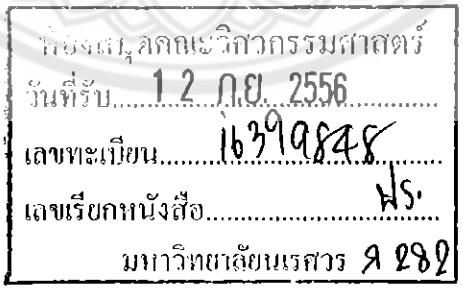
ศึกษาคุณสมบัติการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

STUDY CHARACTERISTIC OF SYNCHRONOUS MACHINES

นายกฤษฎา เหมบุรุษ รหัส 52361628

นายธนากร หล้าสวย รหัส 52361819



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2555

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน ศึกษาคุณสมบัติการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

ผู้ดำเนินโครงงาน นายกฤษฎา เหมบุรุษ รหัส 52361628

นายธนากร หล้าสวย รหัส 52361819

ที่ปรึกษาโครงงาน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2555

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ที่ปรึกษาโครงงาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครพันธ์ วงศ์กังแห)

.....กรรมการ

(ดร.สุพรรณนิกา วัฒนะ)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	ศึกษาคุณสมบัติการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลซิงโครนัส			
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกฤษฎา	เหมบุรุษ	รหัส	52361628
	นายธนากร	หล้าสวย	รหัส	52361819
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร		เรืองสินชัยวานิช	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า			
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์			
ปีการศึกษา	2555			

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในการทดสอบการเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสจะทดสอบทั้งในสภาวะไม่มีโหลดและมีโหลด เพื่อหาคุณสมบัติในการเริ่มเดินของมอเตอร์ซิงโครนัส ส่วนการทดสอบการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะทดสอบทั้งในสภาวะไม่มีโหลดและมีโหลดเช่นกัน โดยขณะมีโหลด จะทดสอบโดยใช้โหลดความต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) ตัวเก็บประจุ (C) มาต่อไว้ที่เอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเริ่มเดินและจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับโหลดจึงหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโหลดแต่ละประเภทได้ เช่น แรงดันที่ตกคร่อมโหลด กระแสที่ผ่านโหลด เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของแรงดันโหลดเต็มที่และไม่มีโหลด เป็นต้น จากนั้นนำผลการทดสอบการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสมาเปรียบเทียบกับการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction machines) และหาข้อสรุปถึงคุณสมบัติการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

Project title	Study Characteristic of Synchronous Machines		
Name	Mr.Kidsada	Hemburut	ID. 52361628
	Mr.Thanakorn	Rasouy	ID. 52361819
Project advisor	Asst. Prof. Dr.	Somporn	Ruangsinchaiwanich
Major	Electrical Engineering		
Department	Electrical and Computer Engineering		
Academic year	2012		

Abstract

This project is education of starting about the Synchronous machines which can make the duty both the motor ant the generator. In the testing of starting about the Synchronous machines can be test in the No load and the Full load to search the property in the starting of the Synchronous motors. Testing of the starting of the Synchronous generator will be test in the state of No load and full load , too. That the full load will be test by using the Resitive (R) , the Inductive (L) and the Capacitive (C) connected to the output of the generator . When the generator starts and turn on the alternating current power to load that can find the electrical properties about the each type of load , for example , the voltage across the load , the current through the load , the percentage difference of the full load and no load , etc . Then can take the result of the testing between the starting of the Synchronous machines and the testing between the starting of the Synchronous machines and the starting of the Induction machines to compare and find the conclusion about properties of the starting of the Synchronous machines.

กิตติกรรมประกาศ

การที่ข้าพเจ้าได้จัดทำโครงงานเรื่อง ศึกษาคุณสมบัติการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลซิงโครนัส ตั้งแต่เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2555 ถึง เดือน มีนาคม พ.ศ. 2556 ส่งผลให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้ และประสบการณ์ต่าง ๆ ที่มีค่ามากมาย สำหรับโครงงานชิ้นนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความร่วมมือและสนับสนุนหลายฝ่ายดังนี้

1. ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน
2. ว่าที่ร้อยตรีธานี โกสุม ครูช่าง
3. นายสิทธิพงษ์ เพ็งประเดิม นิสิตปริญญาโท
4. นางสาวเดือนแรม แพ่งเกี่ยว นิสิตปริญญาโท

และบุคคลท่านอื่นๆทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการจัดทำโครงงานฉบับนี้

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลเป็นที่ปรึกษาในการทำโครงงานนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแล และให้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำโครงงาน

นาย กฤษฎา เหมบุรุษ
นาย ธนากร หล้าสวย

สารบัญ

MISSING

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้กันมากในปัจจุบันโดยแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ในส่วนของโครงงานนี้จะกล่าวถึงเครื่องจักรกลซิงโครนัส ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้า โดยเครื่องจักรกลซิงโครนัสเป็นเครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความเร็วรอบคงที่ ซึ่งสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Generator) หรือทำงานเป็นมอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous Motor) ความเร็วของเครื่องจักรกลซิงโครนัสจะเป็นความเร็วคงที่ที่เรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)

ดังนั้นจึงก่อให้เกิดการศึกษาค้นคว้าและทำการทดลองการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลซิงโครนัสเพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถนำไปวิเคราะห์และปฏิบัติให้เกิดประโยชน์ในการเลือกใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้ทำงานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาเทคนิคในการเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟส

1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคในการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส

1.2.3 เพื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลซิงโครนัสกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน

1.3.1 สามารถเข้าใจหลักการทำงานและการเริ่มเดินเครื่องจักรกลซิงโครนัส 3 เฟส

1.3.2 สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสและการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟสได้

1.3.3 สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลซิงโครนัสกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำได้เพื่อนำไปประยุกต์ในการใช้งานต่อไป

1.4 ขอบเขตของโครงงาน

1.4.1 เปรียบเทียบค่าที่ได้ของผลการทดลองการเริ่มเดินเครื่องจักรกลซิงโครนัสแบบต่างๆ

1.4.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้ของผลการทดลองระหว่างเครื่องจักรกลซิงโครนัสกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

1.4.3 เปรียบเทียบและสรุปข้อมูลในส่วนต่างเพื่อประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.5 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2555							ปี 2556		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องจักรกลซิงโครนัส										
2. ออกแบบการทดลอง										
3. ทดลองการเริ่มเดินของเครื่องจักรกลซิงโครนัส										
4. ทำการเปรียบเทียบข้อมูลการเริ่มเดินระหว่างเครื่องจักรกลซิงโครนัสและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ										
5. สรุปผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มโครงงาน										

1.6 งบประมาณ

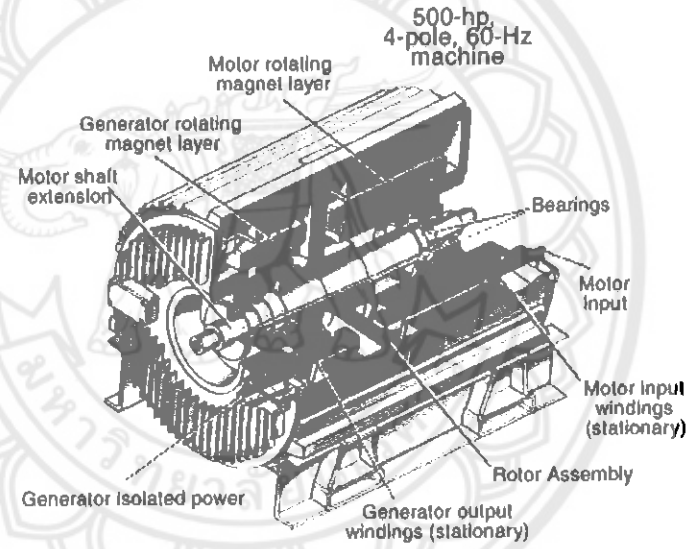
1.6.1 ค่าอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	1,000 บาท
1.6.2 ถ่ายเอกสาร	300 บาท
1.6.3 ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	200 บาท
1.6.4 ค่าจัดทำรูปเล่ม	500 บาท
รวมเป็นเงิน(สองพันบาทถ้วน)	2,000 บาท

หมายเหตุ: ขออนุมัติถัวเฉลี่ยทุกรายการ

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 เครื่องจักรกลซิงโครนัส

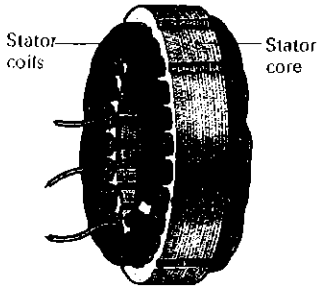
เครื่องจักรกลซิงโครนัส (Synchronous Machine) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีความเร็วในสภาวะคงตัวแปรผันตรงกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature Winding) ที่สเตเตอร์ ที่โรเตอร์มีสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับขดลวดสนาม (Field Winding) โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากการมีกระแสไฟฟ้าสามเฟสในขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส



รูปที่ 2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส [1]

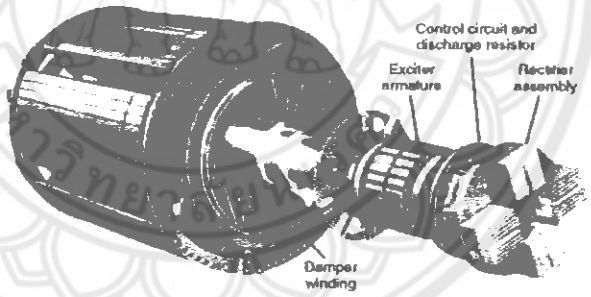
2.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

สเตเตอร์ (Stator) เป็นส่วนสำคัญของเครื่องจักรกลซิงโครนัสที่ใช้สำหรับพันขดลวดซิงโครนัส โดยมีแกนเหล็กที่ทำด้วยแผ่นเหล็กบางๆวางอัดซ้อนทับกันเรียกว่า แผ่นลามิเนต (Laminate Sheet) เพื่อลดการสูญเสียการไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current Loss) และแกนเหล็กสเตเตอร์จะปั๊มเป็นร่องสล็อต เพื่อใช้สำหรับพันขดลวดอาร์เมเจอร์

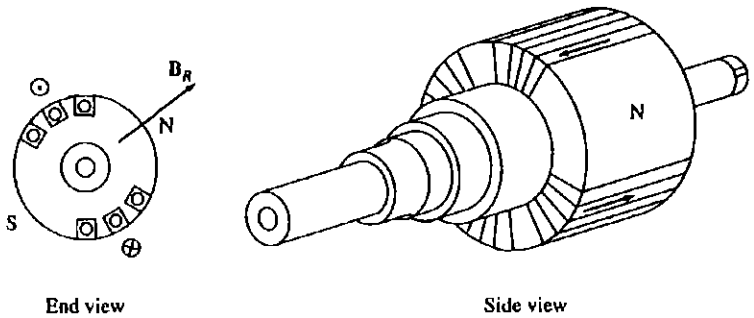


รูปที่ 2.2 สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส [2]

โรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส และทำหน้าที่เป็นสนามแม่เหล็กให้เกิดขั้วเหนือและขั้วใต้สลับกัน โดยจะพันขดลวดสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมสลับกันไปมา และปลายทั้งสองข้างของขดลวดสนามแม่เหล็กต่อเข้ากับสลิปริง เพื่อเป็นทางเดินทางกระแสไฟฟ้า และตัวโรเตอร์จะสร้างจากแผ่นเหล็กลามิเนต จะมีโครงสร้างเป็น 2 ลักษณะ คือแบบขั้วยื่น (Salient-pole Rotor) และแบบทรงกระบอก (Cylindrical Rotor) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) เป็นโรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient Pole) โดยด้านบนของโรเตอร์สามารถฝังติดขดลวดช่วยสตาร์ทมอเตอร์ที่เรียกว่า ขดลวดแดมเปอร์ (Damper Winding) รูปที่ 2.3 (ข) เป็นโรเตอร์แบบทรงกระบอก



(ก) โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient Pole) [3]



(ข) โรเตอร์แบบทรงกระบอก (Cylindrical Rotor) [4]

รูปที่ 2.3 โรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

2.2 มอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous Motor)

มอเตอร์ซิงโครนัสเป็นมอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส มีขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่และมีขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่หมุน คุณสมบัติเด่นหมุนด้วยความเร็วที่คงที่ โดยมีค่าเท่ากับความเร็วซิงโครนัสไม่ว่าจะมีโหลดขนาดเท่าใดก็ตามและหากการเปลี่ยนแปลงของโหลดไม่เกินค่าพิกัดมอเตอร์ซิงโครนัสแล้ว ความเร็วของมอเตอร์ซิงโครนัสจะยังคงที่เสมอ โดยขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟสและจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

2.2.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัส

เมื่อต่อไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าที่ขดลวดของสเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนอยู่รอบๆสเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสความเร็วของสนามแม่เหล็กนี้จะเท่ากับความเร็วซิงโครนัส สำหรับโรเตอร์จะเป็นขดลวดสนามแม่เหล็กเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้ขดลวดสนามแม่เหล็กจะเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ขั้วแม่เหล็กนี้จะหมุนเกาะติดไปกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ทำให้เพลาของมอเตอร์ซิงโครนัสหมุนไปด้วยความเร็วซิงโครนัส ความเร็วซิงโครนัสหาได้ดังนี้

$$N_S = \frac{120f}{p} \tag{2.1}$$

เมื่อกำหนดให้

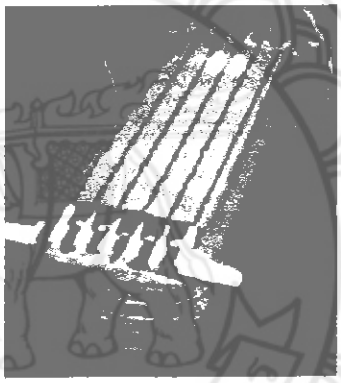
N_S ความเร็วซิงโครนัส (rpm)
f ความถี่ของแรงดันไฟสลับที่จ่ายให้สเตเตอร์ (Hz)
p จำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ($pole$)

2.2.2 การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัส

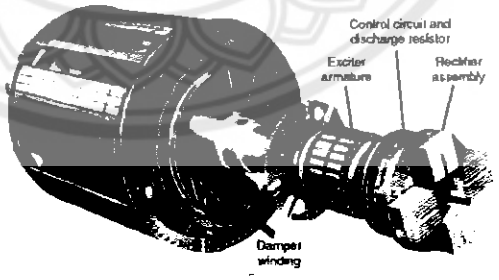
เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนเกิดขึ้นกับสเตเตอร์ เมื่อจ่ายแหล่งจ่ายไฟสลับ 3 เฟสและความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจะเท่ากับความเร็วซิงโครนัสโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสจะถูกวางในสนามแม่เหล็กหมุน ดังนั้นเมื่อกระตุ้นกระแสสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ จะเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นรอบๆโรเตอร์ ขั้วแม่เหล็กนี้จะดึงดูดกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ผลคือจะเกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนเกาะไปกับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส แต่ในทางปฏิบัติ การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสขนาดใหญ่จะต้องมีวิธีการเฉพาะ ซึ่งที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ

(1) การเหนี่ยวนำ

การเริ่มเดินด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ (Induction Starting) ใช้หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยฝังขดลวดแดมเปอร์ไว้บนผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์ทุกๆขั้ว เมื่อจ่ายไฟสลับ 3 เฟสเข้าไปที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดแดมเปอร์ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นบริเวณผิวหน้าของโรเตอร์ โรเตอร์จะหมุนไปตามสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์จนกระทั่งโรเตอร์หมุนไปด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อย จึงเริ่มจ่ายกระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์จึงเกิดอย่างถาวร และดึงดูดกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์และหมุนไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ลักษณะของขดลวดแดมเปอร์และการติดตั้งขดลวดแดมเปอร์ที่ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข)



(ก) ขดลวดแดมเปอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส [5]

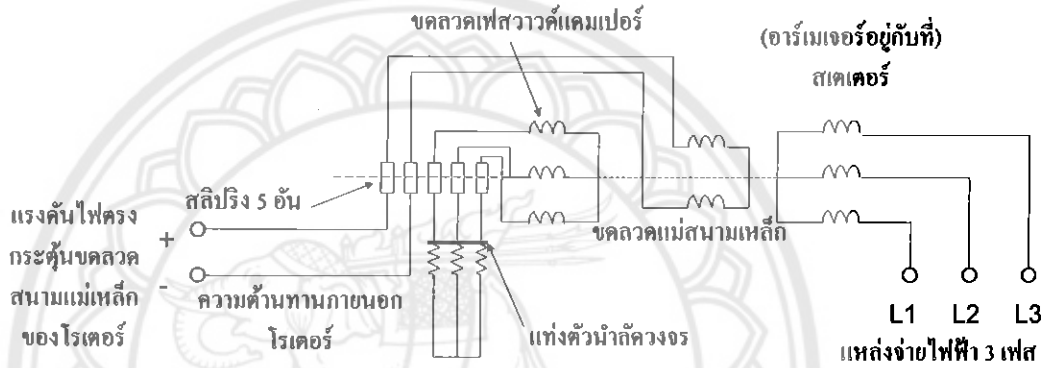


(ข) ขดลวดแดมเปอร์ที่ด้านหน้าขั้วแม่เหล็ก [6]

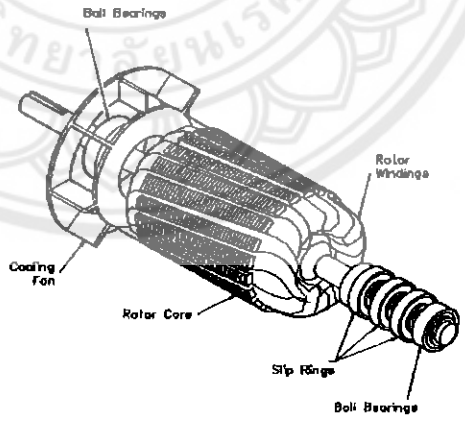
รูปที่ 2.4 ขดลวดแดมเปอร์และการติดตั้งขดลวดแดมเปอร์

(2) โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์

วิธีใช้โรเตอร์แบบซิมเพล็ก (Simplex Rotor) คือวิธีการเพิ่มขดลวดที่โรเตอร์ โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์จะมีขดลวดอีกชุดหนึ่งพันอยู่บนผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กแทนขดลวดแดมเปอร์ มีชื่อว่าเฟสวาวด์แดมเปอร์ (Phase Wound Damper) โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์จะมีสลิปริง 5 อัน โดย 3 อันแรกสำหรับขดลวดที่โรเตอร์ และอีก 2 อันสำหรับขดลวดสนามแม่เหล็ก การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสแบบโรเตอร์ซิมเพลกซ์ จึงใช้หลักการเดียวกันกับการเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์พันขดลวด (Wound Rotor Induction Motor) วงจรของมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์แสดงในรูปที่ 2.5 (ก) และโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์แสดงในรูปที่ 2.5 (ข)



(ก) วงจรของมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์เพื่อใช้ในการเริ่มเดิน



(ข) โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์ [7]

รูปที่ 2.5 โรเตอร์แบบซิมเพลกซ์

มอเตอร์ซิงโครนัสที่เริ่มเดินด้วยโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์นี้ จะให้แรงบิดตอนเริ่มหมุนสูงมากกว่า 3 เท่าของแรงบิดเมื่อโหลดเต็มพิกัด บางครั้งเรียกมอเตอร์ซิงโครนัสที่มีโรเตอร์แบบซิมเพลกซ์ว่า มอเตอร์ซิงโครนัสที่มีแรงบิดเริ่มหมุนสูง (High-starting Torque Synchronous Motor)

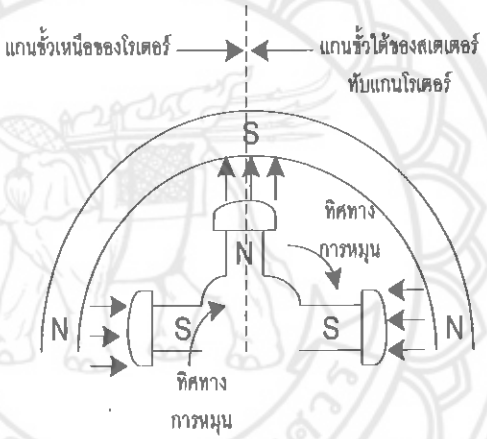
(3) การขับด้วยต้นกำลัง

การขับโดยใช้ต้นกำลัง (Prime Mover) ต่อกับเพลาของมอเตอร์ซิงโครนัส นิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัวขับ โดยให้มอเตอร์ซิงโครนัสทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพิ่มความเร็วของตัวขับเพื่อให้มอเตอร์ซิงโครนัสหมุนไปที่ความเร็วพิกัด และป้อนกระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กให้มอเตอร์ซิงโครนัส ตรวจสอบลำดับเฟสให้ถูกต้อง วัดแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ซิงโครนัสเท่าแรงดันพิกัดและให้ใช้สวิตซ์ 3 เฟสขนานมอเตอร์ซิงโครนัส ซึ่งขณะนี้ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสของระบบจำหน่าย เมื่อขนานได้แล้วให้ตัดแหล่งจ่ายมอเตอร์กระแสตรงที่เป็นต้นกำลังออก ขณะนี้มอเตอร์ซิงโครนัสซึ่งเคยทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานเป็นมอเตอร์ซิงโครนัสอย่างสมบูรณ์ สำหรับมอเตอร์กระแสตรงที่เป็นต้นกำลังจะทำหน้าที่เป็นโหลดของมอเตอร์ซิงโครนัส ลักษณะของการต่อมอเตอร์กระแสตรงเป็นต้นกำลังเพื่อเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสแสดงในรูปที่ 2.6

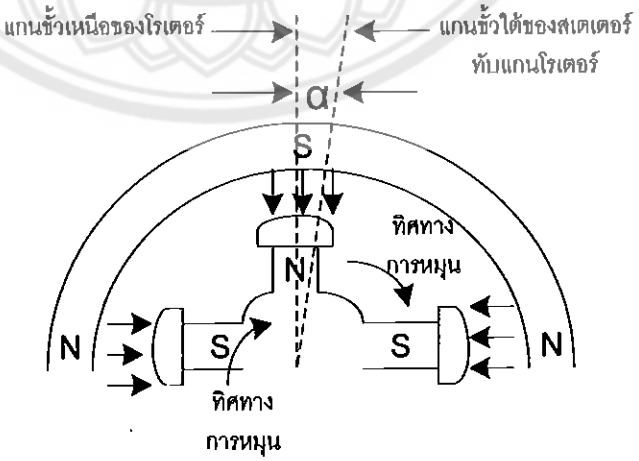
รูปที่ 2.6 การต่อต้นกำลังเพื่อเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัส

2.2.3 มอเตอร์ซิงโครนัสขณะมีโหลด

มอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อทำงานโดยไม่มีโหลด ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์จะถูกขึดติดหรือเกาะติดกับขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) โดยที่แกนของขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือของโรเตอร์จะทับกันพอดีกับแกนขั้วแม่เหล็กขั้วใต้ของสเตเตอร์ และจะเกาะติดอย่างนี้ตลอดเวลาเมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสหมุน แต่เมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสมีโหลดต่ออยู่ที่เพลาของมอเตอร์ โรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสจะเลื่อนถอยหลังออกไปเป็นมุมมุมหนึ่งโดยที่ความเร็วของมันไม่ลดลง ดังแสดงในรูป 2.7 (ข) เรียกว่ามุมแอลฟา (α) หรือเรียกว่ามุมของโหลด (Load Angle) หรือมุมของแรงบิด (Torque Angle) ถ้าโหลดมีค่ามาก มุม α จะกว้างมากขึ้น ถ้าโหลดมีค่าน้อย มุม α จะมีค่าลดลง มุม α คือมุมที่เกิดจากระยะห่างของแกนเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์กับแกนเส้นแรงแม่เหล็กของสเตเตอร์



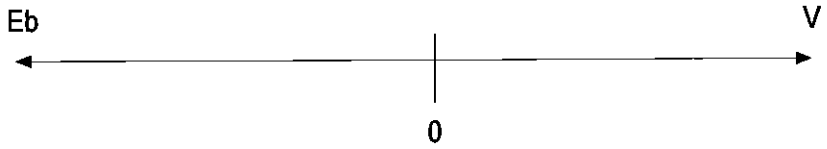
(ก) การยึดเกาะกันระหว่างขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์กับสเตเตอร์ ขณะไม่มีโหลด



(ข) มุมโหลด (Load Angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์กับสเตเตอร์ขณะมีโหลด

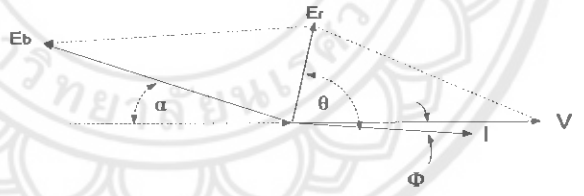
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาสนามแม่เหล็กขณะมอเตอร์ซิงโครนัสทำงาน

ดังนั้นเมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสทำงานในสภาวะไม่มีโหลดและไม่คิดกำลังสูญเสียในมอเตอร์ เฟสเซอร์ของแรงดันที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

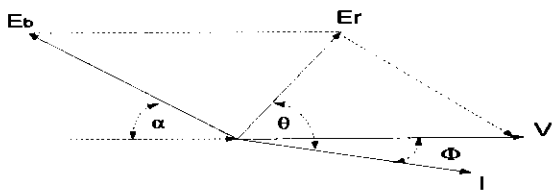


รูปที่ 2.8 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันที่ป้อนเข้ามอเตอร์ซิงโครนัสกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ

จากรูปที่ 2.8 เมื่อกำหนดให้ E_b คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (*Back emf*) โดยจะแปรผันตรงกับเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์ เพราะมอเตอร์ซิงโครนัสมีความเร็วคงที่เท่ากับความเร็วซิงโครนัส V คือแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ซิงโครนัสและ E_b คือแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ จะมีเฟสตรงกันข้ามเป็นมุม 180 องศาและมีผลต่างของแรงดันเป็นศูนย์ ($E_R = 0$) เมื่อมอเตอร์ทำงานขณะไม่มีโหลด การสูญเสียในมอเตอร์เฟสเซอร์ของ E_b จะถอยหลังไปเป็นมุม α จะทำให้เกิดผลต่างของแรงดัน (E_R) ขึ้น ทำให้เกิดกระแส (I) ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ เพื่อสร้างแรงบิดให้เอาชนะการสูญเสีย มอเตอร์จึงหมุนไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) เมื่อมอเตอร์ไม่มีโหลด เฟสเซอร์ของแรงดันจะถอยกว้างออกไปอีกทำให้มุม α กว้างขึ้นจะทำให้แรงดันเพิ่มมากขึ้นและค่ากระแสในอาร์เมเจอร์ (I) สูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงเฟสเซอร์ขณะมีโหลดในรูปที่ 2.9 (ข)



(ก) ขณะไม่มีโหลด



(ข) ขณะมีโหลด

รูปที่ 2.9 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัส

เมื่อมอเตอร์ซิงโครนัสมีโหลดเพิ่มขึ้น มุม α จะกว้างขึ้น และ E_R จะมากขึ้นตามไปด้วย เพื่อสร้างกระแสอาร์เมเจอร์ให้มากขึ้น และจะทำให้แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมากตามไปด้วย ถ้าแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมากกว่าแรงบิดของโหลด แน่นอนว่ามอเตอร์ยังคงหมุนไปได้ตามความเร็วซิงโครนัส อย่างไรก็ตามหากโหลดเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งโรเตอร์หลุดออกจากความเร็วซิงโครนัส นั่นแสดงว่าแรงบิดของโหลดมีค่ามากกว่าแรงบิดเต็มพิกัดของมอเตอร์ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นจนกระทั่งโรเตอร์หลุดออกจากความเร็วซิงโครนัสเรียกว่า Pull-Out Torque จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.9 (ข) หาค่ากระแสอาร์เมเจอร์ได้ว่า

$$I = \frac{\vec{E}_R}{Z_S} \tag{2.2}$$

เมื่อกำหนดให้ $\vec{E}_R = \vec{V} - \vec{E}_b$

และ $Z_s = R_a + jX_S$

ค่า θ หาได้จาก $\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a}$

เมื่อกำหนดให้

R_a ความต้านทานอาร์เมเจอร์ต่อเฟส

X_S รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสต่อเฟส

θ มุมต่างเฟสของ I กับ $E_R \cong 90^o$

α มุมโหลด

ϕ มุมเฟสหรือมุมต่างเฟสระหว่างกระแส (I) กับแรงดัน (V)

2.2.4 กำลังสูงสุดและแรงบิดสูงสุดในมอเตอร์ซิงโครนัส

กำลังกล (Mechanical Power: P_m) คือ กำลังที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ ซึ่งสามารถหาได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (E_b) คูณด้วยกระแสอาร์เมเจอร์ (I) และค่ามุมที่แตกต่างกันระหว่างแรงดัน (V) กับกระแส (I) ดังสมการต่อไปนี้

$$P_m = E_b I \cos(\alpha \pm \varphi) \tag{2.3}$$

ถ้าค่าของมุม φ เป็นบวก กรณีค่าตัวประกอบกำลังจะนำหน้า และถ้าค่าของมุม ϕ เป็นลบ ผลคือ ค่าตัวประกอบกำลังจะล้าหลัง เมื่อกำลังกลที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ต่อเฟสคือ สมการที่ (2.3) ดังนั้น สมการของกำลังกลกรณี 3 เฟส คือ

$$P_m = 3E_b I \cos(\alpha \pm \varphi) \tag{2.4}$$

อย่างไรก็ตาม กำลังงานกลที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จะมีค่าเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าทางด้านอินพุตของมอเตอร์ซิงโครนัส ลบด้วยกำลังที่สูญเสียในสเตเตอร์ (กำลังที่สูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์ $P_{js} = 3I^2 R_a$) ถ้าพิจารณากรณี 3 เฟส จะได้

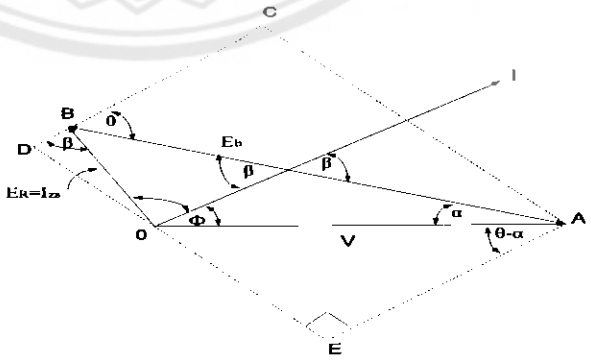
$$P_{in} = 3VI\cos\varphi$$

$$P_{js} = 3I^2 R_a$$

นั่นคือ

$$P_m = P_{in} - P_{js} \tag{2.5}$$

เมื่อพิจารณาสมการของ P_m ในเทอมของ E_b และ X_s ให้พิจารณาจากเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.10 เป็นเฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส เมื่อขับโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า จะได้ว่ามุม $OAE = \theta - \alpha$ และมุม $OBD = \beta$



รูปที่ 2.10 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสเมื่อขับโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า

จากรูปที่ 2.10 สมการกำลังกลต่อเฟสคือ

$$P_m = E_b I \cos\beta \tag{2.6}$$

เพราะว่า $BD = CD - BC$

แต่ $BD = IZ_s \cos\beta$

และ $CD = V\cos(\theta - \alpha)$

และ $BC = E_b \cos\theta$

ดังนั้นสมการ BD คือ

$$IZ_s \cos\beta = V\cos(\theta-\alpha) - E_b\cos\theta$$

$$I\cos\beta = \frac{V}{Z_s}\cos(\theta-\alpha) - \frac{E_b}{Z_s}\cos\theta \tag{2.7}$$

แทนค่าสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.7) ได้ว่า

$$P_m = E_b\left(\frac{V}{Z_s}\cos(\theta-\alpha) - \frac{E_b}{Z_s}\cos\theta\right)$$

$$\therefore \quad P_m = \frac{E_b \times V}{Z_s}\cos(\theta-\alpha) - \frac{E_b^2}{Z_s}\cos\theta \tag{2.8}$$

เนื่องจาก R_a มีค่าน้อยมาก สามารถละทิ้ง หรือไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณ ดังนั้น $Z_s \cong X_s$ และ $\theta \cong 90°$ นั่นคือ สมการ (2.8) จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อ $R_a = 0$ และ $Z_s = X_s$ และ $\theta = 90°$ ได้ดังนี้

$$P_m = \frac{E_b V}{X_s}\cos(90° - \alpha)$$

นั่นคือ

$$P_m = \frac{E_b V}{X_s}\sin\alpha \tag{2.9}$$

กำลังทางกลสูงสุด (Maximum Mechanical Power) ที่เกิดขึ้นกับโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส หรือ $P_{m(\max)}$ จะเกิดขึ้นได้เมื่อมุม θ เท่ากับมุม เป็นผลให้ค่า $\cos(\theta-\alpha)$ มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสมการของ P_m สามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_{m(\max)} = \frac{E_b V}{Z_s} - \frac{E_b^2}{Z_s}\cos\alpha$$

$$P_{m(\max)} = \frac{E_b V}{Z_s} - \frac{E_b^2}{Z_s}\cos\theta$$

เมื่อกำหนดให้ $Z_s \cong X_s$ และ $\theta \cong 90°$ ดังนั้น

$$P_{m(\max)} = \frac{E_b V}{Z_s} = \frac{E_b V}{X_s} \qquad (2.10)$$

ในทำนองเดียวกัน แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่เพลาของมอเตอร์ซิงโครนัส คือแรงบิดที่เรียกว่า Pall Out Torque หรือ $T_{\max}$

$$T_{\max} = \frac{9.55 P_{m(\max)}}{n_s} \qquad (2.11)$$

เมื่อกำหนดให้

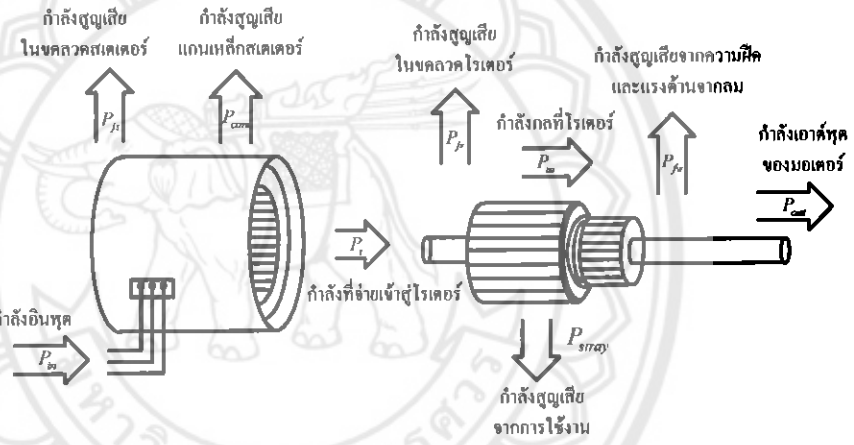
$T_{\max}$ แรงบิดสูงสุด *(N-m)*

$P_{m(\max)}$ กำลังกลสูงสุด *(watt)*

n_s ความเร็วซิงโครนัส *(rpm)*

2.2.5 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัส

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัส หาได้จากกำลังเอาต์พุต (P_{out}) หารด้วยกำลังอินพุต (P_{in}) ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.11 สามารถแสดงลำดับของพลังงานไฟฟ้าทางอินพุต (P_{in}) ที่จ่ายเข้าที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส พลังงานไฟฟ้าส่วนนี้จะเกิดการสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์ (P_{js}) และกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของสเตเตอร์ (P_{core}) กำลังงานส่วนที่เหลือบนสเตเตอร์จะส่งผ่านช่องอากาศมายังโรเตอร์ (P_r) กำลังส่วนนี้จะสูญเสียจากขดลวดสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ (P_{jr}) แปลงเป็นพลังงานกล (P_m) ที่ตัวโรเตอร์ จากนั้นจะเกิดกำลังสูญเสียจากภาระจากการใช้งาน (Stray-load) ซึ่งมีค่าประมาณ 9 ของกำลังกลทางเอาต์พุต และกำลังสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านจากลม (P_{fw}) ก่อนที่จะส่งกำลังกลที่เหลือไปยังเพลาของมอเตอร์กลายเป็นกำลังกลเอาต์พุต (P_{out}) ดังแสดงผังการไหลของพลังงานในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ผังการไหลของพลังงานอินพุตและเอาต์พุตของมอเตอร์ซิงโครนัส

โดยหลักการเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส กำลังสูญเสียในแกนเหล็กของโรเตอร์จะไม่เกิดขึ้นเพราะไม่มีกระแสไหลวนในแกนเหล็กของโรเตอร์ ด้วยสาเหตุที่ว่าโรเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ดังนั้นประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัส (η) คือ ค่าเป็นร้อยละหาได้ดังนี้

$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \qquad (2.12)$$

และ $$P_{in} = P_{out} + P_{losses}$$

เมื่อ P_{losses} กำลังสูญเสียรวมทั้งหมดในมอเตอร์ซิงโครนัส

ดังนั้น $$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}} \times 100\% \qquad (2.13)$$

2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator) หรือเรียกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternators) เพราะทำหน้าที่ผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้พลังงานกลจากต้นกำลังมาหมุนเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสอาจใช้ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นส่วนที่หมุนหรือเป็นส่วนที่อยู่กับที่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับขนาดของเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสขนาดเล็กมีทั้งขั้วสนามแม่เหล็กหมุนและชนิดอาร์เมเจอร์หมุน ใหญ่จะเป็นแบบขั้วสนามแม่เหล็กหมุน แต่สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาดใหญ่จะเป็นแบบขั้วสนามแม่เหล็กหมุน การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ให้เป็นแบบขั้วสนามแม่เหล็กหมุน มีสาเหตุสำคัญที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิด 4 ประการ

1. กำลังเอาต์พุตถูกส่งออกจากเครื่องกำเนิดได้โดยไม่ต้องผ่านสลิปริงและแปรงถ่าน ดังนั้นจึงไม่เกิดการอาร์กที่แปรงถ่านกับสลิปริง ซึ่งเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในเครื่องกำเนิด
2. ทำให้โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดเล็กลง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของขดลวดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์มีขนาดเล็กกว่าอาร์เมเจอร์ที่พันอยู่บนสเตเตอร์มาก ทำให้ขนาดของโรเตอร์คือขดลวดสนามมีขนาดเล็กลง
3. การอาร์กระหว่างหน้าสัมผัสของแปรงถ่านกับสลิปริงจะลดลงมาก เพราะว่าแรงดันที่จ่ายให้ขดลวดสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นแรงดันไฟตรงมีขนาดไม่เกิน 250 โวลต์ เป็นผลให้กำลังสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลง
4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นทำหน้าที่ผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงประมาณ 30 กิโลโวลต์ เนื่องจากขดลวดอาร์เมเจอร์อยู่กับที่ จึงไม่มีปัญหาเรื่องฉนวนกั้นระหว่างสลิปริงที่วางอยู่ตำแหน่งใกล้กัน

2.3.1 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดซิงโครนัส

โดยใช้ต้นกำลังขับ (Prime Mover) ต่อกับเพลาของมอเตอร์ซิงโครนัส นิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัวขับ โดยเพิ่มความเร็วของตัวขับเพื่อให้เครื่องกำเนิดซิงโครนัสหมุนไปที่ความเร็วพิกัดจะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนอยู่รอบๆ สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสสำหรับโรเตอร์จะเป็นขดลวดสนามแม่เหล็กเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กให้มอเตอร์ซิงโครนัส จ่ายไฟตรงให้ขดลวดสนามแม่เหล็กจะเกิดขั้วแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ ขั้วแม่เหล็กนี้จะหมุนเกาะติดไปกับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ ทำให้เพลาของมอเตอร์ซิงโครนัสหมุนไปด้วยความเร็วซิงโครนัส ความเร็วซิงโครนัสหาได้ดังนี้

$$N_S = \frac{120f}{p} \tag{2.14}$$

เมื่อกำหนดให้

N_S ความเร็วซิงโครนัส *(rpm)*

f ความถี่ของแรงดันไฟสลับที่จ่ายให้สเตเตอร์ *(Hz)*

p จำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ *(pole)*

2.3.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ด้วยหลักการพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดัน 1 โวลต์ กำเนิดจากขดลวดตัวนำ 1 รอบ หมุนตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กจำนวน 10^8 ต่อ 1 วินาที ดังนั้นสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเฉลี่ย (E_{av}) ที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้

$$E_{av} = N \times \frac{\phi}{t} \tag{2.15}$$

เมื่อกำหนดให้

E_{av} แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยที่กำเนิดได้ *(volt)*

N จำนวนรอบของขดลวด *(round)*

ϕ ฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้ว *(Wb)*

เมื่อวางลวดตัวนำจำนวน 1 รอบ ระหว่างขั้วแม่เหล็กเหนือและขั้วแม่เหล็กใต้ของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็ก1คู่ตัวนำจะหมุนตัดเส้นแรงแม่เหล็กที่จุดต่ำสุดและสูงสุดทุกๆ $\frac{1}{4}$ รอบ และเมื่อความถี่ในการตัดคือ f ดังนั้น $t = \frac{1}{f}$ ในทุกๆ $\frac{1}{4}$ รอบ $t = \frac{1}{4f}$ แทนค่า $\frac{1}{4f}$ ในสมการ (2.15) และเมื่อกำหนดให้ฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) ในหน่วยเวเบอร์ (*Wb*) จึงได้ว่า

$$E_{av} = N\frac{\phi}{\frac{1}{4f}}$$

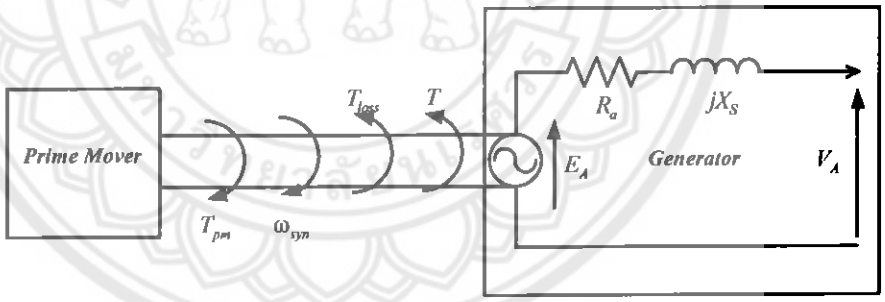
$$E_{av} = 4fN\phi \tag{2.16}$$

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นด้วยหลักการของเครื่องกำเนิดนี้เป็นคลื่นไซน์ดังนั้น ค่าแรงดันไฟสลับของคลื่นไซน์คือ ค่าประสิทธิผลหรือ อาร์เอมเอส (*rms*) และแทนค่าแรงดันอาร์เอมเอส (*rms*) ด้วยแรงดัน (E) ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงดัน (E_{av}) เท่ากับ 1.11 เท่า ดังนั้นสมการแรงดันที่กำเนิดได้เป็นค่าอาร์เอมเอส (*rms*) คือ สมการดังนี้

$$E = 4.44 f N \phi \tag{2.17}$$

2.3.3 การเริ่มเดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

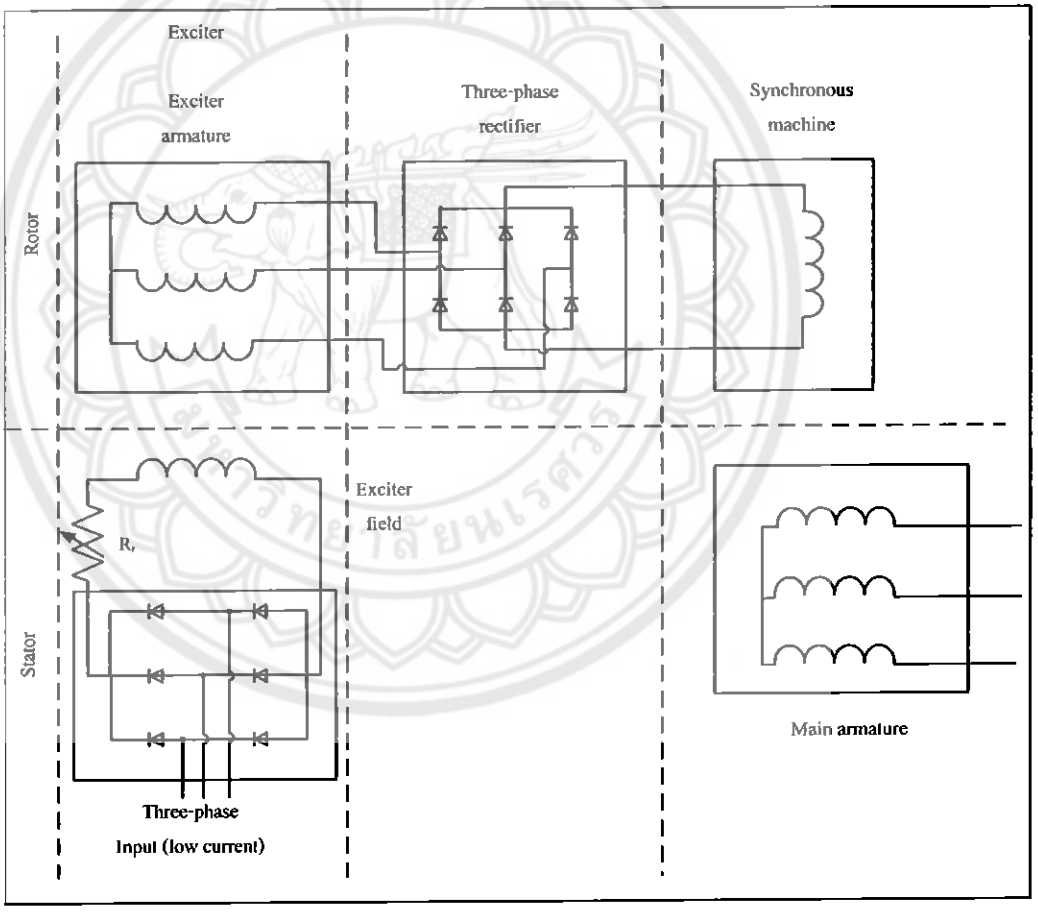
โดยใช้วิธีขับต้นกำลัง (Prime Mover) ต่อกับเพลาของมอเตอร์ซิงโครนัส นิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัวขับ ในที่นี้ตัวขับต้นกำลังอาจจะใช้เป็นกังหันน้ำ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสกรงกระรอกก็ได้ โดยให้มอเตอร์ซิงโครนัสทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพิ่มความเร็วของตัวขับเพื่อให้มอเตอร์ซิงโครนัสหมุนไปที่ความเร็วพิกัด และป้อนกระแสกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กให้มอเตอร์ซิงโครนัส ตรวจสอบลำดับเฟสให้ถูกต้องวัดแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ซิงโครนัสเท่าแรงดันพิกัด และให้ใช้สวิตซ์ 3 เฟสขนานมอเตอร์ซิงโครนัส ซึ่งตอนนี้ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยสมบูรณ์



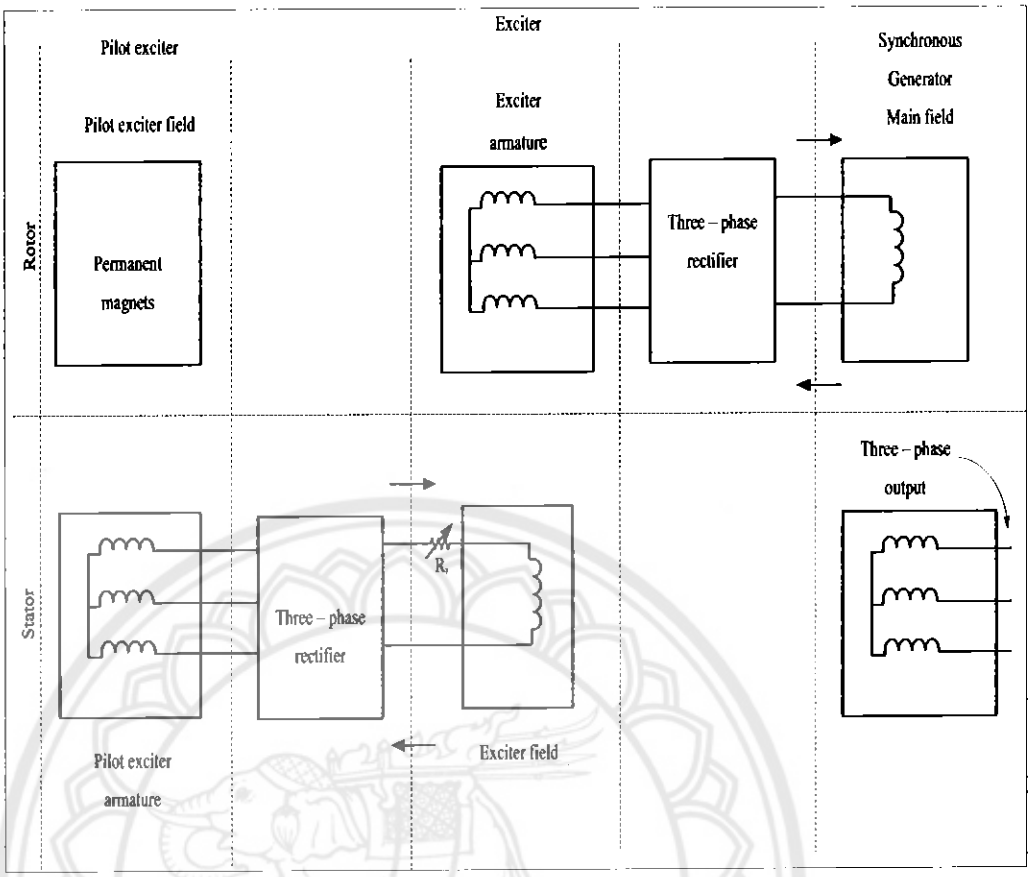
รูปที่ 2.12 การต่อต้นกำลังเพื่อเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

โดยทั่วไปแล้วเครื่องจักรกลซิงโครนัส ส่วนใหญ่จะมีขดลวดอาร์มาเจอร์อยู่บนสเตเตอร์ และขดลวดสนามอยู่ที่โรเตอร์ ในการสร้างสนามแม่เหล็กจะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Excitation) ให้กับขดลวดสนามซึ่งทำได้ 2 ลักษณะคือ ถ้าเป็นเครื่องจักรรุ่นเก่าจะใช้ชุดกระตุ้น (Exciter) ที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีโรเตอร์ต่อร่วมเพลาเดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสจ่ายกระแสให้ขดลวดสนามโดยผ่านวงแหวนสลิป (Slip Rings) และแปรงถ่านสำหรับเครื่องจักรรุ่นใหม่จะใช้ชุดกระตุ้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับชุดเรียงกระแส (Rectifier) ซึ่งติดตั้งอยู่บนเพลาเดียวกันกับโรเตอร์ของเครื่องจักรกลซิงโครนัสจะเห็นได้ว่าลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องใช้แปรงถ่าน (Brushless Excitation) และวงแหวนสลิปนิยมใช้มี 2 แบบ คือ



(ก) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นได้รับจากส่วนอยู่กับที่ภายนอก



(ข) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นได้รับจากเครื่องกำเนิดโดยตรง

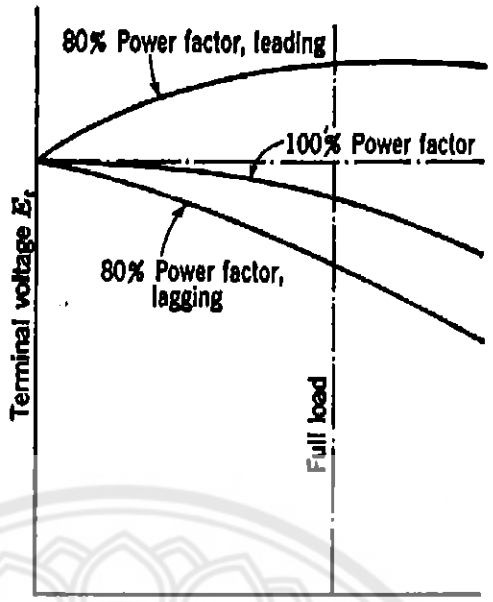
รูปที่ 2.13 การกระตุ้นสนามแม่เหล็ก

2.3.4 โวลต์เตจเรกกูเรชั่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Voltage Regulation)

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทำงานในสภาวะที่พร้อมจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะต้องทำงานตามสภาวะดังต่อไปนี้

1. ต้องหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส
2. มีแหล่งจ่ายไฟตรงจ่ายขดลวดสนามตามพิกัด
3. กำเนิดแรงดันที่ขั้วได้ตามที่กำหนดไว้ในพิกัด

เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไข 3 ประการข้างต้นแล้ว จึงจะสามารถต่อโหลดเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะมีผลต่อแรงดันที่ขั้วโดยตรง และการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิด เกิดจากผลของค่าตัวประกอบกำลังของโหลดเท่านั้น ดังนั้น โวลต์เตจเรกกูเรชั่น คือ การหาค่าร้อยละเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงดันที่ขั้วเมื่อไม่มีโหลด (V_{NL}) และแรงดันที่ขั้วเมื่อมีโหลดเต็มพิกัด (V_{FL})



รูปที่ 2.14 ลักษณะแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (กระแสสนามและความเร็วคงที่)

2.3.5 องค์ประกอบที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ ที่เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในส่วนต่อไป สำหรับองค์ประกอบ 3 ประการดังกล่าวคือ

(1) ผลของความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Armature resistance , R_a)

(2) ผลของอาร์เมเจอร์แอกแตนซ์ (Armature reactance , X_L)

(3) ผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชั่น (Armature reaction , X_a)

(1) ผลของความต้านทานอาร์เมเจอร์

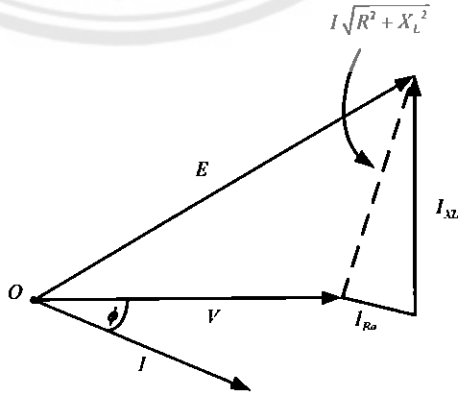
ถ้าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ต่อเฟสคือ R_a เมื่อเครื่องกำเนิดต่อกับโหลดจะเกิดกระแสในอาร์เมเจอร์ ผลคือ เกิดแรงดันตกในอาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับ IR_a ซึ่งจะอินเฟสกับกระแสในอาร์เมเจอร์ในทางปฏิบัติ เมื่อทำการทดลองหาค่าแรงดันตกในอาร์เมเจอร์พบว่ามีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิด ในการคำนวณอาจละทิ้งค่านี้ได้

(2) ผลของอาร์เมเจอร์แอกแตนซ์

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดจะเกิดกระแสไหลผ่านขดลวดอาเมเจอร์ และกระแสนี้จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆ ขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดและความถี่ของกระแสอาร์เมเจอร์ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเกิดที่ปลายขดลวดและบริเวณรอบๆสล๊อต จึงไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ เส้นแรงแม่เหล็กในส่วนนี้ เรียกว่า เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) เนื่องจากค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลแปรผันโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์และขึ้นอยู่กับมุมเฟสของกระแสและแรงดัน ดังนั้นเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหลเปลี่ยนแปลงตามความถี่จะเกิดการตัดกับขดลวดทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นมาในขดลวดด้วยตนเองเรียกว่ารีแอกแตนซ์รั่วไหล (Leakage Reactance หรือ X_L) ซึ่งกระแสอาร์เมเจอร์จะตามหลังแรงดันแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากรีแอกแตนซ์รั่วไหลเป็นมุม 90 องศาไฟฟ้าดังนั้นสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีความสัมพันธ์กับความต้านทานอาร์เมเจอร์และ รีแอกแตนซ์รั่วไหลคือสมการ (2.18)

$$E = V + IR_a + jIX_L$$
$$E = V + I(R_a + jX_L)$$
$$E = V + I\sqrt{R^2 + X_L^2} \qquad (2.18)$$

โดยที่ $I\sqrt{R^2 + X_L^2}$ คือแรงดันไฟฟ้าตกที่มีผลจากค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์และเกิดจากรีแอกแตนซ์รั่วไหลในอาร์เมเจอร์ เฟสเซอร์แสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามสมการ (2.18) แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงแรงดันตกที่เกิดจากความต้านทานอาร์เมเจอร์และรีแอกแตนซ์รั่วไหล

(3) ผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชั่น

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายโหลด จะเกิดกระแสไหลผ่านอาร์เมเจอร์ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากอาร์เมเจอร์ปรากฏการณ์เกิดเช่นเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง อย่างไรก็ตาม ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนั้น ผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชั่นแปรผันกับค่าตัวประกอบกำลังของโหลดที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดด้วย นั่นคือ โหลดที่เป็นผลของค่าความต้านทานจะเป็นโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1และโหลดที่เป็นผลของตัวเหนี่ยวนำจะเป็นโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังล้าหลังและโหลดที่เป็นผลของตัวเก็บประจุจะเป็นโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

โหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง คือโหลดความต้านทานจะมีค่าตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง นั่นคือกระแสโหลดและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดได้จะเกิดพร้อมกันและจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงสุด เพราะว่าขดลวดอาร์เมเจอร์เคลื่อนที่ตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กตรงตำแหน่งกึ่งกลางขั้วแม่เหล็กพอดี

โหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังนำหน้า คือ กระแสโหลดจะมีมุมเฟสนำหน้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้แรงแม่เหล็กที่อาร์เมเจอร์เสริมกันกับเส้นแรงแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็ก เป็นผลให้เส้นแรงแม่เหล็กภายใต้ขั้วแม่เหล็กนั้นมีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าสูงกว่าขณะไม่มีโหลด

โหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังล้าหลัง คือโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังล้าหลังกระแสโหลดจะมีมุมเฟสล้าหลังกระแสโหลดจะมีมุมเฟสล้าหลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วของเครื่องกำเนิดเมื่ออาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนไป เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีทิศทางสวนทางกับเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก จะเป็นผลให้เส้นแรงแม่เหล็กรวมของขั้วแม่เหล็กมีค่าความหนาแน่นลดลงเป็นสาเหตุให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสลดลงไปด้วย

2.3.6 รีแอกแตนซ์ซิงโครนัส

รีแอกแตนซ์ซิงโครนัส (Synchronous Reactance : X_s) เป็นรีแอกแตนซ์รวมระหว่างรีแอกแตนซ์รั่วไหล (X_L) และรีแอกแตนซ์ของอาร์เมเจอร์ (X_a) รีแอกแตนซ์ซิงโครนัสเป็นผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตกลงเมื่อโหลดมีค่าตัวประกอบกำลังล้าหลัง โดยค่าแรงดันนี้จะต่ำกว่าค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะไม่มีโหลดทั้งนี้ด้วยสาเหตุ 3 ประการ คือ

(1) เกิดจากแรงดันตกที่ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (IR_a)

(2) เกิดจากแรงดันตกเนื่องจากผลของรีแอกแตนซ์รั่วไหลที่อาร์เมเจอร์ (IX_L)

(3) เกิดจากผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชั่น (IX_a)

ในส่วนของแรงดันตกเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชั่นเมื่อโหลดเหนี่ยวนำนั้นเมื่อกำหนดให้ X_a คือรีแอกแตนซ์ที่สมมติขึ้นในสภาวะที่เกิดอาร์เมเจอร์รีแอกชั่น ดังนั้นแรงดันที่เกิดจาก X_a คือ IX_a เนื่องจากรีแอกแตนซ์ซิงโครนัสคือผลรวมของรีแอกแตนซ์รั่วไหลและรีแอกแตนซ์ที่อาร์เมเจอร์และค่าของ X_a จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวประกอบกำลังของโหลด ดังนั้น ค่าของ X_s หาได้จากสมการ

$$X_S = X_L + X_a \tag{2.19}$$

นั่นคือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขณะมีโหลด คือ

$$IR_a + jIX_S = I(R_a + jX_S)$$

$$I(R_a + jX_s) = IZ_s \tag{2.20}$$

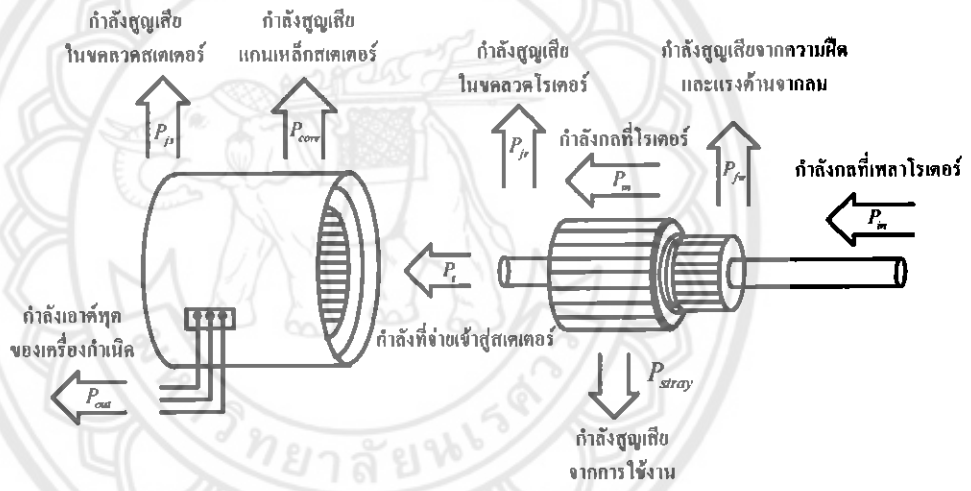
เมื่อกำหนดให้ Z_s อิมพิแดนซ์ซิงโครนัส นั่นคือ

$$Z_s = R_a + jX_s$$

$$Z_s = \sqrt{R_a^2 + X_s^2} \tag{2.21}$$

2.3.7 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัส หาได้จากกำลังเอาต์พุต (P_{out}) หารด้วยกำลังอินพุต (P_{in}) ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 2.16 สามารถแสดงลำดับของพลังงานไฟฟ้าทางอินพุต (P_{in}) ที่จ่ายเข้าที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส พลังงานไฟฟ้าส่วนนี้จะเกิดการสูญเสียในขดลวดทองแดงของสเตเตอร์ (P_{js}) และกำลังสูญเสียในแกนเหล็กของสเตเตอร์ (P_{core}) กำลังงานส่วนที่เหลือบนสเตเตอร์จะส่งผ่านช่องอากาศมายังโรเตอร์ (P_r) กำลังส่วนนี้จะสูญเสียจากขดลวดสนามแม่เหล็กของโรเตอร์ (P_{jr}) แปลงเป็นพลังงานกล (P_m) ที่ตัวโรเตอร์ จากนั้นจะเกิดกำลังสูญเสียภาระจากการใช้งาน (Stray-load) ซึ่งมีค่าประมาณ 9 ของกำลังกลทางเอาต์พุต และกำลังสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านจากลม (P_{fw}) ก่อนที่จะส่งกำลังกลที่เหลือไปยังเพลาของมอเตอร์กลายเป็นกำลังกลเอาต์พุต (P_{out}) ดังแสดงผังการไหลของพลังงานในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ผังการไหลของพลังงานอินพุตและเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ดังนั้นประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัส คือ (η) ค่าเป็นร้อยละหาได้จากสมการ

$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{2.22}$$

และ $$P_{in} = P_{out} + P_{losses}$$

เมื่อกำหนดให้

P_{losses} กำลังสูญเสียรวมทั้งหมดในมอเตอร์ซิงโครนัส

ดังนั้น $$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}} \times 100\% \tag{2.23}$$

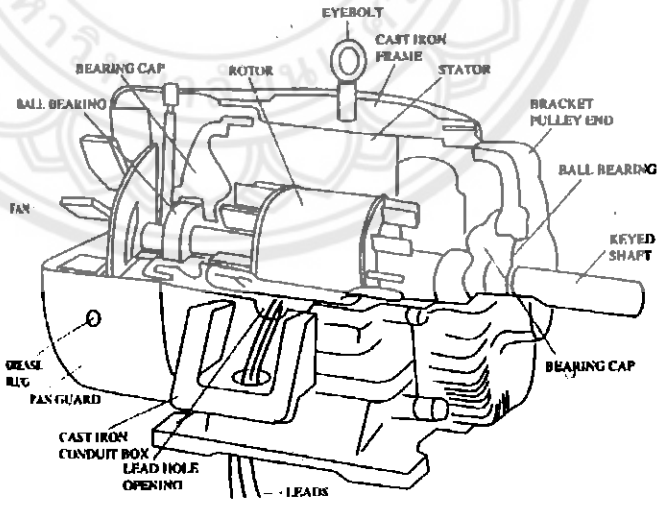
2.4 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าปกติเครื่องกลอินดักชันเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดแต่ถ้านำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดจะมีข้อเสียมากจึงไม่ค่อยนิยมใช้กันดังนั้นเมื่อกล่าวถึงเครื่องกลอินดักชันจึงมักหมายถึงมอเตอร์อินดักชันโดยทั่วไปจะนิยมนำไปใช้งานเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับใช้เป็นตัวต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีราคาถูกหลักการทำงานไม่ซับซ้อนมีความสะดวกและง่ายต่อการบำรุงรักษาเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นๆ

คำว่า "อินดักชัน" (Induction) หมายถึง การเหนี่ยวนำบางครั้งเรียก**มอเตอร์อินดักชันว่า**มอเตอร์เหนี่ยวนำสาเหตุที่เรียกเช่นนี้ เพราะการหมุนของมอเตอร์ดังกล่าวเกิดจาก**การเหนี่ยวนำของ**สนามแม่เหล็กหมุนของขดลวดที่สเตเตอร์ที่มีต่อตัวนำในโรเตอร์

2.4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

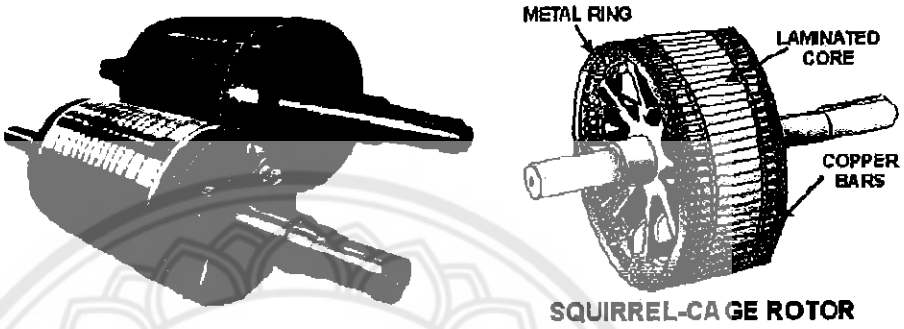
โครงสร้างหลักๆจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่กับตัวหมุน**ที่สเตเตอร์จะเป็น**ส่วนที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้าและในส่วนนี้จะพันขดลวด 3 **ชุดตามจำนวน**เฟส ในตัวหมุนโครงสร้างของโรเตอร์จะมี 2 ลักษณะคือแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel Cage) กับแบบโรเตอร์พันด้วยขดลวด (Wound Rotor)



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส

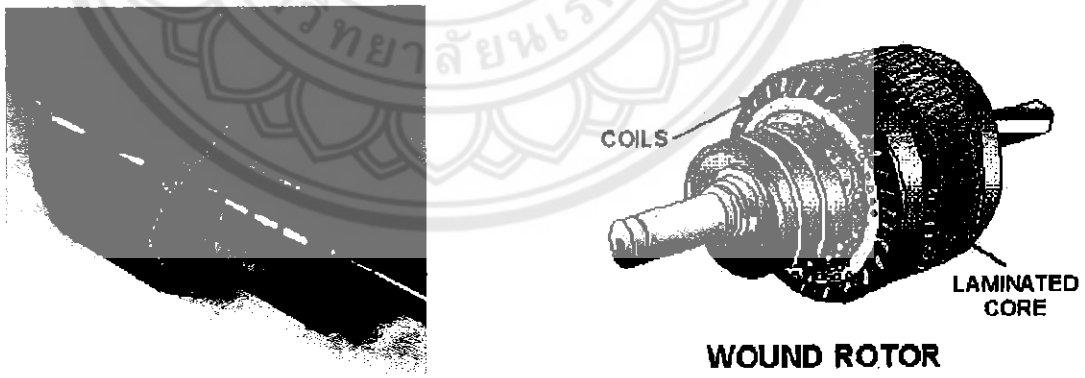
ส่วนของโรเตอร์ จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

(ก) แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) โครงสร้างแบบนี้จะประกอบด้วยแท่งโลหะที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเช่น อลูมิเนียมอัลลอยด์โดยที่ที่หัวและท้ายของแท่งโลหะจะต่อเชื่อมถึงกัน ดังรูปที่ 2.18



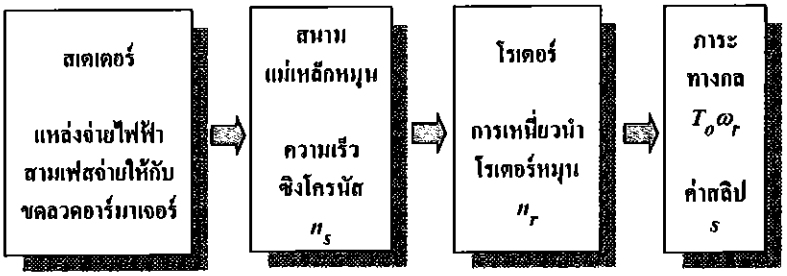
รูปที่ 2.18 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor) [8]

(ข) แบบวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor)โครงสร้างของโรเตอร์ชนิดนี้ จะมีลักษณะเป็นเหล็กที่ทำเป็นช่อง (Slot) ไว้โดยรอบที่ผิวภายในช่องจะพันด้วยขดลวด มีจำนวนขั้วและเฟสเท่ากับจำนวนขั้วและเฟสของสเตเตอร์ลักษณะการต่อขดลวดของโรเตอร์ จะต่อเป็นแบบวาย (Wye) หรือเดลต้า (Delta) ก็ได้ ปลายที่เหลือจะถูกนำออกมาต่อกับวงแหวนลื่น (Slip ring) เพื่อต่อกับความต้านทานภายนอกสำหรับใช้ในการเริ่มเดินเครื่อง ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โรเตอร์แบบแบบวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor) [8]

2.4.2. การทำงานในสภาวะมอเตอร์ (Motor)



รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

หลักการทำงาน

หลักการทำงานของอินดักชั่นมอเตอร์ (Induction Motor) จะเหมือนกับของหมอแปลงไฟฟ้าคือ แบ่งเป็นสองส่วนได้แก่ ขดลวดทางด้านปฐมภูมิหรือสเตเตอร์ และขดลวดทางด้านทุติภูมิหรือโรเตอร์ โรเตอร์และสเตเตอร์ จะถูกแยกออกจากกันเป็นอิสระ กระแสที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์จะเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ ดังนั้นพลังงานจะถูกส่งผ่านจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ในทำนองเดียวกันกับการส่งผ่านพลังงานจากขดลวดปฐมภูมิไปยังทุติยภูมิของหมอแปลง แตต่างกันตรงที่ โรเตอร์ของ Induction motor เคลื่อนที่หรือหมุนได้สเตเตอร์ของมอเตอร์จะถูกจ่ายด้วยไฟกระแสสลับ ทำให้เกิดเอ็มเอ็มเอฟ (mmf) ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) เมื่อโรเตอร์ถูกวางอยู่ในสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่สเตเตอร์ ฟลักซ์แม่เหล็กจะตัดผ่านตัวนำของโรเตอร์และกำเนิดอีเอ็มเอฟ (Emf) ขึ้นที่ภาวะไร้โหลดโรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับสนามแม่เหล็กและมีกระแสถูกเหนี่ยวนำในตัวนำน้อยมาก แต่เมื่อมอเตอร์ถูกโหลด โรเตอร์จะหมุนช้ากว่าความเร็วของสนามแม่เหล็ก และกระแสจำนวนมากจะถูกเหนี่ยวนำในตัวนำของโรเตอร์

ความเร็วเชิงมุมของการหมุนของสนามแม่เหล็ก จะขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ 2 ตัว คือ ความถี่และกระแส และจำนวนขั้วของสเตเตอร์ คือ

$$N_S = \frac{120f}{p} \tag{2.24}$$

เมื่อกำหนดให้

N_S ความเร็วซิงโครนัส (*rpm*)

f ความถี่ของแรงดันไฟสลับที่จ่ายให้สเตเตอร์ (*Hz*)

p จำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ (*pole*)

Ns ในสมการที่ 2.24 เปนความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) ของสนามแมเหล็กที่หมุน ไมใชความเร็วของโรเตอร (Rotor speed) โดยโรเตอรปกติจะหมุนชากว่าความเร็วซิงโครนัสอยูประมาณ 2-5% เสมอขึ้นอยูกับโหลดทางกลของมอเตอร ความแตกตางระหวางความเร็วซิงโครนัสกับ ความเร็วโรเตอรนี้เรียกวา สลิป (Slip) ดังสมการที่ 2.25

$$S = \frac{N_S - N_r}{N_S} \tag{2.25}$$

เมื่อกำหนดให้

S สลิป (Slip)

N_S ความเร็วซิงโครนัส (*rpm*)

Nr ความเร็วโรเตอร์ (*rpm*)

ความเร็วของโรเตอรสามารถแสดงอยูในรูปของ ความเร็วซิงโครนัสและ Slip (S) ไดดังสมการที่ 2.26

$$N_r = N_S(1-S)$$

$$N_r = \frac{120f}{p} \times (1-S) \tag{2.26}$$

ความถี่ของแรงดันที่เกิดขึ้นในสเตเตอร คือ

$$\omega_S = \frac{P}{2}\omega_m \tag{2.27}$$

เมื่อกำหนดให้

ω_m ความเร็วเชิงกล (rad./sec)

ความถี่ของโรเตอร์ $f_r = s.f_e$ (2.28)

เมื่อกำหนดให้

f_r ความถี่ของโรเตอร์ (*Hz*)

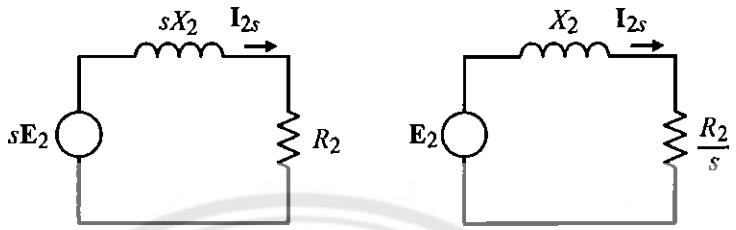
f_e ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (*Hz*)

ในขณะที่เริ่มหมุน (Starting) ค่าสลิปจะเท่ากับ 1 ความถี่ของโรเตอร์ fr จะเท่ากับความถี่ fe ของสเตเตอร์

2.4.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Equivalent Circuit)

วงจรสมมูลของโรเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Rotor Equivalent Circuit)

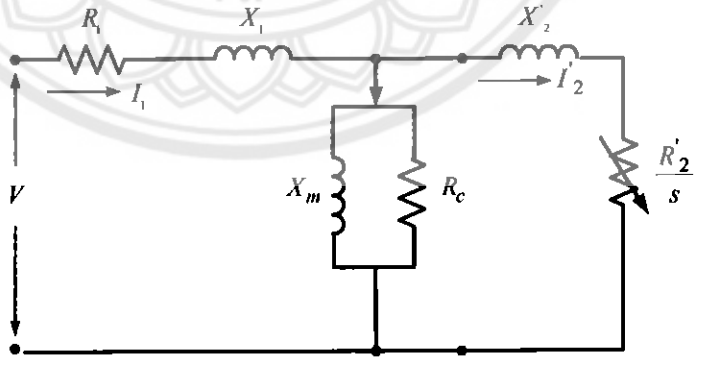
จากสมการที่ 2.28 จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ของโรเตอร์จะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าสลิป ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆทางไฟฟ้าที่โรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิป



รูปที่ 2.21 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของโรเตอร์ต่อเฟส 2 รูปแบบ

วงจรสมมูลของสเตเตอร์ต่อเฟส (Per Phase Stator Equivalent Circuit)

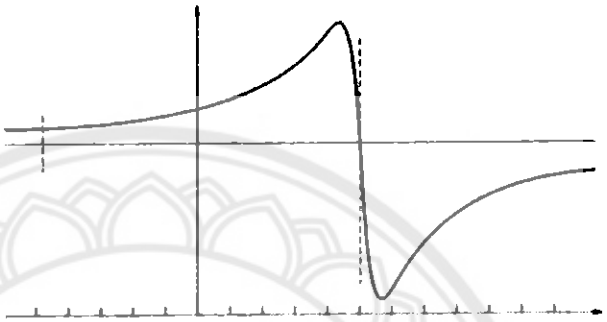
วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 กำหนดให้ V, I_1, R_1 และ X_1 เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าพิกัด ค่ากระแสความต้านทานไฟฟ้าและความต้านทานเสมือน (Leakage Reactance) ขณะหยุดนิ่งของสเตเตอร์ตามลำดับ R_c และ X_m เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าการสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss Resistance) และค่าความต้านทานเสมือนการสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Reactance) ของสเตเตอร์ตามลำดับ จะได้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าต่อเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.22 โดยกำหนดให้ค่า I'_2, R'_2 และ X'_2 เป็นค่าที่พิจารณาอยู่ทางด้านสเตเตอร์แล้ว



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ต่อเฟส

2.4.4 การทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

กรณีที่ทำงานในสภาวะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้น จะต้องมีตัวขับต้นกำลังขับที่แกนโรเตอร์ให้หมุนที่ความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส ทำให้สลิปมีค่าน้อยกว่าศูนย์หรือมีค่าติดลบโดยที่จะต้องได้รับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้าตลอดเวลา เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟออกมาจึงสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.23 ลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ค่าสลิปต่างๆ

จากรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่านอกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถทำงานในสภาวะที่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำแล้ว ยังสามารถทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้แต่การนำเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาใช้งานนั้นอาจจะมีปัญหาได้ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำจะถูกออกแบบให้มีความเร็วรอบที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส แต่เมื่อนำมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจะให้ตัวขับต้นกำลังหมุนแกนโรเตอร์ให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงกว่าพิกัดกำลังที่ออกแบบให้ใช้งานจริงของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งจะทำให้อายุการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆมีประสิทธิภาพที่ลดลง ส่งผลให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดการชำรุดเสียหายได้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นในการเลือกใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นจึงควรพิจารณาถึงพิกัดกำลังของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ด้วย

บทที่ 3

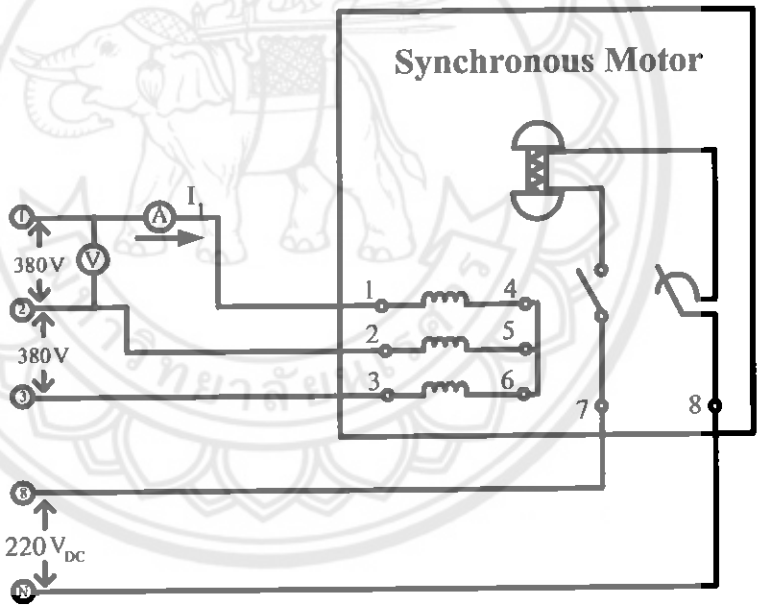
การทดสอบและวิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบหาคุณลักษณะของการเริ่มเดินเครื่องจักรกลซิงโครนัสและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำหน้าที่เป็นมอเตอร์

3.1.1 การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสขณะไม่มีโหลด

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเอาซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous Motor) , ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Supply) และชุดมิเตอร์วัดไฟฟ้าสลับ (AC Meter) มาต่อวงจรดังรูปที่ 3.1 ให้ต่อขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เป็นแบบวาย (Wye) แล้วต่อเข้าเอาท์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ให้แรงดันไฟฟ้าคงที่ 380 V_{AC} ที่ขั้วต่อ 1 , 2 และ 3



รูปที่ 3.1 การต่อขดลวดสเตเตอร์ของซิงโครนัสมอเตอร์

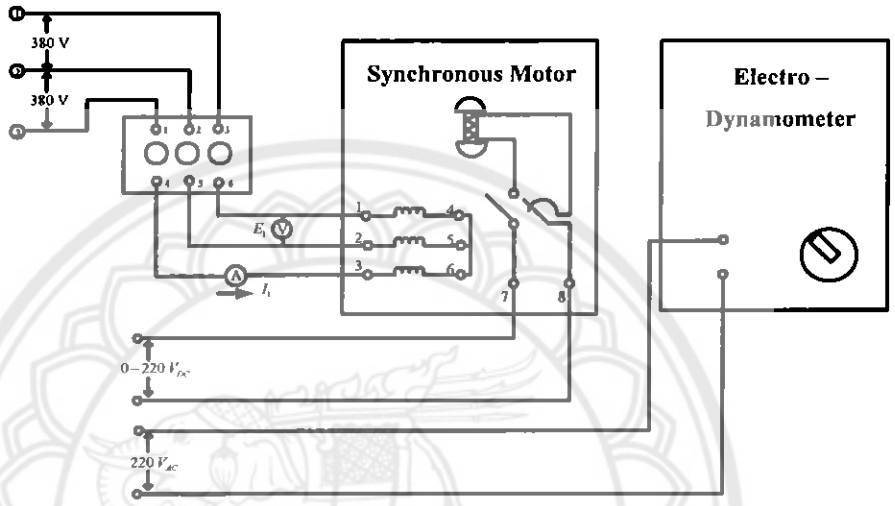
2. ขดลวดโรเตอร์ของซิงโครนัสมอเตอร์จะต่ออยู่กับเอาท์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ให้แรงดันไฟฟ้า 0- 220 V_{DC} (ที่ขั้ว 7 และ N) เปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าขณะนี้แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส

3. ค่อยๆปรับหมุนตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้มีค่าเป็น 220V_{DC} ซึ่งจ่ายให้กับขดลวดโรเตอร์ โดยสังเกตที่เข็มมิเตอร์

3.1.2 การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสขณะมีโหลด

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำชุดอิเล็คโตรไดนาโมมิเตอร์ (Electro Dynamometer) และ ชุดซิงโครไนซิงค์สวิตช์ (Synchronizing Switch Modules) มาต่อวงจรตามรูปที่ 3.2 แล้วต่อมอเตอร์เข้ากับอิเล็คโตร-ไดนาโมมิเตอร์ด้วยสายพาน



รูปที่ 3.2 วงจรเริ่มเดินของซิงโครนัสมอเตอร์ขณะต่อโหลด

2. ชุดซิงโครไนซิงค์สวิตช์จะใช้สวิตช์เป็นลักษณะ เปิด-ปิด ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์ และวงจรในรูปที่ 3.2 ให้ตั้งสวิตช์นั้นอยู่ในตำแหน่งเปิดวงจร (OFF)

3. ให้ต่อเอาท์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีค่า 220 V_{AC} คงที่ (ที่ขั้ว I และ N) เข้ากับอินพุตของชุดอิเล็คโตรไดนาโมมิเตอร์แล้วหมุนลูกบิด (knob)ในทิศตามเข็มนาฬิกาให้มีค่าประมาณ 10% ของการป้อนสูงสุด (ตั้งโหลดไว้ที่ 10 % ของโหลดทั้งหมด)

4. ขดลวดโรเตอร์ของซิงโครนัสมอเตอร์จะต่ออยู่กับเอาท์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ให้แรงดันไฟฟ้า 0- 220 V_{DC} (ที่ขั้ว 7 และ N) พร้อมตั้งค่าความต้านทานฟิลด์ (Field Rheostat) ให้มีค่าความต้านทานเป็น 0 โอห์ม โดยหมุนปุ่มปรับในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจนสุด ตั้งสวิตช์ (S) ที่รีโอสแตตที่โรเตอร์ ให้เป็นเปิด (ON)

5. เปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าขณะนี้แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส จะมาอยู่ที่ชุดซิงโครไนซิงค์สวิตช์ ซึ่งอยู่ในตำแหน่งสวิตช์ปิด (Off) อยู่ และให้สังเกตที่หลอดไฟทั้งสามของชุดซิงโครไนซิงค์สวิตช์ จากนั้นเปิด (ON) สวิตช์ของชุดซิงโครไนซิงค์สวิตช์ สังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นแล้วบันทึกค่า

6. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 3 แล้วเปลี่ยนค่าโหลดเป็น 20% - 100%

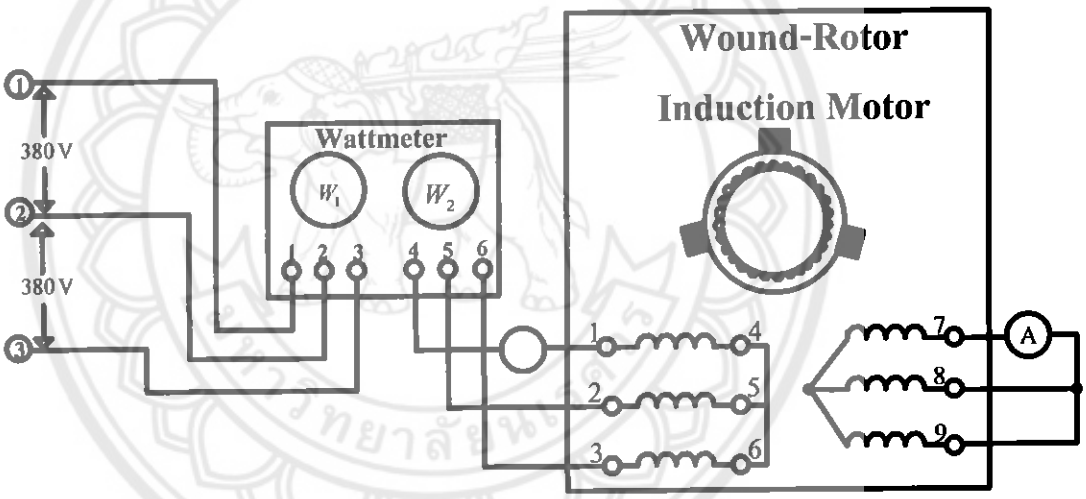
3.1.3 การเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดวาวด์โรเตอร์(Wound Rotor Induction Motor) ชุดอิเล็คโตรไดนาโมมิเตอร์ (Electro Dynamometer) , แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Supply) และชุดมิเตอร์วัดไฟฟ้าสลับ (AC Meter) มาต่อวงจรดังรูปที่ 3.3 ขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 ชุด จะต่ออยู่กับเอาท์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ที่ขั้วต่อ 1, 2 และ 3

2. ขดลวดโรเตอร์ทั้ง 3 ชุด จะต่ออยู่กับเอาท์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ที่ขั้วต่อ 7, 8 และ 9

3. เปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า วัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าของโรเตอร์และวัดค่ากระแสที่สเตเตอร์ วัดความเร็วรอบ

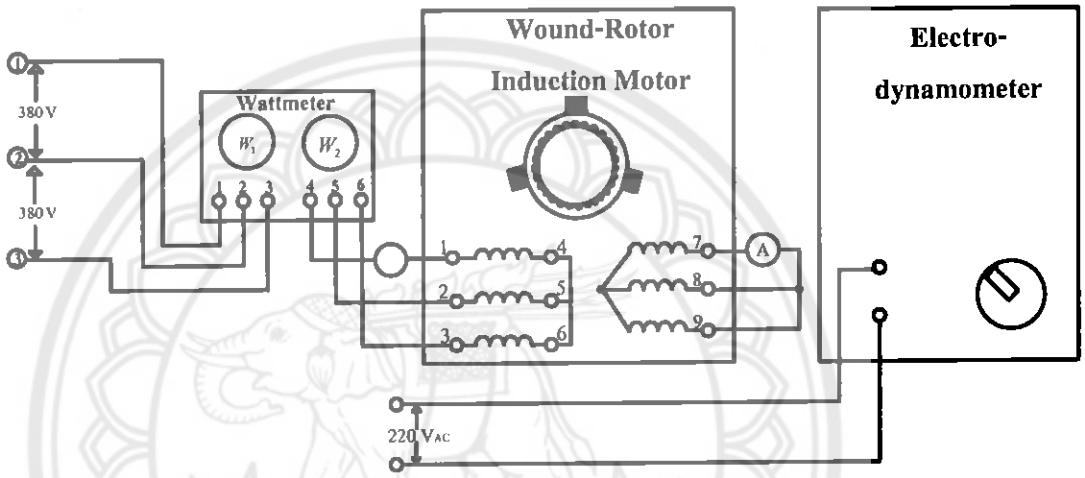


รูปที่ 3.3 วงจรสำหรับทดสอบการเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด

3.1.4 การเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีโหลด

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเอามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor Induction Motor) , ชุดอิเล็คโตรไดนาโมมิเตอร์ (Electro Dynamometer) , แหล่งจ่ายไฟฟ้า , และชุดมิเตอร์วัดไฟฟ้าสลับมาต่อวงจร ดังรูปที่ 3.4 ขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 ชุด จะต่ออยู่กับเอาท์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ที่ขั้วต่อ 1, 2 และ 3



รูปที่ 3.4 วงจรสำหรับทดสอบการเริ่มเดินของมอเตอร์วาวด์โรเตอร์

2. ต่อสายพานระหว่างชุดวัดค่าแรงบิดด้วยแม่เหล็กไฟฟ้ากับวาวโรเตอร์มอเตอร์

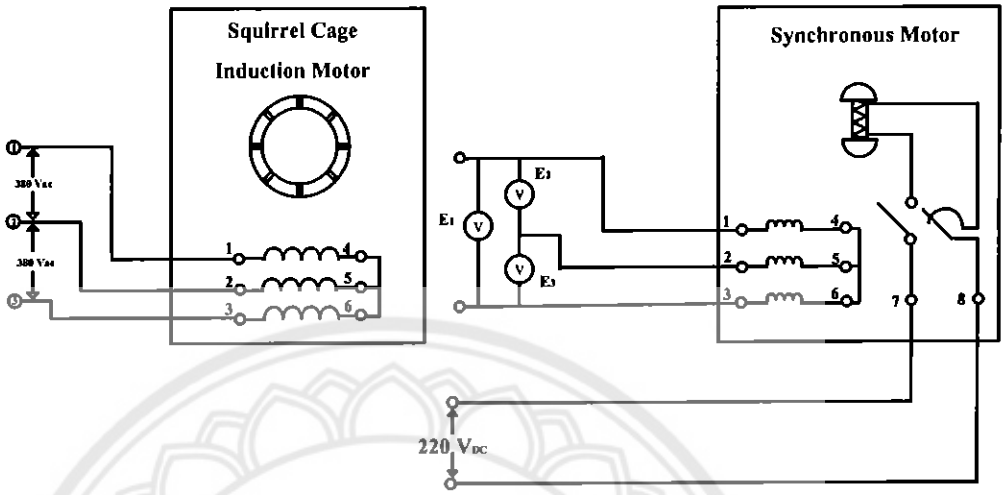
2.1 ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า ที่มีค่า 220 V_{AC} คงที่ ที่ขั้วต่อ 1 และ N เขากับอินพุตของชุดอิเล็คโตรไดนาโมมิเตอร์

2.2 ปรับปุ่มบิดของชุดอิเล็คโตรไดนาโมมิเตอร์ไปในทิศทางหมุนตามเข็มนาฬิกาให้มีค่าประมาณ 10% ของการป้อนสูงสุด (ตั้งโหลดไว้ที่ 10 % ของโหลดทั้งหมด)

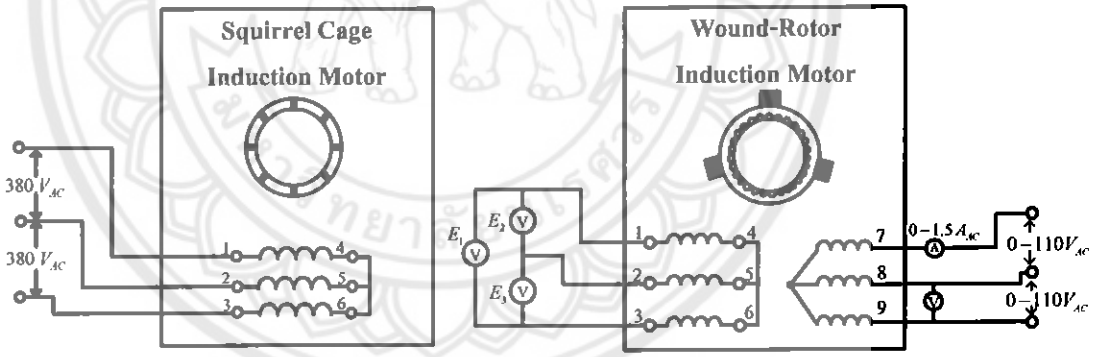
3. เปิดสวิตช์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า วัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ทั้ง 3 และค่าแรงบิดที่เกิดขึ้น

4. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 3 แล้วเปลี่ยนค่าโหลดเป็น 20% - 100%

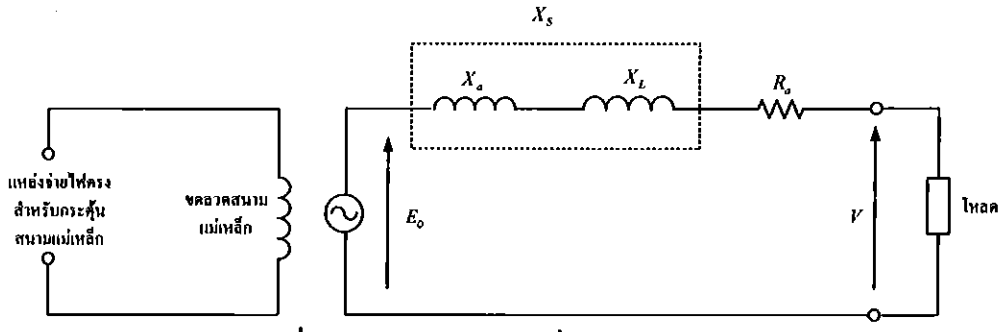
3.2 การทดสอบเครื่องจักรกลซิงโครนัสและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 วงจรสำหรับทดสอบการเริ่มเดินของเครื่องกำเนิดซิงโครนัส



รูปที่ 3.6 วงจรสำหรับทดสอบการเริ่มเดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดซิงโครนัส

R_a ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์

X_s รีแอกแตนซ์ซิงโครนัส

ประเภทของโหลดที่ใช้ทดสอบ

ชนิดของโหลดที่ใช้ทดสอบ

โหลดชนิด ความต้านทาน (R = 1100 Ω)

โหลดชนิด ตัวเก็บประจุ 2.89μF (C = 1100 Ω)

โหลดชนิด ตัวนำ 3.5 H (L= 1100 Ω)

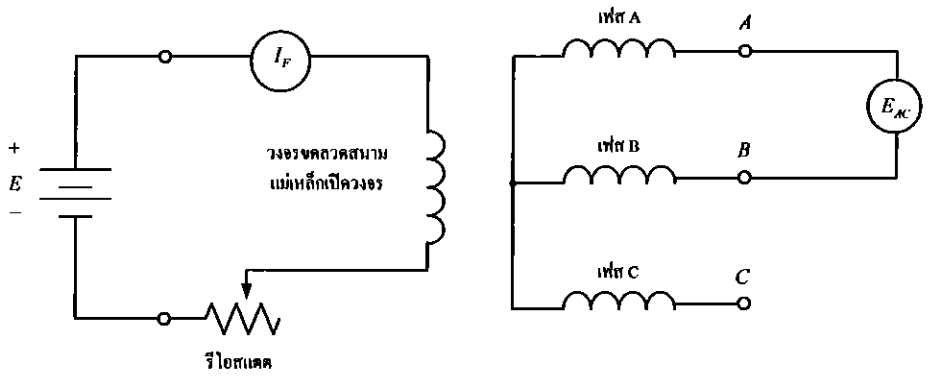
หมายเหตุ ใช้โหลด 1100Ω เพราะ พิกัดของค่ากระแสมีค่าที่ต่ำเมื่อใช้ในค่าความ**ต้านทานของโหลด**อื่นๆและ โหลดชนิดปรับค่าได้ในห้องปฏิบัติการชำรุดทำให้การใช้โหลดอยู่ใน**ค่าที่จำกัด**

วิธีการทดสอบหาคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1. การทดสอบสภาวะไม่มีโหลด (No load Test)
2. การทดสอบสภาวะเมื่อต่อกับโหลดชนิด RLC

3.2.1. การทดสอบสภาวะไม่มีโหลด (No Load Test)

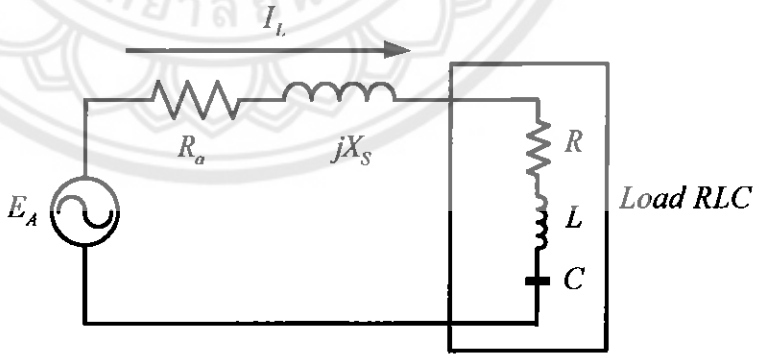
คือการทดสอบหาค่าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสขณะเปิดวงจรไม่ต่อโหลดโดยต้องทำการขับมอเตอร์ให้หมุนไปที่ความเร็วซิงโครนัสตามพิกัดกำหนด และต่อแหล่งจ่ายไฟตรงเข้ากับขดลวดสนามแม่เหล็ก และค่อยๆปรับค่ากระแสขดลวดสนามแม่เหล็ก (I_f) ตั้งแต่ค่าศูนย์จนถึงค่าที่เป็นผลให้สนามแม่เหล็กเริ่มอิ่มตัว และทดลองวัดค่าแรงดันที่ขั้ว (E_{AC}) สำหรับวงจรการทดสอบแบบเปิดวงจรแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรทดสอบแบบเปิดวงจร

3.2.2 การทดสอบสภาวะเมื่อต่อโหลดชนิด RLC

วิธีการทดสอบนี้จะต่อโหลด RLC กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยแบ่งชนิดของโหลด 4 ชนิด R, RL , RC , RLC เพื่อหาคุณสมบัติแรงดันและกระแสของโหลดในโหลดประเภทต่างๆ ก่อนการทดสอบให้ดูพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าว่าทนกระแสได้มากสุดกี่แอมแปร์ (A) จากนั้นเลือกโหลดให้เหมาะกับพิกัดมิฉะนั้นโหลดอาจเสียหายได้ ขั้นตอนการทดสอบเมื่อต่อวงจรโหลดเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าป้อนแรงดัน 3 เฟส ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อเริ่มเดินจากนั้นค่อยๆ กระตุ้นไฟฟ้ากระแสตรงที่โรเตอร์ เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายแรงดันให้กับโหลด จากนั้นให้วัดแรงดันที่ตกคร่อมโหลดและกระแสโหลด เมื่อทำการวัดเสร็จในขณะนั้นจะทำการปลดโหลดทั้งหมดเพื่อหาแรงดันที่ไม่ต่อกับโหลด (Vn) เพื่อไปเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเลชั่น (Voltage Reguration) โดยจะทดสอบไปถึงค่ากระแสเต็มพิกัด (Full Load)



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อต่อกำโหลด RLC

สมการการคำนวณหาค่าโวลต์เตจเรกกูเรชั่น (Voltage Reguration)

$$\%V = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}}$$

เมื่อกำหนดให้

V_{NL} แรงดันขณะไม่มีโหลด

V_{FL} แรงดันขณะโหลดเต็มที่

บทที่ 4

ผลที่ได้จากการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบการเริ่มเดินเครื่องจักรกลซิงโครนัสและเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะทำหน้าที่เป็นมอเตอร์

4.1.1 ผลการทดสอบการเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสขณะไม่มีโหลด

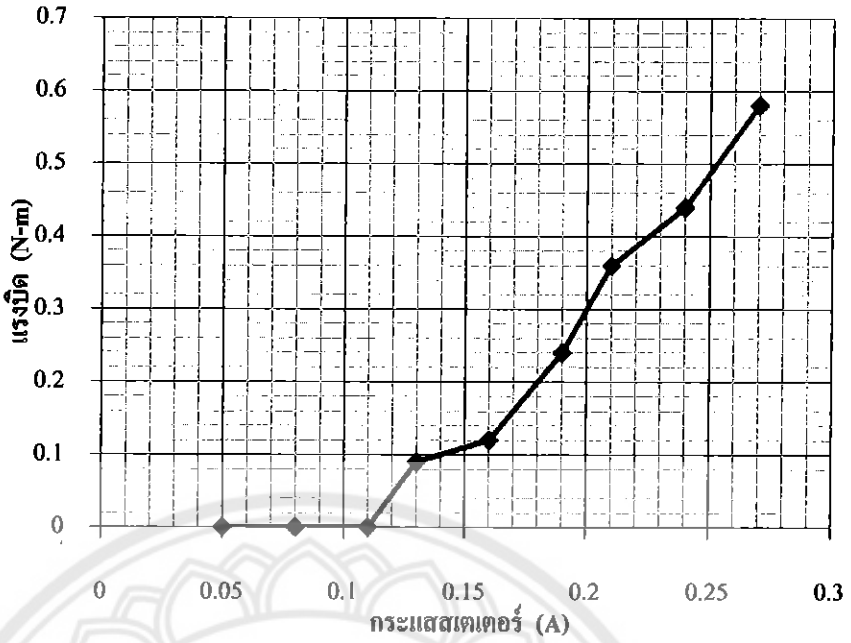
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสขณะไม่มีโหลด

E_I (A)	I_s(A)	τ (N-m)	Speed (rpm)
380	0.05	0	1500

4.1.2 การเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสขณะมีโหลด

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสขณะมีโหลด (I_{max} = 0.27)

I (A)	I_s(A)	τ (N-m)	Speed (rpm)
10%	0.05	0	1500
20%	0.05	0	1500
30%	0.08	0	1500
40%	0.11	0	1500
50%	0.13	0.09	1500
60%	0.16	0.12	1500
70%	0.19	0.24	1500
80%	0.21	0.36	1500
90%	0.24	0.44	1500
100%	0.27	0.58	1500



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสเตเตอร์กับแรงบิด

4.1.3 การเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด

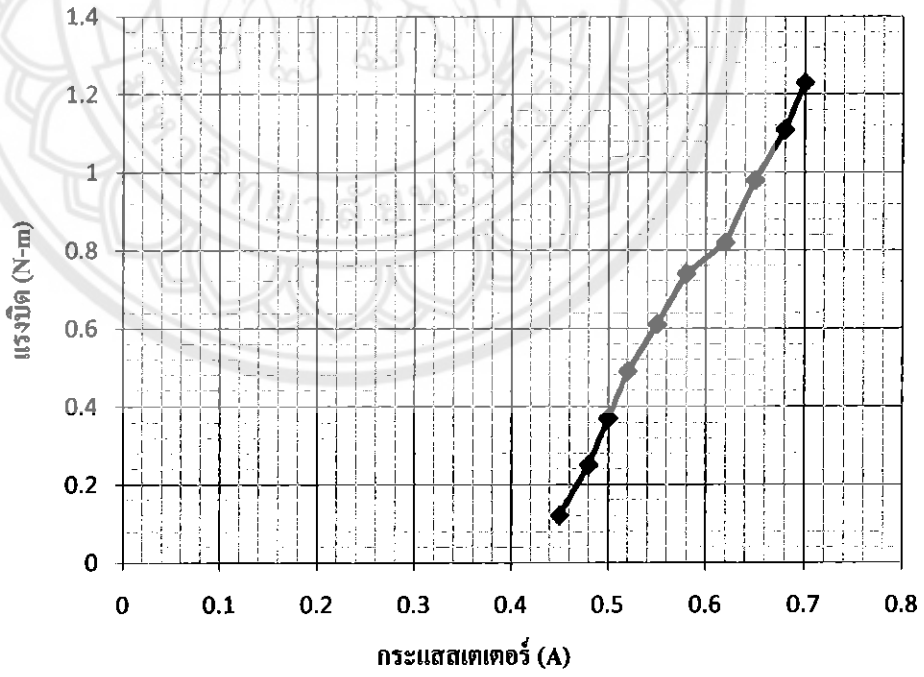
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะไม่มีโหลด

E_1 (V)	I_s (A)	W_1+W_2 (Watt)	τ (N-m)	Speed (*rpm*)
380	0.45	48	0	1489

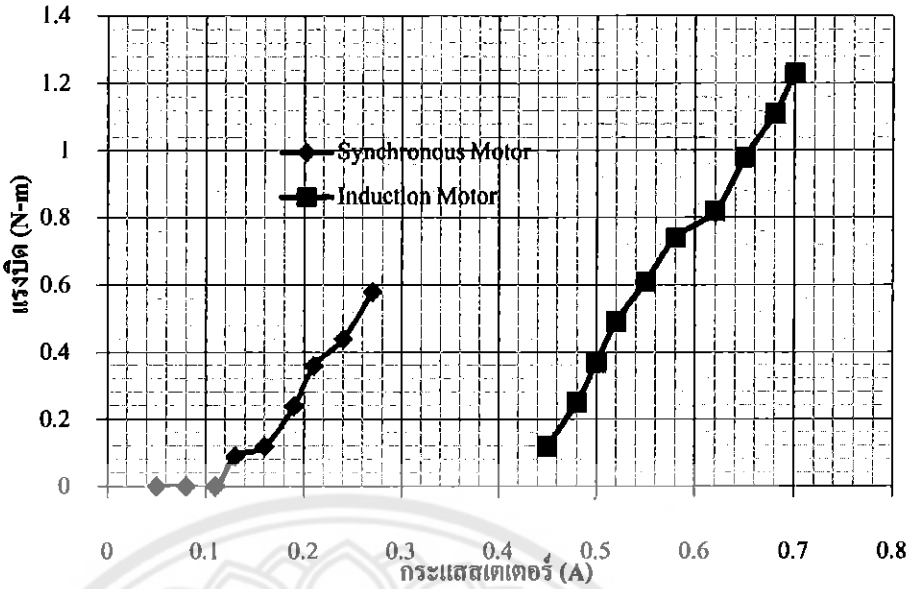
4.1.4 การเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีโหลด

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีโหลด

τ (N-m)	I_{stator}(A)	W_1+W_2(Watt)	I_{rotor}(A)	Speed(rpm)
0.12	0.45	100	0.05	1458
0.25	0.48	120	0.15	1439
0.37	0.50	143	0.18	1433
0.49	0.52	155	0.20	1408
0.61	0.55	192	0.22	1383
0.74	0.58	225	0.30	1372
0.82	0.62	233	0.40	1345
0.98	0.65	263	0.45	1332
1.11	0.68	273	0.45	1322
1.23	0.70	320	0.57	1290



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสมพันธ์ระหว่างกระแสสเตเตอร์กับแรงบิด

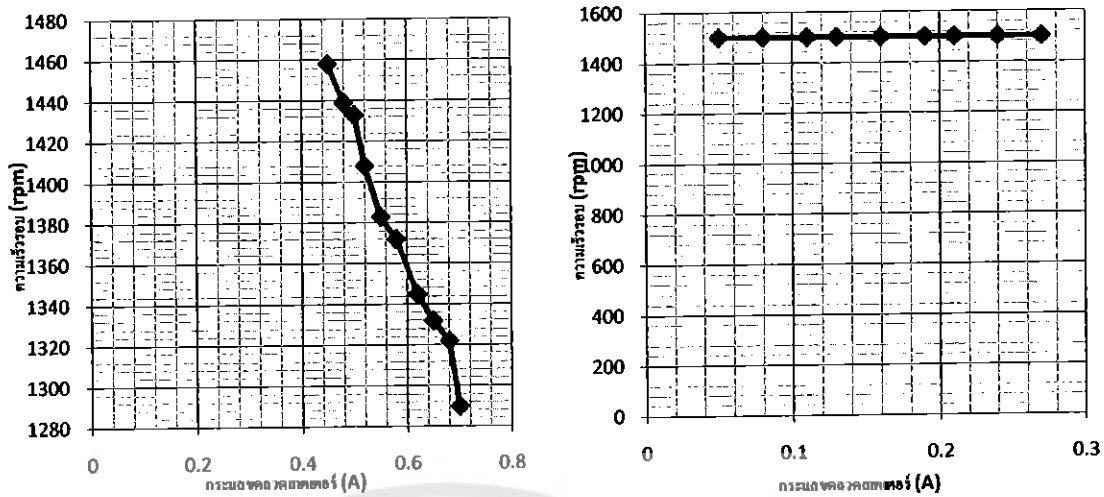


รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงบิดกับกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสกับมอเตอร์อินดักชั่น

จากกราฟ จะเห็นว่ากระแสสเตเตอร์และแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสในช่วงแรก มีค่าน้อยมาก จากนั้นกระแสสเตเตอร์และแรงบิดเพิ่มขึ้นมีลักษณะการขึ้นของกราฟเริ่มเป็นเชิงเส้น ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีกระแสสเตเตอร์และแรงบิดที่สูงกว่ามอเตอร์ซิงโครนัส ลักษณะการขึ้นของกราฟลักษณะเป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ซิงโครนัสและมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Load	Efficiency Induction Motor	Efficiency Synchronous Motor
10 %	18.32	0
20%	31.39	0
30%	38.83	0
40%	46.61	0
50%	46.01	16.63
60%	47.25	17.90
70%	51.99	30.15
80%	51.97	40.91
90%	56.29	43.75
100%	51.96	51.27



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วรอบกับกระแสสเตเตอร์ของ**มอเตอร์ซิงโครนัส**กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

มอเตอร์ซิงโครนัสขณะมีโหลด เมื่อมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ**โหลด** หากการเปลี่ยนแปลงของโหลดมีค่าไม่เกินค่าพิกัดมอเตอร์ซิงโครนัสแล้ว ความเร็วของ**มอเตอร์ซิงโครนัส**จะยังคงที่เสมอ ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำความเร็วรอบจะไม่คงที่โดยความเร็วรอบจะแปรผกผันกับกระแสโหลดเพราะเมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบลดลง

4.2 ผลการทดสอบการเริ่มเดินเครื่องจักรกลซิงโครนัสและเครื่องจักรกล**ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ** ขณะทำหน้าที่ เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

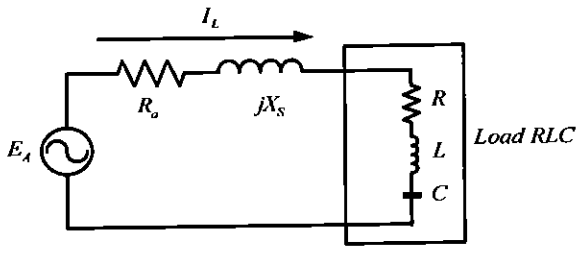
4.2.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดซิงโครนัสขณะมีโหลด

ชนิดของโหลดที่ใช้ทดสอบ

โหลดชนิด ความต้านทาน (R = 1100 Ω)

โหลดชนิด ตัวเก็บประจุ 2.89 μF (C = 1100 Ω)

โหลดชนิด ตัวเหนี่ยวนำ 3.5 H (L= 1100 Ω)



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลการเริ่มเดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบโหลดชนิดความต้านทาน (R)

I_L(A)	V_R(V)	V_{DC}(V)	I_{DC}(V)	V_N(V)
0.06	50	40	0.05	
0.08	63	49	0.05	
0.10	80	58	0.055	
0.12	100	70	0.075	
0.14	120	79	0.1	
0.16	136	90	0.12	
0.18	150	100	0.13	
0.20	170	110	0.14	
0.22	190	130	0.15	240

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำ (L)

I_L(A)	V_L(V)	V_{DC}(V)	I_{DC}(A)	V_N(V)
0.06	50	50	0.05	
0.08	77	70	0.08	
0.10	85	90	0.1	
0.12	100	110	0.125	
0.14	120	128	0..15	
0.16	140	146	0.17	
0.18	155	158	0.2	
0.20	173	190	0.23	
0.22	180	210	0.25	250

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบโหลดตัวเก็บประจุ (C)

I_L (A)	V_C (V)	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	V_N (V)
0.06	44	30	0.04	
0.08	62	40	0.047	
0.10	80	50	0.05	
0.12	100	60	0.075	
0.14	120	75	0.08	
0.16	134	85	0.1	
0.18	150	98	0.11	
0.20	175	110	0.14	
0.22	186	127	0.15	240

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบโหลดชนิดความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC)

I_L (A)	V_{RC} (V)	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	V_N (V)
0.06	68	30	0.04	
0.08	97	40	0.047	
0.10	115	50	0.05	
0.12	140	60	0.075	
0.14	160	75	0.08	
0.16	190	85	0.1	
0.18	217	98	0.11	
0.20	240	110	0.14	
0.22	260	127	0.15	240

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบโหลดชนิดความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ (RL)

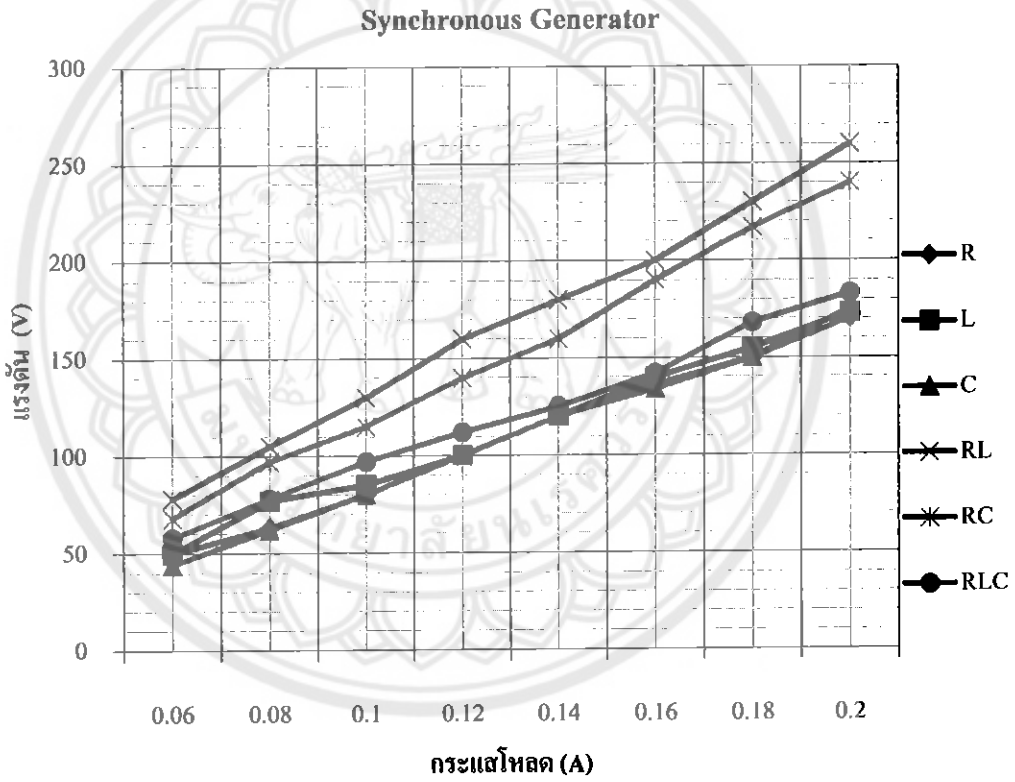
I_L (A)	V_{RL} (V)	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	V_N (V)
0.06	78	50	0.05	
0.08	105	70	0.08	
0.10	130	90	0.1	
0.12	160	110	0.125	
0.14	180	128	0..15	
0.16	200	146	0.17	
0.18	230	158	0.2	
0.20	260	190	0.23	
0.22	280	210	0.25	345

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบโหลดชนิดความต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (RLC)

I_L (A)	V_{RLC} (V)	V_{DC} (V)	I_{DC} (A)	V_N (V)
0.06	58	40	0.05	
0.08	78	50	0.06	
0.10	97	60	0.075	
0.12	112	70	0.09	
0.14	125	80	0.1	
0.16	142	96	0.12	
0.18	168	110	0.13	
0.20	183	120	0.15	
0.22	203	140	0.16	255

ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณโวลต์เตจเรกกูเรชั่นของเครื่องกำเนิดซิงโครนัส

Voltage Regulation Synchronous Generator	
Load	**Voltage Regulation (%)**
R	(260-207)/207 = 25.6
L	(250-180) /180 = 38.88
C	(270-208)/208 = 29.81
RC	(270-290)/290 = -6.89
RL	(345-280)/280 = 23.21
RLC	(255-203)/203 = 25.62



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันโหลดกับกระแสโหลด

4.2.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะมีโหลด

ชนิดของโหลดที่ใช้ทดสอบ

โหลดชนิด ความต้านทาน (R = 1100 Ω)

โหลดชนิด ตัวเก็บประจุ 2.89 μF (C = 1100 Ω)

โหลดชนิด ตัวเหนี่ยวนำ 3.5 H (L= 1100 Ω)

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบโหลดชนิดความต้านทาน (R)

I_L (A)	V_R (V)	V_{AC} (V)	V_N (V)
0.06	50	20	
0.08	62	23	
0.10	80	30	
0.12	90	30	
0.14	110	40	
0.16	122	42	
0.18	140	50	
0.20	160	60	238

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบโหลดชนิดตัวเหนี่ยวนำ (L)

I_L (A)	V_L (V)	V_{AC} (V)	V_N (V)
0.06	90	38	
0.08	120	50	
0.10	160	60	
0.12	185	70	
0.14	218	85	
0.16	250	100	
0.18	280	110	
0.20	310	120	446

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบโหลดตัวเก็บประจุ (C)

I_L (A)	V_C (V)	V_{AC} (V)	V_N (V)
0.06	58	18	
0.08	70	20	
0.10	90	30	
0.12	108	38	
0.14	120	40	
0.16	140	42	
0.18	160	50	
0.20	180	60	235

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบโหลดชนิดความต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC)

I_L (A)	V_{RC} (V)	V_C (V)	V_{AC} (V)	V_N (V)
0.06	58	22	18	
0.08	70	30	20	
0.10	90	38	30	
0.12	108	42	38	
0.14	120	50	40	
0.16	140	60	42	
0.18	160	70	50	
0.20	180	78	60	235

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบโหลดชนิดความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ (RL)

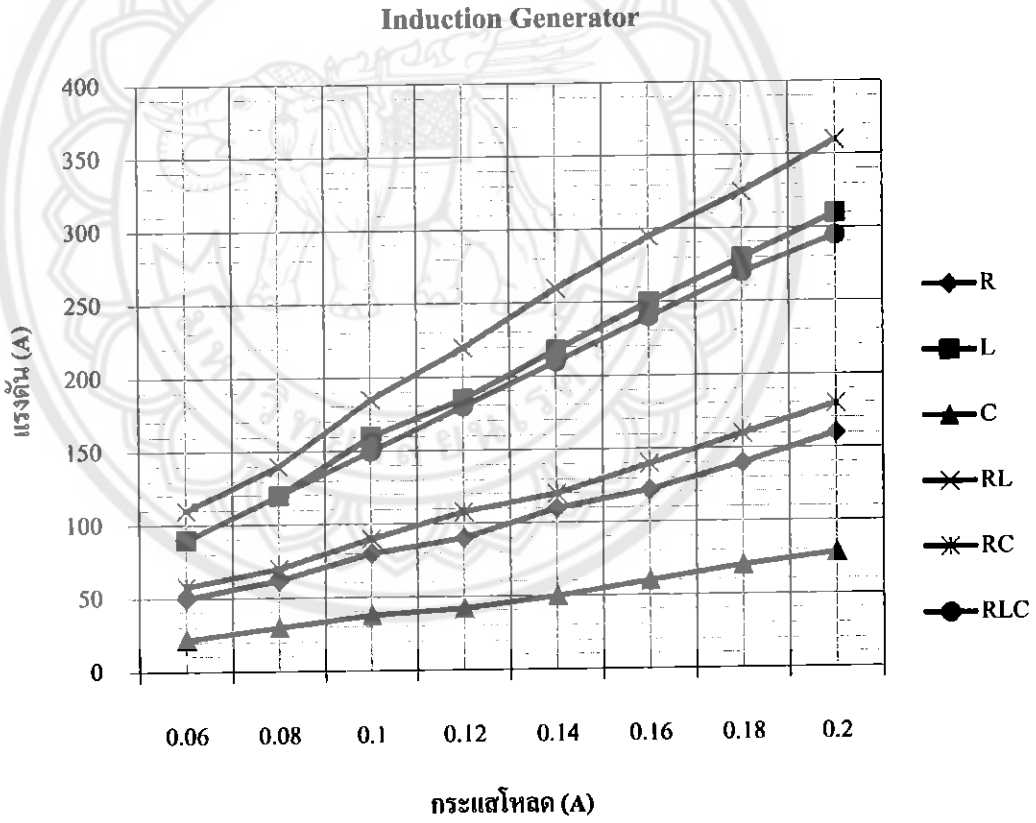
I_L (A)	V_{RL} (V)	V_L (V)	V_{AC} (V)	V_N (V)
0.06	110	90	38	
0.08	140	120	50	
0.10	185	160	60	
0.12	220	185	70	
0.14	260	218	85	
0.16	295	250	100	
0.18	325	280	110	
0.20	360	310	120	446

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบโหลดชนิดความต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (RLC)

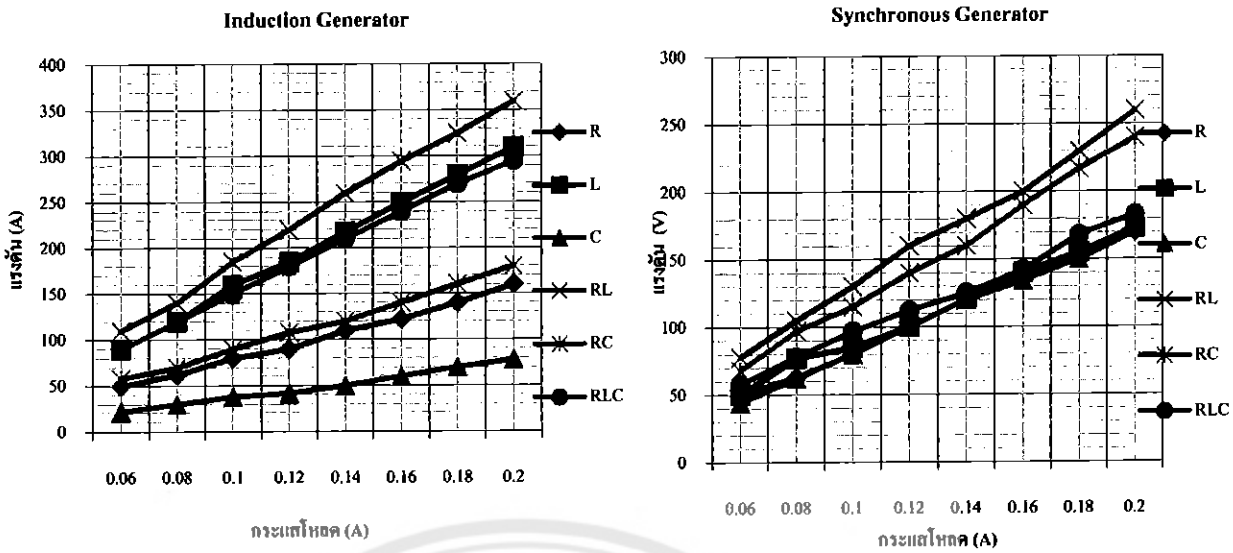
I_L	V_{RLC}	V_{AC}	Vn
0.06	90	30	
0.08	120	40	
0.10	150	50	
0.12	180	60	
0.14	210	70	
0.16	240	80	
0.18	270	90	
0.20	295	100	377

ตารางที่ 4.19 ผลการคำนวณโวลต์เตจเรกกูเรชั่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Voltage Regulation Induction Generator	
Load	**Voltage Regulation (%)**
R	(238-160)/160 = 48.75
L	(446-310)/310 = 43.87
C	(235-78)/78 = 201.28
RC	(235-180)/180 = 30.55
RL	(446 -360)/360 = 23.88
RLC	(377 – 295)/295 = 27.79



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันโหลดกับกระแสโหลด



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบแรงดันโหลดกับกระแสโหลด ในสภาวะโหลดต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัสกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากกราฟเปรียบเทียบแรงดันและกระแสโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ช่วงกราฟของซิงโครนัสมีช่วงที่ใกล้เคียงกันในโหลดชนิดต่างๆ เทียบกับช่วงกราฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ช่วงกราฟค่อนข้างต่างกันในโหลดต่างๆ แต่แรงดันเมื่อในสภาวะมีโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่ามากกว่าซิงโครนัส แต่ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า จึงต้องมีการคำนวณหาค่า โวลตเตจเรกกูเรชั่น ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบหาเปอร์เซนต์ความแตกต่างของแรงดันในสภาวะไม่มีโหลดกับแรงดันในสภาวะโหลดเต็มที่โดยในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าเปอร์เซนต์โวลตเตจเรกกูเรชั่นที่น้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ดีกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในทุกๆค่าโหลด

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบ

5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

5.1.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัส

จากการทดสอบการเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสในขณะไม่มีโหลด เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟสให้กับสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์และจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์ ทำให้โรเตอร์เกิดการหมุนซึ่งทิศทางการหมุนจะมีทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนมีความเร็วใกล้กับความเร็วซิงโครนัส จึงจ่ายกระแสกระตุ้นให้กับขดลวดที่โรเตอร์ทำให้โรเตอร์เกิดขั้วแม่เหล็กซึ่งขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์จะยึดติดกับขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเร็วเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ หรือเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส

จากการทดสอบการเริ่มเดินมอเตอร์ซิงโครนัสในขณะมีโหลด กำหนดค่ากระแสกระตุ้น (Field Current) คงที่ แล้วปรับค่า กระแสโหลดไปที่ระดับต่างๆ 10 % - 100 % ของกระแสโหลดสูงสุด (I_{max}) ค่าแรงบิด (Torque) ที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับการปรับกระแสโหลด จะพบว่าค่าแรงบิด (Torque) ในช่วงแรกจะมีค่าน้อยมากและจะค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะพบว่า มอเตอร์ซิงโครนัสมีแรงบิดในการเริ่มเดินน้อยกว่า ดังนั้นในการใช้งานจึงนิยมใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการขับโหลดเนื่องจากให้แรงบิดที่สูง

5.1.2 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดซิงโครนัส

จากการทดสอบสภาวะไม่มีโหลด แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถปรับแรงดันเอาต์พุตได้ค่าสูงกว่าเครื่องกำเนิดซิงโครนัส แต่ยังไม่สามารถบ่งบอกว่าเครื่องกำเนิดแบบใดที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เนื่องจากเมื่อนำโหลดความต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ มาต่อด้านเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบบจะเกิดแรงดันที่ตกคร่อมตามโหลดและนำมาหาค่าโวลต์เตจเรกกูเรชั่น (%VR) เมื่อเปรียบเทียบกันจะพบว่าค่าโวลต์เตจเรกกูเรชั่น (%VR) ของเครื่องกำเนิดซิงโครนัส มีค่าต่ำกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จึงบ่งบอกว่าเครื่องกำเนิดซิงโครนัสมีประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าดีกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในทุกๆค่าโหลด

5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการทำโครงงาน

5.2.1 ปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ในการทดสอบ ได้แก่ อุปกรณ์ในการทดสอบและเครื่องมือวัดที่ชำรุดส่งผลให้ผลการทดสอบผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนได้

5.2.2 โหลดที่ใช้ในการทดลองได้แก่ โหลดความต้านทาน โหลดตัวเก็บประจุและโหลดตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ชำรุด ทำให้ต้องใช้โหลดแบบจำกัดค่านั้นๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] http://threephaseelectricmotor.com/wp-content/uploads/2012/03/synchronous motor-construction.gif, สืบค้นข้อมูล 20 ส.ค. 2555

[2] http://automecanico.com/auto2011/alt2.jpg, สืบค้นข้อมูล 20 ส.ค. 2555

[3] http://engine-icio.ru/image.php?id=226610, สืบค้นข้อมูล 22 ส.ค. 2555

[4] www.globalspec.com/reference/73510/203279/chapter-31-synchronousgenerators, สืบค้นข้อมูล 22 ส.ค. 2555

[5] http://www.globalspec.com/reference/59734/203279/chapter-12-synchronous generators , สืบค้นข้อมูล 30 ส.ค. 2555

[6] http://175.41.129.203/electric/article/view.php?id=44275, สืบค้นข้อมูล 30 ส.ค. 2555

[7] http://electricalengineeringbasics.blogspot.com/2010/01/squirrel-cage-motors-ajoritory-of-3.html, สืบค้นข้อมูล 18 ม.ค. 2556

[8] http://webserv.kmitl.ac.th/s1010958/web/php/A.C.ThreephaseMotor.php, สืบค้นข้อมูล 18 ม.ค. 2556

[9] นภัทร วัจนเทพินทร์ (2544) .ทฤษฎีเครื่องกลไฟฟ้า 2.กรุงเทพมหานคร.สกายบุ๊กส์.

[10] ไชยชาญ หินเกิด.เครื่องกลไฟฟ้า 2 (2541).กรุงเทพมหานคร.บริษัท ดวงกมลสมัย จำกัด.

[11] สมพงษ์ ศรีลัด (2551).เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหมุน.กรุงเทพมหานคร. โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน