

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาตำแหน่งมุมโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส

THE INVESTIGATION OF ROTOR ANGLE POSITION
OF SYNCHRONOUS MACHINE



วค.

๗๗๒๙๗

๒๕๔๙

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 72736

วัน,เดือน,ปี 22 ส.ย. 2550

b. 11๙๙ 208b
i.....

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การหาตำแหน่งมุมโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส
THE INVESTIGATION OF ROTOR ANGLE POSITION
OF SYNCHRONOUS MACHINE



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. พิชิต ล้ายอง

อ. เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การหาค่าตำแหน่งมุมโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส

ผู้จัดทำ

1. นาย เมษา ภูตะมี
2. นาย ศุภวัฒน์ เรืองเรียง
3. นาย วิศรุต ศรีอ่อนนวล



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ พิชิต ล้ายอง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีเหตุขัดแย้งหรือข้อสงสัยใดๆ กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

THE INVESTIGATION OF ROTOR ANGLE POSITION
OF SYNCHRONOUS MACHINE

Maysa Pootamee

Suppawat Reongraing

Wisarut Sriannon

Assoc. Prof. Pichit Lumyong

Advisor

Piampoom Saikrueck

Advisor

2006

ABSTRACT

This study presents a test that determines performance characteristics of synchronous machine which functions as either the synchronous generator or the synchronous motor in rated power transfer and on load by using the Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard 155-1995 (IEEE Std 155-1995). The parameters and position of rotor angle obtained then are compared with the performance characteristics of synchronous machine theory. The findings demonstrate that there is an increase of the value of rotor angle when there is a higher transmission of loads or a higher on load.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณในความรู้ที่ได้รับจาก อาจารย์พิชิต ล้ายอง อาจารย์เปี่ยมภูมิ สฤกพฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาและพี่ปริญญาโททุกคนที่ได้คอยให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากทุกท่านที่กล่าวมาโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนในการศึกษา ส่งให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป.....	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส.....	3
2.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	3
2.2.1 ส่วนที่อยู่กับที่.....	4
2.2.2 ส่วนที่เคลื่อนที่.....	5
2.2.3 ขดลวดแฉกเปเปอร์.....	6
2.2 ความเร็วซิงโครนัสและความถี่.....	7
2.3 พิจารณาจากผลการเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก.....	10
2.3.1 การพันแบบเป็นกระจุกหรือแบบรวม.....	10
2.3.2 การพันแบบกระจาย.....	10
2.4 ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสามเฟส.....	11
2.5 สนามแม่เหล็กหมุน.....	12
2.6 การสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	14
2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไม่มีแปรงถ่าน.....	15
2.8 การเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว.....	16
2.9 ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์.....	19
2.10 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ตัวประกอบกำลังต่างๆ.....	21
2.11 โวลต์เดจเรกกูเรชัน.....	23
2.12 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส.....	24
2.13 การหาค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์.....	24
2.14 มอเตอร์ซิงโครนัส.....	27
2.15 การเริ่มเดินเครื่องจักรซิงโครนัส.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.16	วิธีการเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ซิงโครนัส 28
2.17	การป้อนโหลดให้กับมอเตอร์ซิงโครนัส 30
2.18	วงจรมุมลู่และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัส 32
2.19	การปรับแต่งค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส 33
2.20	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัส..... 34
2.21	คุณลักษณะในการทำงาน ของมอเตอร์ซิงโครนัส..... 40
2.22	คุณลักษณะของมุมกำลัง 41
2.23	เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสคอนแดนเซอร์ 43
บทที่ 3	คุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วยื่นหรือเซเลียนท์โพลการ ทดสอบตามมาตรฐานและการหาวงจรมุมลู่ 45
3.1	คุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วยื่นหรือเซเลียนท์โพล ... 45
3.2	สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กยี่ .. 46
3.3	การทดสอบตามมาตรฐานและการหาวงจรมุมลู่ 50
3.3.1	เส้นโค้งอิมิตัวแบบเปิดวงจร 50
3.3.2	Air-gap line 50
3.3.3	เส้นโค้งอิมิตัวแบบลัดวงจร..... 51
3.3.4	การทดสอบหาค่ารีแอกแตนซ์ในแกน $D-Q$ (Slip test)..... 52
3.3.5	การทดสอบหาวงจรมุมลู่ 54
3.4	แสดงการคำนวณตามมาตรฐาน..... 58
บทที่ 4	การทดสอบหามุมโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส 69
4.1	คุณลักษณะของมุมโรเตอร์หรือมุมของแรงบิดเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส.. 69
4.2	การศึกษาแรงบิด..... 70
4.3	วิธีการหาค่าแฉงในการติดตั้งเซ็นเซอร์..... 72
4.3	การวัดมุมโรเตอร์มีอยู่ 2 วิธี..... 74
	การทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส 76
	การคำนวณของมุมโรเตอร์ (Calculational angle (δ) จากค่า Parameter 80
	การทดลองมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 83
	การคำนวณของมุมโรเตอร์ (Calculational angle (δ) จากค่า Parameter 88

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 90

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส..... 3
2.2	แสดงลักษณะร่องสลีทแบบต่างๆ ของแกนเหล็กของอาร์มาเจอร์..... 4
2.3	ลักษณะขดลวดสเตเตอร์เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ..... 4
2.4	โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่นหรือขั้วแบบเซเลีย..... 5
2.5	แบบขั้วแม่เหล็กเรียบรูปทรงกระบอก..... 6
2.6	ขดลวดแอมแปร์ที่ฝังไว้ด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กทุกขั้ว..... 6
2.7	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่านแสดงอีกไซด์อร์..... 7
2.8	เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีโรเตอร์แบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก..... 7
2.9	เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีโรเตอร์แบบ 4 ขั้วแม่เหล็ก..... 8
2.10	ลักษณะการพันของขดลวดการพันแบบกระจายและพันแบบกระจุก..... 10
2.11	โครงสร้างเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส..... 11
2.12	สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส ($a - b - c$)..... 11
2.13	สัญญาณไฟฟ้าสามเฟสและโครงสร้างขดลวดอาร์มาเจอร์ ($a - b - c$)..... 12
2.14	สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก..... 13
2.15	ภาพตัดขวางของเครื่องจักรไฟฟ้าวัดจากแนวของโรเตอร์..... 14
2.16	ภาพตัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบไม่มีแปรงถ่าน..... 16
2.17	ลักษณะของลึกลงฟลักซ์รอบตัวนำในร่องและปลายคอลลีย์..... 17
2.18	เวกเตอร์โอดีอะแกรมแสดงค่า I_o , X_L นำหน้า I_o เป็นมุม 90° ไฟฟ้า..... 17
2.19	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กขณะจ่ายโหลดตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง..... 18
2.20	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กขณะจ่ายโหลดตัวประกอบกำลังล่าหลัง..... 18
2.21	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กขณะจ่ายโหลดตัวประกอบกำลังนำหน้า..... 19
2.22	เวกเตอร์โอดีอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด I_o มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ล่าหลัง..... 20
2.23	วงจรมุมมูลย์เครื่องกำเนิดเมื่อจ่ายกระแส I_o ให้โหลดที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ใดๆ..... 20
2.24	เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อแรงดันที่ขั้วอินเฟสกันกระแส..... 21
2.25	เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อกระแสล่าหลังแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว..... 22
2.26	เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อกระแสนำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว..... 22
2.27	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงที่ค่าตัวประกอบกำลังต่างๆ กัน..... 23
2.28	การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าสามเฟส..... 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานอาเมเจอร์.....	25
2.30 วงจรทดสอบแบบเปิดวงจร	25
2.31 กราฟแสดงคุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าขณะทดสอบแบบเปิดวงจร.....	26
2.32 วงจรการทดสอบแบบลัดวงจร	26
2.33 กราฟแสดงคุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าขณะทดสอบแบบลัดวงจร	27
2.34 แสดงสภาพการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าโรเตอร์ และจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าขดลวดพร้อมกันอาเมเจอร์.....	28
2.35 การใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส	29
2.36 วงจรการสตาร์ทมอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟสชนิดขดลวดหน่วง.....	29
2.37 แสดงมุมโหลด (δ) ของมอเตอร์ซิงโครนัสขนาดมีโหลดและไม่มีโหลด	30
2.38 เฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสที่วิ่งไปพร้อมกับสนามแม่เหล็กหมุนที่โหลดต่างๆ ..	31
2.39 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ซิงโครนัส.....	33
2.40 เฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด	34
2.41 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และค่าตัวประกอบกำลัง ของมอเตอร์มีค่าเป็นหนึ่ง เขียนโดยใช้แรงดันเป็นแกนอ้างอิง.....	35
2.42 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง	36
2.43 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลัง ของมอเตอร์นำหน้าเขียนโดยใช้แรงดัน I_0 เป็นแกนอ้างอิง	36
2.44 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลัง ของมอเตอร์นำหน้า เขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง	37
2.45 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลัง ของ มอเตอร์ล่าหลัง เขียนโดยใช้แรงดันเป็นแกนอ้างอิง.....	38
2.46 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลดและมีค่าตัวประกอบกำลัง มอเตอร์ล่าหลังเขียนโดยใช้กระแส I_0 เป็นแกนอ้างอิง.....	39
2.47 กราฟรูปตัดวีแสดงความสัมพันธ์ของมอเตอร์ซิงโครนัสขณะที่ปรับค่ากระแสสนาม .	41
2.48 วงจรไฟฟ้าที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 2 ชุด	41
2.49 วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส กำหนดให้ไม่คิดค่า R_0	43
2.50 เฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสขณะที่ปรับค่ากระแส I_f เมื่อภาระทางกลคงที่.....	44
3.1 แสดงการเดินทางของเส้นแม่เหล็กอาร์มาเจอร์และเฟสเซอร์ไดอะแกรม	45
3.2 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	47
3.3 เฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส.....	47
3.4 เฟสเซอร์ในเครื่องจักรซิงโครนัสแบบขั้วยื่น.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.5	เส้นโค้งอิมิตัว	51
3.6	การทดสอบแบบ slip test ตามทฤษฎี	53
3.7	เส้นโค้งอิมิตัวแบบเปิดวงจร	55
3.8	เส้นโค้งอิมิตัวแบบลัดวงจร	56
3.9	การแสดงค่า I_{FG}	57
3.10	การแสดงค่า I_{FSI}	57
3.11	กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้า E_{max} และ E_{min}	58
3.12	กราฟแสดงกระแส I_{max} และ I_{min}	59
3.13	เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ภาวะไฟฟ้าล้าหลัง	62
3.14	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ภาวะไฟฟ้าล้า หลังจากกาวัด	67
3.15 ก)	วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	68
3.15 ข)	วงจรสมมูลซิงโครนัสมอเตอร์	68
4.1	ขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ที่เป็นเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสขณะมีโหลด และไม่มีโหลด	69
4.2	กราฟความสัมพันธ์แรงบิดกับมุมกำลังของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแบบ เซเลียทีโพล	71
4.3	ลักษณะแผ่นวงกลมที่ติดตั้งกับแกนโรเตอร์	72
4.4	แสดงการหา positive sequence และโพลาร์ดี	72
4.5	แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กหมุนตามกัน	73
4.6	แสดงตำแหน่งจุดที่ใช้เซ็นเซอร์วัด	73
4.7	แสดงสัญญาณที่โพลีเซ็นเซอร์ที่จับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	74
4.8	แสดงการวัดมุมด้วยอีเล็กทรอนิกส์	75
4.9	การใช้สโตนโคโรวัดมุมโรเตอร์	76
4.10	วงจรการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	77
4.11	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะ no - load มีค่ามุม $\delta_m = 0^\circ$	79
4.12	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะ on - load มีค่ามุม $\delta_m = 15.36^\circ$	79
4.13	แสดงกำลังไฟฟ้ากับกระต้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	80
4.14	วงจรการทดลองซิงโครนัสมอเตอร์	84
4.15	วงจรการทดลอง DC motor	85
4.16	เครื่องมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสขณะ $I_f = 0.1A$ มีค่ามุม $\delta = 36.03^\circ$	86
4.17	เครื่องมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสขณะ $I_f = 0.9A$ มีค่ามุม $\delta = 14.35^\circ$	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 แสดงกำลังไฟฟ้ากับกระแสกระตุ้น	87
4.18 กราฟรูปตัววีแสดงความสัมพันธ์ของมอเตอร์ซิงโครนัสขณะที่ปรับค่ากระแสสนาม .	88
5.1 ขณะมอเตอร์จ่ายโหลด หลอดไฟ100w จำนวน 35 ดวง ณ การปรับเพาเวอร์ต่างๆ	92
5.2 การเปลี่ยนแปลงมุมโรเตอร์ขณะจ่ายโหลดที่พิกัดต่างๆ	93
5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโหลด	95
5.4 กำลังของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อได้รับโหลดแบบชั่วคราวกระบอก.....	97



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่ความเร็วต่างๆ.....	9
3.1 ผลการทดลองแบบเปิดวงจร	54
3.2 ผลการทดลองแบบลัดวงจร	55
4.8 ค่าผลการทดลองขณะที่มี LOAD R เพียงอย่างเดียว.....	78
4.9 ค่าผลการทดลองขณะที่มี LOAD R-L.....	78
4.14 ค่าผลการทดลองขณะรับภาระทางไฟฟ้า(โหลดไฟ 1 ดวง)	85
4.15 ค่าผลการทดลองขณะรับภาระทางไฟฟ้า(โหลดไฟ 35 ดวง)	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้งและยังคงจะพัฒนาต่อไปเรื่อยๆ ดังนั้นถือว่าด้านอุตสาหกรรมมีความสำคัญมากต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย

ซึ่งในโรงงานบางแห่งอาจจะมีการผลิตไฟฟ้าใช้เองเพื่อทำการจ่ายโหลดให้กับระบบไฟฟ้าในโรงงานและกระบวนการผลิตต่างๆ โรงงานอุตสาหกรรมกรณีที่เกิดไฟฟ้ายังใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและถ้าโรงงานต้องการปรับปรุงค่าของเพาเวอร์แฟคเตอร์ใช้มอเตอร์ซิงโครนัสต่อกับระบบไฟฟ้าในโรงงานก็จะสามารถปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ได้ เมื่อเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายโหลดเพิ่มมากขึ้นทำให้ขั้วสนามแม่เหล็กของโรเตอร์กับขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ที่เกาะกันจะห่างออกจากกันเป็นมุมมูมหนึ่งๆ เรียกว่ามุมโรเตอร์เมื่อมีการจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มุมโรเตอร์ก็จะกว้างขึ้นด้วยดังนั้นที่มุมระหว่างขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์กับขั้วแม่เหล็กที่เกาะกันก็เริ่มจะหลุดจากกัน เมื่อจ่ายโหลดเกินพิกัดถึงจุดที่หลุดคือขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์กับขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์หลุดจ่ายกันหรือไม่เสถียรภาพ ดังนั้นปริญญาโทพิเศษนี้จึงได้ทำการศึกษาการหาตำแหน่งมุมโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส เพื่อหาว่าขณะที่จ่ายโหลดอยู่นี้มุมโรเตอร์จะมีมุมเท่าไร ณ ที่พิกัดต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสทั้งกรณีที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและมอเตอร์ซิงโครนัสที่เป็นโรเตอร์เป็นแบบขั้วยื่นหรือเซเลชันซีโพล
2. เพื่อศึกษาการวิธีการหาตำแหน่งมุมโรเตอร์ขณะเครื่องจักรไฟฟ้าทำการจ่ายโหลดที่พิกัดแบบต่างๆ

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

1. ศึกษาเครื่องจักรซิงโครนัสที่นำมาทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล
2. ทดสอบเครื่องจักรซิงโครนัสตามมาตรฐานของ IEEE Std 115 – 1995
3. ทำการทดสอบโดยการป้อนโหลดชนิดต่างๆ และหาตำแหน่งที่มุมโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ระยะเวลาการดำเนินงาน เดือน มิถุนายน-มกราคม

แผนการดำเนินงาน	มิถุนายน	กรกฎาคม	สิงหาคม	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม
ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส							
ทำการซ่อมแซมเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อใช้ในการทดสอบ							
ทดสอบการเดินเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสและหาวงจรสมมูล							
หาวิธีการทดสอบหาค่าแอมพลิจูดและสรีปวิเคราะห์การทดลอง							

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

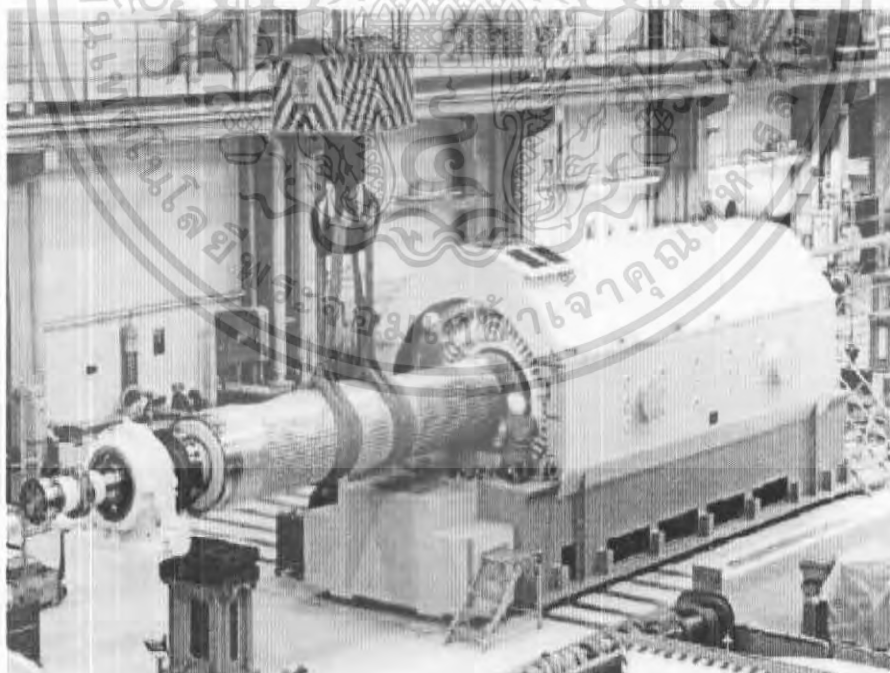
1. รู้จักโครงสร้างและทฤษฎีการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสทั้งกรณีที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส
2. รู้วิธีการทดสอบเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และวงจรสมมูล
3. รู้วิธีการทดสอบหาค่าแอมพลิจูดและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

2.1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสก็คือเครื่องจักรไฟฟ้าที่ทำงานในขณะที่ตัวหมุนมีความเร็วเท่ากับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจากอาร์มาเจอร์ ไม่ว่าเครื่องจักรไฟฟ้านั้นจะทำหน้าเป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาหรือเป็นตัวจ่ายกำลังออกมาก็ตาม จะอย่างไรก็ตามตัวอาร์มาเจอร์หรือสนามกระตุ้นอาจจะอยู่ที่ตัวอยู่กับที่หรือตัวที่หมุนก็ได้แล้วแต่จุดประสงค์ของการใช้งานและขนาดของเครื่องจักรไฟฟ้า ดังนั้นเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสจึงต้องมีความเร็วคงที่เสมอโดยไม่คำนึงถึงว่าโหลดที่เครื่องจักรไฟฟ้าได้รับนั้นจะมีมากน้อยเท่าใดก็ตาม ซึ่งจำนวนขั้วแม่เหล็กและความถี่ของเครื่องจักรไฟฟ้านั้นต้องคงที่โดยปกติแล้วเครื่องจักรไฟฟ้าแบบนี้ก็แบ่งออกเป็นสองกรณีคือ ถ้าป้อนกำลังให้แก่ตัวเครื่องจักรไฟฟ้าและจ่ายกระแสไฟฟ้ากระตุ้นเข้าขดลวดสนามเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดนี้จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ถ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์และจ่ายกระแสไฟฟ้ากระตุ้นเข้าขดลวดสนามเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดเดียวกันนี้จะทำงานเป็นมอเตอร์ซิงโครนัส ดังนั้นโครงสร้างจึงเป็นลักษณะเดียวกัน ส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้



รูปที่ 2.1 ลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนที่อยู่กับที่นี้มักจะเรียกชื่อว่า สเตเตอร์และในส่วนนี้ยังประกอบด้วยสิ่งสำคัญคือ โครงของเครื่องจักรไฟฟ้า แกนขดลวดและขดลวด

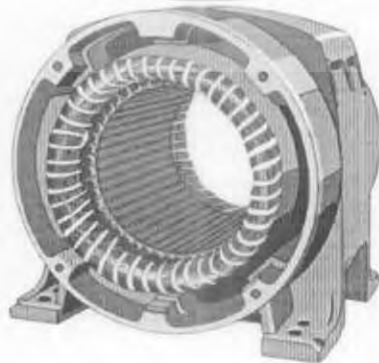
(ก) โครง ทำด้วยเหล็กหล่อรูปทรงกระบอกกลวงฐานส่วนล่างมีลักษณะเป็นขาตั้งและยังทำหน้าที่แกนขดลวดให้แน่นอยู่กับที่ ผิวด้านนอกโดยรอบของโครงเครื่องจักรไฟฟ้าเรียบหรือบางตัวจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นครีบเพื่อช่วยระบายความร้อน

(ข) แกนขดลวด ทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆ มีลักษณะเป็นทรงกลมเจาะรูปตรงกลางและเจาะร่องภายในโดยรอบแผ่นเหล็กนี้เรียกว่า แผ่นลามิเนต แล้วนำเอาแผ่นเหล็กบางเหล่านี้ที่อาบซิลิกอนแล้วมาอัดเข้าด้วยกันโดยที่แต่ละแผ่นนำมาอัดติดกันเรียกว่าแกนขดลวดหรือสเตเตอร์คอร์ ร่องที่เจาะภายในโดยรอบเรียกว่า สล็อต เป็นที่สำหรับพันขดลวดและแกนขดลวดนี้ทำหน้าที่เป็นทางเดินเส้นแรงแม่เหล็กหรือเป็นวงจรแม่เหล็กเพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน เครื่องจักรไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่แกนเหล็กอาร์มาเจอร์จะมีช่องสำหรับให้อากาศผ่านเพื่อช่วยระบายความร้อน ลักษณะของร่องที่ใช้พันขดลวดอาร์มาเจอร์มี 3 แบบ



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะร่องสล๊อตแบบต่างๆ ของแกนเหล็กของอาร์มาเจอร์

(ค) ขดลวดสเตเตอร์ ขดลวดที่พันลงในสล๊อตของแกนขดลวด เส้นขดลวดทองแดงที่ใช้พันเป็นขดลวดนี้ จะเป็นชนิดที่เคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าอย่างดีเช่น น้ำมันวานิช ซึ่งเมื่อแห้งสนิทแล้วจะเป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี



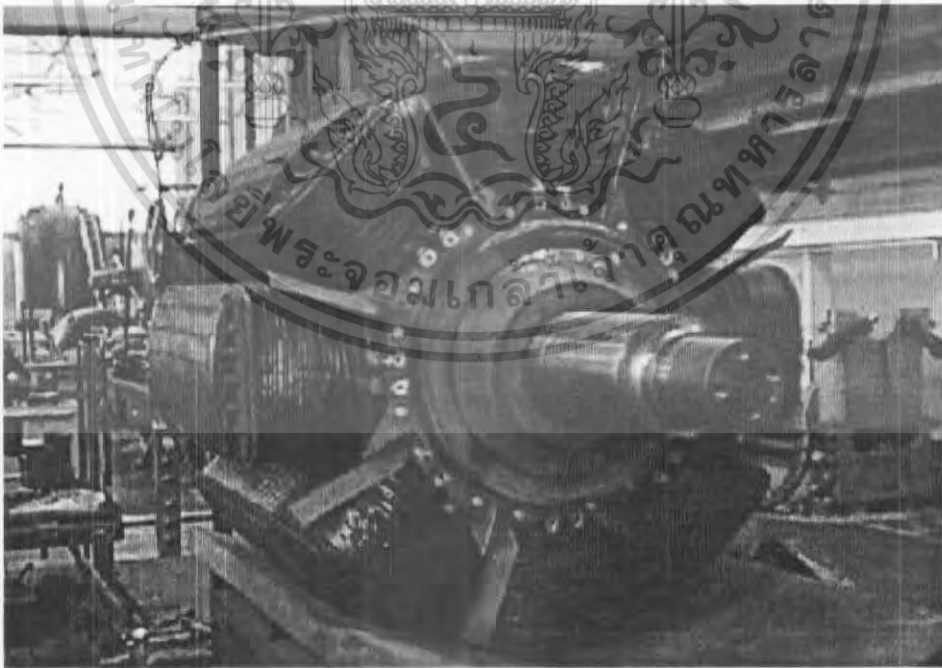
รูปที่ 2.3 ลักษณะขดลวดสเตเตอร์เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ส่วนเคลื่อนที่ จะเป็นขั้วแม่เหล็กซึ่งมีขดลวดสนามพันอยู่เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่ปรับค่าได้โดยปรับกระแสที่ไหลเข้าขดลวดสนามกระตุ้นซึ่งพันอยู่บนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ขั้วแม่เหล็กแบบยื่นและขั้วแม่เหล็กแบบทรงกระบอก

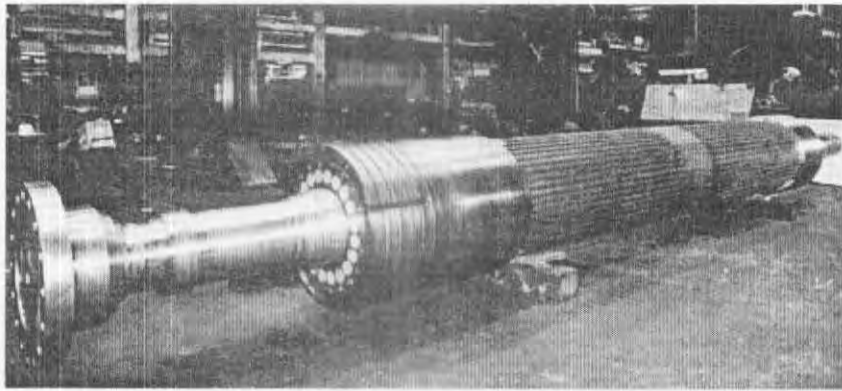
(ก) ขั้วแม่เหล็กแบบยื่น เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เซเลียนท์โพลมีลักษณะเป็นขั้วแม่เหล็กยึดติดกับโรเตอร์ช่องว่างอากาศระหว่างตัวโรเตอร์กับตัวสเตเตอร์จึงไม่สม่ำเสมอคือช่องว่างอากาศที่หน้าขั้วแม่เหล็กจะน้อยกว่าบริเวณที่ไม่ใช่ขั้วแม่เหล็ก เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกขับด้วยความเร็วรอบต่ำและปานกลาง ดันกำลังที่ใช้ขับได้แก่ เครื่องยนต์ดีเซล และกังหันไอน้ำ จำนวนขั้วแม่เหล็กจะมีตั้งแต่ 4 ขั้วขึ้นไปโครงสร้างของขั้วแม่เหล็กแบบนี้ประกอบด้วยเหล็กแผ่นบางๆ อัดเป็นแท่งยึดด้วยสลักเกลียวเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไหลวน

(ข) แบบขั้วแม่เหล็กเรียบรูปทรงกระบอก มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีช่องว่างอากาศระหว่างตัวโรเตอร์กับตัวสเตเตอร์สม่ำเสมอ เครื่องกำเนิดที่ถูกขับด้วยความเร็วสูง ดันกำลังที่ให้ความเร็วรอบสูงได้แก่ เครื่องกังหันไอน้ำและกังหันก๊าซ เนื่องจากมันถูกขับด้วยความเร็วประมาณ 3000 rpm ดังนั้นโครงสร้างของมันจึงต้องเป็นรูปทรงกระบอกมีพื้นที่ผิวขั้วเรียบเสมอกัน เหตุผลที่ต้องใช้ขั้วแม่เหล็กนี้ ก็เพื่อหลีกเลี่ยงแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและลดการสูญเสียเนื่องจากแรงต้านจากลม โดยส่วนที่หมุนจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กเมื่อเทียบกับความยาวของแกน



รูปที่ 2.4 โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่นหรือขั้วแบบเซเลียม

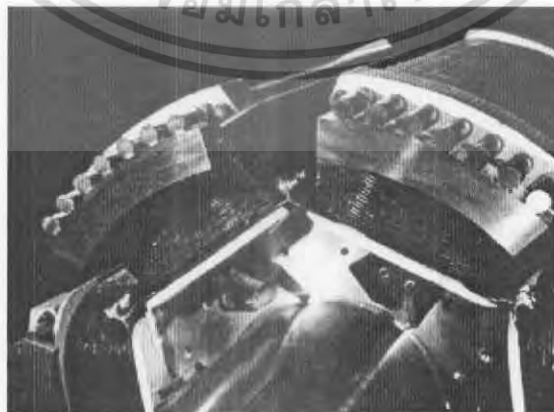
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แบบขั้วแม่เหล็กเรียบรูปทรงกระบอก

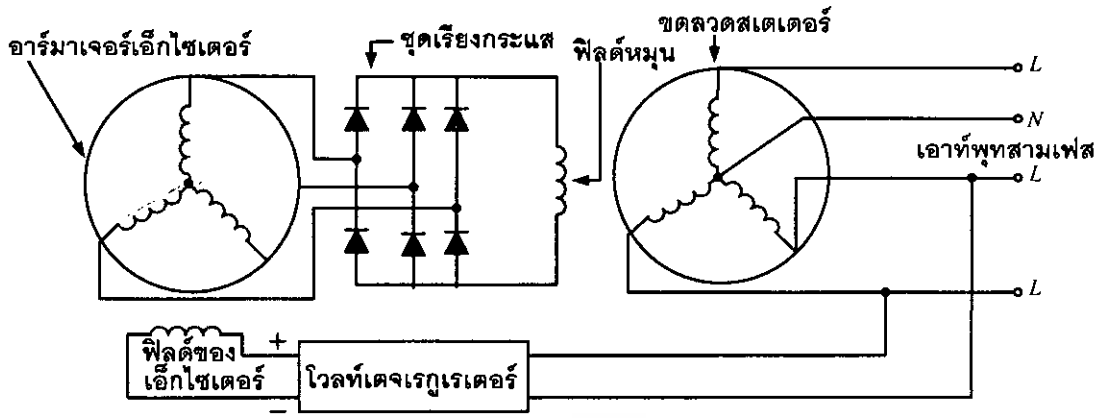
2.1.3 ขดลวดแฉกเปเปอร์ ที่ขั้วแม่เหล็กของส่วนที่หมุนจะมีร่องสำหรับฝังแท่งทองแดง และปลายแท่งทองแดงเหล่านี้จะถูกฉลัดวงจรด้วยแท่งทองแดงถึงกันหมดมีลักษณะเหมือนกับโรเตอร์แบบกรงกระรอกเรียกว่า ขดลวดแฉกเปเปอร์ ขดลวดนี้มีไว้สำหรับแก้การแกว่งหรือสั่นของโรเตอร์ขณะที่โรเตอร์กำลังหมุนอยู่ การสั่นของโรเตอร์เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วของต้นกำลังไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังใช้แก้การแกว่งหรือการสั่นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและในมอเตอร์ ซิงโครไนส์ก็จำเป็นต้องมีขดลวดแฉกเปเปอร์ไว้เพื่อช่วยในการเริ่มต้นเครื่องด้วย

เนื่องจากขดลวดแฉกเปเปอร์ถูกฝังไว้หน้าขั้วแม่เหล็กของส่วนที่หมุนจึงหมุนไปพร้อมกับสนามแม่เหล็กบนอาร์เมเจอร์ ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครไนส์ จึงไม่ตัดกับสนามแม่เหล็กหมุนแต่เมื่อมีการเพิ่มหรือลดโหลดลงในทันทีที่จะตัดกับสนามแม่เหล็กเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและมีกระแสไหลในขดลวดแฉกเปเปอร์ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อต้านกับการเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กของขดลวดแฉกเปเปอร์ นั่นคือจะมีแรงต้านทานการสั่นจากอำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสในขดลวดแฉกเปเปอร์ กับอำนาจแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนบนอาร์เมเจอร์หน่วงการสั่นให้หยุดเร็วขึ้น



รูปที่ 2.6 ขดลวดแฉกเปเปอร์ที่ฝังไว้ด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กทุกขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

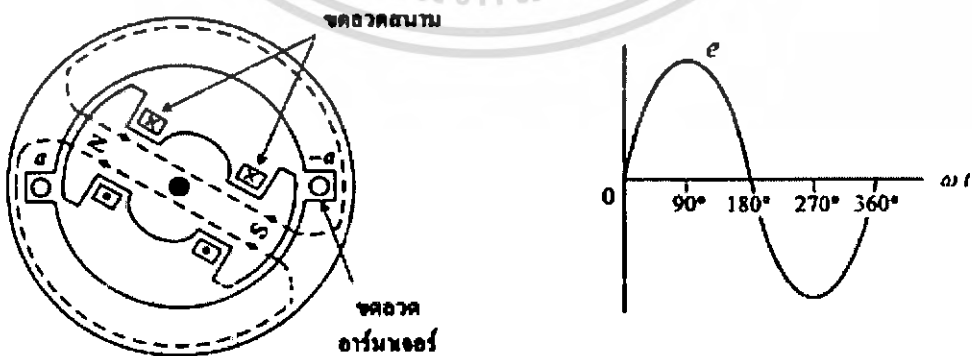


รูปที่ 2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่านแสดงเอ็กไซเตอร์

2.1.4 เอ็กไซเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นตัวเอง ซึ่งติดตั้งอยู่บนเพลลาเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ เอ็กไซเตอร์ทำหน้าที่ผลิตและจ่ายกระแสตรงให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับขนาดใหญ่มักจะเลือกใช้วิธีการเอ็กไซเตชัน ด้วยชุดเรียงกระแสระบบไร้แปรงถ่านซึ่งแบบนี้ต้องการการบำรุงรักษาน้อยกว่าระบบที่ใช้สลีปริงและแปรงถ่าน

2.2 ความเร็วเชิงโคโรนัสและความถี่

โครงสร้างเครื่องจักรไฟฟ้าดังรูปที่ 2.8 (ก) แสดงส่วนประกอบดังนี้ ที่โรเตอร์มีขดลวดสนามซึ่งมีกระแสไหลในทิศทางดังรูปทำให้เกิดขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว เป็นขั้ว N และ S ที่สเตอร์มีขดลวดอาเมเจอร์ a และ $-a$ ซึ่งเป็นขดลวดตัวนำเส้นเดียวกันแต่วางอยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน โดยที่ตำแหน่งของตัวนำ a และ $-a$ จะต้องวางอยู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่มีขั้วต่างกัน นั่นคือ ถ้าตัวนำ a อยู่ภายใต้ขั้ว N ตัวนำ $-a$ จะต้องอยู่ภายใต้ขั้ว S ในกรณีนี้ (2 ขั้วแม่เหล็ก) ตัวนำ a และ $-a$ จะวางอยู่ตรงข้ามกัน (ทำมุม 180°) ทางกล

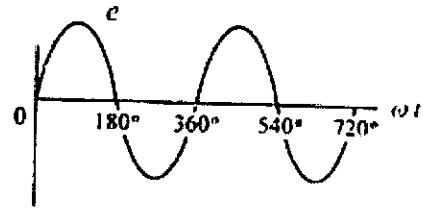
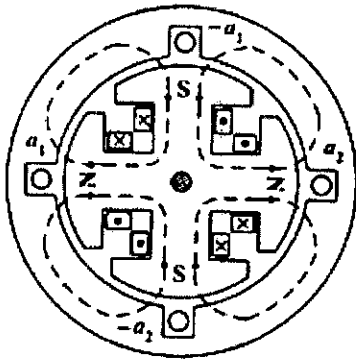


(ก) โครงสร้างสเตอร์และโรเตอร์

(ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 1 cycle

รูปที่ 2.8 เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีโรเตอร์แบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โครงสร้างสเตอร์และโรเตอร์

(ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2 cycle

รูปที่ 2.9 เครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีโรเตอร์แบบ 4 ขั้วแม่เหล็ก

เมื่อโรเตอร์ที่หมุนรอบตัวเองจะเกิดการตัดกันระหว่าง a และ $-a$ กันสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ จะเห็นได้ว่าตัวนำ a และ $-a$ วางอยู่ใต้ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ที่มีขั้วต่างกัน ทิศทางของค่า e ที่เกิดขึ้นในแต่ละตัวนำจึงมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกันแต่เนื่องจากตัวนำ a และ $-a$ เป็นลวดเส้นเดียวกัน ดังนั้นค่า e ที่เกิดจากขดลวดตัวนำมีทิศทางที่เสริมกันพิจารณาตัวนำ a ในรูปที่ 2.8 (ก) เมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบหมายความว่าได้เคลื่อนที่ไปเป็นมุม 360° ทางกล ตัวนำ a จะเกิดค่า e ทั้งสองทิศทางมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่ 2.8 (ข) เรียกว่าเกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำครบ 1 cycle ซึ่งเป็นมุม 360° ทางไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้มุมทางไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับมุมทางกล และถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อวินาที (3,000 รอบต่อนาที) จะได้สัญญาณไฟฟ้าเกิดขึ้นจำนวน 50 รอบต่อวินาที ซึ่งเรียกว่ามีความถี่เท่ากับ 50 Hz โครงสร้างรูปที่ 2.9 แสดงโรเตอร์แบบ 4 ขั้วแม่เหล็กเมื่อโรเตอร์หมุนครบ 1 รอบต่อวินาที ตัวนำจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจำนวน 2 cycle ถ้าโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 25 รอบต่อวินาที (1500 รอบต่อนาที) จะได้สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจำนวน 50 รอบ/วินาที หรือมีความถี่เท่ากับ 50 Hz

ดังนั้นจำนวนขั้วแม่เหล็กและความเร็วรอบของโรเตอร์จะมีผลต่อค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2.1)$$

เมื่อกำหนดให้ θ_e เป็นมุมทางไฟฟ้า θ_m เป็นมุมทางกลและ P เป็นจำนวนขั้วแม่เหล็ก จะได้ความถี่จะขึ้นอยู่กับ

$$f = \frac{P n_s}{2 \cdot 60} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ f เป็นค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าหน่วยเป็น H_z และ n_s เป็นค่าความเร็วรอบมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm) ซึ่งเรียกชื่อว่าคุณเร็วซิงโครนัส จะได้ว่า

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.3)$$

จะเห็นว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กโรเตอร์ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วซิงโครนัสและจำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์และในทำนองเดียวกัน ค่าความเร็วซิงโครนัสจะสามารถกำหนดได้โดยความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและจำนวนขั้วแม่เหล็ก

ดังนั้นกำหนดให้ n_s คือความเร็วซิงโครนัสคือความเร็วของตัวหมุนซึ่งถูกดันกำลังขับเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผลิตไฟฟ้าได้ตามความถี่ที่ต้องการ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องผลิตความถี่ไฟสลับเท่ากับ $50H_z$ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 2 ขั้วแม่เหล็ก ($P = 2$) จากสมการ จะต้องหมุนตัวเครื่องที่ความเร็วรอบเท่ากับ 3,000 รอบต่อ นาที ดังสมการต่อไปนี้

$$n_s = \frac{120(50Hz)}{2}$$

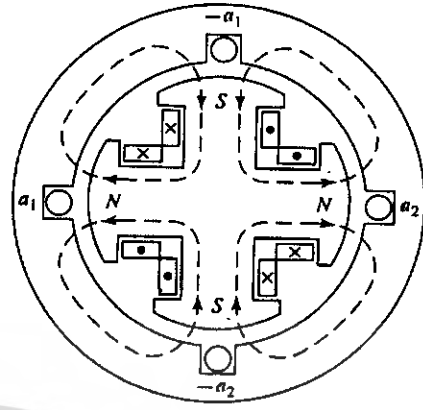
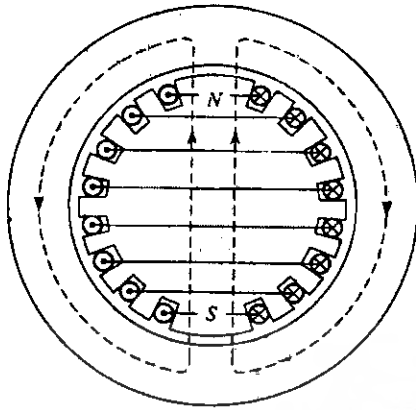
$$n_s = 3,000 \text{ rpm}$$

จำนวนโพล	ความเร็วซิงโครนัส n_s (rpm)		
	$f = 25Hz$	$f = 50Hz$	$f = 60Hz$
2	1,500	3,000	3,600
4	750	1,500	1,800
6	500	1,000	1,200
8	375	750	900

ตารางที่ 2.1 ตารางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ความเร็วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทิศทางจากผลการเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก



(ก) การพันแบบกระจาย

(ข) การพันแบบขั้วยื่น

รูปที่ 2.10 ลักษณะการพันของขดลวดการพันแบบกระจายและพันแบบกระจุก

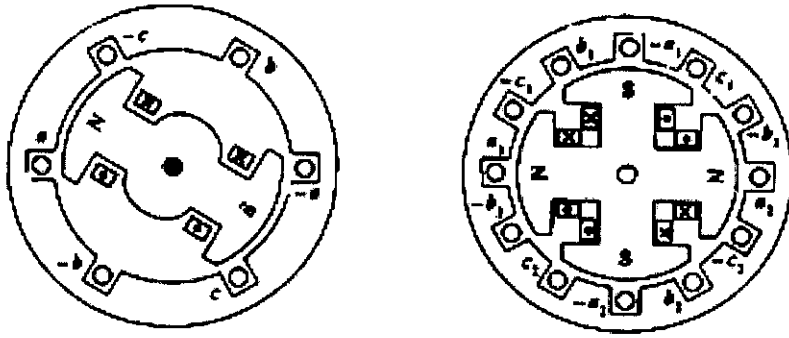
2.3.1 การพันแบบเป็นกระจุกหรือแบบรวม เป็นการพันตัวนำรอบแท่งเหล็กหนึ่งโดยที่ขดลวดที่พันนั้นพันรวมกันเป็นชุดเดียวรอบแท่งเหล็กนั้น ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่แท่งเหล็กจากที่ได้จ่ายไฟจำนวนหนึ่งเข้าไปในขดลวด การพันแบบนี้มักใช้ขั้วแม่เหล็กแบบยื่นดังรูป 2.10 (ก) ในการพันแบบนี้จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีความเข้มข้นมากตรงบริเวณกลางขั้ว ส่วนบริเวณระหว่างขั้วต่อขั้วที่ใกล้กันจะมีสนามแม่เหล็กน้อย

2.3.2 การพันแบบกระจาย แบบนี้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะสม่ำเสมอกว่าแบบแรก ซึ่งขดลวดที่พันนี้จะแยกกันลงไปในแต่ละช่อง ของอาร์มาเจอร์เพื่อทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กออกไปโดยรอบ ฉะนั้นจึงอาจเรียกขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น ดังรูปที่ 2.10 (ข) ขั้วชนิดนี้มีแกนเหล็กของอาร์มาเจอร์ทำเป็นช่องสลอท เพื่อใช้พันหรือใส่ตัวนำลงไปในช่องเหล่านั้น การพันแบบนี้จะไม่เห็นลักษณะของขั้วแม่เหล็กที่แบ่งเป็นขั้วๆ อย่างเช่นแบบขั้วแม่เหล็กที่เป็นแบบขั้วยื่น การทำแบบนี้ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กกระจายออกไปได้สม่ำเสมอดี และยังแก้การเกิดอาการของการเหนี่ยวนำของขดลวดที่พันในอาร์มาเจอร์อีกด้วย

2.4 ขดลวดอาร์มาเจอร์แบบสามเฟส

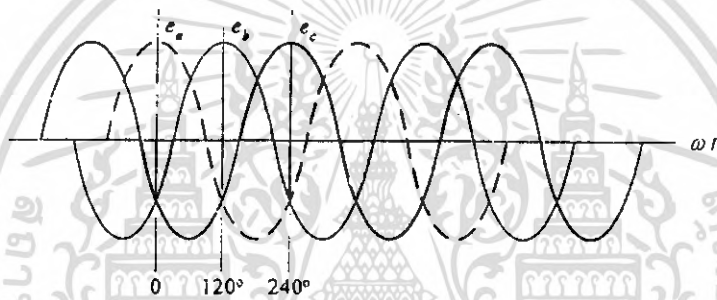
สัญญาณไฟฟ้าสามเฟสได้มาจากหลักการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องจักรไฟฟ้าที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 จากรูปที่ 2.11 (ก) แสดงเครื่องจักรไฟฟ้าที่มีแบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก ขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ประกอบด้วยขดลวดตัวนำ 3 ชุดคือ $a, -a$ ชุด $b, -b$ และชุด $c, -c$ วางอยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน ขดลวด a, b และ c วางห่างกันเป็นมุม 120° ทางกล และลวดตัวนำ $-a, -b$ และ $-c$ จะวางห่างกันเป็นมุม 120° ทางกลในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นถ้ากำหนดให้โรเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา การเกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทั้งสามชุดจะมีเฟสทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันเป็นมุม 120° ทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) โรเตอร์แบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก (ข) โรเตอร์แบบ 4 ขั้วแม่เหล็ก

รูปที่ 2.11 โครงสร้างเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส



รูปที่ 2.12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (a-b-c)

ไฟฟ้าทั้งนี้เนื่องจากความสัมพันธ์ของมุมทางไฟฟ้าและมุมทางกล ในทำนองเดียวกันรูปที่ 2.11 (ข) แสดงโครงสร้างโรเตอร์แบบ 4 ขั้วแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าลวดตัวนำ a_1, b_1 และ c_1 วางอยู่ห่างกันเป็นมุม 60° ทางกล ซึ่งจะทำให้การเกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทั้งสามชุดจะมีเฟสทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันเป็นมุม 120° ทางไฟฟ้าเช่นเดียวกัน

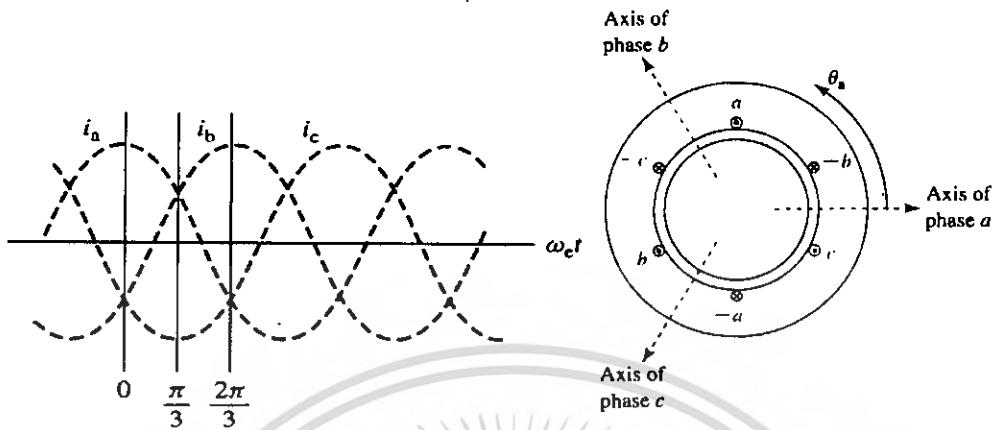
ดังนั้นโครงสร้างเครื่องจักรไฟฟ้าในลักษณะนี้จะทำให้ได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส ดังรูปที่ 2.12

$$e_a = E_m \cos \omega t \quad , \quad e_b = E_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad , \quad e_c = E_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.4)$$

เมื่อ e_a, e_b และ e_c เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวด a, b และ c

2.5 สนามแม่เหล็กหมุน

สนามแม่เหล็กหมุนเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส โดยพิจารณาจากระบบไฟฟ้าสามเฟสที่สมดุล ซึ่งแนวแกนสนามแม่เหล็กของขดลวดแต่ละเฟส



(ก) สัญญาณกระแสไฟฟ้าสามเฟส

(ข) แนวแกนสนามแม่เหล็กของขดลวด

รูปที่ 2.13 สัญญาณไฟฟ้าสามเฟสและโครงสร้างขดลวดอาร์มาเจอร์ ($a-b-c$)

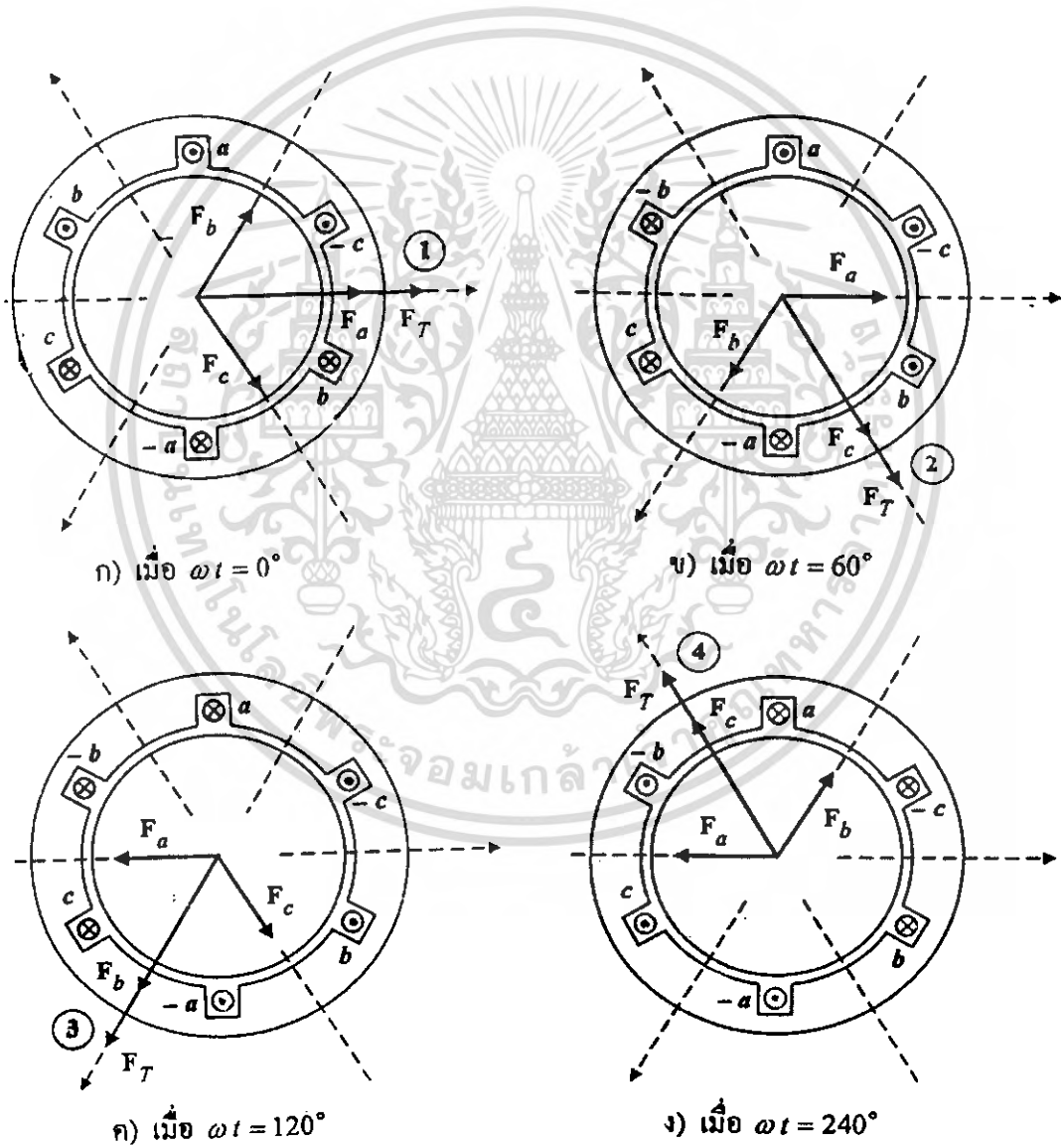
จะวางห่างทำมุมกัน 120° ทางกล (120° ทางไฟฟ้า) เมื่อเกิดค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสที่สมดุลในขดลวด ดังรูปที่ 2.13 (ก) เกิดขึ้นในขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์แบบสามเฟส รูปที่ 2.14 (ข) ซึ่งแบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าขดลวด a, b และ c แต่ละขดจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของกระแสไฟฟ้าแต่ละขดลวดดังนี้

$$i_a = I_m \cos \omega t, \quad i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ), \quad i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (2.5)$$

จากรูปที่ 2.13 (ข) เมื่อขดลวด a, b และ c แต่ละขดมีกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะสร้างสนามแม่เหล็ก F_a, F_b และ F_c ขึ้นตามลำดับในแกนตั้งรูป แนวแกนสนามแม่เหล็กนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขดลวดอาร์มาเจอร์เหล่านี้อยู่บนสเตเตอร์ซึ่งอยู่กับที่ แต่ทิศทางของสนามแม่เหล็กในแต่ละแนวแกนจะขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสในขดลวดต่างๆ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.5 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนพิจารณาได้จากลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกนเมื่อเวลาต่างๆ กันดังนี้

เมื่อเวลา $\omega t = 0^\circ$ ค่ากระแส i_a จะมีขนาดสูงสุดและเป็นบวกในขณะที่ค่ากระแส i_b และ i_c จะมีขนาดที่เท่ากันและน้อยกว่า i_a แต่มีค่าเป็นลบ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางดังรูปที่ 2.14 (ก) สังเกตว่าขนาดของ F_b และ F_c จะน้อยกว่า F_a เมื่อพิจารณาผลของค่าสนามแม่เหล็กต่างๆ ณ เวลานั้น จะทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กลัพธ์ F_r ขึ้นมาในแนวที่ 1 เมื่อเวลา $\omega t = 60^\circ$ จะเห็นได้ว่าค่ากระแส i_a จะยังเป็นบวกแต่ขนาดลดลง ในขณะที่ค่ากระแส i_b จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นบวกและมีขนาดเท่ากับ i_a ส่วนค่ากระแส i_c จะยังมีค่าเป็นลบแต่มี

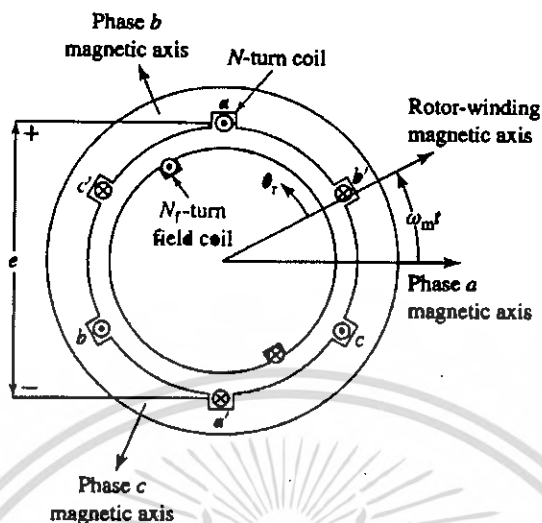
ขนาดสูงสุด ดังนั้น ณ เวลานั้นจะทำให้เกิดค่าสนามแม่เหล็กลัพธ์ F_T ขึ้นมาในแนวที่ 2 ดังรูปที่ 2.14 (ข) สังเกตได้ว่าขนาดนี้สนามแม่เหล็กลัพธ์ F_T ได้มีการเคลื่อนที่จากแนวที่ 1 เป็นมุม 60° ทางกลมาอยู่ในแนวที่ 2 ต่อมาเมื่อเวลา $\omega t = 120^\circ$ จากรูปที่ 2.13 (ค) จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กลัพธ์ F_T จะเคลื่อนที่มาอยู่ในแนวแกนที่ 3 ซึ่งขณะนี้ F_T ได้มีการเคลื่อนที่จากแนวแกนที่ 1 เป็น 120° ทางกลในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 2.14 (ง) $\omega t = 240^\circ$ ค่า F_T จะเคลื่อนที่มาอยู่ในแนวที่ 4 ซึ่งได้มีการเคลื่อนที่จากแนวที่ 1 เป็นมุม 240° ทางกล จากผลที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ พบว่าสนามแม่เหล็กลัพธ์ F_T ได้มีการเคลื่อนที่ในลักษณะที่หมุนไปรอบโรเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยมีความสัมพันธ์ของมุมทางกลกับมุมทางไฟฟ้าที่เท่ากันเนื่องจากเครื่องจักรไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก



รูปที่ 2.14 สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบ 2 ขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การสร้างแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของเครื่องจักรไฟฟ้าวัตจากแนวของโรเตอร์

จากรูปเมื่อ θ เป็นมุมทางไฟฟ้าวัตจากแนวแกนของโรเตอร์ กำหนดให้

$$B = B_{peak} \cos \theta \quad (2.6)$$

ค่าเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศต่อขั้ว (air-gap flux per pole) กรณี P ขั้วแม่เหล็ก

$$\Phi = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} (B_{peak} \cos \theta) l r = 2B_{peak} l r \quad (2.7)$$

กำหนดโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ ω ค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องคล่องขดลวดอาร์มาเจอร์ N รอบมีค่า

$$\lambda = N \Phi \cos \omega t \quad (2.8)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดอาร์มาเจอร์

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \cos \omega t - \omega N \Phi \sin \omega t \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอม $N \frac{d\Phi}{dt} \cos \omega t$ เรียกว่า transformer voltage

เทอม $\omega N \Phi \sin \omega t$ เรียกว่า speed voltage

ในกรณีนี้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กในช่องอากาศต่อขั้วมีค่าคงที่ จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อเฟส

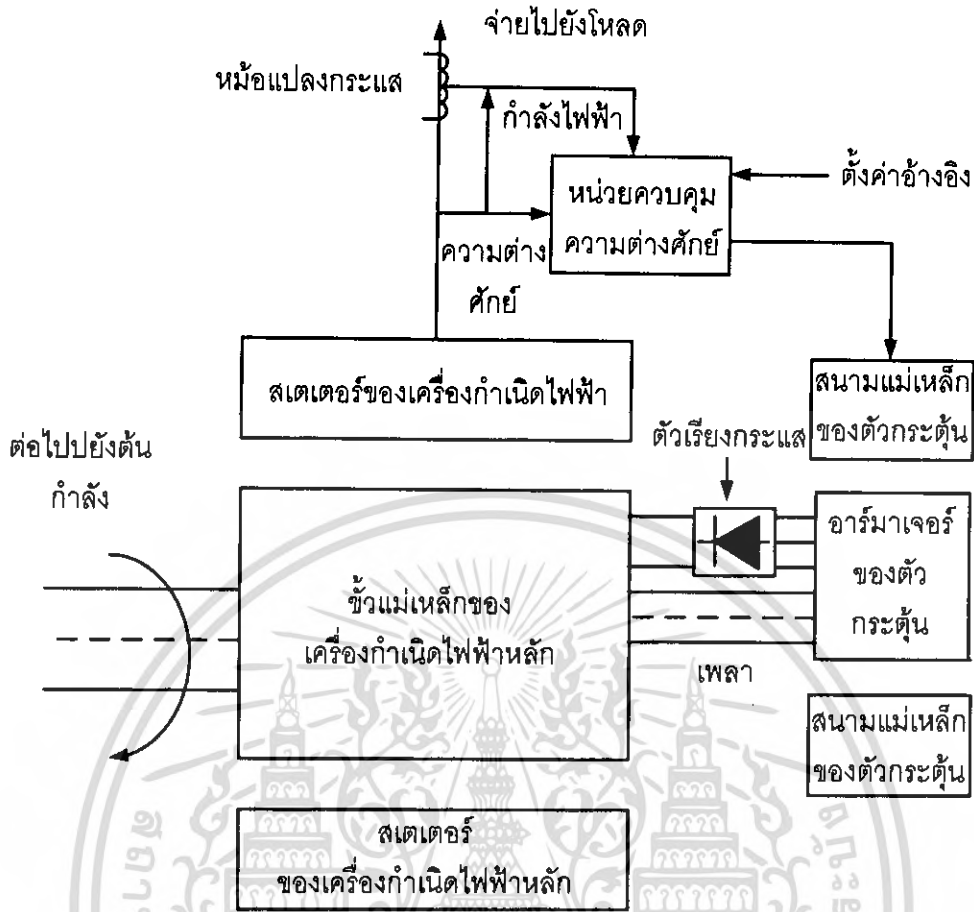
$$e = \omega N \Phi \sin \omega t \quad (2.10)$$

$$E_{rms} = 4.44 f K_w N_{ph} \Phi \quad V \quad (2.11)$$

เมื่อ K_w เป็นค่าคงที่การพันขดลวดมีค่า ≤ 1.0 และ N_{ph} เป็นจำนวนรอบขดลวดอาเมเจอร์ต่อเฟส

2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไม่มีแปรงถ่าน

ในปัจจุบันเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะสร้างเป็นลักษณะที่ไม่มีแปรงถ่านเพื่อลดส่วนที่ต้องดูแลรักษาได้ง่ายแก่ แปรงถ่านและสลีปริง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักเป็นแบบขั้วแม่เหล็กสนามเป็นตัวหมุน อาร์มาเจอร์เป็นตัวที่อยู่กับที่มีตัวกระตุ้น เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบอาร์มาเจอร์เป็นตัวหมุนจ่ายกระแสผ่านวงจรวัดเรียงกระแส เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักโดยชุดตัวเรียงกระแสจะติดกับเพลา เครื่องจักรไฟฟ้าลักษณะนี้ไม่มีแปรงถ่านเนื่องจากการจ่ายโหลดต่อออกจากตัวสเตอไรต์ได้โดยตรง การควบคุมค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักจะควบคุมที่ขดลวดสนามของตัวกระตุ้น



รูปที่ 2.16 ภาพตัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบไม่มีแปรงถ่าน

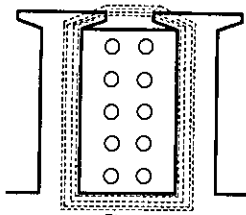
2.8 การเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว

ถ้าโหลดที่ขั้วของเครื่องกำเนิดเปลี่ยนแปลง จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดเปลี่ยนแปลงไปด้วยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าขึ้นมีสาเหตุเนื่องมาจาก

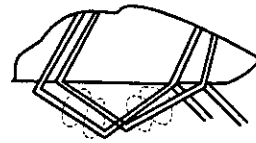
2.8.1 ความต้านทานของขดลวดอาเมเจอร์ (R_a) ความต้านทานของอาร์มาเจอร์ต่อเฟส R_a เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเจอร์ $I_a R_a$ ซึ่งจะเกิดอินเฟสกัน กับกระแสอาร์มาเจอร์ I_a ในทางปฏิบัติถือว่าแรงดันตกเนื่องจากความต้านทานของอาเมเจอร์มีค่าน้อยมากจึงอาจละทิ้งได้

$$R_a = (1.2 - 1.6) R_{dc} \text{ แต่โดยมากใช้ } R_a = 1.5 R_{dc} \tag{2.12}$$

2.8.2 อาร์มาเจอร์ลี้คเกจรีแอคแตนซ์ (X_L) เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดอาเมเจอร์จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ตัวในอาร์มาเจอร์ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของกระแสเส้นแรงแม่เหล็กเหล่านี้ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์เส้นแรงแม่เหล็กนี้เรียกว่า ลี้คเกจฟลักซ์ลักษณะของลี้คเกจฟลักซ์ที่เกิดขึ้นรอบตัวนำในร่องและปลายขดลวดแสดงในรูปที่ 2.17

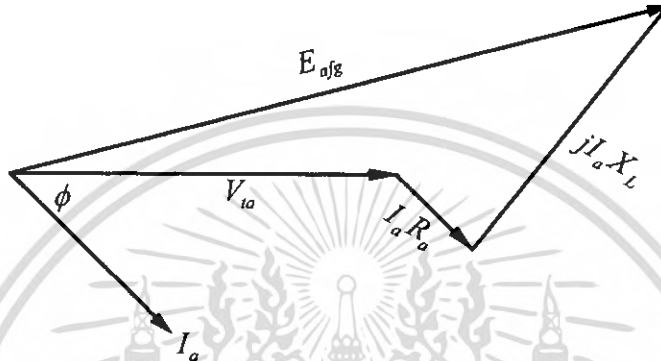


(ก) ลีตเกจฟลักซ์ของร่องกิ่งปิด



(ข) ลีตเกจฟลักซ์ที่เกิดขึ้นที่ปลายคอล์ย

รูปที่ 2.17 ลักษณะของลีตเกจฟลักซ์รอบตัวนำในร่องและปลายคอล์ย



รูปที่ 2.18 เวกเตอร์ไดอะแกรมแสดงค่า $I_a X_L$ นำหน้า I_a เป็นมุม 90° ไฟฟ้า

ค่าลีตเกจฟลักซ์จะขึ้นอยู่กับกระแสอาร์มาเจอร์ I_a และขึ้นอยู่กับมุมเฟสระหว่างกระแสกับแรงดัน เมื่อแรงดันลีตเกจมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่จะตัดกับขดลวดทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมาเรียกว่า Self inductance หรือ Reactance e.m.f แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมลีตเกจรีแอคแตนซ์จะนำหน้ากระแสอาร์มาเจอร์ 90° ไฟฟ้า

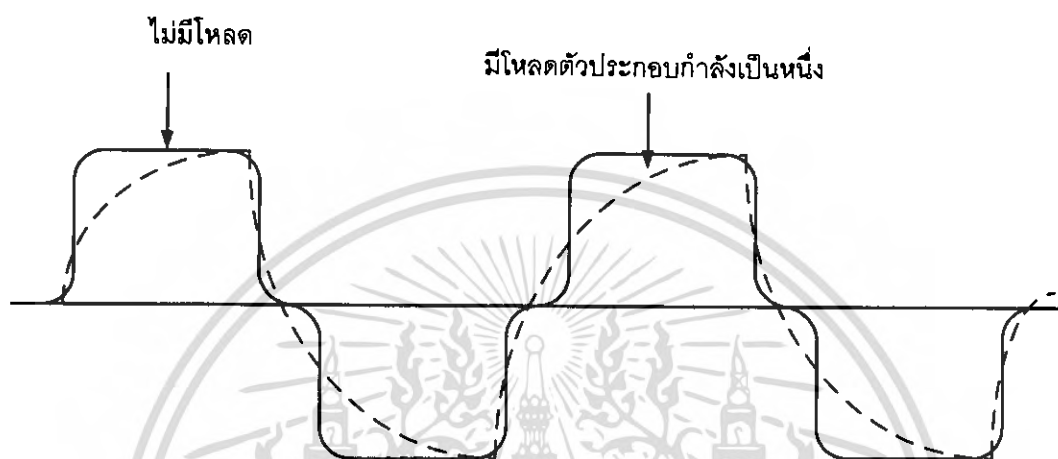
$$E_{afg} = V_{ta} + I_a R_a + jI_a X_L$$

$$E_{afg} = V_{ta} + (I_a R_a + jI_a X_L)$$

$$E_{afg} = V_{ta} + I_a \sqrt{R_a^2 + X_L^2} \tag{2.13}$$

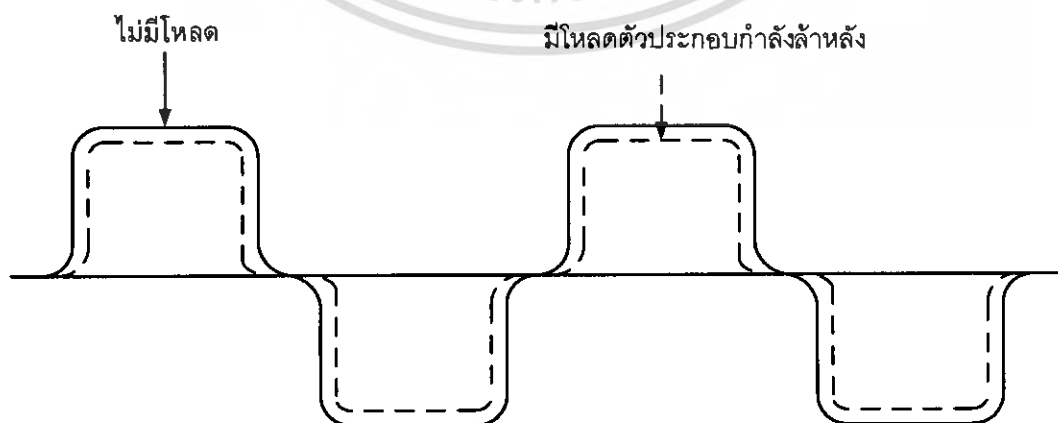
2.8.3 สาเหตุเนื่องจากอามาเจอร์รีแอคชั่น เกิดจากกระแสที่ไหลในอาร์มาเจอร์ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังจ่ายโหลดเป็นผลให้มี ปฏิกริยาระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กของอาร์มาเจอร์กับเส้นแรงแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กเช่นเดียวกับอาร์มาเจอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับนั้นอามาเจอร์รีแอคชั่นอยู่กับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของโหลดด้วย 3 ชนิด

(ก) โหลดที่ค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง คือกระแสและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นพร้อมกันหรืออินเฟส ซึ่งตำแหน่งนี้มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงสุด อันเนื่องจากขดลวดของอาร์มาเจอร์ติดกับเส้นแรงแม่เหล็กตรงกึ่งกลางขั้วพอดี้ ซึ่งรูปคลื่นเส้นแรงแม่เหล็กเป็นแบบราบในรูปจะเป็นเส้นทึบในขณะที่ไม่ได้จ่ายโหลด และเมื่อจ่ายโหลดจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในอาร์มาเจอร์จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นมาต้านกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ขั้ว ดังนั้นจะทำให้มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กลดลงเป็นเส้นประ



รูปที่ 2.19 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กขณะจ่ายโหลดตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง

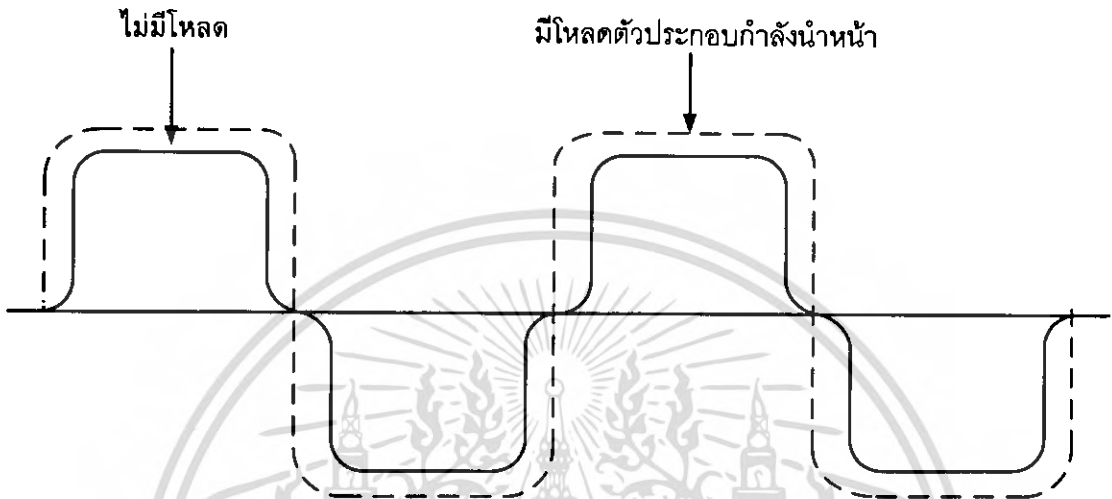
(ข) โหลดที่มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าล้าหลัง คือกระแสที่โหลดจะมีมุมเฟสล้าหลังแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วของเครื่องกำเนิดเมื่ออาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนไปเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดอาร์มาเจอร์ จะมีทิศทางสวนกับเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก จะเป็นผลให้เส้นแรงแม่เหล็กรวมของขั้วแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นลดลง เป็นสาเหตุให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสลดลงไป



รูปที่ 2.20 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กขณะจ่ายโหลดตัวประกอบกำลังล้าหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) โหลดตัวประกอบกำลังไฟฟ้านำหน้า นั่นคือมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลดนำหน้า แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่อาร์มาเจอร์ เสริมกันกับเส้นแรงแม่เหล็กของ ขั้วแม่เหล็ก เป็นผลให้เส้นแรงแม่เหล็กภายในขั้วแม่เหล็กนั้นมีความหนาแน่นของเส้นแรง แม่เหล็กเพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมี ค่าสูงกว่าขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 2.21 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กขณะจ่ายโหลดตัวประกอบกำลังนำหน้า

2.9 ซิงโครนัสรีแอคแตนซ์

ถ้าให้กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก I_f มีค่าคงที่แล้วแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดลงจากค่า no-load คือจากค่า E_{afg} เป็น V_{ta} เมื่อโหลด มีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ล้าหลังที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า ลดลงเนื่องจากความต้านทานของอาร์มาเจอร์ ($I_a R_a$) ลดลงเนื่องจากอาร์มาเจอร์รีแอคแตนซ์ ($I_a X_s$) ลดลงเนื่องจากอาร์มาเจอร์รีแอคแตนซ์ ($I_a X_a$)

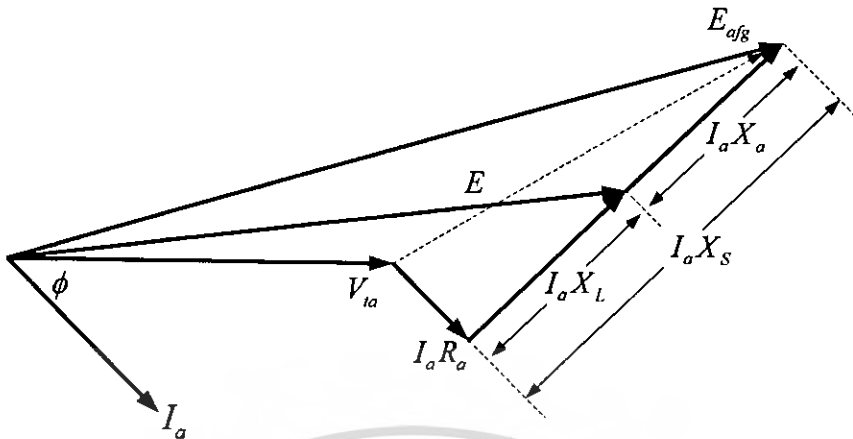
การลดลงของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากอาร์มาเจอร์รีแอคแตนซ์อาจจะสมมติว่ามีค่ารีแอคแตนซ์สมมุติ (X_a) (Fictitious reactance) เกิดขึ้นในขดลวดอาร์มาเจอร์ค่า (X_a) นี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม ($I_a X_a$) แทนแรงดันไฟฟ้าตกเนื่องจากอาร์มาเจอร์รีแอคแตนซ์ค่าของอาร์มาเจอร์รีแอคแตนซ์ ($I_a X_s$) และอาร์มาเจอร์รีแอคแตนซ์ (X_a) สามารถนำมารวมเข้าด้วยกันเป็นค่า ซิงโครนัสรีแอคแตนซ์

$$X_s = X_L + X_a \quad (2.14)$$

X_a เป็นค่ารีแอคแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามเพาเวอร์แฟคเตอร์ของโหลด เพราะว่าอาร์มาเจอร์รีแอคแตนซ์ขึ้นอยู่กับเพาเวอร์แฟคเตอร์ของโหลด แรงดันไฟฟ้าตกทั้งหมดในเครื่องกำเนิดขณะไม่มีโหลดคือ

$$I_a R_a + j X_L = I_a (R_a + j X_s) = I_a Z_s \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

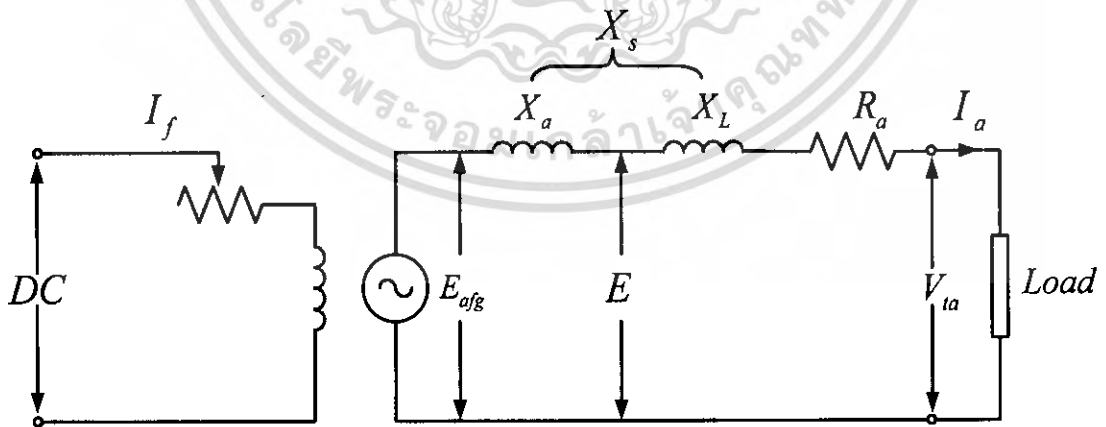


รูปที่ 2.22 เวกเตอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด I_a มีค่าเฟลาเวอร์แพลคเตอร์ล่าหลัง

เมื่อ Z_s เป็นค่าซิมโครนัสอิมพีแดนซ์ ของอาร์มาเจอร์การนำค่าว่า ซิมโครนัส มาใช้ก็เพื่อแสดงสภาวะเมื่อเครื่องจักรไฟฟ้ากำลังทำงานอยู่ที่ความเร็วซิมโครนัส

$$Z_s = R_a + jX_s \text{ หรือ } \sqrt{R_a^2 + X_s^2} \tag{2.16}$$

จากรูปแสดงเฟสเซอร์ผลต่างระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อไม่มีโหลด E_{afg} และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว V_{ta} ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $I_a Z_s$



รูปที่ 2.23 วงจรสมมูลย์เครื่องกำเนิดเมื่อจ่ายกระแส I_a ให้โหลดที่ค่าเฟลาเวอร์แพลคเตอร์ใดๆ

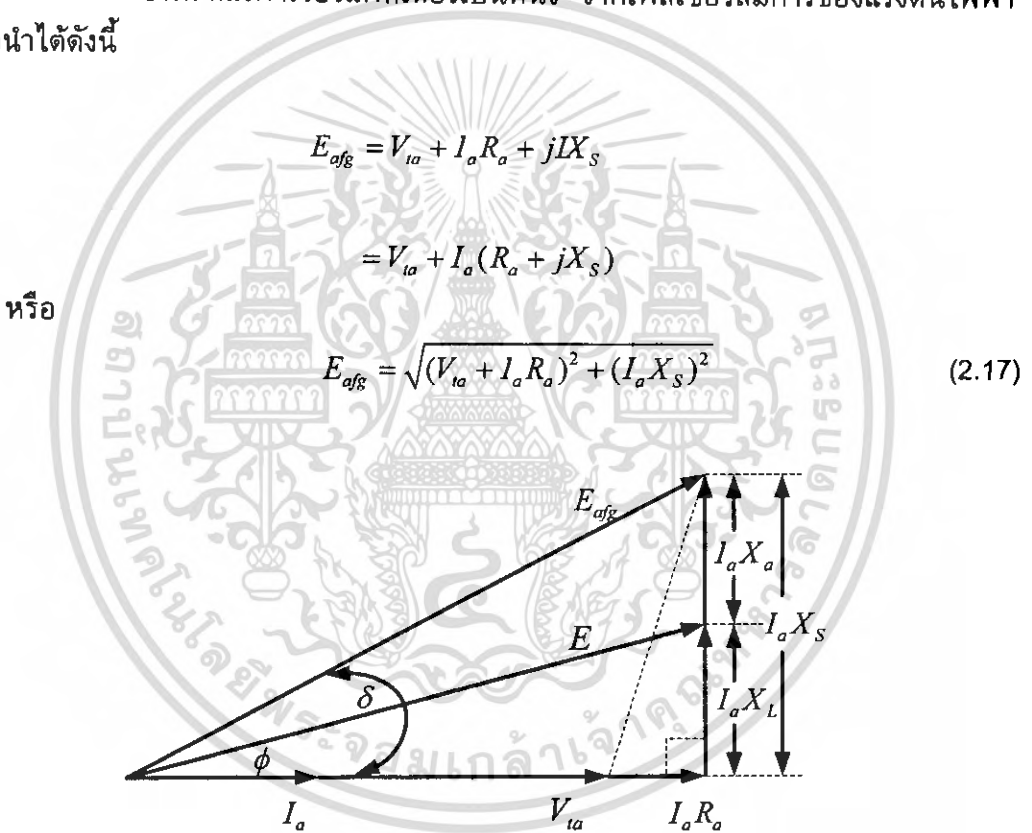
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ที่ตัวประกอบกำลังต่าง ๆ

ในเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง สามารถหาค่าของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้โดยการบวกแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ของเครื่องกำเนิดเข้ากับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานของอาร์มาเจอร์

แต่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับนั้นไม่ได้มีค่าความต้านทานของอาร์มาเจอร์ แต่เพียงอย่างเดียวแต่ยังมีค่ารีแอคแตนซ์ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำตัวอาร์มาเจอร์รีแอคชั่นอีกด้วย ดังนั้นเมื่อรวมแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องบวกแรงดันไฟฟ้าตกที่อิมพีแดนซ์เข้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมัน การบวกนั้นจะต้องบวกกันทางเวกเตอร์ซึ่งจะต้องคำนึงถึงเฟาเวอร์แฟคเตอร์ไหลด้วย

2.10.1 เมื่อไหลตมีเฟาเวอร์แฟคเตอร์เป็นหนึ่ง จากเฟสเซอร์สมการของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังนี้



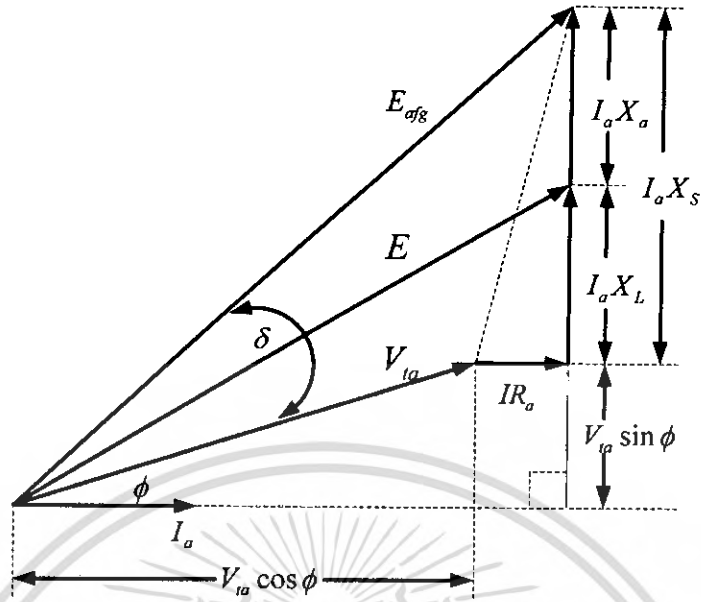
รูปที่ 2.24 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อแรงดันที่ขั้วอินเฟสกันกระแส

2.10.2 เมื่อไหลตมีเฟาเวอร์แฟคเตอร์ล่าหลัง จากเฟสเซอร์สมการของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$E_{afg} = (V_{ia} \cos \phi + I_a R_a) + j(V_{ia} \sin \phi + I_a X_S)$$

$$E_{afg} = \sqrt{(V_{ia} \cos \phi + I_a R_a)^2 + (V_{ia} \sin \phi + I_a X_S)^2} \tag{2.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

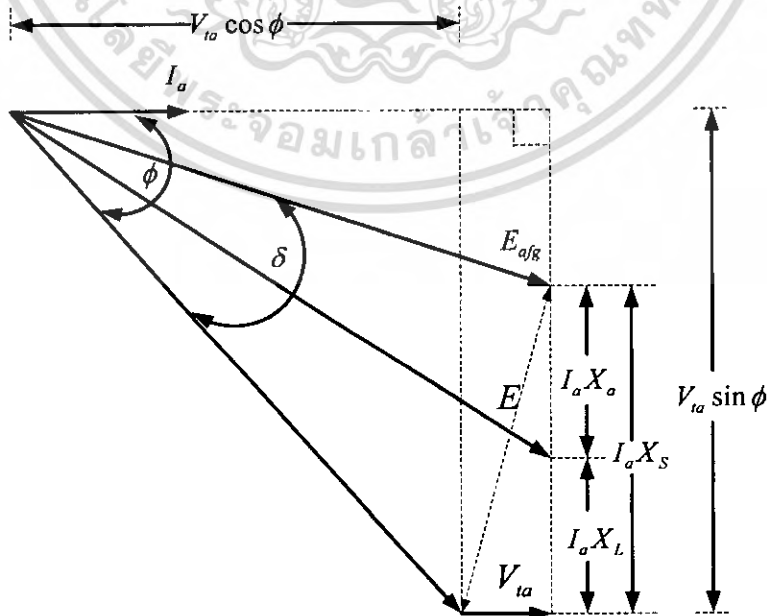


รูปที่ 2.25 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อกระแสล้าหลังแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

2.10.3 เมื่อโหลดมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์นำหน้า จากเฟสเซอร์สมการของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$E_{afg} = (V_{ta} \cos \phi + I_a R_a) + j(V_{ta} \sin \phi - I_a X_s)$$

$$E_{afg} = \sqrt{(V_{ta} \cos \phi + I_a R_a)^2 + (V_{ta} \sin \phi - I_a X_s)^2} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.26 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อกระแสนำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 โวลต์เตจเรกกูเรชั่น

เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ได้ขึ้นอยู่กับกระแสของโหลดแต่เพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของโหลดอีกด้วย ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดโดยปกติจะคำนวณหาค่าโวลต์เตจเรกกูเรชั่นเมื่อเครื่องกำเนิดจ่ายโหลดเต็มพิกัด แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถคำนวณหาค่าโวลต์เตจเรกกูเรชั่นที่โหลดขนาดเท่าใดก็ได้ซึ่งโวลต์เตจเรกกูเรชั่นนี้หมายถึงผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อไม่มีโหลดกับเมื่อมีโหลดเต็มพิกัด ต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อมีโหลดเต็มพิกัด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

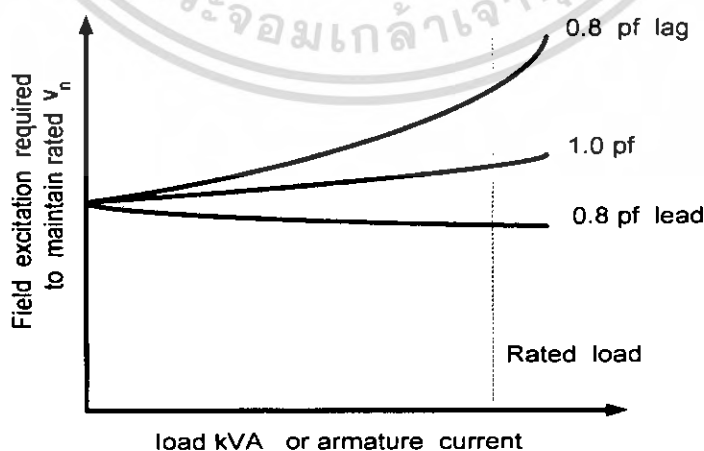
$$\text{โวลต์เตจเรกกูเรชั่น} = \frac{E_{afg} - V_{ia}}{V_{ia}} \quad (2.20)$$

$$\text{หรือ \% โวลต์เตจเรกกูเรชั่น} = \frac{E_{afg} - V_{ia}}{V_{ia}} \times 100 \quad (2.21)$$

เมื่อ E_{afg} = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อไม่มีโหลด)

V_{ia} = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อมีโหลดเต็มพิกัด

- ข้อสังเกต 1. $E_{afg} - V_{ia}$ เป็นผลต่างทางเลขคณิต ไม่ใช่ผลต่างทางเวกเตอร์
2. ในกรณีที่โหลดมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์นำหน้าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อมีโหลดเต็มพิกัด (V_{ia}) จะสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อไม่มีโหลด (E_{afg}) ดังนั้นค่าของ % โวลต์เตจเรกกูเรชั่น จะมีค่าเป็นลบ



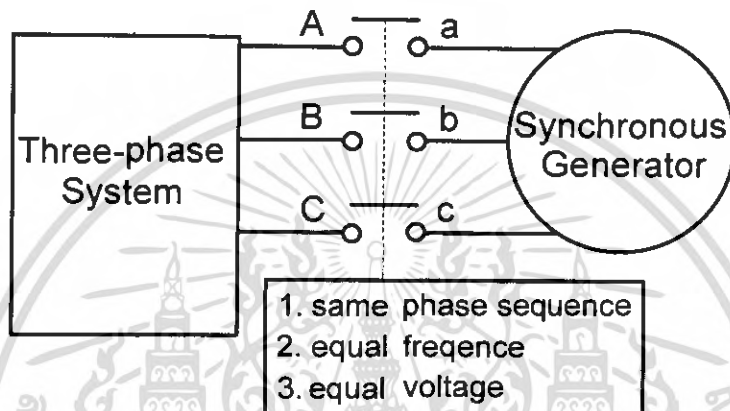
รูปที่ 2.27 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงที่ค่าตัวประกอบกำลังต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.28 จะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- 2.12.1 ลำดับเฟสของระบบไฟฟ้าต้องเหมือนกัน (same phase sequence)
- 2.12.2 ความถี่ของระบบไฟฟ้าต้องเท่ากัน (equal frequency)
- 2.12.3 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต้องเท่ากัน (equal voltage)

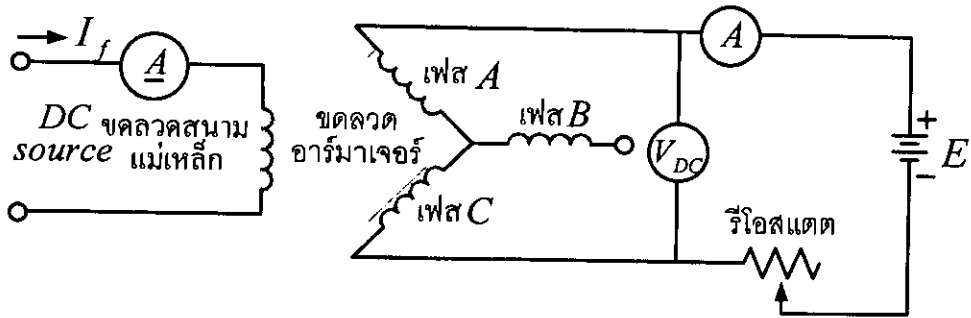


รูปที่ 2.28 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าสามเฟส

2.13 การหาค่าซิงโครนัสรีแอคแตนซ์

ในทางปฏิบัติการหาค่าแรงกูเรชั่นของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายโหลด จะหาจากวงจรสมมูลนั้นได้จากค่าของ R_a และ X_s วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าดังกล่าวนี้โดยวิธีทดสอบดังนี้คือ วิธีทดสอบหาค่าความต้านทานอาเมเจอร์ วิธีทดสอบแบบเปิดวงจร วิธีทดสอบแบบลัดวงจร

2.13.1 วิธีทดสอบหาค่าความต้านทานอาเมเจอร์ การหาค่าความต้านทานอาเมเจอร์ R_a ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส จะใช้วิธีทดสอบโดยการทดสอบขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ทำงานและไม่มีการกระตุ้นที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก โดยการต่อแหล่งจ่ายไฟตรงเข้าไปที่ขั้วคู่หนึ่งคู่ใดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และวัดหาค่า I_{DC} และ V_{DC} ของขดลวด เพื่อนำมาหาค่า R_{DC} ใช้ทดสอบได้ทั้งขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อแบบสตาร์ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 วงจรการทดสอบหาค่าความต้านทานอาเมเจอร์

ในทางปฏิบัติการทดสอบดังรูปที่ 2.29 นี้ต้องใช้รีโอสแตตที่ทนกระแสได้สูงๆ ต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์มาเจอร์เพราะว่า R_a มีค่าต่ำมากจากรูปที่ 2.29 ค่า R_{DC} ที่หาได้คือ

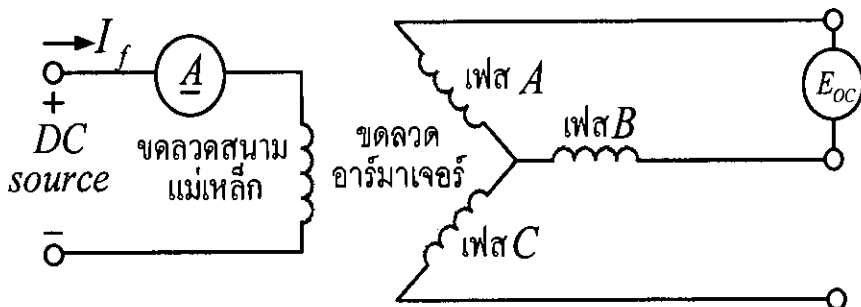
$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \tag{2.22}$$

ซึ่งค่า V_{DC} นี้มีค่าเป็น 2 เท่า ของค่า R_a เพราะค่า V_{DC} เท่ากับค่า R_a รวมกันเฟส ดังนั้น R_a หาได้จากสมการ

$$R_a = \frac{R_{DC}}{2} \tag{2.23}$$

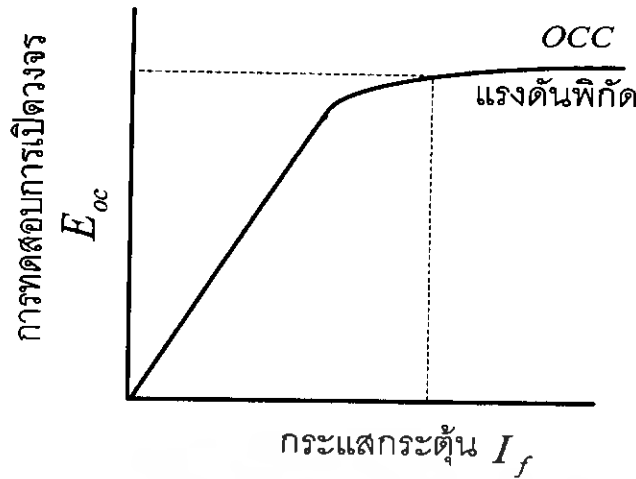
เนื่องจากค่า R_a ของอาร์มาเจอร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับจะเป็นค่าใช้งาน ดังนั้นค่า R_a ที่ได้จะต้องคูณกับแฟกเตอร์คือ $R_{a(eff)}$ ที่เป็นค่าคงที่ตั้งแต่ 1.25 ถึง 1.75 ซึ่งเกิดมาจากโครงสร้างของการพันขดลวด รูปร่างลักษณะของสลิต ฯลฯ จึงจะได้ $R_{a(eff)}$

2.13.2 วิธีทดสอบแบบเปิดวงจร ขั้นตอนการทดสอบแบบปิดวงจร เริ่มต้นจากจ่ายพลังงานให้เครื่องจักรไฟฟ้าหมุนด้วยความเชิงโคโรนัส (n_s) โดยให้ขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่ในสภาพวงจรเปิด ดังรูปที่ 2.30 จากนั้นทำการปรับค่า I_f ให้มีค่าเพิ่มขึ้น บันทึกค่า I_f และ E_{OC}



รูปที่ 2.30 วงจรทดสอบแบบเปิดวงจร

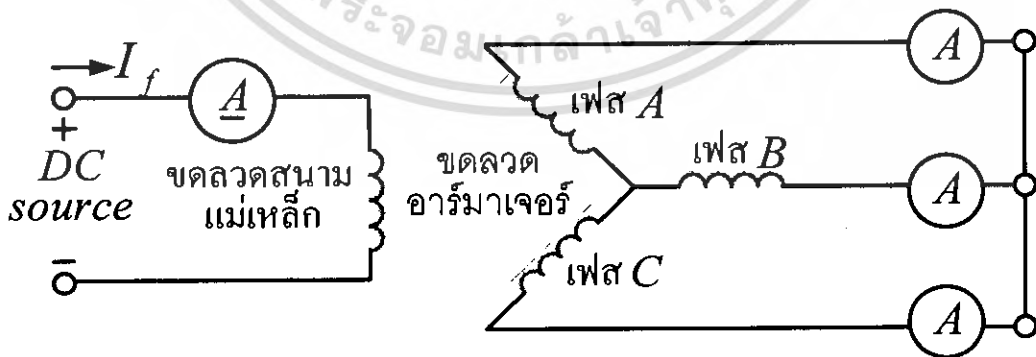
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 กราฟแสดงคุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าขณะทดสอบแบบเปิดวงจร

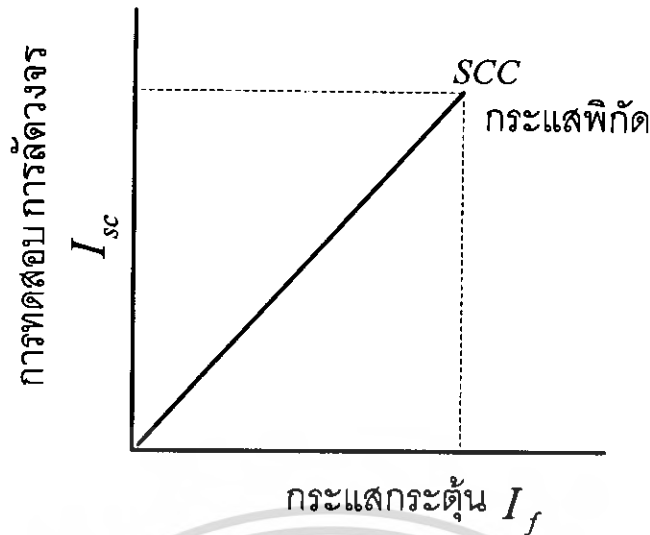
อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้า E_{AB} ที่ได้จากการทดลองแบบเปิดวงจรเป็นแรงดันระหว่างสาย ในการนำไปคำนวณจะต้องเปลี่ยนแรงดันระหว่างเฟส เนื่องจากอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ทดสอบในการต่อแบบสตาร์ ดังนั้น $E_{OC} = E_{AB} / \sqrt{3}$ เส้นกราฟที่จากการทดสอบแบบปิดวงจรคือเส้นกราฟระหว่าง $E_{AB} / \sqrt{3}$ และ I_f ดังรูปที่ 2.31

2.13.3 วิธีทดสอบแบบลัดวงจร ขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่ในสภาพลัดวงจรโดยใช้แอมมิเตอร์ดังรูปที่ 2.32 จากนั้นทำการจ่ายพลังงานกลให้เครื่องจักรไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (ms) ทำการปรับค่า I_f เพิ่มขึ้น ให้บันทึกค่า I_f และกระแสลัดวงจร I_{SC} ที่เกิดขึ้นจนได้กระแสลัดวงจรประมาณ 1.5–2 เท่าของกระแสพิกัด จะได้กราฟคุณลักษณะของเครื่องจักรขณะลัดวงจรดังรูปที่ 2.33 ในกรณีนี้กระแสลัดวงจรจะมีเฟสตามหลังแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำประมาณ 90° เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าความต้านทานเสมือนซิงโครนัสมากๆ



รูปที่ 2.32 วงจรการทดสอบแบบลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 กราฟแสดงคุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าขณะทดสอบแบบลัดวงจร

2.14 มอเตอร์ซิงโครนัส

โครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสนั้นก็เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแต่ก็อาจมีรูปร่างบางอย่างที่ผิดกันไปบ้างทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานว่าต้องการให้เป็นมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขั้วแม่เหล็กที่ใช้ของมอเตอร์นั้นเป็นแบบ ขั้วแม่เหล็กแบบเซเลเนียนท์ส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจจะเป็นแบบขั้วแม่เหล็กเซเลเนียนท์หรือขั้วทรงกระบอกก็ได้สำหรับสเตเตอร์นั้นเหมือนกัน รวมทั้งการพันสนามแม่เหล็กด้วยมอเตอร์นั้นต้องการขดลวดตัวหน่วงพันไว้ที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กเพื่อป้องกันการครางและยังช่วยในการเริ่มทำให้มอเตอร์หมุนถึงความเร็วที่ต้องการโดยวิธีการเริ่มหมุน การเหนี่ยวนำทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ต่างก็มีขดลวดสนามแม่เหล็กที่ได้รับกระแสตรงจากวงจรภายนอก

นอกจากนั้นคุณสมบัติของมอเตอร์ซิงโครนัสมีความเร็วคงที่ไม่ว่าจะมีโหลดหรือไม่มีโหลดก็ตาม ความเร็วที่วิ่งไปพร้อมกับความเร็วสนามแม่เหล็กและยังสามารถใช้ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังหรือค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ได้เช่นเดียวกับการใช้เพาเวอร์คาปาซิเตอร์

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2.24)$$

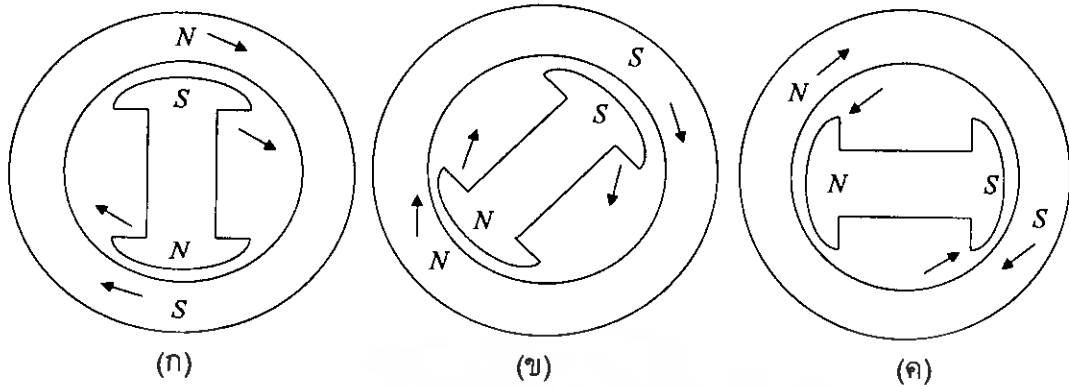
n_s = ความเร็วที่วิ่งไปพร้อมกับความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน (*rpm*)

f = ความเร็วถี่ของไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (H_z)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 การเริ่มเดินเครื่องจักรซิงโครนัส



รูปที่ 2.34 แสดงสภาพการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าโรเตอร์และจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเข้าขดลวดพร้อมกันอาเมเจอร์

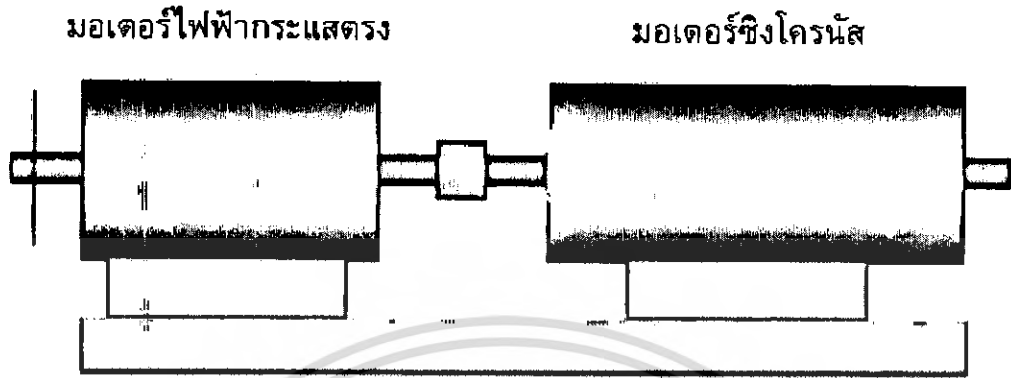
เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่โรเตอร์ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กดังรูปที่ 2.34 ขั้วแม่เหล็กของตัวโรเตอร์ก็จะติดกับขั้วแม่เหล็กของอาร์มาเจอร์ มีแรงกระทำบนตัวโรเตอร์ที่จะทำให้โรเตอร์หมุนตามการหมุนของสนามแม่เหล็ก แต่โรเตอร์ก็ไม่สามารถหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส n_s ในทันทีได้ แม้จะมีไหลตต่ออยู่หรือไม่ก็ตามดังนั้นตัวโรเตอร์จะเคลื่อนที่เล็กน้อย ขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์ก็จะหลุดจากการดึงดูดของขั้วแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ ในเวลาต่อมาที่ขั้วเหมือนกันก็จะไล่ทันกันดังรูปที่ 2.34 (ข) ขั้วแม่เหล็กเหมือนกันจะพยายามผลักโรเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามเข็ม แต่โรเตอร์ก็ยังสามารถหมุนตามสนามแม่เหล็กหมุนได้ทันดังนั้นขั้วแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนก็จะนำหน้าขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ตามรูปที่ 2.34 (ค) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงผลักให้โรเตอร์พยายามเคลื่อนที่ในทางตรงข้าม ตัวโรเตอร์จึงไม่สามารถหมุนไปได้ จึงจำเป็นต้องมีวิธีการที่จะเริ่มเดินในเครื่องจักรซิงโครนัส

2.16 วิธีการเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ซิงโครนัส

การในการสตาร์ทให้มอเตอร์ซิงโครนัสเริ่มหมุนก่อนข้างมีวิธีการซับซ้อนแตกต่างกันไป มอเตอร์แบบอื่นเล็กน้อย ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่ามันไม่มีกำลังในตัวมันเองในการทำให้ตัวมันเองเริ่มหมุนได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการที่จะให้มันเริ่มหมุน วิธีการที่จะทำให้มันเริ่มหมุนนั้นก็แบ่งออกได้เป็น 2 วิธี

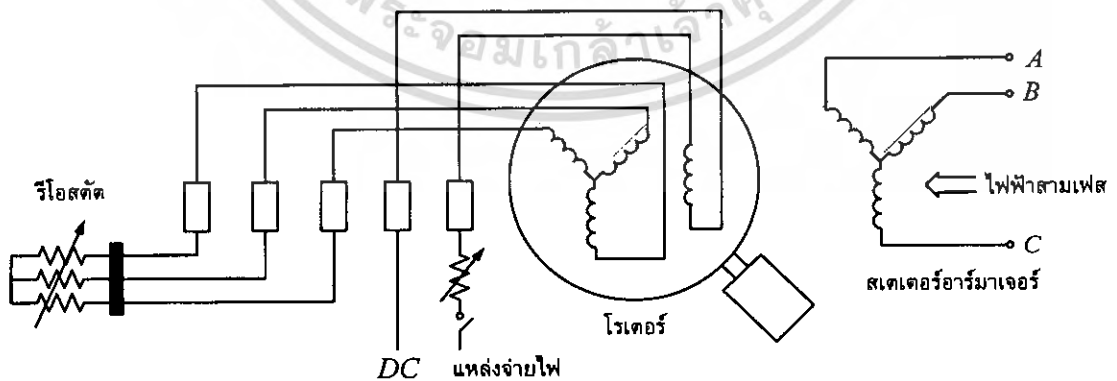
2.16.1 ใช้ตัวต้นกำลังจากภายนอก วิธีคือการใช้ตัวต้นกำลังภายนอกมาขับให้มอเตอร์ซิงโครนัสหมุนโดยอาจจะใช้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง อินดักชันมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ที่ต่อกันโดยตรงกับเพลลาของมอเตอร์เป็นตัวขับก็ได้ วิธีนี้ทำได้โดยที่เราใส่ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่ขั้วแม่เหล็กที่อยู่บนตัวหมุนจนกระทั่งได้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนออกมาเท่ากับพิกัด ตามที่กำหนดไว้บนแผ่นป้ายชื่อของเครื่องนั้นๆ จากนั้นก็ต้องตรวจสอบลำดับเฟสให้ถูกต้องเสียก่อนโดยใช้

synchronizing lamp แล้วจึงค่อยสับไฟจากวงจรภายนอกเข้าไปก็จะกลายเป็นมอเตอร์ซิงโครนัสทันทีจากนั้นก็ตัดต้นกำลังออกไป



รูปที่ 2.35 การใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

2.16.2 ใช้หลักการเหนี่ยวนำให้เริ่มหมุน ใช้หลักการของอินดักชันมอเตอร์ โดยการฝังขดลวดแอมแปร์ไว้หน้าผิวของขั้วแม่เหล็ก เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งจะเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดแอมแปร์ทำให้โรเตอร์หมุนซึ่งความเร็วจะต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อย จากนั้นก็จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขดลวดสนามกระตุ้น ไปสร้างขั้วแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ทำให้ขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์เกาะติดกันจนโรเตอร์หมุนเท่ากับความเร็วซิงโครนัส และยังมีวิธีการเหนี่ยวนำอีกหลายวิธี เช่น ใช้ความต้านทานต่ออนุกรมเข้ากับตัวหมุน ใช้การต่อแบบสตาร์ท-เดลต้าหรือใช้ออโตทรานฟอร์เมอร์เป็นต้น

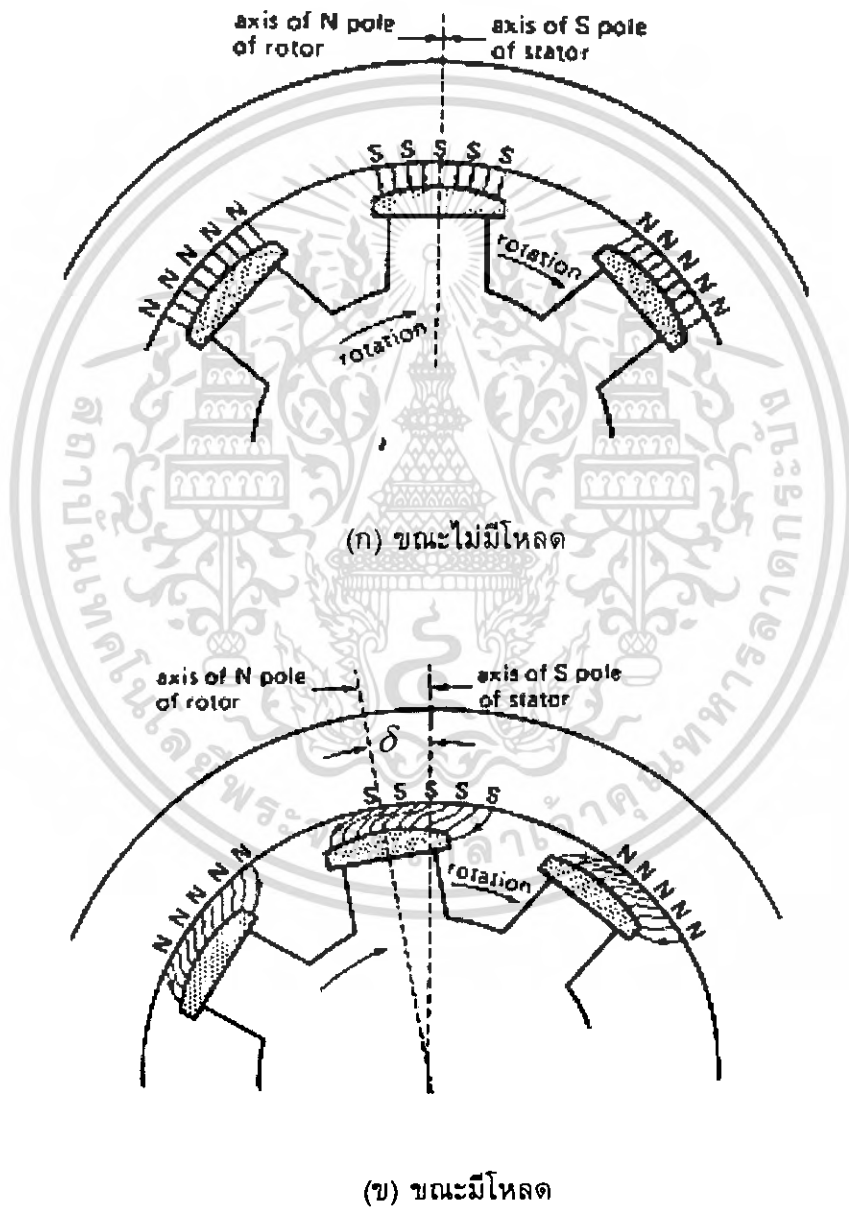


รูปที่ 2.36 วงจรการสตาร์ทมอเตอร์ซิงโครนัสสามเฟสชนิดขดลวดหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17 การป้อนโหลดให้กับมอเตอร์ซิงโครนัส

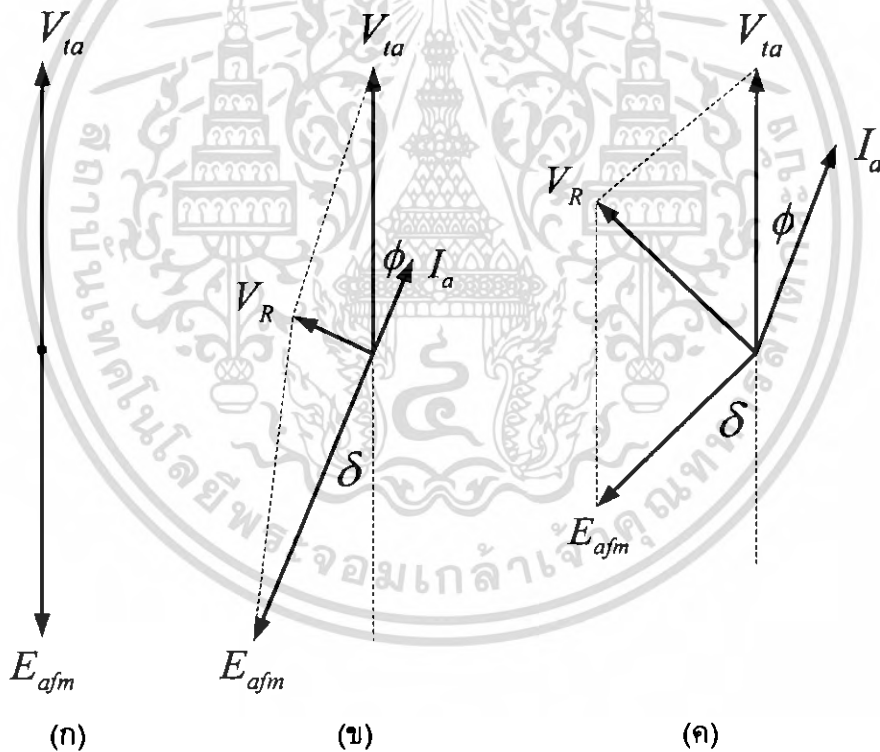
การดึงดูดกันระหว่างขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์กับขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ไม่ได้ดึงดูดติดกันแน่นอย่างถาวร เมื่อโหลดของมอเตอร์เพิ่มขึ้นโรเตอร์จะเลื่อนถอยหลังเป็นมุมๆ หนึ่ง แต่ความเร็วไม่ได้ช้าลง ดังรูปที่ 2.37 และยังคงหมุนต่อไปด้วยความเร็วซิงโครนัส มุมที่โรเตอร์เลื่อนถอยหลังไปมีชื่อเรียกว่า มุมของโหลดหรือมุมแรงบิด ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น ก็ขึ้นอยู่กับมุมๆ นี้เราเรียกว่า δ (เดลต้า)



รูปที่ 2.37 แสดงมุมโหลด (δ) ของมอเตอร์ซิงโครนัสขนาดมีโหลดและไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายหลังจากที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ อันเนื่องมาจากขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟตรงและขั้วแม่เหล็กหมุนจากไฟฟ้ากระแสสลับเกาะกันแล้ว มอเตอร์ก็จะวิ่งด้วยความเร็วคงที่ตลอดไปการจับตัวกันระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนทางกลนั้น $E_{afm} = V_{ta}$ ดังรูปที่ 2.38 ที่ในกรณีไม่มีการสูญเสียต่างๆ นั่นคือไม่มีกระแสไหลเมื่อเป็นเช่นนั้นก็ไม่ต้องการกำลังไฟจากข้างนอกเข้าไปใช้งาน แต่ในขณะที่มอเตอร์ได้รับภาระเพิ่มขึ้น ก็ไม่ทำให้ความเร็วของมันลดหรือเปลี่ยนไป แต่ว่าตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กที่ตัวหมุนกับตัวที่อยู่กับที่จะไม่อยู่ในแกนเดียวกันแล้ว นั่นคือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านกลับกับ E_{afm} ที่เกิดขึ้นก็จะไม่แยกเฟสกับ V_{ta} ไป 180° แต่ว่าจะถอยหลังไปเป็นมุม δ ทั้งนี้เพราะ E_{afm} เกิดขึ้นช้ากว่าเดิมไปอีกเป็นมุม δ ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า V_R ขึ้น ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะทำให้เกิด I_a ขึ้น เมื่อเป็นเช่นนั้นมอเตอร์ก็ต้องการกำลังมากขึ้นเพื่อชดเชยการเพิ่มโหลดทางกล ในกรณีเดียวกันเมื่อลดโหลดทางกลของมอเตอร์ก็ไม่ทำให้ความเร็วรอบของมันเพิ่มขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กวิ่งกลับมาอยู่ในสภาพที่กำลังไฟที่จ่ายเข้าไปให้กับมอเตอร์นั่นเอง



รูปที่ 2.38 เฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสที่วิ่งไปพร้อมกับสนามแม่เหล็กหมุนที่โหลดต่างๆ

ในสภาพที่ยังไม่มีโหลดทางกลก็ไม่ทำให้เกิดกระแสไหลเข้าไปทั้งนี้เพราะแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ E_{afm} ที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์มาเจอร์ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีขนาดเท่าและทิศทางตรงกันข้ามกับ V_{ta} ตามรูปที่ 2.38 (ก) แต่เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก็ทำให้ตัวหมุนถอยหลังกลับไปเล็กน้อยด้วยมุม δ เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่ตัวอยู่กับที่ ฉะนั้นจึงทำให้เกิดแรงลัพท์ V_R ซึ่งทำให้เกิดกระแสเพิ่มเข้าไปที่ตัวหมุนหรือที่ตัวอาร์มาเจอร์ นั่นคือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกมุม δ นี้เรียกว่า มุมของแรงบิดหรือมุมโรเตอร์ ซึ่งจากเฟสเซอร์ถ้ามุมของแรงบิดใหญ่ขึ้นนั้นก็อาจทำให้เกิดการไม่มีเสถียรสภาพ เกิดขึ้นได้ในบางครั้งบางคราวของการใช้งาน โดยปกติมุมระหว่าง V_R และ I_a นั้นเป็นมุมที่ใหญ่มากเกือบ 90° ดังนั้นเพราะว่าความต้านทานรีแอกแตนซ์มากกว่าความต้านทานของขดลวดมากโดยที่ I_a มาที่หลัง V_R เกือบ 90° แต่มุมนี้ไม่ใช่มุมที่ทำให้เกิดการกินกำลังไฟฟ้าเข้าไป มุมที่ทำให้เกิดการกินกำลังไฟฟ้าคือมุมที่ I_a กระทำกับ V_{ia} คือ $V_{ia} I_a \cos \phi$ นั่นเอง ดังนั้นจึงไม่ได้หมายความว่ามุมของตัวประกอบกำลังจำเป็นต้องมีค่าต่ำตามที่ได้จากเครื่องวัดที่เกิดจากมุมระหว่าง V_R กับ I_a ทั้งนี้เพราะว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วนั้นคือ V_{ia} ไม่ใช่ V_R

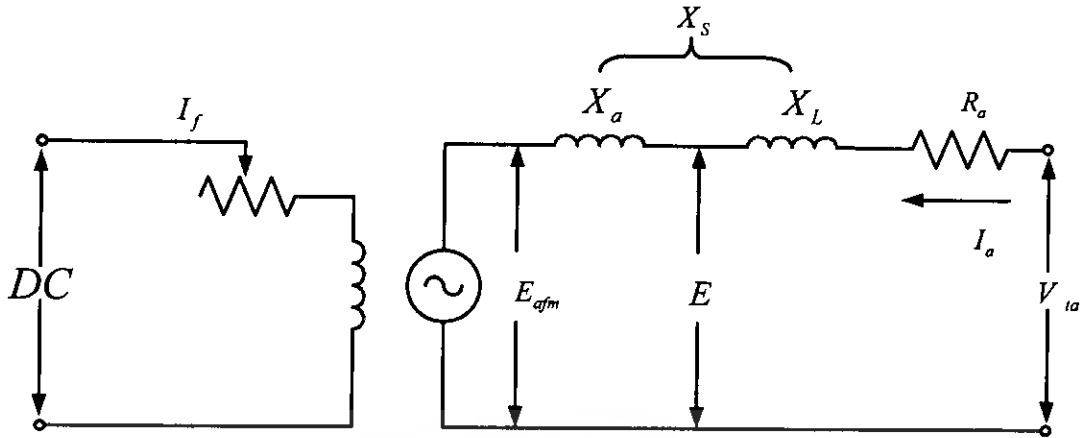
การที่ให้มอเตอร์ได้รับโหลดมากเกินไปหนึ่งจะเป็นสาเหตุให้มอเตอร์หยุดไปเลยการเพิ่มค่าของ V_R ตามรูปที่ 2.38 (ค) ทำให้มอเตอร์กินกระแสไฟฟ้ามากขึ้น และมุม ϕ ซึ่งเป็นมุมกระแสล้าหลังแรงดันไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปก็เพิ่มขึ้นด้วยภาระเพิ่ม และเมื่อถึงที่จุดๆ หนึ่งซึ่งเป็นจุดที่กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการใช้มากที่สุดก็จะทำให้มอเตอร์ช้าและหยุดไปในที่สุดเมื่อภาระได้เพิ่มมากเกินไปจุดนี้ไปคือ $V_{ia} I_a \cos \phi$ จุดที่เกินแรงบิดที่มอเตอร์จะสามารถหมุนได้นี้เรียกว่า จุดที่ถูกดึงหลุดไป โดยปกติมอเตอร์จะสามารถทนโหลดที่มากเกินไปได้บ้าง แต่ว่าการที่มอเตอร์ได้รับโหลดหนักที่ทันใจและเกินจุดที่ถูกดึงหลุดไปนี้จึงทำให้มันหยุดไปกรณีนี้มักจะไม่เกิดขึ้น ทั้งนี้เพราะตัวหมุนมีแรงเฉื่อยซึ่งต่อกับโหลดด้วย ฉะนั้นเมื่อเพิ่มโหลดเข้าและออกทันทีทันใดจึงมีการต้านทานจากแรงเฉื่อยเหล่านี้ให้ช้าลงไปจากการปรับค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปที่อาร์มาเจอร์และการปรับความเข้มสนามแม่เหล็กจึงทำให้จุดหลุดของแรงบิดเปลี่ยนไปด้วย ในทำนองเดียวกันกับการที่แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใส่ให้กับมอเตอร์เกิดมีค่าต่ำกว่าปกติก็ยอมทำให้มอเตอร์หลุดจากการซิงโครไนส์และหยุดไปในที่สุดแม้ว่าในขณะนั้นมอเตอร์จะได้รับโหลดตามปกติก็ตาม

2.18 วงจรสมมูลย์และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครไนส์

วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ซิงโครไนส์ มีลักษณะเช่นเดียวกับวงจรสมมูลย์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทุกอย่าง ต่างกันคือแทนที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาก็กลับกลายเป็นรับไฟฟ้าเข้าไป

สมการที่เป็นมอเตอร์

$$E_{afm} = V_{ia} - I_a R_a - j I_a X_s \quad (2.25)$$

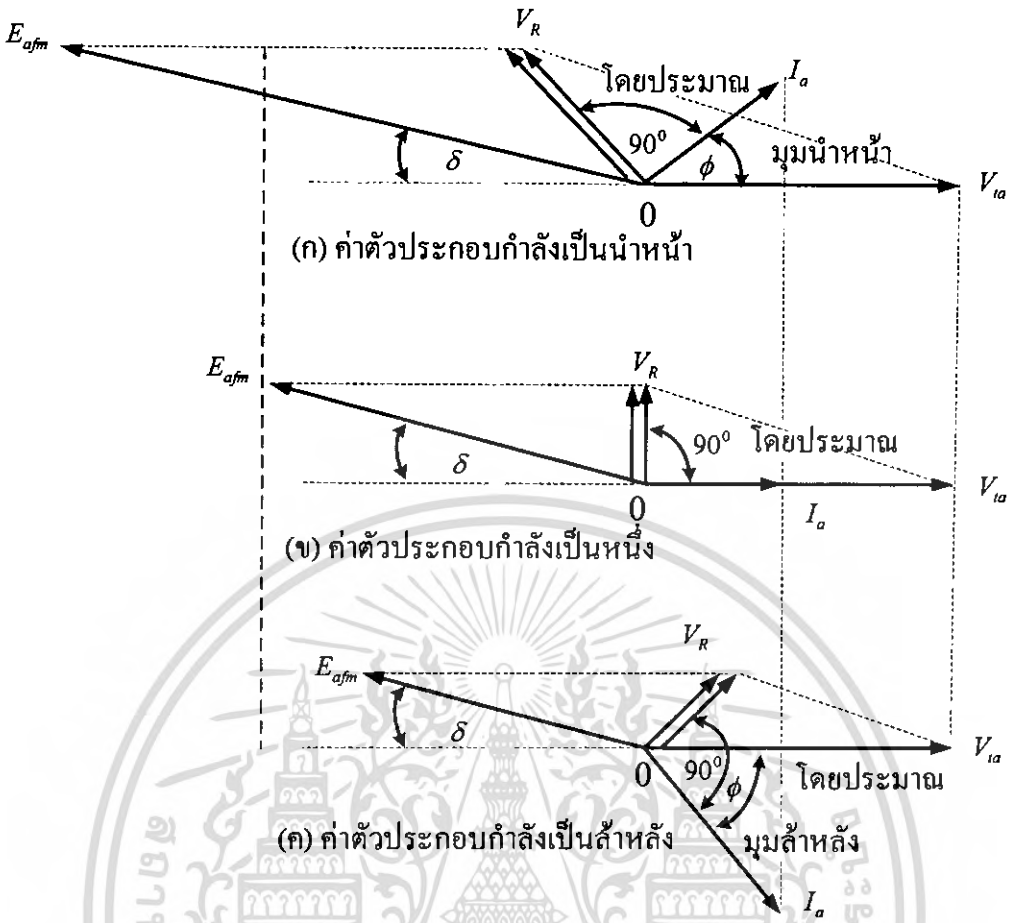


รูปที่ 2.39 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ซิงโครนัส

2.19 การปรับแต่งค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ามอเตอร์ซิงโครนัสมีข้อดีคือมีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส จะปรับความเร็วของมันได้ด้วยการปรับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับที่ป้อนให้กับสเตเตอร์อีก ประการหนึ่ง คือสามารถทำงานได้ทั้งเมื่อมีค่าประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็ก I_f เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ถ้าควบคุมให้มอเตอร์ซิงโครนัสทำงานและขับโหลดที่คงที่ค่าใดค่าหนึ่งและทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ผลคือ กำลังอินพุตของมอเตอร์ซิงโครนัสจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าตัวประกอบกำลังและกระแสอินพุตจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.40 (ก) เป็นการกระตุ้นกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กให้มีกระแสมากกว่ากระแสปกติ การกระตุ้นแบบนี้จะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่านำหน้าเพราะว่าเมื่อกระตุ้นกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กให้มีค่ามากขึ้นกว่าปกติ จะทำให้กระแสอาร์เมเจอร์ I_a นำหน้าแรงดันที่ขั้ว V_{ta} เป็นมุม ϕ แต่กระแส I_a ยังคงล้าหลังแรงดันอยู่ประมาณ 90° เช่นเดิม จากเฟสเซอร์ทั้ง 3 รูปที่ 2.40 จะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสจะเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ของมัน

จากรูปที่ 2.40 (ข) เป็นการกระตุ้นกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กให้ลดลงต่ำกว่าปกติ เป็นผลให้ค่าแรงดัน E_{afm} ลดลงและ V_R เปลี่ยนแปลงไปค่ากระแส I_a เพิ่มขึ้นแต่ยังล้าหลัง V_{ta} เป็นมุม ϕ จะได้ตัวประกอบกำลังจูงโหลดล้าหลัง สังเกตจากเฟสเซอร์ในรูปที่ 2.40 (ข) จะพบว่ากระแส I_a ยังคงล้าหลัง V_R อยู่เป็นมุมประมาณ 90° เช่นเดิม



รูปที่ 2.40 เฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด

พิจารณาจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.40 (ค) เมื่อปรับค่ากระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กจนกระทั่งกระแสอาร์มาเจอร์ I_a อินเฟสกับแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ซิงโครนัส V_{ta} จะเห็นว่ากระแส I_a จะล่าหลัง V_R เป็นมุมประมาณ 90° ในสภาวะนี้ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดจะมีค่าเป็น 1 เพราะมุมเฟสเป็นศูนย์ การกระตุ้นกระแสขดลวดสนามแม่เหล็กแบบนี้เรียกว่าการกระตุ้นปกติ

จากทั้งสามกรณีจะสังเกตเห็นว่ามอเตอร์ยังคงหมุนด้วยความเร็วคงที่ มุมโหลดคงที่และกำลังอินพุตของมอเตอร์ก็คงที่

2.20 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัส

เฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส เขียนขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาค่ามุมโหลด (δ) และค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านกลับ (E_{afm}) ที่มอเตอร์ ซึ่งจะมีรูปแบบของเฟสเซอร์เปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวประกอบกำลังของโหลด ซึ่งมี 3 กรณี คือ เมื่อโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่งและเมื่อโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้าและล่าหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า θ หาได้จาก

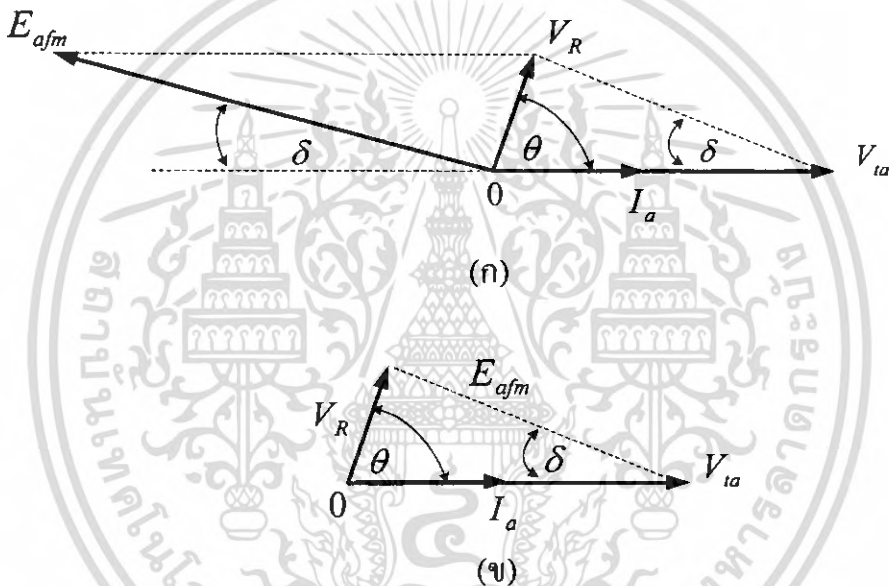
$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a} \quad (2.26)$$

เมื่อ

θ = มุมต่างเฟส

δ = มุมโหลด

2.20.1 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง เมื่อค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสมีค่าเป็นหนึ่ง เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมโดยใช้แกนแรงดัน V_{ia} เป็นแกนอ้างอิง ได้ดังรูปที่ 2.41 (ก) หรือ รูปที่ 2.41 (ข)



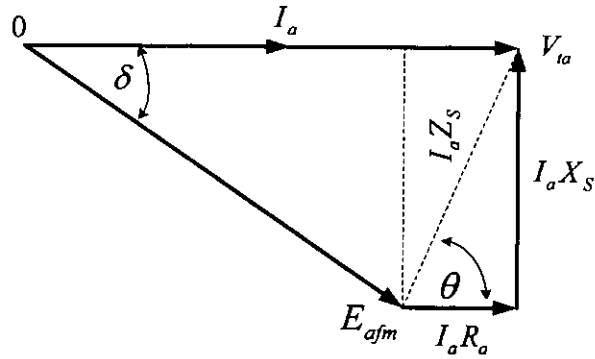
รูปที่ 2.41 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์มีค่าเป็นหนึ่ง เขียนโดยใช้แรงดันเป็นแกนอ้างอิง

จากรูปที่ 2.41 เขียนสมการ E_{afm} และ δ ได้ว่า

$$E_{afm} = \sqrt{V_{ia}^2 + V_R^2 - 2V_{ia}V_R \cos \theta} \quad (2.27)$$

$$\delta = \sin^{-1} \left[\frac{V_R \sin \theta}{E_{afm}} \right] \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



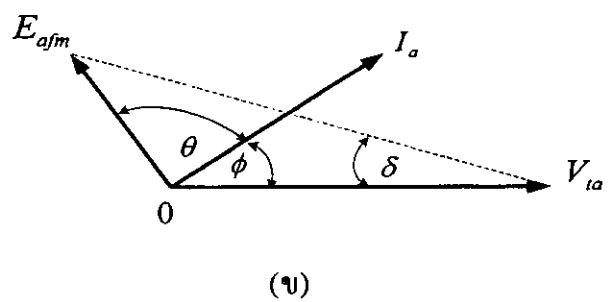
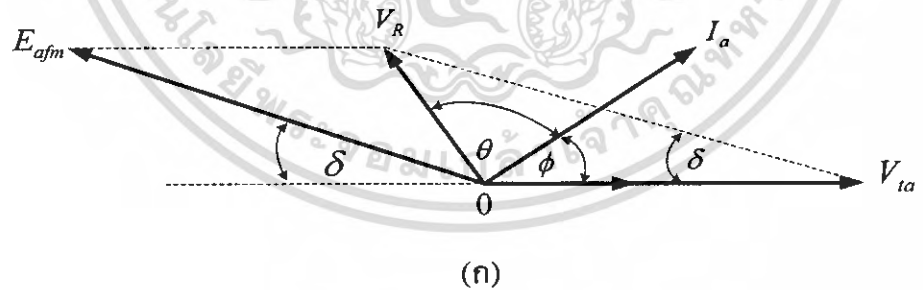
รูปที่ 2.42 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง ในทำนองเดียวกันเมื่อเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง โดยใช้กระแส I_a เป็นตัวอ้างอิงเขียนได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.42

โดยใช้กระแส I_a เป็นตัวอ้างอิงเขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง จากรูปที่ 2.42 เขียนเป็นสมการ E_{afm} และ δ ได้ว่า

$$E_{afm} = (V_{ta} - I_a R_a) + j(I_a X_s) \tag{2.29}$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{I_a X_s}{V_{ta} - I_a R_a} \right] \tag{2.30}$$

2.20.2 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า เมื่อค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัสนำหน้า เขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมโดยใช้แกนแรงดัน V_{ta} เป็นแกนอ้างอิงได้รูปที่ 2.43 (ก) หรือรูปที่ 2.43 (ข)



รูปที่ 2.43 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลัง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของมอเตอร์นำหน้าเขียนโดยใช้แรงดัน I_a เป็นแกนอ้างอิง

จากรูปที่ 2.43 เขียนสมการ E_{afm} และ δ ได้ว่า

$$E_{afm} = \sqrt{V_{ta}^2 + V_R^2 - 2V_{ta}V_R \cos(\theta + \phi)} \quad (2.31)$$

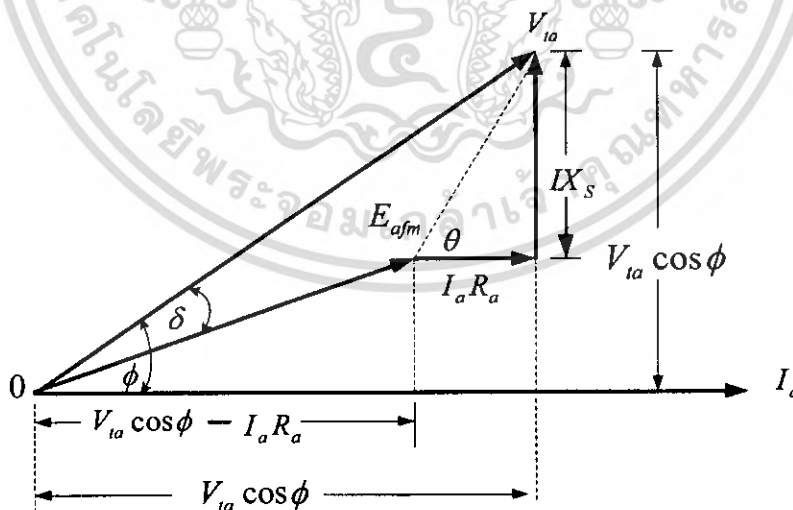
$$\delta = \sin^{-1}\left[\frac{V_R \sin(\theta + \phi)}{E_{afm}}\right] \quad (2.32)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเขียนเฟสเซอร์โตะแกรมโดยใช้กระแส I_a เป็นแกนอ้างอิง จะได้ดังรูปที่ 2.44

จากรูปที่ 2.44 เขียนสมการ E_{afm} และ δ ได้ว่า

$$E_{afm} = (V_{ta} \cos \phi - I_a R_a) + j(V_{ta} \sin \phi + I_a X_s) \quad (2.33)$$

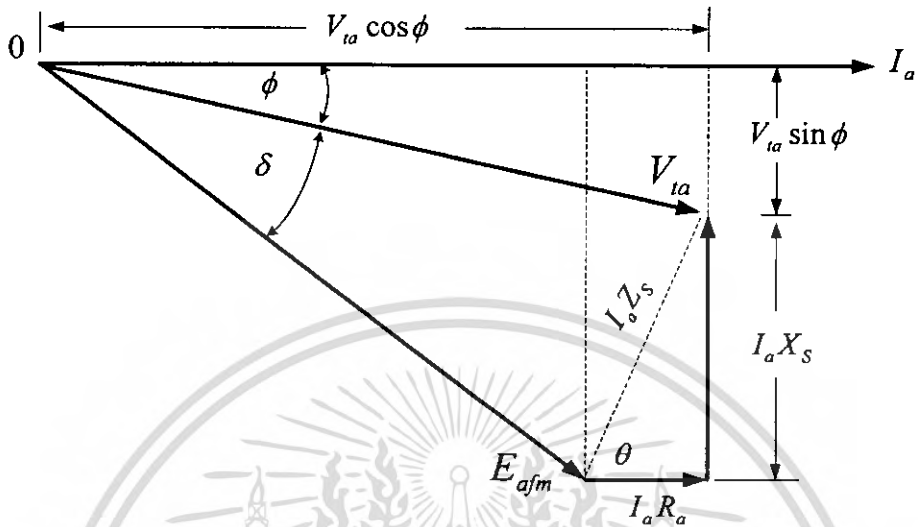
$$\delta = \tan^{-1}\left[\frac{V_{ta} \sin \phi + I_a X_s}{V_{ta} \cos \phi - I_a R_a}\right] - \phi \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.44 เฟสเซอร์โตะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์นำหน้า เขียนโดยใช้กระแสเป็นแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.20.3 เมื่อค่าตัวประกอบกำลังล้าหลัง เมื่อค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ซิงโครนัส ล้าหลัง จะเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมโดยใช้แกนแรงดัน V_{ta} เป็นแกนอ้างอิงได้ดังรูปที่ 2.45 (ก) หรือรูปที่ 2.45 (ข)



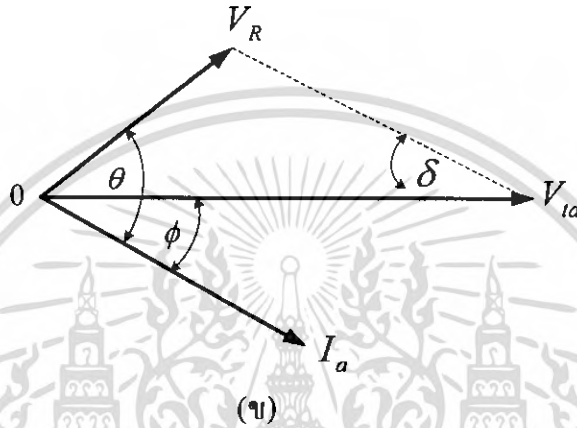
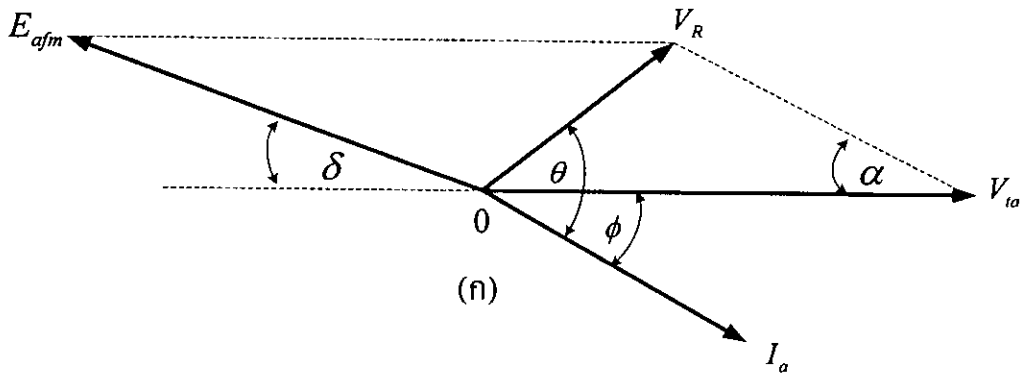
รูปที่ 2.45 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลด และมีค่าตัวประกอบกำลังของ มอเตอร์ล้าหลัง เขียนโดยใช้แรงดันเป็นแกนอ้างอิง

จากรูปที่ 2.45 เขียนสมการ E_{afm} และ δ ได้ว่า

$$E_{afm} = \sqrt{V_{ta}^2 + V_R^2 - 2V_{ta}V_R \cos(\theta + \phi)} \quad (2.35)$$

$$\delta = \sin^{-1} \left[\frac{V_R \sin(\theta + \phi)}{E_{afm}} \right]$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมโดยใช้กระแส I_a เป็นแกนอ้างอิง จะได้ดัง รูปที่ 2.46



รูปที่ 2.46 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อมีโหลดและมีค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ล้าหลังเขียนโดยใช้กระแส I_a เป็นแกนอ้างอิง

จากรูปที่ 2.46 เขียนสมการ E_{afm} และ δ ได้ว่า

$$E_{afm} = (V_{ta} \cos \phi - I_a R_a) + j(V_{ta} \sin \phi + I_a X_s) \quad (2.36)$$

$$\delta = \phi - \tan^{-1} \left[\frac{V_{ta} \sin \phi + I_a X_s}{V_{ta} \cos \phi - I_a R_a} \right] \quad (2.37)$$

เนื่องจากการของ E_{afm} ในมอเตอร์ซิงโครนัสและสมการของ V_{ta} ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นสมการเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากรณีมอเตอร์ซิงโครนัส สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านกลับ

$$E_{afm} = (V_{ta} \cos \phi - I_a R_a) + j(V_{ta} \sin \phi \pm I_a X_s) \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$E_{afm} = \sqrt{(V_{ia} \cos \phi - I_a R_a)^2 + (V_{ia} \sin \phi \pm I_a X_s)^2} \quad (2.39)$$

โดยกำหนดให้ : ใช้เครื่องหมาย + เมื่อค่าตัวประกอบกำลัง นำหน้า
: ใช้เครื่องหมาย - เมื่อค่าตัวประกอบกำลัง ล้าหลัง

กรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ

$$E_{afm} = (V_{ia} \cos \phi + I_a R_a) + j(V_{ia} \sin \phi \pm I_a X_s) \quad (2.40)$$

หรือ

$$E_{afm} = \sqrt{(V_{ia} \cos \phi + I_a R_a)^2 + (V_{ia} \sin \phi \pm I_a X_s)^2} \quad (2.41)$$

โดยกำหนดให้ : ใช้เครื่องหมาย + เมื่อค่าตัวประกอบกำลัง ล้าหลัง
: ใช้เครื่องหมาย - เมื่อค่าตัวประกอบกำลัง นำหน้า

สำหรับค่ามุมโหลด (δ) ที่ค่าตัวประกอบกำลังใดๆ สามารถหาได้จากสมการ 2.43

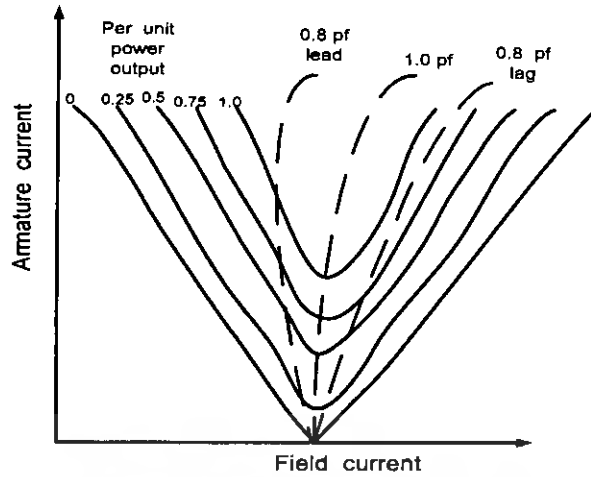
$$\delta = \cos^{-1} \left[\frac{E_{afm}^2 + V_{ia}^2 - V_R^2}{2E_{afm} V_{ia}} \right] \quad (2.42)$$

2.21 คุณลักษณะในการทำงาน ของมอเตอร์ซิงโครนัส

มอเตอร์ซิงโครนัสมีคุณลักษณะเด่นอยู่ 2 ประการคือ

2.21.1 มีการปรับแต่งความเร็วที่สมบูรณ์ที่สุด คือให้ความเร็วคงที่ตลอดเวลาโดยไม่คำนึงถึงโหลด นอกจากสภาวะโอเวอร์โหลดเท่านั้น จึงจะทำให้โรเตอร์หลุดออกจากความเร็วซิงโครนัสและหยุดการปรับปรุงแต่งความเร็วทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า

2.21.2 มีช่วงการปรับแต่งค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ได้ทั้งนำหน้าและล้าหลังในย่านที่กว้างมากจากคุณลักษณะอันนี้จึงสามารถนำมอเตอร์ซิงโครนัสไปใช้ประโยชน์ในการแก้เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบสายส่งหรือระบบจำหน่ายตามจุดต่างๆ ได้ต้องการ เพื่อช่วยลดการสูญเสียในระบบสายส่งได้มากขึ้น



รูปที่ 2.47 กราฟรูปตัดวีแสดงความสัมพันธ์ของมอเตอร์ซิงโครนัสขณะที่ปรับค่ากระแสสนาม

2.22 คุณลักษณะของมุมกำลัง

จากวงจรไฟฟ้าที่รูปที่ 2.48 ค่ากำลังไฟฟ้า P_2 ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง E_2 กำหนดได้จาก

$$P_2 = E_2 I \cos \phi \tag{2.43}$$

เมื่อมุม ϕ เป็นมุมระหว่าง I กับ E_2



รูปที่ 2.48 วงจรไฟฟ้าที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่ออยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 2 ชุด

พิจารณาได้ค่ากระแสได้จากความสัมพันธ์

$$I = I \angle -\phi = \frac{E_1 - E_2}{Z} = \frac{E_1 \angle \delta - E_2 \angle 0^\circ}{|Z| \angle \phi_z} \tag{2.44}$$

เมื่อ ϕ_z เป็นมุมของค่าอิมพีแดนซ์ Z และมุม δ เป็นมุมระหว่าง E_1 กับ E_2 ดังนั้น

$$I = \frac{E_1}{|Z|} \angle \delta - \phi_z - \frac{E_2}{|Z|} \angle -\phi_z \quad (2.45)$$

จากสมการจะเห็นว่า ค่าในส่วน real มีค่า

$$I \cos \phi = \frac{E_1}{|Z|} \cos(\delta - \phi_z) - \frac{E_2}{|Z|} \cos(\phi_z) \quad (2.46)$$

เมื่อ $\cos(-\phi_z) = \cos(\phi_z) = R/|Z|$ จะได้ว่า

$$P_2 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \cos(\delta - \phi_z) - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2} \quad (2.47)$$

จาก $\alpha_z = 90^\circ - \phi_z = \tan^{-1} \frac{R}{X}$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ E_2 (power at load end)

$$P_1 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin(\delta - \phi_z) - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2} \quad (2.49)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่ากำลังไฟฟ้าที่ E_1 (power at load end)

$$P_1 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin(\delta - \phi_z) + \frac{E_1^2 R}{|Z|^2} \quad (2.50)$$

ถ้าไม่คิดค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์ R_a นั่นคือไม่มีการสูญเสียจากขดทองแดง $\alpha_z \approx 0$

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta \quad (2.51)$$

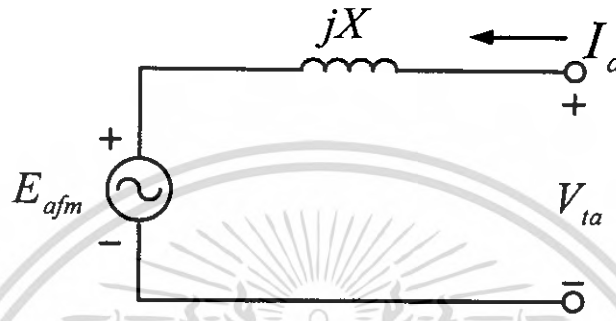
มุม δ จะเรียกว่ามุมกำลังและเมื่อกำหนดให้ค่า E_1 กับ E_2 คงที่จะได้ว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ δ มีค่า $\pm 90^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{1,\max} = P_{2,\max} = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta \quad (2.52)$$

2.23 เครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัสคอนแดนเซอร์

กำหนดให้มอเตอร์เชิงโครนัสที่ต่ออยู่กับ แหล่งจ่าย V_{ta} และไม่มีคิตค่าสูญเสีย ดังรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.49 วงจรสมมูลของมอเตอร์เชิงโครนัส กำหนดให้ไม่มีคิตค่า R_a

$$P_{input} = 3V_{ta} I_a \cos \phi \quad (2.53)$$

$$P_{transfer} = 3 \frac{V_{ta} E_{afm}}{X_s} \sin \delta \quad (2.54)$$

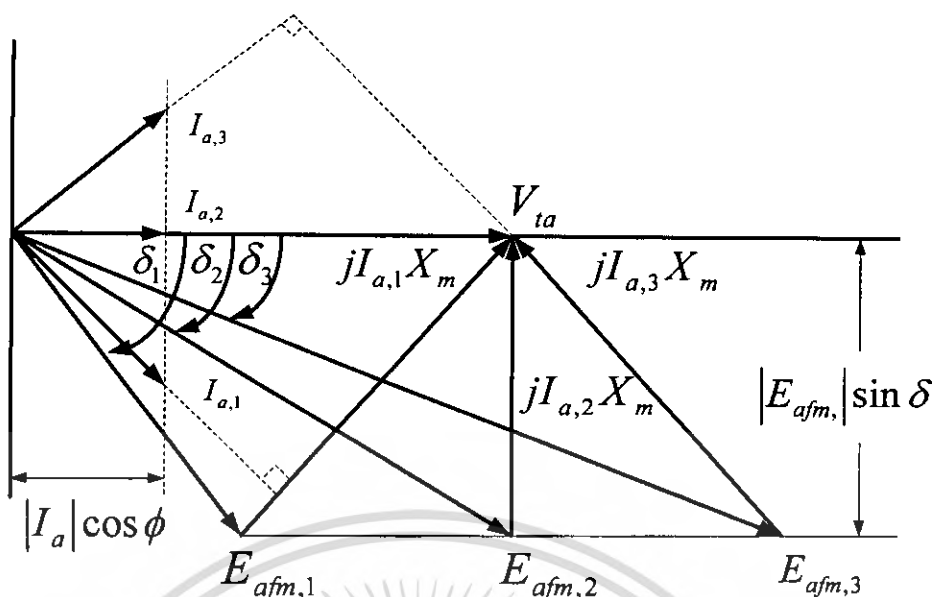
ถ้าภาระทางกลของมอเตอร์เชิงโครนัสมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง หมายความว่าค่า P_{input} และ $P_{transfer}$ จะมีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อค่า V_{ta} คงที่จะได้ว่า

$$\text{จากสมการ (2.53) ค่าผลคูณ } I_a \cos \phi \text{ มีค่าคงที่} \quad (2.55)$$

$$\text{จากสมการ (2.54) ค่าผลคูณ } E_{afms} \sin \delta \text{ มีค่าคงที่} \quad (2.56)$$

จากเฟสเซอร์ในรูปที่ 2.50 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับค่ากระแสสนาม I_f จะมีผลต่อขนาดของค่า E_{afm} ที่เกิดขึ้นซึ่งเมื่อ E_{afm} มีการเปลี่ยนแปลง แนวแกนของ E_{afm} จะต้องเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการ 2.58 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งต่างๆ ของ E_{afm} จะมีผลต่อมุม δ ที่เกิดขึ้นด้วยโดยจะทำให้แนวของ I_a มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะต้องเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.57 จะเห็นได้ว่าแนวของ I_a ที่ตำแหน่งต่างๆ จะทำให้มอเตอร์เชิงโครนัสมีสภาพเป็นภาระทางไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.50 เฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสขณะที่ปรับค่ากระแส I_f เมื่อภาระทางกลคงที่

จากรูปที่ 2.50 แสดงให้เห็นว่าเมื่อภาระทางกลมีค่าคงที่ การปรับค่ากระแสสนาม I_f จะส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ซิงโครนัสมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น มีสภาพเป็น lagging, unity หรือ leading p.f. ก็ได้ และที่ตำแหน่งค่า I_f ซึ่งทำให้ได้ค่า I_a ต่ำที่สุด มอเตอร์ซิงโครนัสจะมีสภาพเป็น unity p.f.

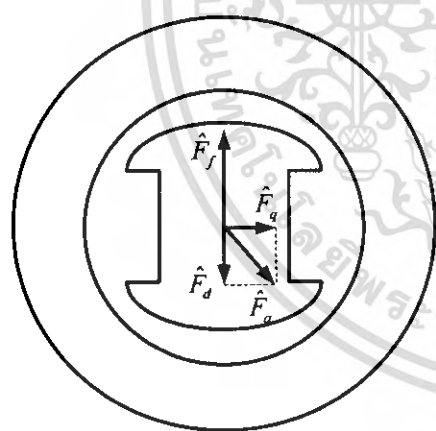
บทที่ 3

คุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบขั้วยื่นหรือเซเลียนท์โพล

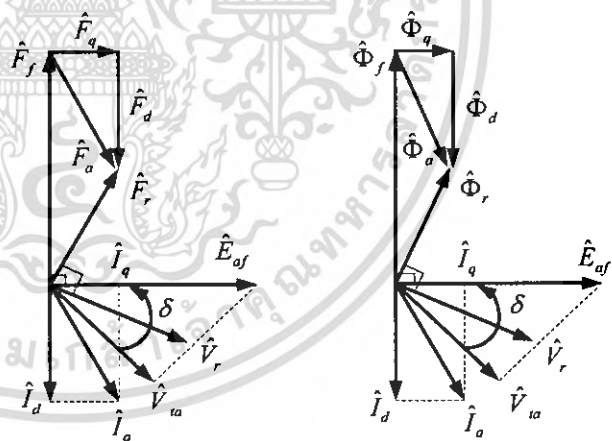
การทดสอบตามมาตรฐานและการทางจรสมมูล

3.1 คุณลักษณะของเครื่องจักรไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบขั้วยื่นหรือเซเลียนท์โพล

เครื่องจักรไฟฟ้าที่เป็นชนิดขั้วแม่เหล็กยื่น แรงเคลื่อนแม่เหล็กจากกระแสอาร์มาเจอร์เป็นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก F_a ซึ่งมีค่า $I_a N_a$ โดยแปรผันตามกระแสอาร์มาเจอร์เหมือนกับเครื่องจักรไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กทรงกระบอก แต่ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในขั้วแม่เหล็กหรือแกนแนวตรง (direct - axis) นั้น เส้นแรงแม่เหล็กเดินได้สะดวกกว่าทางเดินแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก หรือที่เรียกว่าแกนขวาง (quadrant - axis) ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจึงไม่อยู่ในแนวแกนเดียวกับ F_a หรือ $I_a N_a$ ตามรูปที่ 3.1 และความต้านทานของทางเดินแม่เหล็ก \mathfrak{R} เป็นตัวจำกัดเส้นแรงแม่เหล็กจึงค่าที่ไม่คงที่ เพราะช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับอาร์มาเจอร์ในตำแหน่งต่างๆ ไม่เท่ากันคือ ที่หน้าขั้วแม่เหล็กมีช่องว่างน้อยกว่าบริเวณแกนแนวขวางจึงทำให้รีแอกแตนซ์รั่วซึมมีค่าเท่ากับ wN_a^2 / \mathfrak{R} เพราะฉะนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำตกเนื่องจากรีแอกแตนซ์อาร์มาเจอร์และรีแอกแตนซ์รั่วจะไม่สามารถกำหนดในรูป $I_a X_a$ ได้เหมือนกับในกรณีเครื่องจักรไฟฟ้าชนิดขั้วแม่เหล็กทรงกระบอก



(ก) แสดงการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กเหล็กอาร์มาเจอร์ซึ่งแยกออกอยู่ในแกนแนวตรงและแกนแนวขวาง



(ข) เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าทั้งสองสาขา

รูปที่ 3.1 แสดงการเดินทางของเส้นแม่เหล็กอาร์มาเจอร์และเฟสเซอร์ไดอะแกรม

ค่าต้านทานของทางเดินแม่เหล็กจะคงที่ถ้าแยกอยู่ในสองแกนคือ แกนแนวตรงและแกนแนวขวางให้เป็น \mathfrak{R}_d และ \mathfrak{R}_q โดยที่ค่า $\mathfrak{R}_d < \mathfrak{R}_q$ ซึ่งเป็นตัวกำหนดเส้นแรงแม่เหล็กในแกนตรงและแกนขวาง แรงเคลื่อนแม่เหล็กอาร์มาเจอร์ต้องแยกเป็นสองสาขาคือ แรงเคลื่อนแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกนตรง \hat{F}_d และแรงเคลื่อนแม่เหล็กแนวแกนขวาง \hat{F}_q ตามลำดับ ตามรูปที่ 3.1 (ก) เส้นแรงแม่เหล็ก $\hat{\Phi}_d$ และ $\hat{\Phi}_q$ เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\hat{\Phi}_a = \hat{\Phi}_d + \hat{\Phi}_q \quad (3.1)$$

$$\hat{F}_a = \hat{F}_d + \hat{F}_q \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$\hat{\Phi}_d = \frac{\hat{F}_d}{\mathfrak{R}_d} = \frac{N_a \hat{I}_d}{\mathfrak{R}_d} \quad (3.3)$$

$$\hat{\Phi}_q = \frac{\hat{F}_q}{\mathfrak{R}_q} = \frac{N_a \hat{I}_q}{\mathfrak{R}_q} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) แสดงว่ากระแสอาร์มาเจอร์จะต้องถูกแยกเป็นสองสาขาคือ \hat{I}_d และ \hat{I}_q ดังสมการ

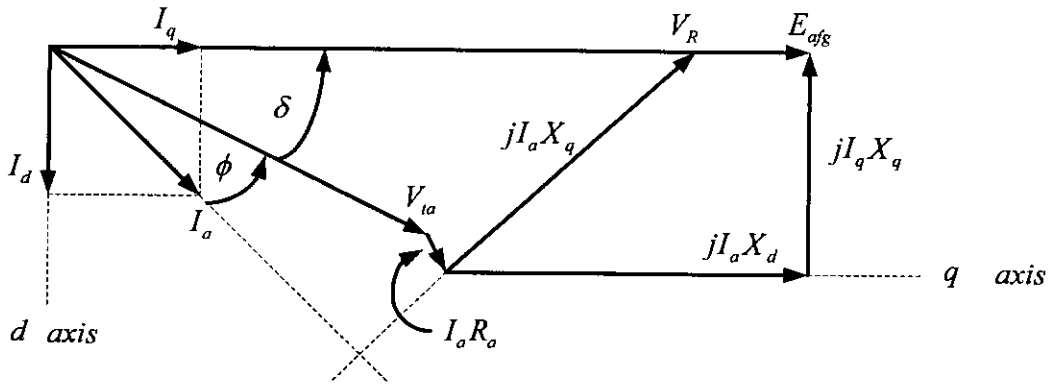
$$\hat{I}_a = \hat{I}_d + j\hat{I}_q \quad (3.5)$$

เมื่อ \hat{I}_d ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก $\hat{\Phi}_d$ คือกระแสอาร์มาเจอร์ในแนวแกนตรง (direct-axis armature current) ซึ่งอยู่ในแนวเดียวกับขั้วแม่เหล็กหลัก \hat{I}_q ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก $\hat{\Phi}_q$ คือกระแสอาร์มาเจอร์ในแนวแกนขวาง (quadrature-axis armature current)

3.2 สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กยื่น

3.2.1 สมการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกคร่อมเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กอาร์มาเจอร์และเส้นแรงแม่เหล็กขั้ว ดังนั้นการจะเลือกแกนอ้างอิงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแกนอ้างอิง การหาคุณสมบัติขณะทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากสมการที่ 3.6 จะยึดแนวแกนตรงขวาง (d-q axis) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นหลักหรือจะใช้รูปเฟสเซอร์ไดอะแกรมจากรูปที่ 3.2 ในการแก้ปัญหา

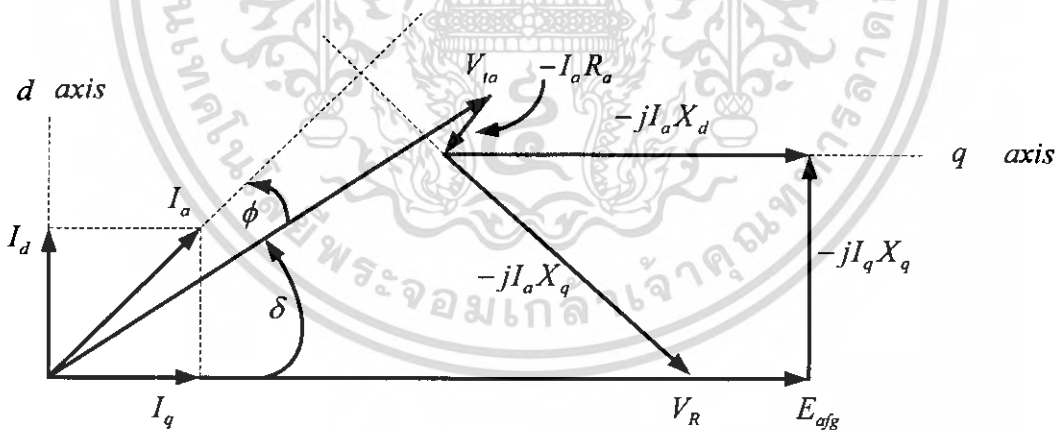
$$E_{afg} = V_{to} + I_a R_a + jI_d X_d + jI_q X_q \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.2 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

3.2.2 สมการมอเตอร์ซิงโครนัส สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องจักรไฟฟ้าที่ทำงานเป็นมอเตอร์แตกต่างกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เครื่องหมายหน้าเทอมของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำดกคร่อม เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กอาร์มาเจอร์ เส้นแรงแม่เหล็กวีและในความสัมพันธ์ของอาร์มาเจอร์คือ จาก + เป็น - โดยเปลี่ยนจาก E_{afg} เป็น E_{afm} ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในมอเตอร์ ดังนั้นสมการได้ดังนี้

$$E_{afg} = V_{ta} - I_a R_a - jI_d X_d - jI_q X_q \tag{3.7}$$



รูปที่ 3.3 เฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส

3.2.3 การหาเฟสเซอร์ในเครื่องจักรแบบขั้วยื่น เนื่องด้วยการสร้างลัทธิโดยขดลวดอาร์มาเจอร์ที่ต้องอาศัยความสัมพันธ์ของตำแหน่งขั้วและเฟสเซอร์ตามรูปที่ 4 (ก) จากการแก้สมการแปลงค่าจากในรูปเฟสเซอร์มาเป็นค่าในรูปของ F_{da} และ F_{qa} ที่อยู่ในแนวแกน D และ Q ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบที่ตรงกันนั้นจะไม่เหมือนกันกับส่วนของ รีลักแตนซ์อัตราส่วนของ B_{da} / F_{da} จะมีค่ามากกว่าอัตราส่วนของ B_{qa} / F_{qa} เป็นที่ยอมรับกันว่า

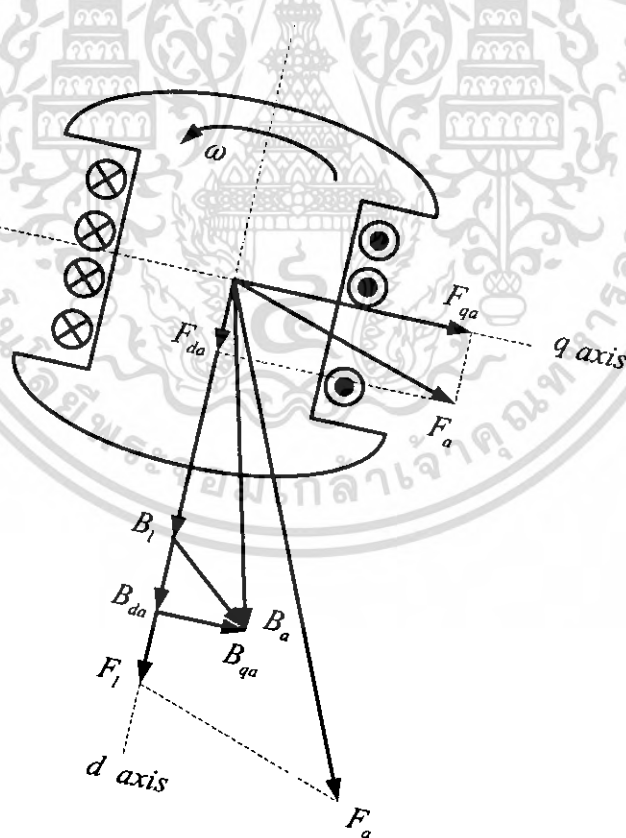
ส่วนประกอบฮาร์โมนิกทั้งหมดของความหนาแน่นล็กซ์ และส่วนประกอบความหนาแน่นฟลักซ์ ในแนวแกน D และแกน Q ทั้งหมดนั้นจะกระจายอยู่ในรูปของคลื่นไซน์เหนือ Pole-pitch ดังรูปที่ 4 (ข) ดังนั้นส่วนประกอบของความหนาแน่นล็กซ์ของแต่ละส่วนนั้นสามารถนำมาแสดงในรูปของเฟสเซอร์ได้ โดยค่าของมันจะขึ้นอยู่กับ F_{da} และ F_{qa} โดยค่าของ F_{da} และ F_{qa} ที่ได้จะมีสัดส่วนตรงกับส่วนของ I_d และ I_q ของกระแสอาเมเจอร์ ดังนั้นเฟสเซอร์ของ B_{da} และ B_{qa} จะมีความสัมพันธ์กับ I_d และ I_q เฟสเซอร์แต่แรงดันภายในของเครื่องจักรแบบทรงกระบอกจะสามารถเขียนในรูปของ $jX_a I$ ได้ถึงแม้ว่าวิธีการประยุกต์ใช้ของเครื่องจักรแบบขั้วยีนจะคล้ายกัน แต่ค่าของความต้านทานเหนี่ยวนำบนแกนทั้งสองจะแตกต่างกันดังสมการ 3.6

$$jX_{da}I_d + jX_{qa}I_q \quad (3.6)$$

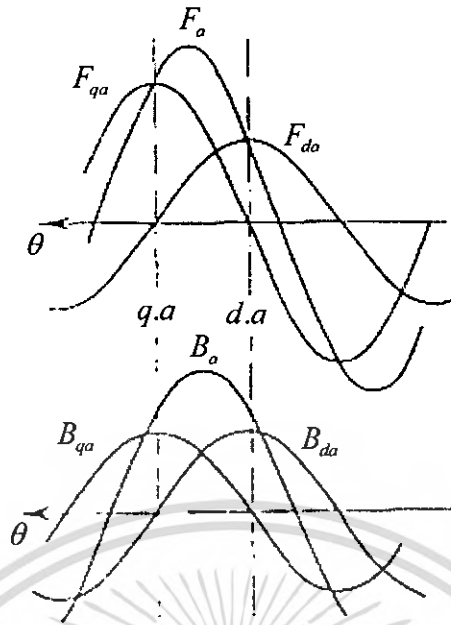
ซึ่ง

$$I_a = I_d + I_q \quad (3.7)$$

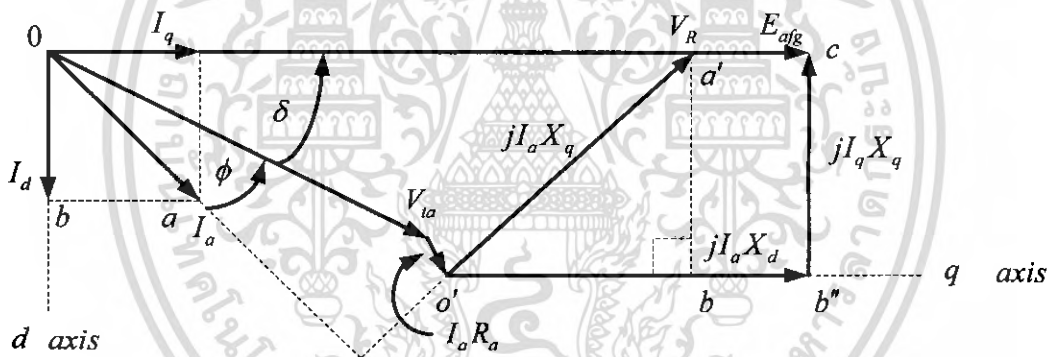
(I_d และ I_q เป็นค่าเฟสเซอร์ที่ตั้งฉากกัน ส่วน X_{da} และ X_{qa} เป็นค่าความต้านทานเหนี่ยวนำเนื่องจากการเหนี่ยวนำของขดลวดอาเมเจอร์ในแนวแกน D และแกน Q)



(ก) เฟสเซอร์แสดงความหนาแน่นฟลักซ์



(ข) การเสริมทับกันของเฟสเซอร์ในแนวแกน D และ Q



$$\begin{aligned}
 o'd' &= jI_a X_q & d'c &= jI_a (X_d - X_q) \\
 b'a' &= b''c = jI_q X_q \\
 o'b' &= jI_d X_q
 \end{aligned}$$

(ค) การหาเฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

รูปที่ 3.4 เฟสเซอร์ในเครื่องจักรซิงโครนัสแบบขั้วยื่น

ซึ่งจากเฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดซิงโครนัสแบบขั้วยื่น จะพบว่าไม่สามารถเขียนเฟสเซอร์ได้โดยตรง เนื่องจากว่ายังไม่ทราบค่ามุม δ จากค่า $jI_a X_q$ เพื่อหา E_{afg} เป็นแกนอ้างอิงก่อน จากนั้นก็จะได้มุม δ นำค่า δ ที่ได้จากการคำนวณหาค่า I_d และ I_q แทนค่าสมการที่ 3.6 และ สมการ 3.7

3.3 การทดสอบตามมาตรฐานและการหาจรรยาบรรณ

3.3.1 เส้นโค้งอิมิตัวแบบเปิดวงจร

เส้นโค้งอิมิตัวแบบเปิดวงจรสามารถหาได้โดย ขั้วเครื่องจักรทดสอบที่ความเร็วพิกัด, เปิดวงจร และบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอามาเจอร์ กระแสฟิลด์และความถี่ที่ขั้ว เพื่อที่จะรับข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับ Generator Model การอ่านค่าและบันทึกค่ามีขั้นตอน ดังนี้

1) อ่านค่า 6 ค่าที่จุดต่ำกว่า 60% ของพิกัดแรงดันไฟฟ้า (1 ค่าที่การกระตุ้นที่ศูนย์)
 2) จาก 60% ถึง 110% อ่านค่าเพิ่มขึ้นอย่างน้อยที่ทุกๆ 5% ของการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (อย่างน้อย 10 จุด) พื้นที่ช่วงนี้เป็นช่วงวิกฤต และการวัดควรมีการควบคุมการกระตุ้นในแต่ละจุดอย่างแน่นอน

3) ที่ค่ามากกว่า 110% อย่างน้อย 2 ค่า รวมทั้งหนึ่งจุดที่ค่าประมาณ 120% ของพิกัดกระแสฟิลด์ No-load (หรือที่ค่าที่มากที่สุดที่ผู้ผลิตระบุ)

4) ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า การอ่านค่าควรที่จะตรวจสอบให้แรงดันไฟฟ้า(line-to-line) ของทั้งสามเฟสสมดุล การอ่านค่านี้ควรทำภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ของการกระตุ้นและความเร็ว และการใช้โวลต์มิเตอร์ตัวเดียวกัน

การอ่านค่าเส้นโค้งนี้ ควรทำในขณะที่เพิ่มค่าของการกระตุ้น (Increasing excitation) ถ้ามีความจำเป็นที่จะต้องลดกระแสฟิลด์ ควรจะลดลงที่ศูนย์แล้วค่อยเพิ่มไปที่ค่าที่ต้องการ เพื่อที่จะลดค่าฮิดเดอริชิสที่จะเกิดขึ้นในผลการทดลอง

เครื่องจักรไฟฟ้าควรทำงานเป็นเวลาหลายนาทีในแต่ละจุดของแรงดันไฟฟ้า เพื่อที่จะทำความเร็วเสถียรที่ค่าพิกัด ไม่เกิดความคลาดเคลื่อนจากความผันแปรของความเร็วและการกระตุ้น ยกเว้น 2 จุด ที่มากกว่า 110% ของพิกัดศักดาไฟฟ้า ซึ่งต้องปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต

ผลที่ได้ถูกต้องสำหรับความเร็วและสามารถพล็อตได้เหมือนรูปที่ 1 แรงดันไฟฟ้าของเฟสเดียว (Single phase line-to-line) หรือ ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของเฟสที่แต่ละค่าของการกระตุ้นจะถูกนำมาใช้

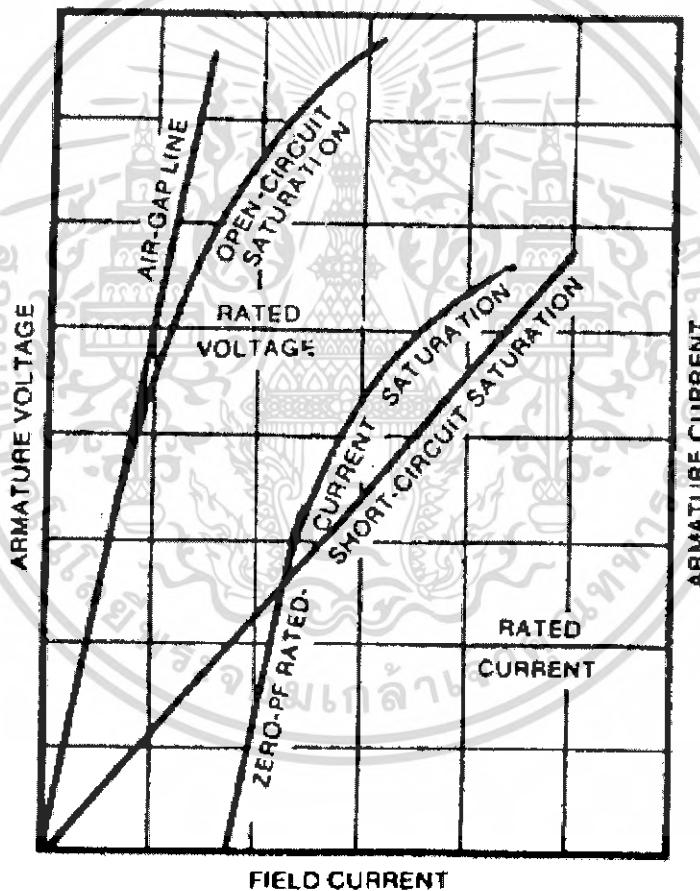
3.3.1 Air-gap line Air-gap line ได้มาจากเส้นโค้งอิมิตัวแบบเปิดวงจร โดยขยายเส้นตรงส่วนล่าง (ดูจากรูปที่ 3.4) ถ้าส่วนล่างไม่เป็นเชิงเส้น (linear) air-gap line จะวาดโดยวาดเส้นตรงที่ความชันที่มากที่สุดผ่านจุดกำเนิด สัมผัสกับเส้นโค้งอิมิตัว วิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบจุดต่ำกว่าแรงดันของ zero power actor และเส้นโค้งอิมิตัวที่พิกัดกระแส

3.3.3 เส้นโค้งอิมิตัวแบบลัดวงจร เส้นโค้งอิมิตัวแบบลัดวงจรสามารถหาได้โดย ขั้วเครื่องจักรทดสอบที่ความเร็วพิกัด ลัดวงจรด้านอามาเจอร์ และบันทึกค่ากระแสอามาเจอร์และกระแสฟิลด์ โดยปกติการอ่านควรวัดบันทึกค่ากระแสอามาเจอร์ที่ประมาณ 125%, 100%, 75%, 50% และ 25% ของพิกัดกระแส ไปค่าสูงสุดของกระแสทดสอบจะถูกตั้งไว้ที่ 125% แต่บางครั้งต้องรับการกำหนดจากผู้ผลิต เนื่องจากเครื่องจักรบางชนิด การระบายความร้อนใน

ส่วนของสเตเตอร์จะไม่อนุญาตให้มีค่าพิกัดกระแสเกิน 100% เพื่อที่จะลดความเสี่ยงจากการเสียหาย

การอ่านค่าที่พิกัดกระแสควรที่จะอ่านทั้งสามเฟสเพื่อตรวจสอบความสมดุล หากในแต่ละเฟสมีขั้ว Line หรือ neutral มากกว่าหนึ่ง การสมดุลของกระแสระหว่างขั้วที่แยกจากกัน ควรจะมีการตรวจสอบในแต่ละเฟส

การอ่านค่ากระแสควรจะทำโดยการลดค่ากระดุนในการสตาร์ทลง ซึ่งต้องให้กระแสอาร์มาเจอร์เท่ากับค่ามากที่สุดตอนเริ่มต้น จุดสูงสุดของกระแสควรทำการวัดก่อนเพื่ออุณหภูมิของขดลวดจะมีค่าเกือบคงที่เท่าที่จะเป็นไปได้ตลอดการทดสอบ ผลที่ได้สามารถนำไปพล็อตได้เหมือนรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เส้นโค้งอ้อมตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การทดสอบหาค่ารีแอกแตนซ์ในแกน $D-Q$ (Slip test)

(ก) หากความเหนี่ยวนำเชิงโครนัสในแนวแกน D (Direct-axis synchronous reactance X_d) โดยเครื่องจักรไฟฟ้าตามปกติแล้วค่าความเหนี่ยวนำในแนวแกน D จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานในแนวแกน D เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณที่เดียวกัน ในการพิจารณานั้นเราจะพิจารณาจากค่าความต้านทานเชิงโครนัสในแนวแกน D ที่ได้จากการทดสอบแบบเปิดวงจรและการทดสอบแบบลัดวงจร โดยจะใช้สัดส่วนของค่ากระแสกระตุ้นที่ค่าพิกัดของอามีเจอร์ที่ได้มาจากการทดสอบแบบลัดวงจรและค่ากระแสกระตุ้นที่พิกัดแรงดันของเส้น Air-gap line จากการทดสอบแบบเปิดวงจรซึ่งค่าความเหนี่ยวนำเชิงโครนัสในแนวแกน D สามารถหาได้จากสมการ

$$X_{du} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}} \quad (3.12)$$

เมื่อ X_{du} = ค่าความเหนี่ยวนำเชิงโครนัสไม่มอดิว
 I_{FSI} = ค่ากระแสกระตุ้นที่ค่าพิกัดของกระแสอามีเจอร์จากการทดสอบแบบลัดวงจร
 I_{FG} = ค่ากระแสกระตุ้นที่ค่าพิกัดแรงดันของเส้น Air-gap line จากการทดสอบแบบเปิดวงจร

ค่าความเหนี่ยวนำเชิงโครนัสมอดิว (X_{ds}) จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขภายในของเครื่องจักรเชิงโครนัส โดยจากการคาดคะเนค่าความเหนี่ยวนำในแนวแกน D (X_d) จะประกอบด้วยค่าความเหนี่ยวนำที่เกี่ยวข้องคล่องกันระหว่างขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ (X_{ad}) บวกกับค่าความเหนี่ยวนำที่สูญเสียภายในตัวสเตเตอร์ (X_L) ดังนั้น

$$X_d = X_{ad} + X_L \quad (3.13)$$

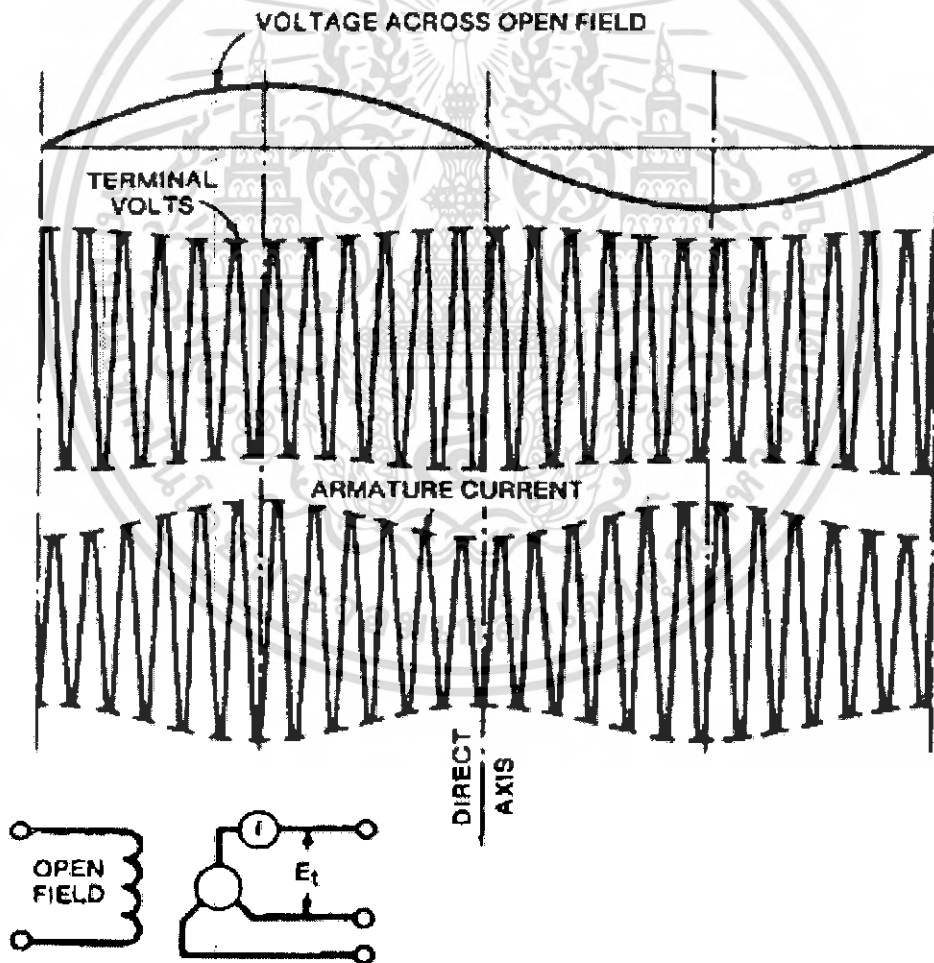
(ข) หากค่าความเหนี่ยวนำในแนวแกน Q (Quadrature-axis synchronous reactance X_q) จะเป็นการพิจารณาค่าสูงสุดและต่ำสุดของแรงดันและกระแสอามีเจอร์ จากกราฟเมื่อ Slip มีค่าน้อยมาก โดยค่าความเหนี่ยวนำเชิงโครนัสในแนวแกน $D-Q$ ที่เหมาะสมจะสามารถหาได้จากสมการที่ 3.14 และ 3.15 ซึ่งค่าที่แม่นยำที่สุดของความเหนี่ยวนำเชิงโครนัสในแนวแกน Q ที่เราได้จะสืบเนื่องผลจากการทดสอบและคำนวณค่าความเหนี่ยวนำเชิงโครนัสในแนวแกน D ดังสมการที่ 3.14 และ 3.15

$$X_{qs} = \frac{E_{\min}}{I_{\min}} \quad (3.14)$$

$$X_{ds} = \frac{E_{\min}}{I_{\min}} \quad (3.15)$$

$$X_{qu} = X_{du} \left(\frac{X_{qs}}{X_{ds}} \right) \quad pu \quad (3.16)$$

$$X_{qu} = X_{du} \left(\frac{E_{\min}}{E_{\max}} \right) \left(\frac{I_{\min}}{I_{\max}} \right) \quad pu \quad (3.17)$$



รูปที่ 3.6 การทดสอบแบบ slip test ตามทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การทดสอบหาวจรสมมูล

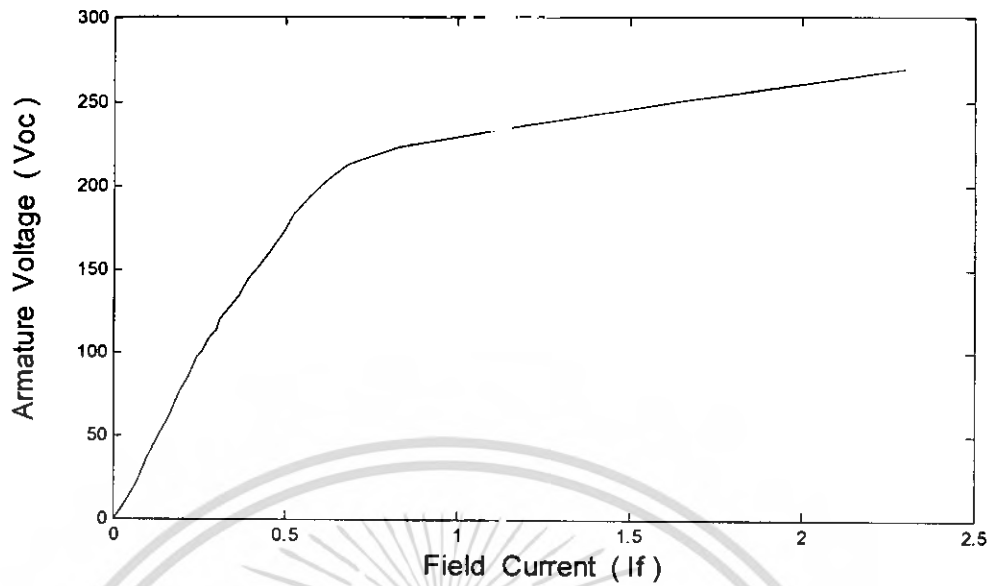
(ก) การทดลองเส้นโค้งอิมิตัวแบบเปิดวงจรประกอบด้วยเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. พิกัดแรงดันไฟฟ้า $\frac{220}{\sqrt{3}} = 127V$
2. อ่านค่า 6 ค่าที่ต่ำกว่า 60% ของพิกัดแรงดันไฟฟ้า 60% ของ $127V = 76V$
3. ตั้งแต่ 60% ถึง 110% อ่านค่าอย่างน้อยทุกๆ 5% อย่างต่ำ 10 จุด 110% ของ $127V = 139V$
4. ที่ค่ามากกว่า 110% อ่านค่าอย่างน้อย 2 จุด รวมทั้ง 1 ค่า ที่ประมาณ 120% ของพิกัดแรงดันไฟฟ้า 120% ของ $127V = 152.4V$

$V_{oc}(V)$	$I_{f(syn)}(A)$	$V_{f(syn)}(V)$
10	0.009	1.093
20	0.033	4.43
23	0.055	7.09
36	0.077	9.57
49	0.090	10.96
62	0.112	13.64
75	0.118	13.99
80	0.132	15.01
85	0.135	16.40
91	0.143	17.45
97	0.148	17.57
101	0.157	18.95
108	0.174	20.20
114	0.176	21.57
120	0.193	22.83
127	0.202	24.74
135	0.208	25.56
144	0.212	26.79
153	0.228	28.75
163	0.240	30.70

ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองแบบเปิดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 เส้นโค้งอิมิตัวแบบเปิดวงจร

(ข) การทดสอบเส้นโค้งอิมิตัวแบบลัดวงจร

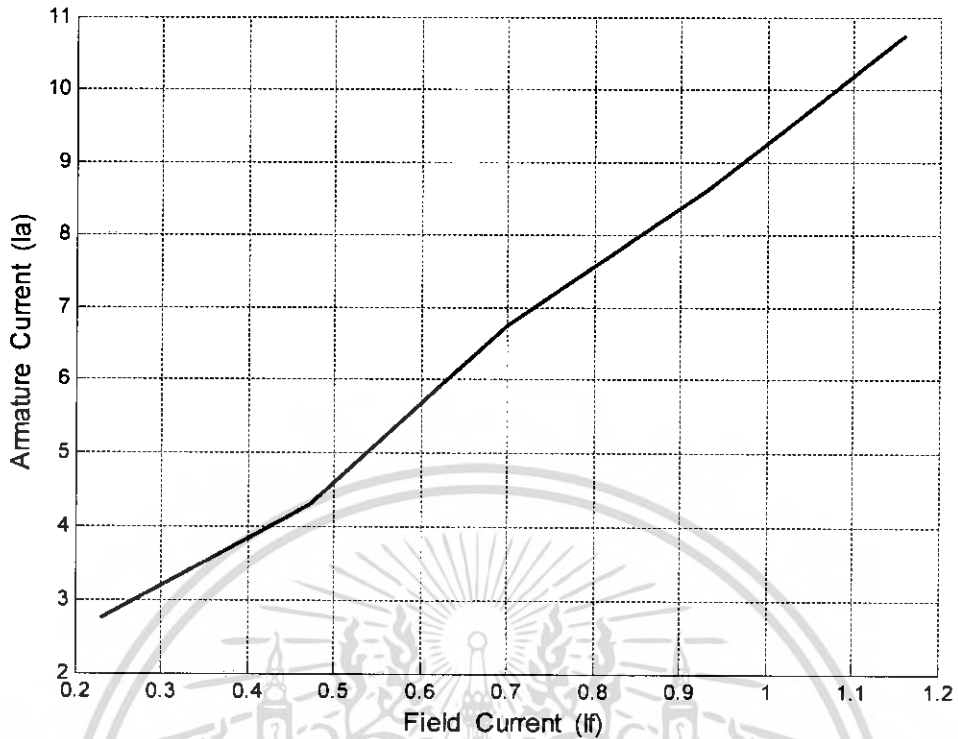
ประกอบด้วยเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. บันทึกค่ากระแสแอมแปร์ที่ประมาณ 125%, 100%, 75%, 50% และ 25% ของพิกัดกระแส
2. บันทึกค่ากระแสฟิลด์ที่ค่ากระแสแอมแปร์ต่างๆ

$I_{a(syn)} (A)$	$I_{f(dc)} (A)$	$V_{f(syn)}$
10.75	1.16	85.7
8.6	0.93	61.0
6.75	0.7	51.57
4.3	0.47	34.74
2.75	0.23	17.57

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองแบบลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



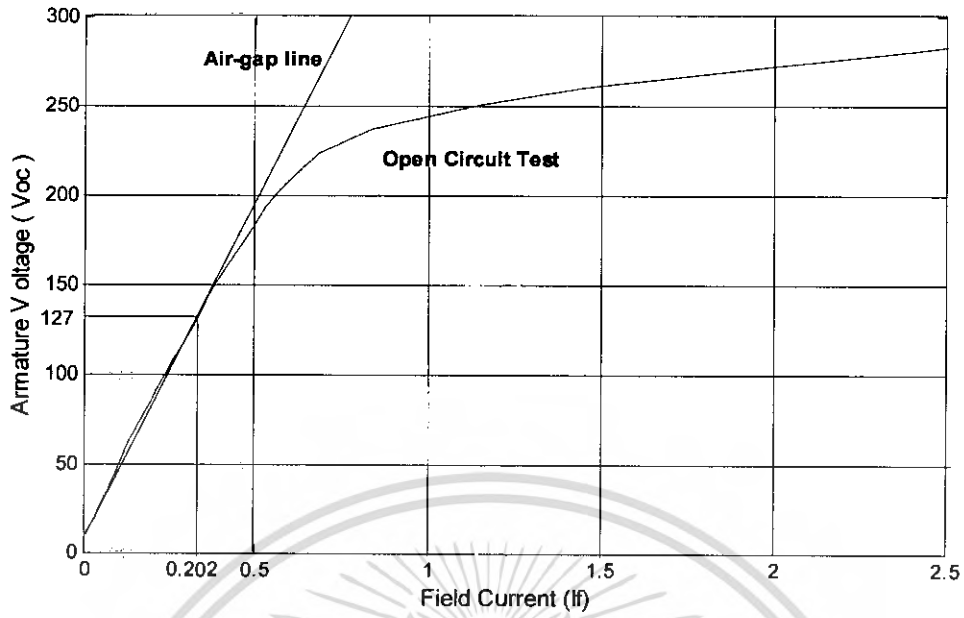
รูปที่ 3.8 เส้นโค้งอิมิตัวแบบลัดวงจร

(ค) การทดสอบหาค่าความต้านทานอาเมเจอร์ วัดโดยใช้ Digitle low Resistance Ohmmeter ทำการวัดค่าความต้านทานอาเมเจอร์ของแต่ละเฟส

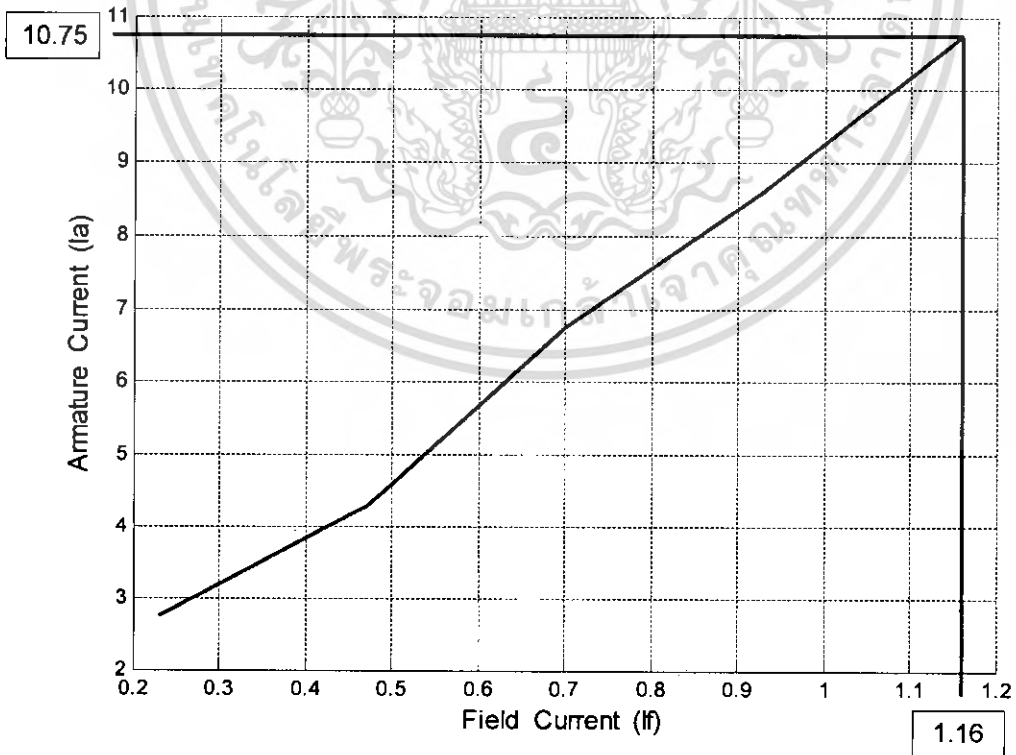
$X - U$ มีค่า 1.497 Ω

$Y - V$ มีค่า 1.503 Ω

$Z - W$ มีค่า 1.501 Ω



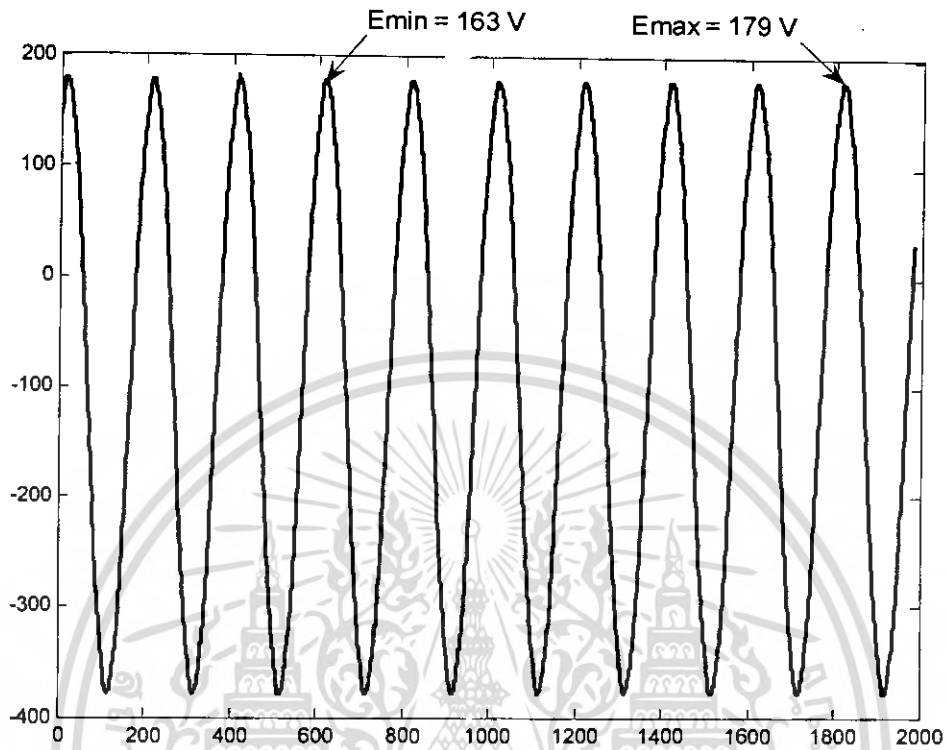
รูปที่ 3.9 การแสดงค่า I_{FG}



รูปที่ 3.10 การแสดงค่า I_{FSI}

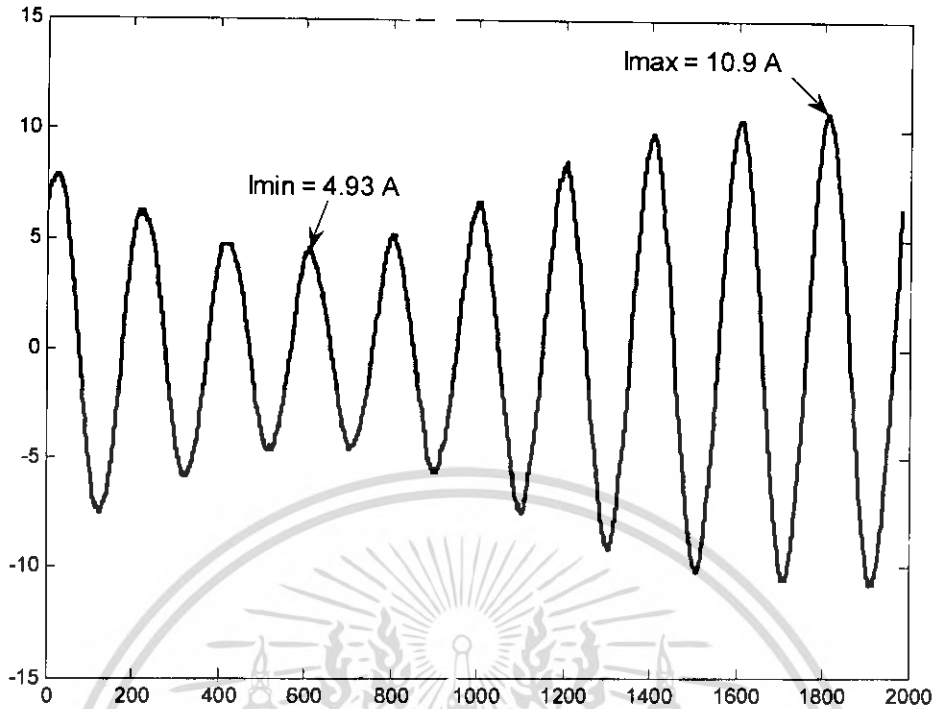
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบหาค่าความเหนี่ยวนำขึงโครนัสในแกน D และ Q (slip test)



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้า E_{max} และ E_{min}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงกระแส I_{max} และ I_{min}

3.4 แสดงการคำนวณตามมาตรฐาน

$$\text{จากรูปจะได้ว่า } E_{max} = 179 \text{ V} ; E_{min} = 163 \text{ V}$$

$$I_{max} = 10.9 \text{ A} ; I_{min} = 4.93 \text{ A}$$

การหาค่าความเหนี่ยวนำในแกน D จากผลการทดลองที่ได้ทำการเริ่มคำนวณค่าจาก สมการ

$$X_{du} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}}$$

$$= \frac{1.16}{0.202} = 5.74 \text{ p.u.}$$

จากสมการที่ 4.5 แทนค่าทั้งหมดได้ดังนี้

$$X_{qu} = X_{du} \left(\frac{E_{min}}{E_{max}} \right) \left(\frac{I_{min}}{I_{max}} \right)$$

$$= 5.74 \left(\frac{163}{179} \right) \left(\frac{4.93}{10.9} \right) = 2.364$$

เพราะฉะนั้นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_{du} = 5.74 \quad \text{p.u.}$$

$$X_{qu} = 2.36 \quad \text{p.u.}$$

3.41 การเปรียบเทียบเฟสเซอร์ไดอะแกรมระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และทางการทดสอบ

ในการเขียนเฟสเซอร์ไดอะแกรมจะใช้สมการ 2 สมการในการอ้างอิงในกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้าตามลำดับ

ก. เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

1. การคำนวณทางทฤษฎีเมื่อภาระไฟฟ้ามีมุมล่าหลัง (Lagging) จากสมการจะได้ว่า

$$\hat{V}_{ia} = \hat{E}_{afg} - \hat{I}_a R_a - (j\hat{I}_q X_q + j\hat{I}_d X_d)$$

เมื่อมีค่าฐาน $V_{ia} = 127 \text{ V}$, $I_a = 10.75 \text{ A}$, $R_a = \frac{127}{10.75} = 11.814 \Omega$

สามารถคำนวณและเขียนในทางทฤษฎีได้โดยคำนวณเป็น Per unit เมื่อ $V_{ia} = 127 \text{ V}$, $I_a = 2.27 \text{ A}$, มุม $\theta = 22.78^\circ$ ดังนั้น

$$V_{ia} = \frac{127}{127} = 1$$

$$I_a = \frac{2.27}{10.75} = 0.211$$

$$\hat{I}_a = 0.211 \angle -22.78^\circ$$

$$= 0.211 \cos(-22.78^\circ) + j0.211 \sin(-22.78^\circ)$$

$$= 0.1945 - j0.0816$$

$$R_a = \frac{1.497}{11.814} = 0.1266$$

$$\hat{I}_a R_a = 0.2109 \times 0.1266 = 0.0267$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หามุม δ จากการเพิ่มค่า $j\hat{I}_a X_q$ เพื่อหาค่า \hat{E}'_{afg} เป็นแกนอ้างอิงก่อนโดยจะได้สมการดังนี้

$$\hat{E}'_{afg} = V_{ta} + \hat{I}_a R_a + j\hat{I}_a X_{qu}$$

$$\begin{aligned}\hat{E}'_{afg} &= 1 + 0.1266(0.1945 - j0.0816) + j2.364(0.1945 - j0.0816) \\ &= 1.2176 + j0.4497 = 1.29 \angle 20.27^\circ\end{aligned}$$

จะได้มุม $\delta = 20.27^\circ$

นำค่ามุม δ ที่ได้ไปคำนวณหาค่า I_d และ I_q ดังนี้

$$I_d = |I_a| \sin(\theta + \delta) = 0.2109 \sin(22.78 + 20.27) = 0.144$$

$$I_q = |I_a| \cos(\theta + \delta) = 0.2109 \cos(22.78 + 20.27) = 0.154$$

$$\hat{I}_q = 0.154 \angle 20.27^\circ = 0.144 + j0.053$$

$$\hat{I}_d = 0.144 \angle (-90 - 20.27)^\circ = 0.0498 - j0.135$$

แทนค่าลงสมการหาค่า \hat{E}_{afg} จะได้ว่าจาก

$$V_{ta} = \hat{E}_{afg} - R_a \hat{I}_a - (jX_{qd} \hat{I}_q + jX_{du} \hat{I}_d)$$

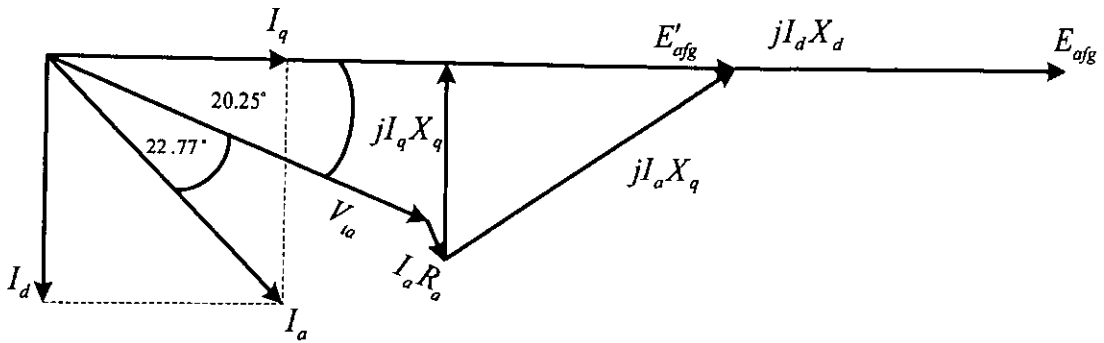
ได้ดังนี้

$$\hat{E}_{afg} = \hat{V}_{ta} + \hat{I}_a R_a + (j\hat{I}_q X_{qu} + j\hat{I}_d X_{du})$$

$$\hat{E}_{afg} = 1 + 0.1266(0.1945 - j0.0816) + j2.364(0.144 + j0.053) + j5.74(0.0498 - j0.135)$$

$$\hat{E}_{afg} = 1.6745 + j0.6161 = 1.78 \angle 20.20^\circ$$

เราสามารถนำค่าที่ได้จากคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก การวาดเฟสเซอร์ที่ตัวแปรต่างๆ จะได้จะได้รูปเฟสเซอร์ดังรูป



รูปที่ 3.13 เฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ภาระไฟฟ้าล้าหลัง

จากรูปที่ 3.11 เราสามารถวัดค่ามุมระหว่าง V_{ta} และ E'_{afg} ได้เท่ากับ 20.25° และทำการวัดขนาดของ E'_{afg} จากรูปที่ 3.11 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.76 Per Unit ซึ่งค่าที่ได้จากการวาดรูปนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณ เพราะฉะนั้นสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเราจึงสรุปได้ว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีจะได้ค่าที่เท่ากับค่าที่ได้จากการวัดด้วยมือ

2. การคำนวณทางทฤษฎีเมื่อภาระไฟฟ้ามีมุมเป็นศูนย์
ภาระไฟฟ้ามีมุมเป็นศูนย์เมื่อภาระไฟฟ้ามีเพียงความต้านทานเพียงอย่างเดียวเพราะฉะนั้นจะเหลือสมการเพียง

$$\hat{V}_{ta} = \hat{E}_a - \hat{I}_a R_a - (j\hat{I}_q X_q + j\hat{I}_d X_d)$$

$$\text{เมื่อมีค่าฐาน } V_{ta} = 127 \text{ V, } I_a = 10.75 \text{ A, } R_a = \frac{127}{10.75} = 11.814 \Omega$$

สามารถคำนวณและเขียนในทางทฤษฎีได้โดยคำนวณเป็น Per unit $V_{ta} = 127 \text{ V}$,
 $I_a = 1.65 \text{ A}$, มุม $\theta = 0^\circ$
ดังนั้น

$$V_{ta} = \frac{127}{127} = 1$$

$$I_a = \frac{1.65}{10.75} = 0.1534$$

$$\hat{I}_a = 0.1534 \angle 0^\circ = 0.1534$$

$$R_a = \frac{1.497}{11.814} = 0.1266$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{I}_a R_a = 0.1534 \times 0.1266 = 0.0194$$

หามุม δ จากการเพิ่มค่า $j\hat{I}_a X_q$ เพื่อหาค่า \hat{E}'_{afg} เป็นแกนอ้างอิงก่อนโดยจะได้สมการดังนี้

$$\hat{E}'_{afg} = V_{ta} + \hat{I}_a R_a + j\hat{I}_a X_{qu}$$

$$\begin{aligned}\hat{E}'_{afg} &= 1 + 0.0194 + j2.364(0.1534) \\ &= 1.0194 + j0.3626 = 1.082 \angle 19.580^\circ\end{aligned}$$

จะได้มุม $\delta = 19.580^\circ$

นำค่ามุม δ ที่ได้ไปคำนวณหาค่า I_d และ I_q ดังนี้

$$I_d = |I_a| \sin(\theta + \delta) = 0.1534 \sin(0 + 19.54) = 0.0514$$

$$I_q = |I_a| \cos(\theta + \delta) = 0.1534 \cos(-90 + 19.58) = 0.0514$$

$$\hat{I}_q = 0.0514 \angle 19.58^\circ = 0.0484 + j0.0172$$

$$\hat{I}_d = 0.0514 \angle (-90 - 19.58)^\circ = 0.0172 - j0.0848$$

แทนค่าลงสมการหาค่า \hat{E}'_{afg} จะได้ว่าจาก

$$V_{ta} = \hat{E}'_{afg} - R_a \hat{I}_a - (jX_{qd} \hat{I}_q + jX_{du} \hat{I}_d)$$

ได้ดังนี้

$$\hat{E}'_{afg} = \hat{V}_{ta} + \hat{I}_a R_a + (j\hat{I}_q X_{qu} + j\hat{I}_d X_{du})$$

$$\hat{E}'_{afg} = 1 + 0.0194 + j2.364(0.0484 + j0.0172) + j5.74(0.0172 - j0.0848)$$

$$\hat{E}'_{afg} = 1.0991 + j0.2131 = 1.119 \angle 10.972^\circ$$

ข. เฟสเซอร์ไดอะแกรมของซิงโครนัสมอเตอร์

1. การคำนวณทางทฤษฎีเมื่อภาระไฟฟ้ามีมุมนำหน้า (Leading)

จากสมการจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{V}_{ia} = \hat{E}_a + \hat{I}_a R_a + (j\hat{I}_q X_q + j\hat{I}_d X_d)$$

เมื่อมีค่าฐาน $V_{ia} = 127 \text{ V}$, $I_a = 10.75 \text{ A}$, $R_a = \frac{127}{10.75} = 11.814 \text{ } \Omega$

สามารถคำนวณและเขียนในทางทฤษฎีได้โดยคำนวณเป็น Per unit เมื่อ $V_{ia} = 127 \text{ V}$,
 $I_a = 5.47 \text{ A}$, $\theta = 47.7^\circ$
 ดังนั้น

$$V_{ia} = \frac{127}{127} = 1$$

$$I_a = \frac{5.47}{10.75} = 0.314$$

$$\hat{I}_a = 0.314 \angle 47.7^\circ$$

$$= 0.314 \cos(47.7^\circ) + j0.314 \sin(47.7^\circ)$$

$$= 0.2113 - j0.2628$$

$$R_a = \frac{1.497}{11.814} = 0.1266$$

$$X_{du} = 5.74$$

$$X_{qu} = 2.364$$

$$\hat{I}_a R_a = 0.314 \times 0.1266 = 0.0397$$

หามุม δ จากการเพิ่มค่า $j\hat{I}_a X_q$ เพื่อหาค่า \hat{E}'_{afm} เป็นแกนอ้างอิงก่อนโดยจะได้
 สมการดังนี้

$$\hat{E}'_{afm} = V_{ia} - \hat{I}_a R_a - j\hat{I}_a X_{qu}$$

$$\hat{E}'_{afm} = 1 - 0.1266(0.2113 - j0.2322) - j2.364(0.2113 - j0.2322)$$

$$= 1.5222 + j0.5288 = 1.611 \angle -19.15^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้มุม $\delta = -19.15^\circ$

นำค่ามุม δ ที่ได้ไปคำนวณหาค่า I_d และ I_q ดังนี้

$$I_d = |I_a| \sin(\theta - \delta) = 0.314 \sin(47.7 + 19.15) = 0.289$$

$$I_q = |I_a| \cos(\theta - \delta) = 0.314 \cos(47.7 + 19.15) = 0.122$$

$$\hat{I}_q = 0.122 \angle -19.915^\circ = 0.1152 - j0.04$$

$$\hat{I}_d = 0.289 \angle (90 - 19.15)^\circ = 0.0948 + j0.273$$

แทนค่าลงสมการหาค่า \hat{E}_{afm} จะได้ว่าจาก

$$V_{ta} = \hat{E}_{afm} - R_a \hat{I}_a - (jX_{qd} \hat{I}_q + jX_{du} \hat{I}_d)$$

$$\hat{E}_{afm} = \hat{V}_{ta} + \hat{I}_a R_a + (j\hat{I}_q X_{qu} + j\hat{I}_d X_{du})$$

$$\hat{E}_{afm} = 1 - 0.1266(0.2113 + j0.2322) - j2.364(0.1152 - j0.04) - j5.74(0.0948 + j0.273)$$

$$\hat{E}_{afm} = 2.4458 - j0.8456 = 2.587 \angle -19.07^\circ$$

2. การคำนวณทางทฤษฎีเมื่อภาระไฟฟ้ามีมุมล่าหลัง (Lagging)

จากสมการ จะได้ว่า

$$\hat{V}_{ta} = \hat{E}_{afm} + \hat{I}_a R_a + (j\hat{I}_q X_q + j\hat{I}_d X_d)$$

$$\text{เมื่อมีค่าฐาน } V_{ta} = 127 \text{ V}, I_a = 10.75 \text{ A}, R_a = \frac{127}{10.75} = 11.814 \Omega$$

สามารถคำนวณและเขียนในทางทฤษฎีได้โดยคำนวณเป็น Per unit เมื่อ $V_{ta} = 127 \text{ V}$,

$$I_a = 4.30 \text{ A}, \theta = -56^\circ$$

ดังนั้น

$$V_{ta} = \frac{127}{127} = 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_a = \frac{430}{10.75} = 0.4$$

$$\hat{I}_a = 0.4 \angle -56.0^\circ$$

$$= 0.4 \cos(-56.0^\circ) + j0.4 \sin(-56.0^\circ)$$

$$= 0.2236 - j0.1266$$

$$R_a = \frac{1.497}{11.814} = 0.1266$$

$$X_{du} = 5.74$$

$$X_{qu} = 2.364$$

$$\hat{I}_a R_a = 0.4 \times 0.1266 = 0.0506$$

หามุม δ จากการเพิ่มค่า $j\hat{I}_a X_q$ เพื่อหาค่า \hat{E}'_{afm} เป็นแกนอ้างอิงก่อนโดยจะได้
สมการดังนี้

$$\hat{E}'_{afm} = V_t - \hat{I}_a R_a - j\hat{I}_a X_{qu}$$

$$\hat{E}'_{afm} = 1 - 0.1266(0.2236 - j0.3316) - j2.364(0.2236 - j0.3316)$$

$$= 0.1878 - j0.4866 = 0.5215 \angle -69^\circ$$

จะได้มุม $\delta = -69^\circ$

นำค่ามุม δ ที่ได้ไปคำนวณหาค่า I_d และ I_q ดังนี้

$$I_d = |I_a| \sin(\theta - \delta) = 0.4 \sin(-56 + 69) = 0.089$$

$$I_q = |I_a| \cos(\theta - \delta) = 0.4 \cos(-56 + 69) = 0.389$$

$$\hat{I}_q = 0.389 \angle -69^\circ = 0.139 - j0.363$$

$$\hat{I}_d = 0.289 \angle -(90 - 69)^\circ = -0.093 + j0.036$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าลงสมการหาค่า \hat{E}_{afg} จะได้ว่าจาก

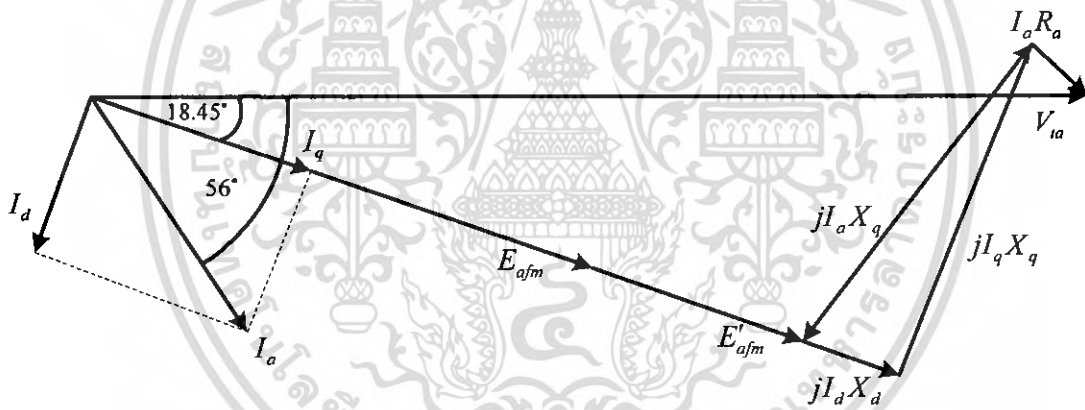
$$V_{ia} = \hat{E}_{afg} - R_a \hat{I}_a - (jX_{qd} \hat{I}_q + jX_{du} \hat{I}_d)$$

$$\hat{E}_{afm} = \hat{V}_{ia} + \hat{I}_a R_a + (j\hat{I}_q X_{qu} + j\hat{I}_d X_{du})$$

$$\hat{E}_{afm} = 1 - 0.1266(0.2263 + j0.3316) - j2.364(0.139 - j0.3634) - j5.74(-0.0694 + j0.3285)$$

$$\hat{E}_{afm} = -0.0694 - j0.1898 = 2.02 \angle 110.08^\circ$$

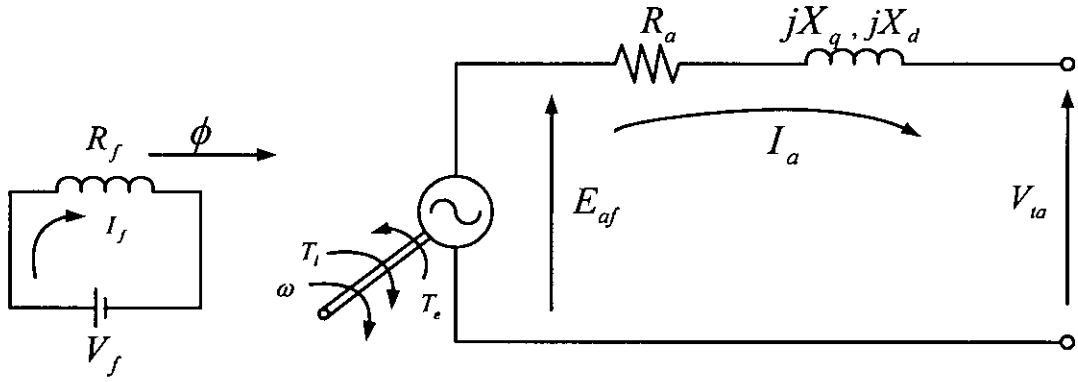
เราสามารถนำค่าที่ได้จากคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวาดเฟสเซอร์ที่ตัวแปรต่างๆ จะได้รูปเฟสเซอร์ดังรูป



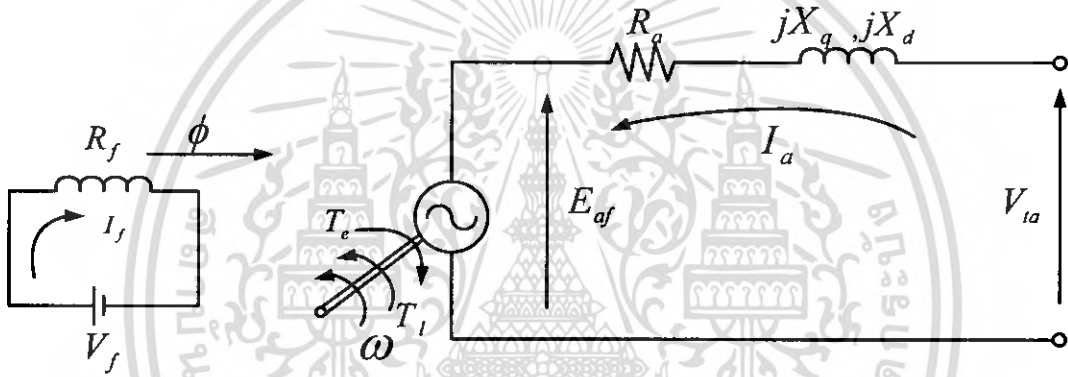
รูปที่ 3.14 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ภาระไฟฟ้าล้าหลังจากการวัด

จากรูปเฟสเซอร์ เราสามารถวัดค่ามุมระหว่าง V_{ia} และ E_{afg} ได้เท่ากับ -31.2° และทำการวัดขนาดของ E_{afg} จากรูปเฟสเซอร์ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 2.37 Per Unit ซึ่งค่าที่ได้จากการวาดรูปนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากการคำนวณ เพราะฉะนั้นสำหรับซิงโครนัสมอเตอร์เราจึงอาจสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีจะได้ค่าที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากวัดด้วยมือ

เมื่อได้เฟสเซอร์ไดอะแกรมแล้วเราสามารถเขียนอยู่ในรูปของวงจรมุมูล ได้ทั้งในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและกรณีมอเตอร์ไฟฟ้าดังรูป



รูปที่ 3.15 (ก) วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



รูปที่ 3.15 (ข) วงจรสมมูลซิงโครนัสมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

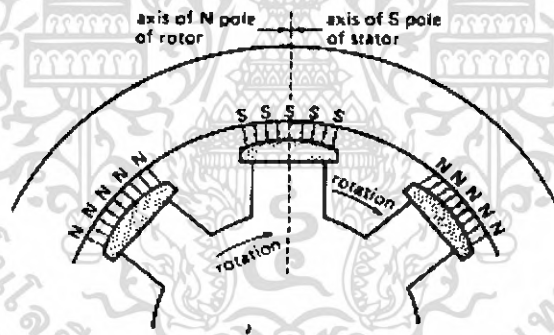
บทที่ 4

การทดสอบหามุมโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัส

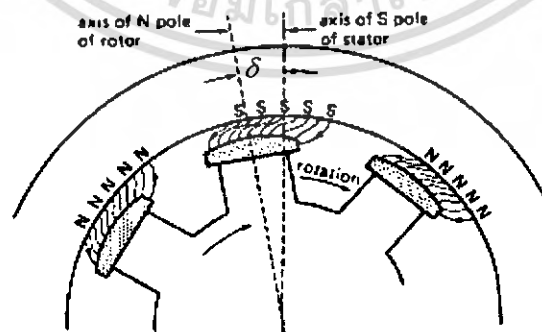
4.1 คุณลักษณะของมุมโรเตอร์หรือมุมของแรงบิดเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส

4.1.1 การป้อนโหลดให้กับมอเตอร์ซิงโครนัส ขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์เกิดการดึงดูดกับขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์แต่ไม่ได้ดึงดูดติดกันแน่นจนอย่างถาวร เมื่อโหลดของมอเตอร์เพิ่มขึ้นโรเตอร์จะเลื่อนถอยหลังเป็นมุมๆ หนึ่ง แต่ความเร็วไม่ได้ช้าลงและยังคงหมุนต่อไปด้วยความเร็วซิงโครนัสแต่ตำแหน่งมุมที่โรเตอร์เลื่อนจากสเตเตอร์ดังรูปที่ 4.1 มุมโรเตอร์หรือมุมแรงบิดซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของโหลด แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นก็ขึ้นอยู่กับมุมๆ นี้ เราเรียกว่า δ (เดลต้า)

4.1.2 การจ่ายโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีลักษณะคล้ายมอเตอร์ซิงโครนัสแต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะเป็นการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด ดังนั้นลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อขณะไม่จ่ายโหลดนั้นขั้วแม่เหล็กที่สเตอรรกับโรเตอร์จะหมุนไปพร้อมกันแต่ เมื่อทำการจ่ายโหลด (ขึ้นอยู่กับโหลดด้วย) โรเตอร์ก็จะมีความเร็วลดลงดังนี้เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วคงที่ที่ต้องการขับเคลื่อนกำลังให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหมุนให้ได้ที่พิกัด จึงทำให้โรเตอร์หมุนเร็วขึ้นส่งผลให้มีมุมที่แตกต่างกับสเตอร์



(ก) ขณะไม่มีโหลด



(ข) ขณะมีโหลด

รูปที่ 4.1 ขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ที่เป็นเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสขณะมีโหลดและไม่มีโหลด

จากการทำงานของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดมุมระหว่างขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์มุมนี้เรียกว่า มุมโรเตอร์ (δ) เมื่อเริ่มเดินเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสที่ความเร็วพิกัดจะเห็นได้ว่าขณะเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสไม่มีโหลดหรือโหลดเบาๆ จะเห็นมุมโรเตอร์ (δ) มีขนาดเล็กมาก แต่เมื่อทำการจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นมุมโรเตอร์จะมีขนาดเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.1 (ข)

4.2 การศึกษาแรงบิด

ค่าแรงบิดที่ได้จะคิดมาจากค่าการสูญเสียขณะที่เปลี่ยนกำลังทางกลเป็นกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กยื่นซึ่งจะต้องเท่ากับกำลังที่จ่ายภาวะ

$$3P_d = 3V_{ta}I_a \cos \theta \quad (4.1)$$

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในบทที่ 3

$$I_q X_q = V_{ta} \sin \delta \quad \text{หรือ} \quad I_q = \frac{V_{ta} \sin \delta}{X_d} \quad (4.2)$$

$$I_d X_d = E_{of} - V_{ta} \cos \delta \quad \text{หรือ} \quad I_d = \frac{E_{of} - V_{ta} \cos \delta}{X_d} \quad (4.3)$$

$$I_a \cos \theta = I_d \sin \delta + I_q \cos \delta \quad (4.4)$$

แทนค่าสมการ 4.2, 4.3 และ 4.4 ลงใน 4.1

$$I_a \cos \theta = \frac{E_{of} \sin \delta}{X_d} + \frac{V_{ta} (X_d - X_q) \sin(2\delta)}{2X_d X_q} \quad (4.5)$$

เมื่อหมุนด้วยความเร็ว ω จะเกิดแรงบิด

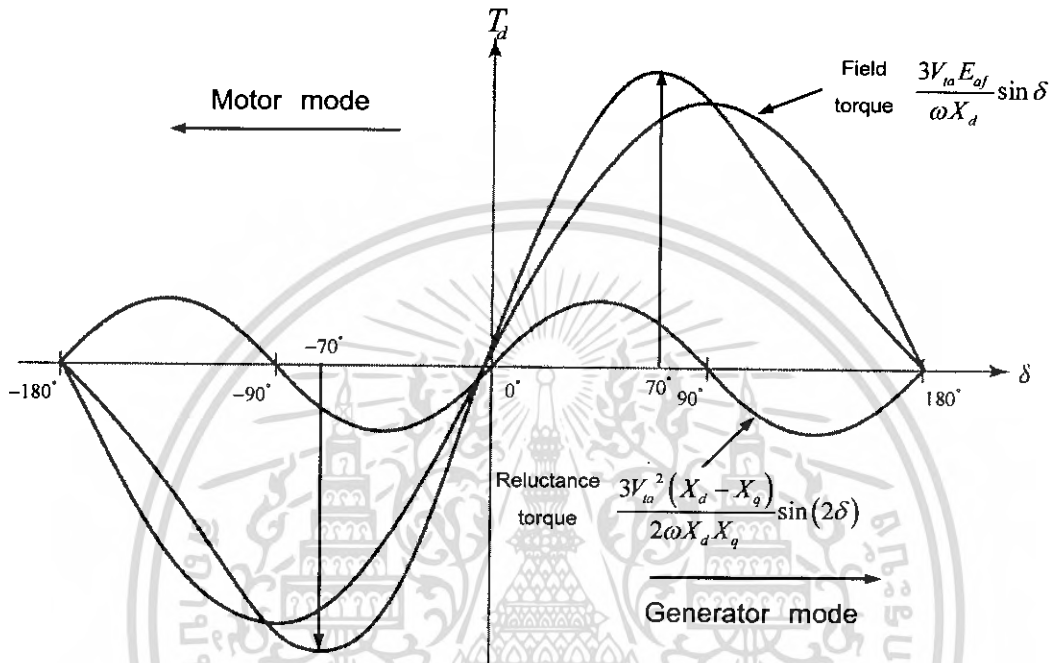
$$3T_d = \frac{3P_d}{\omega s} = \frac{3V_{ta} E_{of} \sin \delta}{\omega s X_d} + \frac{3V_{ta}^2 (X_d - X_q) \sin(2\delta)}{2\omega s X_d X_q} \quad (4.6)$$

ซึ่งจากสมการสมการที่ 4.4 เห็นได้ว่าพจน์แรกของสมการจะเหมือนกับสมการที่ 2.56 ทุกประการยกเว้น X_s ที่ถูกแทนที่ด้วย X_d จึงกล่าวได้ว่าพจน์แรกของสมการเป็นพจน์แรกของโรเตอร์ทรงกระบอกส่วนพจน์หลังเกิดจากความเป็นเซเลี่ยนส์โพลของโรเตอร์ ซึ่งค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานแม่เหล็กในช่องอากาศของแกน d และ q มีค่าไม่เท่ากัน เราจึงเรียกพจน์ที่สองของสมการนี้ว่า แรงบิดรีลักแตนซ์จากรูปที่ 4.1 แสดงเส้นโค้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ ค่าแรงบิดจะมีค่าสูงหรือลดเป็นผลเนื่องมาจากค่าของ δ ดังนั้น $\delta = 70^\circ$ จึงเป็นตำแหน่งที่สูงสุด

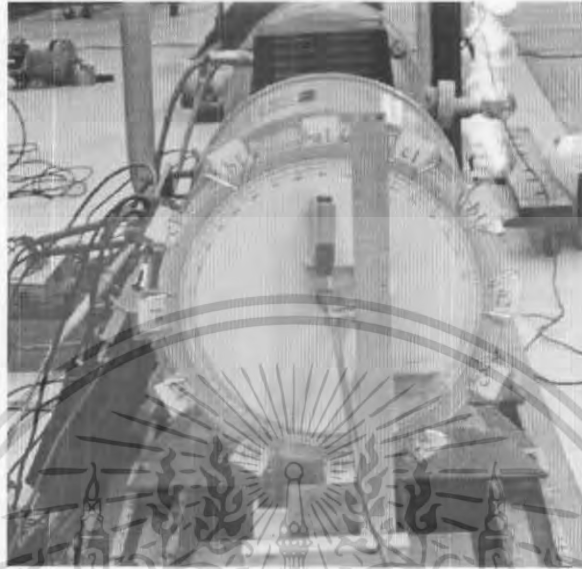
จากสมการที่ 4.6 จะได่กราฟดังนี้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์แรงบิดกับมุมกำลังของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสแบบเซเลียท์โพล

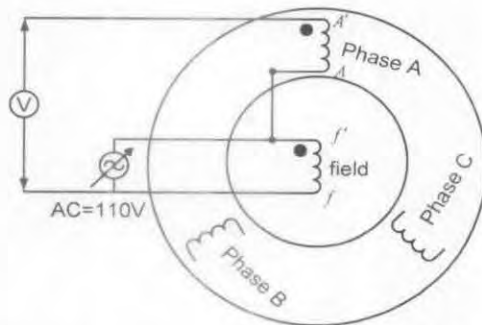
4.2 วิธีการหาตำแหน่งในการติดตั้งเซ็นเซอร์

ทำได้โดยติดแผ่นวงกลมดัดลักษณะดังรูปที่ 4.3 เพื่อทำการกำหนดตำแหน่งของขดลวดในแต่ละเฟส(เฟส a เฟส b และเฟส c) เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงในการทดสอบดังรูปที่ 4.3



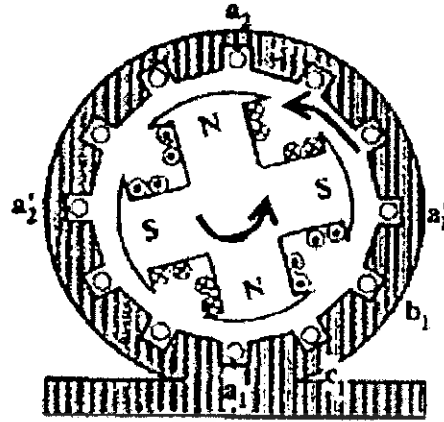
รูปที่ 4.3 ลักษณะแผ่นวงกลมที่ติดตั้งกับแกนโรเตอร์

4.2.1 phase sequence การหา phase sequence ทำได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ($AC=110V$) ให้กับขดลวดฟิลด์ซึ่งขดลวดฟิลด์ต่ออนุกรมกับขดลวดเฟส A ดังนั้นถ้าทิศทางของสนามแม่เหล็กเล็ริมกันจะทำให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขดลวดฟิลด์และขดลวดเฟส A มีแรงดันเพิ่มขึ้นโดยจะพิจารณาทั้งสามเฟสและกำหนดขั้วสนามแม่เหล็ก เพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดมีทิศทางเดียวกันเมื่อต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า ในลักษณะนี้เมื่อมีกระแสไหลเข้า I_a, I_b และ I_c ที่เป็น positive sequence โหลดในขดลวด armature winding แบบสามเฟส จะเกิดฟลักแม่เหล็กเนื่องจากกระแส positive sequence ซึ่งจะหมุนไปในทิศทางเดียวกับทิศทางหมุนของโรเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสและจะหมุนไปด้วยกันกับสนามแม่เหล็กเนื่องจากขดลวดฟิลด์ดังรูปที่ 4.4



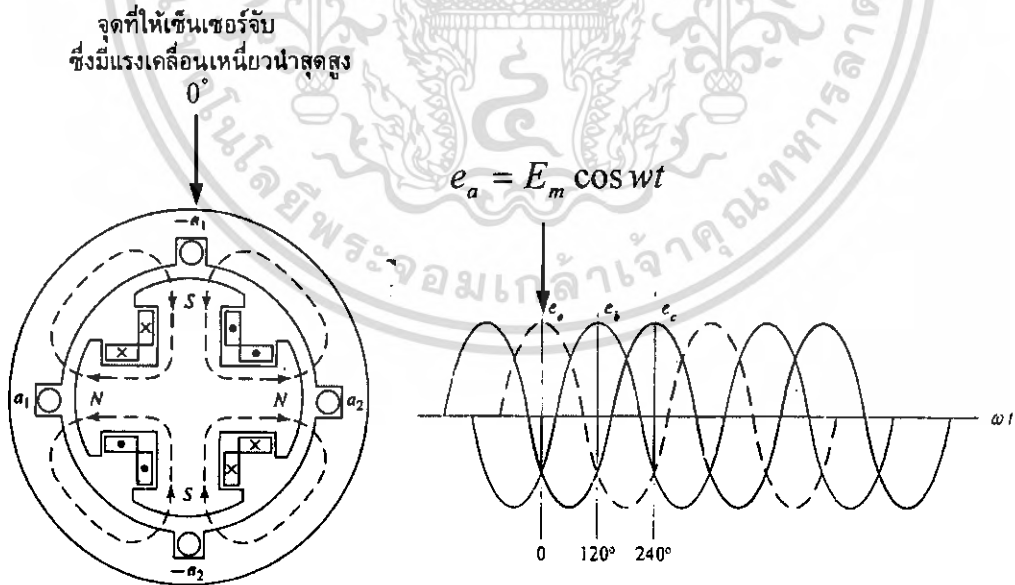
รูปที่ 4.4 แสดงการหา positive sequence และโพลาริตี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



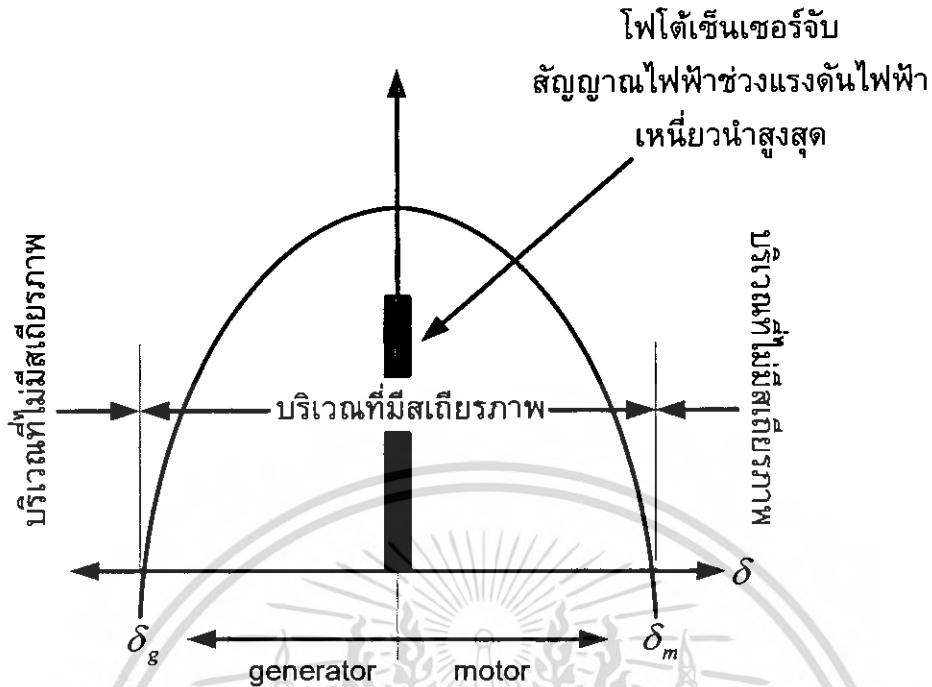
รูปที่ 4.5 แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กหมุนตามกัน

4.2.2 กำหนดตำแหน่งจุดที่ใช้เซ็นเซอร์วัด หาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงสุดโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าขดลวดฟิลด์ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็ก N และ S จากนั้นก็ขับเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสทำให้โรเตอร์หมุนเพื่อให้นามแม่เหล็กของโรเตอร์ตัดกับขดลวดสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำการวัดหาจุดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงสุด ซึ่งในการทดลองเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสมีขั้วแม่เหล็กแบบเซเลียน 4 ขั้วดังนั้นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นจึงมี 4 ลูกคลื่น ในการทดลองจะใช้ตำแหน่ง $-a_1$ เป็นตำแหน่งอ้างอิง ที่มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงสุดจึงกำหนดให้ติดตั้งเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งนี้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งจุดที่ใช้เซ็นเซอร์วัด

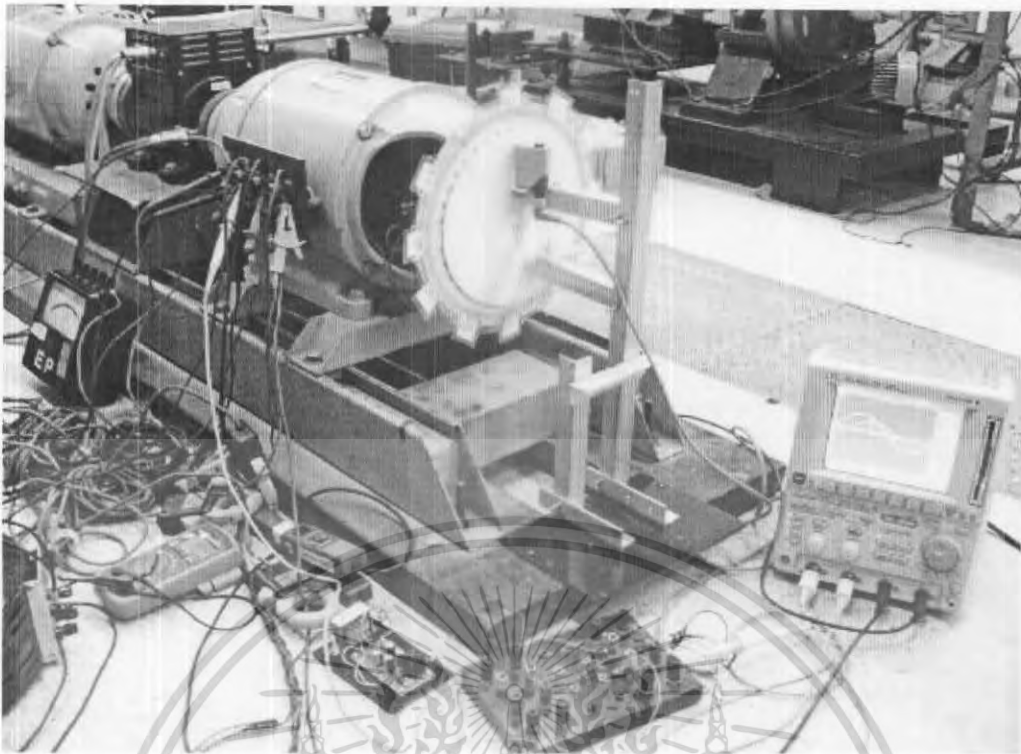
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณที่โพลิตเซ็นเซอร์ที่จับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

4.3 การวัดมุมโรเตอร์มีอยู่ 2 วิธี

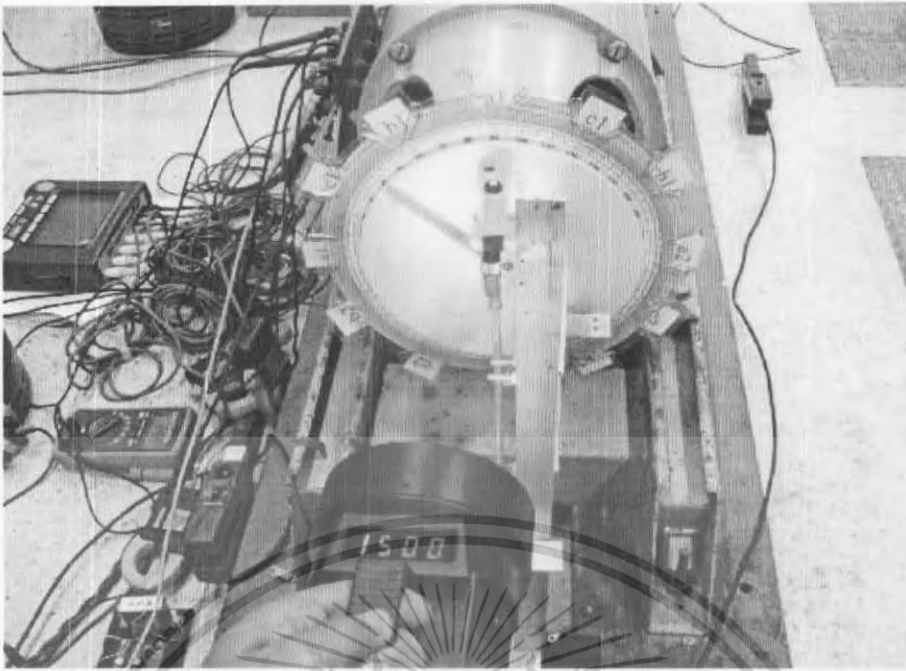
4.3.1. การวัดด้วยอิเล็กทรอนิกส์จากรูปที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ที่แผ่นวงกลมที่ติดกับแกนโรเตอร์และหาตำแหน่งจะติดตั้งเซ็นเซอร์จากหัวข้อ 4.2 จากนั้นทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสโดยใช้สโคปจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณของเซ็นเซอร์ ซึ่งขณะไม่โหลดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสกับสัญญาณของเซ็นเซอร์จะอยู่ที่จุดอ้างอิง ($\delta = 0^\circ$) เมื่อทำการจ่ายโหลดที่พิกัดต่างๆ มุมโรเตอร์ก็จะห่างจะตำแหน่งอ้างอิงเมื่อเปรียบกับขณะไม่มีโหลด ซึ่งมีทิศทางของสัญญาณดังรูปที่ 4.7 ถ้าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีทิศทางเคลื่อนไปทางด้านซ้ายเพราะดันกำลังที่ขั้วจะต้องเพิ่มมากเพื่อทำการจ่ายโหลดตามพิกัด ดังนั้นขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์จะนำหน้าขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ในกรณีที่เป็นมอเตอร์ซิงโครนัสจะทำการขั้วโหลดจึงทำให้ขั้วของโรเตอร์เคลื่อนที่ถอยไปข้างหลังขั้วสเตเตอร์ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 แสดงการวัดมุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์

4.3.2. การใช้สโตโบสโคป ซึ่งวิธีแบบนี้เป็นการวัดโดยใช้ไฟกระพริบที่ความถี่ของการเคลื่อนไหวกจากตำแหน่งที่จับ ไฟกระพริบที่ส่งกระทบการเคลื่อนไหวกในความเร็วต่างๆ จะประมวลผลโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในของเครื่องวัดและแสดงการเคลื่อนไหวกออกมาเป็นภาพหยุดนิ่ง ในการทดสอบการเปลี่ยนตำแหน่งโรเตอร์สามารถจะแสดงมุมที่เกิดขึ้นขณะไม่มีโหลดกับมีโหลด เนื่องจากว่าเมื่อโหลดมีภาระเปลี่ยนแปลง จะมีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้า $P.F.$ และแรงดันไฟฟ้า การเปลี่ยนตำแหน่งในโรเตอร์สามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสัญญาณเวลาระหว่างการมองเห็นที่เครื่องมือวัดและแรงดันไฟฟ้าช่วงปลายของ wave form สัญญาณที่เกิดขึ้นที่มองเห็นจากเครื่องมือวัดคือการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วช่วงปลายคลื่น การใช้สโตโบสโคปจะเกิดปัญหาในด้านการปรับการความถี่โดยที่การใช้สโตโบสโคปวัดค่ามุมของโรเตอร์นั้นค่าความถี่ที่สโตโบสโคปจะต้องมีค่าเท่ากับความถี่ของเครื่องจักรจึงในการปรับค่าความถี่ของสโตโบสโคปนั้นเป็นเรื่องยากจึงเป็นที่มาของการทดลองดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



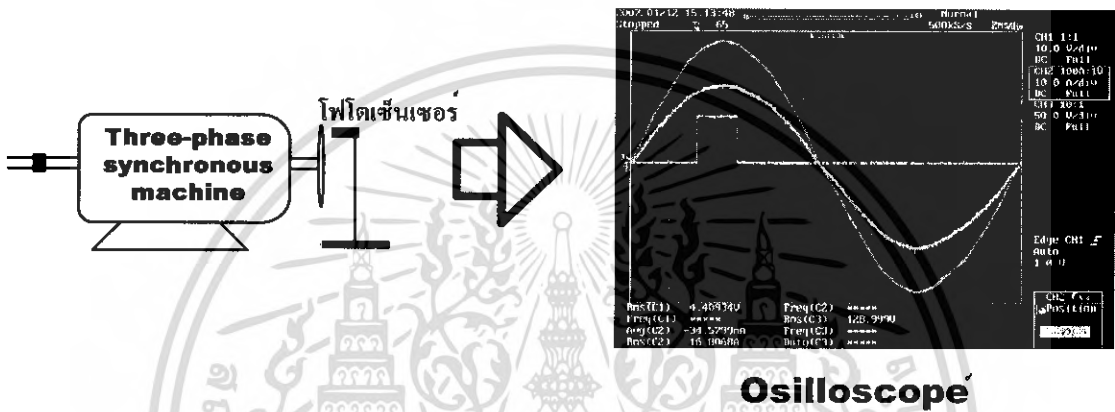
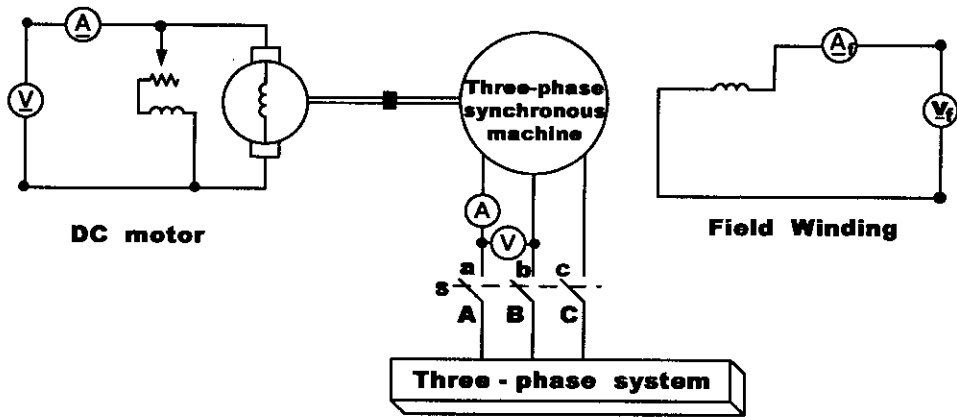
รูปที่ 4.9 การใช้สโตนโครวัตต์มอเตอร์

การทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส

อุปกรณ์ในการทดลอง

- | | |
|---|-----------|
| 1. Synchronous machine - DC motor | 1 ชุด |
| 2. oscilloscope | 1 ชุด |
| 3. Bridge Rectifier | 4 ชุด |
| 4. โฟโตเซนเซอร์ - วงจรที่ใช้ร่วมกับโฟโตเซนเซอร์ | 1 ชุด |
| 5. Transformer 220-220 V | 1 เครื่อง |
| 6. Transformer 0-15 V | 1 เครื่อง |
| 7. Variast | 4 เครื่อง |
| 8. Current probe | 1 ชุด |
| 9. Volt probe | 1 ชุด |
| 10. wattmeter | 1 เครื่อง |
| 11. DC Amp meter | 2 เครื่อง |
| 12. DC Volt meter | 2 เครื่อง |
| 13. แผงหลอดไฟฟ้า (ขนาด 100 W), Balas | 1 ชุด |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 วงจรการทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ขั้นตอนการทดลองเมื่อให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1. ที่ DC MOTOR

- ทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับขดฟิลต์ $V_f = 220V$

- ทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับขดอาเมเจอร์จนกว่าความเร็วของ DC motor เท่ากับความเร็วที่พิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ($n_s = 1500 \text{ rpm}$)

2. ที่ Synchronous machine

- ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดฟิลต์ (V_f) ที่ค่าๆ ค่าหนึ่งโดยที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกเท่ากับ $127V (V_{ia})$ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออก (V_{ia}) จะต้องคงที่ตลอดในการทดลอง

3. ทำการบันทึกค่าลงในตาราง และนำข้อมูลจากตารางไปทำการ Plot กราฟเพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าคำนวณหา δ จากค่า

ตารางที่ 4.8 ค่าผลการทดลองขณะที่มี LOAD R เพียงอย่างเดียว

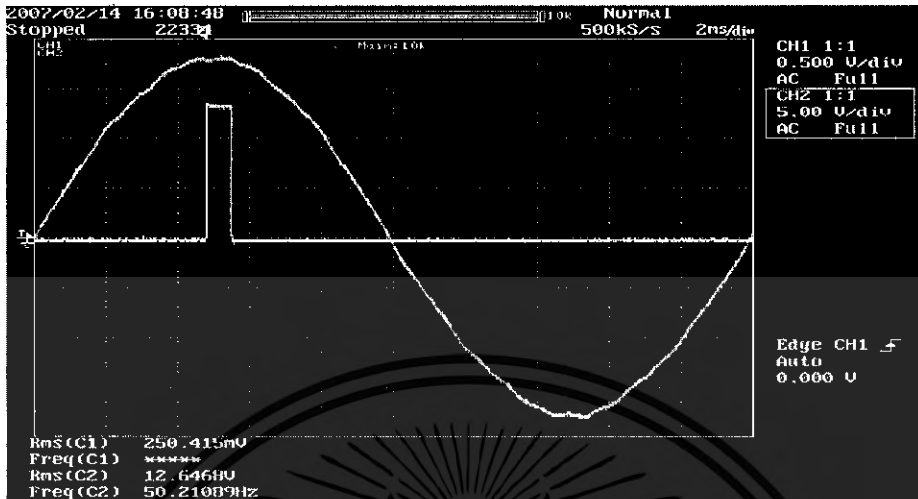
load	V_{ta}	I_a	V_f	I_f	$P(W)$	$S(VA)$	$Q(VAR)$	$p.f$
no load	127	0	23.97	0.340	-	-	-	-
หลอดไฟ 6 หลอด	127	0.65	23.97	0.340	260	260	-	1
หลอดไฟ 12 หลอด	127	1.33	24.43	0.364	510	510	-	1
หลอดไฟ 18 หลอด	127	1.65	27.23	0.378	730	730	-	1

ตารางที่ 4.9 ค่าผลการทดลองขณะที่มี LOAD R-L

Load	V_{ta}	I_a	V_f	I_f	$P(W)$	$S(VA)$	$Q(VAR)$	$p.f$
no load	127	0	23.30	0.30	-	-	-	-
หลอดไฟ 6 หลอด บัลลัสต์ 1 ชุด	127	0.73	26.31	0.34	270	290	100	0.93
หลอดไฟ 1 หลอด บัลลัสต์ 2 ชุด	127	1.51	30.56	0.40	530	570	220	0.92
หลอดไฟ 18 หลอด บัลลัสต์ 3 ชุด	127	2.27	35.02	0.46	790	850	330	0.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลจากออสซิลอสโคปไปทำการ plot กราฟเพื่อหาดำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ซึ่งได้แสดงรูปตำแหน่งการเคลื่อนที่กับระยะห่างของมุมที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.10 และ 4.11

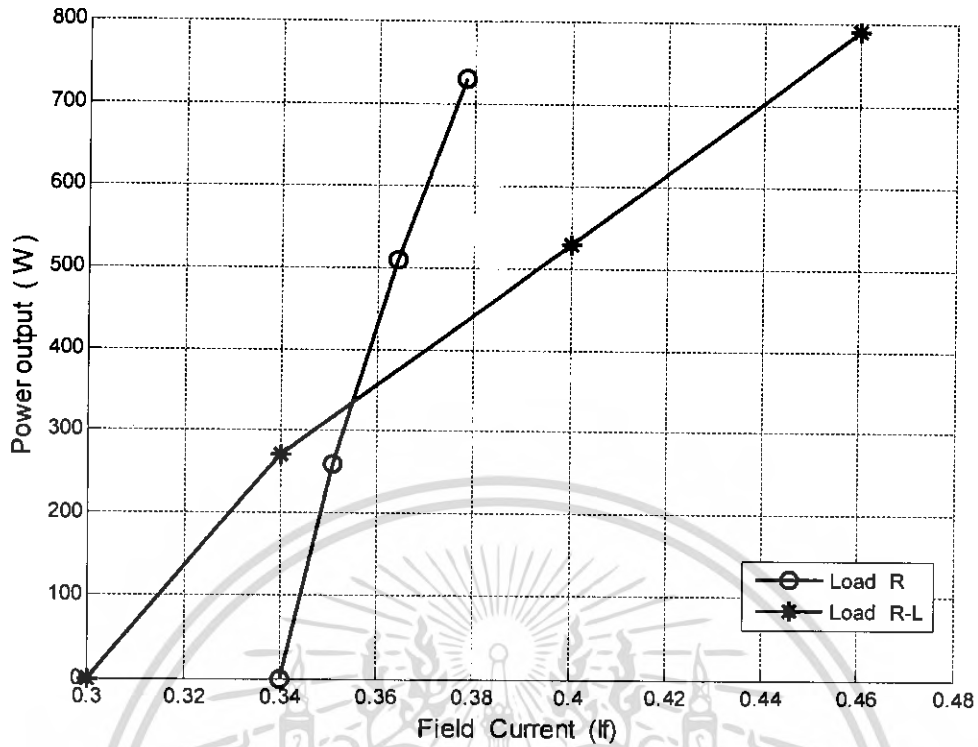


รูปที่ 4.11 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสขณะ no - load มีค่ามุม $\delta_m = 0^\circ$



รูปที่ 4.12 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสขณะ on - load มีค่ามุม $\delta_m = 15.36^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงกำลังไฟฟ้ากับกระแสวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การคำนวณของมุมโรเตอร์ (Calculational angle (δ)) จากค่า Parameter

จากมุมแรงบิด δ_e ระหว่างขั้วโรเตอร์และสเตเตอร์จะเป็นการวัดมุมทางไฟฟ้าแต่ก็สามารถคำนวณมุมทางกล δ_m จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\delta_m = \frac{2\delta_e}{P} \text{ mechanical}^\circ \quad (4.7)$$

จากมุมทางไฟฟ้า

$$\delta_e = \tan^{-1} \left[\frac{|I_a| R_a \sin \phi + |I_a| X_{qu} (\cos \phi)}{|E_a| + |I_a| R_a \cos \phi - |I_a| X_{qu} (\sin \phi)} \right] \quad (4.8)$$

การคำนวณเป็น Per Unit

1. Generator

1.1 ขณะ No-Load

เมื่อมีค่ามาตรฐาน

$$V = 127 \text{ V}, I = 10.75 \text{ A}, R_a = \frac{127}{10.75} = 11.814 \text{ } \Omega$$

สามารถคำนวณและเขียนในทางทฤษฎีได้โดยคำนวณเป็น Per Unit เมื่อ $V_t = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$

, $I_a = 0 \text{ A}$, $\phi = 0^\circ$,

$$E_a = \frac{127}{127} = 1 \text{ p.u.}$$

$$I_a = \frac{0}{10.75} = 0 \text{ p.u.}$$

$$R_a = \frac{1.497}{11.817} = 0.12 \text{ p.u.}$$

$$X_{qu} = 2.50 \text{ p.u.}$$

$$X_{du} = 5.74 \text{ p.u.}$$

แทนค่าลงในสมการ (1)

$$\delta_e = \tan^{-1} \left[\frac{|0|(0.12)(\sin 0^\circ) + |0|2.5(\cos 0^\circ)}{|1| + |0|(0.127)(\cos 0^\circ) - |0|(2.50)(\sin 0^\circ)} \right]$$

$$\delta_e = \tan^{-1} \left(\frac{0}{1} \right)$$

$$\delta_e = 0^\circ$$

$$\delta_m = \frac{2(0)}{4}$$

$$\delta_m = 0^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 มีภาระทางไฟฟ้า (R - L)

เมื่อมีค่ามาตรฐาน

$$V = 127 \text{ V} , I = 10.75 \text{ A} , R_a = \frac{127}{10.75} = 11.814 \ \Omega$$

สามารถคำนวณและเขียนในทางทฤษฎีได้โดยคำนวณเป็น Per Unit เมื่อ $V_r = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$,

$$I_a = 2.27 \text{ A} , \phi = 23.07^\circ$$

$$E_a = \frac{127}{127} = 1 \quad p.u$$

$$I_a = \frac{2.27}{10.75} = 0.21 \quad p.u$$

$$R_a = \frac{1.497}{11.817} = 0.12 \quad p.u$$

$$X_{gu} = 2.50 \quad p.u$$

$$X_{du} = 5.74 \quad p.u$$

แทนค่าลงในสมการ (1)

$$\delta_e = \tan^{-1} \left[\frac{|0.21|(0.12)(\sin 23.07^\circ) + |0.21|(2.5)(\cos 23.07^\circ)}{|1 + |0.21|(0.127)(\cos 23.07^\circ) - |0.21|(2.5)(\sin 23.07^\circ)} \right]$$

$$\delta_e = \tan^{-1} \left(\frac{0.493}{0.818} \right)$$

$$\delta_e = 31.07^\circ$$

$$\delta_m = \frac{2(31.07)}{4}$$

$$\delta_m = 15.53^\circ$$

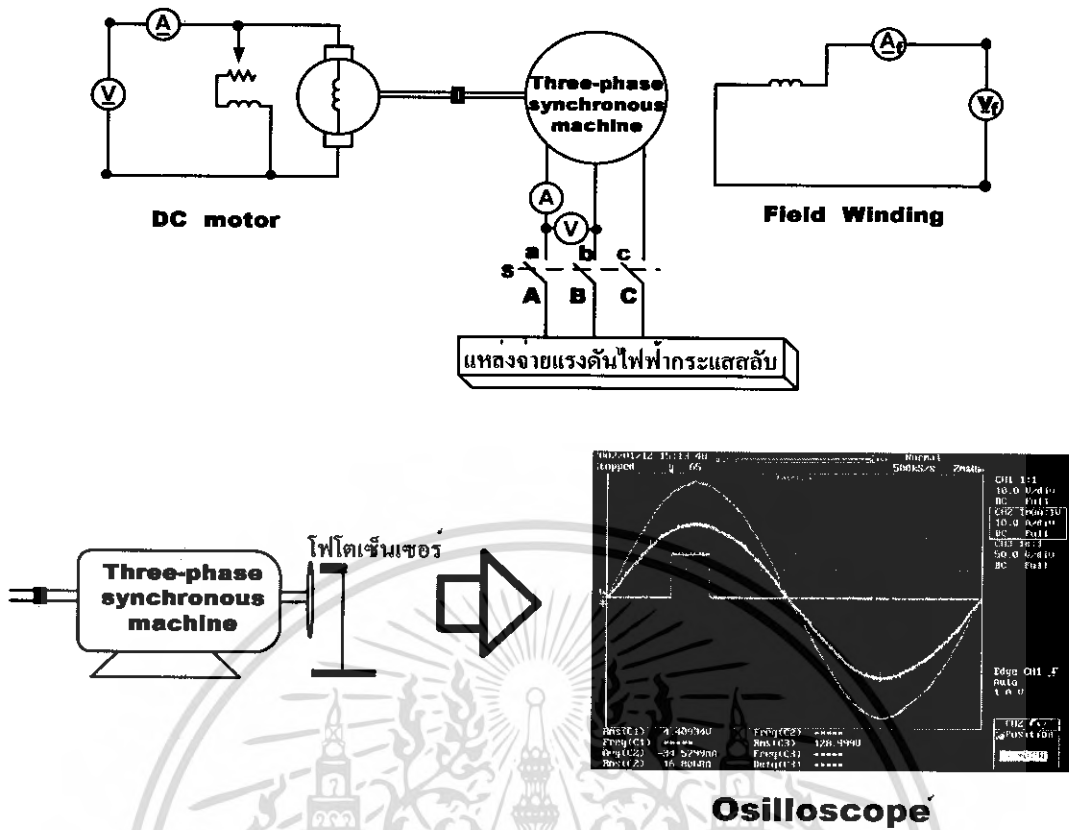
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. Synchronous machine - DC motor	1 ชุด
2. oscilloscope	1 ชุด
3. Bridge Rectifier	4 ชุด
4. โฟโตเซนเซอร์ - วงจที่ใช้ร่วมกับโฟโตเซนเซอร์	1 ชุด
5. Transformer 220–220 V	1 เครื่อง
6. Transformer 0–15 V	1 เครื่อง
7. Variast	4 เครื่อง
8. Current probe	1 ชุด
9. Volt probe	1 ชุด
10. wattmeter	1 เครื่อง
11. DC Amp meter	2 เครื่อง
12. DC Volt meter	2 เครื่อง
13. แผงหลอดไฟฟ้า (ขนาด 100 W)	1 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 วงจรการทดลองซิงโครนัสมอเตอร์

ขั้นตอนการทดลองเมื่อให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า

1. ที่ DC MOTOR

- ทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับขดฟิลด์ $V_f = 220 \text{ V}$
- ทำการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับขดอาเมเจอร์จนกว่าความเร็วของ DC motor เท่ากับความเร็วที่พิกัดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ($N_s = 1480 \text{ rpm}$)

2. ที่ Synchronous machine

- ป้อนแรงดันไฟฟ้าไฟกระแสสลับ (3 phase) ต่อแบบ star ให้กับ Synchronous motor โดยทำการพิจารณาตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

2.1 N_s จะต้องเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า

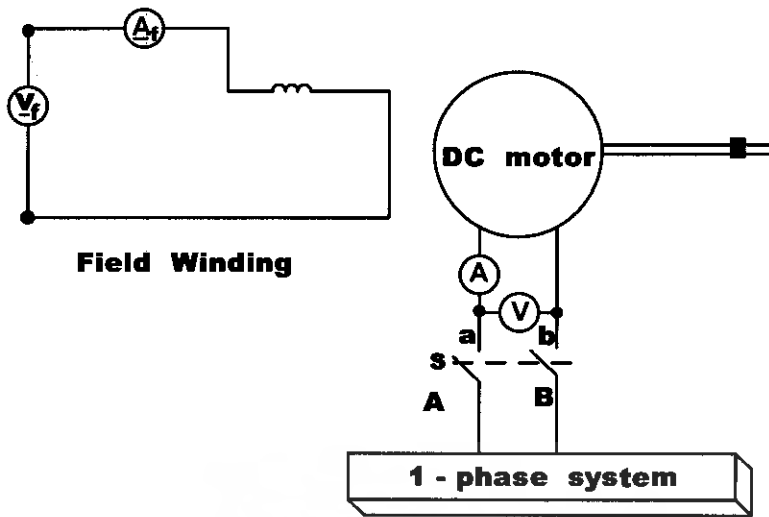
2.2 I_L จะต้องไม่เกินที่พิกัด, แรงดันไฟฟ้าที่ขดฟิลด์จะต้องเท่ากับศูนย์ ($V_f = 0$)

2.3 หากไม่เป็นไปตามในหัวข้อที่ 1. กับ หัวข้อที่ 2. ให้ทำการสลับสายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ Synchronous motor

2.4 หากเป็นไปตามในหัวข้อที่ 1. กับ หัวข้อที่ 2. ให้ทำการทดลองในหัวข้อที่ 3.

2.5 หากไม่เป็นไปตามในหัวข้อที่ 1. กับ หัวข้อที่ 2. ห้ามทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่ Synchronous motor เด็ดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 วงจรการทดลอง DC motor

3. เมื่อ Synchronous motor ซึ่งเข้ากับระบบแล้วให้ทำการตัดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ป้อนให้กับขดลวดแม่เหล็กของ DC motor หลังจากนั้น ให้ DC motor จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้า
4. ทำการทดลองและบันทึกค่าลงในตาราง และนำข้อมูลจากตารางไปทำการ Plot กราฟเพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ (δ) จากค่า Parameter

ตารางที่ 4.14 ค่าผลการทดลองขณะรับภาระทางไฟฟ้า (โหลดไฟ 1 ดวง)

ตารางการทดลองหม้อมอเตอร์ที่เป็นมอเตอร์ซิงโครนัส

ตาราง การทดลองโหลดไฟ 1 ดวง

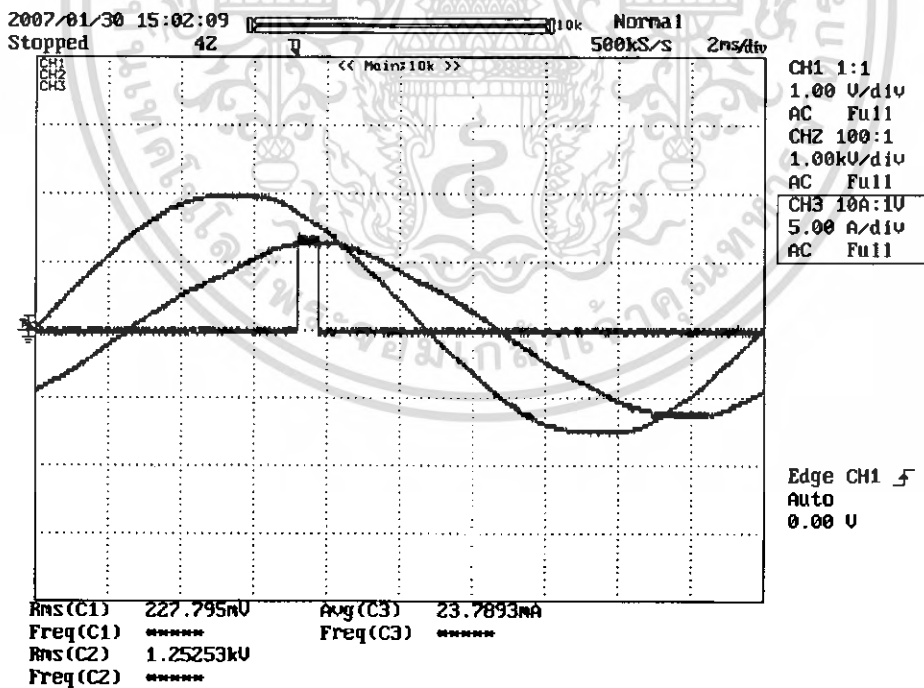
I_f	V_f	I_a	V_a	$P(kW)$	$Q(kW)$	$S(kW)$	$p.f$	θ°
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.1	8.52	1.84	127	0.37	0.63	0.74	0.510	60.0 lag
0.2	16.41	1.19	127	0.35	0.31	0.48	0.754	40.7 lag
0.3	23.61	0.92	127	0.35	0.00	0.35	0.989	8.1 lag
0.4	30.53	1.27	127	0.36	0.34	0.50	0.715	45.1 lead
0.5	38.58	2.02	127	0.36	0.69	0.77	0.450	60.8 lead
0.6	45.50	2.68	127	0.40	0.99	1.06	0.341	67.9 lead
0.7	53.32	3.43	127	0.46	1.32	1.33	0.298	71.3 lead
0.8	60.42	4.25	127	0.62	1.58	1.72	0.298	72.13 lead
0.9	68.7	5.57	127	0.97	1.96	2.13	0.391	74.4 lead

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ค่าผลการทดลองขณะรับภาระทางไฟฟ้า(โหลดไฟ 35 ดวง)

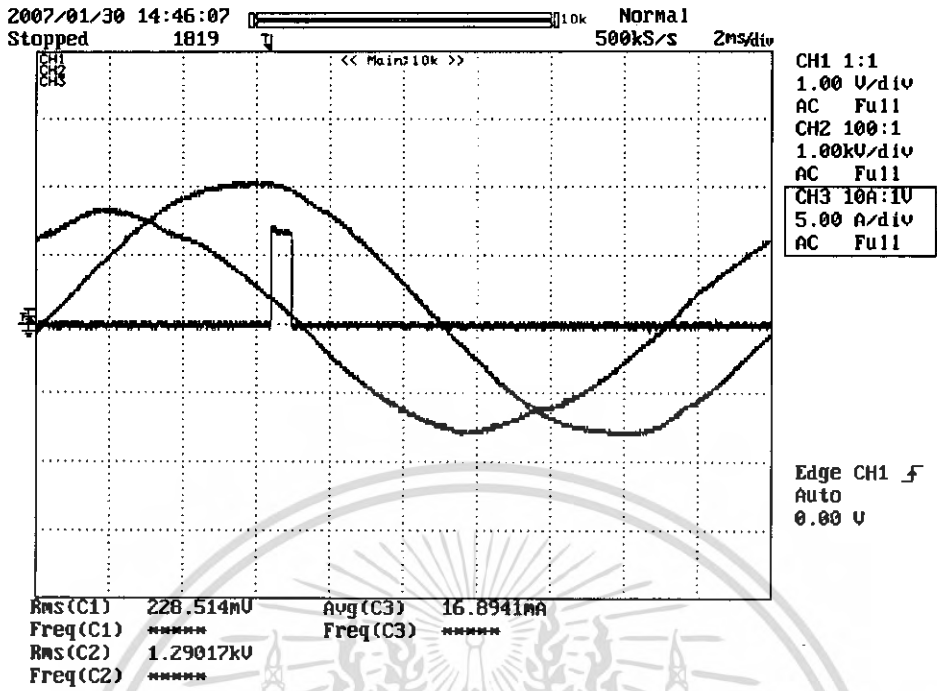
I_f	V_f	I_o	V_o	P (KW)	Q (KW)	S (KW)	$p.f$	ϕ (องศา)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.1	8.45	4.30	127	1.12	1.24	1.66	0.673	56.0 lead
0.2	16.24	3.20	127	1.05	0.66	1.25	0.848	52.6 lead
0.3	23.60	2.77	127	1.03	0.25	1.06	0.972	46.5 lead
0.4	31.44	2.69	127	1.03	0.11	1.04	0.995	38.6 lead
0.5	39.26	3.00	127	1.03	0.47	1.14	0.909	24.9 lead
0.6	47.38	3.56	127	1.06	0.85	1.35	0.784	6.0 lead
0.7	54.47	4.12	127	1.10	1.15	1.59	0.685	13.3 lag
0.8	62.52	4.86	127	1.14	1.50	1.89	0.605	32.0 lag
0.9	68.70	5.47	127	1.18	1.78	2.15	0.547	47.7 lag

เมื่อนำข้อมูลจากออสซิลอสโคปไปทำการ plot กราฟเพื่อหาตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ซึ่งได้แสดงรูปตำแหน่งการเคลื่อนที่กับระยะห่างของมุมที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.16 และ 4.17

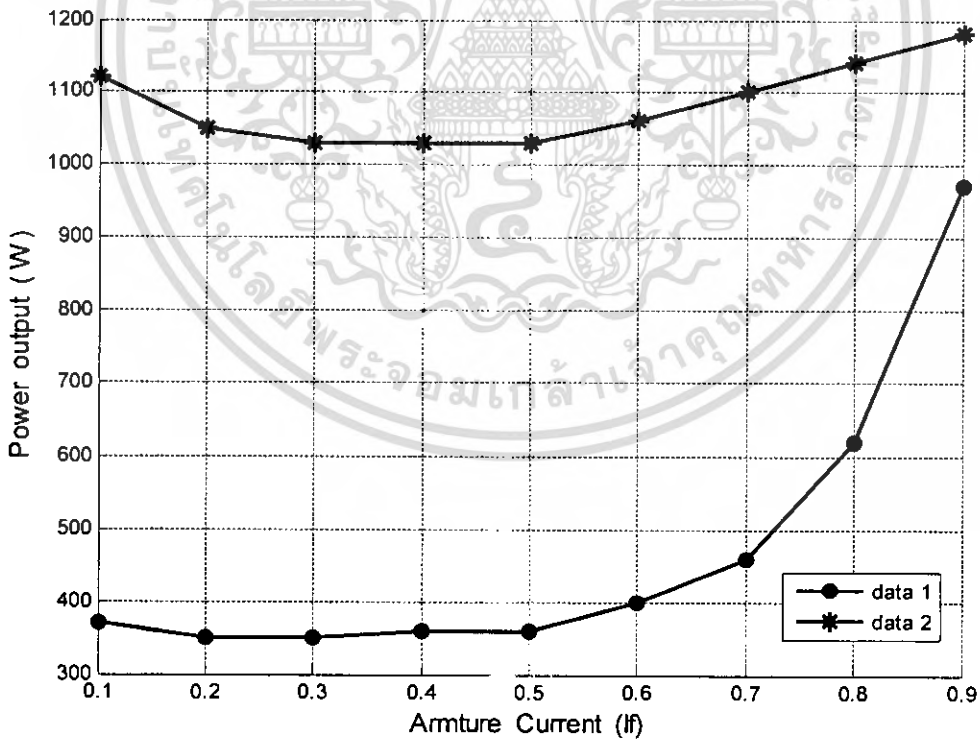


รูปที่ 4.16 เครื่องมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสขณะ $I_f = 0.1A$ มีค่ามุม $\delta = 36.03^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

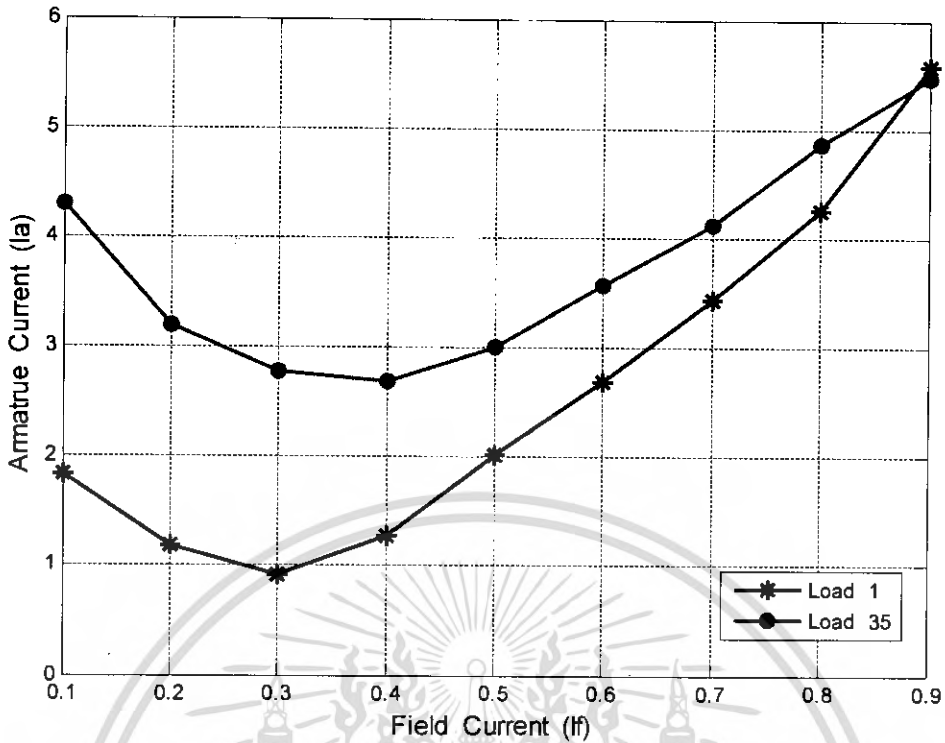


รูปที่ 4.17 เครื่องมือเครื่องไฟฟ้าเชิงโครนอสถนะ $I_f = 0.9A$ มีค่ามุม $\delta = 14.35^\circ$



รูปที่ 4.18 แสดงกำลังไฟฟ้ากับกระแสกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟรูปตัววีแสดงความสัมพันธ์ของมอเตอร์ซิงโครนัสขณะที่ปรับค่ากระแสสนาม

การคำนวณของมุมโรเตอร์ (Calculational angle (δ)) จากค่า Parameter

2. Motor โหลด 35 ดวง

1.1 ขณะ $I_f = 0.1A$

เมื่อมีค่ามาตรฐาน

$$V = 127 \text{ V}, I = 10.75 \text{ A}, R_a = \frac{127}{10.75} = 11.814 \text{ } \Omega$$

สามารถคำนวณและเขียนในทางทฤษฎีได้โดยคำนวณเป็น Per Unit เมื่อ $V_t = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$,

$$I_a = 4.30 \text{ A}, \phi = 56.0^\circ$$

$$E_a = \frac{127}{127} = 1 \quad p.u$$

$$I_a = \frac{4.30}{10.75} = 0.4 \quad p.u$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_o = \frac{1.497}{11.817} = 0.127 \quad p.u$$

$$X_{qu} = 2.50 \quad p.u$$

$$X_{du} = 5.74 \quad p.u$$

แทนค่าลงในสมการ (1)

$$\delta_e = \tan^{-1} \left[\frac{|0.4|(0.127)(\sin 56.0^\circ) + |0.4|(2.5)(\cos 56.0^\circ)}{|1| + |0.4|(0.127)(\cos 56.0^\circ) - |0.4|(2.5)(\sin 56.0^\circ)} \right]$$

$$\delta_e = \tan^{-1} \left(\frac{0.6013}{0.1993} \right)$$

$$\delta_e = 71.66^\circ$$

$$\delta_m = \frac{2(71.66^\circ)}{4} = 35.83^\circ$$

2.2 ขณะ $I_f = 0.9A$

เมื่อมีค่ามาตรฐาน

$$V = 127 \text{ V}, I = 10.75 \text{ A}, R_o = \frac{127}{10.75} = 11.814 \text{ } \Omega$$

สามารถคำนวณและเขียนในทางทฤษฎีได้โดยคำนวณเป็น Pre Unit เมื่อ $V_r = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127V$,

$$I_o = 5.47 \text{ A}, \phi = -47.7^\circ ,$$

$$E_o = \frac{127}{127} = 1 \quad p.u$$

$$I_o = \frac{5.47}{10.75} = 0.508 \quad p.u$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_a = \frac{1.497}{11.817} = 0.127 \quad p.u$$

$$X_{qu} = 2.50 \quad p.u$$

$$X_{du} = 5.74 \quad p.u$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\delta_e = \tan^{-1} \left[\frac{|I_a| R_a \sin \phi + |I_a| X_{qu} (\cos \phi)}{|E_a| + |I_a| R_a \cos \phi - |I_a| X_{qu} (\sin \phi)} \right] \quad (4.8)$$

$$\delta_e = \tan^{-1} \left[\frac{0.508(0.127)(\sin -47.7^\circ) + (0.508)(2.5)(\cos -47.7^\circ)}{1 + 0.508(0.127)(\cos -47.7^\circ) - 0.508(2.5)(\sin -47.7^\circ)} \right]$$

$$\delta_e = \tan^{-1} \left(\frac{-0.987}{1.982} \right)$$

$$\delta_e = -26.47^\circ$$

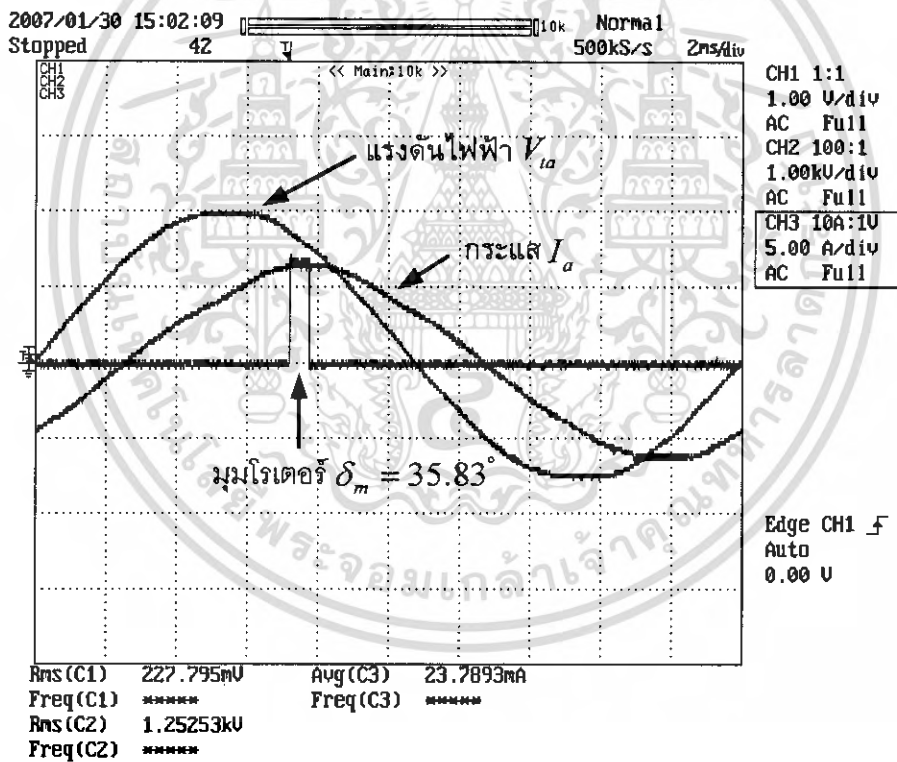
$$\delta_m = \frac{2(-26.47)}{4} = -13.235^\circ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

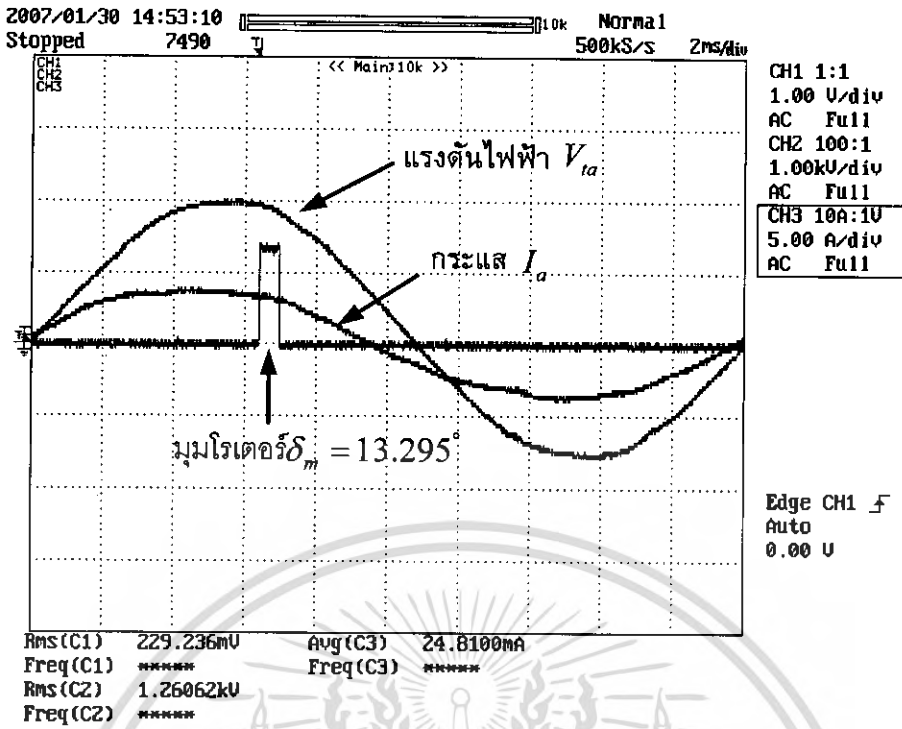
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบการหามุมโรเตอร์ของเครื่องจักรซิงโครนัสซึ่งจะเห็นได้ว่าขณะที่ทั้งทำงานเป็นสองกรณีเป็นทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและมอเตอร์ซิงโครนัส

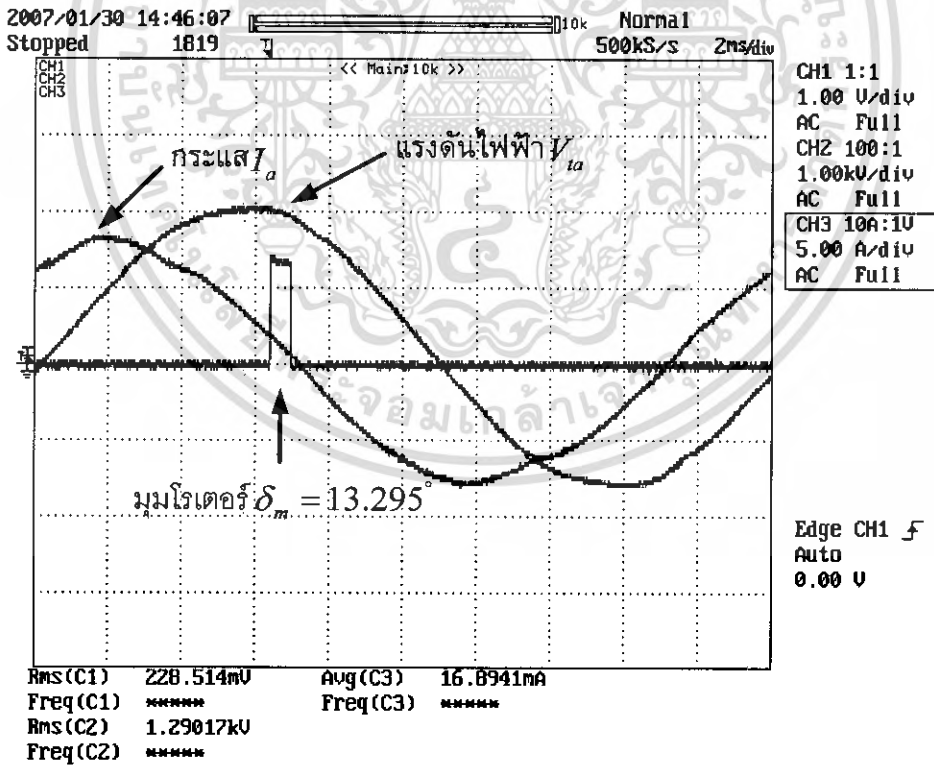
กรณีที่เป็นมอเตอร์ซิงโครนัส ซึ่งคุณลักษณะมอเตอร์ซิงโครนัสสามารถปรับเพาเวอร์แฟกเตอร์ได้ตามต้องการ ดังนั้นเมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ระบบใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อขั้วแม่เหล็กโรเตอร์กับขั้วแม่เหล็กสเตเตอร์จะมีมุมโรเตอร์ขะจ่ายซึ่งมุมๆ นี้เมื่อทำการจ่ายโหลดจะทำให้มุมโรเตอร์กว้างขึ้นแต่ถ้าจ่ายกระแสตรงกระตุ้นขดลวดสนามจะทำให้มุมโรเตอร์ที่กว้างขึ้นลดลงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ขดลวดกระตุ้นเสริมกับขดลวดสนามแม่เหล็กและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากขึ้น



(ก) มอเตอร์ซิงโครนัสขณะกระแสล้าหลังแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วซึ่งมุมโรเตอร์ $\delta_m = 35.83^\circ$



(ข) มอเตอร์ซิงโครนัสขณะกระแสอินเฟสแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วซึ่งมุมโรเตอร์ $\delta_m = 13.295^\circ$

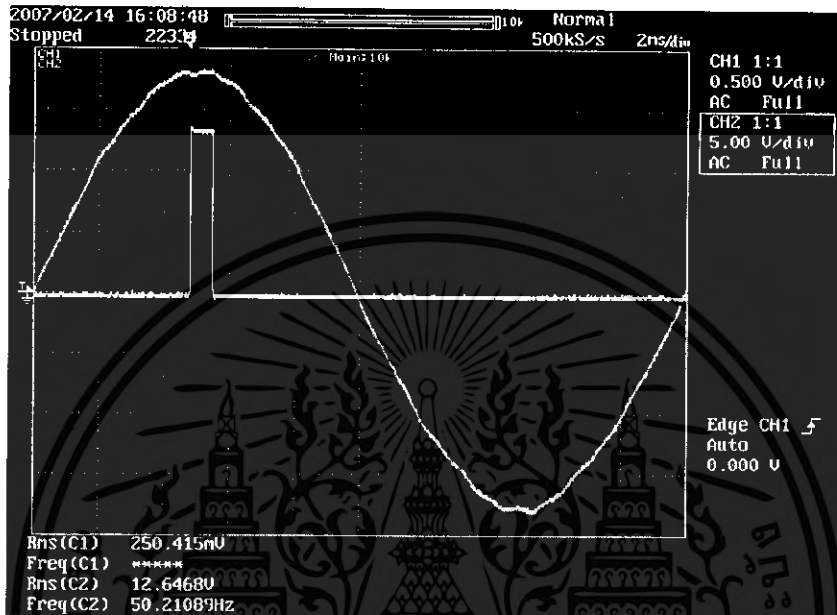


(ข) มอเตอร์ซิงโครนัสขณะกระแสอินเฟสแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วซึ่งมุมโรเตอร์ $\delta_m = 13.295^\circ$

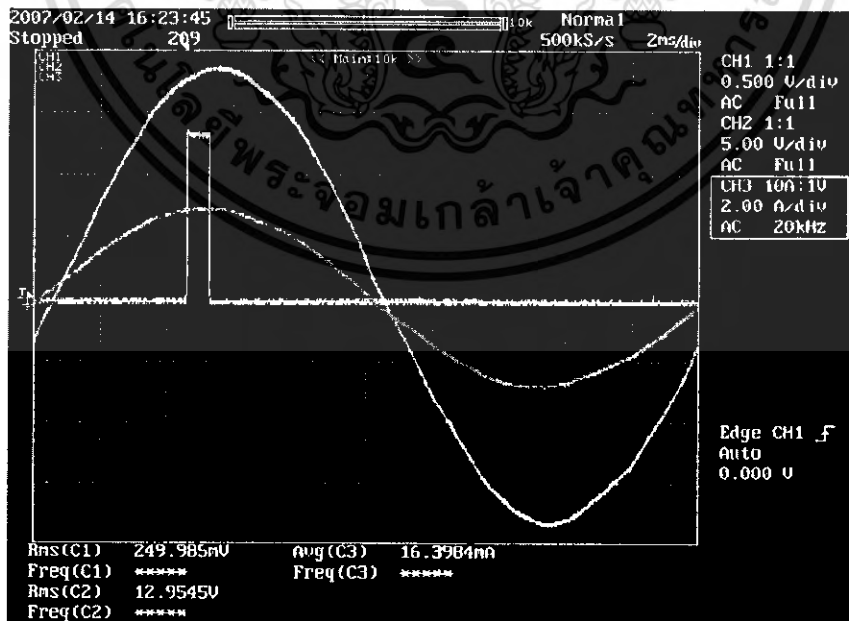
รูปที่ 5.1 ขณะมอเตอร์จ่ายโหลด หลอดไฟ 100 w จำนวน 35 ดวง ณ การปรับเพาเวอร์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าขณะที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าขณะ no – load ขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะมีมุมระหว่างทั้งสองขั้วมีน้อยและเมื่อทำการจ่ายโหลดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสก็จะมีมุมโรเตอร์มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.2

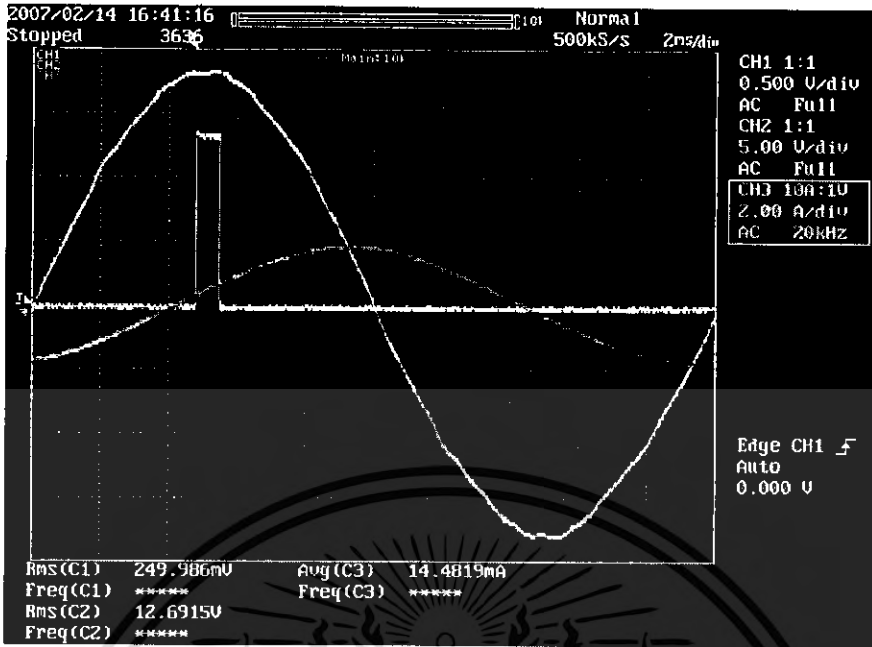


(ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะ no – load

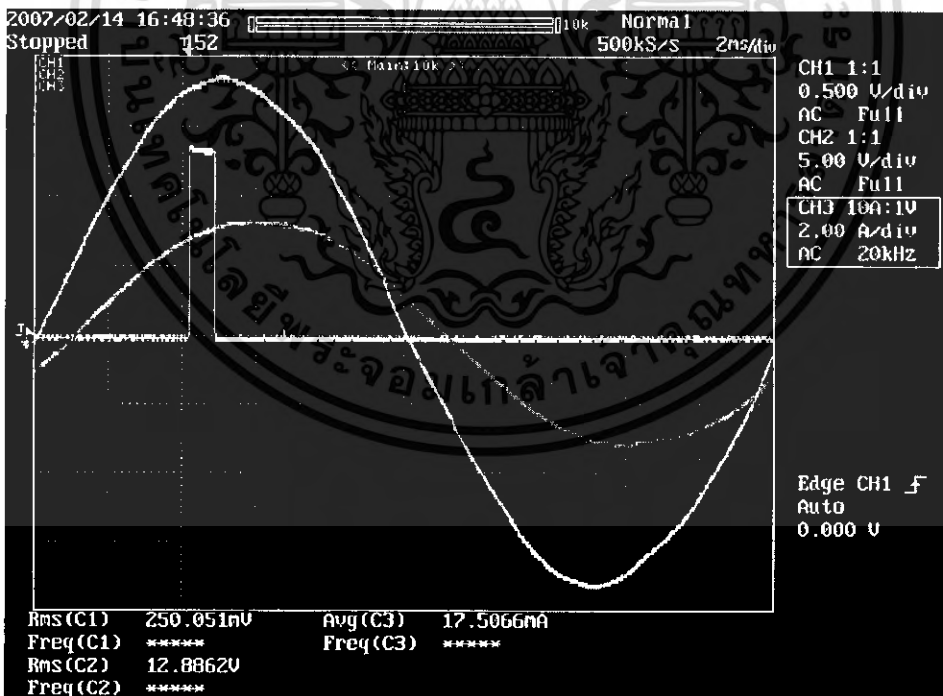


(ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะจ่ายโหลดความต้านทานอย่างเดียว หลอดไฟ 18 ดวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



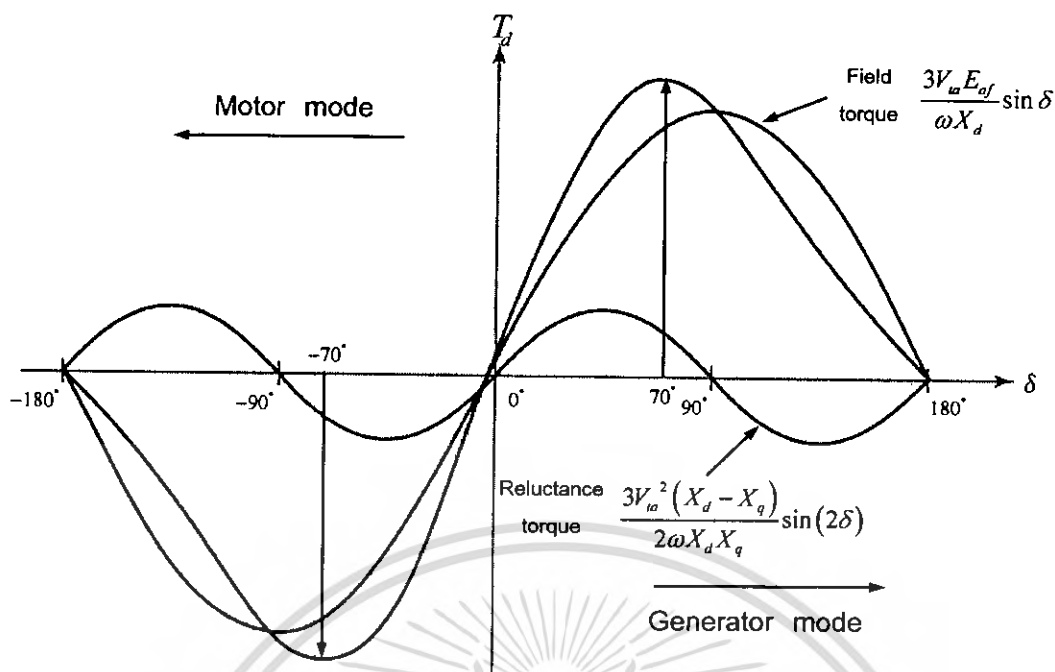
(ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ขณะจ่ายโหลดความเหนี่ยวนำอย่างเดียว บัลลัสต์ 3 ชุด 12 อัน



(ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ขณะจ่ายโหลดความต้านทาน หลอดไฟ 100 w และค่าความเหนี่ยวนำ 9 อัน

รูปที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงมุมโรเตอร์ขณะจ่ายโหลดที่พิกัดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโหลด

เมื่อเป็นเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสจะเป็นสมการ

$$3T_d = \frac{3P_d}{\omega s} = \frac{3V_{ta}E_{af} \sin \delta}{\omega s X_d} + \frac{3V_{ta}^2(X_d - X_q) \sin(2\delta)}{2\omega s X_d X_q}$$

ซึ่งจากสมการสมการ พจน์แรกของโรเตอร์ทรงกระบอกส่วนพจน์หลังเกิดจากความ เป็นเซเลชันส์โพลของโรเตอร์ ซึ่งค่าความต้านทานแม่เหล็กในช่องอากาศของแกน d และ q มีค่าไม่เท่ากัน เราจึงเรียกพจน์ที่สองของสมการนี้ว่า แรงบิดรีลักแตนซ์ แสดงเส้นโค้งเครื่อง ก่าเน็ดไฟฟ้าและมอเตอร์ ค่าแรงบิดจะมีค่าสูงหรือลดเป็นผลเนื่องมาจากค่าของ δ ดังนั้น $\delta = 70^\circ$ จึงเป็นตำแหน่งที่สูงสุด

จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดจากรูปที่ 5.3 มีกำลังและแรงบิดสองพจน์ซึ่งโดยพจน์ที่สองจะมี ค่าที่คงแต่พจน์แรกจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นอยู่กับฉะนั้นจึงพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งออกมา นั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ E_{af} และ $\sin \delta$ แต่ E_{af} เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ V_f และ V_f เป็นสัดส่วนกับ I_f

$$E_{af} \propto I_f \tag{5.1}$$

$$P = \sin \delta \tag{5.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ

$$P = KE_{af} \sin \delta \quad (5.3)$$

เมื่อ
$$K = \frac{V_{ta}}{X} \quad (5.4)$$

จากที่ทราบว่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งออกนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ E_{af} และ $\sin \delta$ ฉะนั้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับการกระตุ้น (field excitation) ที่ค่าต่างๆ จึงทำให้มีค่าของกำลังส่งออกที่สูงสุดแต่ละค่าไม่เท่ากันดังรูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังออกแปรเปลี่ยนไปตาม สนามกระตุ้น

ดังนั้นจึงได้สมการของกำลังมีค่าสูงสุดเป็น

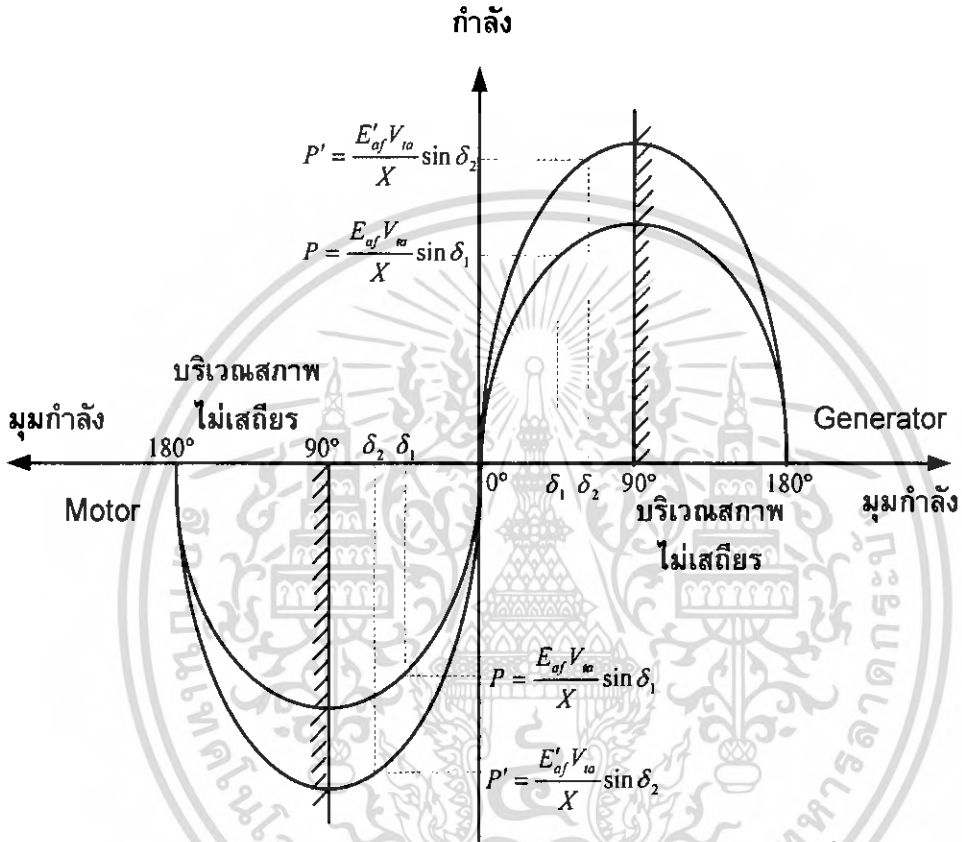
$$P_{\max} = KE_{af} \quad (2.62)$$

สมการนี้จะเกิดขึ้นเสมอเมื่อ $\delta = 90^\circ$ ที่มีภาระสูงสุดเป็น P_{\max} ในกรณีที่กำลังไฟมีค่าคงที่ก็จะให้ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{af} กับ δ เมื่อ E_{af} มีค่ามากย่อมทำให้ δ มีค่าน้อยถ้า E_{af} มีค่าน้อยย่อมทำให้ δ มีค่ามาก แต่ถ้า δ มีค่ามากกว่า 90° แล้วย่อมทำให้เครื่องอยู่ในสภาพที่ไม่คงที่ซึ่งจะทำให้เครื่องเสียหายได้และก็จะทำให้หมดสภาพที่จะจ่ายโหลดต่อไปได้

ในการปฏิบัตินั้นมักให้ δ ต่ำกว่า 70° ไฟฟ้าลงมา ในกรณีที่ไม่ต้องจ่ายไฟหรือว่าโหลดไหลดลงไปให้เท่ากับศูนย์คือ $\delta = 0$ ซึ่งทำให้ $E_{af} = V_{ta}$ อินเฟสกันด้วย โดยปกตินั้นโหลดที่เครื่องจักรไฟฟ้าจ่ายออกไปภายนอกนั้นถือว่าเป็นบวก ดังนั้นถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นลบ นั่นคือได้รับกำลังไฟฟ้าจากภายนอก จึงกลายเป็นมอเตอร์ซึ่งโครนัสไปดังรูปที่ 2.51

ดังนั้นสำหรับการแบ่งจ่ายโหลดระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวหนึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าที่ใหญ่มากเช่นการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ซึ่งจะเปรียบเป็นอนันต์ คุณสมบัติของบัสอนันต์คือ มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัสบาร์จะคงที่ ไม่ว่าโหลดจะเปลี่ยนแปลงมากน้อยเท่าใดก็ตาม ในการที่จะให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โหลดเพิ่มขึ้นจาก P เป็น P' มีผลทำให้มุมกำลังสูงขึ้น เพื่อไม่ให้มุมกำลังโตขึ้นมาก ต้องปรับให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้นจาก E_{af} เป็น E'_{af} โดยตรง

ข้อแนะนำในปฏิญญาฉบับนี้ มีประโยชน์ในการดูประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งดูได้จากมุมที่โรเตอร์ว่าอยู่ที่ตำแหน่งไหนในขณะที่จ่ายโหลดทำให้รู้ถึงประสิทธิภาพโดยไม่ต้องทำการวัดซึ่งดูได้จากรูปในการทดลองสามารถสังเกตในการจ่ายว่าอยู่ในสภาวะมีเสถียรภาพ หรือไม่ ถ้ามุมโรเตอร์มากขึ้นทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ เป็นประโยชน์มากในงานอุตสาหกรรมที่มีเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสในระบบไฟฟ้าในโรงงาน



รูปที่ 2.4 กำลังของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อได้รับโหลดแบบชั่วทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



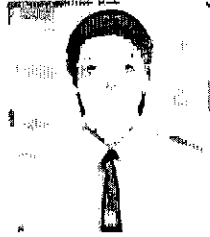
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.E.Fitzgerald ,Charles Kingsley,Stephen D.Umans, **Electrimachinery** , McGraw-Hill book Co .2003 ,pp.245-297
- [2] Jimmie J.Cathey , **Electricmachine analysis and design applying matlab**, McGraw-Hill Co .2001,pp.421-515
- [3] **IEEE Guide** : Test Procedures for Synchronouse Machine ,New York ,1996
- [4] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย , **Electrical machines** , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,กรุงเทพฯ หน้าที่ 67-91
- [5] ธวัชชัย อัดถวิบูลย์กุล , **เครื่องกลไฟฟ้า2** ,กรุงเทพฯ ,เจริญธรรม ,2533 ,หน้าที่ 90-152
- [6] สัมพันธ์ หาญชเล , **เครื่องกลไฟฟ้า 2** ครั้งที่16 , ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ,หน้าที่ 2-1 - 2-68
- [7] ศิระ หงษ์ภา , **ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ** , กรุงเทพฯ ,ส.ส.ท , 2537 หน้าที่ 37- 59
- [8] พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ,ณรงค์เดช ศรีอัครอมร,**ทฤษฎีวิเคราะห์วงจรเครื่องจักรกลไฟฟ้า** ครั้งที่ 4, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,กรุงเทพฯ , 2542 หน้าที่ 182 - 230
- [9] คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, **ศัพท์เทคนิควิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง**, กรุงเทพฯ, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2535
- [10] ณรงค์ ขอนตะวัน , **มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง** กรุงเทพฯ ,ห้างหุ้นส่วนจำกัดเอราวัณ การพิมพ์ 2538 หน้าที่ 203-268
- [11] มนัส สังวรศิลป์ ,วรรรัตน์ ภัทอมรกุล , **คู่มือการใช้ MATLAB** ครั้งที่ 1, นนทบุรี , อินโฟเพรส 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

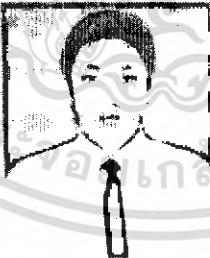
ประวัติผู้แต่ง



นายเมษา กุตะมี รหัสนักศึกษา 47015105
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์



นายสุภวัฒน์ เรียงเรียง รหัสนักศึกษา 47015111
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์



นายวิศรุต ศรีอ่อนนวล รหัสนักศึกษา 47015149
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้