเตเตอร์และขดลวดอาร์เมเจอร์อยู่ที่โรเตอร์จะเรียกว่า แบบอาร์เมเจอร์หมุน(rotating armature) จะมีการต่อกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดบนโรเตอร์กับวงจรภายนอก โดยผ่านสลิปริงและแปรงถ่านหรือผ่านไดโอด แล้วแต่ประเภทของการสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ

เมื่อพิจารณาถึงพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งแบบสนามแม่เหล็กหมุน และแบบอาร์เมเจอร์หมุน จะเห็นได้ว่าเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีพิกัดสูงขึ้น ชนิดที่ให้ความเหมาะสมในการใช้งานก็คือ แบบสนามแม่เหล็กหมุน เพราะเมื่อขดลวดอาร์เมเจอร์อยู่กับที่ ก็จะทำให้ความง่ายในการจัดการด้านฉนวน และอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับขดลวดบนโรเตอร์จะเป็นเพียงทางผ่านของกระแสที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีขนาดศักดาและกำลังต่ำกว่าของขดลวดอาร์เมเจอร์มาก ในที่นี้จะกล่าวถึงระบบการสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้เท่านั้น

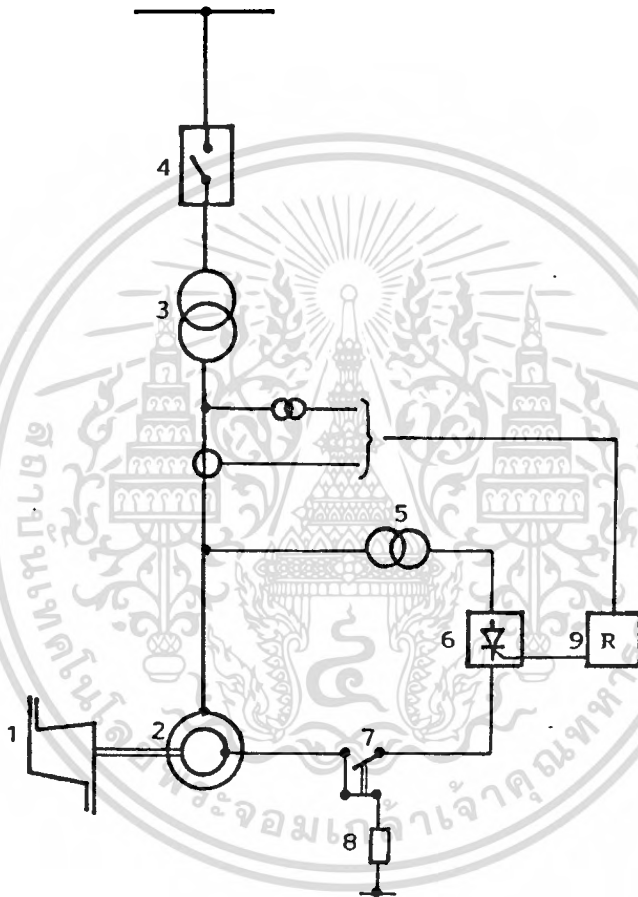
2.2.1 รูปร่างของโรเตอร์ จะมีผลต่อวิธีการพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก โรเตอร์ที่มีใช้ในปัจจุบันจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ

(ก) โรเตอร์แบบ ซาลิเอนท์ (salient rotor) มักใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบต่ำ ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะมีรูปร่างเป็นขดลวดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ยื่นออกมา การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กในช่วงระยะขั้ว (pole pitch) จะประมาณเป็นรูปซายน์ โดยการทำการป่วงของแกนเหล็กส่วนที่เป็นหน้าขั้ว(pole face) ให้เหมาะสม

(ข) โรเตอร์แบบกลมหรือทรงกระบอก มักใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบสูง การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กในช่วงระยะขั้ว จะประมาณเป็นรูปซายน์ด้วยการกระจายของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ โครงสร้างแบบนี้จะให้ผลดีในแง่ของความแข็งแรง และการถ่วงดุลย์(balancing)จะทำได้แม่นยำกว่า ยิ่งกว่านั้นผิวโรเตอร์ที่เรียบจะทำให้เสียงดังขณะหมุนลดน้อยลงอีกด้วย

2.2.2 การสร้างสนามแม่เหล็ก วิธีดั้งเดิมของการสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ก็คือมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสไฟตรง ป้อนกระแสไฟเข้าสูโรเตอร์โดยผ่านสลิปริงและแปรงถ่าน ในปัจจุบันการสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ จะมีอยู่ 3 ระบบด้วยกันคือ

(ก) การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไทรสเตอร์อยู่กับที่ (excitation with stationary thyristor)



- | | |
|----------------------|-------------------------------------|
| 1 เทอร์ไบน์ | 5 หม้อแปลงระบบสร้างสนามแม่เหล็ก |
| 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า | 6 ไทรสเตอร์ คอนเวอร์เตอร์ |
| 3 หม้อแปลงกำลัง | 7 สวิตช์ตัดตอนระบบสร้างสนามแม่เหล็ก |
| 4 สวิตช์ตัดตอนหลัก | 8 ความต้านทานหน่วงสนามแม่เหล็ก |
| | 9 อุปกรณ์รักษาค่าอัตโนมัติ |

กำลังไฟฟ้าป้อนให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จะได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเอง จึงไม่จำเป็นต้องมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยหม้อแปลง 5 จะแปลงระดับศักดาลงมาให้กับชุดทรานซิสเตอร์ กระแสไฟฟ้าสลับจะถูกเรกติฟายแล้วป้อนให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กโดยผ่านสลีปรिंगและแปรงถ่าน

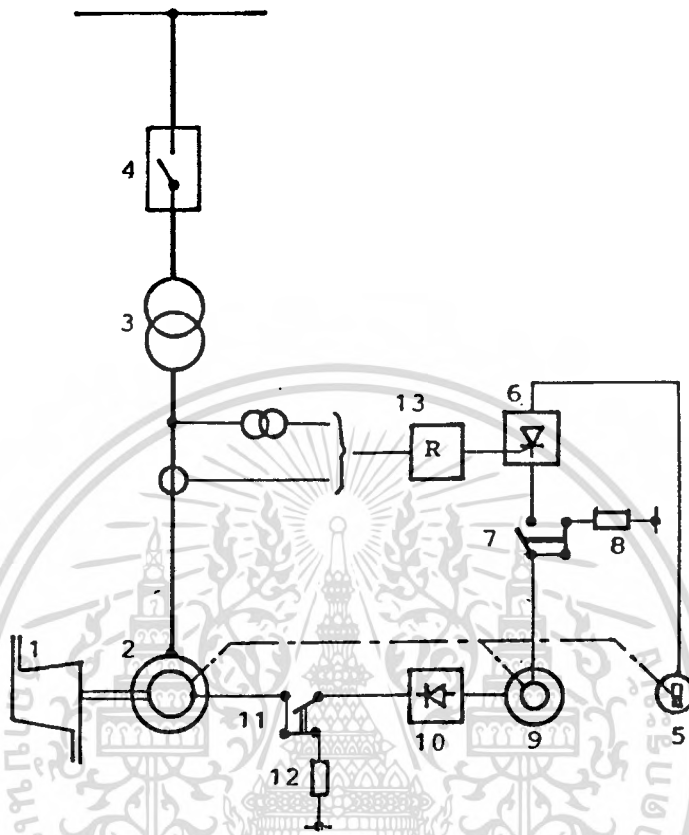
เมื่อเกิดความผิดปกติในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สวิตช์ตัดตอนของระบบสร้างสนามแม่เหล็ก(field breaker)จะตัดขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กออก แล้วต่อขดลวดนี้เข้ากับความต้านทานที่มีคุณลักษณะขึ้นกับระดับศักดา ดังนั้นสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะลดลงในช่วงเวลาที่สั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะส่งผลให้ลดความเสียหายที่เกิดขึ้นให้น้อยที่สุด

จากการควบคุมชุดทรานซิสเตอร์ ศักดาของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงได้เกือบจะทันทีทันใด รวมทั้งยังสามารถกลับขั้วศักดาได้อีกด้วย ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลเข้าของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้สามารถควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ทำงานในภาวะที่ติดที่สุดได้

จะเห็นได้ว่าการสร้างสนามแม่เหล็กแบบนี้ ไม่มีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ดังนั้นที่ปลายเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงมีเฉพาะสลีปรिंग ทำให้เพลลามีความยาวสั้นลง การหมุนของโรเตอร์จึงเรียกว่า แล้วยังทำให้เครื่องจักรมีโครงสร้างที่เล็กลงด้วย

(ข) การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไดโอดอยู่กับที่และมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นแบบ 3 เฟส(excitation with stationary diode and 3-phase exciter) วงจรการทำงานแสดงในรูปที่ 2.7 กำลังที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กจะได้จากตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่ต่ออยู่กับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสไฟแบบ 3 เฟสของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น จะถูกเรกติฟายโดยไดโอดที่อยู่กับที่ แล้วจ่ายให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กโดยผ่านสลีปรिंगและแปรงถ่าน ขนาดสนามแม่เหล็กของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นแบบ 3 เฟส จะควบคุมโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวร

การปรับศักดาของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำได้โดยการควบคุมขนาดสนามแม่เหล็กของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น การเปลี่ยนแปลงศักดาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะขึ้นกับค่าคงที่เวลา(time constant)ของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น จึงทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงศักดาที่อาร์เมเจอร์ได้รวดเร็วเหมือนกับการควบคุมโดยทรานซิสเตอร์ในวิธีที่ผ่านมา



- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1 เทอร์ไบน์ | 8 ความต้านทานหน่วงสนามแม่เหล็กสำหรับ |
| 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า | ตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น 3 เฟส |
| 3 หม้อแปลงกำลัง | 9 ตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น 3 เฟส |
| 4 สวิตช์ตัดตอนหลัก | 10 ไดโอดเรกติฟายเออร์ |
| 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวร | 11 สวิตช์ตัดตอนระบบสร้างสนามแม่เหล็ก |
| 6 ไทริสเตอร์ คอนเวอร์เตอร์ | สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า |
| 7 สวิตช์ตัดตอนระบบสร้างสนามแม่เหล็ก | 12 ความต้านทานหน่วงสนามแม่เหล็ก |
| สำหรับตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น 3 เฟส | สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า |
| | 13 อุปกรณ์รักษาศักดาอัตโนมัติ |

รูปที่ 2.7 การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไดโอดอยู่กับที่และมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นแบบ

3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบนี้ยังคงมีสวิตช์ตัดตอนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก และความต้านทานก็จะมีคุณลักษณะ เหมือนกับกรณีของการสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไทรสเตอร์อยู่กับที่ เพราะขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กสามารถเข้าถึงได้โดยผ่านสลีปรिंगเช่นเดียวกัน

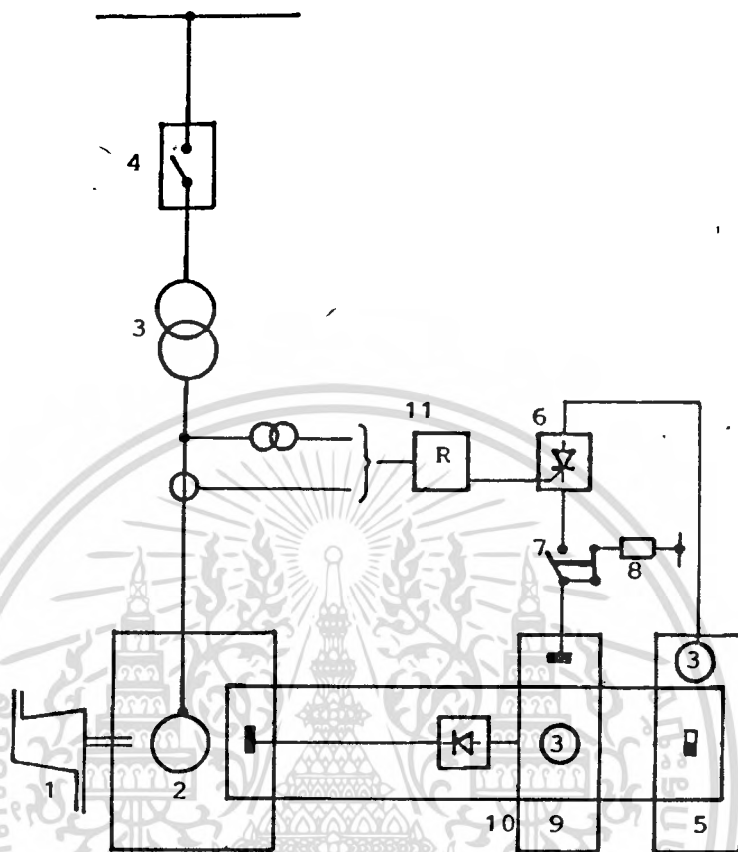
(ค) การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไดโอดหมุนและมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นแบบ 3 เฟส (excitation with rotary diode and 3-phase exciter) วงจรการทำงานแสดงในรูปที่ 2.8 กำลังไฟที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กของระบบนี้ จะมาจากตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นแบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่มีอาร์เมเจอร์อยู่บนโรเตอร์ที่ต่ออยู่กับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวร จะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นอีกต่อหนึ่ง

ตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่มีอาร์เมเจอร์เป็นตัวหมุน ดังนั้นจะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดลวดที่อยู่บนโรเตอร์ ไดโอดที่หมุนไปพร้อมกับโรเตอร์จะเรกติฟายกระแสสลับ แล้วป้อนโดยตรงเข้าสู่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในระบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีสลีปรिंग ระยะเวลาที่ไม่ต้องดูแลเครื่องจึงยาวนานขึ้น

การปรับศักดาของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำได้โดยการควบคุมขนาดสนามแม่เหล็กของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ความเร็วของการเปลี่ยนแปลงศักดาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกจำกัดโดยค่าคงที่เวลา ของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นเช่นเดียวกับกรณี การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไดโอดอยู่กับที่และมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นแบบ 3 เฟส

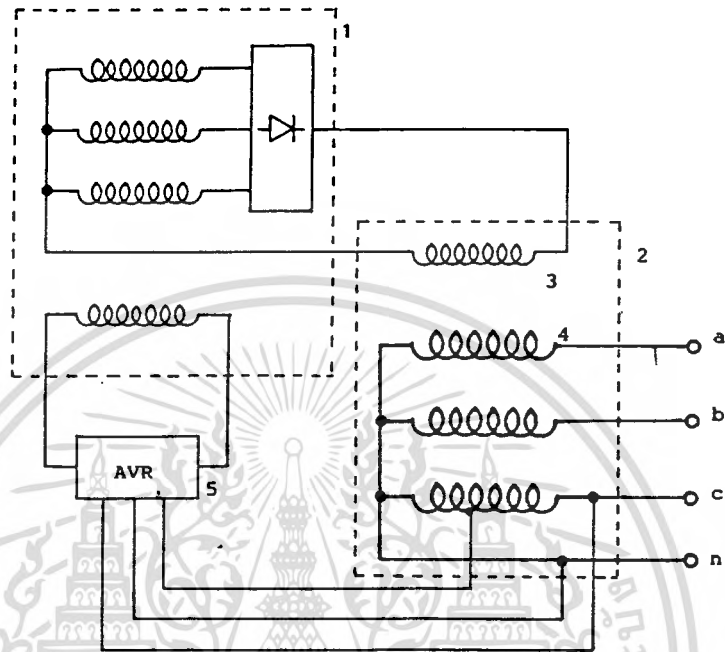
ในระบบนี้จะไม่มียุติการตัดตอนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก วิธีเดียวที่จะตัดการป้อนพลังงานเข้าสู่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็คือ การตัดไฟที่จ่ายเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นโดยสวิตช์ตัดตอนและความต้านทาน ดังนั้นการตัดไฟในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะใช้เวลามากกว่า 2 วิธีที่ผ่านมา

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งจะกล่าวถึงเฉพาะแบบที่ไม่มีแปรงถ่านเท่านั้น ก็จะมีหลักการเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ เพียงแต่จะลดความซับซ้อนของการสร้างสนามแม่เหล็ก และอุปกรณ์ป้องกันบางส่วนไป องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดงกล่าวจะสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.9 ศักดาเริ่มต้นที่เกิดในอาร์เมเจอร์ของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นนั้น จะเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง (residual flux) ของแกนเหล็ก ศักดานี้จะมีค่าไม่มากนัก แต่สามารถทำให้เกิดกระแสไหลผ่านขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่อง



- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1 เทอร์ไบน์ | 8 ความต้านทานหม้อแปลงแม่เหล็กสำหรับ |
| 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า | ตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น 3 เฟส |
| 3 หม้อแปลงกำลัง | 9 ตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น 3 เฟส |
| 4 สวิตช์ตัดตอนหลัก | 10 ไดโอดเรกติฟายเออร์หมุน |
| 5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร | 13 อุปกรณ์รักษาคัดดาอัตโนมัติ |
| 6 ไทริสเตอร์ คอนเวอร์เตอร์ | |
| 7 สวิตช์ตัดตอนระบบสร้างสนามแม่เหล็ก | |
| สำหรับตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น 3 เฟส | |

รูปที่ 2.8 การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไดโอดหมุนและมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นแบบ 3 เฟส



- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1 ตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น | 4 ขดลวดอาร์เมเจอร์ |
| 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า | 5 อุปกรณ์รักษาตัดอัตโนมัติ |
| 3 ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก | |

รูปที่ 2.9 การสร้างสนามแม่เหล็กแบบมีไดโอดหมุนและมีตัวสร้างสนามแม่เหล็ก กระตุ้นแบบ 3 เฟส ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

กำเนิดไฟฟ้าได้ โดยที่กระแสจะถูกเรกติฟายโดยไดโอดที่ติดตั้งอยู่บนโรเตอร์ก่อนที่จะเข้าขดลวด ขนาดคิกดาอาร์เมเจอร์ที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะถูกนำมาเรกติฟายแล้ว ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยการควบคุมของวงจร รักษาตัดอัตโนมัติ ดังนั้นคิกดาอาร์เมเจอร์ของตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นก็จะสูงขึ้น ทำให้กระแสสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย ผลเหล่านี้จะเสริมกันไปเรื่อยๆ จนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ภาวะทำงานปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เรกิวเลชันของศักดา (voltage regulation)[3]

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายกระแสไฟให้กับโหลด จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ศักดาที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ ถ้ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กและความเร็วรอบมีค่าคงที่ จะเรียกการเปลี่ยนแปลงศักดานี้ว่า เรกิวเลชันประจำตัว(inherent regulation) โดยมีนิยามดังนี้

เรกิวเลชันประจำตัว(%) = $(\text{ศักดาขณะไร้อโหลด} - \text{ศักดาขณะโหลด}) \times 100 / \text{ศักดาขณะ โหลด}$

มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อเรกิวเลชันประจำตัวนี้ คือ

(ก) ผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดโดยขดลวดอาร์เมเจอร์ ถึงแม้ว่าจะรักษาสถาปัตยกรรมแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก ให้มีค่าคงที่ก็ตาม แต่เส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกตัดโดยขดลวดอาร์เมเจอร์ ระหว่างไม่มีโหลดกับมีโหลดจะมีค่าไม่เท่ากัน เพราะกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กอีกส่วนหนึ่งขึ้นมา เมื่อรวมกับสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กจะได้ผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการกระจายจริงๆ ในช่องอากาศ(gap) เมื่อเฟาเวอร์แฟคเตอร์ของโหลดมีค่าประมาณ 1 กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขวาง(cross magnetizing) และทำให้เกิดการเพี้ยนของสนามแม่เหล็กกลับจากเดิม ผลที่ตามมาคือจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กจะลดลง อันเนื่องจากการเพิ่มและลดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ไม่เท่ากัน ในกรณีที่เฟาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าต่ำและกระแสตาม(lag)ศักดา แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีความโน้มเอียง ในอันที่จะต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก และที่เฟาเวอร์แฟคเตอร์เป็นศูนย์แรงเคลื่อนแม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์ จะต้านแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กทั้งหมด ดังนั้นผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศจะลดลงอย่างมาก แต่ถ้ากระแสนำ(lead)ศักดา ผลข้างต้นของขดลวดอาร์เมเจอร์จะเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก ศักดาที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์จึงเพิ่มขึ้น ผลอันเกิดจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์นี้เรียกว่า อาร์เมเจอร์รีแอคชัน(armature reaction)

(ข) ความต้านทาน, รีแอคแตนซ์ของปลายต่อตัวนำ(end-connection reactance) และ รีแอคแตนซ์จากการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในสล็อต(slot leakage reactance) ความต้านทานของขดลวดทำให้เกิดศักดาตกคร่อมที่มีเฟสเดียวกับกระแสและมีขนาดแปรตามขนาดกระแส รีแอคแตนซ์ของปลายต่อตัวนำ เป็นส่วนที่ทำให้เกิดศักดาตกคร่อมอันเนื่องจากการตัดกันของเส้นแรงแม่เหล็ก กับตัวนำที่อยู่นอกแกนเหล็กออกไป รีแอคแตนซ์จากการรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในสล็อต ทำให้เกิดศักดาตกคร่อมเนื่องจาก สนามแม่เหล็กในช่องอากาศไม่ได้ถูก

ตัดโดยขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้งหมด แต่จะมีบางส่วนที่ผ่านจากซี่แกนเหล็ก(teeth)หนึ่งไปยังอีกซี่แกนเหล็กหนึ่ง จึงทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยลง จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้อาจจะมีค่ามากได้ โดยเฉพาะเมื่อต้องจ่ายกระแสที่มีเพาเวอร์แฟคเตอร์(power factor)ต่ำๆ

(ค) รูปร่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ศักดาที่วัดได้จากขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์นั้นไม่ได้ขึ้นกับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดโดยขดลวดอาร์เมเจอร์เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับการกระจายในช่วงขั้วของเส้นแรงแม่เหล็กด้วยเช่นกัน เพราะว่าจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกตัดโดยขดลวดอาร์เมเจอร์นั้น จะให้ค่าเฉลี่ยของศักดาที่เหนี่ยวนำขึ้นมาเท่านั้น ในขณะที่รูปร่างของศักดาจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่า rms ที่ต้องการ

ดังนั้นในการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อคำนึงถึงเรกทิวเลชั่น จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้

- ขนาดของช่องอากาศ ช่องอากาศที่มีขนาดใหญ่สามารถช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเรกทิวเลชั่นที่ดีขึ้นได้ เพราะต้องใช้แอมป์-เทิร์น(amp-turn) ที่มีค่าสูงในการสร้างสนามแม่เหล็ก ดังนั้นแอมป์-เทิร์นของกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ทำให้เกิดอาร์เมเจอร์รีแอคชั่นจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแอมป์-เทิร์นของขั้วแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามการที่ช่องอากาศมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดรั่วไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก(magnetic leakage)มากขึ้น และเพิ่มโครงสร้างให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

- การอึดตัวของแกนเหล็ก การออกแบบให้แกนเหล็กมีการอึดตัวในบางส่วนก็ช่วยให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเรกทิวเลชั่นที่ดีขึ้นได้เช่นเดียว

- การลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ แต่การลดค่าเหล่านี้ก็มีข้อจำกัดอยู่เหมือนกัน เพราะปริมาณเหล่านี้จะเป็นตัวจำกัดกระแสขณะลัดวงจร

บทที่ 3

แนวความคิดและทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขดลวด 3 เฟส ชนิดไม่มีแปรงถ่านและสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง

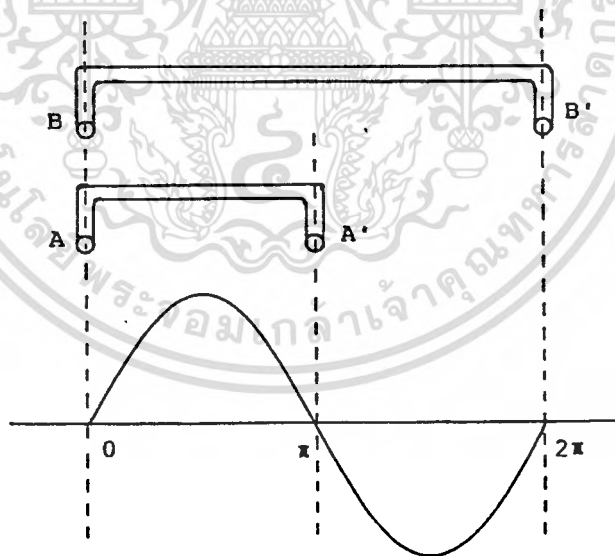
3.1 แนวความคิด

ดังที่กล่าวในบทที่แล้วว่า องค์ประกอบที่สำคัญทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีอยู่ 2 ส่วน ด้วยกันคือ ขดลวดอาร์เมเจอร์ และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก โดยที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์จะได้รับพลังงานจากภายนอกโดยผ่านแปรงถ่านและสลิปริงหรือไดโอด เมื่อไม่มีการส่งพลังงานผ่านแปรงถ่านและสลิปริง และยังไม่มียุติสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่จะส่งพลังงานผ่านไดโอด ไปยังขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จึงไม่มีการต่อถึงกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกับวงจรภายนอกเลย ปัญหาหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไม่มีแปรงถ่านและสามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเองก็คือ จะทำอย่างไรจึงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์นั้น และจะควบคุมรูปร่างและขนาดของสนามแม่เหล็กนั้นได้อย่างไร

โดยทั่วไปสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีพลังงานจากภายนอกทำให้เกิด หรือในกรณีที่ไม่มีพลังงานจากภายนอก ก็อาจเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กตกค้าง ซึ่งจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นกับคุณสมบัติของสารในวงจรแม่เหล็กนั้น สำหรับเหล็กที่ใช้ทำเป็นสเตเตอร์และโรเตอร์ที่มีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมขนาดสนามแม่เหล็กนั้น จะเป็นสารที่มีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างต่ำและเป็นปริมาณน้อยเกินไปที่จะนำมาใช้ในภาวะใช้งานปกติ ดังนั้นจะอาศัยเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างนี้เพียงอย่างเดียว เป็นสนามแม่เหล็กหลักในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะสร้างขึ้นไม่ได้ จึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะส่งพลังงานไปยังขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็ก ในวิทยานิพนธ์นี้จะส่งพลังงานจากภายนอกผ่านทางสนามแม่เหล็กไปยังขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ โดยการสร้างสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ให้มีทิศทางผ่านช่องอากาศและโรเตอร์ ดังนั้นเมื่อโรเตอร์หมุนก็จะเกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กและเกิดกระแสไหลได้เมื่อต่อขดลวดนี้ให้ครบวงจร ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีขนาดแปรตามกระแสไหล ในที่นี้จะเรียกขดลวดที่สเตเตอร์ที่สร้างสนามแม่เหล็กมาตัดกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์นี้ว่า ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ถ้าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์นี้ถูกทำให้มีทิศทาง และขนาดที่แน่นอนบนโรเตอร์ ก็จะเกิดความเร็วสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์กับสเตเตอร์

ดังนั้นถ้ามีขดลวดอีกชุดหนึ่งอยู่บนสเตเตอร์ ก็จะเกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดชุดนี้ โดยมีรูปคลื่นตามรูปร่างของผลลัพธ์การกระจาย(space distribution) ของสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น และมีความถี่ขึ้นกับความเร็วยกกับจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ จึงเห็นได้ว่าถ้าทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กซึ่งมีขั้วและขนาดคงที่บนโรเตอร์ได้แล้ว กลไกการเกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดที่สเตเตอร์ก็จะเหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วโครนัสทั่วไป ขดลวดชุดนี้สามารถจ่ายกระแสไฟให้กับโหลดที่นำมาต่อได้ ในที่นี้จะเรียกขดลวดชุดนี้ว่า ขดลวดอาร์เมเจอร์ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่ามีความเร็วสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นจะต้องหาวิธีการผันขดลวดที่ทำให้ไม่มีการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือทำให้เกิดการหักล้างหมดไปของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นนี้

พิจารณาสถาปัตยกรรมแม่เหล็ก 2 ขั้วจากจำนวน 4 ขั้วที่เกิดจากโรเตอร์ เฉพาะส่วนที่เป็นรูปคลื่นไซน์พื้นฐาน(fundamental sine) ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นในสนามแม่เหล็กรูปขั้ว



สมมติว่าขนาดสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาถึงการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวด AA' และ BB' ขณะที่โรเตอร์หมุน จะเห็นได้ว่า ในกรณีของขดลวด AA' แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ตัวนำ A และ A' จะต่างเฟสกัน 180 องศา ดังนั้นความต่างศักย์ที่ปลายขดลวด AA' จะเป็น 2 เท่าของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำในแต่ละตัวนำ แต่ในกรณีขดลวด BB' แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ตัวนำ B และ B' จะมีเฟสเดียวกัน ดังนั้นความต่างศักย์ที่ปลายขดลวด BB' จะหักล้างกันเป็นศูนย์ ด้วยเหตุผลนี้ ในการออกแบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น จะเป็นขดลวดที่มีระยะขดลวด(coil pitch) ห่างกัน 2 เท่าของระยะขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ จึงเห็นได้ว่าในกรณีนี้จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นจะมีเพียง 2 ขั้ว เท่านั้น การควบคุมขนาดของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ ทำได้โดยการควบคุมขนาดของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่สเตเตอร์

ส่วนวิธีการพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ จะเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดโรเตอร์ทรงกระบอกทั่วไป เพียงแต่จะ ไม่มีการต่อถึงกันทางไฟฟ้าระหว่างขดลวด และแต่ละขดลวดจะต่อกับไดโอดเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของกระแส อันมีผลทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่แน่นอนบนโรเตอร์ จำนวนขั้วบนโรเตอร์จะขึ้นกับความถี่กระแสไฟและความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยหาได้จาก

$$\text{จำนวนขั้วแม่เหล็ก} = (120 * \text{ความถี่กระแสไฟ}) / \text{ความเร็วรอบต่อนาที} \quad (3.1)$$

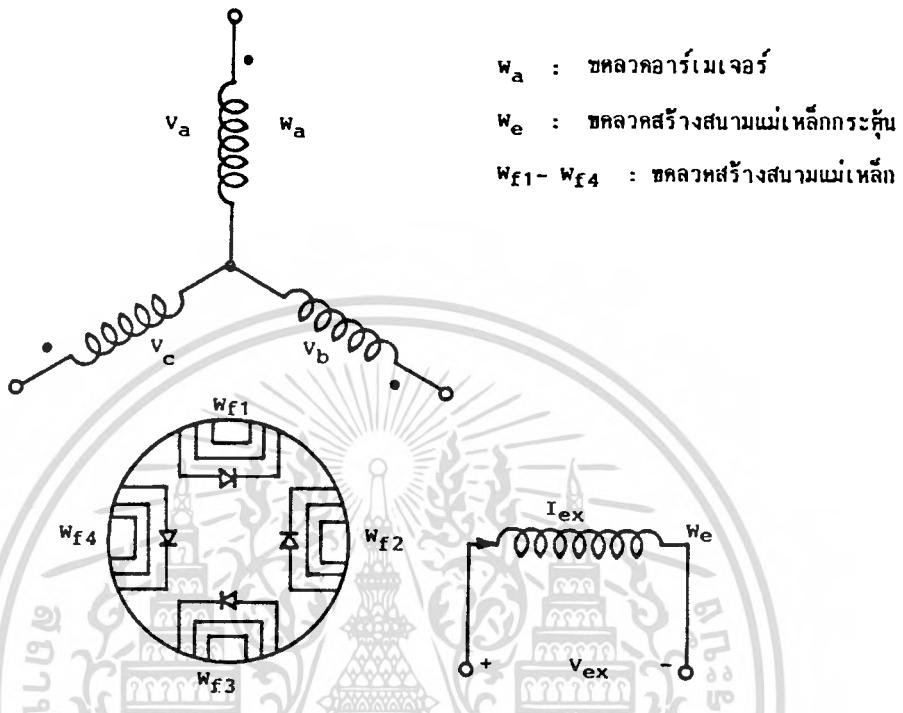
จากแนวความคิดข้างต้นจะสามารถแสดงขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดล่าว ได้ดังรูปที่ 3.2

3.2 การวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้ จะมีสมมุติฐานดังต่อไปนี้คือ

- โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่
- ความต้านทานของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะละทิ้งได้เมื่อเทียบกับค่ารีแอคแตนซ์
- คุณสมบัติของแกนเหล็กเป็นแบบเชิงเส้น(linear)
- การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นมีเฉพาะรูป

คลื่นไซน์พื้นฐานเท่านั้น



รูปที่ 3.2 วงจรเบื้องต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะสร้างขึ้น

ถ้าสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์มีขนาดคงที่ที่ตำแหน่งใดๆ โดยไม่ขึ้นกับเวลาแล้ว ผลรวมศักดาของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กทั้ง 4 ขด คือ

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{f1} \\ \phi_{f2} \\ \phi_{f3} \\ \phi_{f4} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

โดยที่ ϕ_{f1} , ϕ_{f2} , ϕ_{f3} และ ϕ_{f4} เป็นการคล้องเส้นแรงแม่เหล็ก (flux linkage) ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กขดที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมทริกซ์(matrix)การคล่องเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก คือ

$$\begin{bmatrix} \phi_{f1} \\ \phi_{f2} \\ \phi_{f3} \\ \phi_{f4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f & M_{fn} & -M_{fo} & M_{fn} \\ M_{fn} & L_f & M_{fn} & -M_{fo} \\ -M_{fo} & M_{fn} & L_f & M_{fn} \\ M_{fn} & -M_{fo} & M_{fn} & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \\ i_{f4} \end{bmatrix} + M_{ef} I_{ex} \begin{bmatrix} \cos \omega_m t \\ -\sin \omega_m t \\ -\cos \omega_m t \\ \sin \omega_m t \end{bmatrix}$$

(3.3)

โดยที่

L_f = ความเหนี่ยวนำตัวเอง(self inductance) ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

M_{fn} = ความเหนี่ยวนำร่วม(mutual inductance) ระหว่างขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่อยู่ติดกัน

M_{fo} = ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ที่อยู่ตรงข้ามกัน

M_{ef} = ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

ω_m = ความเร็วเชิงมุมทางกลระหว่างขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

I_{ex} = กระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

$i_{f1} - i_{f4}$ = กระแสสร้างสนามแม่เหล็กของขดลวดที่ 1-4

ในกรณีที่รูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ เหมือนกับในกรณีที่จ่ายกระแสไฟตรงให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กแล้ว ϕ_{f1} , ϕ_{f2} , ϕ_{f3} และ ϕ_{f4} จะมีค่าเท่ากันคือ ϕ_f

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่อยู่ติดกันจะมีเฟสต่างกัน 90° และถ้าคิดว่ากระแสมีเฟสห่างกัน 90° เช่นกัน ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสร้างสนามแม่เหล็กในแต่ละขดลวด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} i_{f2}(\alpha/\omega_m) &= i_{f1}[(\alpha+\pi)/\omega_m] \\ i_{f3}(\alpha/\omega_m) &= i_{f2}[(\alpha+\pi)/\omega_m] \\ i_{f4}(\alpha/\omega_m) &= i_{f3}[(\alpha+\pi)/\omega_m] \end{aligned} \quad (3.4)$$

เนื่องจากขดลวดแต่ละขดได้ต่อกับไดโอด ดังนั้นถ้าสมมติคำตอบที่เป็นไปได้ของ i_{f1} เป็นรูปสมการที่ขึ้นกับเวลาคือ $i_{f1} = I_f(1 - \cos \omega_m t)$ แล้ว จะทำให้ได้คำตอบของ i_{f2} i_{f3} , i_{f4} ด้วย คือ

$$\begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \\ i_{f4} \end{bmatrix} = I_f \begin{bmatrix} 1 - \cos \omega_m t \\ 1 + \sin \omega_m t \\ 1 + \cos \omega_m t \\ 1 - \sin \omega_m t \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

โดยที่

I_f = ค่าเฉลี่ยของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

คำตอบในสมการ (3.5) จะให้ขอบเขต(boundary) $\alpha = 0$ ที่ $t = 0$ ของสมการ (3.4) ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} i_{f1}(0/\omega_m) &= 0 \\ i_{f2}(0/\omega_m) &= I_f \\ i_{f3}(0/\omega_m) &= 2I_f \\ i_{f4}(0/\omega_m) &= I_f \end{aligned} \quad (3.6)$$

นำค่าขอบเขตที่เวลา $t = 0$ ในสมการ (3.6) ไปแทนในสมการ (3.3) จะได้

$$\begin{bmatrix} \phi_f \\ \phi_f \\ \phi_f \\ \phi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{fn} I_f - 2M_{fo} I_f + M_{fn} I_f + M_{ef} I_{ex} \\ L_f I_f + 2M_{fn} I_f - M_{fo} I_f \\ M_{fn} I_f + 2L_f I_f + M_{fn} I_f - M_{ef} I_{ex} \\ -M_{fo} I_f + 2M_{fn} I_f + L_f I_f \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$\phi_f = (L_f + 2M_{fn} - M_{fo}) I_f \quad (3.7)$$

แทนสมการ (3.7) ลงในสมการ (3.3)

$$\begin{bmatrix} L_f + 2M_{fn} - M_{fo} \\ L_f + 2M_{fn} - M_{fo} \\ L_f + 2M_{fn} - M_{fo} \\ L_f + 2M_{fn} - M_{fo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f - L_f \cos \omega_m t + M_{fn} + M_{fn} \sin \omega_m t - M_{fo} - M_{fo} \cos \omega_m t + M_{fn} - M_{fn} \sin \omega_m t \\ M_{fn} - M_{fn} \cos \omega_m t + L_f + L_f \sin \omega_m t + M_{fn} + M_{fn} \cos \omega_m t - M_{fo} + M_{fo} \sin \omega_m t \\ -M_{fo} + M_{fo} \cos \omega_m t + M_{fn} + M_{fn} \sin \omega_m t + L_f + L_f \cos \omega_m t + M_{fn} - M_{fn} \sin \omega_m t \\ M_{fn} - M_{fn} \cos \omega_m t - M_{fo} - M_{fo} \sin \omega_m t + M_{fn} + M_{fn} \cos \omega_m t + L_f - L_f \sin \omega_m t \end{bmatrix}$$

$$\frac{+M_{ef} I_{ex}}{I_f} \begin{bmatrix} \cos \omega_m t \\ -\sin \omega_m t \\ -\cos \omega_m t \\ \sin \omega_m t \end{bmatrix}$$

จากเมทริกซ์ข้างบน จะได้ว่า

$$L_f + M_{fo} = \frac{M_{ef} I_{ex}}{I_f}$$

ดังนั้น

$$I_f = \frac{M_{ef} I_{ex}}{L_f + M_{fo}} \quad (3.8)$$

นำสมการ (3.8) แทนในสมการ (3.5) และ (3.7) ตามลำดับ จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \\ i_{f4} \end{bmatrix} = \frac{M_{ef} I_{ex}}{L_f + M_{fo}} \begin{bmatrix} 1 - \cos \omega_m t \\ 1 + \sin \omega_m t \\ 1 + \cos \omega_m t \\ 1 - \sin \omega_m t \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

และ

$$\psi_f = \frac{(L_f + 2M_{fn} - M_{fo})}{L_f + M_{fo}} \frac{M_{ef} I_{ex}}{L_f + M_{fo}} \quad (3.10)$$

การคล้องเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น จะหาได้จากผล
ลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดนั้น คือ

$$\psi_e = L_e I_{ex} + M_{ef} [(i_{f1} - i_{f3}) \cos \omega_m t - (i_{f2} - i_{f4}) \sin \omega_m t] \quad (3.11)$$

แทนสมการ (3.5) ลงในสมการ (3.11)

$$\psi_e = L_e I_{ex} - 2M_{ef} I_f \quad (3.12)$$

แทนสมการ (3.8) ในสมการ (3.12)

$$\psi_e = \frac{(L_e - 2M_{ef}^2) I_{ex}}{L_f + M_{fo}} \quad (3.13)$$

จะเห็นได้ว่า ถ้ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นและความเหนี่ยวนำ ในสมการ (3.13) มีค่าคงที่แล้ว เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นจะมีค่าคงที่ด้วย ดังนั้นจะ ไม่มีการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดชุดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะไร้อโหลด จะหาได้จากการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของผลลัพท์ของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดจากโรเตอร์ ที่คล่องขดลวดอาร์เมเจอร์จากแนวความคิดข้างต้นได้แสดงให้เห็นว่า กลไกการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั่วไป ดังนั้นจำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์จะเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่หาได้จากสมการ (3.1) คือ 4 ขั้ว และความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กจะเป็น 2 เท่าของความเร็วเชิงมุมทางกล ดังนั้นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่อเฟสของขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะไร้อโหลด จะหาได้จาก

$$e_p = -\frac{d}{dt} [M_{af} (i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} + i_{f4}) \cos 2\omega_m t] \quad (3.14)$$

โดยที่
 M_{af} = ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกับขดลวดอาร์เมเจอร์
แทนสมการ (3.5) ลงในสมการ (3.14)

$$\begin{aligned} e_p &= -\frac{d}{dt} [M_{af} I_f (1 - \cos \omega_m t + 1 + \sin \omega_m t + 1 + \cos \omega_m t + 1 - \sin \omega_m t) \cos 2\omega_m t] \\ &= -\frac{d}{dt} (4M_{af} I_f \cos 2\omega_m t) \\ &= 8\omega_m M_{af} I_f \sin 2\omega_m t \\ &= \sqrt{2} E_a \sin 2\omega_m t \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยที่

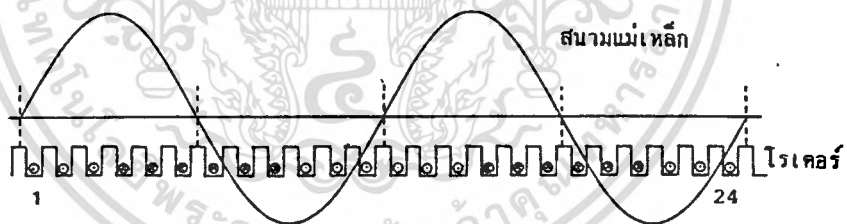
$$E_a = 8\omega_m M_{af} I_f / \sqrt{2}$$

บทที่ 4

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วโครนัส 3 เฟส ชนิดไม่มีปรอทกันและสามารถ
สร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเอง

4.1 การออกแบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

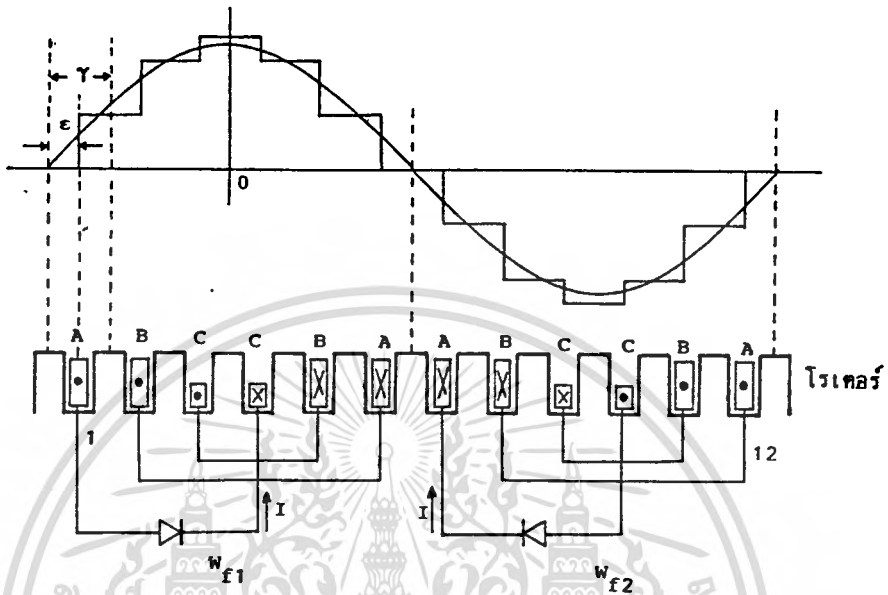
โรเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าที่นำมาดัดแปลงเป็นชนิดทรงกระบอก มีข้อมูลดังต่อไปนี้
จำนวนสล็อต(slot) 24 สล็อต
เส้นผ่าศูนย์กลาง 14.9 ซม.
ความยาวตามแนวแกน 8 ซม.
ความต้องการของการออกแบบคือ เมื่อมีกระแสไฟไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีการกระจายใน 1 ช่วงขั้วเป็นรูปไซน์ และจากสมการที่ 3.1
จะได้ว่าจำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์จะต้องมี 4 ขั้ว ดังนั้นระยะขั้ว จะมีความกว้าง 6 สล็อต
ซึ่งสามารถสร้างภาพประกอบได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ในช่องอากาศ

แต่การเกิดสนามแม่เหล็กที่มีการกระจายตามรูปที่ 4.1 นั้น จะเกิดได้เฉพาะกรณีที่จำนวน
จำนวนมากถึงอนันต์ จนกระแสที่ไหลในตัวนำในช่องสลอตคิดเป็นแผ่นหรือแพนของกระแสได้ แต่
สำหรับในกรณีที่จำนวน 24 สล็อต จะคำนึงถึงการกระจายรูปคลื่นไซน์พื้นฐานของสนามแม่
เหล็กเป็นหลัก ในที่นี้จะตั้งสมมติฐานว่า ระบบที่กำลังพิจารณาเป็นระบบเชิงเส้น ดังนั้นรูปร่าง
การกระจายของสนามแม่เหล็ก จะเหมือนกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหรือแอมป์-เทิร์นของกระแส
ที่ไหลในช่องสลอต ดังนั้นจึงนำรูปที่ 4.1 มาใช้พิจารณาถึงการหาค่าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แอมป์-เทิร์นของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์

โดยที่

I = กระแสที่ไหลในตัวนำ

$\otimes$ = ทิศทางของกระแสที่มุ่งเข้ากระดาด

$\odot$ = ทิศทางของกระแสที่มุ่งออกจากกระดาด

τ = มุมระหว่างสลอต และ $\epsilon = \tau/2$

A, B, C = ตัวนำในช่องสลอตที่มีกระแส I ไหลผ่าน

ความสัมพันธ์หรือรูปคลื่นที่มีคาบแน่นอน เมื่อกระจายด้วยอนุกรมฟูเรียร์จะแทนด้วยผลรวมของรูปคลื่นไซน์พื้นฐานกับรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่ของรูปคลื่นไซน์พื้นฐานหรือฮาร์โมนิก (harmonic) ดังนั้นถ้าให้รูปคลื่นในรูปที่ 4.2 แทนด้วย $AT(\theta)$ เมื่อกระจายด้วยอนุกรมฟูเรียร์ โดยเทียบกับตำแหน่ง 0 จากภาคผนวก ก จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 AT(\theta) &= \frac{4}{\pi} AI \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos(2n-1) \frac{\gamma}{2} \cos(2n-1) \theta \\
 &+ \frac{4}{\pi} BI \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos(2n-1) \frac{3\gamma}{2} \cos(2n-1) \theta \\
 &+ \frac{4}{\pi} CI \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos(2n-1) \frac{5\gamma}{2} \cos(2n-1) \theta
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

จะเห็นได้ว่า $AT(\theta)$ จะเป็นรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากหรือน้อย จะขึ้นกับสัดส่วนจำนวนรอบ A, B และ C จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน $A:B:C$ เท่ากับ $2:2:1$ จะให้การเฉลี่ยรูปไซน์ได้ดี ในการออกแบบจึงเลือกอัตราส่วนนี้ใช้คำนวณหาส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ตามสมการ (4.1) ดังตารางที่ 4.1

ลำดับฮาร์โมนิกที่	เปอร์เซ็นต์ (เทียบกับรูปคลื่นไซน์พื้นฐาน)
1	100
3	6.5
5	0.4
7	0.3
9	2.2
11	9.1
13	-7.7
15	-1.3
17	-0.1
19	-0.1
21	-0.9
23	-4.3

25	4.0
27	0.7
29	0.1
31	0.1
33	0.6
35	2.9
37	-2.7
39	-0.5

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ขนาดฮาร์โมนิกเมื่อเทียบกับขนาดรูปคลื่นฐานันฐาน
โดยที่ $\sigma = \pi/6$, I และ $A = 1$

เนื่องจากจำนวนรอบของตัวนำมีค่าไม่เท่ากันทั้งหมดในขดลวดแต่ละชุด ดังนั้นจะ
เลือกการพันขดลวดแบบ คอนเทนทริก-เช่น และที่ปลายขดลวดแต่ละชุดจะต่อเข้ากับไดโอด
เพื่อกำหนดทิศทางการไหลของกระแสให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่แน่นอน ตามการต่อในรูปที่ 4.2

4.2 การออกแบบขดลวดที่สเตเตอร์

ข้อมูลสเตเตอร์ของเครื่องจักร ไฟฟ้าที่นำมาดัดแปลงคือ

จำนวนสล็อต 36 สล็อต

เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 15.1 ซม.

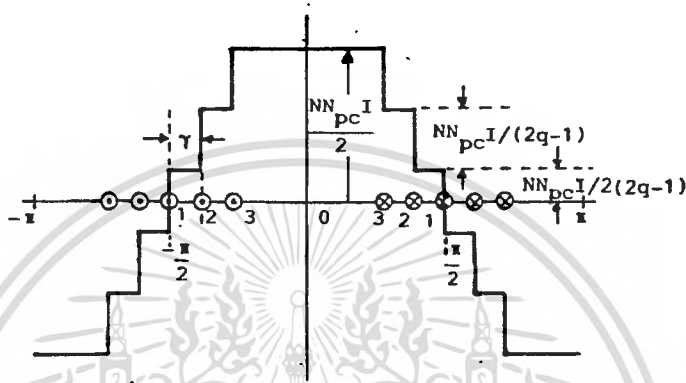
เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก 21.3 ซม.

ความยาวตามแนวแกน 8 ซม

4.2.1 การออกแบบขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น[4] จากบทที่แล้วได้แสดง
ให้เห็นว่า การที่จะทำให้ไม่มีกระแสเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
ดังนั้น ทำได้โดยให้ขดลวดชุดนี้มีระยะขดลวดเป็น 2 เท่าของระยะขั้วของโรเตอร์ ซึ่งเมื่อ
คิดทางสเตเตอร์แล้ว จะมีระยะเท่ากับ 18 สล็อต ในการออกแบบจะใช้วิธีพันขดลวดชุดนี้
แบบ แลป ขึ้นเดียว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการพิจารณาถึงความเหมาะสมของ จำนวนขดลวด

ซึ่งแต่ละขดจะมีจำนวนรอบ N_{PC} เท่ากัน และมีกระแส I ไหลผ่าน ความเป็นไปได้ของจำนวนขดลวดจะมี 2 กรณี คือ

(ก) ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นเป็นจำนวนคี่ N ขด



รูปที่ 4.3 แอมป์-เทอรันของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นเป็นจำนวนคี่
โดยที่ $\gamma = 2\pi/36$, $N = 5$

ถ้าคิดว่าระบบที่กำลังพิจารณานี้เป็นแบบเชิงเส้น สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะแปรตามแอมป์-เทอรัน ของขดลวด โดยที่แอมป์-เทอรันรวมจะเป็นผลรวม แอมป์-เทอรันของขดลวดแต่ละขด จากภาคผนวก ก จะสามารถหารูปคลื่นขายนพื้นฐานและฮาร์โมนิคของแอมป์-เทอรันของแต่ละขดลวดในรูปคลื่นที่ 4.3 ได้คือ

ขดลวดที่

ขนาด

1

$$\frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{PC} I}{2(2q-1)}$$

2

$$\frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{PC} I}{2q-1} \cos(2n-1)\gamma$$

$$3 \quad \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc}}{2q-1} I \cos(2n-1)2\gamma$$

...

...

$$q \quad \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc}}{2q-1} I \cos(2n-1)(q-1)\gamma$$

โดยที่

$$q = \frac{N+1}{2}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

ผลรวมแอมป์-เทอรัน แต่ละฮาร์โมนิกของทุกขดลวดคือ

$$\begin{aligned} AT_{(2n-1)} &= \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc}}{2q-1} I \left[\frac{1 + \cos(2n-1)\gamma}{2} + \cos(2n-1)2\gamma + \dots \right. \\ &\quad \left. + \cos(2n-1)(q-1)\gamma \right] \\ &= \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc}}{2q-1} I \left[\frac{\sin \frac{(2n-1)q\gamma}{2} \cos \frac{(2n-1)(q-1)\gamma}{2}}{\sin \frac{(2n-1)\gamma}{2}} - \frac{1}{2} \right] \\ &= \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc}}{2(2q-1)} \frac{\sin \frac{(2n-1)(2q-1)\gamma}{2}}{\sin \frac{(2n-1)\gamma}{2}} \\ &= \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{N_{pc}}{2} I \frac{\sin \frac{(2n-1)(2q-1)\gamma}{2}}{\sin \frac{(2n-1)\gamma}{2}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.2)~ จะสามารถหาผลของจำนวนขดลวดที่มีต่อขนาดของฮาร์โมนิคต่างๆได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงฮาร์โมนิคที่ 13 เท่านั้น

จำนวน ขดลวด	ขนาดฮาร์โมนิคลำดับที่ (แอมป์-เทอรัน)						
	1	3	5	7	9	11	13
1	0.6366	-0.2122	0.1273	-0.0909	0.0707	-0.0579	0.0490
3	1.8905	-0.5798	0.2910	-0.1532	0.0707	-0.0183	-0.0140
5	3.0870	-0.7920	0.2468	-0.0138	-0.0707	0.0704	-0.0310
7	4.1896	-0.7920	0.0263	0.1437	-0.0707	-0.0299	0.0538
9	5.1650	-0.5798	-0.2130	0.1121	0.0707	-0.0500	-0.0382
11	5.9834	-0.2122	-0.3001	-0.0670	0.0707	0.0640	-0.0047
13	6.6200	0.2122	-0.1728	-0.1580	-0.0707	0.0062	0.0443
15	7.0555	0.5798	0.0780	-0.0410	-0.0707	-0.0682	-0.0522
17	7.2766	0.7920	0.2730	0.1299	0.0707	0.0405	0.0228

ตารางที่ 4.2. ขนาดฮาร์โมนิคที่จำนวนขดลวดต่างๆ เมื่อ $N_{PC} I = 1$

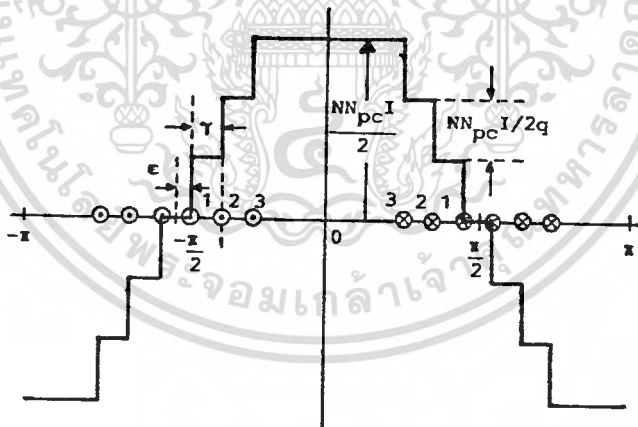
จำนวน ขดลวด	ขนาดฮาร์โมนิคลำดับที่ (เปอร์เซ็นต์)						
	1	3	5	7	9	11	13
1	100.00	-33.33	20.00	-14.29	11.11	-9.09	7.69
3	100.00	-30.67	15.39	-8.10	3.74	-0.97	-0.74
5	100.00	-25.66	7.99	-0.45	-2.29	2.28	-1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7	100.00	-18.90	0.63	3.43	-1.69	-0.71	1.28
9	100.00	-11.22	-4.12	2.17	1.37	-0.97	-0.74
11	100.00	-3.55	-5.02	-1.12	1.18	1.07	-0.07
13	100.00	3.21	-2.61	-2.39	-1.07	0.09	0.67
15	100.00	8.22	1.11	-0.58	-1.00	-0.97	-0.74
17	100.00	10.88	3.75	1.78	0.97	0.56	0.31

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ขนาดฮาร์โมนิคเทียบกับขนาดรูปคลื่นชายฝั่งพื้นฐาน ที่แอมป์-เทอร์นเดียวกัน เมื่อ $N_{PC} I = 1$

(ข) ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นเป็นจำนวนคู่ N ขด



รูปที่ 4.4 แอมป์-เทอร์นของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่เป็นจำนวนคู่ โดยที่ $\sigma = 2\pi/36$, $N = 6$

ด้วยเหตุผลเดียวกับ (ก) จะสามารถหารูปคลื่นชายฝั่งพื้นฐานและฮาร์โมนิค ของแต่ละขดลวดในรูปคลื่นที่ 4.4 ได้คือ

ขดลวดที่

ขนาด

$$\begin{aligned}
 1 & \quad \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc} I}{2q} \cos(2n-1) \epsilon \\
 2 & \quad \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc} I}{2q} \cos(2n-1) (\epsilon + \gamma) \\
 3 & \quad \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc} I}{2q} \cos(2n-1) (\epsilon + 2\gamma) \\
 & \quad \dots \\
 q & \quad \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc} I}{2q} \cos(2n-1) [\epsilon + (q-1)\gamma]
 \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{N}{2} \\
 n &= 1, 2, 3, \dots
 \end{aligned}$$

ผลรวมแอมป์-เทิร์น แต่ละฮาร์โมนิคของทุกขดลวด คือ

$$\begin{aligned}
 AT_{(2n-1)} &= \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc} I}{2q} \{ \cos(2n-1) \epsilon + \cos(2n-1) (\epsilon + \gamma) \\
 & \quad + \cos(2n-1) (\epsilon + 2\gamma) + \dots + \cos(2n-1) [\epsilon + (q-1)\gamma] \} \\
 &= \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{NN_{pc} I}{2q} \{ \cos(2n-1) \epsilon [1 + \cos(2n-1) \gamma \\
 & \quad + \cos(2n-1) 2\gamma + \dots + \cos(2n-1) (q-1) \gamma] \\
 & \quad - \sin(2n-1) \epsilon [\sin(2n-1) \gamma + \sin(2n-1) 2\gamma + \dots \\
 & \quad + \sin(2n-1) (q-1) \gamma] \}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{N_{pc}}{2q} I \left[\frac{\cos(2n-1)\epsilon \frac{\sin(2n-1)q\gamma}{2} \cos \frac{(2n-1)(q-1)\gamma}{2}}{\frac{\sin(2n-1)\gamma}{2}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\sin(2n-1)\epsilon \frac{\sin(2n-1)q\gamma}{2} \frac{\sin(2n-1)(q-1)\gamma}{2}}{\frac{\sin(2n-1)\gamma}{2}} \right] \\
 &= \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{N_{pc}}{2q} I \frac{\sin(2n-1)q\gamma}{\frac{\sin(2n-1)\gamma}{2}} \left\{ [\cos(2n-1)\epsilon \cos \frac{(2n-1)(q-1)\gamma}{2} \right. \\
 &\quad \left. - \sin(2n-1)\epsilon \frac{\sin(2n-1)(q-1)\gamma}{2}] \right\} \\
 &= \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \frac{4}{\pi} \frac{N_{pc}}{2q} I \frac{\sin(2n-1)q\gamma}{\frac{\sin(2n-1)\gamma}{2}} \cos(2n-1) \left[\epsilon + \frac{(q-1)\gamma}{2} \right] \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

จากสมการ(4.3) จะสามารถหาผลของจำนวนขดลวดที่มีต่อขนาดของฮาร์โมนิคต่างๆ เมื่อ $\epsilon = \pi/2$ ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงฮาร์โมนิคที่ 13 เท่านั้น

จำนวน ขดลวด	ขนาดฮาร์โมนิคลำดับที่ (แอมป์-เทอรัน)						
	1	3	5	7	9	11	13
2	1.2684	-0.4100	0.2308	-0.1490	0.1000	-0.0664	0.0414
4	2.4982	-0.7101	0.2967	-0.1019	0.0000	0.0454	-0.0532
6	3.6522	-0.8199	0.1506	0.0793	-0.1000	0.0353	0.0270
8	4.6952	-0.7101	-0.1030	0.1562	0.0000	-0.0696	0.0185
10	5.5955	-0.4100	-0.2831	0.0275	0.1000	0.0123	-0.0508

12	6.3258	0.0000	-0.2609	-0.1373	0.0000	0.0612	0.0468
14	6.8639	0.4100	-0.0523	-0.1215	-0.1000	-0.0541	-0.0094
16	7.1934	0.7101	0.1937	0.0542	0.0000	-0.0242	-0.0347
18	7.3044	0.8199	0.3013	0.1586	0.1000	0.0707	0.0540

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ขนาดฮาร์โมนิกที่จำนวนขดลวดต่างๆ เมื่อ $N_{PC}I = 1$

จำนวน ขดลวด	ขนาดฮาร์โมนิกลำดับที่ (เปอร์เซ็นต์)						
	1	3	5	7	9	11	13
2	100.00	-32.32	18.20	-11.75	7.89	-5.23	3.26
4	100.00	-28.42	11.88	-4.08	0.00	1.82	-2.13
6	100.00	-22.45	4.12	2.17	-2.74	0.97	0.74
8	100.00	-15.12	-2.19	3.33	0.00	-1.48	0.39
10	100.00	-7.33	-5.06	0.49	1.79	0.22	-0.91
12	100.00	0.00	-4.12	-2.17	0.00	0.97	0.74
14	100.00	5.97	-0.76	-1.77	-1.46	-0.79	-0.14
16	100.00	9.87	2.69	0.75	0.00	-0.34	-0.48
18	100.00	11.22	4.12	2.17	1.37	0.97	0.74

ตารางที่ 4.5 ขนาดฮาร์โมนิกเทียบกับขนาดรูปคลื่นชายฝั่งฐาน ที่นอมป์-เทอร์น
เดียวกัน เมื่อ $N_{PC}I = 1$

ในที่นี้จะเลือกจำนวนขดลวดโดยคำนึงถึง ขนาดของรูปคลื่นชายฝั่งฐานและฮาร์โมนิก
เป็นหลัก ซึ่งพิจารณาได้จากตารางที่ 4.3 และ 4.5 สำหรับกรณีที่จำนวนขดลวดเป็นจำนวนคี่
และคู่ตามลำดับ ถ้าให้ความสำคัญผลของฮาร์โมนิกที่ 3 ซึ่งโดยปกติจะมีขนาดสูงกว่าฮาร์โมนิก

อื่นๆแล้ว จากตารางที่ 4.3 จะได้ว่าค่าต่ำสุดที่ได้คือ 3.21 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีจำนวนขดลวด 13 ขด และจากตารางที่ 4.5 ค่าต่ำสุดที่ได้คือ 0.00 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีจำนวนขดลวด 12 ขด ดังนั้นจำนวนรอบที่เหมาะสมที่สุดคือ 12 ขด นอกจากจำนวนขดนั้นจะไม่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกที่ 3 แล้ว ฮาร์โมนิกที่เป็นจำนวนเท่าที่เป็นเลขคี่คือ 9, 15, ... ก็จะไม่ปรากฏอีกด้วยเช่นกัน ส่วนฮาร์โมนิกอื่นๆ คือ 5, 7, 11, 13 จะมีขนาดเท่ากับ -4.12, -2.17, 0.97 และ 0.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

การพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ที่มีระยะขดลวด 18 สล็อต จำนวน 12 ขด แสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเกิดความไม่สมดุลย์ของปลายต่อตัวนำที่อยู่นอกสล็อตอย่างมาก ทำให้เกิดความลำบากในการลงขดลวดชุดอื่นๆ ในบริเวณที่มีปลายต่อตัวนำอยู่มากๆนั้น อีกทั้งยังมีผลทางแม่เหล็กเนื่องจากปลายต่อตัวนำเหล่านี้ ดังนั้นในการพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นนี้ จะใช้การพันตามรูปที่ 4.6 ซึ่งจะทำให้เกิดความสมดุลย์และลดความหนาแน่นของปลายต่อตัวนำได้ดีกว่า โดยที่ไม่ทำให้คุณลักษณะการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าในตัวนำแตกต่างกัน แต่วิธีการพันจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมคือ ขดลวดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ที่มีจำนวนขดลวดเท่าๆกัน และมีระยะขดลวดลดลงเหลือ 12 สล็อต

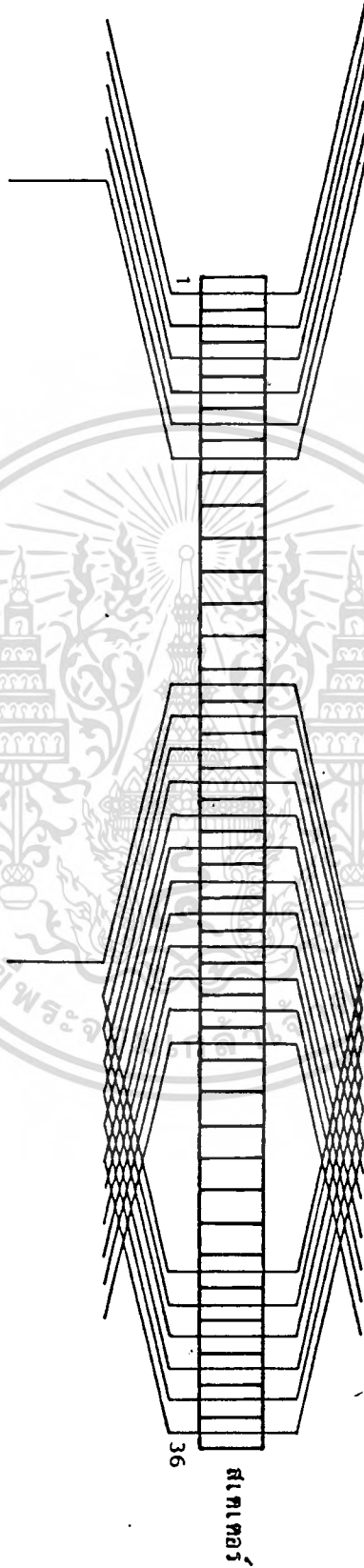
4.2.2 การออกแบบขดลวดอาร์เมเจอร์ ในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นได้ด้วยตัวเองนั้น พลังงานที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กจะได้จากขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยต่อกับ เเรดิฟายเออร์แล้วนำศักดากระแสไฟตรงมาป้อนให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ดังนั้นขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟให้กับทั้งโหลดและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แยกแยะระหว่างขดลวดที่จ่ายกระแสไฟให้กับโหลด กับขดลวดที่จ่ายกระแสไฟให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยจะเรียกว่าขดลวดอาร์เมเจอร์หลักและขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วยตามลำดับ

(ก) การออกแบบขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก จากความต้องการกระแสไฟความถี่ 50 เฮิรตซ์ ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์จะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ โดยหาได้จากสมการ (3.1)

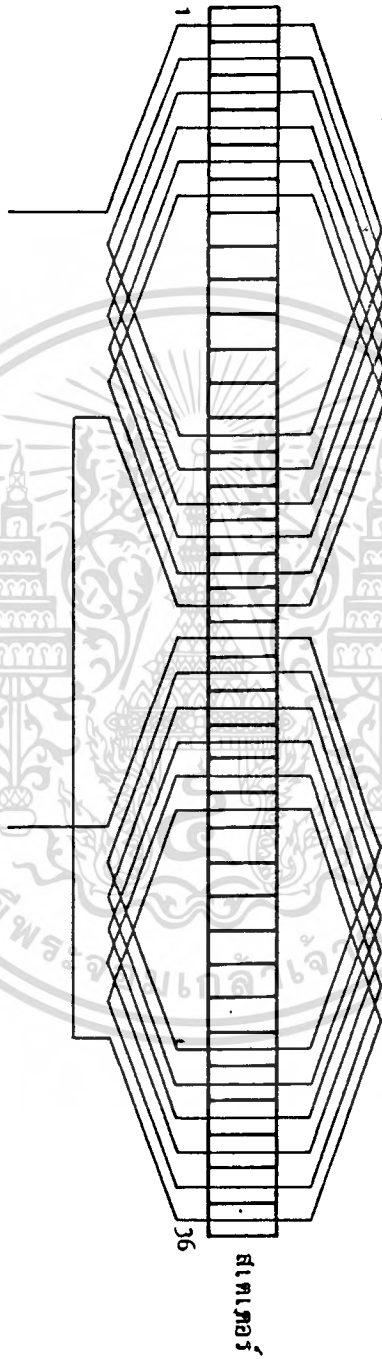
$$\text{จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์} = 120 * 50 / 1500$$

$$= 4$$

$$\text{สล็อตต่อขั้วต่อเฟส} (n_s) = 3$$



รูปที่ 4.5 การนับมอดูลสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กกระบอกที่มีระยะมอดูล 18 สลิต



รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางสร้างสามแม่เหล็กการระเหยมีระยะขนาด 12 สลัก

$$\text{มุมระหว่างสลิต}(\gamma) = 20^\circ$$

แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดลวดแต่ละเฟสที่ฮาร์โมนิคต่างๆ หาได้จาก

$$E_p' = 4.44 K_d' K_p' N \phi' f'$$

โดยที่

$$K_d' = \frac{\sin(2n-1)n_s \gamma}{n_s \sin \frac{(2n-1)\gamma}{2}} \quad (4.4)$$

$$K_p' = \frac{\sin(2n-1)(180^\circ - \rho)}{2} \quad (4.5)$$

$$\phi' = \phi_{(2n-1)}$$

$$f' = f_{(2n-1)}$$

$$(180^\circ - \rho) = \text{ระยะขดลวด}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

จากสมการ (4.4) สามารถแสดงค่า แฟกเตอร์การกระจาย(distribution factor)สำหรับฮาร์โมนิคต่างๆ เมื่อจำนวนสลิตต่อขั้วต่อเฟสเปลี่ยนแปลงไป ดังตารางที่ 4.6

ลำดับ ฮาร์โมนิค ที่	สลิตต่อขั้วต่อเฟส (n_s)					
	2	3	4	5	6	∞
1	0.9659	0.9598	0.9577	0.9567	0.9561	0.9549
3	0.7071	0.6667	0.6533	0.6472	0.6440	0.6366
5	0.2588	0.2176	0.2053	0.2000	0.1972	0.1910
7	-0.2588	-0.1774	-0.1576	-0.1494	-0.1453	-0.1364

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9	-0.7071	-0.3333	-0.2706	-0.2472	-0.2357	-0.2122
11	-0.9659	-0.1774	-0.1261	-0.1095	-0.1017	-0.0868
13	-0.9659	0.2176	0.1261	0.1022	0.0920	0.0735

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) แฟคเตอร์การกระจาย(K_d')

จากสมการ (4.5) จะสามารถแสดงค่า แฟคเตอร์ระยะขดลวด(pitch factor) สำหรับรูปคลื่นซ้ายพื้นฐานที่จำนวนสลิตต่อขั้วและระยะขดลวดต่างๆ ดังตารางที่ 4.7 และค่าแฟคเตอร์ระยะขดลวด สำหรับฮาร์โมนิกที่ระยะขดลวดต่างๆ ดังตารางที่ 4.8

สลิตต่อขั้ว	ระยะขดลวด ($180^\circ - \mu$)										
	180°	168°	165°	160°	156°	150°	144°	140°	135°	132°	120°
3	1.0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.8660
6	1.0000	-	-	-	-	0.9659	-	-	-	-	0.8660
9	1.0000	-	-	0.9848	-	-	-	0.9397	-	-	0.8660
12	1.0000	-	0.9914	-	-	0.9659	-	-	0.9239	-	0.8660
15	1.0000	0.9945	-	-	0.9781	-	0.9511	-	-	0.9135	0.8660

ตารางที่ 4.7 แฟคเตอร์ระยะขดลวด(K_p)

ลำดับฮาร์โมนิกที่	ระยะขดลวด (สลิต)						
	3	4	5	6	7	8	9
1	0.5000	0.6428	0.7660	0.8660	0.9397	0.9848	1.0000
3	1.0000	0.8660	0.5000	0.0000	-0.5000	-0.8660	-1.0000
5	0.5000	-0.3420	-0.9397	-0.8660	-0.1736	0.6428	1.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7	-0.5000	-0.9848	-0.1736	0.8660	0.7660	-0.3420	-1.0000
9	-1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	-1.0000	0.0000	1.0000
11	-0.5000	0.9848	-0.1736	-0.8660	0.7660	0.3420	-1.0000
13	0.5000	0.3420	-0.9397	0.8660	-0.1736	-0.6428	1.0000

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) แพลเตอร์ระยะขดลวด(K'_p) เมื่อ สลิตต่อนิ้ว = 9

จากตารางที่ 4.6 และ 4.8 จะสามารถหาแพลเตอร์การพันขดลวด(winding factor) ได้ดังตารางที่ 4.9

ลำดับ ฮาร์โมนิก ที่	ระยะขดลวด (สลิต)						
	3	4	5	6	7	8	9
1	0.4799	0.6170	0.7352	0.8312	0.9019	0.9452	0.9598
3	0.6667	0.5774	0.3334	0.0000	-0.3334	-0.5774	-0.6667
5	0.1088	-0.0744	-0.2045	-0.1884	-0.0378	0.1399	0.2176
7	0.0887	0.1747	0.0308	-0.1536	-0.1359	0.0607	0.1774
9	0.3333	0.0000	-0.3333	0.0000	0.3333	0.0000	-0.3333
11	0.0887	-0.1747	0.0308	0.1536	-0.1359	-0.0607	0.1774
13	0.1088	0.0744	-0.2045	0.1884	-0.0378	-0.1399	0.2176

ตารางที่ 4.9 แพลเตอร์การพันขดลวด($K'_w = K'_d K'_p$) เมื่อ สลิตต่อนิ้ว = 9

จากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงขนาดฮาร์โมนิก เมื่อเทียบกับขนาดรูปคลื่นชายเนินพื้นฐานของสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ เมื่อมีกระแสไฟตรงไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ฮาร์โมนิกที่มีอยู่จะทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์อย่างไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไว้ก็ตามฮาร์โมนิกที่มีขนาดเกิน 5 เปอร์เซนต์ของรูปคลื่นชายฝั่งฐาน จะมีเพียงฮาร์โมนิกที่ 3, 11 และ 13 ซึ่งมีขนาด 6.5, 9.1 และ -7.7 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ

สำหรับการออกแบบขดลวดอาร์เมเจอร์ จะขึ้นกับการพิจารณาค่าแฟคเตอร์การกระจายและแฟคเตอร์ระยะขดลวดในตารางที่ 4.6 และ 4.8 ตามลำดับ จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ฮาร์โมนิกต่างๆจะน้อยกว่าเมื่อขดลวดมีการพันแบบคอนเท็นทริก แต่อย่างไรก็ตามจะมีผลดีกว่าในแง่ของรูปร่างของรูปคลื่น อาร์เมเจอร์รีแอกชั่นจะน้อยกว่า และการถ่ายเทความร้อนจากตัวนำจะดีกว่าด้วย

ผลของแฟคเตอร์ระยะขดลวดพิจารณาได้จากตารางที่ 4.7 ในกรณีที่จำนวนสลิตต่อขั้วต่อเฟสต่างๆ และจากตารางที่ 4.8 ในกรณีที่จำนวนสลิตต่อขั้วต่อเฟสเท่ากับ 3 จะเห็นได้ว่าผลของระยะขดลวดที่น้อยกว่าระยะขั้ว จะทำให้ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ฮาร์โมนิกต่างๆ แตกต่างไปจากเมื่อขดลวดมีระยะขดลวดเท่ากับระยะขั้ว ดังนั้นโดยการเลือกระยะขดลวดที่เหมาะสมจะทำให้สามารถจำกัดหรือลดฮาร์โมนิกที่ต้องการลงไปได้ สำหรับการออกแบบขดลวดอาร์เมเจอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ จะคำนึงถึงผลของฮาร์โมนิกที่ 3 และฮาร์โมนิกที่เป็นจำนวนเท่าของฮาร์โมนิกที่ 3 เป็นหลัก ดังนั้นจึงเลือกระยะขดลวดเท่ากับ 6 สลิต

สำหรับผลของแฟคเตอร์การกระจายและแฟคเตอร์ระยะขดลวด ที่มีต่อการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฮาร์โมนิกอื่นๆ จะพิจารณาได้จากตารางที่ 4.9 ซึ่งเป็นผลคูณของแฟคเตอร์ทั้งสองและเรียกว่า แฟคเตอร์การพันขดลวด

(ข) การออกแบบขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย จะเหมือนกับขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก

4.3 การหาจำนวนตัวนำของแต่ละขดลวด

4.3.1 การหาจำนวนตัวนำของขดลวดที่สเตเตอร์ ดังได้กล่าวมาแล้วว่าที่สเตเตอร์จะประกอบด้วย

- ขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก
- ขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย
- ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

ในขั้นแรกจะคิดว่า ที่สเตเตอร์มีขดลวดเพียง 2 ชุด คือขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น พื้นที่ของขดลวดทั้ง 2 ชุด ในสลิต จะต้องมีความสัมพันธ์กัน

เพราะพื้นที่ของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นจะแทนจำนวนแอมป์-เทิร์น ของขดลวด ส่วนพื้นที่ของขดลวดอาร์เมเจอร์จะแทนกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น ในกรณีที่แอมป์-เทิร์นของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นน้อยเกินไป ก็จะไม่สามารถทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าถึงค่าที่ต้องการ แต่ถ้าแอมป์-เทิร์นมากเกินไปจะไปลดพื้นที่ของขดลวดอาร์เมเจอร์นั้นหมายถึงกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ลดลงด้วย ในการหาสัดส่วนพื้นที่นี้ พบว่าถ้าไม่มีการอิ่มตัวของแกนเหล็กแล้ว ค่าแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ที่มีตัวนำขนาดเดียวกันจะสูงสุดเมื่อพื้นที่รวมของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นเป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่ตัวนำทั้งหมดในสล็อต

จากการวัดพื้นที่สล็อตที่สามารถบรรจุตัวนำได้ประมาณ 49 ตร.มม. ดังนั้นถ้าเลือกขดลวด SWG. 19 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 0.825 ตร.มม. เป็นขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น จะได้ว่ามีจำนวนรอบเท่ากับ 30 รอบ ซึ่งให้พื้นที่รวมเท่ากับ 25 ตร.มม. พื้นที่ที่เหลือจะใช้บรรจุขดลวดอาร์เมเจอร์หลักและขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย จำนวนรอบของขดลวดทั้ง 2 ชุด จะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ เพราะถ้าจำนวนรอบมากเกินไปจะทำให้ตัวนำมีขนาดเล็กซึ่งทำให้มีนิกัดกำลังต่ำ แต่ถ้าจำนวนรอบน้อยเกินไปจะทำให้ต้องใช้แอมป์-เทิร์นสูง กระแสในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นจะถึงนิกัดก่อนที่กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์จะถึงนิกัด ทำให้มีนิกัดกำลังต่ำเช่นเดียวกัน ดังนั้นความเหมาะสมในการออกแบบคือ การที่ขดลวดทั้ง 3 ชุด ควรถึงนิกัดกระแสพร้อมๆกัน ในที่นี้ได้เลือกขดลวดอาร์เมเจอร์หลักให้มีจำนวนรอบเท่ากับ 100 รอบ ส่วนการกำหนดจำนวนรอบของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย จะต้องพิจารณาถึงศักดาที่ใช้ในการป้อนพลังงานให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ซึ่งจะขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดโดยที่จะมีขนาดใกล้เคียงกับค่าความต้านทานของขดลวด ที่หาได้จากจำนวนรอบคูณด้วยความยาวเฉลี่ยต่อรอบคูณด้วยความต้านทานต่อหน่วยความยาว ซึ่งจะหาความต้านทานได้ประมาณ 7 โอห์ม ถ้าให้ขดลวดมีความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 4-5 แอมป์ต่อตร.มม. และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นจะทนกระแสได้ประมาณ 4 แอมป์ ดังนั้นศักดาต่ำสุดที่คร่อมขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นประมาณ 28 โวลต์ เพื่อเป็นการชดเชยกับความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อขดลวดเกิดความร้อน และจากการที่ใช้ศักดาเป็นพัลส์ รวมถึงการเพิ่มการตอบสนองของวงจรรักษาศักดา จึงสร้างแหล่งพลังงานที่มีศักดา 40 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ถ้าแหล่งพลังงานนี้ได้จากการเรกติฟายศักดาของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วยแบบเต็มลูกคลื่น(full wave) ที่มีคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เป็นตัวกรอง(filter)การกระเพื่อมของศักดา ในการออกแบบนี้จะคิดว่าศักดาไฟตรงมีขนาดเท่ากับค่าสูงสุด(peak) ของศักดารูปซายน์ และขดลวดมีการต่อแบบวาย(Y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์จากเอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ศักดาต่อเฟสของขดลวดคือ $40/\sqrt{6}$ หรือ 16.33 โวลต์ จากค่าที่ได้นำไปเทียบกับจำนวนรอบของขดลวดอาร์เมเจอร์หลักที่ให้ศักดา 220 โวลต์ ที่ 100 รอบ จะได้จำนวนรอบของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วยเท่ากับ 7.4 รอบ หรือค่าที่ใช้จริงคือ 8 รอบ

ในการเลือกขนาดขดลวดอาร์เมเจอร์หลักและขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย จากการที่ทราบว่าร่วรวมของพื้นที่ขดลวดทั้งสองชุดจะเท่ากับพื้นที่ที่เหลือจากการบรรจุขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24 ตร.มม. เนื่องจากพิกัดกระแสของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นมีค่าประมาณ 4 แอมป์ ดังนั้นขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วยจะต้องมีพิกัดกระแสอย่างต่ำ 3.3 แอมป์ ในที่นี้ได้เลือกขดลวด SWG.19 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 0.825 ตร.มม. พื้นที่หน้าตัดรวมของขดลวดอาร์เมเจอร์หลักเท่ากับ $(24 - 0.825 \times 8) / 100 = 0.174$ ตร.มม. ซึ่งใกล้เคียงกับขดลวด SWG.26 ที่มีพื้นที่หน้าตัด 0.167 ตร.มม. โดยจะทนกระแสได้ประมาณ 0.7 แอมป์

จากข้อมูลข้างต้น ถ้าเลือกการพันแบบแลป 2 ชั้น สำหรับขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้ง 2 ชุด จะสามารถสรุปการพันขดลวดทั้ง 3 ชุด ได้ดังนี้คือ

ขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	ขั้ว
วิธีการพัน	แลป 2 ชั้น	3 เฟส
ระยะขั้ว	9	สล็อต
ระยะขดลวด	6	สล็อต
จำนวนรอบต่อชุด	50	รอบ

ขนาดตัวนำ SWG. 26

การต่อขดลวด เดลต้า/วาย

ขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	ขั้ว
วิธีการพัน	แลป 2 ชั้น	3 เฟส
ระยะขั้ว	9	สล็อต
ระยะขดลวด	6	สล็อต
จำนวนรอบต่อชุด	4	รอบ

ขนาดตัวนำ SWG. 19

การต่อขดลวด ยาย

ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	2	ขั้ว
วิธีการพัน	แฉป	1 ชั้น 1 เฟส
ระยะขั้ว	18	สล็อต
ระยะขดลวด	12	สล็อต
จำนวนขดลวด	12	ขด
จำนวนรอบต่อขด	30	รอบ
ขนาดตัวนำ	SWG. 19	

จากข้อมูลข้างบน สามารถแสดงภาพคลี่(developed diagram) ของการพันขดลวดทั้ง 3 ชุด ได้ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8

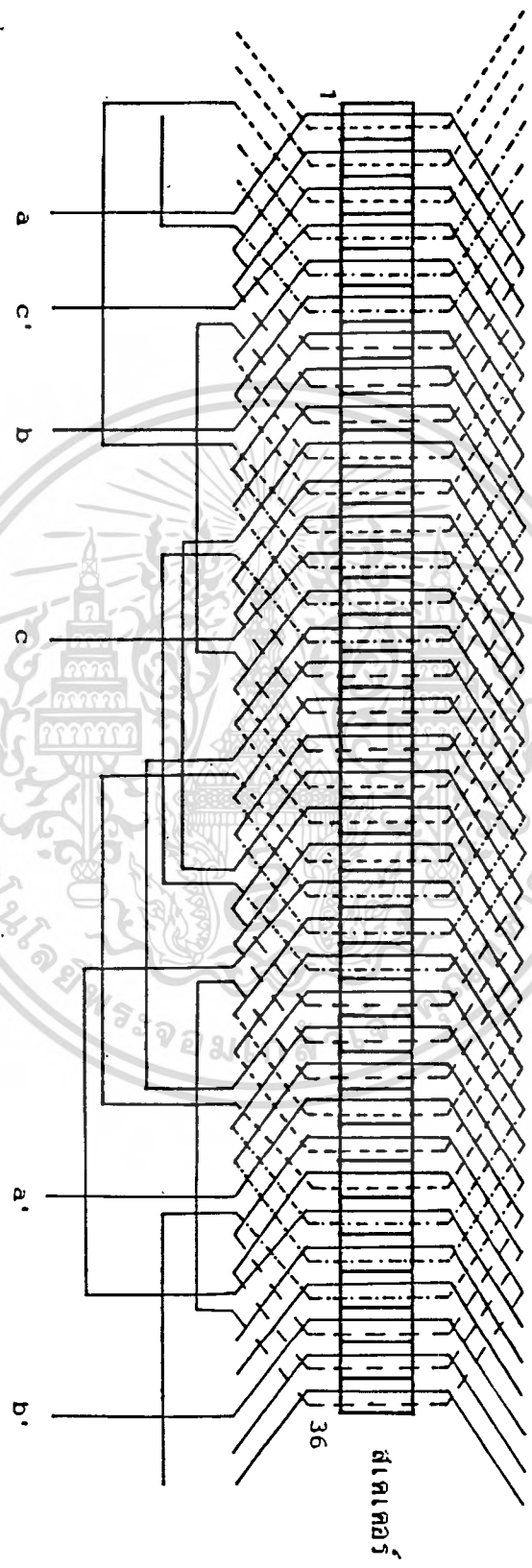
4.3.2 การหาจำนวนตัวนำของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จากหัวข้อที่ 4.1 จะได้ว่าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก มีวิธีการพันแบบคอนเซนทริก-เซน แต่ละชุดมีขดลวด 3 ชุด มีอัตราส่วน $A:B:C$ เป็น $2:2:1$ ดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากกระแสที่ไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะเป็นไปตามสมการที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าจำนวนขดลวดจะมีผลต่อขนาดกระแสที่ไหลในขดลวด เนื่องจากทำให้ความเหนี่ยวนำในสมการเปลี่ยนไป แต่จากการสังเกตพบว่าสำหรับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นใดๆที่กระแสค่าเดียวกันแล้ว แอมป์-เทิร์นของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กจะมีค่าคงที่เมื่อพื้นที่หน้าตัดรวมในสล็อตเท่าเดิม ในที่นี้จะใช้ลวดตัวนำขนาด SWG.20 โดยมีอัตราส่วน $A:B:C$ เป็น $100:100:50$ รอบ

ดังนั้นวิธีการพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จะเป็นดังข้อมูลข้างล่าง

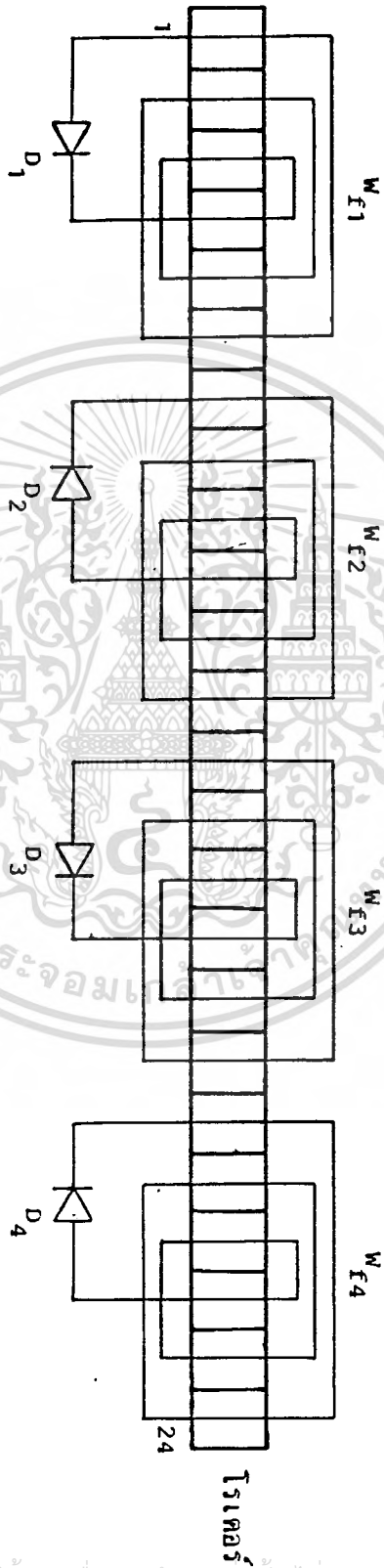
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	ขั้ว
วิธีการพัน	คอนเซนทริก-เซน	1 ชั้น
ระยะขดลวด	$A:B:C$	$5:3:1$ สล็อต
จำนวนรอบต่อขด	$A:B:C$	$100:100:50$ รอบ
ขนาดตัวนำ	SWG.20	

จากข้อมูลข้างบน สามารถแสดงภาพคลี่ของการพันขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กได้ดัง

รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แผนภูมิการพันมอดลวอาร์เมเจอร์ทั้ง 2 ชุด

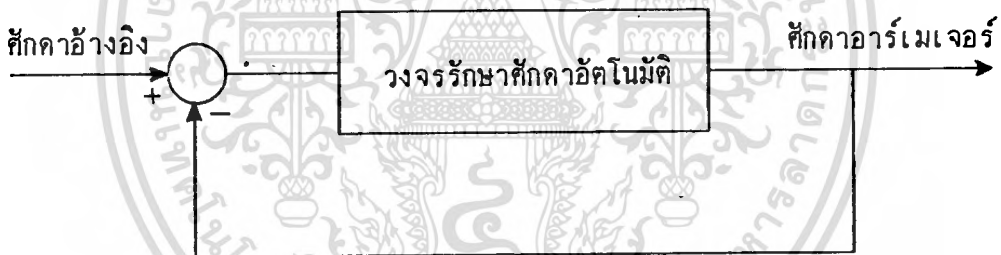


รูปที่ 4.8 แผนภูมิการไหลของพลังงานแม่เหล็ก

บทที่ 5

การสร้างศักดาและการควบคุมศักดาและความถี่

ดังได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.3 แล้วว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถถูกออกแบบให้มีแรงกิวเลชันประจำตัวที่ดีมากได้ อย่างไรก็ตามในแง่ของความประหยัด จะไม่มีการออกแบบแรงกิวเลชันให้ดี จนกระทั่งไม่จำเป็นต้องใช้วงจรภายนอกมาช่วยในการรักษาศักดาที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ วงจรดังกล่าวนี้จะทำหน้าที่ปรับแอมป์-เทอร์นของขั้วแม่เหล็กให้เหมาะสมกับขนาดและประเภทของโหลด โดยจะมีส่วนที่คอยเปรียบเทียบศักดาของอาร์เมเจอร์กับค่าที่ได้ตั้งเอาไว้ ถ้าศักดาเพิ่มขึ้นวงจรจะลดแอมป์-เทอร์น ของขั้วแม่เหล็ก แต่ถ้าศักดาน้อยลงวงจรก็จะเพิ่มแอมป์-เทอร์นของขั้วแม่เหล็ก หลักการดังกล่าวสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การทำงานของวงจรรักษาศักดาอัตโนมัติ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ออกแบบวงจรรักษาศักดาอัตโนมัติ ให้ทำหน้าที่ปรับกระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยการควบคุมความกว้างของพัลส์(pulse) ศักดาที่มีขนาด 40 โวลต์ ที่ได้จากการเรกติฟายศักดากระแสสลับของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย ด้วยความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ โดยใช้ไอซี TL494 ทำหน้าที่สร้างพัลส์มาควบคุมการสวิตชิง(switching) ของทรานซิสเตอร์ (transistor)หลัก และภายในไอซียังมีวงจรที่สามารถถูกออกแบบให้มีการป้อนกลับ เพื่อให้วงจรรักษาศักดาให้คงที่ได้อย่างอัตโนมัติ นอกจากนั้นยัง ได้สร้างวงจรตรวจสอบศักดาและความถี่ ในกรณีที่อาจมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าที่ตั้งเอาไว้ในช่วงเวลาที่ต่อเนื่องระยะหนึ่ง วงจรจะตัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

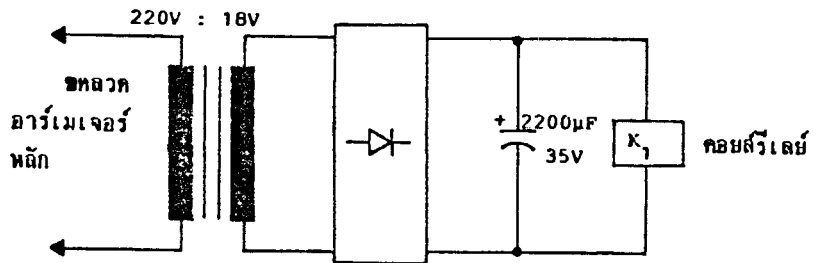
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งวงจรรักษาคัดเอาต์โมเมนต์และวงจรควบคุมศักดาและความถี่ นอกจากจะมีส่วนประกอบเป็นวงจรย่อยที่ทำหน้าที่ต่าง ๆ กันแล้ว ยังต้องมีความสัมพันธ์ในการทำงานอย่างเป็นขั้นตอนร่วมกับคุณลักษณะอย่างอื่น ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การสร้างศักดา

5.1.1 ศักดาเริ่มต้น เมื่อโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุน จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ได้ แม้ว่า จะไม่มีการให้พลังงานกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเลยก็ตาม เนื่องจากจะมีเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็ก จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กตกค้างนี้จะขึ้นกับคุณสมบัติของแกนเหล็กนั้นซึ่งจะมีค่าไม่มาก ในที่นี้ได้ใช้คาปาซิเตอร์ C_u ขนาด 17 ไมโครฟารัด 440 โวลท์ ต่อคร่อมขดลวดอาร์เมเจอร์หลักเพียงเฟสเดียวดังในรูปที่ 5.2 เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่ไม่สมดุลย์เมื่อกดสวิตช์ S_u ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนทั้งในทิศทางเดียวกันและตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของโรเตอร์ สนามแม่เหล็กที่หมุนในทิศทางเดียวกับโรเตอร์ จะมีความเร็วสัมพันธ์กับโรเตอร์เป็นศูนย์ ส่วนสนามแม่เหล็กที่หมุนในทิศทางตรงข้ามกับโรเตอร์จะมีความเร็วสัมพันธ์เป็น 2 เท่าของความเร็วเชิงโคโรนัส จะตัดกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ทำให้เกิดกระแสในขดลวดนั้น กระแสที่ไหลนี้จะทำให้สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์มีขนาดมากขึ้น เป็นผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์มีค่ามากขึ้น กระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์ C_u ก็จะมีค่ามากขึ้น สนามแม่เหล็กหมุนจากการที่จ่ายโหลดไม่สมดุลย์จะมากขึ้นตาม การสร้างศักดาจะเป็นไปในลักษณะที่เสริมกันไปมาแบบนี้ และมีการสร้างศักดาอย่างรวดเร็ว เมื่อศักดาสูงถึงค่าที่ต้องการจะมีรีเลย์ซึ่งมีไฟเลี้ยงคอยันที่มีศักดาแปรตามศักดาเฟสของขดลวดที่ต่อคาปาซิเตอร์ C_u สั่งหน้าสัมผัส S_1 ให้ตัดคาปาซิเตอร์ C_u ออกจากวงจร จากนั้นวงจรรักษาคัดเอาต์โมเมนต์ก็จะรับช่วงทำงานต่อไป

5.1.2 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงคอยล์รีเลย์ จะได้จากการเรกติฟายศักดาเฟสของขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก ที่แปลงลงมาให้เหมาะสมกับพิกัดศักดาของคอยล์รีเลย์ ดังวงจรในรูปที่ 5.3 ระดับศักดาของขดลวดอาร์เมเจอร์หลักจะให้รีเลย์ตัดคาปาซิเตอร์ C_u ออกนั้น จะขึ้นกับการเลือกค่าศักดาทางทุติยภูมิของหม้อแปลง อย่างไรก็ตามการเลือกค่าศักดานี้จะต้องคำนึงค่าศักดาที่จ่ายให้กับคอยล์ในภาวะปกติด้วย ขนาดของคาปาซิเตอร์ในวงจรจะต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้



รูปที่ 5.3 วงจรจ่ายไฟเลี้ยงคอยล์รีเลย์

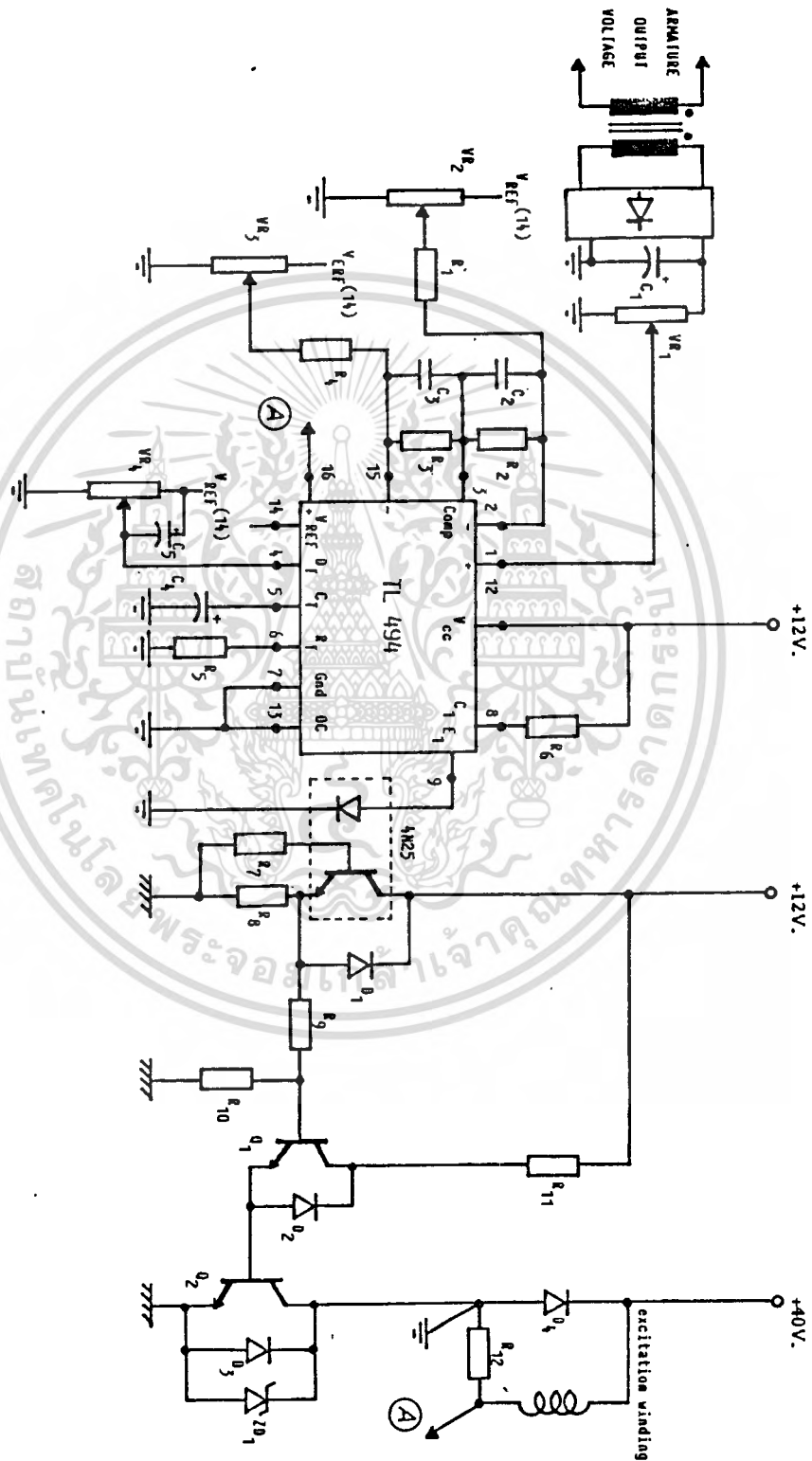
รีเลย์ยังคงทำงานอยู่ได้ ตั้งแต่ช่วงเวลาที่เกิดคาปาซิเตอร์ C_u ออก จนถึงภาวะการทำงานปกติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

5.1.3 วงจรเรกติฟายเออร์ของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย ในรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าศักดากระแสสลับของขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วยจะถูกเรกติฟายแบบเต็มลูกคลื่น เพื่อจ่ายศักดากระแสตรงให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ขณะที่คาปาซิเตอร์ C_u ต่อเข้ากับขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก และกำลังสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่นั้น ขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วยก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้วยเช่นกัน แต่เมื่อตัดคาปาซิเตอร์ C_u ออกจากวงจร ศักดาของขดลวดทั้งสองชุดจะหมดไปในทันที ดังนั้น จะต้องมีการเก็บพลังงานในขณะที่เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวด โดยการต่อคาปาซิเตอร์ C_u ที่มีค่ามากพอ เข้ากับเรกติฟายเออร์ทางด้านศักดากระแสตรง เพื่อที่จะจ่ายพลังงานให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ในตอนที่ตัดคาปาซิเตอร์ C_u ออก จนกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเข้าสู่ภาวะการทำงานปกติ ในที่นี้ใช้คาปาซิเตอร์ C_u ขนาด 11500 ไมโครฟารัด 150 โวลท์ นอกจากคาปาซิเตอร์ C_u จะมีประโยชน์ในการเก็บพลังงานในขณะสร้างศักดาแล้ว ในภาวะปกติยังเป็นตัวรองการกระเพื่อมของศักดา ทำให้วงจรรักษาศักดาอัตโนมัติทำงานได้ดีขึ้นด้วย

5.2 วงจรรักษาศักดาอัตโนมัติ

วงจรรักษาศักดาอัตโนมัติแสดงไว้ในรูปที่ 5.4 โดยมีรายละเอียดของส่วนประกอบและหลักการทำงานดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

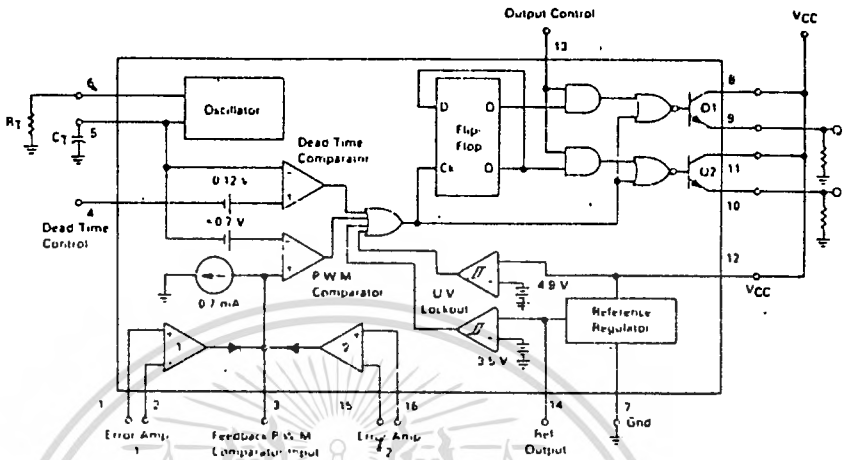


รูปที่ 5.4 วงจรรีขัณหาต์ถาอืด โนมต

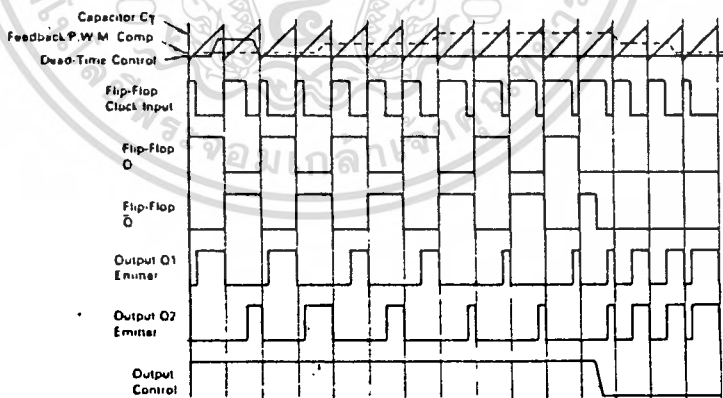
ค่าของอุปกรณ์ในวงจรมีดังต่อไปนี้

R_1	= 4.7 K Ω	VR_3	= 100 K Ω
R_2	= 100 K Ω	VR_4	= 100 K Ω
R_3	= 2.2 M Ω	C_1	= 100 μ F
R_4	= 4.7 K Ω	C_2	= 0.05 μ F
R_5	= 110 K Ω	C_3	= 0.1 μ F
R_6	= 1 K Ω	C_4	= 0.01 μ F
R_7	= 562 K Ω	C_5	= 220 μ F
R_8	= 8.2 K Ω	D_1	= 1N4043
R_9	= 24 K Ω	D_2	= 1N4043
R_{10}	= 10 K Ω	D_3	= 1N3106
R_{11}	= 1 K Ω	D_4	= ERD51-01
R_{12}	= 0.1 Ω	ZD_1	= 75 V 5 W
VR_1	= 10 K Ω	Q_1	= 2N2222A
VR_2	= 100 K Ω	Q_2	= MJ11016

5.2.1 ไอซี TL494 โครงสร้างภายในและการทำงานของ TL494 สามารถแสดงได้ในรูปที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ โดยเป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมความกว้างของพัลส์ที่เป็นเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ที่อยู่ภายในไอซีคือ Q_1 และ Q_2 ความถี่ของพัลส์ได้จากออสซิลเลเตอร์(oscillator) ที่กำหนดโดยความต้านทาน R_T และคาปาซิเตอร์ C_T ซึ่งสามารถหาได้โดยประมาณจาก $f_{osc} = 1.1/(C_T R_T)$ ออสซิลเลเตอร์จะผลิตสัญญาณฟันเลื่อย(sawtooth) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณเดดไทม์(dead time)จากขา 4 ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาที่ไม่ให้กระแสของทรานซิสเตอร์ และเปรียบเทียบกับเอาต์พุตจากขา 3 ของวงจรขยายความผิดพลาด(error amp.)ทั้งสองตัว เอาต์พุตจากวงจรคอมแพเรเตอร์(comparator)ทั้งสองจะต่อเข้ากับ ออร์เกต(or gate) เอาต์พุตของออร์เกตที่ได้ จะเป็นการเลือกเอาต์พุตของวงจรคอมแพเรเตอร์ทั้งสอง ที่ต้องการการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ในช่วงเวลาที่น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เอาต์พุตนี้จะใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาของฟลิปฟล็อป(flip flop) และยังถูกนำไปต่อกับนอร์เกต(nor gate) ที่ขับทรานซิสเตอร์เอาต์พุต โดย



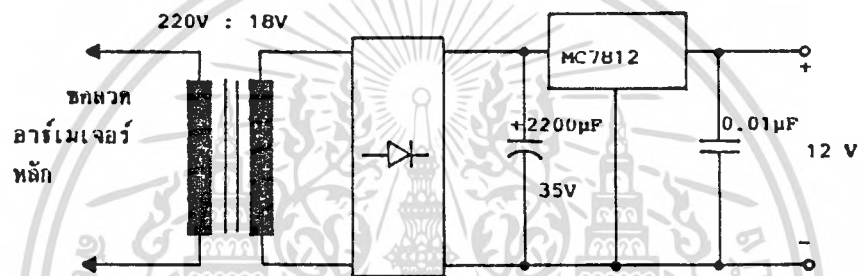
รูปที่ 5.5 บล็อกไดอะแกรม(block diagram)ของ TL494



รูปที่ 5.6 ไทมิงไดอะแกรม(timing diagram)

ที่ขาอีกข้างหนึ่งของนอร์เกต แต่ละตัวจะต่อกับเอาต์พุตของแอนด์เกต(and gate) แต่ละตัวที่มีอินพุตเป็นสัญญาณควบคุมเอาต์พุต(ขา13) และสัญญาณ Q และ Q̄ ดังนั้นทรานซิสเตอร์จะนำกระแสได้เมื่ออินพุตของนอร์เกตมีสถานะเป็น 0 ทั้งคู่ จากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าสถานะของสัญญาณควบคุมเอาต์พุต จะมีผลต่อความถี่ของพัลส์ที่ขับทรานซิสเตอร์ โดยที่ถ้ามีสถานะเป็น 1 ความถี่ที่ได้จะเป็นครึ่งหนึ่งของความถี่จากออสซิลเลเตอร์ แต่ถ้ามีสถานะเป็น 0 ความถี่ของพัลส์ที่ขับทรานซิสเตอร์จะเท่ากับความถี่จากออสซิลเลเตอร์

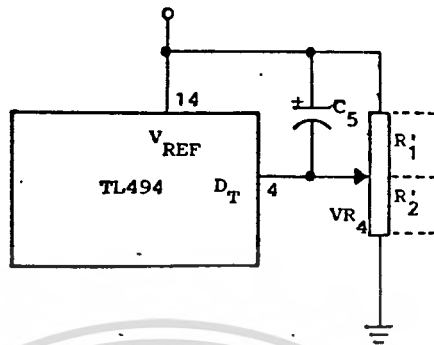
5.2.2 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร จะได้จากการเรกติฟายต์ดากกระแสสลับ ที่แปลง



รูปที่ 5.7 วงจรจ่ายไฟเลี้ยงวงจรรักษาตักดาอัตโนมัติ

ลงมาจากตักดาเฟสของขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก จะมีแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรอยู่ 2 ชุด แต่ละชุดจะเหมือนกันดังรูปที่ 5.7 โดยจะแยกกันจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรสร้างสัญญาณพัลส์คือ ไอซี TL494 กับวงจรกำลังที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์กระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ซึ่งรายละเอียดของวงจรจะได้กล่าวในภายหลัง ความสัมพันธ์ของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงกับการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีดังนี้คือ เมื่อมีการสร้างตักดาโดยการต่อคาปาซิเตอร์ C_u เข้าไปนี้ ตักดาที่ขดลวดอาร์เมเจอร์หลักจะถูกแปลงลงมา ให้มีค่าที่เหมาะสมกับช่วงการทำงานของเรกิวเลเตอร์(regulator) และถูกประจุไว้ที่คาปาซิเตอร์ขนาด 2200 ไมโครฟารัด 35 โวลต์ ช่วงเวลาการคายประจุจะต้องนานพอ สำหรับการตัดคาปาซิเตอร์ C_u ออก และยังสามารถจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรได้ จนกว่ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น จะทำให้เกิดตักดาที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ในภาวะปกติ

5.2.3 วงจรซอฟต์แวร์สตาร์ท (soft start) ในตอนแรกที่วงจรรักษาศักดาอัตโนมัติ

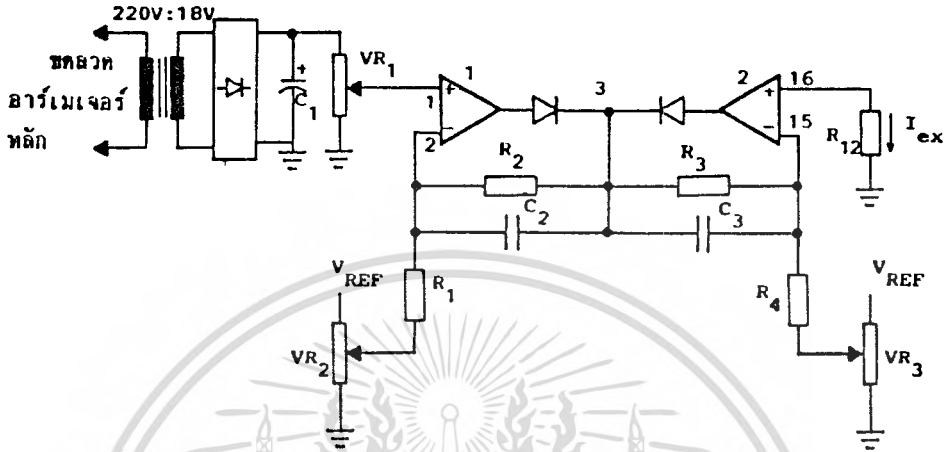


รูปที่ 5.8 วงจรซอฟต์แวร์สตาร์ท

เริ่มทำงานนั้น จะตรวจพบว่าศักดาที่ขดลวดอาร์เมเจอร์หลักมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นวงจรจะสร้างพัลส์ที่มีความกว้างมากที่สุดมาให้กับทรานซิสเตอร์หลัก (Q_2) ทำให้กระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นมีค่าสูง ผลที่ตามมาคือศักดาที่ขดลวดอาร์เมเจอร์มีค่าสูงมาก เมื่อเวลาต่อมาวงจรจะรับรู้ถึงศักดาที่สูงเกินไป ก็จะลดความกว้างของพัลส์สัญญาณลงเพื่อให้ศักดาที่ขดลวดอาร์เมเจอร์หลักมีค่าเท่ากับศักดาอ้างอิงที่ตั้งเอาไว้ นั่นคือการทำงานจะเข้าสู่ภาวะปกติ เพื่อป้องกันศักดาที่มีค่าสูงขณะที่วงจรเริ่มทำงานนั้น จึงได้เพิ่มเติมวงจรจำกัดกระแสให้มีสูงเกินไปในขณะที่ยังรักษาศักดาเริ่มทำงาน วงจรดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 5.8 โดยที่ขา 14 จะให้ศักดาอ้างอิง (V_{REF}) ที่ตัวไอซีสร้างขึ้นมาในมีค่าคงที่ 5 โวลต์ ช่วงเวลาเดดไทม์ (dead time) ของสัญญาณพัลส์ จะขึ้นกับการแบ่งศักดาระหว่าง R'_1 กับ R'_2 ผลของการต่อ C คร่อม R'_1 คือเมื่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเริ่มจ่ายไฟให้วงจรรักษาศักดา ศักดาอ้างอิงจะมากคร่อม R'_2 ทั้งหมด และศักดาที่คร่อม R'_2 จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามค่าคงที่เวลาของ C, R'_1 และ R'_2 และจะคงที่เมื่อมีศักดาเท่ากับ $R'_2 V_{REF} / (R'_1 + R'_2)$ โดยการควบคุมเดดไทม์นี้ จะทำให้กระแสที่เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น นั่นคือศักดาที่ขดลวดอาร์เมเจอร์หลักจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่ตั้งศักดาอ้างอิงเอาไว้ วงจรรักษาศักดา ก็จะรักษากระแสนั้นไว้ โดยการปรับความกว้างของพัลส์ศักดาที่ป้อนให้ขดลวด

5.2.4 วงจรควบคุมทิศทางและกระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

การควบคุมทิศทาง



รูปที่ 5.9 วงจรควบคุมทิศทางและกระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

จะทำงานโดยวงจรขยายความผิดพลาด โดยที่ทิศทางจากอาร์เมเจอร์หลักจะถูกแปลงลงมา และ
เรคติฟายให้เป็นทิศทางไฟตรง แล้วถูกทำให้เรียบโดย C_1 จากนั้นทิศทางจะถูกแบ่งโดย VR_1
เพื่อนำมาป้อนขา 1 ให้เหมาะสมกับทิศทางอ้างอิงที่ได้จาก VR_2 ที่ป้อนขา 2 ซึ่งใช้เป็นหัวตั้ง
ทิศทางที่อาร์เมเจอร์ตามต้องการ ในการทำงานของวงจรนี้ ถ้าสัญญาณที่เข้าขา 1 มีค่าเท่ากับ
ทิศทางอ้างอิงที่ขา 2 สัญญาณที่ขา 3 จะเป็นสัญญาณไฟตรงที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง และสัญญาณนี้จะถูก
นำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณเรมป์(ramp)รูปฟันเลื่อย ที่สร้างขึ้นภายในไอซี, เพื่อสร้างพัลส์ที่มี
ความกว้างค่าหนึ่งออกมา แต่ถ้าสัญญาณที่เข้าขา 1 มีค่ามากกว่าทิศทางอ้างอิงที่ขา 2 จะทำให้
สัญญาณที่ขา 3 มีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อสัญญาณนี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณเรมป์ ก็จะทำให้
ไอซีสร้างพัลส์ที่มีความกว้างน้อยลงออกมาควบคุมให้ ทราานซิสเตอร์หลักนำกระแสในช่วงเวลาที่
น้อยลง จนกระทั่งสัญญาณที่ขา 1 มีขนาดเท่ากับทิศทางอ้างอิงที่ขา 2 วงจรก็จะรักษาความกว้าง
ของพัลส์นั้นไว้จนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ขา 1 ต่อไป ส่วนในกรณีที่สัญญาณที่เข้าขา 1
มีขนาดน้อยกว่าทิศทางอ้างอิงขา 2 ก็จะทำให้ผลในทางกลับกันคือ สัญญาณที่ขา 3 จะมีขนาดลดลง
เมื่อถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณเรมป์ ก็จะทำให้พัลส์ที่มีความกว้างมากขึ้นมาควบคุมการนำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงของทรานซิสเตอร์หลัก . จนกระทั่งสัญญาณที่เข้าขา 1 มีขนาดเท่ากับศักดาอ้างอิงที่ขา 2 ขนาดศักดาที่ขา 3 ก็จะต้องที่ที่ค่านั้นต่อไปจนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของศักดาที่ขา 1 อีก สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบวงจรคือ ความไวและเสถียรภาพของการทำงาน นั่นคือวงจรควรปรับศักดาที่อาร์เมเจอร์ได้อย่างรวดเร็ว แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องให้การทำงานที่มีเสถียรภาพด้วยเช่นกัน การปรับวงจรให้มีความไวในการเปลี่ยนแปลงศักดาจนเกินไป จะทำให้เกิดการออสซิลเลตของศักดาที่อาร์เมเจอร์ได้ แต่ถ้าปรับให้วงจรมีเสถียรภาพจนเกินไป ก็จะทำให้การรับรู้และการปรับศักดาเป็นไปอย่างเชื่องช้า การทำงานได้ดีของวงจรเกิดจากการประนีประนอมร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ด้วยเช่น โหมดความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และตัวขั้วความเหนี่ยวนำของขดลวดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมความเร็วตัวขับ เป็นต้น จากวงจรจะเห็นได้ว่า ค่าคงที่เวลาของวงจรวัดศักดาที่ป้อนสัญญาณให้ขา 1 จะมีผลต่อการรับรู้การเปลี่ยนแปลงศักดาของขา 1 โดยตรง ในขณะที่ R_1 , R_2 และ C_2 จะเป็นตัวที่ปรับความไวของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ขา 3 เมื่อมีความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่ขา 1 และขา 2 ดังนั้น การทำงานได้ของวงจรก็คือการปรับค่าเหล่านี้ให้มีความสอดคล้องกับปัจจัยอื่นๆ นั่นเอง

ส่วนวงจรควบคุมกระแสจะทำงานโดยวงจรขยายความผิดพลาด 2 โดยที่สัญญาณที่เข้าขา 16 จะได้จากศักดาตกคร่อมความต้านทานค่าต่ำๆ ของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นหลักการทำงานของวงจรจะอธิบายได้เหมือนกับการทำงานของวงจรควบคุมศักดา

ถึงแม้ว่าทั้งวงจรควบคุมศักดาและวงจรควบคุมกระแส จะควบคุมความกว้างของพัลส์ที่ผ่านขา 3 เหมือนกัน แต่สัญญาณที่ควบคุมความกว้างของพัลส์นี้จะถูกเลือกจากวงจรใดวงจรหนึ่ง ที่ให้สัญญาณที่ขา 3 มีขนาดสูงกว่าเท่านั้น เพราะแต่ละวงจรจะมีไดโอดต่ออยู่กับเอาต์พุต ดังนั้นเมื่อวงจรใดก็ตามให้สัญญาณที่เอาต์พุตสูงกว่าอีกวงจรหนึ่ง จะทำให้ศักดาที่ขาคาโทด (cathode) ของอีกวงจรหนึ่งมีสูงกว่าศักดาของแอโนด(anode) สัญญาณของวงจรที่ให้สัญญาณต่ำกว่าจึงไม่สามารถผ่านไดโอดออกมาได้

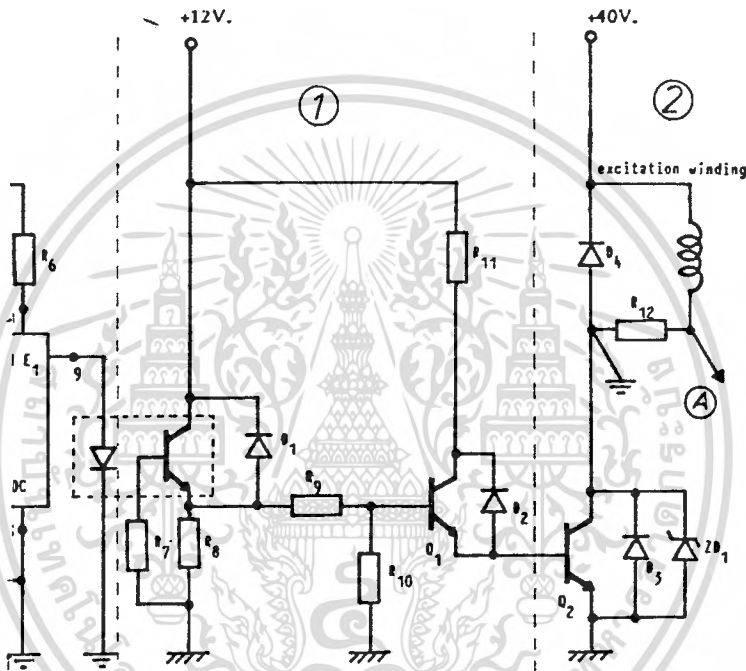
5.2.5 วงจรกำลัง ในที่นี้ได้แยก(isolate)ระหว่างวงจรสร้างพัลส์คือ TL494 กับวงจรกำลังด้วยออปโตคัปเปิลเลอร์(optocoupler) 4N25 ซึ่งมีโครงสร้างภายในประกอบด้วย ไดโอดที่ปล่อยแสงได้(LED) และทรานซิสเตอร์ไวแสง(phototransistor) อย่างละ 1 ตัว ด้วยเหตุผลดังนี้

- เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้กับวงจรสร้างพัลส์ เมื่อเกิดความผิดปกติ

ในวงจรกำลัง

- ทำให้วงจรตรวจจับกระแสซึ่งอยู่ในวงจรสร้างพัลส์ สามารถเลือกตำแหน่งการตรวจจับกระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นในวงจรกำลังได้

วงจรกำลังแสดงไว้ในรูปที่ 5.10 และสามารถแบ่งการทำงานตามหน้าที่ได้เป็น



รูปที่ 5.10 วงจรกำลัง

- ส่วนขั้วทรานซิสเตอร์หลัก (1) เนื่องจากทรานซิสเตอร์หลัก (Q_2) จะถูกใช้เป็นตัวสวิตช์ ดังนั้นจะต้องออกแบบให้ทรานซิสเตอร์หลักทำงานในช่วงอิ่มตัว เพื่อลดการกำลังสูญเสียในทรานซิสเตอร์ขณะสวิตช์ อย่างไรก็ตามจะต้องคำนึงปริมาณการอิ่มตัวด้วยเช่นกัน การอิ่มตัวที่มากเกินไป จะทำให้ทรานซิสเตอร์ต้องใช้เวลามากขึ้นในการสร้างและหยุดพัลส์ นั่นคือรูปร่างของพัลส์จะเสียไป นอกจากนั้นยังทำให้กำลังสูญเสียขณะสวิตช์ในทรานซิสเตอร์เพิ่มขึ้นจากเดิมอีกด้วย

- ส่วนกำลัง (2) จะเป็นส่วนของทรานซิสเตอร์หลักที่สวิตช์กระแสที่ป้อนเข้าขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยทรานซิสเตอร์ MJ11016 และเนื่องจากความถี่ของการสวิตช์มีค่าไม่สูง ผลอันเนื่องจากการสวิตช์เช่น สไปค์(spike) จึงมีค่าไม่สูงนัก และช่วงเวลาของการนำและหยุดก็ไม่มาก ในวงจรนี้ไม่ได้สร้าง snubber ให้กับทรานซิสเตอร์ เพียงแต่มีซี-เนอร์(zener) 75 โวลต์ 5 วัตต์ พร้อมที่ชาคอลเลคเตอร์และชาอิมิตเตอร์ดังในรูปที่ 5.10 เท่านั้น ส่วนสัญญาณของการสวิตช์จะได้แสดงในบทต่อไป

5.3 วงจรป้องกันศักดาและความถี่สูงหรือต่ำเกินไป

ในภาวะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ศักดาและความถี่สูงหรือต่ำเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายหรือการทำงานที่ผิดพลาด ของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมียวงจรที่คอยตรวจระดับศักดาและความถี่ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของอุปกรณ์ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้นอกจากจะได้สร้างวงจรควบคุมศักดาอัตโนมัติตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีวงจรป้องกันอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในภาวะที่อาจเกิดความผิดปกติของการทำงาน ซึ่งประกอบด้วย

- วงจรป้องกันศักดาสูงหรือต่ำเกินไป
- วงจรป้องกันความถี่สูงหรือต่ำเกินไป

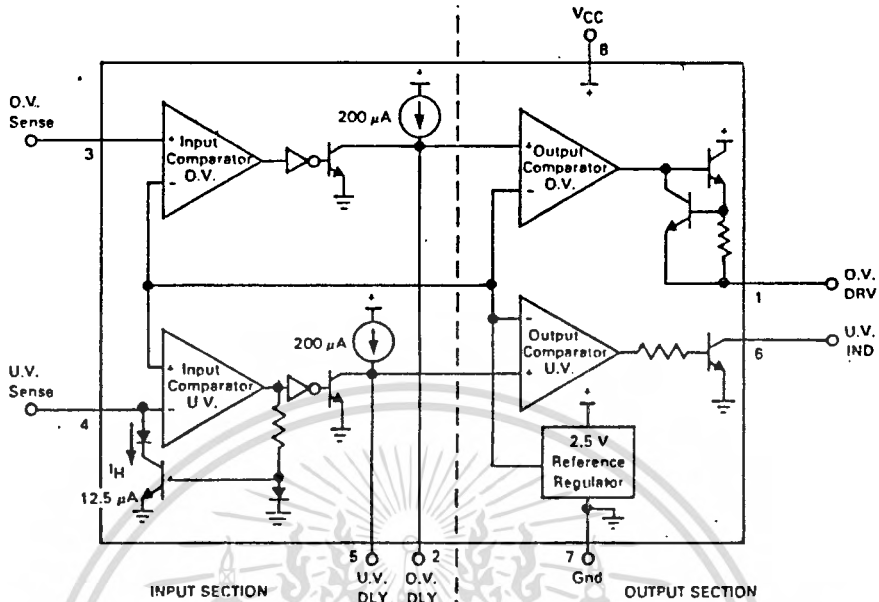
ดังจะมีรายละเอียดการทำงานของแต่ละวงจรดังต่อไปนี้

5.3.1 วงจรป้องกันศักดาสูงหรือต่ำเกินไป

วงจรดังกล่าวนี้จะมีไอซี MC3425

เป็นอุปกรณ์หลัก โดยมีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 5.11 ไอซี MC3425 จะมีขา 3 และ 4 สำหรับรับรูระดับศักดาจากอาร์เมเจอร์ที่สูง และต่ำกว่าศักดาอ้างอิงที่สร้างขึ้นภายในไอซีขนาด 2.5 โวลต์ ตามลำดับ โดยที่เมื่อศักดาที่ขา 3 สูงกว่าศักดาอ้างอิง เอาต์พุตของคอมแพเรเตอร์ศักดาสูงด้านอินพุตจะมีสถานะสูง(high) ศักดาคร่อมขาเบสของทรานซิสเตอร์ ที่ต่ออยู่กับเอาต์พุตของอินเวอร์ตติ้งบัฟเฟอร์(inverting buffer) จะมีสถานะต่ำ(low) ดังนั้นทรานซิสเตอร์จะไม่นำกระแส แหล่งจ่ายกระแสคงที่ขนาด 200 ไมโครแอมป์ จะประจุคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่ที่ขา 2 เมื่อศักดาของคาปาซิเตอร์สูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงกว่าศักดาอ้างอิง เอาต์พุตของคอมแพเรเตอร์ด้านเอาต์พุตก็จะมีสถานะสูง ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่ที่ขา 1 ก็จะสามารถนำกระแสได้และทำให้ศักดาที่ขา 1 เท่ากับ V_{cc} แต่เมื่อศักดาที่ขา 3 ต่ำกว่าศักดาอ้างอิง เอาต์พุตของคอมแพเรเตอร์ด้านอินพุตจะมีสถานะต่ำ ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 บล็อกไดอะแกรมของไอซี MC3425

กับอินเวอร์ตติ้ง บัฟเฟอร์จะสามารถนำกระแสได้ ประจุในคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่กับขา 2 จะถูกคายผ่านทรานซิสเตอร์ตัวนี้ โดยที่อัตราการคายประจุจะเร็วกว่าอัตราการประจุมาก เมื่อศักดาที่คร่อมคาปาซิเตอร์นี้ลดลงจนต่ำกว่าศักดาอ้างอิง เอาท์พุทของคอมแพเรเตอร์ด้านเอาท์พุทจะมีสถานะต่ำ ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่ต่อกับขา 1 จะหยุดนำกระแส ซึ่งจะเป็นการการตัดไฟที่ขา 1 นั้นเอง สำหรับการรับรู้ศักดาต่ำที่ขา 4 นั้น เมื่อศักดาจากอาร์เมเจอร์สูงกว่าศักดาอ้างอิง จะให้อาท์พุทของคอมแพเรเตอร์ด้านอินพุทเป็นสถานะต่ำ ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับ อินเวอร์ตติ้งบัฟเฟอร์นำกระแสได้ กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสคงที่จะไหลผ่านทรานซิสเตอร์นี้ จึงไม่มีการประจุของคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่กับขา 5 ดังนั้นเอาท์พุทของคอมแพเรเตอร์ด้านเอาท์พุทจะให้สถานะต่ำ ดังนั้นทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับขา 6 จะไม่นำกระแส แต่ถ้าศักดาที่ขา 4 ต่ำกว่าศักดาอ้างอิง จะทำให้อาท์พุทของคอมแพเรเตอร์ด้านอินพุทมีสถานะสูง เอาท์พุทของอินเวอร์ตติ้งบัฟเฟอร์ที่ขับทรานซิสเตอร์จะมีสถานะต่ำ ทรานซิสเตอร์จึงไม่นำกระแส ดังนั้นจะมีการประจุของคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่กับขา 5 เมื่อศักดาของคาปาซิเตอร์สูงเกินศักดาอ้างอิง ก็จะทำให้อาท์พุทของคอมแพเรเตอร์ด้านเอาท์พุท ที่ขับเบสของทรานซิสเตอร์ที่ต่ออยู่กับขา 6 เป็นสถานะสูง ทรานซิสเตอร์ก็จะนำกระแสได้ จะเห็นได้ว่าการทำงาน

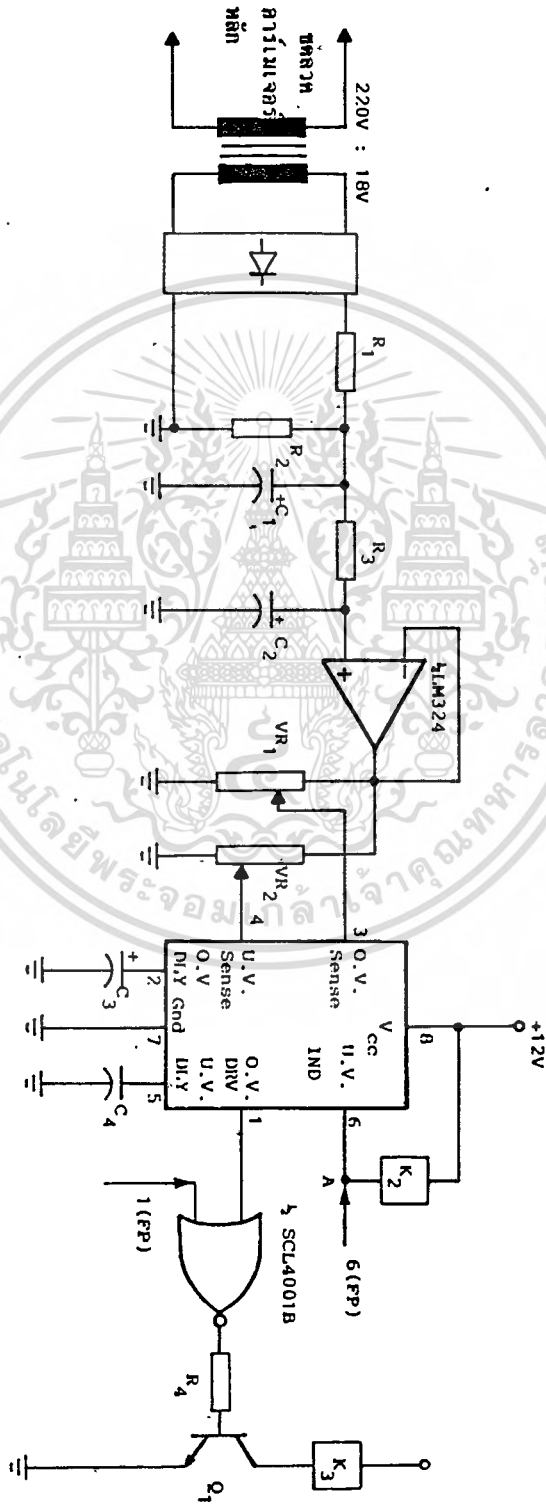
เวลาการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่ต่อกับขา 1 และขา 6 หลังจากตัดขาของอาร์เมเจอร์สูงหรือต่ำกว่าศักดาอ้างอิงของไอซีนั้น จะขึ้นกับการเลือกขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่กับขา 2 และขา 5 ตามลำดับ โดยที่เวลาของการท่วงนี้จะเท่ากับ $12500C_{DLV}$ วินาที

รายละเอียดของวงจรที่สมบูรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ป้อนให้ขา 3 และ 4 เป็นศักดาไฟตรงที่ได้จากการเรคติฟายศักดากระแสสลับของอาร์เมเจอร์ ที่ถูกแปลงให้มีขนาดต่ำลงมาแล้วถูกกรองให้เรียบ อย่างไรก็ตามการที่ทำให้สัญญาณมีความเรียบมากขึ้นเท่าไร ก็จะทำให้การเปลี่ยนแปลงระดับศักดาของสัญญาณตามขนาดศักดาของอาร์เมเจอร์ช้ามากขึ้นเท่านั้น ในการออกแบบฟิลเตอร์ของวงจรนี้ ได้ยึดหลักของการประนีประนอมระหว่างการทำงานของไอซี MC3425 และความไวของการตามความเปลี่ยนแปลงศักดาอาร์เมเจอร์ของสัญญาณที่ป้อนให้ขา 3 และ 4 เพื่อให้ไอซีสามารถทำงานได้อย่างดี ในขณะที่การตามศักดาอาร์เมเจอร์ของสัญญาณก็มีความไวพอสมควร

ค่าของอุปกรณ์ในวงจรมีดังต่อไปนี้

$R_1 = 20 \text{ K}\Omega$	$C_1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$
$R_2 = 5.6 \text{ K}\Omega$	$C_2 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$
$R_3 = 180 \text{ K}\Omega$	$C_3 = 2200 \text{ }\mu\text{F}$
$R_4 = 51 \text{ K}\Omega$	$C_4 = 2200 \text{ }\mu\text{F}$
$VR_1 = 100 \text{ K}\Omega$	$Q_1 = \text{BC337}$
$VR_2 = 10 \text{ K}\Omega$	

5.3.2 วงจรป้องกันความถี่สูงหรือต่ำเกินไป รูปที่ 5.13 จะแสดงถึงการใช้งานของไอซี LM2907 ซึ่งทำหน้าที่ให้เอาต์พุตเป็นระดับศักดาไฟตรง ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณอินพุต ขนาดของศักดาเอาต์พุตจะหาได้จาก $V_{out} = V_{CC} f_{in} C_1 R_3 K$ โดยที่ K เป็นค่าคงที่ของการขยายซึ่งมีค่าประมาณ 1.0 สัญญาณที่ได้จะมีริปเปิลอยู่ด้วย ขนาดของริปเปิลนี้สามารถหาได้จาก $V_{ripple} = (1 - V_{CC} f_{in} C_1 / I_2) V_{CC} C_1 / 2C_2$ pk-pk เนื่องจากสัญญาณ V_{out} จากไอซี LM2907 จะมีริปเปิลอยู่ ดังนั้นจะต้องมีการกรองริปเปิลออกแล้วจึงขยายสัญญาณนี้ให้มีขนาดสูงขึ้นโดยออปแอมป์ (op-amp) อย่างไรก็ตามริปเปิลที่ยังคงเหลืออยู่จะถูกขยายขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องกรองริปเปิลอีกครั้งหนึ่ง สัญญาณที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ



รูปที่ 5.12 วงจรป้องกันศักดาสูงหรือต่ำเกินไป



ศักดาอ้างอิงที่มีระดับต่างกัน โดยคอมแพเรเตอร์สองตัว เอาท์พุทของคอมแพเรเตอร์ซึ่งมีระดับ ศักดาอ้างอิงสูงและต่ำ จะต่อกับขา 3 และ 4 ของไอซี MC3425 สำหรับการทำงานเมื่อกระแสไฟมีความถี่สูงและต่ำกว่าค่าที่ตั้งเอาไว้ตามลำดับ

ค่าของอุปกรณ์ในวงจรมีดังต่อไปนี้

R_1	=	20 K Ω	VR_1	=	10 K Ω
R_2	=	1 K Ω	VR_2	=	10 K Ω
R_3	=	100 K Ω	C_1	=	0.015 μ F
R_4	=	10 K Ω	C_2	=	0.47 μ F
R_5	=	180 K Ω	C_3	=	0.1 μ F
R_6	=	10 K Ω	C_4	=	0.1 μ F
R_7	=	30 K Ω	C_5	=	2200 μ F
R_8	=	180 K Ω	C_6	=	2200 μ F

บทที่ 6

ผลการทดลอง

ผลการทดลองในบทนี้ จะแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบ และความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ โดยได้สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นหลายชุด เพื่อศึกษาคุณลักษณะหลายๆ อย่าง ผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.1 - 6.3 จะใช้แหล่งพลังงานจากภายนอกในการสร้างสนามแม่เหล็ก ส่วนหัวข้อที่ 6.4 จะเป็นการหาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นตามเป้าหมายอย่างสมบูรณ์ คือพลังงานในการสร้างสนามแม่เหล็กจะได้จากตัวมันเอง ข้อมูลของสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ต้นคือ - โรเตอร์ R4 จะมีวิธีการพันและขนาดของตัวนำตามการออกแบบที่ได้กล่าวมาข้าง

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	ขั้ว
วิธีการพัน	คอนเซนทริก-เซน	1 ชั้น
ระยะขดลวด	A:B:C	5:3:1 สลัด
จำนวนรอบต่อขด	A:B:C	100:100:50 รอบ
ขนาดตัวนำ	SWG. 20	

- โรเตอร์ R3 มีวิธีการพันเหมือน โรเตอร์ R4 แต่จำนวนรอบและขนาดตัวนำเปลี่ยนแปลงไป ดังมีรายละเอียด คือ

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	ขั้ว
วิธีการพัน	คอนเซนทริก-เซน	1 ชั้น
ระยะขดลวด	A:B:C	5:3:1 สลัด
จำนวนรอบต่อขด	A:B:C	400:400:200 รอบ
ขนาดตัวนำ	SWG. 26	

- สเตเตอร์ S4 มีวิธีการพันและขนาดตัวนำตามการออกแบบที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

คือ

ขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	ขั้ว
วิธีการพัน	แลป	2 ชั้น 3 เฟส
ระยะขั้ว	9	สล็อต
ระยะขดลวด	6	สล็อต
จำนวนรอบต่อขด	50	รอบ
ขนาดตัวนำ	SWG. 26	
การต่อขดลวดระหว่างเฟส		วาย

ขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	ขั้ว
วิธีการพัน	แลป	2 ชั้น 3 เฟส
ระยะขั้ว	9	สล็อต
ระยะขดลวด	6	สล็อต
จำนวนรอบต่อขด	4	รอบ
ขนาดตัวนำ	SWG. 19	
การต่อขดลวดระหว่างเฟส		วาย

ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	2	ขั้ว
วิธีการพัน	แลป	1 ชั้น 1 เฟส
ระยะขั้ว	18	สล็อต
ระยะขดลวด	12	สล็อต
จำนวนขดลวดทั้งหมด	12	ขด
จำนวนรอบต่อขด	30	รอบ
ขนาดตัวนำ	SWG. 19	

- สเตเตอร์ S3 จะมีเพียงขดลวดอาร์เมเจอร์หลักและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นเท่านั้น โดยที่พลังงานที่ป้อนให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น จะได้จากการเรกติฟายต์กตากระแสสลับ 1 เฟส และมีคาปาซิเตอร์ขนาด 11500 ไมโครฟารัด 150 โวลท์

เป็นฟิลเตอร์ รายละเอียดของสเตเตอร์ S3 มีตามข้อมูลข้างล่าง

ขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	ขั้ว
วิธีการพัน	แลป	2 ชั้น 3 เฟส
ระยะขั้ว	9	สล็อต
ระยะขดลวด	6	สล็อต
จำนวนรอบต่อขั้ว	60	รอบ
ขนาดตัวนำ	SWG. 24	

การต่อขดลวดระหว่างเฟส

วาย

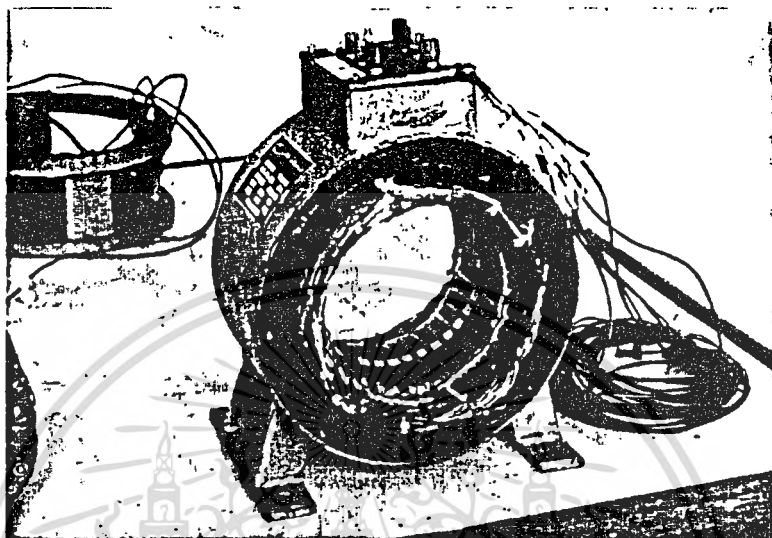
ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

จำนวนขั้วแม่เหล็ก	2	ขั้ว
วิธีการพัน	แลป	1 ชั้น 1 เฟส
ระยะขั้ว	18	สล็อต
ระยะขดลวด	12	สล็อต
จำนวนขดลวดทั้งหมด	6 และ 12	ขด
จำนวนรอบต่อขด	15	รอบ
ขนาดตัวนำ	SWG. 20	

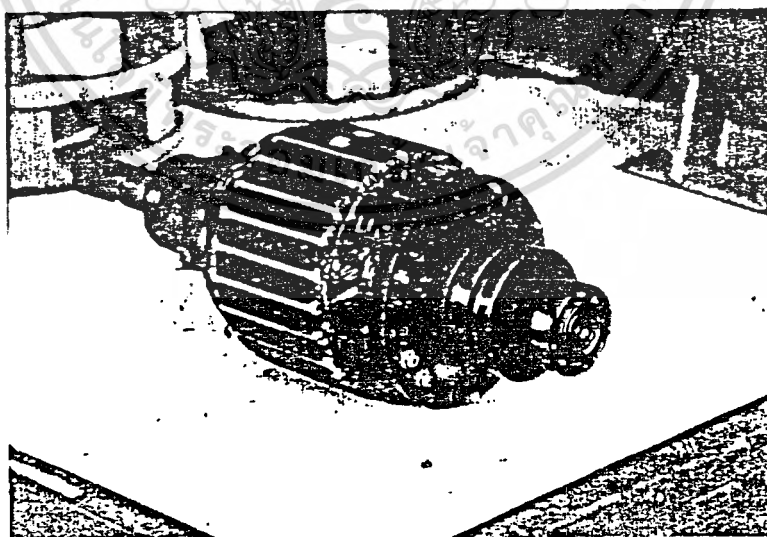
ภาพถ่ายแสดงสเตเตอร์ S4 และโรเตอร์ R4 ที่ได้เห็นเรียบร้อยแล้ว วงจรควบคุม และการต่อวงจรที่ใช้ในการทดลองอย่างสมบูรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 - 6.5

6.1 ผลของวิธีการสร้างสนามแม่เหล็ก

จะเป็นการเปรียบเทียบรูปคลื่นศักดาของขดลวดอาร์เมเจอร์หลักขณะไม่มีโหลด เพื่อสังเกตผลที่ได้ จากการสร้างสนามแม่เหล็กในระบบเดิมคือ ป้อนศักดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กในโรเตอร์ กับการสร้างสนามแม่เหล็กโดยการป้อนศักดากระแสไฟตรงแบบต่อเนื่องและแบบพัลซ์เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่สเตเตอร์ ผลการทดลองจะได้จากโรเตอร์ R4 และสเตเตอร์ S4 ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

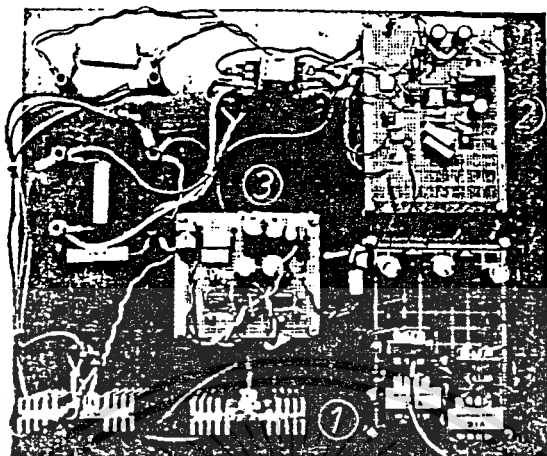


รูปที่ 6.1 สเตเตอร์ S4



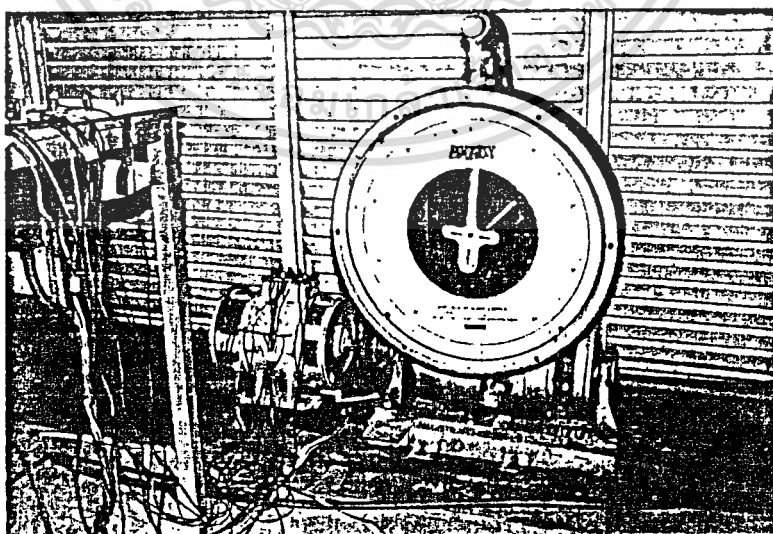
รูปที่ 6.2 โรเตอร์ R4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



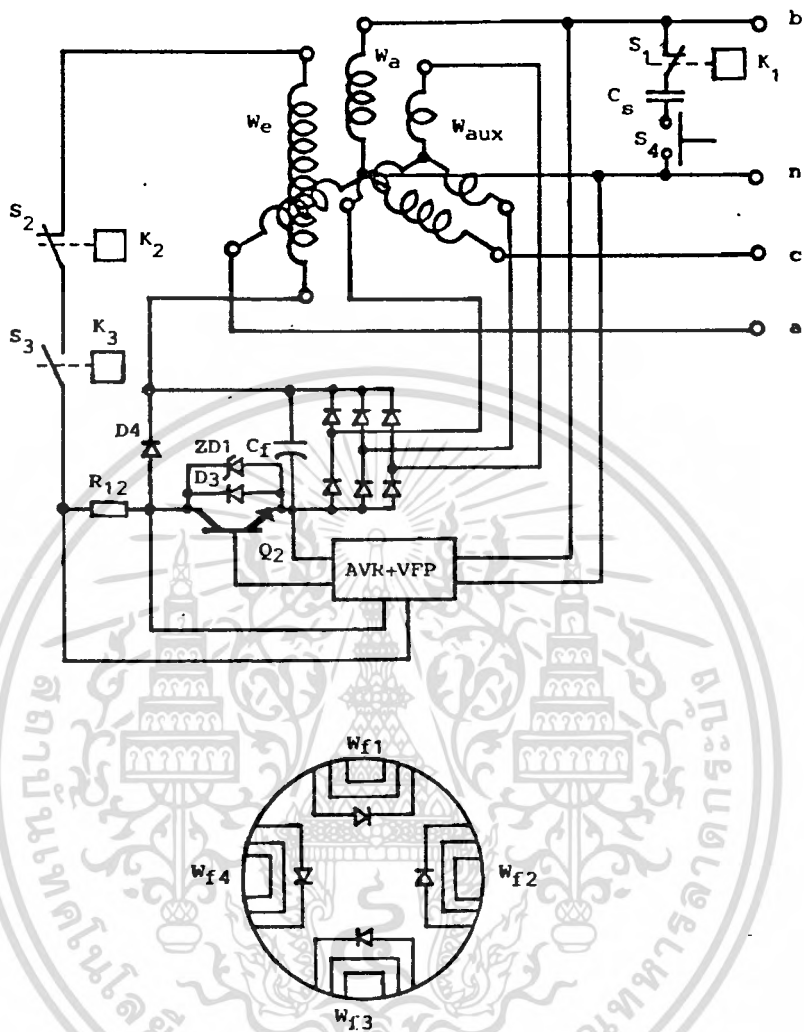
- 1 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร 3 วงจรป้องกันตกตาและความถี่สูงหรือต่ำเกินไป
2 วงจรรักษาคlockอัตโนมัติ

รูปที่ 6.3 วงจรควบคุม



รูปที่ 6.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



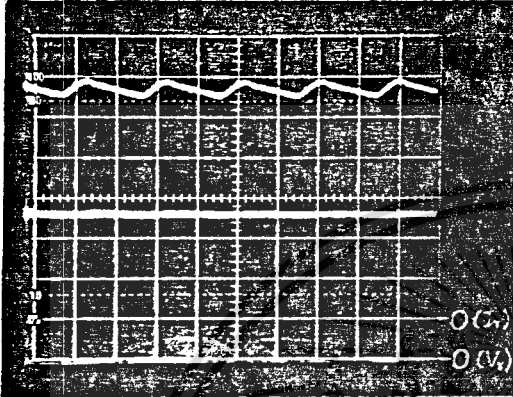
- W_a : ขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก
 W_{aux} : ขดลวดอาร์เมเจอร์ช่วย
 W_e : ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
 AVR : วงจรรักษาตักค่าอัตโนมัติ
 VFP : วงจรป้องกันตกคาและความถี่สูงหรือต่ำเกินไป
 $W_{f1} - W_{f4}$: ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 6.5 การต่อวงจรอย่างสมบูรณ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้น

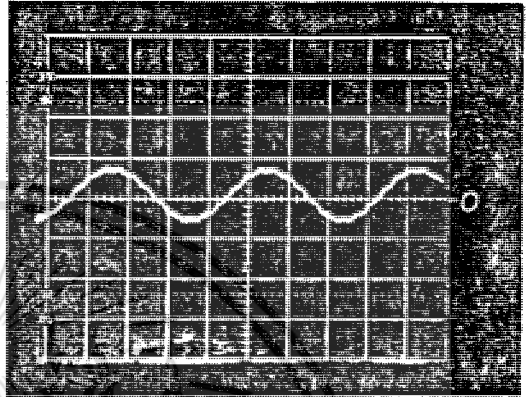
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.1 เมื่อป้อนศักดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่ต่ออนุกรมกันทั้ง

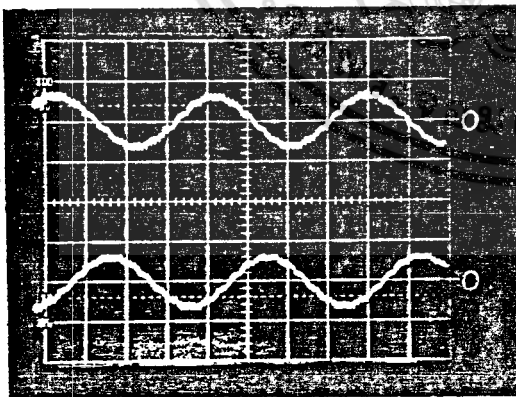
4 ขด



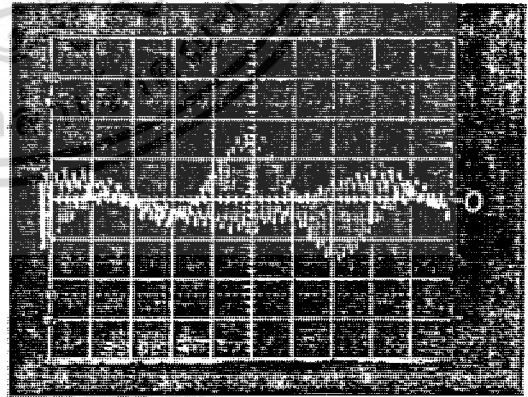
รูปที่ 6.6 รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อน
เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์
(Time Scale = 5 ms/div)
บน : $V_r = 2 \text{ V/div (13.5 V)}$
ล่าง : $I_r = 0.5 \text{ A/div (1.25 A)}$



รูปที่ 6.7 รูปคลื่นศักดาเฟส a (Time
Scale = 5 ms/div)
 $V_{an} = 500 \text{ V/div (220 V)}$



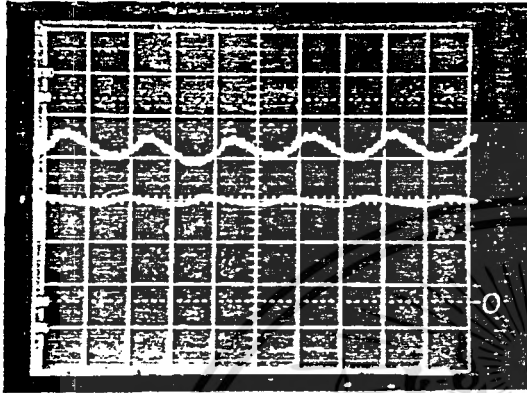
รูปที่ 6.8 รูปคลื่นศักดาเฟส b และ c
(Time Scale = 5 ms/div)
บน : $V_{bn} = 500 \text{ V/div (220 V)}$
ล่าง : $V_{cn} = 500 \text{ V/div (220 V)}$



รูปที่ 6.9 รูปคลื่นศักดาของขดลวดสร้าง
สนามแม่เหล็กกระตุ้น (Time Scale =
5 ms/div)
 $V_{ex} = 20 \text{ V/div}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

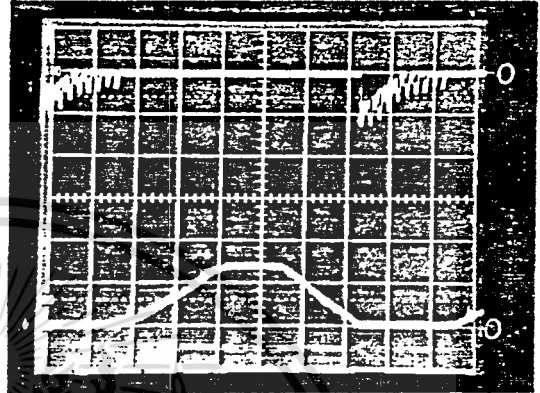
6.1.2 เมื่อป้อนศักดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ต่อในภาวะใช้งานจริงคือขดลวดแต่ละชุดต่อกับไดโอด



รูปที่ 6.10 รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อน
เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $I_{ex} = 0.5 \text{ A/div (2.05 A)}$

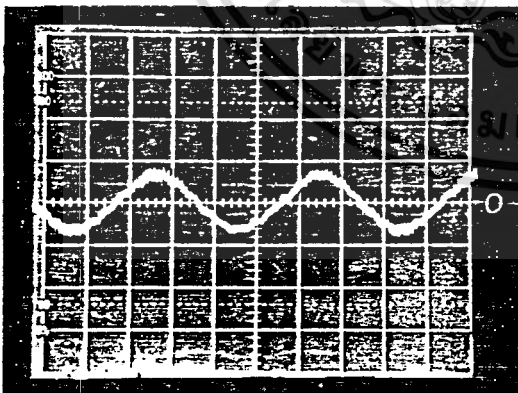
ล่าง : $V_{ex} = 5 \text{ V/div (13.6 V)}$



รูปที่ 6.11 รูปคลื่นศักดาพร้อมไดโอดและ
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale
= 5 ms/div)

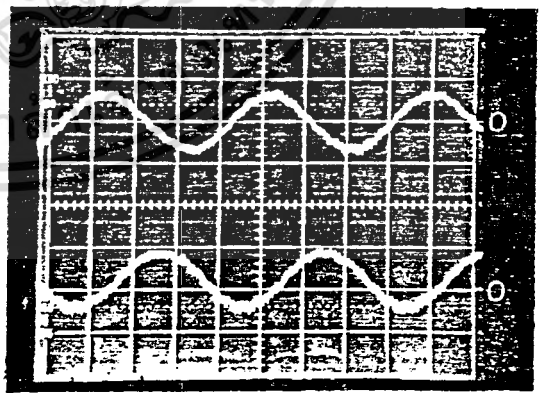
บน : $V_f = 50 \text{ V/div}$

ล่าง : $I_f = 2 \text{ A/div (1.20 A)}$



รูปที่ 6.12 รูปคลื่นศักดาเฟส a (Time
Scale = 5 ms/div)

$V_{an} = 500 \text{ V/div (219 V)}$



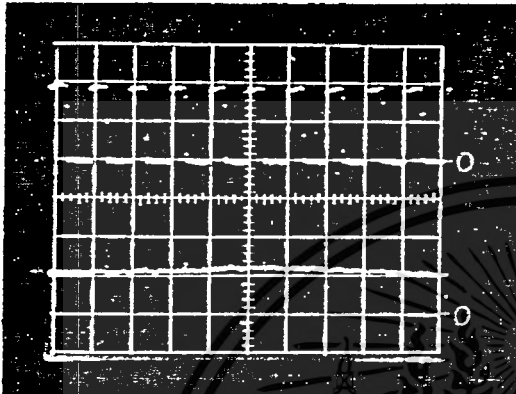
รูปที่ 6.13 รูปคลื่นศักดาเฟส b และ c
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{bn} = 500 \text{ V/div (220 V)}$

ล่าง : $V_{cn} = 500 \text{ V/div (220 V)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

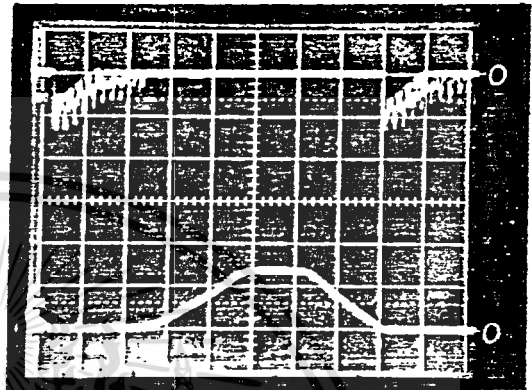
6.1.3 เมื่อป้อนศักดากระแสไฟตรงเป็นพัลส์ความถี่ 1 กิโลเฮิรท์ เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ต่อในภาวะใช้งานจริงคือขดลวดแต่ละชุดต่อกับไดโอด



รูปที่ 6.14 รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อน
เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
(Time Scale = 1 ms/div)

บน : $V_{ex} = 20 \text{ V/div (40.0 V)}$

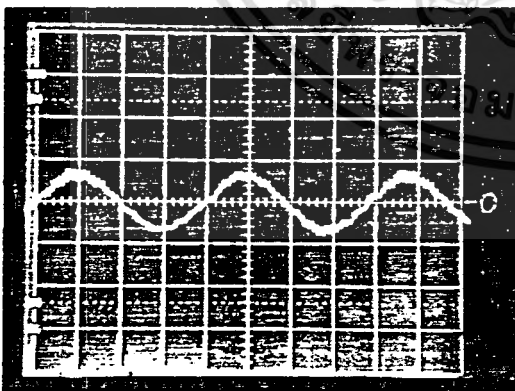
ล่าง : $I_{ex} = 2 \text{ A/div (2.05 A)}$



รูปที่ 6.15 รูปคลื่นศักดาพร้อมไดโอดและ
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale
= 5 ms/div)

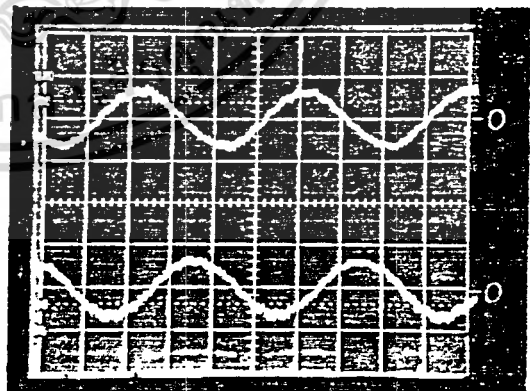
บน : $V_f = 50 \text{ V/div}$

ล่าง : $I_f = 2 \text{ A/Div (1.25 A)}$



รูปที่ 6.16 รูปคลื่นศักดาเฟส a (Time
Scale = 5 ms/div)

$V_{an} = 500 \text{ V/div (219 V)}$

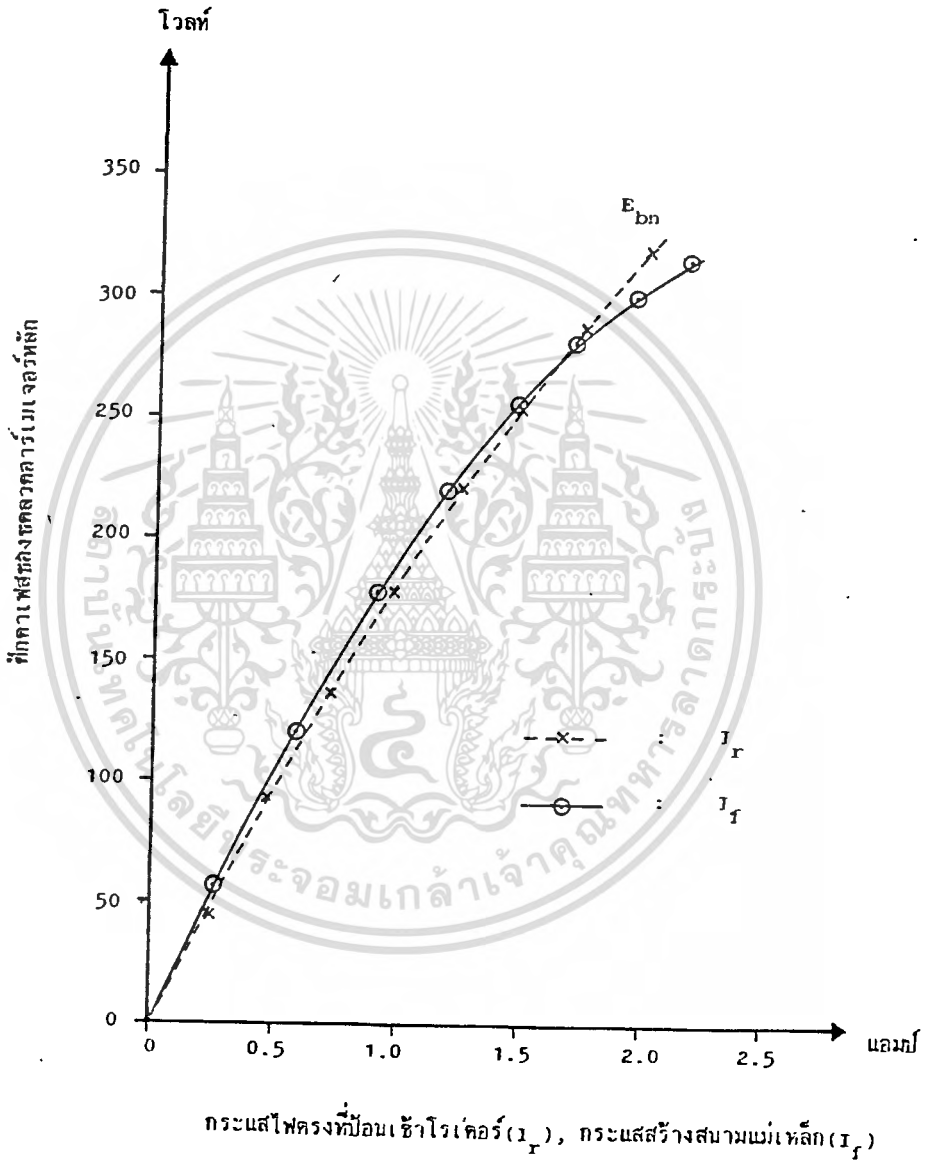


รูปที่ 6.17 รูปคลื่นศักดาเฟส b และ c
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{bn} = 500 \text{ V/div (220 V)}$

ล่าง : $V_{cn} = 500 \text{ V/div (220 V)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



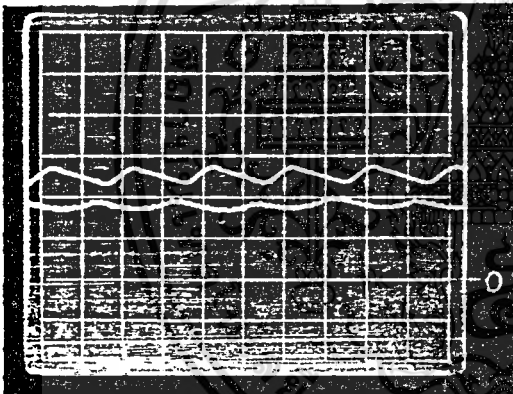
รูปที่ 6.18 คุณลักษณะการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า

6.2 ผลของจำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

จะเป็นการเปรียบเทียบรูปคลื่นศักดาของขดลวดอาร์เมเจอร์หลัก เมื่อป้อนศักดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีจำนวนต่างกัน กับกรณีที่ป้อนศักดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ โดยใช้โรเตอร์และสเตเตอร์ชุดเดียวกันคือ R4 และ S3 รายละเอียดของผลการทดลองมีต่อไปนี

6.2.1 รูปคลื่นศักดาของอาร์เมเจอร์ขณะไม่มีโหลด

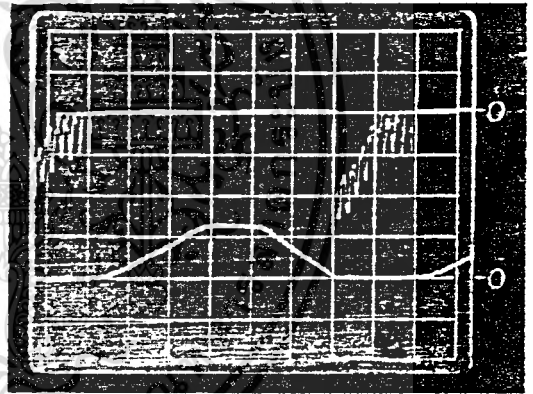
(ก) ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นมีจำนวน 12 ขด



รูปที่ 6.19 รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อน
เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{ox} = 5 \text{ V/div (14.0 V)}$

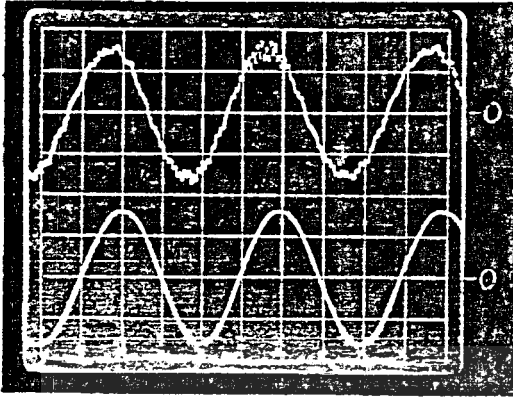
ล่าง : $I_{ox} = 2 \text{ A/div (3.60 A)}$



รูปที่ 6.20 รูปคลื่นศักดาพร้อมไดโอดและ
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale
= 5 ms/div)

บน : $V_f = 20 \text{ V/div}$

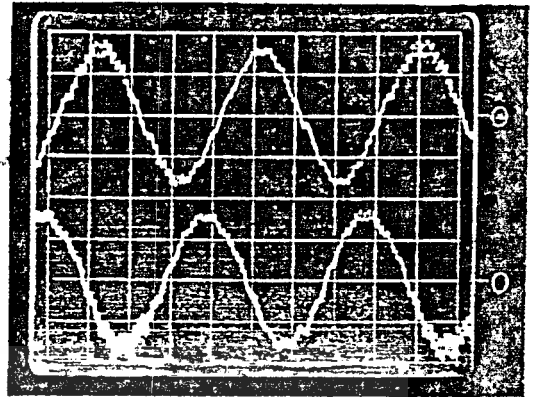
ล่าง : $I_f = 2 \text{ A/div (1.14 A)}$



รูปที่ 6.21 รูปคลื่นศักดาเฟส a เปรียบเทียบรูปขายน (Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{an} = 200 \text{ V/div (223 V)}$

ล่าง : $V_{ref} = 200 \text{ V/div}$

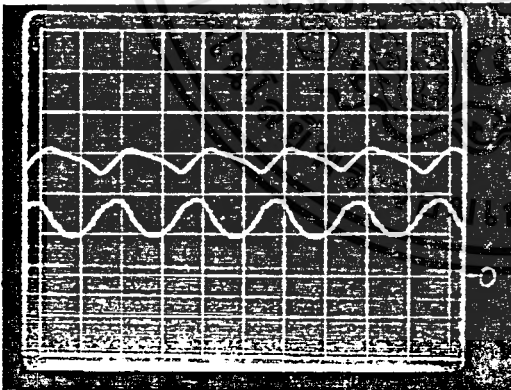


รูปที่ 6.22 รูปคลื่นศักดาเฟส b และ c (Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{cn} = 200 \text{ V/div (220 V)}$

ล่าง : $V_{bn} = 200 \text{ V/div (221 V)}$

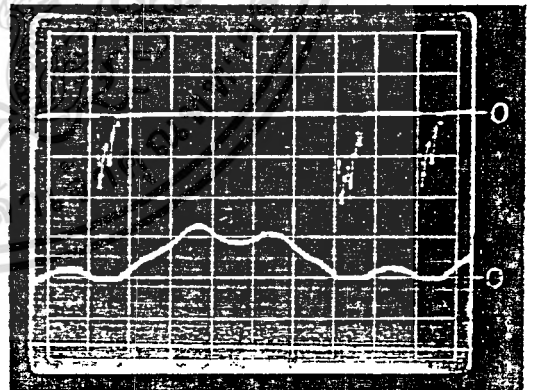
(ข) ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นมีจำนวน 6 ขด



รูปที่ 6.23 รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น (Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{ex} = 2 \text{ V/div (5.8 V)}$

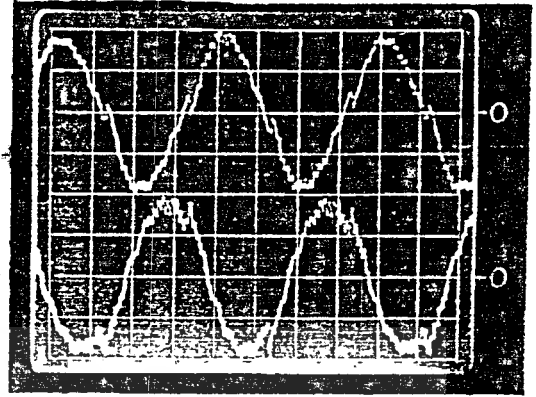
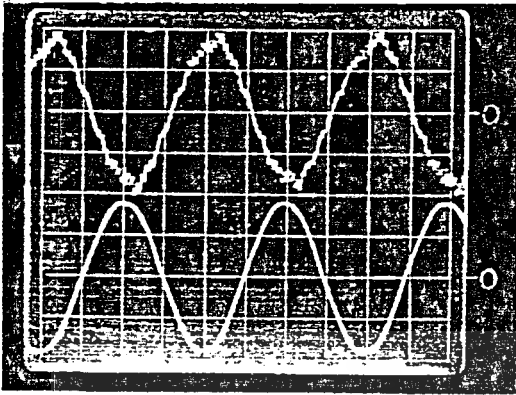
ล่าง : $I_{ex} = 2 \text{ A/div (2.50 A)}$



รูปที่ 6.24 รูปคลื่นศักดาพร้อมไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_f = 20 \text{ V/div}$

ล่าง : $I_f = 1 \text{ A/div (0.57 A)}$



รูปที่ 6.25 รูปคลื่นตักดาเฟส a เปรียบเทียบรูปขั้ว (Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{an} = 100 \text{ V/div (121 V)}$

ล่าง : $V_{ref} = 100 \text{ V/div}$

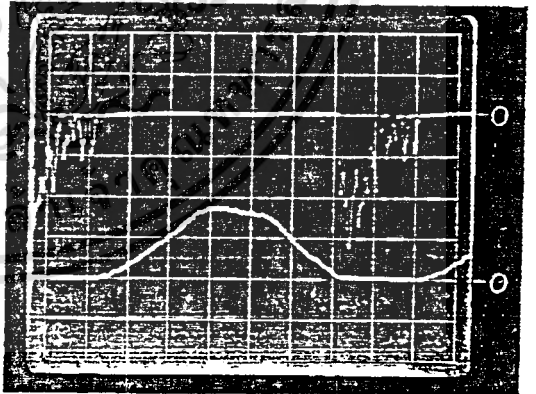
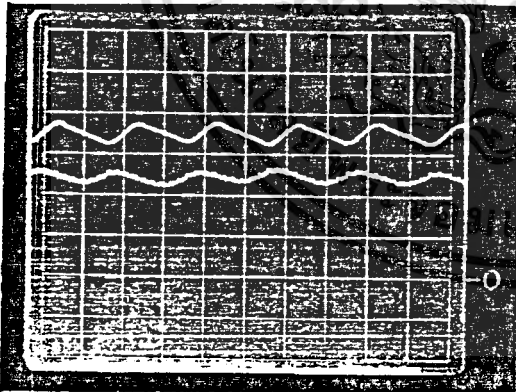
รูปที่ 6.26 รูปคลื่นตักดาเฟส b และ c. (Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{cn} = 100 \text{ V/div (120 V)}$

ล่าง : $V_{bn} = 100 \text{ V/div (124 V)}$

6.2.2 รูปคลื่นตักดาของอาร์เมเจอร์เมื่อจ่ายโหลดวิธีสปี

(ก) ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นมีจำนวน 12 ขด



รูปที่ 6.27 รูปคลื่นตักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น (Time Scale = 5 ms/div)

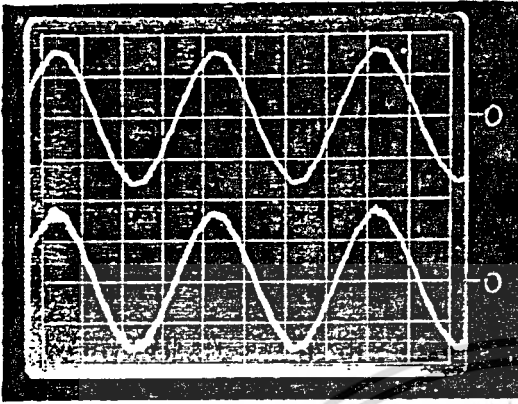
บน : $V_{ex} = 5 \text{ V/div (18.8 V)}$

ล่าง : $I_{ex} = 2 \text{ A/div (4.85 A)}$

รูปที่ 6.28 รูปคลื่นตักดาพร้อมไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_f = 20 \text{ V/div}$

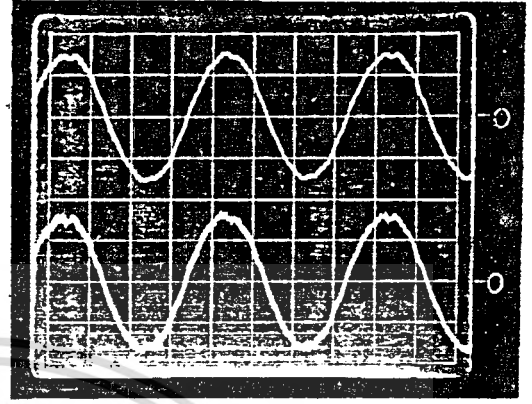
ล่าง : $I_f = 2 \text{ A/div (1.47 A)}$



รูปที่ 6.29 รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส a
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{an} = 200 \text{ V/div (225 V)}$

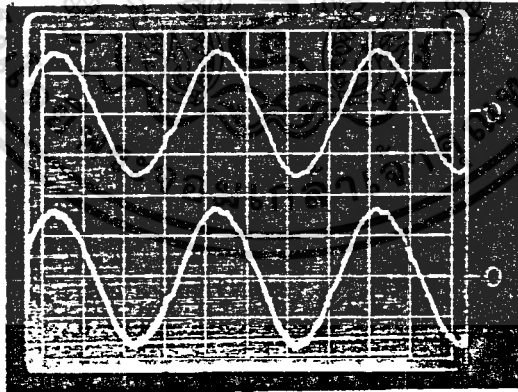
ล่าง : $I_{an} = 0.5 \text{ A/div (0.46 A)}$



รูปที่ 6.30 รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส b
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{bn} = 200 \text{ V/div (223 V)}$

ล่าง : $I_{bn} = 0.5 \text{ A/div (0.45 A)}$

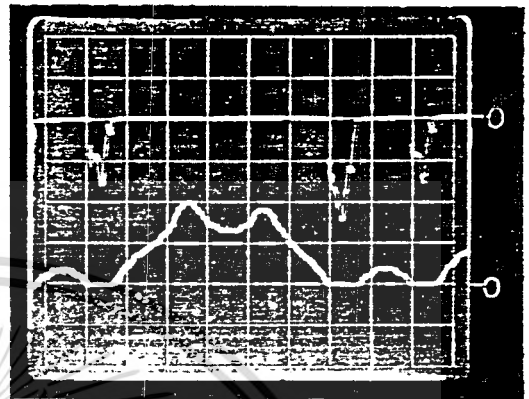
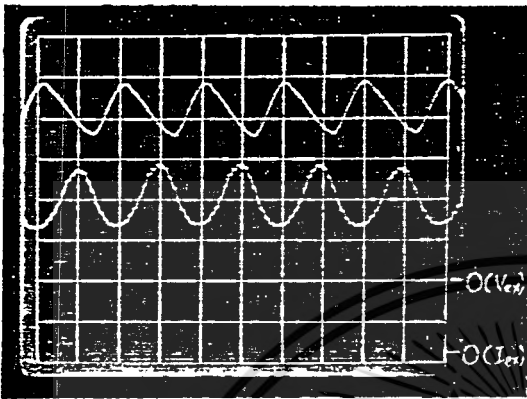


รูปที่ 6.31 รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส c
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{cn} = 200 \text{ V/div (220 V)}$

ล่าง : $I_{cn} = 0.5 \text{ A/div (0.45 A)}$

(ข) ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นมีจำนวน 6 ขด



รูปที่ 6.32 รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อน
เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
(Time Scale = 5 ms/div)

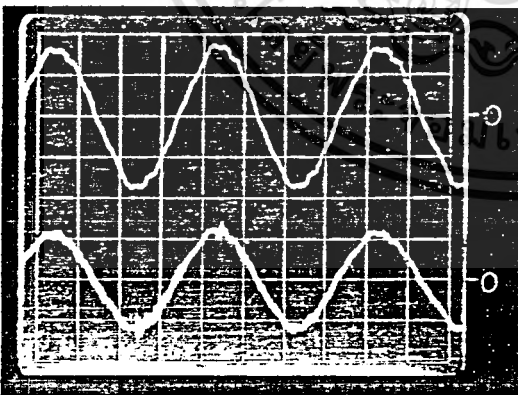
บน : $V_{ex} = 2 \text{ V/div (8.8 V)}$

ล่าง : $I_{ex} = 1 \text{ A/div (3.75 A)}$

รูปที่ 6.33 รูปคลื่นศักดาคร่อมไดโอดและ
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale
= 5 ms/div)

บน : $V_f = 20 \text{ V/div}$

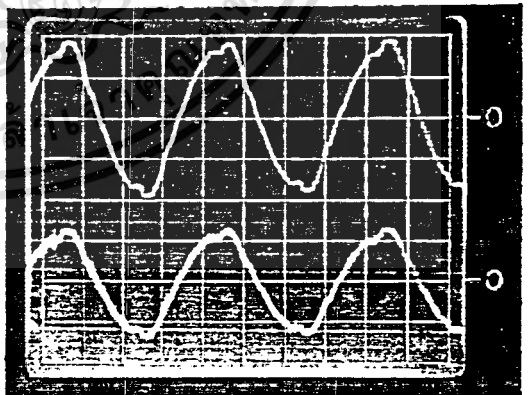
ล่าง : $I_f = 1 \text{ A/div (0.84 A)}$



รูปที่ 6.34 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส a
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{an} = 100 \text{ V/div (118 V)}$

ล่าง : $I_{an} = 0.5 \text{ A/div (0.31 A)}$

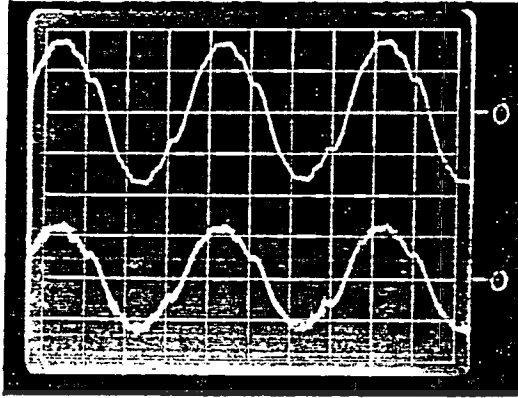


รูปที่ 6.35 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส b
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{bn} = 100 \text{ V/div (124 V)}$

ล่าง : $I_{bn} = 0.5 \text{ A/div (0.33 A)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



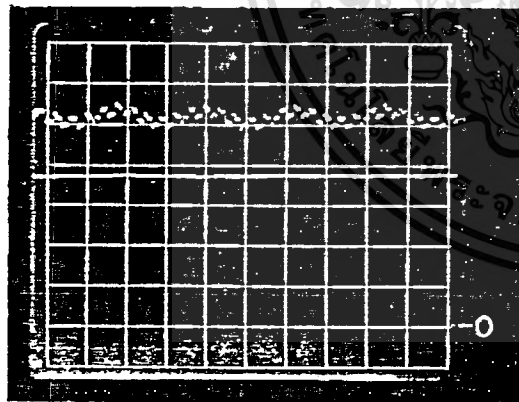
รูปที่ 6.36 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส c

(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{cn} = 100 \text{ V/div (120 V)}$

ล่าง : $I_{cn} = 0.5 \text{ A/div (0.32 A)}$

(ค) เมื่อป้อนกระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์



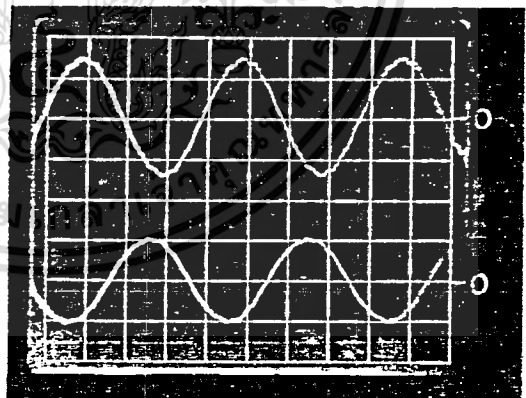
รูปที่ 6.37 รูปคลื่นกระแสสร้างสนามแม่

เหล็กและศักดาที่ขดลวดสร้างสนามแม่

เหล็ก (Time Scale = 5 ms/div)

บน : $I_r = 0.4 \text{ A/div (1.92 A)}$

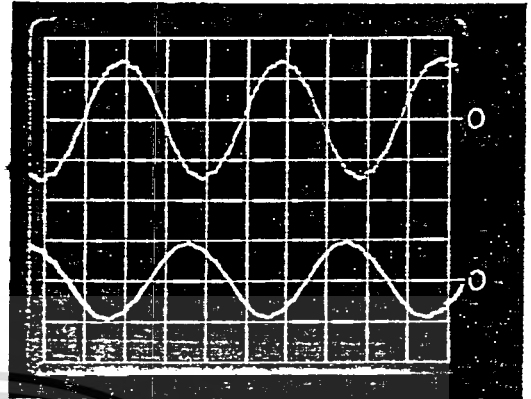
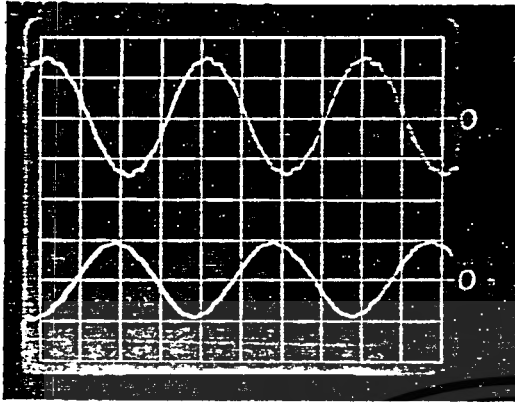
ล่าง : $V_r = 5/\text{div (19.0 V)}$



รูปที่ 6.38 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส a

บน : $V_{an} = 200 \text{ V/div (200 V)}$

ล่าง : $I_{an} = 2 \text{ A/div (1.41 A)}$



รูปที่ 6.39 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส b
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{bn} = 200 \text{ V/div (200 V)}$

ล่าง : $I_{bn} = 2 \text{ A/div (1.40 A)}$

รูปที่ 6.40 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส c
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{cn} = 200 \text{ V/div (197 V)}$

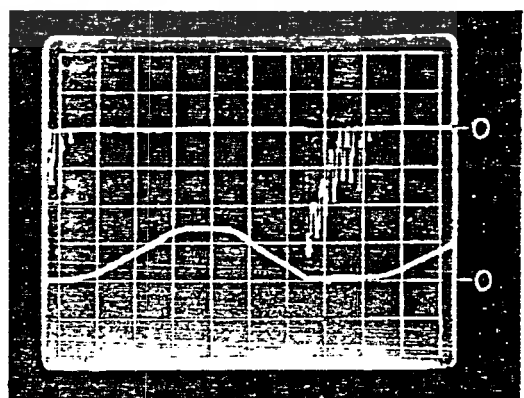
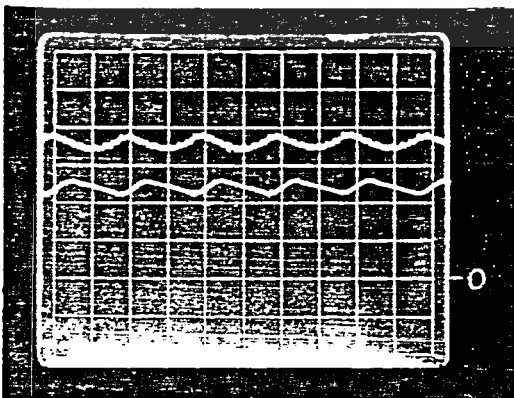
ล่าง : $I_{cn} = 2 \text{ A/div (1.40 A)}$

6.3 ผลของจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

จะแสดงการเปรียบเทียบศักดาของอาร์เมเจอร์ขณะไม่มีโหลด เมื่อจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเปลี่ยนไปโดยที่สเตเตอร์คงเดิม ผลการทดลองจะได้จากโรเตอร์-สเตเตอร์ R3-S3 และ R4-S3 ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

6.3.1 โรเตอร์ R3 และสเตเตอร์ S3 โดยใช้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

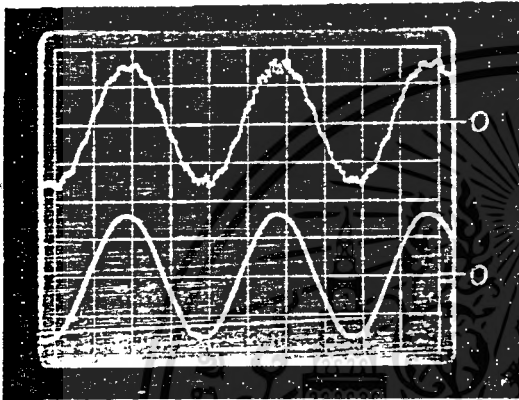
จำนวน 12 ขด



รูปที่ 6.41 รูปคลื่นตักดาและกระแสที่ป้อน
เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{ox} = 5 \text{ V/div}$ (12.8 V)

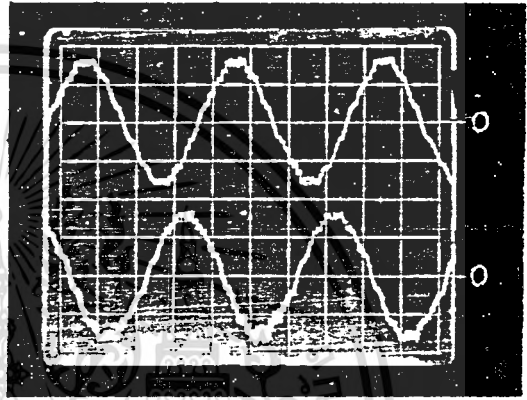
ล่าง : $I_{ox} = 1 \text{ A/div}$ (3.50 A)



รูปที่ 6.42 รูปคลื่นตักดาพร้อมไดโอดและ
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale
= 5 ms/div)

บน : $V_f = 50 \text{ V/div}$

ล่าง : $I_f = 0.5 \text{ A/div}$ (0.30 A)



รูปที่ 6.43 รูปคลื่นตักดาเฟส a เปรียบ
เทียบรูปขายน (Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{an} = 200 \text{ V/div}$ (223 V)

ล่าง : $V_{ref} = 200 \text{ V/div}$

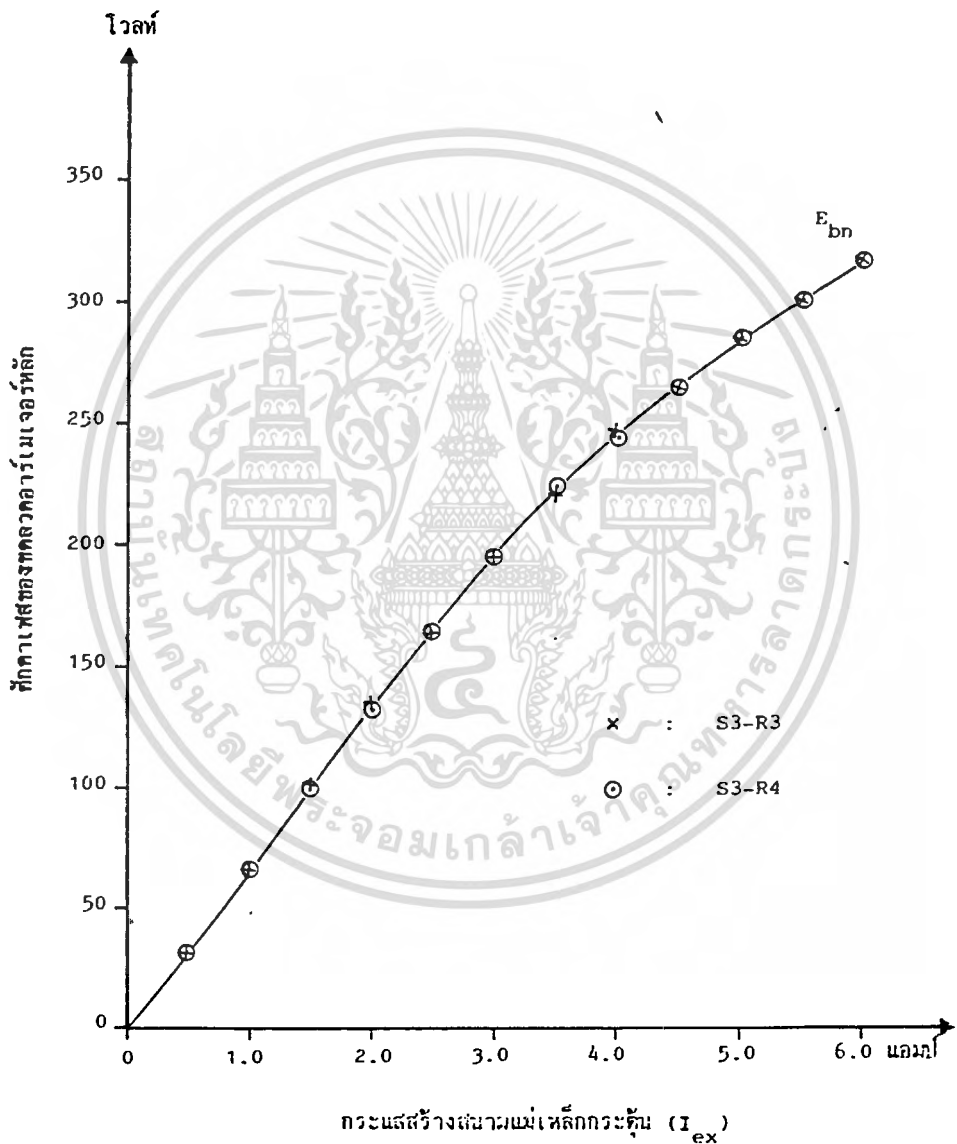
รูปที่ 6.44 รูปคลื่นตักดาเฟส b และ c
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{bn} = 200 \text{ V/div}$ (220 V)

ล่าง : $V_{cn} = 200 \text{ V/div}$ (220 V)

6.3.2 โรเตอร์ R4 และ สเตเตอร์ S3 โดยใช้ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

ต้นจำนวน 12 ชุด แสดงในรูปที่ 6.19 - 6.22



รูปที่ 6.45 คุณลักษณะการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า

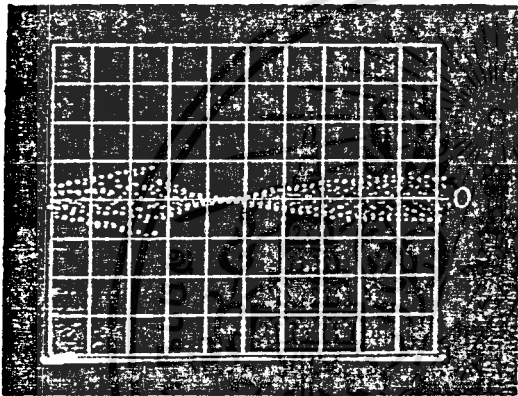
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลิขสิทธิ์จะอยู่ที่ผู้จัดทำเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

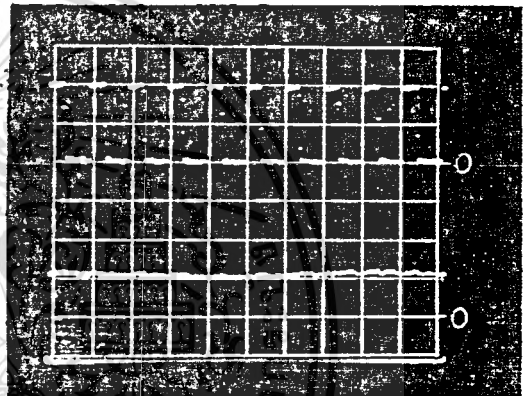
6.4 ผลการทดลองของโรเตอร์ R4 และ สเตเตอร์ S4 เมื่อทำงานแบบสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ด้วยตัวเอง

จะเป็นการทดลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบ ตามที่ได้ตั้งเป้าหมายเอาไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งมีการต่อวงจรตามรูปที่ 6.5 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.4.1 คุณลักษณะขณะ ไม่มี โหลด



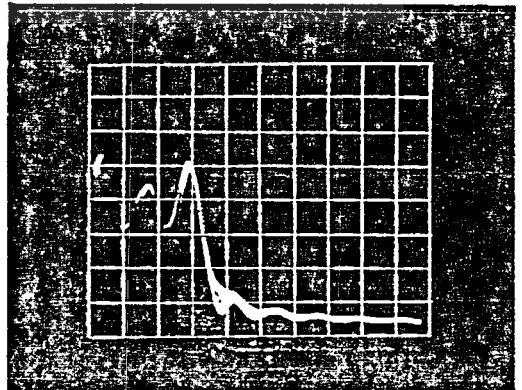
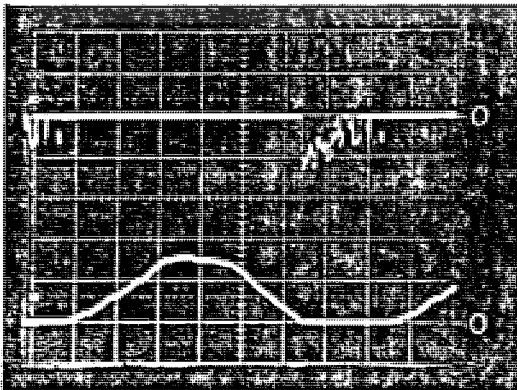
รูปที่ 6.46 ภาพการสร้างศักดาที่อาร์เมเจอร์ (Time Scale = 0.1 s/div)
 $V_b = 500 \text{ V/div}$



รูปที่ 6.47 รูปคลื่นศักดาและกระแสของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น (Time Scale = 1 ms/div)

บน : $V_{ex} = 20 \text{ V/div (40 V)}$

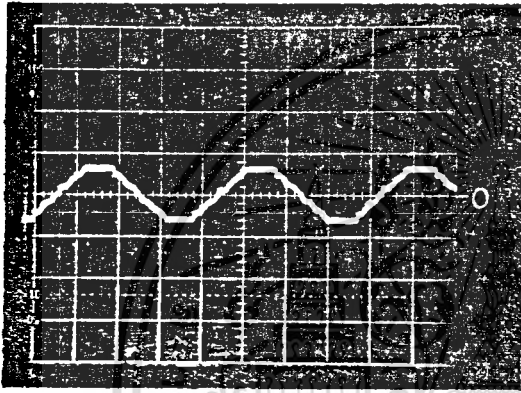
ล่าง : $I_{ex} = 2 \text{ A/div (2.05 A)}$



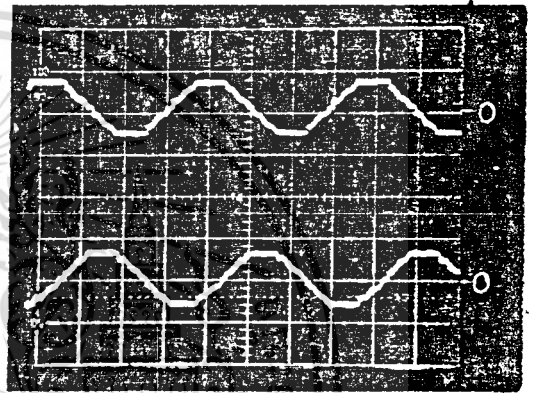
รูปที่ 6.48 รูปคลื่นตักดาพร้อมไดโอดและ
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale
= 5 ms/div)

บน : $V_f = 50 \text{ V/div}$

ล่าง : $I_f = 2 \text{ A/div (1.25 A)}$



รูปที่ 6.49 สเปกตรัมของกระแสสร้าง
สนามแม่เหล็ก (Frequency Scale =
20 Hz/div)



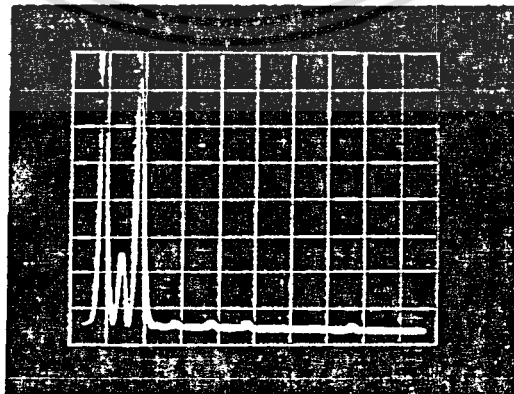
รูปที่ 6.50 รูปคลื่นตักดาเฟส a (Time
Scale = 5 ms/div)

$V_{an} = 500 \text{ V/div (217 V)}$

รูปที่ 6.51 รูปคลื่นตักดาเฟส b และ c
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{bn} = 500 \text{ V/div (220 V)}$

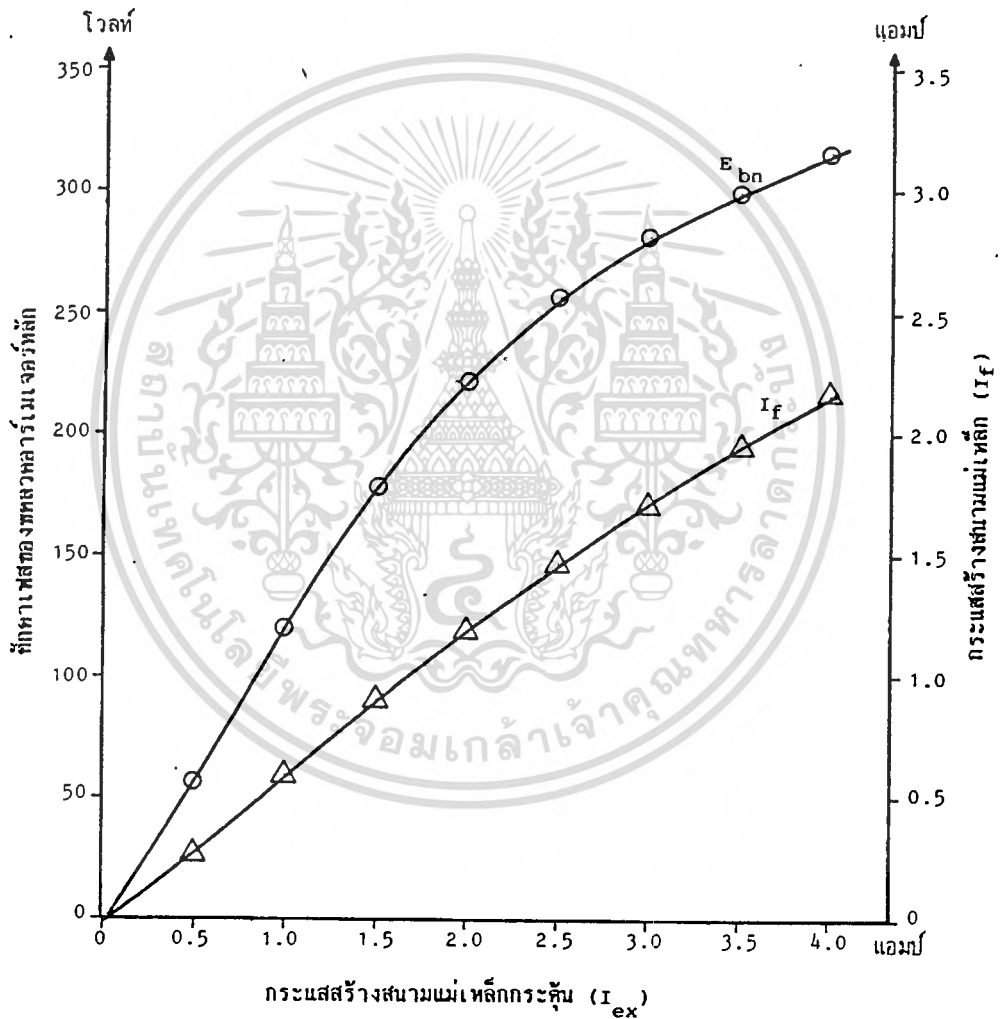
ล่าง : $V_{cn} = 500 \text{ V/div (220 V)}$



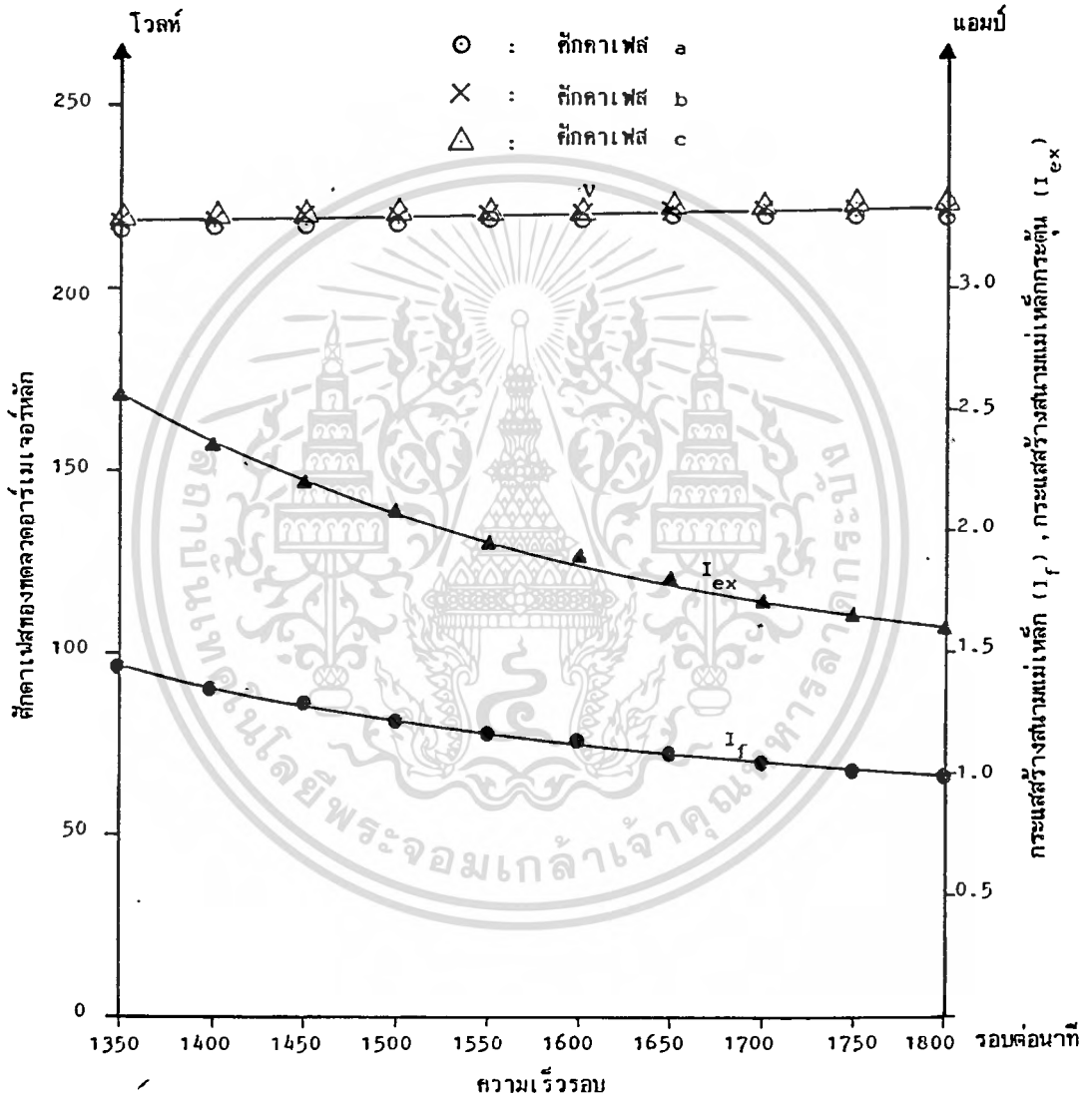
รูปที่ 6.52 สเปกตรัมของตักดาเฟส b

(Frequency Scale = 100 Hz/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

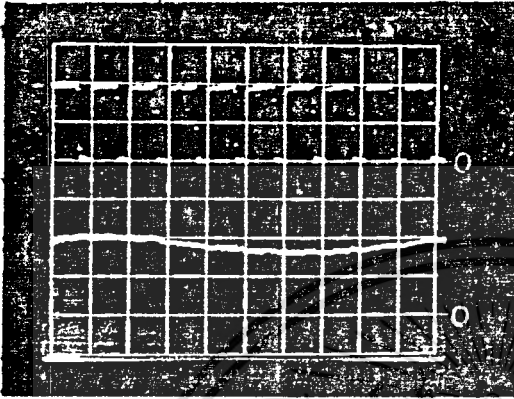


รูปที่ 6.53 คุณลักษณะการเห็นำแรงเคลื่อนไฟฟ้า



รูปที่ 6.54 การควบคุมการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ความเร็วต่างๆ ของวงจรรักษาคัดอัตโนมัติ

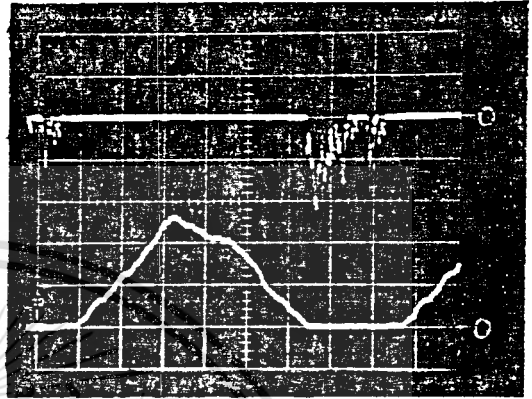
6.4.2 เมื่อจ่าย โหลดวิธีสี่แบบสมดุล



รูปที่ 6.55 รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อน
เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
(Time Scale = 1 ms/div)

บน : $V_{ox} = 20 \text{ V/div (40.0 V)}$

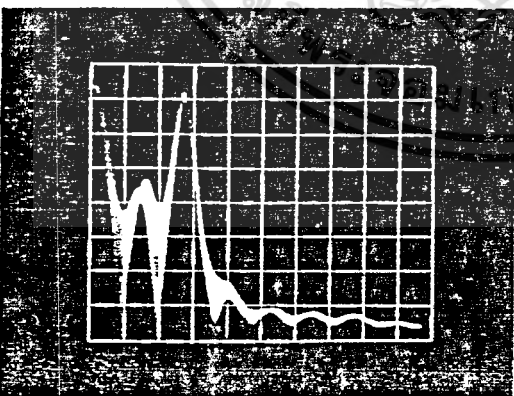
ล่าง : $I_{ox} = 2 \text{ A/div (3.22 A)}$



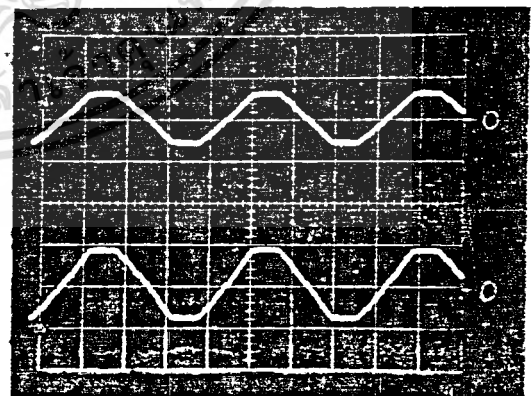
รูปที่ 6.56 รูปคลื่นศักดาพร้อมไดโอดและ
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale
= 5 ms/div)

บน : $V_f = 50 \text{ V/div}$

ล่าง : $I_f = 2 \text{ A/div (1.98 A)}$



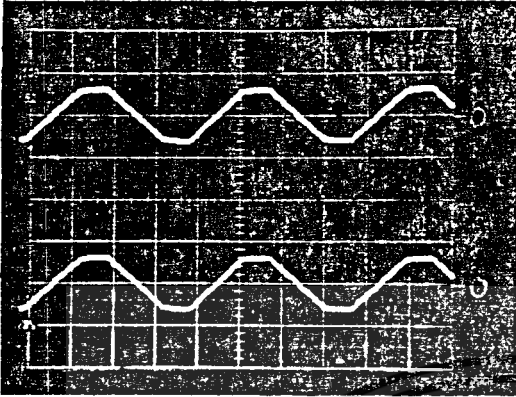
รูปที่ 6.57 สเปกตรัมของกระแสสร้าง
สนามแม่เหล็ก (Frequency Scale =
20 Hz/div)



รูปที่ 6.58 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส a

บน : $V_{an} = 500 \text{ V/div (215 V)}$

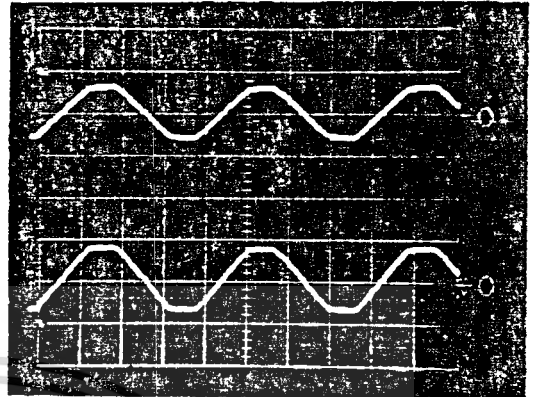
ล่าง : $I_{an} = 1 \text{ A/div (0.68 A)}$



รูปที่ 6.59 รูปคลื่นคิกดาและกระแสเฟส b
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{bn} = 500 \text{ V/div (217 V)}$

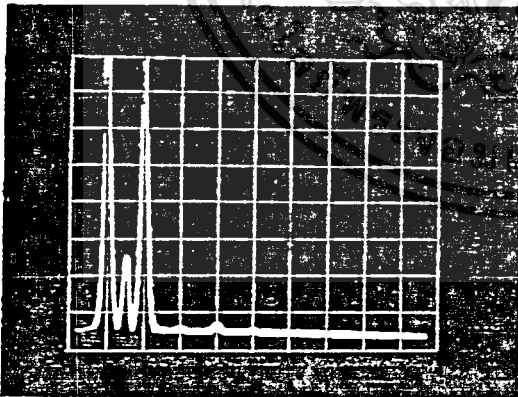
ล่าง : $I_{bn} = 1 \text{ A/div (0.70 A)}$



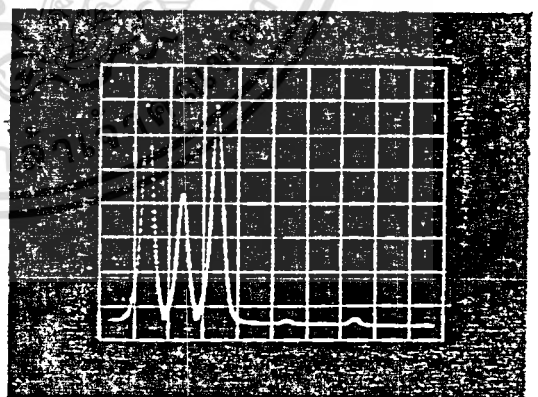
รูปที่ 6.60 รูปคลื่นคิกดาและกระแสเฟส c
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{cn} = 500 \text{ V/div (218 V)}$

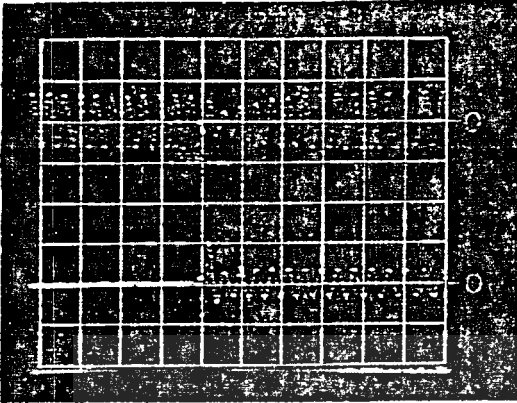
ล่าง : $I_{cn} = 1 \text{ A/div (0.71 A)}$



รูปที่ 6.61 สเปกตรัมของคิกดาเฟส b
(Frequency Scale = 100 Hz/div)



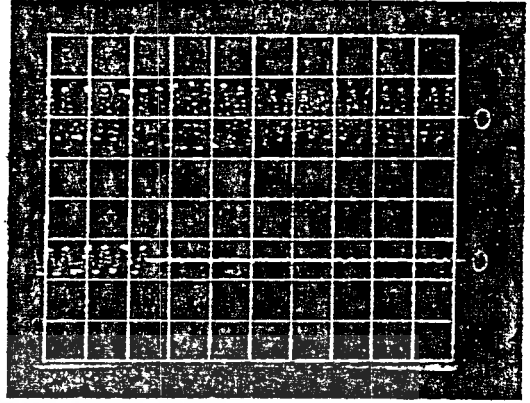
รูปที่ 6.62 สเปกตรัมของกระแสเฟส b
(Frequency Scale = 50 Hz/div)



รูปที่ 6.63 การเปลี่ยนแปลงศักดาและกระแสของเฟส จากภาวะไม่มีโหลดสู่ภาวะมีโหลด (Time Scale = 50ms/div)

$$V_{bn} = 500 \text{ V/div}$$

$$I_{bn} = 2 \text{ A/div}$$

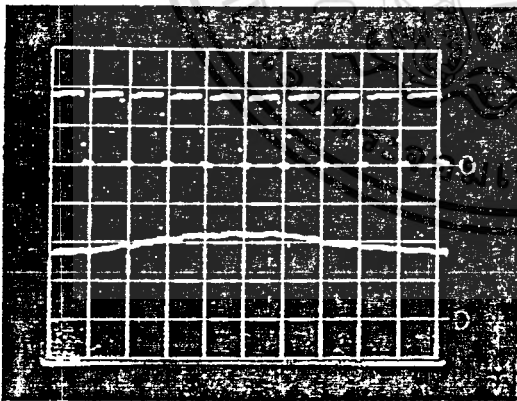


รูปที่ 6.64 การเปลี่ยนแปลงศักดาและกระแสของเฟส จากภาวะมีโหลดสู่ภาวะไม่มีโหลด (Time Scale = 50ms/div)

$$V_{bn} = 500 \text{ V/div}$$

$$I_{bn} = 2 \text{ A/div}$$

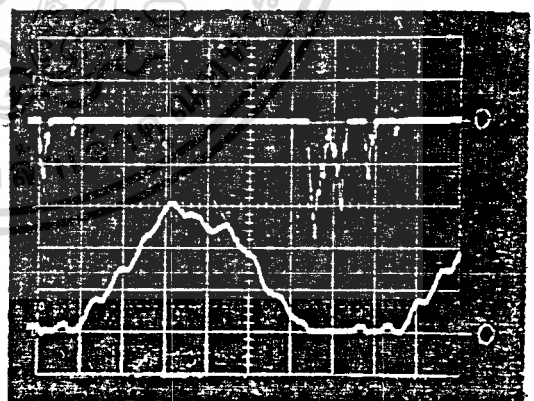
6.4.3 เมื่อจ่าย โหลดพสมรีซิสฟ-อินดักทีฟแบบสมดลย์



รูปที่ 6.66 รูปคลื่นศักดาและกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น (Time Scale = 1 ms/div)

$$\text{บน : } V_{ox} = 20 \text{ V/div (38.6 V)}$$

$$\text{ล่าง : } I_{ox} = 2 \text{ A/div (3.95 A)}$$

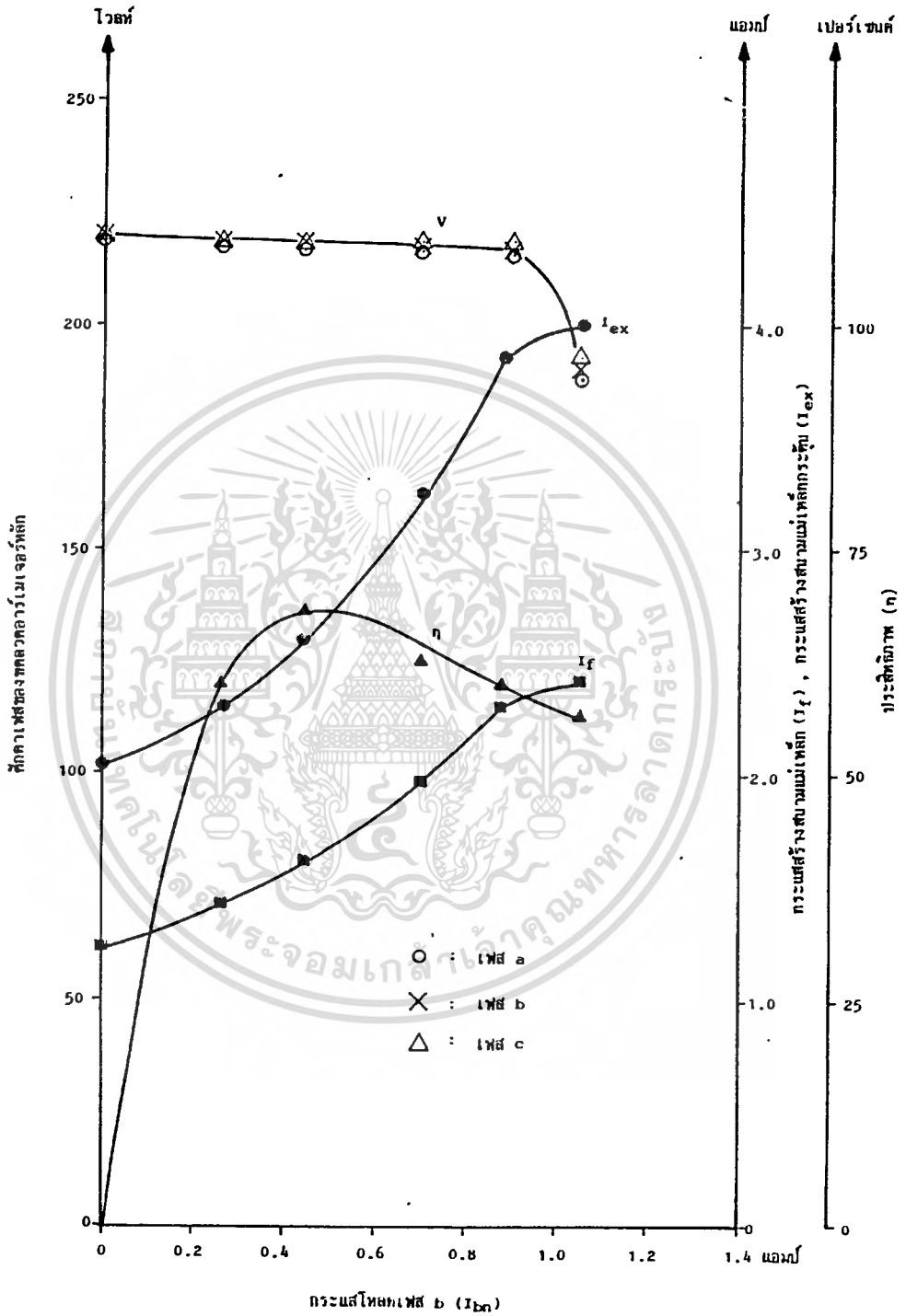


รูปที่ 6.67 รูปคลื่นศักดาคร่อมไดโอดและกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale = 5 ms/div)

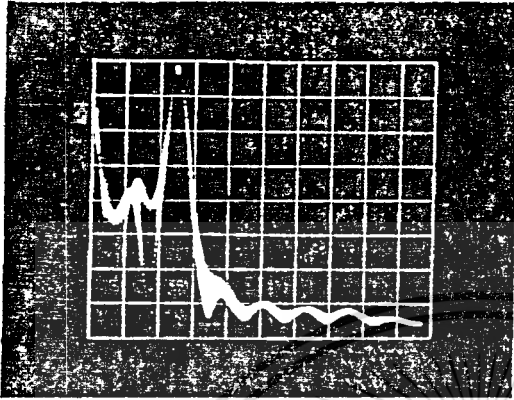
$$\text{บน : } V_f = 50 \text{ V/div}$$

$$\text{ล่าง : } I_f = 2 \text{ A/div (2.38 A)}$$

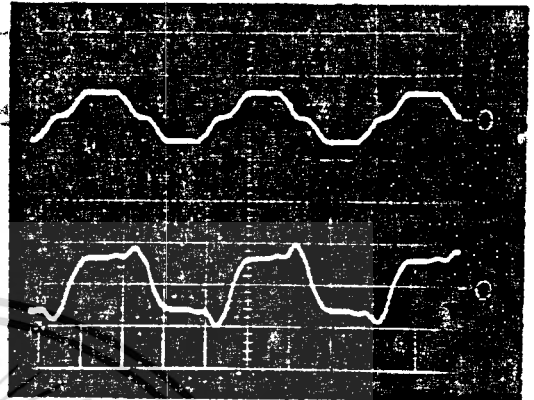
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



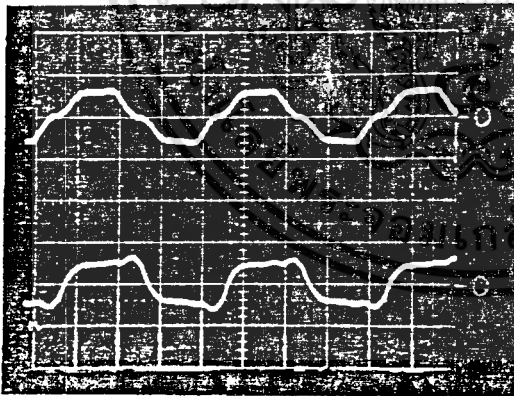
รูปที่ 6.65 คุณลักษณะเมื่อจ่าย โหลดรีลิสกิงแบบสมดุลย์



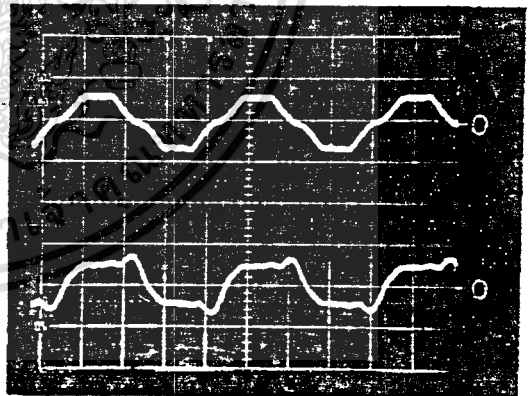
รูปที่ 6.68 สเปกตรัมของกระแสรีฟ้าง
สนามแม่เหล็ก (Frequency Scale =
20 Hz/div)



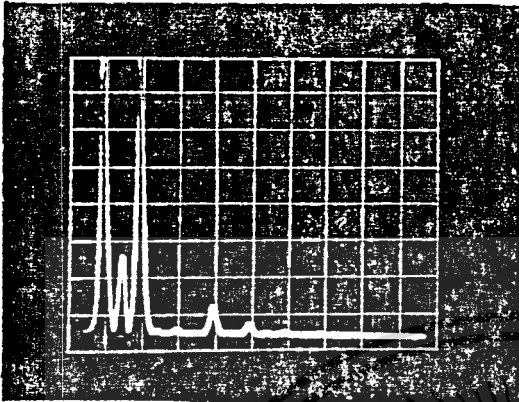
รูปที่ 6.69 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส a
บน : $V_{an} = 500 \text{ V/div (212 V)}$
ล่าง : $I_{an} = 1 \text{ A/div (0.75 A)}$



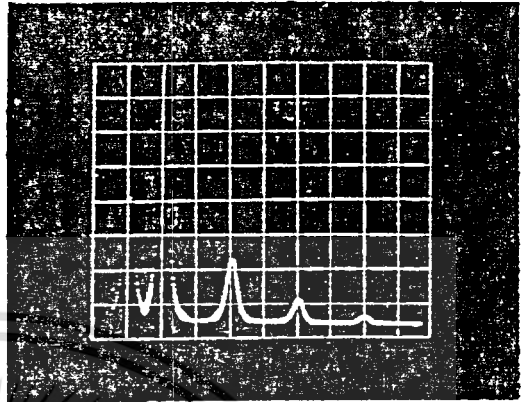
รูปที่ 6.70 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส b
(Time Scale = 5 ms/div)
บน : $V_{bn} = 500 \text{ V/div (215 V)}$
ล่าง : $I_{bn} = 1 \text{ A/div (0.70 A)}$



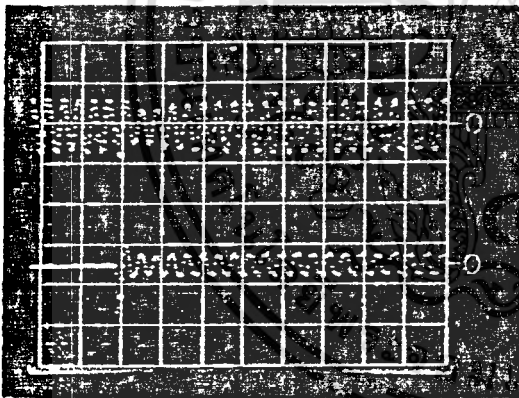
รูปที่ 6.71 รูปคลื่นศักดาและกระแสเฟส c
(Time Scale = 5 ms/div)
บน : $V_{cn} = 500 \text{ V/div (218 V)}$
ล่าง : $I_{cn} = 1 \text{ A/div (0.71 A)}$



รูปที่ 6.72 สเปคตรัมของศักดาเฟส b
(Frequency Scale = 100 Hz/div)



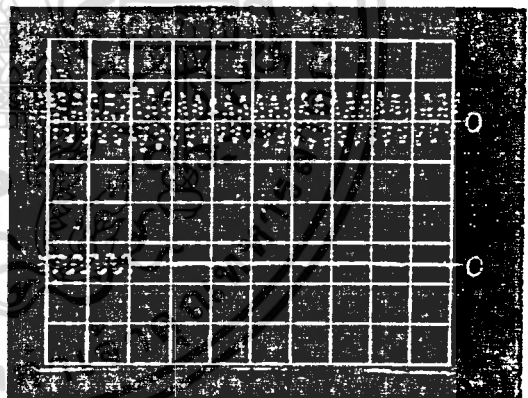
รูปที่ 6.73 สเปคตรัมของกระแสเฟส b
(Frequency Scale = 50 Hz/div)



รูปที่ 6.74 การเปลี่ยนแปลงศักดาและ
กระแสของเฟส b จากภาวะไม่มีโหลดสู่ภาวะ
มีโหลด (Time Scale = 50ms/div)

$$V_{bn} = 500 \text{ V/div}$$

$$I_{bn} = 2 \text{ A/div}$$

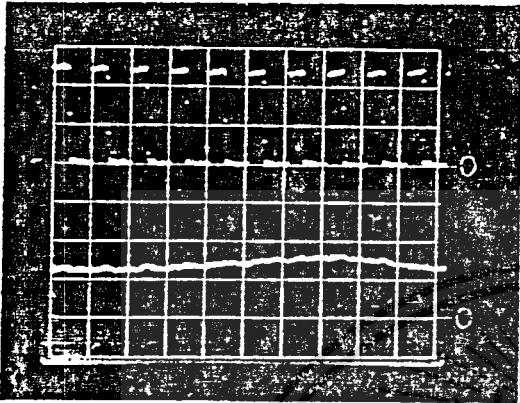


รูปที่ 6.75 การเปลี่ยนแปลงศักดาและ
กระแสของเฟส b จากภาวะมีโหลดสู่ภาวะ
ไม่มีโหลด (Time Scale = 50ms/div)

$$V_{bn} = 500 \text{ V/div}$$

$$I_{bn} = 2 \text{ A/div}$$

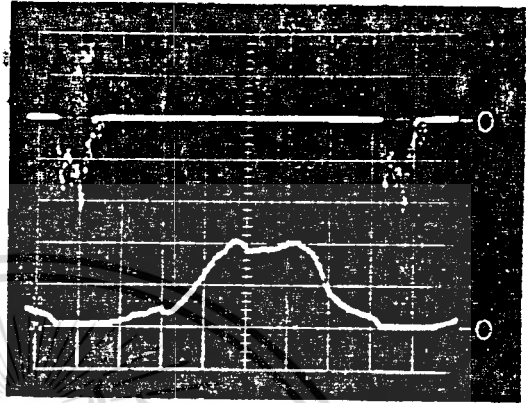
6.4.4 เมื่อจ่าย โหลดรีซิสทีฟเพียงเฟสเดียว



รูปที่ 6.77 รูปคลื่นตักดาและกระแสที่ป้อน
เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
(Time Scale = 1 ms/div)

บน : $V_{ex} = 20 \text{ V/div}$ (49.8 V)

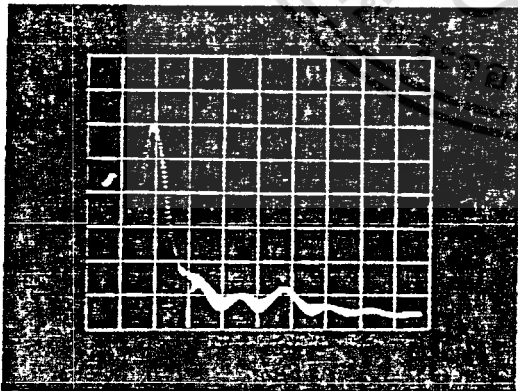
ล่าง : $I_{ex} = 2 \text{ A/div}$ (2.63 A)



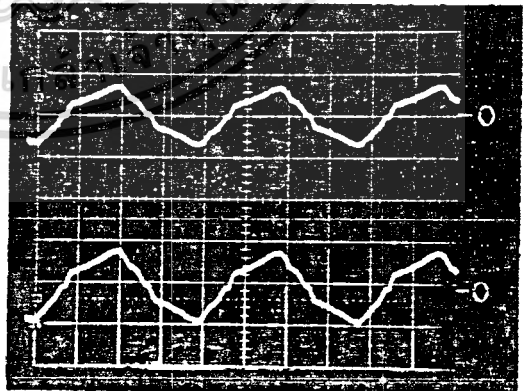
รูปที่ 6.78 รูปคลื่นตักดาพร้อมไดโอดและ
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale
= 5 ms/div)

บน : $V_f = 50 \text{ V/div}$

ล่าง : $I_f = 2 \text{ A/div}$ (1.70 A)



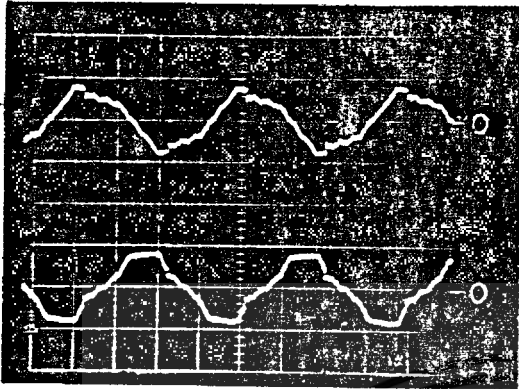
รูปที่ 6.79 สเปกตรัมของกระแสสร้าง
สนามแม่เหล็ก (Frequency Scale =
20 Hz/div)



รูปที่ 6.80 รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส b

บน : $V_{bn} = 500 \text{ V/div}$ (218 V)

ล่าง : $I_{bn} = 1 \text{ A/div}$ (0.70 A)

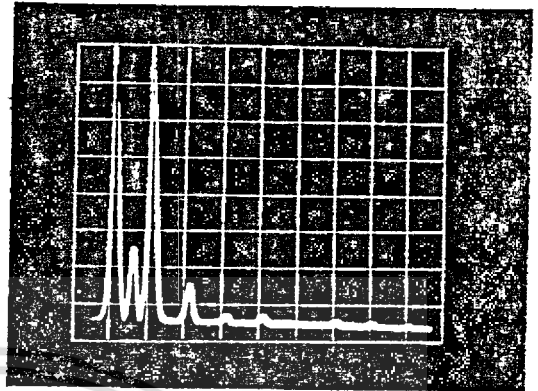


รูปที่ 6.81 รูปคลื่นศักดาเฟส a และ b

(Time Scale = 5 ms/div)

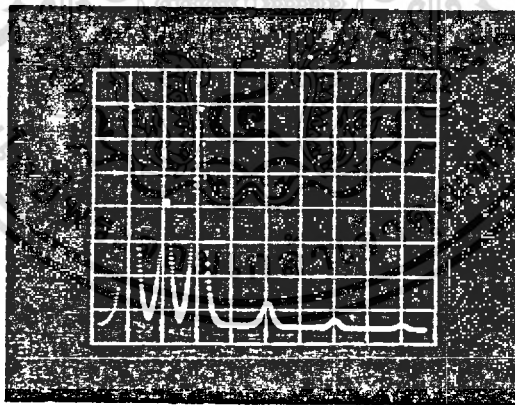
บน : $V_{an} = 500 \text{ V/div (239 V)}$

ล่าง : $V_{cn} = 500 \text{ V/div (270 V)}$



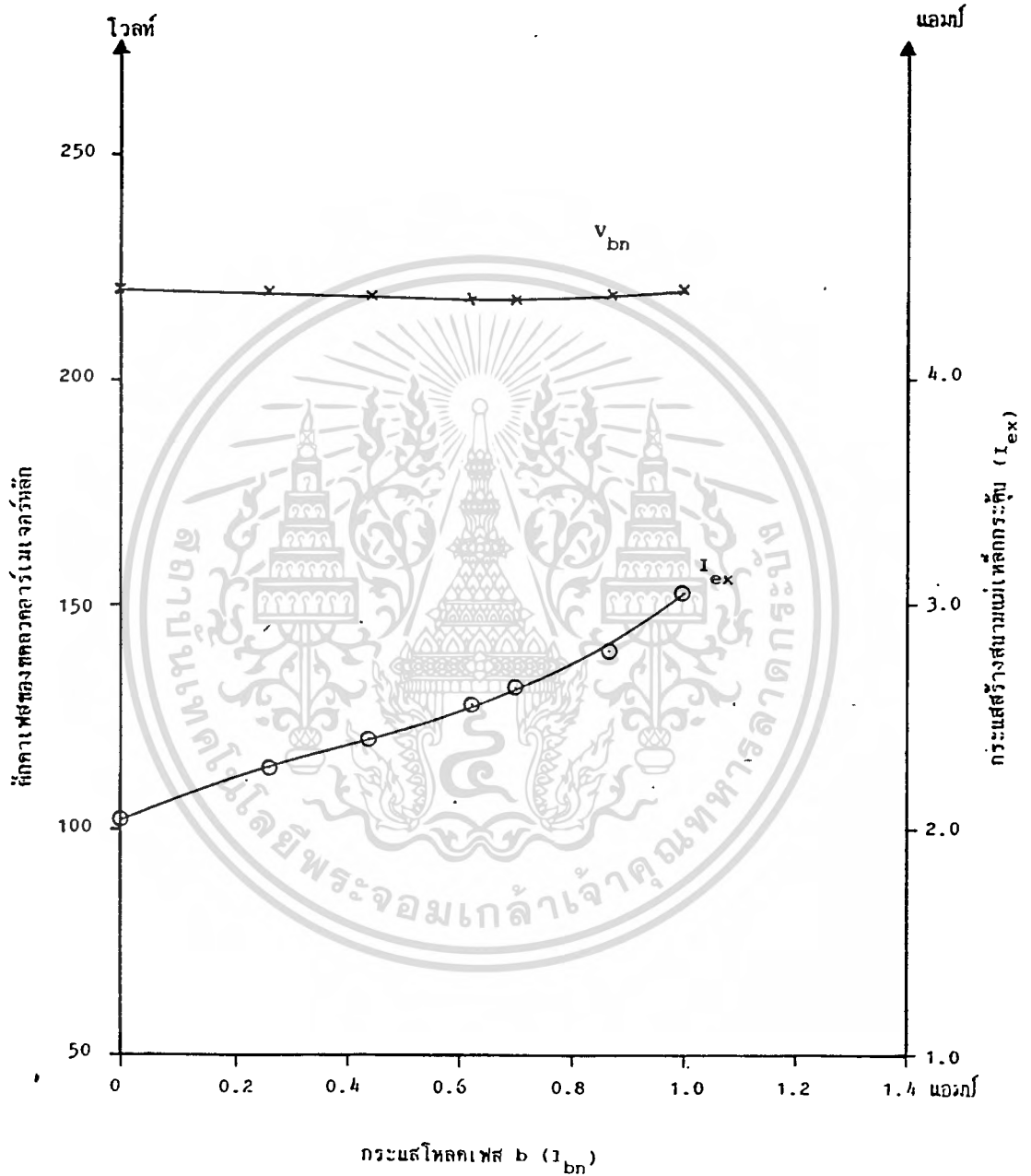
รูปที่ 6.82 สเปกตรัมของศักดาเฟส b

(Frequency Scale = 100 Hz/div)



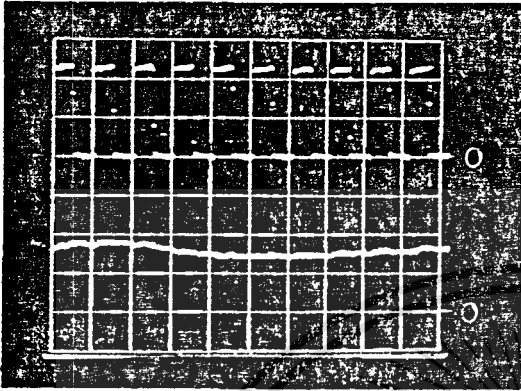
รูปที่ 6.83 สเปกตรัมของกระแสเฟส b

(Frequency Scale = 50 Hz/div)



รูปที่ 6.84 คุณสมบัติเมื่อจ่ายโวลต์กริดวิธีทีฟเฟสเดียว

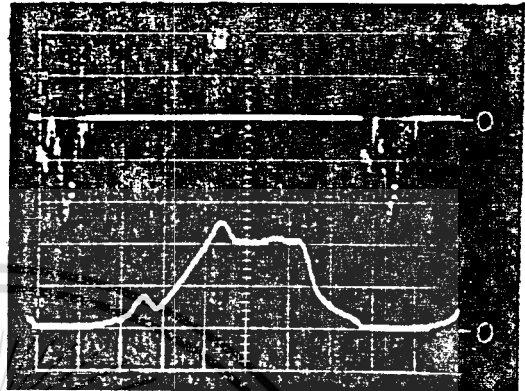
6.4.5 เมื่อจ่าย โหลดผสมรีซิสทีฟ-อินดักทีฟเพียงเฟสเดียว



รูปที่ 6.85 รูปคลื่นตักดาและกระแสที่ป้อน
เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น
(Time Scale = 1 ms/div)

บน : $V_{ex} = 20 \text{ V/div (47.2 V)}$

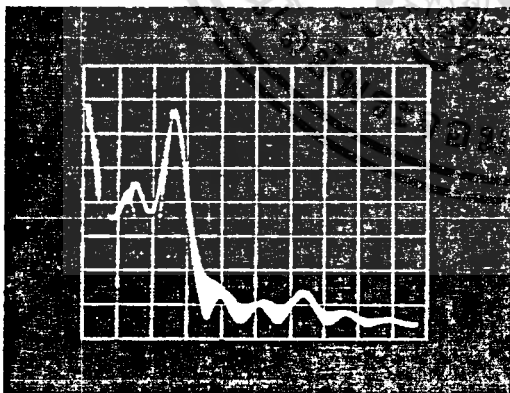
ล่าง : $I_{ex} = 2 \text{ A/div (3.00 A)}$



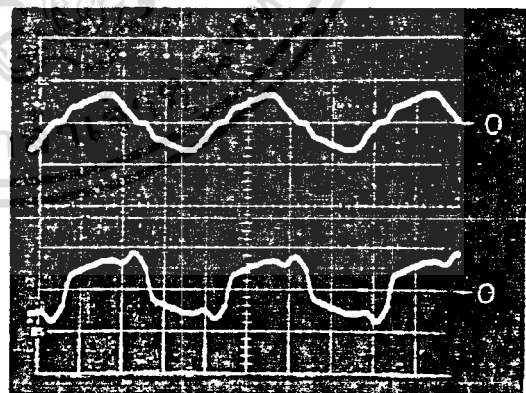
รูปที่ 6.86 รูปคลื่นตักดาพร้อมไดโอดและ
กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Time Scale
= 5 ms/div)

บน : $V_f = 50 \text{ V/div}$

ล่าง : $I_f = 2 \text{ A/div (1.87 A)}$



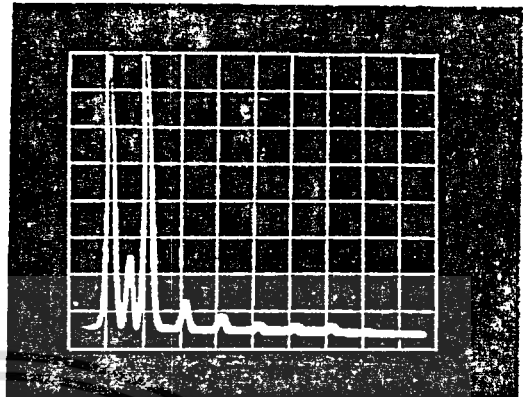
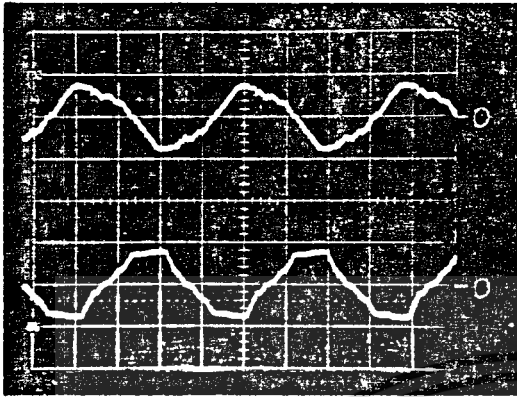
รูปที่ 6.87 สเปกตรัมของกระแสสร้าง
สนามแม่เหล็ก (Frequency Scale =
20 Hz/div)



รูปที่ 6.88 รูปคลื่นตักดาและกระแสเฟส b

บน : $V_{bn} = 500 \text{ V/div (222 V)}$

ล่าง : $I_{bn} = 1 \text{ A/div (0.71 A)}$



รูปที่ 6.89 รูปคลื่นตักดาเฟส a และ b

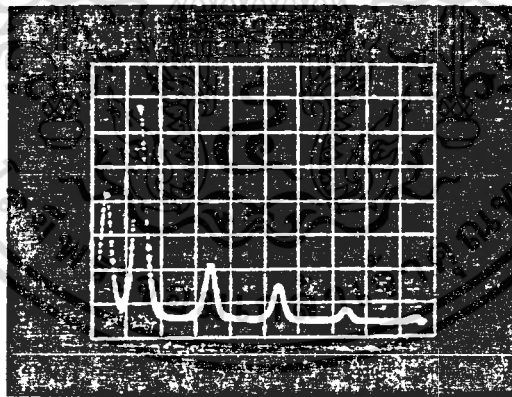
(Time Scale = 5 ms/div)

บน : $V_{an} = 500 \text{ V/div (248 V)}$

ล่าง : $V_{cn} = 500 \text{ V/div (269 V)}$

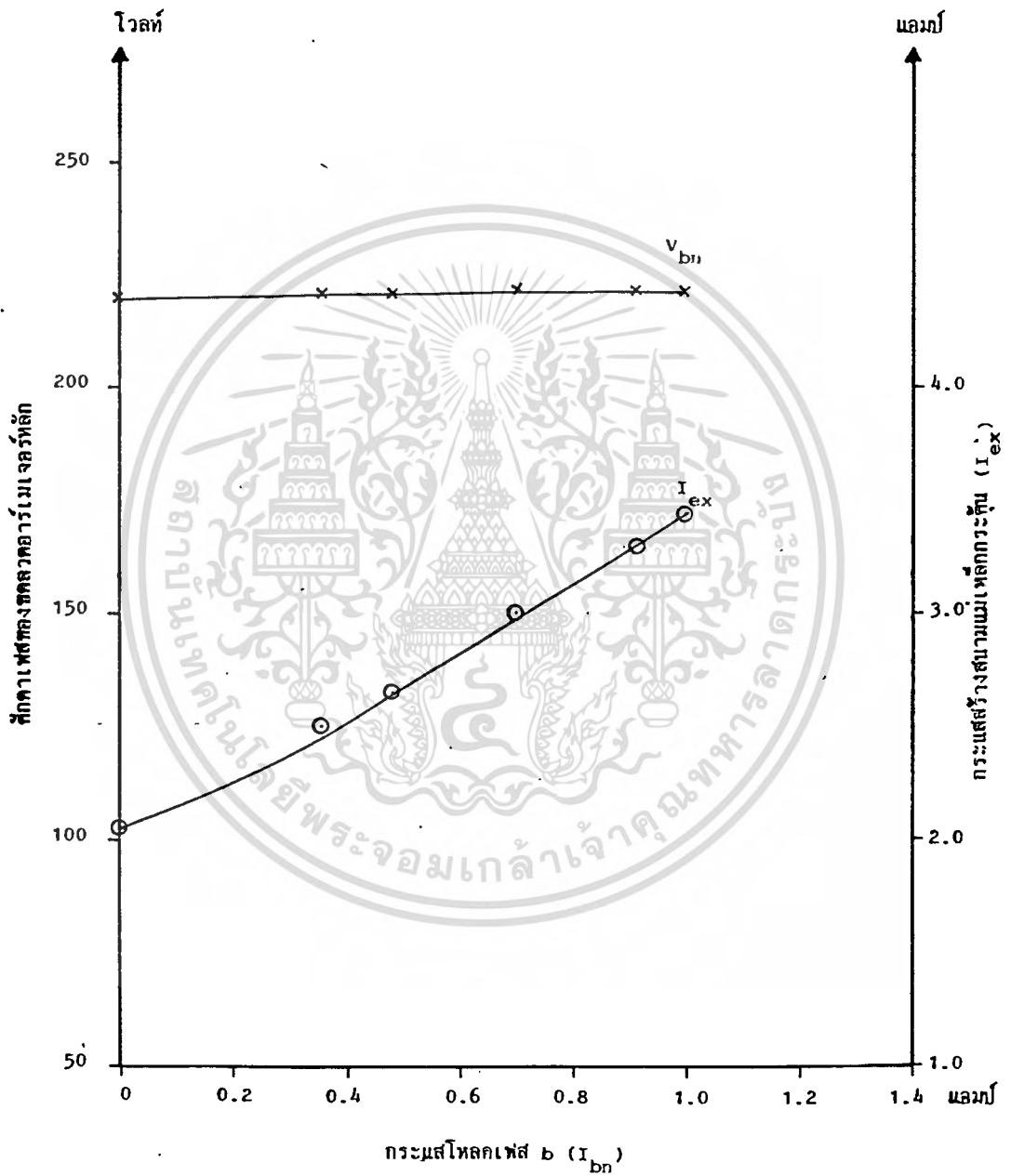
รูปที่ 6.90 สเปคตรัมของตักดาเฟส b

(Frequency Scale = 100 Hz/div)



รูปที่ 6.91 สเปคตรัมของกระแสเฟส b

(Frequency Scale = 50 Hz/div)



รูปที่ 6.92 คุณลักษณะเมื่อจ่ายโวลต์ผสมรีซิสตีฟ-อินดักทีฟเฟสเดียว

บทที่ 7

บทสรุป

จากผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

7.1 ผลของวิธีการสร้างสนามแม่เหล็ก

จากการสร้างสนามแม่เหล็กทั้ง 3 วิธี คือ

1 ป้อนศักดากระแสไฟตรงแบบต่อเนื่องเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ที่อยู่ที่โรเตอร์ซึ่งต่ออนุกรมกันทั้ง 4 ขด

2 ป้อนศักดากระแสไฟตรงแบบต่อเนื่องเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ที่อยู่ที่สเตเตอร์โดยที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ต่อกับไดโอดในภาวะใช้งานจริง

3 ป้อนศักดากระแสไฟตรงเป็นพัลส์ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่อยู่ที่สเตเตอร์ โดยที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ต่อกับไดโอดในภาวะใช้งานจริง

จากรูปที่ 6.6 - 6.17 แสดงให้เห็นว่า แม้ว่าการสร้างสนามแม่เหล็กโดยวิธีที่ 2 และ 3 จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ไม่เป็นกระแสไฟตรงที่มีขนาดคงที่ เหมือนกับการสร้างสนามแม่เหล็กในวิธีที่ 1 ซึ่งเป็นการป้อนศักดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดที่โรเตอร์ก็ตาม แต่รูปคลื่นศักดาของอาร์เมเจอร์ที่ได้จากการสร้างสนามแม่เหล็กทั้ง 3 วิธี ก็มีรูปคลื่นที่คล้ายกัน

7.2 ผลของจำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น

จากรูปที่ 6.19 - 6.26 ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่ต้องจ่ายโหลด จะเห็นความแตกต่างของทั้ง กระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก และรูปคลื่นศักดาของอาร์เมเจอร์ อันเนื่องจากการที่มีจำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามความแตกต่างของรูปคลื่นศักดาอาร์เมเจอร์ของทั้ง 2 ชุด ก็มีไม่มาก แต่จากรูปที่ 6.29 - 6.31 และ 6.34 - 6.36 ซึ่งเป็นรูปคลื่นศักดาอาร์เมเจอร์ เมื่อมีการจ่ายโหลดวิธีสลับของกรณีที่ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นจำนวน 12 ขด และ 6 ขด ตามลำดับ จะเห็นว่ารูปคลื่นของกรณีหลัง จะเกิดการบิดเบี้ยวไปจากรูปขายนับ้าง แต่สำหรับกรณีแรกจะยังคงให้

รูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับรูปซ้าย และใกล้เคียงกับรูปคลื่นที่ได้เมื่อมีการจ่ายโหลดรีซิสทีฟของการป้อนกระแสไฟตรงเข้าขดลวดในโรเตอร์ ดังรูปที่ 6.38 - 6.40

7.3 ผลของจำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 6.21 - 6.22 และ 6.43 - 6.44 ซึ่งเป็นข้อมูล โรเตอร์ - สเตเตอร์ ของ R4 - S3 และ R3 - S3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นศักดาอาร์เมเจอร์ของทั้ง 2 กรณี จะคล้ายกันมาก และเมื่อคุณลักษณะการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าของทั้ง 2 กรณี ในรูปที่ 6.45 จะเห็นได้ว่า แม้ว่าจำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์จะแตกต่างกัน แต่ที่กระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นค่าเดียวกัน จะให้ค่าการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเดียวกัน

7.4 การเปรียบเทียบผลที่ได้ ในทางปฏิบัติกับทฤษฎี

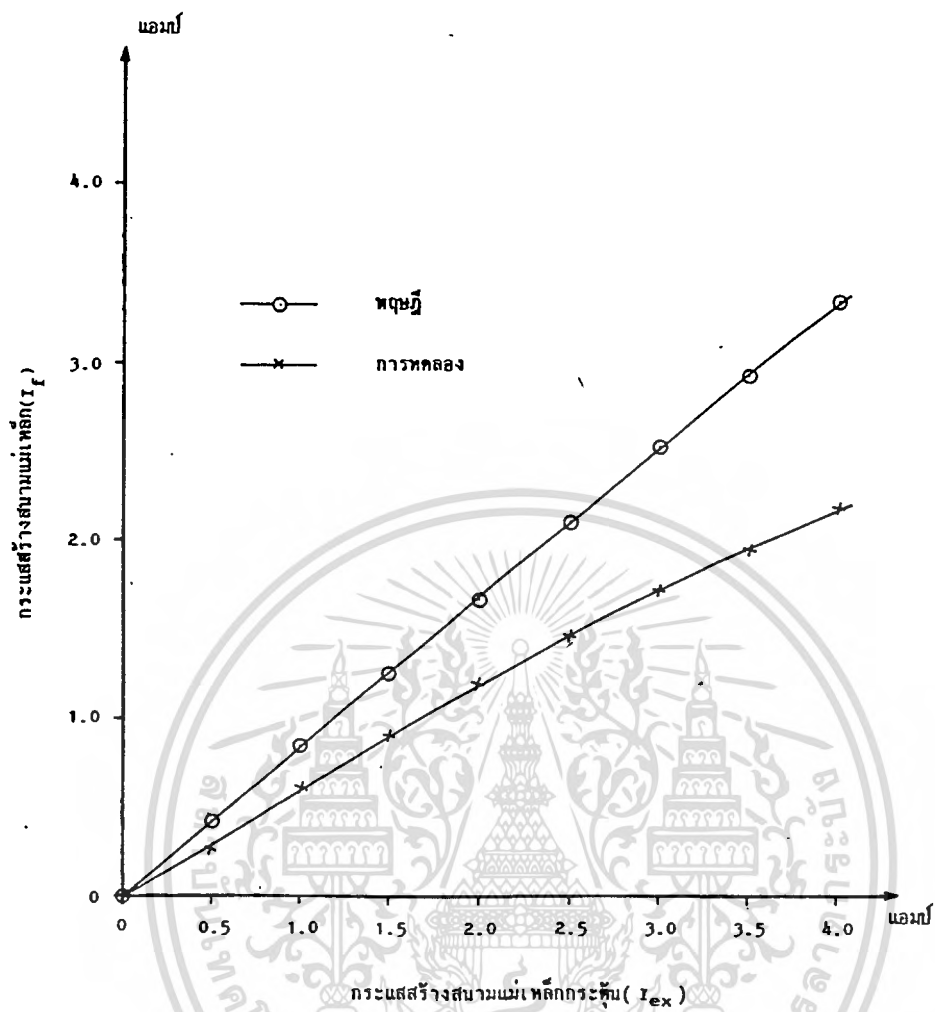
เนื่องจากกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (I_f) ไม่ได้เป็นกระแสไฟตรงที่มีขนาดคงที่ ดังนั้นในการหาค่าเฉลี่ยที่ถูกต้องของกระแส จะต้องใช้วิธีการหาพื้นที่เฉลี่ยใน 1 คาบ ซึ่งจะต้องใช้เครื่องมือเฉพาะ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยจากค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์ โดยการเปรียบเทียบแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากการป้อนศักดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่สเตเตอร์ กับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่เกิดจากการป้อนศักดากระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ ดังรูปที่ 6.18 จะเห็นว่าค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์กับค่ากระแสไฟตรงนี้ จะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงกระแสประมาณ 2 แอมป์ ดังนั้นในการแสดงค่ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กของผลการทดลองในบทที่ 6 จึงใช้ค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์โดยตรง

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากการทดลอง กับค่าในทางทฤษฎี ตามสมการที่ 3.8 ขณะไม่มีโหลด ของผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.4 แสดงในรูปที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการคำนวณจะแตกต่างกันมาก ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจาก

- 1 จากการวัดนารามิเตอร์ในส่วนที่เป็นความเหนี่ยวนำ โดยคิดว่าระบบเป็นแบบเชิงเส้น ในขณะที่คุณสมบัติของแกนเหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

- 2 รูปคลื่นกระแสสร้างสนามแม่เหล็กไม่ได้เป็นไปตามสมการที่ 3.9 ซึ่งได้จากการตั้งสมมุติฐานว่า สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์มีค่าคงที่ แต่จากรูปที่ 6.48 จะเห็นได้ว่า มีศักดาคร่อมไดโอดอยู่ นั่นคือจะมีช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.1 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลองกับทางทฤษฎี

ดังนั้นในการวิเคราะห์หลักการเกิดสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ ที่มีโครงสร้างแบบนี้ อาจมีรูปสมการของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กอย่างอื่นที่สอดคล้องกันอีกก็ได้ ที่ทำให้สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์มีผลเหมือนกับการป้อนกระแสไฟตรงเข้าขดลวดบนโรเตอร์

7.5 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้น (จากหัวข้อการทดลองที่ 6.4)

คุณลักษณะที่จะแสดงต่อไปนี้ จะเป็นกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดแบบสมดุลย์เท่านั้น และค่าการตอบสนองที่แสดงไว้ จะเป็นค่าของระบบที่ใช้มอเตอร์กระแสไฟตรงที่ไม่ได้ควบคุมความเร็วเป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

7.5.1 ขณะไม่มีโหลด

- (ก) การสร้างศักดาด้วยตัวเอง จะเกิดขึ้นเมื่อมีความเร็วรอบประมาณ 1200 รอบต่อนาที หลังจากนั้นจะใช้เวลาประมาณ 2 วินาที ในการเข้าสู่ภาวะปกติ(steady state)
- (ข) รูปคลื่นศักดาให้ค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิคต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์
- (ค) วงจรรักษาศักดาอัตโนมัติ สามารถรักษาศักดาทุกเฟสให้อยู่ในช่วง 220 ± 2 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความเร็ว 1350 - 1800 รอบต่อนาที

7.5.2 เมื่อจ่ายโหลดวิธีสี่ฟัฟเต็มพิกัด(0.7 A)

- (ก) รูปคลื่นศักดามีค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิคต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์
- (ข) การตอบสนองของการเข้าสู่ภาวะปกติ ประมาณ 0.2 วินาที เมื่อใส่โหลดเต็มพิกัดจากภาวะไม่มีโหลด
- (ค) การตอบสนองของการเข้าสู่ภาวะปกติ ประมาณ 0.3 วินาที เมื่อปลดโหลดเต็มพิกัดสู่ภาวะไม่มีโหลด
- (ง) เรกกิวเลชันศักดาของทุกเฟส อยู่ในช่วง 2.5 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงพิกัดโหลด และ 2.7 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 125 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดโหลด
- (จ) ประสิทธิภาพ 60 - 68 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 40 - 125 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดโหลด

7.5.3 เมื่อจ่ายโหลดผสม วิธีสี่ฟัฟ-อินดักทึฟ เต็มพิกัด(0.7 A , pf $\approx$ 0.65)

- (ก) รูปคลื่นศักดามีค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิคประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ เมื่อกระแสโหลดมีเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิคประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์
- (ข) การตอบสนองของการเข้าสู่ภาวะปกติ ประมาณ 0.3 วินาที เมื่อใส่โหลดเต็มพิกัดจากภาวะไม่มีโหลด
- (ค) การตอบสนองของการเข้าสู่ภาวะปกติ ประมาณ 0.3 วินาที เมื่อปลดโหลดเต็มพิกัดสู่ภาวะไม่มีโหลด
- (ง) เรกกิวเลชันศักดาของทุกเฟส อยู่ในช่วง 3.7 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงพิกัดโหลด
- (จ) ประสิทธิภาพ 51 - 52 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 50 - 100 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดโหลด

7.6 สรุปและเสนอแนะ

รูปคลื่นศักดาอาร์เมเจอร์ที่ได้ จากการป้อนกระแสไฟตรงเข้าขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นที่มีจำนวนรอบเหมาะสม จะคล้ายกับรูปคลื่นที่ได้จากการป้อนกระแสไฟตรงเข้าขดลวดที่โรเตอร์ อย่างไรก็ตามรูปคลื่นนี้อาจจะมีความแตกต่างมากจนเห็นได้ชัด เมื่อจำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นไม่เหมาะสม

จากการทดลองที่ได้ว่า จำนวนขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน สำหรับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นหนึ่งๆ แต่ยังคงให้ผลการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์เหมือนกันนั้น มีข้อสังเกตว่า ถ้าหาพื้นที่หน้าตัดรวมของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กทั้งสองจะพบว่าพื้นที่เท่ากัน ดังนั้นในกรณีที่พื้นที่รวมของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กทั้งสองไม่เท่ากัน อาจทำให้ผลการการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าแตกต่างกันไปได้

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ จะแตกต่างกับการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเดิมที่ป้อนกระแสไฟตรงเข้าขดลวดที่โรเตอร์ เพราะกระแสในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ จะขึ้นกับความสัมพันธ์ของความเหนี่ยวนำของขดลวด และกระแสสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น ดังสมการที่ 3.8 การคำนวณหาค่ากระแสสร้างสนามแม่เหล็กที่ถูกต้อง เพื่อนำไปหาจำนวนรอบของขดลวดอาร์เมเจอร์ จึงค่อนข้างยุ่งยากมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นมาเพื่อเก็บข้อมูลครั้งหนึ่งก่อน แล้วจึงนำข้อมูลนั้นมาปรับเพื่อให้เกิดความเหมาะสมของพิกัดขดลวดชุดต่างๆ

การที่ทำให้ไม่ต้องมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้น โดยการสร้างขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นไว้ที่สเตเตอร์นั้น ทำให้พื้นที่ของขดลวดอาร์เมเจอร์ลดลง เป็นผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้มีพิกัดน้อยกว่าพิกัดของเฟรม(frame)นั้น ดังจะเห็นได้ว่าเฟรมที่นำมาดัดแปลงนี้มีขนาด 2 kVA แต่เมื่อนำมาดัดแปลงแล้วจะเหลือพิกัดเพียง 460 VA หรือ 23 เปอร์เซ็นต์ของพิกัดเดิมเท่านั้น

ในส่วนคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและวงจรควบคุมที่ได้สร้างขึ้นมานั้น จะเห็นได้ว่าสามารถทำงานได้อย่างเป็นที่น่าพอใจพอสมควร แม้ว่าจะมีพิกัดลดลงค่อนข้างมากก็ตาม แต่ก็ให้โครงสร้างที่ง่ายขึ้นมากเช่นกัน เพราะไม่ต้องมีตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นและยังตัดปัญหาเกี่ยวกับการคัปปลิง(coupling) หรือขั้นตอนการประกอบระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับตัวสร้างสนามแม่เหล็กกระตุ้นออกไปได้ ดังนั้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ได้รับการพัฒนาให้มีรูปแบบหรือโครงสร้างที่เหมาะสม ก็น่าจะเป็นทางเลือกอย่างหนึ่งสำหรับงานประเภทที่ไม่ต้อง

การดูแลมากนักได้เช่น เป็นแหล่งพลังงานของชุมชนในชนบท เป็นต้น สุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังว่าสิ่งที่ได้พาเกิปรทำมาเป็นเวลานานนี้ คงจะก่อให้เกิดประโยชน์กับสังคมได้บ้างในส่วนหนึ่ง อีกทั้งแนวคิดในการออกแบบ และผลการทดลองที่ได้พยายามรวบรวมไว้ให้มากที่สุดนี้ คงพอเป็นแหล่งความรู้เบื้องต้น และให้แนวคิดสำหรับผู้ที่สนใจเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป



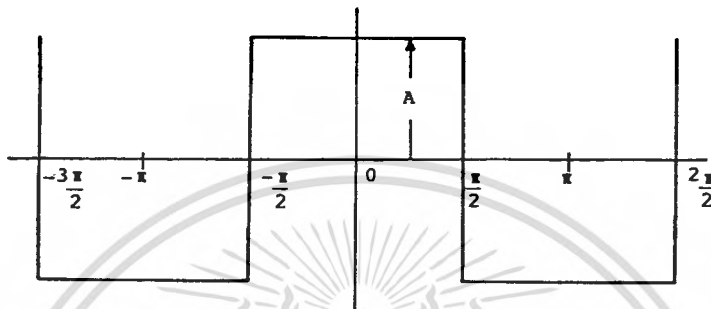
เอกสารอ้างอิง

- [1] S.Nonaka and K.Kesamaru,BRUSHLESS THREE-PHASE SYNCHRONOUS GENERATOR WITHOUT EXCITER, Electrical Engineering in Japan,Vol.105, No.6. pp.91-99,1985.
- [2] D.O Kelly and S.Simmons, INTRODUCTION TO GENERALIZED ELECTRICAL MACHINE THEORY,Mcgraw-Hill,London,1968.
- [3] A.Still and C.S.Siskind, ELEMENTS OF ELECTRICAL MACHINE DESIGN,Mcgraw-Hill,New York,1954.
- [4] A.S.Langsdorf, THEORY OF ALTERNATING CURRENT MACHINERY, Tata Mcgraw-Hill,New Delhi,1981.
- [5] Linear databook , National semiconductor corporation, CALIFORNIA,1982.
- [6] Motorola linear/interface integrated circuit, Motorola Inc., 1988.



ภาคผนวก ก
อนุกรมฟูรีเยร์

1 รูปคลื่นที่มีการกระจายแบบเต็มช่วง(full pitch)



$$f(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta)$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) d\theta$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) \cos n\theta d\theta$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) \sin n\theta d\theta \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

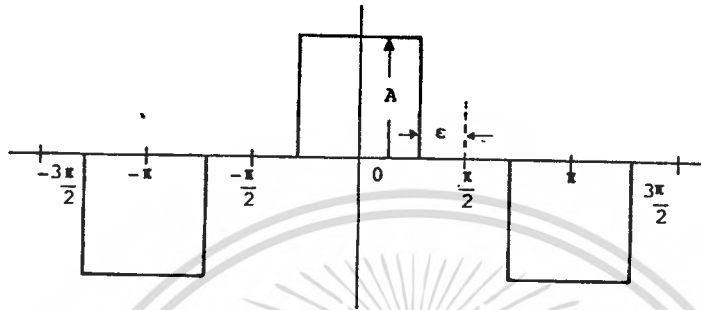
$$f(\theta) = -A \quad -\pi < \theta \leq -\frac{\pi}{2}$$

$$= A \quad -\frac{\pi}{2} < \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$= -A \quad \frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi$$

$$f(\theta) = \frac{4}{\pi} A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos(2n-1)\theta$$

2 รูปคลื่นมีการกระจายแบบไม่เต็มช่วง (fractional pitch)



$$f(\theta) = \begin{cases} -A & -\pi < \theta < -(\frac{\pi}{2} + \epsilon) \\ 0 & -(\frac{\pi}{2} + \epsilon) < \theta < -(\frac{\pi}{2} - \epsilon) \\ A & -(\frac{\pi}{2} - \epsilon) < \theta < (\frac{\pi}{2} - \epsilon) \\ 0 & (\frac{\pi}{2} - \epsilon) < \theta < (\frac{\pi}{2} + \epsilon) \\ -A & (\frac{\pi}{2} + \epsilon) < \theta < \pi \end{cases}$$

$$f(\theta) = \frac{4}{\pi} A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos(2n-1)\epsilon \cos(2n-1)\theta$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

ภาคผนวก II

ข้อมูล TL494



TL494

SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS

SWITCHMODE
PULSE WIDTH MODULATION
CONTROL CIRCUITS

SILICON MONOLITHIC
INTEGRATED CIRCUITS

The TL494 is a fixed frequency, pulse width modulation control circuit designed primarily for Switchmode power supply control. This device features:

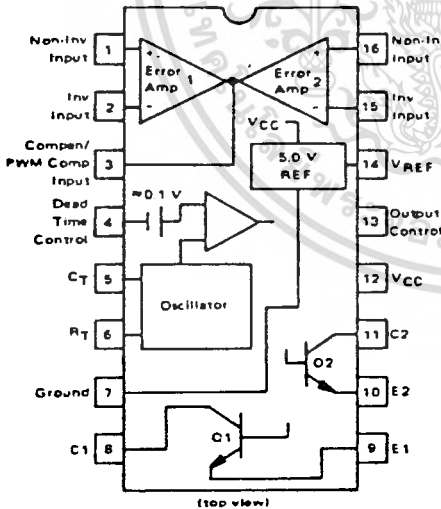
- Complete Pulse Width Modulation Control Circuitry
- On-Chip Oscillator With Master Or Slave Operation
- On-Chip Error Amplifiers
- On-Chip 5 Volt Reference
- Adjustable Dead-Time Control
- Uncommitted Output Transistors Rated to 500 mA Source Or Sink
- Output Control For Push-Pull Or Single-Ended Operation
- Undervoltage Lockout



J SUFFIX
CERAMIC PACKAGE
CASE 620-10



N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 648-06



ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
TL494CN	0° to +70°C	Plastic DIP
TL494CJ	0° to +70°C	Ceramic DIP
TL494IN	-25° to +85°C	Plastic DIP
TL494IJ	-25° to +85°C	Ceramic DIP
TL494MJ	-55° to +125°C	Ceramic DIP

The TL494C is specified over the commercial operating range of 0°C to 70°C. The TL494I is specified over the industrial range of -25°C to 85°C. The TL494M is specified over the full military range of -55°C to 125°C.

TL494

FIGURE 1 — BLOCK DIAGRAM

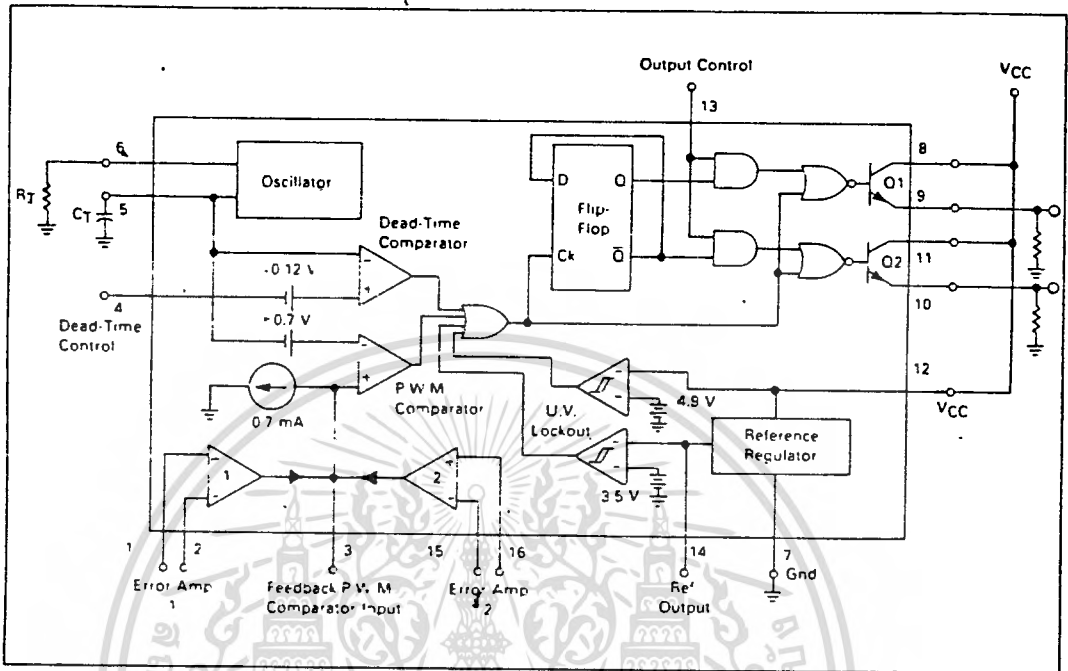
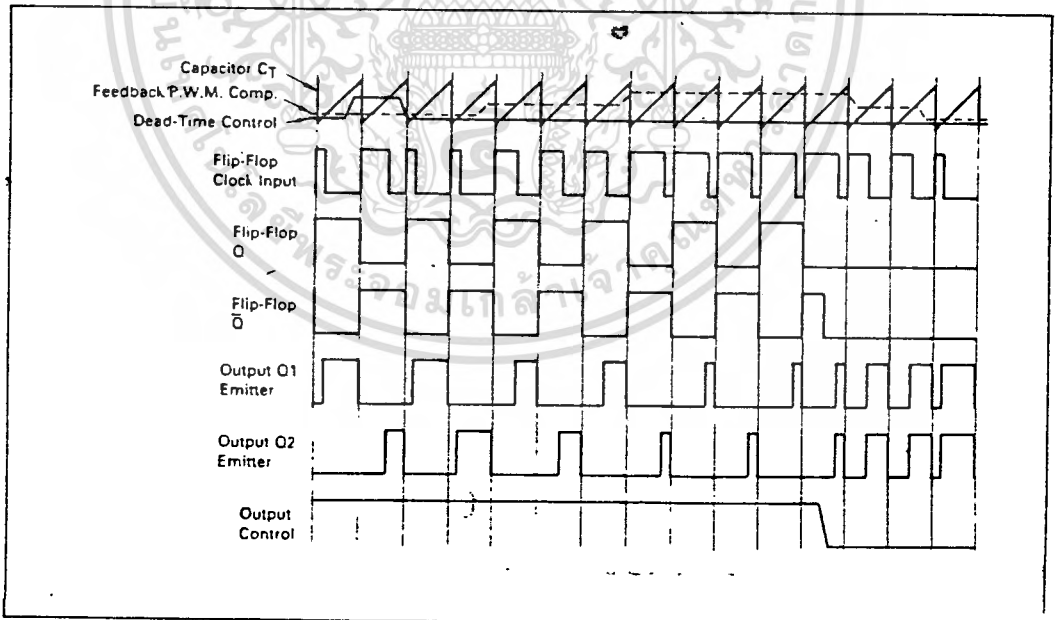


FIGURE 2 — TIMING DIAGRAM



TL494

Description

The TL494 is a fixed-frequency pulse width modulation control circuit, incorporating the primary building blocks required for the control of a switching power supply. (See Figure 1.) An internal-linear sawtooth oscillator is frequency-programmable by two external components, R_T and C_T . The approximate oscillator frequency is determined by:

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$$

For more information refer to Figure 4.

Output pulse width modulation is accomplished by comparison of the positive sawtooth waveform across capacitor C_T to either of two control signals. The NOR gates, which drive output transistors Q1 and Q2, are enabled only when the flip-flop clock-input line is in its low state. This happens only during that portion of time when the sawtooth voltage is greater than the control signals. Therefore, an increase in control-signal amplitude causes a corresponding linear decrease of output pulse width. (Refer to the timing diagram shown in Figure 2.)

The control signals are external inputs that can be fed into the dead-time control, the error amplifier inputs, or the feedback input. The dead-time control comparator has an effective 120 mV input offset which limits the minimum output dead time to approximately the first 4% of the sawtooth-cycle time. This would result in a maximum duty cycle on a given output of 96% with the output control grounded, and 48% with it connected to the reference line. Additional dead time may be imposed on the output by setting the dead time-control input to a fixed voltage, ranging between 0 to 3.3 V.

The pulse width modulator comparator provides a means for the error amplifiers to adjust the output pulse width from the maximum percent on-time, established by the dead time control input, down to zero, as the voltage at the feedback-pin varies from 0.5 to 3.5 V. Both error amplifiers have a common-mode input range from -0.3 V to ($V_{CC} - 2$ V), and may be used to sense power-supply output voltage and current. The error-amplifier outputs are active high and are ORed together at the non-inverting input of the pulse-width modulator comparator. With this configuration, the amplifier that demands minimum output on time, dominates control of the loop.

When capacitor C_T is discharged, a positive pulse is generated on the output of the dead-time comparator, which clocks the pulse-steering flip-flop and inhibits the output transistors, Q1 and Q2. With the output-control connected to the reference line, the pulse-steering flip-flop directs the modulated-pulses to each of the two output transistors alternately for push-pull operation. The output frequency is equal to half that of the oscillator. Output drive can also be taken from Q1 or Q2, when single-ended operation with a maximum on-time of less than 50% is required. This is desirable when the output transformer has a ringback winding with a catch diode used for snubbing. When higher output-drive currents are required for single-ended operation, Q1 and Q2 may be connected in parallel, and the output-mode pin must be tied to ground to disable the flip-flop. The output frequency will now be equal to that of the oscillator.

The TL494 has an internal 5 V reference capable of sourcing up to 10 mA of load current for external bias circuits. The reference has an internal accuracy of $\pm 1.5\%$ with a typical thermal drift of less than 50 mV over an operating temperature range of 0 to 70°C.

FIGURE 3 — FUNCTIONAL TABLE

Input	Output Function	$\frac{V_{out}}{V_{osc}} =$
Output Control		
Grounded	Single-ended P.W.M. at Q1 and Q2	1
At V_{ref}	Push-pull operation	0.5

TL494

MAXIMUM RATINGS (Full operating ambient temperature range applies unless otherwise noted)

Rating	Symbol	TL494C	TL494I	TL494M	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	42	42	42	V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	42	42	42	V
Collector Output Current (each transistor) (1)	I_{C1}, I_{C2}	500	500	500	mA
Amplifier Input Voltage Range	V_{IR}	-0.3 to 42	-0.3 to 42	-0.3 to 42	V
Power Dissipation ($\theta T_A \leq 45^\circ\text{C}$)	P_D	1000	1000	1000	mW
Operating Junction Temperature	T_J				
Plastic Package		125	125	—	$^\circ\text{C}$
Ceramic Package		150	150	150	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A	0 to 70	-25 to 85	-55 to 125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}				
Plastic Package		-55 to 125	-55 to 125	—	$^\circ\text{C}$
Ceramic Package		-65 to 150	-65 to 150	-65 to 150	$^\circ\text{C}$

NOTE 1. Maximum thermal limits must be observed

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristics	Symbol	N Suffix Plastic Package	J Suffix Ceramic Package	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	80	100	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Derating Ambient Temperature	T_A	45	50	$^\circ\text{C}$

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Condition/Value	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
Power Supply Voltage	V_{CC}	7.0	15	40	V
Collector Output Voltage	V_{C1}, V_{C2}	—	30	40	V
Collector Output Current (each transistor)	I_{C1}, I_{C2}	—	—	200	mA
Amplifier Input Voltage	V_{in}	-0.3	—	$V_{CC} - 2.0$	V
Current Into Feedback Terminal	I_{fb}	—	—	0.3	mA
Reference Output Current	I_{ref}	—	—	10	mA
Timing Resistor	R_T	1.8	30	500	k Ω
Timing Capacitor	C_T	0.0047	0.001	10	μF
Oscillator Frequency	f_{osc}	1.0	40	200	kHz

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$ unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted

Characteristic	Symbol	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	

REFERENCE SECTION

Reference Voltage ($I_O = 1.0\text{ mA}$)	V_{ref}	4.75	5.0	5.25	4.75	5.0	5.25	V
Line Regulation ($V_{CC} = 7.0\text{ V to }40\text{ V}$)	Reg_{line}	—	2.0	25	—	2.0	25	mV
Load Regulation ($I_O = 1.0\text{ mA to }10\text{ mA}$)	Reg_{load}	—	3.0	15	—	3.0	15	mV
Short-Circuit Output Current ($V_{ref} = 0\text{ V}$)	I_{SC}	15	35	75	15	35	75	mA

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$ unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494C,I			TL494M			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	

OUTPUT SECTION

Collector Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_{CE} = 40\text{ V}$)	$I_{C(off)}$	—	2.0	100	—	2.0	100	μA
Emitter Off-State Current ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $V_C = 40\text{ V}$, $V_E = 0\text{ V}$)	$I_{E(off)}$	—	—	-100	—	—	-150	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage (2) Common-Emitter ($V_E = 0\text{ V}$, $I_C = 200\text{ mA}$)	$V_{SAT(C)}$	—	1.1	1.3	—	1.1	1.5	V
Emitter-Follower ($V_C = 15\text{ V}$, $I_E = -200\text{ mA}$)	$V_{SAT(E)}$	—	1.5	2.5	—	1.5	2.5	V
Output Control Pin Current Low State ($V_{OC} = 0.4\text{ V}$)	I_{OCL}	—	10	—	—	10	—	μA
High State ($V_{OC} = V_{ref}$)	I_{OCH}	—	0.2	3.5	—	0.2	3.5	mA
Output Voltage Rise Time Common-Emitter (See Figure 13) Emitter-Follower (See Figure 14)	t_r	—	100	200	—	100	200	ns
		—	100	200	—	100	200	ns
Output Voltage Fall Time Common-Emitter (See Figure 13) Emitter-Follower (See Figure 14)	t_f	—	25	100	—	25	100	ns
		—	40	100	—	40	100	ns

Characteristic	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	

ERROR AMPLIFIER SECTIONS

Input Offset Voltage (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	V_{IO}	—	2.0	10	mV
Input Offset Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IO}	—	5.0	250	nA
Input Bias Current (V_O (Pin 3) = 2.5 V)	I_{IB}	—	-0.1	-1.0	μA
Input Common-Mode Voltage Range ($V_{CC} = 40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_{ICR}	-0.3 to $V_{CC}-2.0$	—	—	V
Open-Loop Voltage Gain ($\Delta V_O = 3.0\text{ V}$, $V_O = 0.5\text{ to }3.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	A_{VOL}	70	95	—	dB
Unity-Gain Crossover Frequency ($V_O = 0.5\text{ to }3.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	f_c	—	350	—	kHz
Phase Margin at Unity-Gain ($V_O = 0.5\text{ to }3.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	ϕ_m	—	65	—	deg
Common-Mode Rejection Ratio ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	CMRR	65	90	—	dB
Power Supply Rejection Ratio ($\Delta V_{CC} = 33\text{ V}$, $V_O = 2.5\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$)	PSRR	—	100	—	dB
Output Sink Current (V_O (Pin 3) = 0.7 V)	I_{O-}	0.3	0.7	—	mA
Output Source Current (V_O (Pin 3) = 3.5 V)	I_{O+}	-2.0	-4.0	—	mA

NOTE 2. Low duty cycle pulse techniques are used during test to maintain junction temperature as close to ambient temperatures as possible.

TL494

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 15\text{ V}$, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$ unless otherwise noted.)

For typical values $T_A = 25^\circ\text{C}$, for min/max values T_A is the operating ambient temperature range that applies unless otherwise noted.

Characteristic	Symbol	TL494			Unit
		Min	Typ	Max	
PWM COMPARATOR SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Input Threshold Voltage (Zero duty cycle)	V_{TH}	—	3.5	4.5	V
Input Sink Current ($V_{Pin\ 3} = 0.7\text{ V}$)	I_{I-}	0.3	0.7	—	mA
DEAD-TIME CONTROL SECTION (Test Circuit Figure 12)					
Input Bias Current (Pin 4) ($V_{Pin\ 4} = 0\text{ to }5.25\text{ V}$)	$I_{IB}\text{ (DT)}$	—	-2.0	-10	μA
Maximum Duty Cycle, Each Output, Push-Pull Mode ($V_{Pin\ 4} = 0\text{ V}$, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$) ($V_{Pin\ 4} = 0\text{ V}$, $C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 30\text{ k}\Omega$)	DC_{max}	45 —	48 45	50 50	%
Input Threshold Voltage (Pin 4) (Zero Duty Cycle) (Maximum Duty Cycle)	V_{TH}	— 0	2.8 —	3.3 —	V
OSCILLATOR SECTION					
Frequency ($C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 30\text{ k}\Omega$)	f_{osc}	—	40	—	kHz
Standard Deviation of Frequency* ($C_T = 0.001\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 30\text{ k}\Omega$)	σf_{osc}	—	3.0	—	%
Frequency Change with Voltage ($V_{CC} = 7.0\text{ V to }40\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	$\Delta f_{osc}\text{ (}\Delta V\text{)}$	—	0.1	—	%
Frequency Change with Temperature ($\Delta T_A = T_{low}\text{ to }T_{high}$) ($C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$)	$\Delta f_{osc}\text{ (}\Delta T\text{)}$	—	—	12	%
UNDERVOLTAGE LOCKOUT SECTION					
Turn-On Threshold (V_{CC} Increasing, $I_{ref} = 1.0\text{ mA}$)	V_{th}	5.5	6.43	7.0	V
TOTAL DEVICE					
Standby Supply Current (Pin 6 at V_{ref} , All Other Inputs and Outputs Open) ($V_{CC} = 15\text{ V}$) ($V_{CC} = 40\text{ V}$)	I_{CC}	— —	5.5 7.0	10 15	mA
Average Supply Current ($V_{Pin\ 4} = 2.0\text{ V}$) (See Figure 12) ($C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_T = 12\text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 15\text{ V}$)	—	—	7.0	—	mA

* Standard deviation is a measure of the statistical distribution about the mean as derived from the formula, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N - 1}}$

TL494

FIGURE 4 — OSCILLATOR FREQUENCY
versus TIMING RESISTANCE

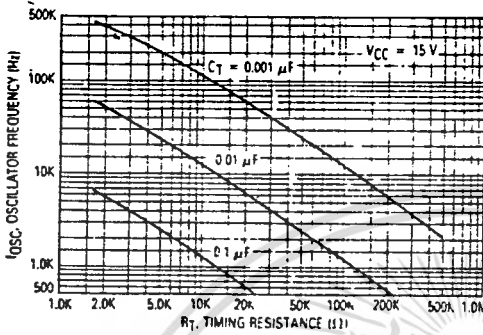


FIGURE 5 — OPEN-LOOP VOLTAGE GAIN AND PHASE
versus FREQUENCY

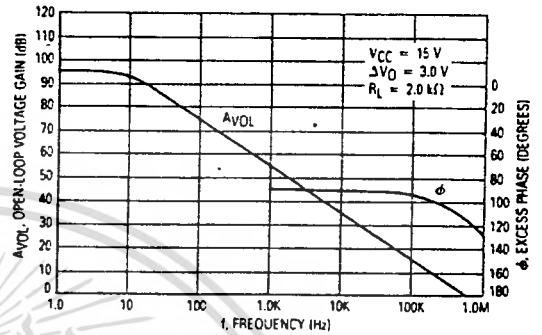


FIGURE 6 — PERCENT DEAD-TIME versus
OSCILLATOR FREQUENCY

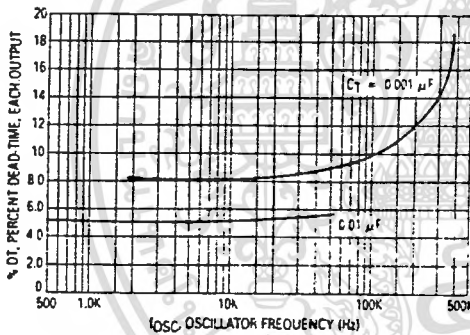


FIGURE 7 — PERCENT DUTY CYCLE versus
DEAD-TIME CONTROL VOLTAGE

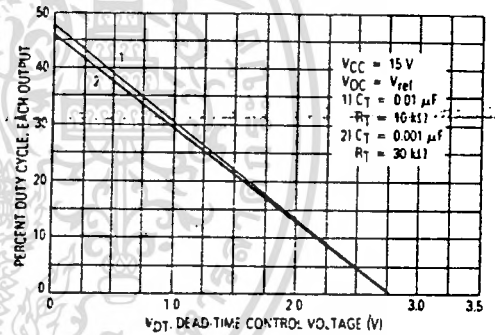


FIGURE 8 — EMITTER FOLLOWER CONFIGURATION
OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus
EMITTER CURRENT

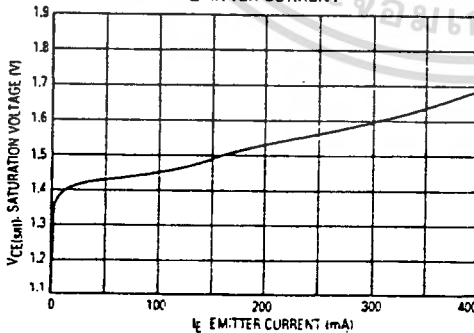
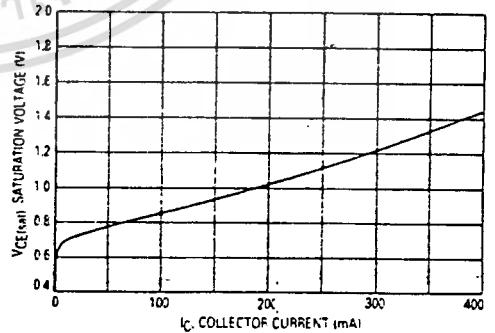


FIGURE 9 — COMMON EMITTER CONFIGURATION
OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus
COLLECTOR CURRENT



ภาคผนวก ค

ข้อมูล MC3425



MOTOROLA

MC3425

POWER SUPPLY SUPERVISORY/OVER-UNDER-VOLTAGE PROTECTION CIRCUIT

The MC3425 is a power supply supervisory circuit containing all the necessary functions required to monitor over- and under-voltage fault conditions. These integrated circuits contain dedicated over- and under-voltage sensing channels with independently programmable time delays. The over-voltage channel has a high current Drive Output for use in conjunction with an external SCR "Crowbar" for shutdown. The under-voltage channel input comparator has hysteresis which is externally programmable, and an open-collector output for fault indication.

- Dedicated Over- And Under-Voltage Sensing
- Programmable Hysteresis Of Under-Voltage Comparator
- Internal 2.5 V Reference
- 300 mA Over-Voltage Drive Output
- 30 mA Under-Voltage Indicator Output
- Programmable Time Delays
- 4.5 V to 40 V Operation

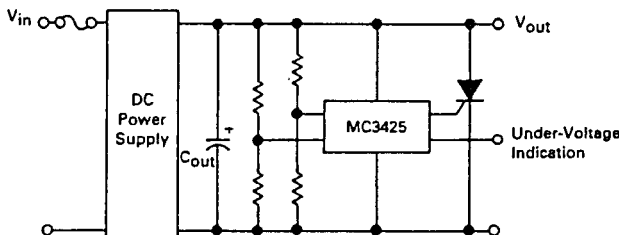
MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	40	Vdc
Comparator Input Voltage Range (Note 1)	V _{IR}	-0.3 to +40	Vdc
Drive Output Short-Circuit Current	I _{OS(DRV)}	Internally Limited	mA
Indicator Output Voltage	V _{IND}	0 to 40	Vdc
Indicator Output Sink Current	I _{IND}	30	mA
Power Dissipation and Thermal Characteristics Maximum Power Dissipation @ T _A = 70°C Thermal Resistance Junction to Air	P _D R _{θJA}	1000 80	mW °C/W
Operating Junction Temperature	T _J	+150	°C
Operating Ambient Temperature Range	T _A	0 to +70	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-55 to +150	°C

NOTE: (1) The input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 300 mV or positive by more than 40 V, independent of V_{CC}, without device destruction.

TYPICAL APPLICATION

Over-Voltage Crowbar Protection, Under-Voltage Indication



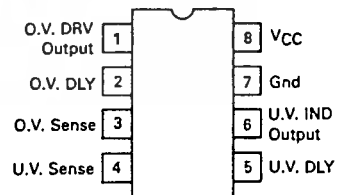
POWER SUPPLY SUPERVISORY/ OVER-UNDER-VOLTAGE PROTECTION CIRCUIT

SILICON MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUIT



P1 SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626-05

PIN CONNECTIONS



(Top View)

ORDERING INFORMATION

Device	Temperature Range	Package
MC3425P1	0 to +70°C	Plastic DIP

MC3425

CIRCUIT DESCRIPTION

The MC3425 is a power supply supervisory circuit containing all the necessary functions required to monitor over- and under-voltage fault conditions. The block diagram is shown below in Figure 15. The Over-Voltage (O.V.) and Under-Voltage (U.V.) Input Comparators are both referenced to an internal 2.5 V regulator. The U.V. Input Comparator has a feedback activated 12.5 μ A current sink (I_H) which is used for programming the input hysteresis voltage (V_H). The source resistance feeding this input (R_H) determines the amount of hysteresis voltage by $V_H = I_H R_H = 12.5 \times 10^{-6} R_H$.

Separate Delay pins (O.V. DLY, U.V. DLY) are provided for each channel to independently delay the Drive and Indicator outputs, thus providing greater input noise immunity. The two Delay pins are essentially the outputs of the respective input comparators, and provide a constant current source, $I_{DLY}(\text{source})$, of typically 200 μ A when the non-inverting input voltage is greater than the inverting input level. A capacitor connected from these Delay pins to ground, will establish a predictable delay time (t_{DLY}) for the Drive and Indicator outputs. The Delay pins are internally connected to the non-inverting inputs of the O.V. and U.V. Output Comparators, which are referenced to the internal 2.5 V regulator. Therefore, delay time (t_{DLY})

is based on the constant current source, $I_{DLY}(\text{source})$, charging the external delay capacitor (C_{DLY}) to 2.5 volts.

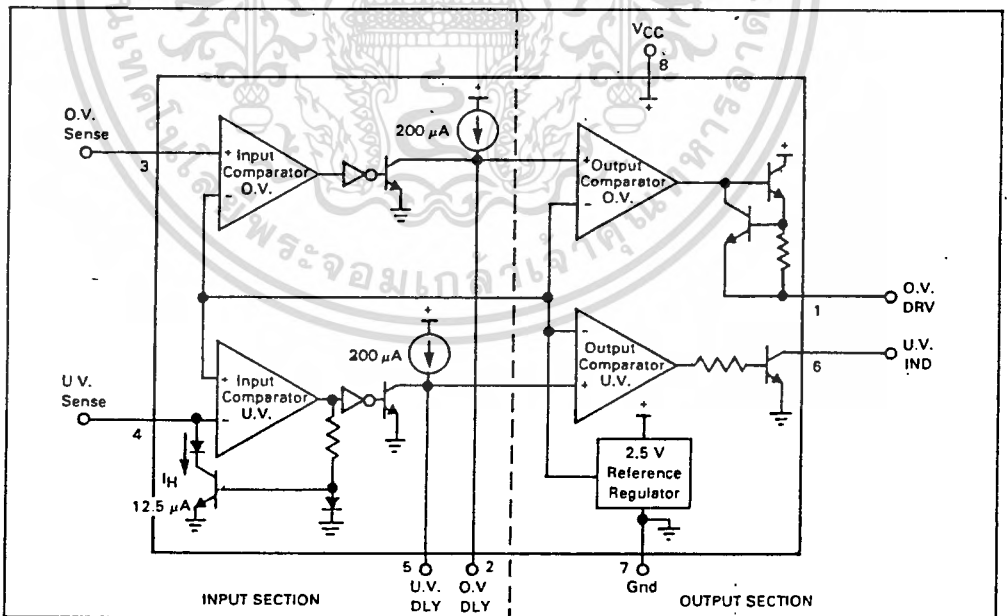
$$t_{DLY} = \frac{V_{ref} C_{DLY}}{I_{DLY}(\text{source})} = \frac{2.5 C_{DLY}}{200 \mu A} = 12500 C_{DLY}$$

Figure 5 provides C_{DLY} values for a wide range of time delays. The Delay pins are pulled low when the respective input comparator's non-inverting input is less than the inverting input. The sink current, $I_{DLY}(\text{sink})$, capability of the Delay pins is ≥ 1.8 mA and is much greater than the typical 200 μ A source current, thus enabling a relatively fast delay capacitor discharge time.

The Over-Voltage Drive Output is a current-limited emitter-follower capable of sourcing 300 mA at a turn-on slew rate of 2.0 A/ μ s, ideal for driving "Crowbar" SCR's. The Under-Voltage Indicator Output is an open-collector, NPN transistor, capable of sinking 30 mA to provide sufficient drive for LED's, small relays or shut-down circuitry. These current capabilities apply to both channels operating simultaneously, providing device power dissipation limits are not exceeded.

The MC3425 has an internal 2.5 V bandgap reference regulator with an accuracy of $\pm 4.0\%$ for the basic devices and $\pm 1.0\%$ for the A-suffix device types at 25°C. The reference has a typical temperature coefficient of 30 ppm/°C for A-suffix devices.

FIGURE 15 — BLOCK DIAGRAM



Note: All voltages and currents are nominal.

MC3425

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (4.5 V $\leq$ V_{CC} $\leq$ 40 V; T_A = T_{low} to T_{high} [see Note 2] unless otherwise specified.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
REFERENCE SECTION					
Sense Trip Voltage (Reference Voltage) V _{CC} = 15 V T _A = 25°C T _{low} to T _{high} (Note 2)	V _{Sense}	2.4 2.33	2.5 2.5	2.6 2.63	V _{dc}
Line Regulation of V _{Sense} 4.5 V $\leq$ V _{CC} $\leq$ 40 V; T _J = 25°C	Reg _{line}	—	7.0	15	mV
Power Supply Voltage Operating Range	V _{CC}	4.5	—	40	V _{dc}
Power Supply Current V _{CC} = 40 V; T _A = 25°C; No Output Loads O.V. Sense (Pin 3) = 0 V; U.V. Sense (Pin 4) = V _{CC} O.V. Sense (Pin 3) = V _{CC} ; U.V. Sense (Pin 4) = 0 V	I _{CC(off)}	—	8.5	10	mA
	I _{CC(on)}	—	16.5	19	mA

INPUT SECTION

Input Bias Current, O.V. and U.V. Sense	I _{IB}	—	1.0	2.0	μA
Hysteresis Activation Voltage, U.V. Sense V _{CC} = 15 V; T _A = 25°C; I _H = 10% I _H = 90%	V _{H(act)}	— —	0.6 0.8	— —	V
Hysteresis Current, U.V. Sense V _{CC} = 15 V; T _A = 25°C; U.V. Sense (Pin 4) = 2.5 V	I _H	9.0	12.5	16	μA
Delay Pin Voltage (I _{DLY} = 0 mA) Low State High State	V _{OL(DLY)} V _{OH(DLY)}	— V _{CC} -0.5	0.2 V _{CC} -0.15	0.5 —	V
Delay Pin Source Current V _{CC} = 15 V; V _{DLY} = 0 V	I _{DLY(source)}	140	200	260	μA
Delay Pin Sink Current V _{CC} = 15 V; V _{DLY} = 2.5 V	I _{DLY(sink)}	1.8	3.0	—	mA

OUTPUT SECTION

Drive Output Peak Current (T _A = 25°C)	I _{DRV(peak)}	200	300	—	mA
Drive Output Voltage I _{DRV} = 100 mA; T _A = 25°C	V _{OH(DRV)}	V _{CC} -2.5	V _{CC} -2.0	—	V
Drive Output Leakage Current V _{DRV} = 0 V	I _{DRV(leak)}	—	15	200	nA
Drive Output Current Slew Rate (T _A = 25°C)	di/dt	—	2.0	—	A/μs
Drive Output V _{CC} Transient Rejection V _{CC} = 0 V to 15 V at dV/dt = 200 V/μs; O.V. Sense (Pin 3) = 0 V; T _A = 25°C	I _{DRV(trans)}	—	1.0	—	mA (Peak)
Indicator Output Saturation Voltage I _{IND} = 30 mA; T _A = 25°C	V _{IND(sat)}	—	560	800	mV
Indicator Output Leakage Current V _{OH(IND)} = 40 V	I _{IND(leak)}	—	25	200	nA
Output Comparator Threshold Voltage (Note 3)	V _{th(OC)}	2.33	2.5	2.63	V
Propagation Delay Time (V _{CC} = 15 V; T _A = 25°C) Input to Drive Output or Indicator Output 100 mV Overdrive, C _{DLY} = 0 μF Input to Delay 2.5 V Overdrive (0 V to 5.0 V Step)	t _{PLH(IN/OUT)}	—	1.7	—	μs
	t _{PLH(IN/DLY)}	—	700	—	ns

NOTES:

(2) T_{low} = 0°CT_{high} = +70°C(3) The V_{th(OC)} limits are approximately the V_{Sense} limits over the applicable temperature range.

MC3425

FIGURE 1 — HYSTERESIS CURRENT versus HYSTERESIS ACTIVATION VOLTAGE

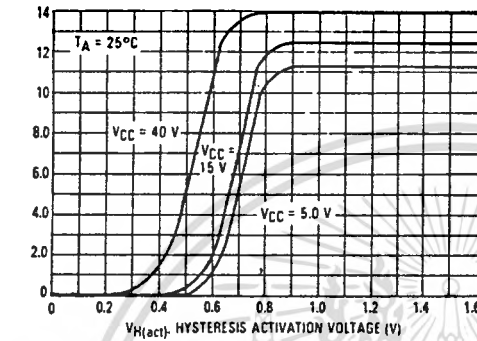


FIGURE 3 — HYSTERESIS CURRENT versus TEMPERATURE

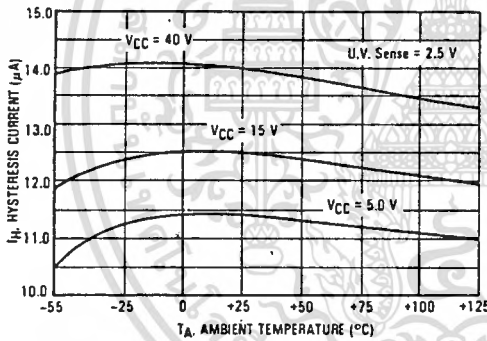


FIGURE 5 — OUTPUT DELAY TIME versus DELAY CAPACITANCE

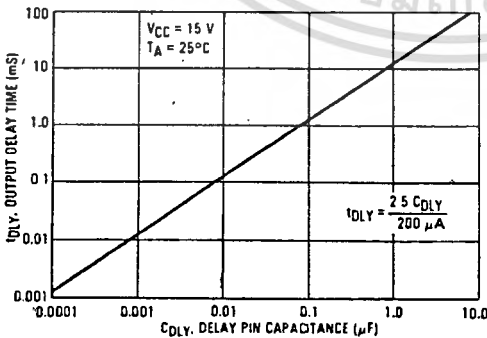


FIGURE 2 — HYSTERESIS ACTIVATION VOLTAGE versus TEMPERATURE

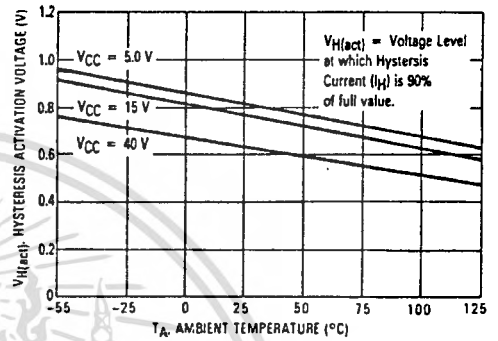


FIGURE 4 — SENSE TRIP VOLTAGE CHANGE versus TEMPERATURE

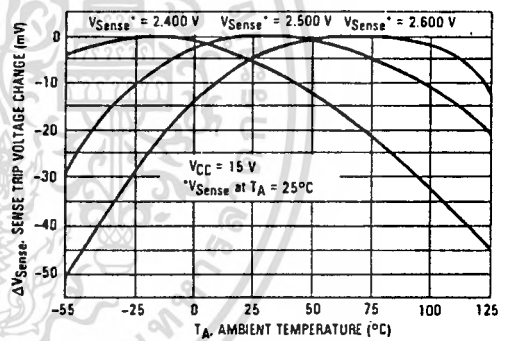
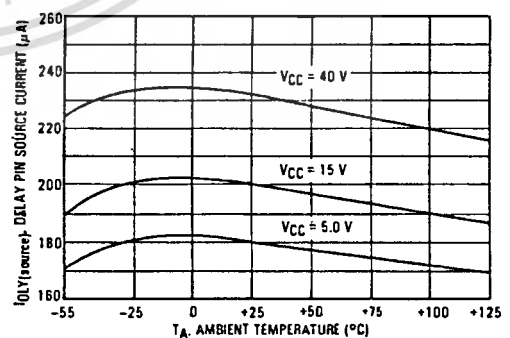


FIGURE 6 — DELAY PIN SOURCE CURRENT versus TEMPERATURE



MC3425

FIGURE 7 — DRIVE OUTPUT SATURATION VOLTAGE
versus OUTPUT PEAK CURRENT

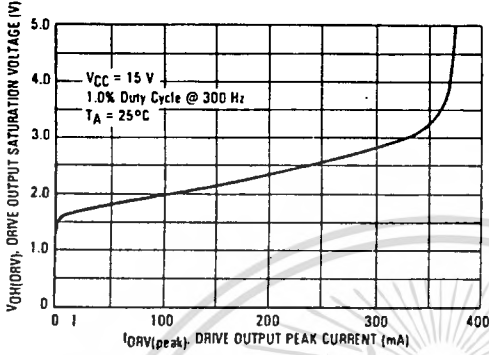


FIGURE 8 — INDICATOR OUTPUT SATURATION
VOLTAGE versus OUTPUT SINK CURRENT

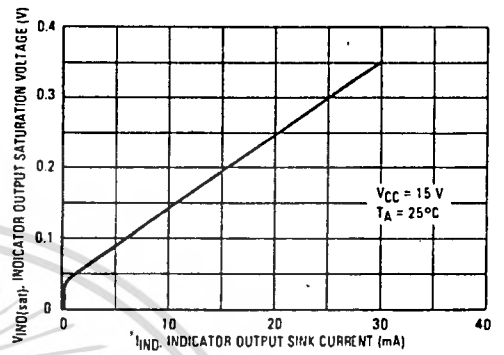


FIGURE 9 — DRIVE OUTPUT SATURATION VOLTAGE
versus TEMPERATURE

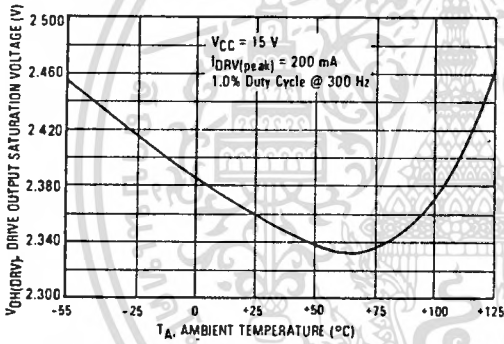
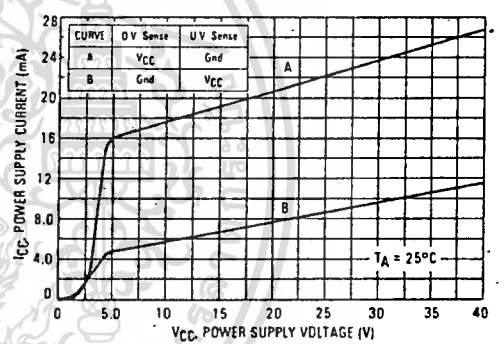


FIGURE 10 — POWER SUPPLY CURRENT
versus VOLTAGE



ภาคผนวก ง

ข้อมูล LM2907

LM2907, LM2917

9



Industrial Blocks

LM2907, LM2917 Frequency to Voltage Converter

General Description

The LM2907, LM2917 series are monolithic frequency to voltage converters with a high gain op amp/comparator designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low ripple, full input protection in two versions (LM2907-8, LM2917-8) and its output swings to ground for a zero frequency input.

Advantages

- Output swings to ground for zero frequency input
- Easy to use; $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$
- Only one RC network provides frequency doubling
- Zener regulator on chip allows accurate and stable frequency to voltage or current conversion. (LM2917)

Features

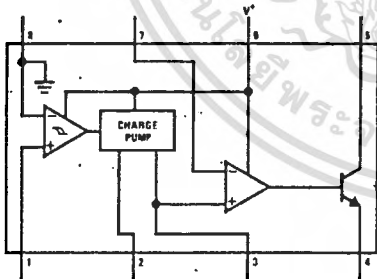
- Ground referenced tachometer input interfaces directly with variable reluctance magnetic pickups
- Op amp/comparator has floating transistor output
- 50 mA sink or source to operate relays, solenoids, meters, or LEDs

- Frequency doubling for low ripple
- Tachometer has built-in hysteresis with either differential input or ground referenced input
- Built-in zener on LM2917
- $\pm 0.3\%$ linearity typical
- Ground referenced tachometer is fully protected from damage due to swings above V_{CC} and below ground

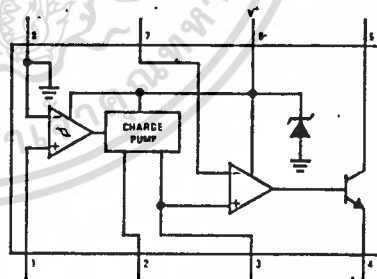
Applications

- Over/under speed sensing
- Frequency to voltage conversion (tachometer)
- Speedometers
- Breaker point dwell meters
- Hand-held tachometer
- Speed governors
- Cruise control
- Automotive door lock control
- Clutch control
- Horn control
- Touch or sound switches

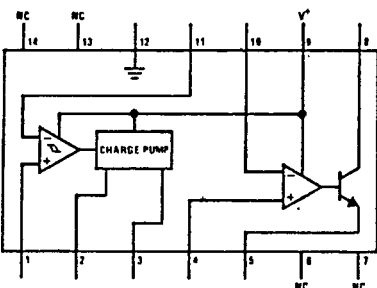
Block and Connection Diagrams Dual-In-Line Packages, Top Views



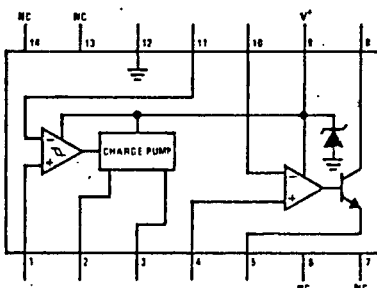
Order Number LM2907N-8
See NS Package N08B



Order Number LM2917N-8
See NS Package N08B



Order Number LM2907J
See NS Package J14A
Order Number LM2907N
See NS Package N14A



Order Number LM2917J
See NS Package J14A
Order Number LM2917N
See NS Package N14A

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

Supply Voltage	28V	Input Voltage Range	
Supply Current (Zener Options)	25 mA	Tachometer LM2907-8, LM2917-8	±28V
Collector Voltage	28V	LM2907, LM2917	0.0V to +28V
Differential Input Voltage		Op Amp/Comparator	0.0V to +28V
Tachometer	28V	Power Dissipation	500 mW
Op Amp/Comparator	28V	Operating Temperature Range	-40°C to +85°C
		Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
		Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	300°C

Electrical Characteristics $V_{CC} = 12 V_{DC}$, $T_A = 25^\circ C$, see test circuit

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
TACHOMETER					
Input Thresholds	$V_{IN} = 250 \text{ mVp-p} @ 1 \text{ kHz (Note 2)}$	±10	±15	±40	mV
Hysteresis	$V_{IN} = 250 \text{ mVp-p} @ 1 \text{ kHz (Note 2)}$		30		mV
Offset Voltage	$V_{IN} = 250 \text{ mVp-p} @ 1 \text{ kHz (Note 2)}$				
LM2907/LM2917			3.5	10	mV
LM2907-8/LM2917-8			5	15	mV
Input Bias Current	$V_{IN} = \pm 50 \text{ mV}_{DC}$		0.1	1	μA
V_{OH} Pin 2	$V_{IN} = +125 \text{ mV}_{DC}$ (Note 3)		8.3		V
V_{OL} Pin 2	$V_{IN} = -125 \text{ mV}_{DC}$ (Note 3)		2.3		V
Output Current; I_2, I_3	$V_2 = V_3 = 6.0V$ (Note 4)	140	180	240	μA
Leakage Current; I_3	$I_2 = 0, V_3 = 0$			0.1	μA
Gain Constant, K	(Note 3)	0.9	1.0	1.1	%
Linearity	$f_{IN} = 1 \text{ kHz}, 5 \text{ kHz}, 10 \text{ kHz}$, (Note 5)	-1.0	0.3	+1.0	%
OP/AMP COMPARATOR					
V_{OS}	$V_{IN} = 6.0V$		3	10	mV
I_{BIAS}	$V_{IN} = 6.0V$		50	500	nA
Input Common-Mode Voltage		0		$V_{CC} - 1.5V$	V
Voltage Gain			200		V/mV
Output Sink Current	$V_C = 1.0$	40	50		mA
Output Source Current	$V_E = V_{CC} - 2.0$		10		mA
Saturation Voltage	$I_{SINK} = 5 \text{ mA}$		0.1	0.5	V
	$I_{SINK} = 20 \text{ mA}$			1.0	V
	$I_{SINK} = 50 \text{ mA}$		1.0	1.5	V
ZENER REGULATOR					
Regulator Voltage	$R_{DROP} = 470\Omega$		7.56		V
Series Resistance			10.5	15	Ω
Temperature Stability			+1		mV/°C
TOTAL SUPPLY CURRENT					
			3.8	6	mA

Note 1: For operation in ambient temperatures above $25^\circ C$, the device must be derated based on a $150^\circ C$ maximum junction temperature and a thermal resistance of $175^\circ C/W$ junction to ambient for package 22 and 16 or a thermal resistance of $187^\circ C/W$ junction to ambient for package 20.

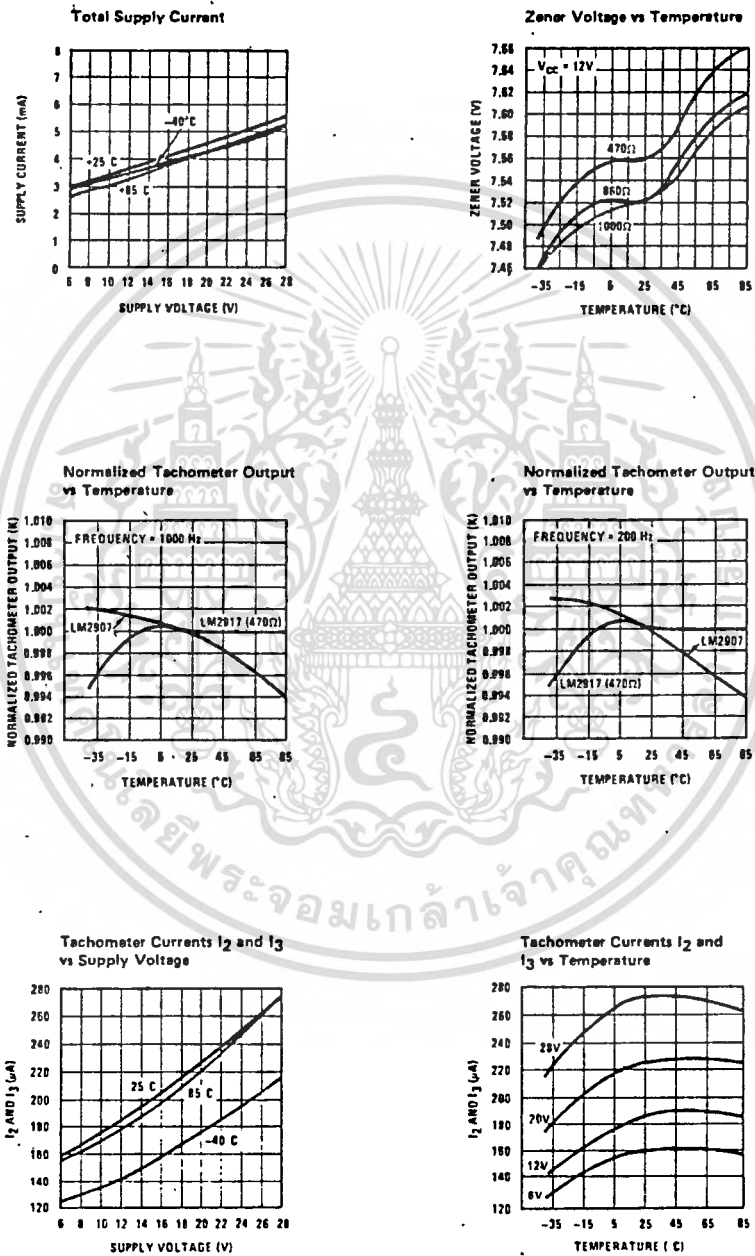
Note 2: Hysteresis is the sum $+V_{TH} - (-V_{TH})$, offset voltage is their difference. See test circuit.

Note 3: V_{OH} is equal to $3/4 \times V_{CC} - 1 V_{BE}$. V_{OL} is equal to $1/4 \times V_{CC} - 1 V_{BE}$ therefore $V_{OH} - V_{OL} = V_{CC}/2$. The difference, $V_{OH} - V_{OL}$, and the mirror gain, I_2/I_3 , are the two factors that cause the tachometer gain constant to vary from 1.0.

Note 4: Be sure when choosing the time constant $R1 \times C1$ that $R1$ is such that the maximum anticipated output voltage at pin 3 can be reached with $I_3 \times R1$. The maximum value for $R1$ is limited by the output resistance of pin 3 which is greater than $10 M\Omega$ typically.

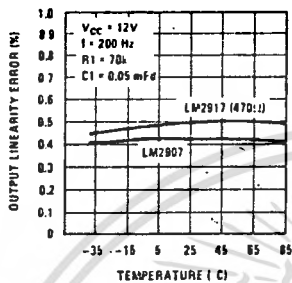
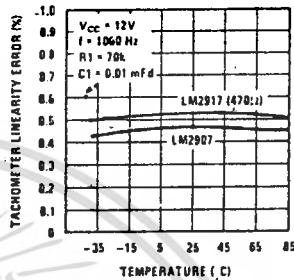
Note 5: Nonlinearity is defined as the deviation of V_{OUT} (at pin 3) for $f_{IN} = 5 \text{ kHz}$ from a straight line defined by the V_{OUT} @ 1 kHz and V_{OUT} @ 10 kHz . $C1 = 1000 \text{ pF}$, $R1 = 68k$ and $C2 = 0.22 \text{ mF}$.

Typical Performance Characteristics

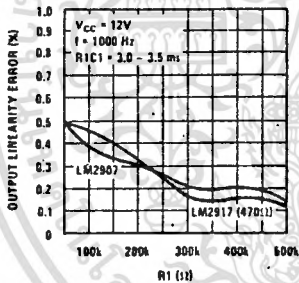
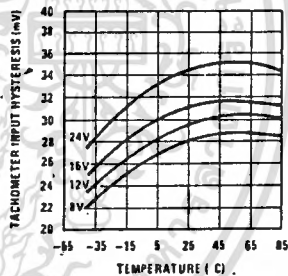
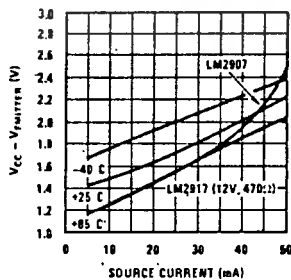
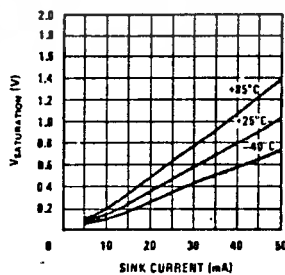


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics (Continued)

Tachometer Linearity
vs TemperatureTachometer Linearity
vs Temperature

Tachometer Linearity vs R1

Tachometer Input Hysteresis
vs TemperatureOp Amp Output Transistor
CharacteristicsOp Amp Output Transistor
Characteristics

General Description (Continued)

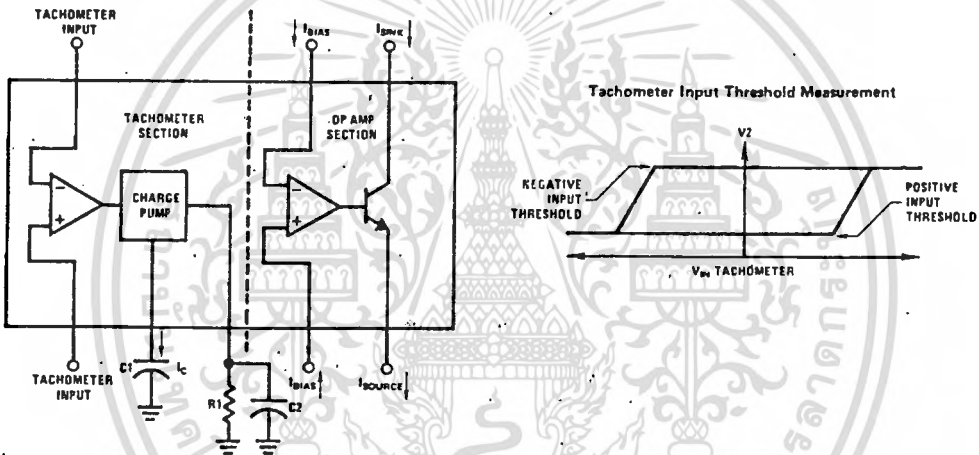
The op amp/comparator is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. This feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above V_{CC} up to a maximum V_{CE} of 28V.

The two basic configurations offered include an 8-pin device with a *ground referenced tachometer* input and an internal connection between the tachometer output and the op amp non-inverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency to voltage conversion applications.

The more versatile configurations provide differential tachometer input and uncommitted op amp inputs. With this version the tachometer input may be floated and the op amp becomes suitable for active filter conditioning of the tachometer output.

Both of these configurations are available with an active shunt regulator connected across the power leads. The regulator clamps the supply such that stable frequency to voltage and frequency to current operations are possible with any supply voltage and a suitable resistor.

Test Circuit and Waveform



Applications Information

The LM2907 series of tachometer circuits is designed for minimum external part count applications and maximum versatility. In order to fully exploit its features and advantages let's examine its theory of operation. The first stage of operation is a differential amplifier driving a positive feedback flip-flop circuit. The input threshold voltage is the amount of differential input voltage at which the output of this stage changes state. Two options (LM2907-B, LM2917-B) have one input internally grounded so that an input signal must swing above and below ground and exceed the input thresholds to produce an output. This is offered specifically for magnetic variable reluctance pickups which typically provide a single-ended ac output. This single input is also fully protected against voltage swings to $\pm 28V$, which are easily attained with these types of pickups.

The differential input options (LM2907, LM2917) give the user the option of setting his own input switching level and still have the hysteresis around that level for excellent noise rejection in any application. Of course in order to allow the inputs to attain common-mode voltages above ground, input protection is removed

and neither input should be taken outside the limits of the supply voltage being used. It is very important that an input not go below ground without some resistance in its lead to limit the current that will then flow in the epi-substrate diode.

Following the input stage is the charge pump where the input frequency is converted to a dc voltage. To do this requires one timing capacitor, one output resistor, and an integrating or filter capacitor. When the input stage changes state (due to a suitable zero crossing or differential voltage on the input) the timing capacitor is either charged or discharged linearly between two voltages whose difference is $V_{CC}/2$. Then in one half cycle of the input frequency or a time equal to $1/2 f_{IN}$ the change in charge on the timing capacitor is equal to $V_{CC}/2 \times C_1$. The average amount of current pumped into or out of the capacitor then is:

$$\frac{\Delta Q}{T} = I_{C(AVG)} = C_1 \times \frac{V_{CC}}{2} \times (2 f_{IN}) = V_{CC} \times f_{IN} \times C_1$$

The output circuit mirrors this current very accurately into the load resistor R_1 , connected to ground, such that if the pulses of current are integrated with a filter

Applications Information (Continued)

capacitor, then, $V_o = i_c \times R1$, and the total conversion equation becomes:

$$V_o = V_{CC} \times f_{IN} \times C1 \times R1 \times K$$

Where K is the gain constant—typically 1.0.

The size of C2 is dependent only on the amount of ripple voltage allowable and the required response time.

CHOOSING R1 AND C1

There are some limitations on the choice of R1 and C1 which should be considered for optimum performance. The timing capacitor also provides internal compensation for the charge pump and should be kept larger than 100 pF for very accurate operation. Smaller values can cause an error current on R1, especially at low temperatures. Several considerations must be met when choosing R1. The output current at pin 3 is internally fixed and therefore $V_o/R1$ must be less than or equal to this value. If R1 is too large, it can become a significant fraction of the output impedance at pin 3 which degrades linearity. Also output ripple voltage must be considered and the size of C2 is affected by R1. An expression that describes the ripple content on pin 3 for a single R1C2 combination is:

$$V_{RIPPLE} = \frac{V_{CC}}{2} \times \frac{C1}{C2} \times \left(1 - \frac{V_{CC} \times f_{IN} \times C1}{I_2} \right) \text{ pk-pk}$$

It appears R1 can be chosen independent of ripple,

however response time, or the time it takes V_{OUT} to stabilize at a new voltage increases as the size of C2 increases so a compromise between ripple, response time, and linearity must be chosen carefully.

As a final consideration, the maximum attainable input frequency is determined by V_{CC} , C1 and I_2 :

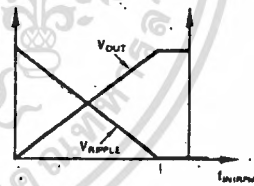
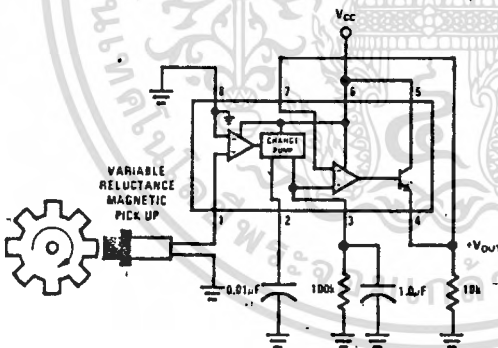
$$f_{MAX} = \frac{I_2}{C1 \times V_{CC}}$$

USING ZENER REGULATED OPTIONS (LM2917)

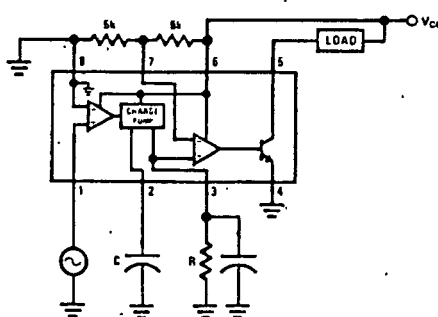
For those applications where an output voltage or current must be obtained independent of supply voltage variations, the LM2917 is offered. The most important consideration in choosing a dropping resistor from the unregulated supply to the device is that the tachometer and op amp circuitry alone require about 3 mA at the voltage level provided by the zener. At low supply voltages there must be some current flowing in the resistor above the 3 mA circuit current to operate the regulator. As an example, if the raw supply varies from 9 to 16V, a resistance of 470Ω will minimize the zener voltage variation to 160 mV. If the resistance goes under 400Ω or over 600Ω the zener variation quickly rises above 200 mV for the same input variation.

Typical Applications

Minimum Component Tachometer



"Speed Switch" Load is Energized When $f_{IN} \geq \frac{1}{2RC}$



Zener Regulated Frequency to Voltage Converter

