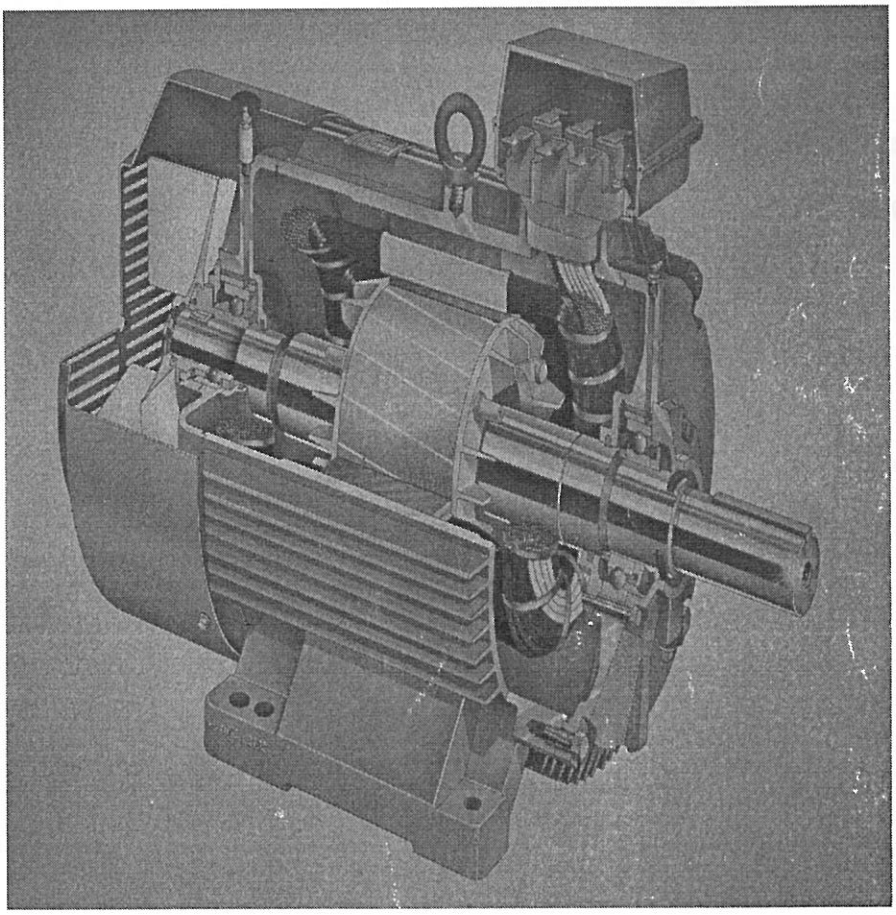
SUT EDITION

เอกสารคำสอนรายวิชา
429302 เครื่องจักรกลไฟฟ้า 2



ดร. เผด็จ เผ่าละออ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คำนำ

เอกสารคำสอนฉบับนี้ ผู้เรียบเรียงจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการประกอบการเรียนการสอนรายวิชา 429302 เครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 ที่เนื้อหากล่าวด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ของนักศึกษาชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากการที่เคยสอนรายวิชานี้มาแล้ว 4 ภาคการศึกษา ซึ่งรายวิชานี้มีความสำคัญมากต่อวิชาชีพวิศวกรไฟฟ้าในปัจจุบัน และยังเป็นรายวิชาบังคับของสภาวิศวกร ผู้เรียบเรียงได้พยายามรวบรวมตัวอย่างพร้อมแบบฝึกหัดให้มากเพื่อให้นักศึกษาสามารถทำความเข้าใจในรายวิชานี้ได้ง่ายขึ้น โดยสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานจริง หรือนำไปเพิ่มพูนต่อในรายวิชาถัดไป

อย่างไรก็ตาม หากนักศึกษาหรือผู้อ่านตรวจพบข้อผิดพลาดหรือมีข้อสงสัยประการใดในเอกสารคำสอนฉบับนี้ ขอความกรุณาแจ้งมาที่อีเมล์ padej@sut.ac.th ผู้เรียบเรียงจะดำเนินการแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อปรับปรุงเอกสารคำสอนฉบับนี้ต่อไป

เผด็จ เผ่าละออ
ผู้เรียบเรียง
(มกราคม 2551)

429302 เครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 **4 (4-0-8)**

Electrical Machine II

ผู้สอน อ.ดร. เผด็จ เผ่าละออ, B34 (ชั้น 4 อาคารวิชาการ) Tel.4407

E-mail: padej@sut.ac.th

คำอธิบายรายวิชา

วิชาบังคับก่อน: 429301 เครื่องจักรกลไฟฟ้า 1

หลักการของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ สนามแม่เหล็กหมุน โครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ สมรรถนะที่สถานะอยู่ตัวและการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส สภาวะชั่วครู่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัส การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สมรรถนะที่สถานะอยู่ตัวและการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำสามเฟสและเฟสเดียว วิธีการเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบหลายเฟสและมอเตอร์ซิงโครนัส

การแบ่งคะแนน

การบ้าน	10%
ทดสอบย่อย	10%
สอบกลางภาค	40%
สอบประจำภาค	40%
รวม	**100%**

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 หลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 1-1

1.1 สนามแม่เหล็ก 1-1

1.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 1-2

1.3 สนามแม่เหล็กหมุน 1-7

1.4 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาวงรอบปิดอย่างง่ายของเส้นลวดตัวนำในสภาวะสนามแม่เหล็กคงตัว 1-11

1.4.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงรอบปิดของเส้นลวดตัวนำในขณะที่หมุน 1-11

1.4.2 แรงบิดเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงรอบปิดของเส้นลวดตัวนำในขณะที่หมุน 1-14

1.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 1-18

1.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อพิจารณาระยะพิตช์ และขดลวดวางตัวแบบกระจาย 1-22

1.7 แรงบิดเหนี่ยวนำของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 1-32

1.8 กำลังงานและกำลังงานสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 1-34

1.8.1 กำลังงานสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 1-35

1.8.2 ไดอะแกรมการไหลของกำลังงาน 1-36

1.9 การคุมค่าแรงดัน 1-37

1.10 แบบฝึกหัดท้ายบท 1-38

บทที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2-1

2.1 หลักการและโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2-1

2.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2-2

2.3 เฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2-5

2.4 กำลังและแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2-7

2.5 การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 2-10

2.5.1 การหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ 2-10

2.5.2 การหาค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ 2-11

2.5.3 การหาค่าอัตราส่วนวงจรลัด 2-14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในสภาวะคงตัว 2-15

2.7 แบบฝึกหัดท้ายบท 2-27

บทที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 3-1

3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสและเฟเซอร์ไดอะแกรม 3-1

3.2 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสในสภาวะคงตัว 3-4

3.2.1 เส้นโค้งคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว 3-4

3.2.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 3-6

3.2.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 3-7

3.3 แบบฝึกหัดท้ายบท 3-21

บทที่ 4 ทฤษฎีขั้วแม่เหล็กยื่นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส 4-1

4.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น 4-1

4.2 กำลังและแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น 4-5

4.3 การทดสอบหาค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวตรงและซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวขวาง 4-7

4.4 แบบฝึกหัดท้ายบท 4-15

บทที่ 5 การเชื่อมต่อกับระบบภายนอก การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสภาวะชั่วครู่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 5-1

5.1 การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบภายนอก 5-1

5.2 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 5-5

5.2.1 ขั้นตอนในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 5-6

5.2.2 คุณลักษณะความถี่-กำลังไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้า-กำลังรีแอกทีฟ 5-11

5.2.3 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ 5-15

5.2.4 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่นกัน 5-19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 สภาวะชั่วครู่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 5-23

5.4 แบบฝึกหัดท้ายบท 5-28

บทที่ 6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6-1

6.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6-1

6.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6-4

6.3 สลิปและความถี่ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ 6-4

6.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6-5

6.5 กำลังงานและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6-9

6.6 การหาแรงบิดและกำลังงานโดยใช้ทฤษฎีเทวินิน 6-16

6.7 ชั้นคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 6-29

6.8 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6-33

6.9 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6-39

6.10 การเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6-41

6.11 แบบฝึกหัดท้ายบท 6-43

บทที่ 7 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว 7-1

7.1 บทนำ 7-1

7.2 การเกิดแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่อง 7-2

7.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส 7-10

7.4 กำลังงานและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส 7-12

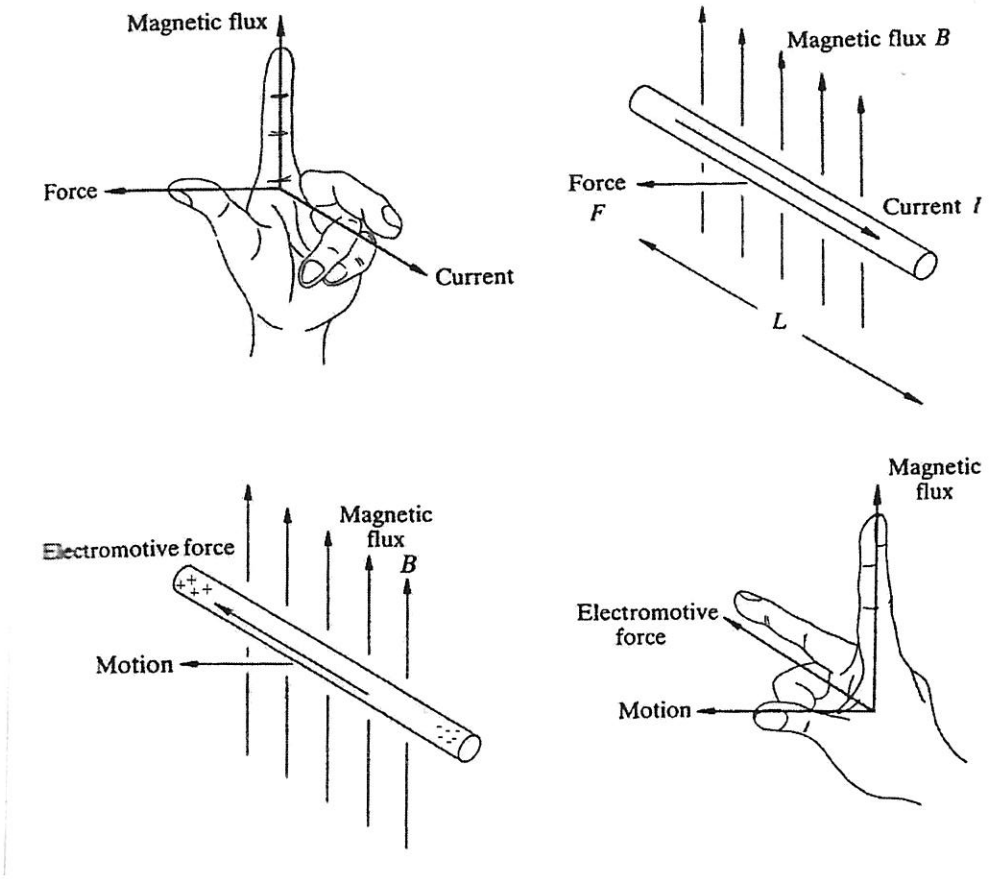
7.5 แบบฝึกหัดท้ายบท 7-19

บทที่ 1
หลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ
(AC Machinery Fundamental)

1.1 สนามแม่เหล็ก (magnetic field)

ประจุไฟฟ้าคือปริมาณของความเป็นไฟฟ้าที่สถิตอยู่ในสสารนั้นๆ ซึ่งแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจะเรียกว่าแรงไฟฟ้า (electric force) และถ้าหากประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ด้วย จะเกิดแรงที่เรียกว่าแรงแม่เหล็ก (magnetic force) ด้วยเหตุที่ทั้งแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีแหล่งกำเนิดเดียวกันคือประจุไฟฟ้า การจัดจำแนกกลุ่มของแรงจึงได้จัดให้ทั้งสองแรงนี้อยู่ในกลุ่มเดียวกันที่เรียกว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้า(electromagnetic force) ทุกๆ ประจุในสสารจะมีความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity) หรืออาจเรียกว่าสนามไฟฟ้า (electric field: **E**) อยู่ปริมาณหนึ่ง ที่เป็นตัวกำกับให้ประจุหนึ่งออกแรงกระทำต่อประจุหนึ่ง ส่วนความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) หรืออาจเรียกว่าสนามแม่เหล็ก (magnetic field: **B**) จะเป็นตัวกำกับให้ออกแรงกระทำเฉพาะประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้เองที่เป็นรากฐานของกลไกในการผันแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปสู่รูปแบบอื่นๆ โดยใช้เป็นพื้นฐานสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลง ซึ่งการผันแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้ จะประกอบด้วยกฎพื้นฐานอยู่ 4 กฎ คือ

1. เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนั้น
2. เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวด ที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ (พื้นฐานปรากฏการณ์หม้อแปลง: $e_{\text{ind}} = -N\frac{d\phi}{dt}$)
3. เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงทางกลขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์มอเตอร์: $\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$) แสดงทิศทางได้ด้วยกฎมือซ้ายของเฟลมมิง ดังรูปที่ 1.1
4. เมื่อเส้นลวดตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า: $e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$) แสดงทิศทางได้ด้วยกฎมือขวาของเฟลมมิง ดังรูปที่ 1.1

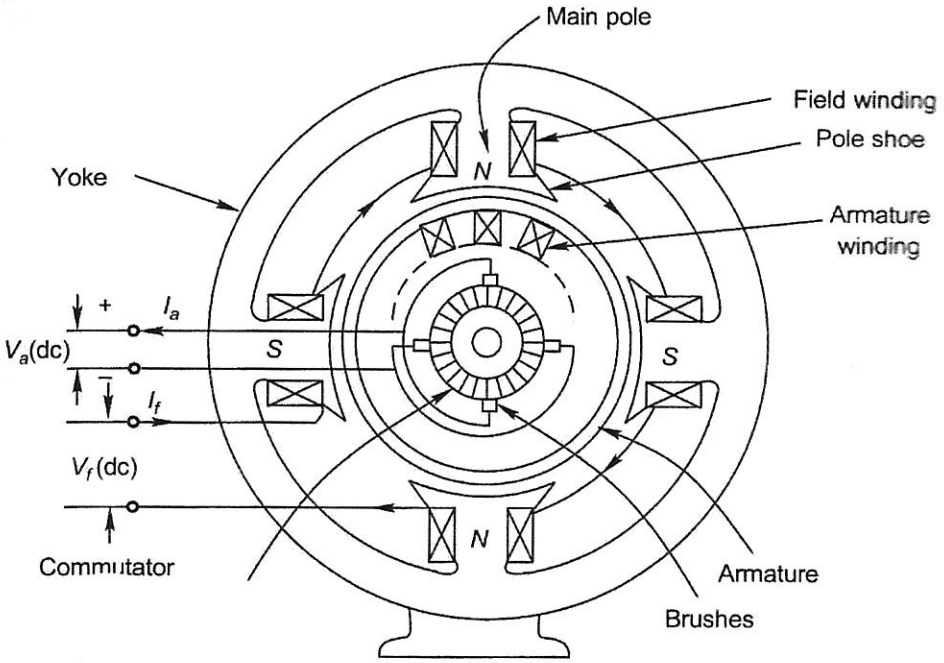


รูปที่ 1.1 กฎมือซ้ายและมือขวาของเฟลมมิง [4]

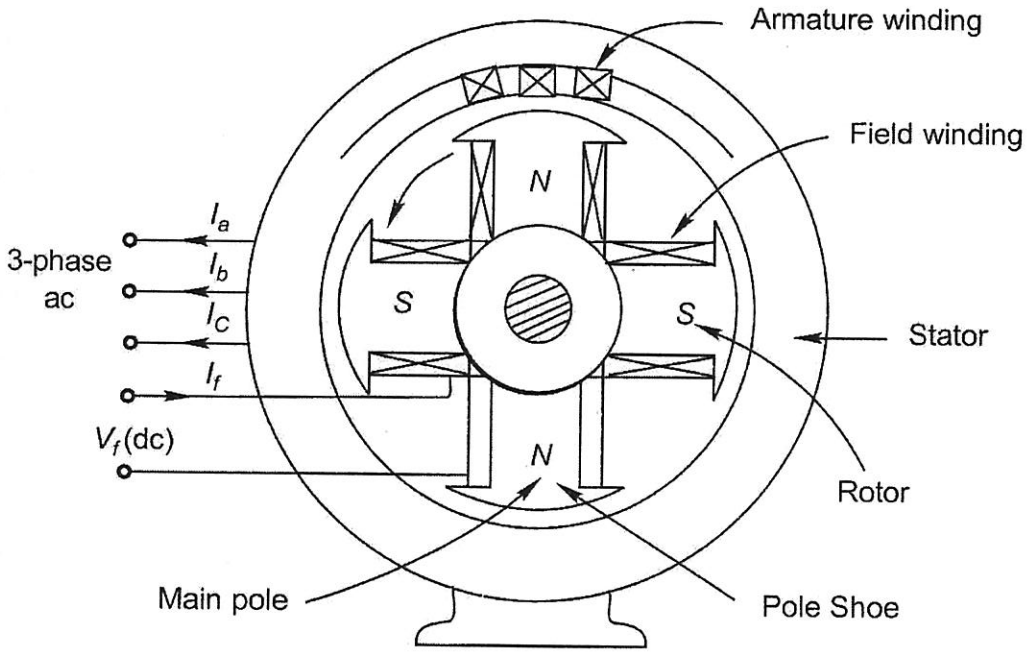
โดยการผันแปลงพลังงานที่จะศึกษานี้ จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องจักรกลไฟฟ้าเท่านั้น อันประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ซึ่งเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และมอเตอร์ (motor) ซึ่งเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และยังสามารถแบ่งเครื่องจักรกลไฟฟ้าตามรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ปรากฏได้เป็น เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง (DC machinery) ดังแสดงด้วยรูปที่ 1.2 และเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ (AC machinery) โดยในที่นี้จะศึกษาเฉพาะเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น

1.2 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ จะประกอบไปด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส (synchronous machine) ซึ่งอาศัยการกระตุ้นสนามแม่เหล็กจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงด้วยรูปที่ 1.3 และเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction machine) ซึ่งอาศัยการกระตุ้นสนามแม่เหล็กจากการเหนี่ยวนำในตัวเอง ดังที่จะได้กล่าวถึงในบทถัดๆ ไป



รูปที่ 1.2 ภาพตัดขวางของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง [7]



รูปที่ 1.3 ภาพตัดขวางของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส [7]

เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (synchronous generator) และมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส (synchronous motor) ส่วนเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดเช่นกัน คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction generator) และมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction motor) แต่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะไม่นิยมนำมาใช้งานเท่ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เช่นเดียวกับมอเตอร์ซิงโครนัส ก็จะไม่นิยมนำมาใช้งานเท่ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจะมีโครงสร้างแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ สเตเตอร์ (stator) หรือส่วนที่อยู่กับที่ และโรเตอร์ (rotor) หรือส่วนที่หมุน โดยสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะเหมือนกันกับสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุกประการ โดยจะต่างกันตรงส่วนของโรเตอร์เท่านั้น

1) สเตเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย แกนสเตเตอร์ (stator core) และขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature winding) บางครั้งอาจเรียกว่าขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) โดยแกนสเตเตอร์จะทำจากแผ่นลามิเนตให้ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (magnetic permeability: μ) มีค่าสูง ซึ่งจะมีความสูญเสียเนื่องจากฮีสเตอริซีส (hysteresis) และกระแสไหลวน (eddy current) ต่ำ แกนสเตเตอร์ถูกเจาะตรงกลางให้มีลักษณะเป็นรูปวงแหวน โดยผิวด้านในถูกเซาะเป็นร่องคั่นด้วยฟันของสเตเตอร์โดยรอบ เพื่อใช้เป็นที่วางสำหรับการพันขดลวดสเตเตอร์ แผ่นลามิเนตเหล่านี้จะถูกอัดเข้าด้วยกันเรียกว่าแกนสเตเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก

ส่วนขดลวดสเตเตอร์ จะเป็นลวดทองแดงเส้นเล็กๆ ที่ใช้พันเป็นขดลวด เคลือบด้วยน้ำมันวาร์นิชที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอย่างดี โดยแบ่งจำนวนขดลวดออกเป็นสามชุดห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า ซึ่งแต่ละชุดจะเรียกว่าเฟส ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟส จะนำมาต่อกันแบบสตาร์ (Y) หรือเดลตา (Δ) แล้วต่อออกสู่วงจรภายนอก การสร้างขั้วแม่เหล็กของแต่ละเฟสที่สเตเตอร์เกิดจากการพันต่อกันของขดลวดเฟสนั้นๆ ในลักษณะพันตรงและพันย้อนกลับสลับกันไป เพื่อให้เกิดขั้วแม่เหล็ก N และ S สลับกันไปเรื่อยๆ เป็นคู่ๆ โดยปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีอยู่ 2 ปัจจัยคือ การวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้พัน และระยะพิตช์ของขดลวด (coil pitch) ที่ใช้พัน

การวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ในร่องมีอยู่สองลักษณะคือ การวางตัวแบบรวม (concentrate) หมายถึง กลุ่มของขดลวดที่ใช้พันวางตัวอยู่ในร่องเดียวกัน และการวางตัวแบบ

กระจาย (distribution) หมายถึง กลุ่มของขดลวดที่ใช้พันวางตัวในแต่ละร่องแยกกันภายในแนวเฟสหรือกลุ่มเฟสนั้น (phase belt or phase group) ซึ่งการวางตัวของขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับส่วนใหญ่จะเป็นแบบกระจาย ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดผลกระทบของฮาร์มอนิกจากการวางตัวของขดลวดแบบรวม แต่เนื่องจากในการวางตัวของขดลวดแบบรวม กลุ่มของขดลวดจะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กได้พร้อมกัน แต่การวางตัวของขดลวดแบบกระจายซึ่งมีขดลวดอยู่ในร่องที่แยกกัน แรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดจึงเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการวางตัวของขดลวดแบบกระจายจึงมีค่าน้อยกว่าการวางตัวของขดลวดแบบรวม ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำที่น้อยลงนี้จะอยู่ในรูปของตัวประกอบการกระจาย (distribution factor หรือ breadth factor: k_d)

การพันขดลวดยังต้องคำนึงถึงระยะพิตช์ของขดลวดที่ใช้พัน ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างด้านข้างทั้งสองของขดลวดเดียวกัน จะแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ ระยะพิตช์เต็ม (full pitch) และระยะพิตช์เศษส่วน (fractional pitch) ซึ่งระยะพิตช์เต็มหมายถึง เมื่อด้านข้างของขดลวดด้านหนึ่งอยู่ตรงกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก N แล้ว จะมีอีกด้านข้างหนึ่งของขดลวดนี้ อยู่ตรงกึ่งกลางขั้วแม่เหล็ก S ที่อยู่ถัดไป ซึ่งมีระยะเทียบได้กับ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก หรือ 180° ไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างมุมทางไฟฟ้า (θ_e) และมุมทางกล (θ_m) จะขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1-1)

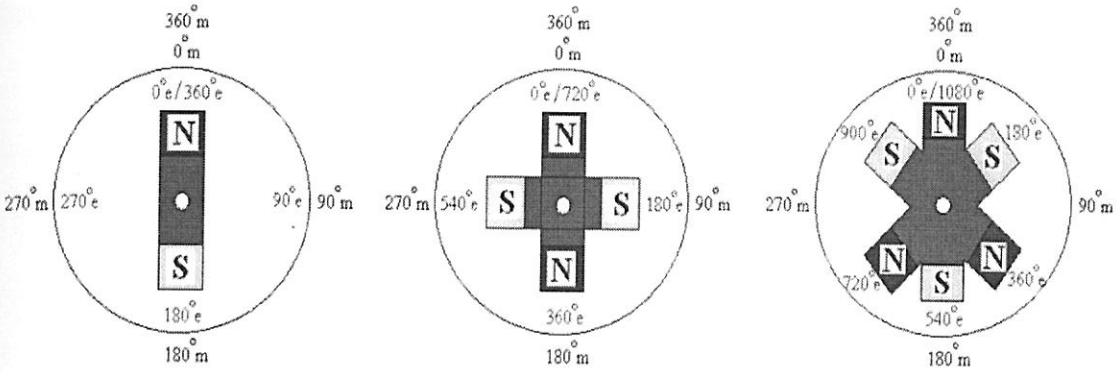
$$\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m \qquad \text{หน่วยองศา} \qquad (1\text{-}1)$$

ดังนั้นอัตราเร็วเชิงมุม $\omega_e = \frac{P}{2}\omega_m$ หน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/sec)

ความถี่ $f_e = \frac{P}{2} f_m$ หน่วยรอบต่อวินาที (Hz)

ถ้า n_m คือความเร็วทางกลหน่วยรอบต่อนาที (rpm) ดังนั้น $f_m = \frac{n_m}{60}$ จึงได้ $f_e = \frac{n_m P}{120}$

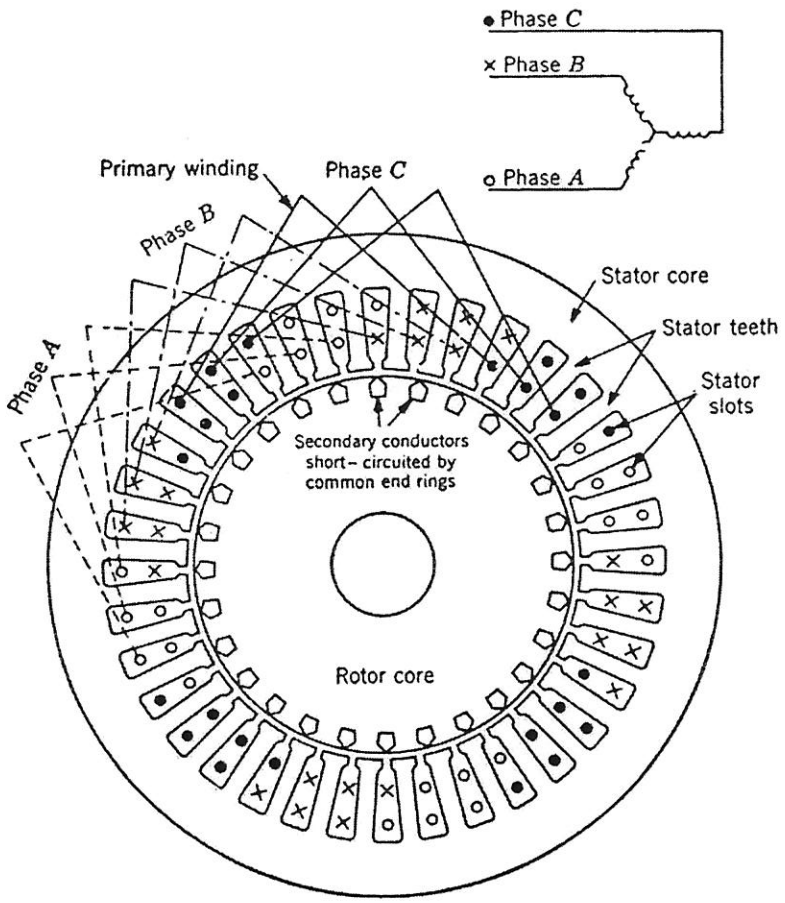
<u>หมายเหตุ:</u> การพิจารณามุมเมื่อศึกษาถึงเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ มุมทางกล (mechanical angle:θ_m) เป็นการพิจารณามุมการหมุนโดยการแบ่งวงกลม 1 รอบ ออกเป็น 360° ซึ่งเป็นมุมที่คุ้นเคยกันทั่วไป และมุมทางไฟฟ้า (electrical angle:θ_e) เป็นการพิจารณามุมการหมุนที่เกี่ยวพันหรือเกิดจากผลของสนามแม่เหล็ก การแบ่งมุมจะไม่ใช้วงกลม 1 รอบ แต่จะพิจารณาจากจำนวนขั้วแม่เหล็ก โดยระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้วที่ต่างกัน (N-S) จะมีระยะห่าง 180° ทางไฟฟ้า ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบมุมทางกลและมุมทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 การเปรียบเทียบมุมทางกลและมุมทางไฟฟ้า

ส่วนระยะพิตช์เศษส่วนคือ ด้านข้างทั้งสองของขดลวดเดียวกันจะอยู่ห่างกันไม่ถึง 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งระยะพิตช์ของขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับส่วนใหญ่ จะเป็นแบบระยะพิตช์เศษส่วน ทั้งนี้เพื่อเป็นการขจัดฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวด แต่ข้อเสียของการพันขดลวดแบบระยะพิตช์เศษส่วนคือ ค่าแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบระยะพิตช์เต็ม ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำที่ลดลงนี้จะอยู่ในรูปของตัวประกอบพิตช์ (pitch factor: k_p) และผลคูณระหว่าง k_d และ k_p จะเรียกว่าตัวประกอบชุดขดลวด (winding factor: k_w)

การพันขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ การพันขดลวดชั้นเดียว (single layer winding) ซึ่งจำนวนขดลวดที่ใช้ในการพันจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนร่อง (slot) เพราะในแต่ละร่องจะมีด้านข้างของขดลวดเพียงด้านเดียว (1 slot = 1 coil side = 1/2 coil) และการพันขดลวดสองชั้น (double layer winding) ซึ่งเป็นที่นิยมในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากได้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้โดยการเลือกช่วงของการพันขดลวดที่เหมาะสม ส่วนข้อเสียคือการพันขดลวดลงร่องและการซ่อมแซมทำได้ยากกว่าการพันขดลวดชั้นเดียว โดยในหนึ่งร่องจะมีด้านข้างของขดลวดบรรจุอยู่สองด้าน (1 slot = 2 coil side = 1 coil) และ ถ้าด้านหนึ่งของขดลวดวางตัวอยู่ชั้นบนของร่องแล้ว อีกด้านหนึ่งของขดลวดจะวางตัวอยู่ชั้นล่างของร่องอันอื่น โดยจะมีฉนวนกั้นระหว่างขดลวดส่วนบนและขดลวดส่วนล่าง การพันแบบขดลวดสองชั้นนี้ สามารถแสดงด้วยรูปที่ 1.5 ซึ่งประกอบด้วยร่องสเตเตอร์ทั้งหมด 36 ร่อง 4 ขั้ว และระยะพิตช์ของขดลวดเท่ากับ 8/9 ร่อง ขดลวดวางตัวแบบกระจาย 3 ร่องต่อแนวเฟสหรือต่อกลุ่มเฟส (3 slots per belt or per group)



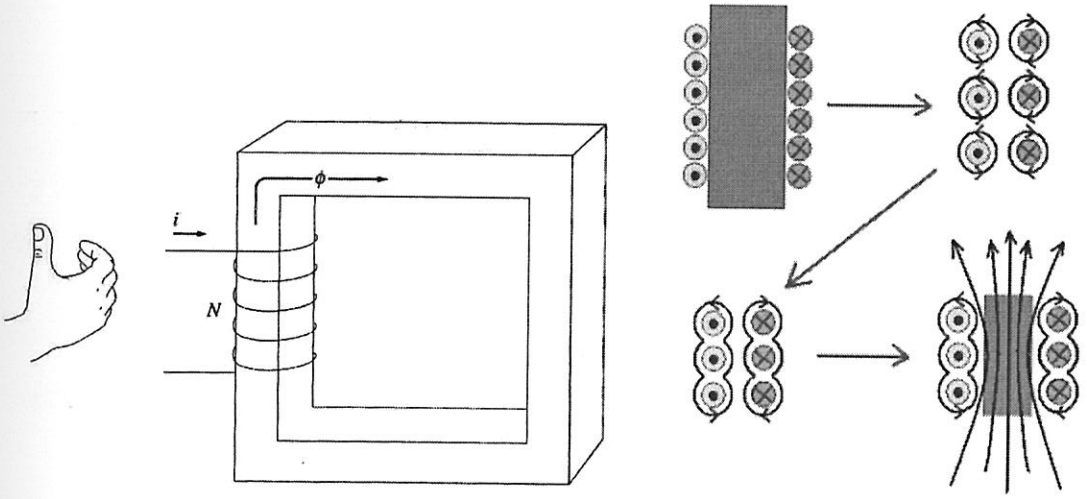
รูปที่ 1.5 การพันขดลวดสเตเตอร์แบบสองชั้น (ยกตัวอย่างมอเตอร์เหนี่ยวนำ) [1]

2) โรเตอร์ โดยโครงสร้างโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะเป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) หรือเป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (nonsalient pole หรืออาจเรียกว่า cylindrical rotor) อย่างใดอย่างหนึ่ง ส่วนโครงสร้างโรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นแบบกรงกระรอก (squirrel cage) หรือเป็นแบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) อย่างใดอย่างหนึ่งเช่นกัน ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดแยกย่อยลงไปตามชนิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในบทถัดๆ ไป

1.3 สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field)

ในการที่จะศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส จำเป็นต้องทราบลักษณะของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเสียก่อน โดยเมื่อป้อนไฟกระแสสลับ 3 เฟส ที่มีขนาดเท่ากันแต่มีมุมต่างเฟสกัน 120° ให้กับขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามชุด ซึ่งประกอบด้วยขดลวด A-A', B-B' และ C-

C' ที่วางตัวไปตามร่องโดยรอบแกนของสเตเตอร์ โดยแกนของขดลวดทั้ง 3 จะมีมุมห่างกัน 120° ไฟฟ้า กระแสที่ไหลเข้าขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กหมุน (rotating magnetic field) ขึ้นที่สเตเตอร์ ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนอย่างง่ายได้ โดยอาศัยความรู้การประยุกต์ใช้กฎมือขวากับขดลวดตัวนำในวงจรแม่เหล็ก (magnetic circuit) ที่คุ้นเคยกันเป็นอย่างดี โดยนิ้วหัวแม่มือจะแทนทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลักซ์แม่เหล็ก (ϕ) เมื่อนิ้วทั้งสี่กำในทิศทางของกระแสที่ไหลในขดลวด ดังแสดงด้วยรูปที่ 1.6 มาช่วยประกอบการอธิบายหลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 1.7 (เครื่องจักรกลไฟฟ้ามี 2 ขั้ว) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าในรูปนี้ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยมีขนาด (magnitude) คงที่ที่ค่าๆ หนึ่ง

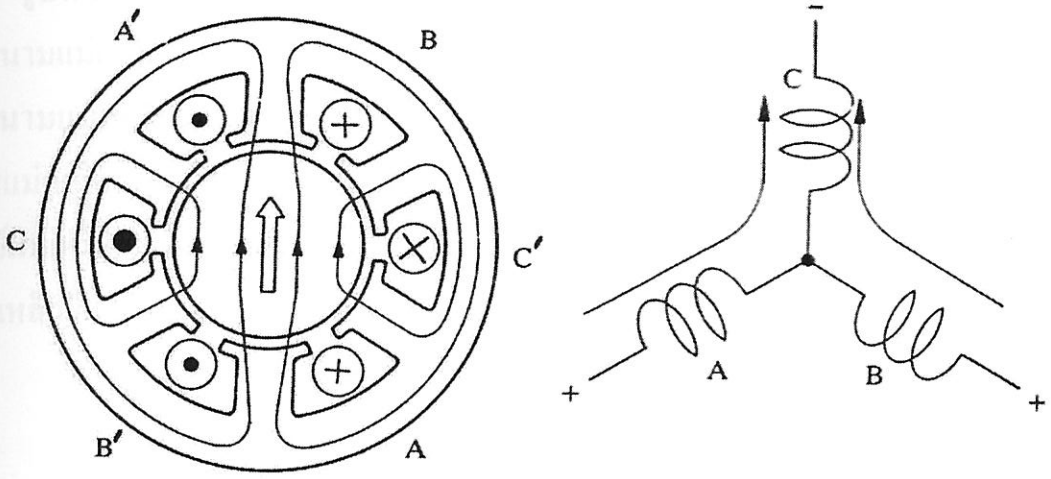


รูปที่ 1.6 การประยุกต์ใช้กฎมือขวากับขดลวดตัวนำในวงจรแม่เหล็ก

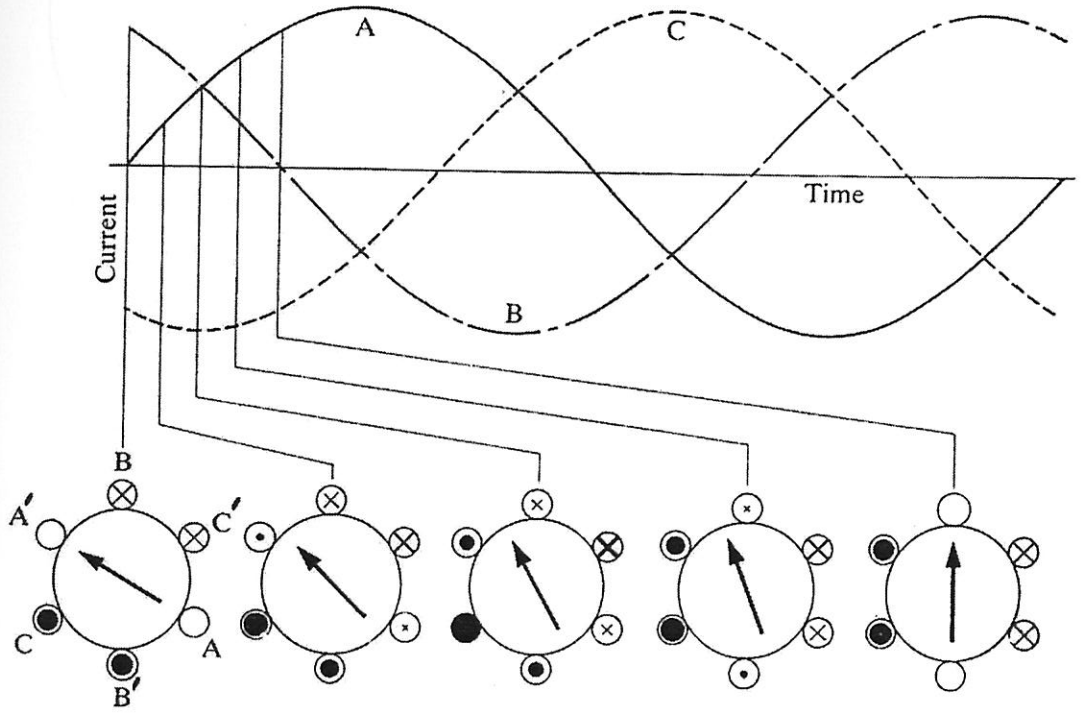
สนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed: n_s) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบที่จ่ายให้มอเตอร์ (f_e) และจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (P) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1-2)

$$n_s = \frac{120 f_e}{P} \quad \text{(หน่วยรอบต่อนาที (revolution per minute: rpm))} \qquad (1\text{-}2)$$

หรือ $\omega_s = \frac{4\pi f_e}{P}$ (หน่วยเรเดียนต่อวินาที (radian per second: rad/sec)) ทั้งนี้เพราะ $\omega = n \times \frac{2\pi}{60}$



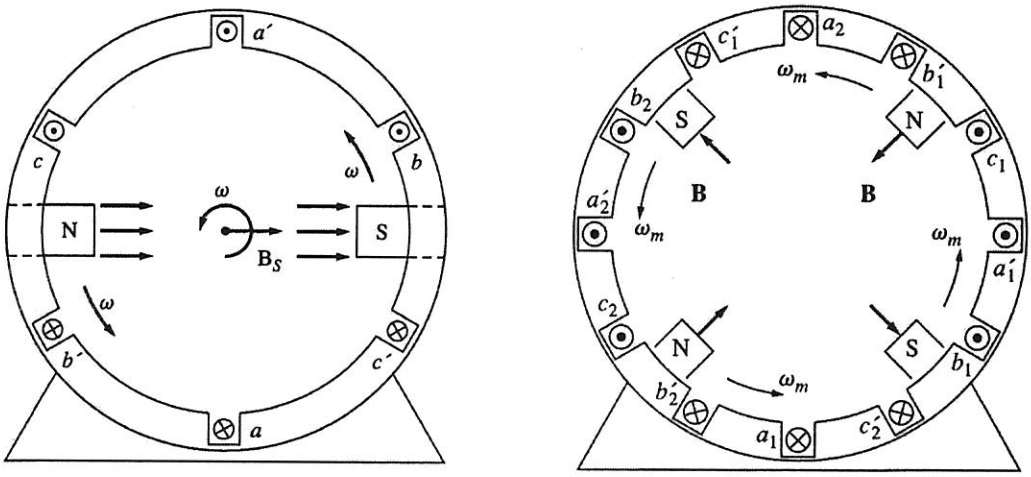
Current and magnetic flux distributions when a positive potential is applied to phases A and B, and a negative to phase C.



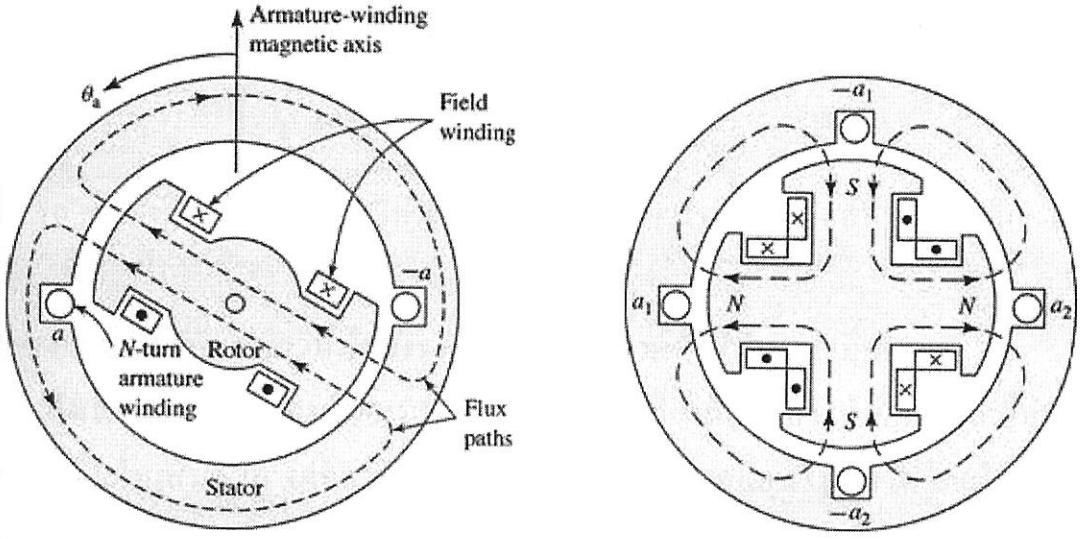
When three-phase sine-wave currents are provided to the windings, the magnetic field revolves at a constant speed with a constant magnitude.

รูปที่ 1.7 หลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุน [4]

รูปที่ 1.7 เป็นการแสดงหลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มี 2 ขั้ว โดยสนามแม่เหล็กหมุนมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ส่วนในรูปที่ 1.8 จะเป็นการเปรียบเทียบการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มี 2 ขั้ว และ 4 ขั้ว ตามลำดับ โดยสนามแม่เหล็กหมุนมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และในรูปที่ 1.9 เป็นการแสดงเส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก (flux path) อย่างแท้จริงเมื่อพิจารณาเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) ที่มี 2 ขั้ว และ 4 ขั้ว ตามลำดับ



รูปที่ 1.8 สนามแม่เหล็กหมุนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มี 2 ขั้ว และ 4 ขั้ว [2]

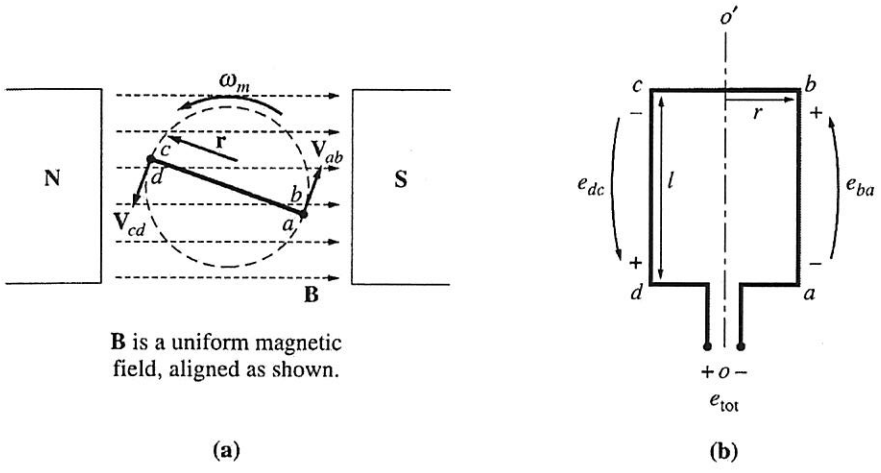


รูปที่ 1.9 เส้นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มี 2 ขั้ว และ 4 ขั้ว [3]

1.4 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาวงรอบปิดอย่างง่ายของเส้นลวดตัวนำในสภาวะสนามแม่เหล็กคงตัว

โดยจะเริ่มต้นศึกษาเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับจากการพิจารณาวงรอบปิดอย่างง่ายของเส้นลวดตัวนำในขณะที่หมุนอยู่และสนามแม่เหล็กมีค่าคงตัว (uniform magnetic field) ว่าจะส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ได้อย่างไร ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเมื่อพิจารณาเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ สนามแม่เหล็กจะมีค่าไม่คงที่ โดยอาจจะไม่คงที่ทางด้านขนาด (magnitude) หรือไม่ก็ทางด้านทิศทาง (มุมเฟส) อย่างไรก็ตามแฟกเตอร์ในการควบคุมแรงเคลื่อนไฟฟ้าและแรงบิดเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงรอบปิดเมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กคงตัว ก็จะคล้ายกันกับสนามแม่เหล็กที่มีการแปรค่าทุกประการ

รูปที่ 1.10 (a) แสดงเครื่องจักรกลไฟฟ้าอย่างง่าย ซึ่งประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก N และ S ที่เอาไว้สร้างสนามแม่เหล็กคงตัวและเส้นลวดตัวนำวงรอบปิดที่หมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ส่วนรูปที่ 1.10 (b) เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตัวนำวงรอบปิดโดยการใช้กฎมือขวาของเฟลมมิง

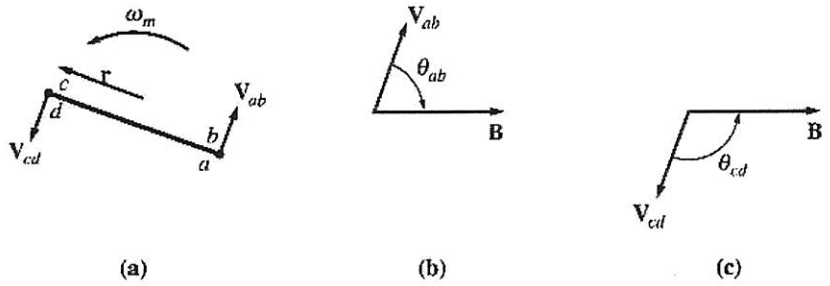


รูปที่ 1.10 การพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำวงรอบปิดเมื่อสนามแม่เหล็กคงตัว [2]

1.4.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงรอบปิดของเส้นลวดตัวนำในขณะที่หมุน

เส้นลวดตัวนำวงรอบปิดหมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในเส้นลวด โดยสามารถอธิบายการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้โดยใช้รูปที่ 1.11 ประกอบ ในการคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมด (e_{tot}) ตลอดวงรอบปิดสามารถพิจารณาได้

จากผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละด้านของเส้นลวด โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าในแต่ละด้านของเส้นลวดคำนวณได้จากสมการที่ (1-3)



รูปที่ 1.11 รูปประกอบการพิจารณาหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าในเส้นลวด [2]

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \qquad (1\text{-}3)$$

- *พิจารณาด้าน ab* ประกอบกับการอธิบายด้วยรูปที่ 1.11 (b) โดย $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ ที่ได้จะมีทิศพุ่งเข้าสู่หน้ากระดาษ ซึ่งเป็นทิศเดียวกันกับด้าน *ab* ดังนั้นจึงได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในด้านนี้คือ

$$e_{ba} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$
$$= vBl \sin\theta_{ab} \qquad \text{(พุ่งเข้าสู่หน้ากระดาษ)}$$

- *พิจารณาด้าน bc* โดย $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ ที่ได้จะตั้งฉากกับความยาว $\mathbf{l}$ ดังนั้นจึงได้ $e_{cb} = 0$

- *พิจารณาด้าน cd* ประกอบกับการอธิบายด้วยรูปที่ 1.11 (c) โดย $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ ที่ได้จะมีทิศพุ่งออกจากหน้ากระดาษ ซึ่งเป็นทิศเดียวกันกับด้าน *cd* ดังนั้นจึงได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในด้านนี้คือ

$$e_{dc} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$
$$= vBl \sin\theta_{cd} \qquad \text{(พุ่งออกจากหน้ากระดาษ)}$$

- *พิจารณาด้าน da* โดย $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ ที่ได้จะตั้งฉากกับความยาว $\mathbf{l}$ ดังนั้นจึงได้ $e_{ad} = 0$

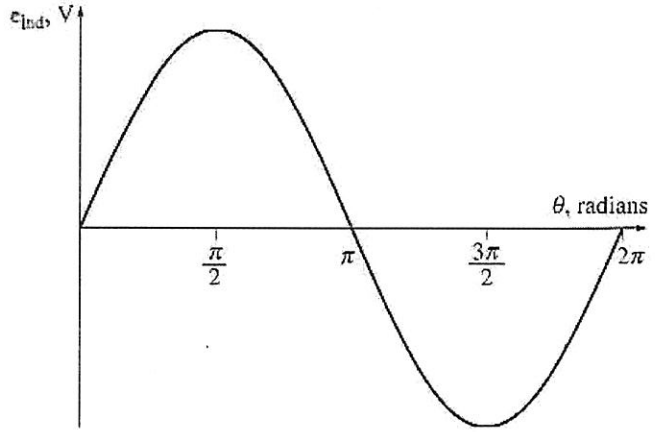
ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเส้นลวดตัวนำ คือ

$$e_{\text{ind}} = e_{ba} + e_{cb} + e_{dc} + e_{ad}$$
$$= vBl \sin\theta_{ab} + vBl \sin\theta_{cd}$$

ซึ่ง $\theta_{ab} = 180^\circ - \theta_{cd}$ และจาก $\sin\theta = \sin(180^\circ - \theta)$ ดังนั้นจึงได้

$$e_{\text{ind}} = 2vBl\sin\theta \tag{1-4}$$

โดยรูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ e_{ind} แสดงได้ดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 รูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำหมุน [2]

ถ้าเส้นลวดตัวนำวงรอบปิดหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม (ω) คงที่ จะได้

$$\theta = \omega t$$

และความเร็วบริเวณหน้าสัมผัสตรงขอบของวงรอบปิด (v) หาได้จาก

$$v = r\omega$$

โดยที่ r เป็นรัศมีที่วัดจากแกนของการหมุนไปยังหน้าสัมผัสตรงขอบของวงรอบปิด นำค่าเหล่านี้ไปแทนในสมการที่ (1-4) จึงได้

$$e_{ind} = 2r\omega Bl\sin\omega t \tag{1-5}$$

พิจารณารูปที่ 1.10 (b) จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่ของวงรอบปิด (A) มีค่าเท่ากับ $2rl$ ดังนั้น

$$e_{ind} = AB\omega\sin\omega t$$

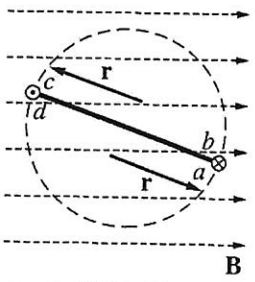
เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุด (maximum flux) ที่ไหลผ่านวงรอบปิดจะมีค่าคือ $\phi_{\max} = AB$ ดังนั้นจึงได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในรูปแบบท้ายสุดเป็น

$$e_{ind} = \phi_{\max}\,\omega\sin\omega t \tag{1-6}$$

ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปคลื่นไซน์โดยมีขนาดเท่ากับผลคูณของฟลักซ์แม่เหล็กภายในเครื่องจักรกลและความเร็วที่ใช้ในการหมุน ซึ่งหลักการนี้ก็ใช้ได้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในความเป็นจริงด้วย

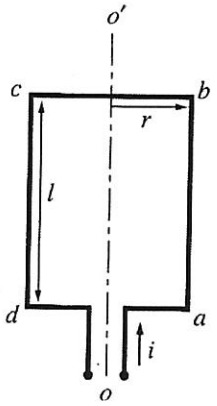
1.4.2 แรงบิดเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวงรอบปิดของเส้นลวดตัวนำในขณะที่หมุน

พิจารณากระแส i ที่ไหลในวงรอบปิดดังแสดงด้วยรูปที่ 1.13 เมื่อมีกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงบิด (torque) ขึ้นบริเวณเส้นลวดตัวนำนั้น ซึ่งสามารถอธิบายถึงขนาดและทิศทางของแรงบิดที่เกิดขึ้นได้โดยการพิจารณารูปที่ 1.14 ประกอบกับการใช้กฎมือซ้ายของเฟลมมิง



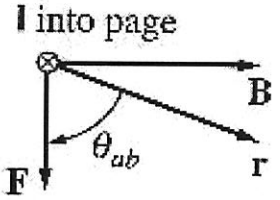
B is a uniform magnetic field, aligned as shown. The × in a wire indicates current flowing into the page, and the • in a wire indicates current flowing out of the page.

(a)

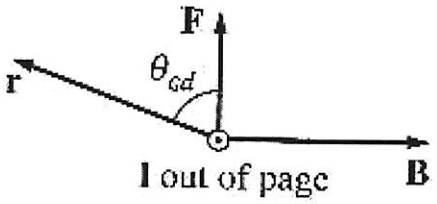


(b)

รูปที่ 1.13 การพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในเส้นลวดตัวนำวงรอบปิดเมื่อสนามแม่เหล็กคงตัว [2]



(a)



(b)

รูปที่ 1.14 รูปประกอบการพิจารณาหาแรงในเส้นลวด [2]

โดยแรง (force) ในแต่ละด้านของเส้นลวดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1-7)

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \qquad (1\text{-}7)$$

และแรงบิดในแต่ละด้านของเส้นลวดก็สามารถหาได้จากผลคูณระหว่างแรงกับระยะทางที่ตั้งฉาก เมื่อ θ คือมุมระหว่างเวกเตอร์ **r** และเวกเตอร์ **F** จึงได้

$$\tau = (F)\,(r\sin\theta)$$
$$= rF\sin\theta \qquad (1\text{-}8)$$

- *พิจารณาด้าน ab* ประกอบกับการอธิบายด้วยรูปที่ 1.14 (a) โดย $(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$ ที่ได้จะมีทิศทางพุ่งลงข้างล่าง ดังนั้นจึงได้แรงที่เกิดขึ้นในด้านนี้คือ

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$
$$= ilB \qquad \text{(พุ่งลงข้างล่าง)}$$

และแรงบิดคือ

$$\tau_{ab} = (F)(r\sin\theta_{ab})$$
$$= rilB\sin\theta_{ab} \qquad \text{(ตามเข็มนาฬิกา)}$$

- *พิจารณาด้าน bc* โดยรัศมี r มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงได้ $\tau_{bc} = 0$

- *พิจารณาด้าน cd* ประกอบกับการอธิบายด้วยรูปที่ 1.14 (b) โดย $(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$ ที่ได้จะมีทิศทางพุ่งขึ้นข้างบน ดังนั้นจึงได้แรงที่เกิดขึ้นในด้านนี้คือ

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$
$$= ilB \qquad \text{(พุ่งขึ้นข้างบน)}$$

และแรงบิดคือ

$$\tau_{cd} = (F)(r\sin\theta_{cd})$$
$$= rilB\sin\theta_{cd} \qquad \text{(ตามเข็มนาฬิกา)}$$

- *พิจารณาด้าน da* โดยรัศมี r มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงได้ $\tau_{da} = 0$

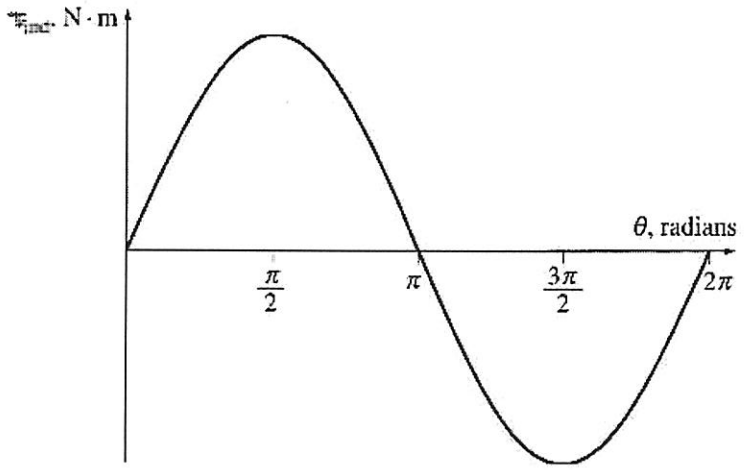
ดังนั้น แรงบิดเหนี่ยวนำรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเส้นลวดตัวนำ คือ

$$\tau_{\text{ind}} = \tau_{ab} + \tau_{bc} + \tau_{cd} + \tau_{da}$$
$$= rilB\sin\theta_{ab} + rilB\sin\theta_{cd}$$

ซึ่ง $\theta_{ab} = \theta_{cd}$ ดังนั้นจึงได้

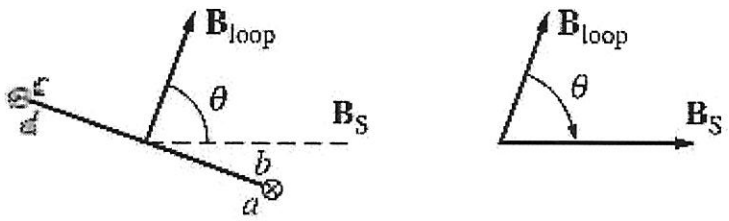
$$\tau_{\text{ind}} = 2rilB\sin\theta \qquad (1\text{-}9)$$

โดยรูปคลื่นของแรงบิดเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น τ_{ind} แสดงได้ดังรูปที่ 1.15



รูปที่ 1.15 รูปคลื่นของแรงบิดเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำหมุน [2]

และจากรูปที่ 1.16 ถ้ากระแสที่ไหลในวงรอบปิดแสดงทิศทางได้ดังรูป โดยที่เส้นลวดตัวนำวางตัวอยู่ในสนามแม่เหล็ก $\mathbf{B}_S$ ซึ่งเมื่อมีกระแสไหลในเส้นลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในวงรอบปิดขึ้น ($\mathbf{B}_{\text{loop}}$) อีกตัวหนึ่ง ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของวงรอบปิด (ประยุกต์ใช้กฎมือขวากับขดลวดตัวนำ) ดังแสดงด้วยรูป โดยที่ $B_{loop} = \dfrac{\mu i}{G}$ ซึ่ง G คือแฟกเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวงรอบปิด และพื้นที่ของวงรอบปิด A ก็มีค่าเท่ากับ $2rl$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการที่ (1-9) จึงได้



(a) (b)

รูปที่ 1.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\mathbf{B}_{loop}$ และ $\mathbf{B}_S$ [2]

$$\tau_{ind} = \frac{AG}{\mu} B_{loop} B_S \sin\theta$$
$$= kB_{loop} B_S \sin\theta \qquad (1\text{-}10)$$

โดยที่ $k = AG/\mu$ ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ส่วน θ คือมุมระหว่าง $\mathbf{B}_{loop}$ และ $\mathbf{B}_S$ หรือสามารถเขียนสมการที่ (1-10) ในรูปของผลคูณไขว้ (cross product) ดังแสดงได้ดังนี้

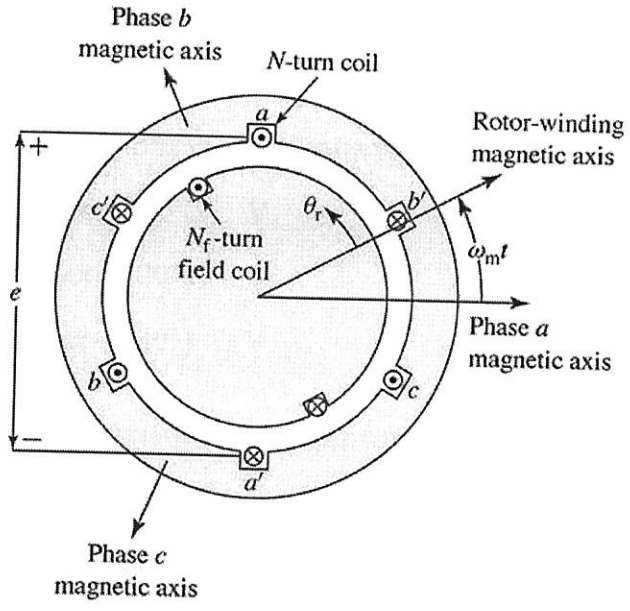
$$\tau_{ind} = k\mathbf{B}_{loop} \times \mathbf{B}_S \qquad (1\text{-}11)$$

ซึ่งหลักการนี้ก็ใช้ได้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในความเป็นจริงด้วย โดยจะสังเกตเห็นว่าแรงบิดเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสนามแม่เหล็กในโรเตอร์ ปริมาณของสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ มุมไซน์ระหว่างสนามแม่เหล็กทั้งสอง และโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

1.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

จากหัวข้อที่ 1.4.1 เป็นการอธิบายการเกิดขึ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงรอบปิดของเส้นลวดตัวนำในขณะที่หมุน ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าในหัวข้อนี้ สนามแม่เหล็กจะอยู่กับที่โดยที่เส้นลวดตัวนำจะเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก (โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้อธิบายการเกิดขึ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงด้วยรูปที่ 1.2) แต่เมื่อพิจารณาเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ การเกิดขึ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดจากสนามแม่เหล็กไปหมุนตัดผ่านขดลวดที่อยู่กับที่ (ดังแสดงด้วยรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม หลักการในการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในหัวข้อที่ 1.4.1 ก็ยังคงใช้ได้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในหัวข้อนี้ ต่างกันแต่เพียงสนามแม่เหล็กในหัวข้อนี้จะมีค่าไม่คงที่ โดยจะอยู่ในรูปของสัญญาณไซนูซอยดัล (sinusoidal) เทียบกับตำแหน่งที่โรเตอร์หมุนไป

พิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าจ่ายออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับพื้นฐานชนิด 2 ขั้ว ดังแสดงด้วยรูปที่ 1.17 โดยพิจารณาเริ่มต้นจากขดลวดสเตเตอร์ 1 ชุด (พิจารณาขดลวดเฟส *a*) ซึ่งมีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ N และค่าความถ่างของขดลวด (coil span) เท่ากับ 180° ไฟฟ้า หรือ 1 พิตช์ขั้วแม่เหล็ก เมื่อ θ_r คือมุมที่วัดจากแกนแม่เหล็กของขดลวดโรเตอร์ (rotor-winding magnetic field) ที่ให้สนามแม่เหล็กสูงสุด (ประยุกต์ใช้กฎมือขวากับขดลวดตัวนำ) ดังนั้นจึงได้สนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ รอบโรเตอร์คือ



รูปที่ 1.17 รูปประกอบการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าจ่ายออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ [3]

$$B = B_m \cos\theta_r$$

เมื่อย้ายกรอบ (frame) การพิจารณาสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ไปที่สเตเตอร์จะได้สนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ รอบสเตเตอร์คือ

$$B = B_m \cos(\omega_m t - \theta_r)$$

เมื่อ $\omega_m t$ คือมุมที่วัดจากแกนแม่เหล็กของขดลวดสเตเตอร์ (stator-winding magnetic field)

จากนั้นดำเนินการพิจารณาหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้หลักการเดียวกันกับหัวข้อที่ 1.4.1 จึงได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าจ่ายออกของขดลวดสเตเตอร์เฟส a (single-turn coil) ดังสมการที่ (1-12)

$$e_{ind} = N\phi\omega\cos\omega t \qquad (1\text{-}12)$$

เมื่อ $\phi = 2rlB_m$ และในกรณีขั้วแม่เหล็กมี 2 ขั้ว จะได้ $\omega_m = \omega_e = \omega$

เทอม $\cos\omega t$ ในสมการที่ (1-12) สามารถแทนที่ได้ด้วยเทอม $\sin\omega t$ โดยไม่มีความผิดพลาดแต่ประการใด ทั้งนี้เพราะขึ้นอยู่กับการกำหนดตำแหน่งแกนอ้างอิงของ θ_r

ดังนั้นถ้าพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าจ่ายออกของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เมื่อขั้วแม่เหล็กซึ่งอยู่ที่โรเตอร์ได้หมุนตัดผ่านขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 ชุด ที่วางตัวอยู่ในร่องสเตเตอร์ โดยมีแกนของขดลวดแตกต่างกัน 120° ทางไฟฟ้า จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแต่ละขดลวดขึ้น ซึ่งก็จะมีมุมเฟสแตกต่างกัน 120° ด้วย ดังแสดงได้ดังนี้

$$e_{aa'}(t) = N_{\text{ph}}\phi\omega\sin\omega t \quad \text{V}$$

$$e_{bb'}(t) = N_{\text{ph}}\phi\omega\sin(\omega t - 120^\circ) \quad \text{V}$$

$$e_{cc'}(t) = N_{\text{ph}}\phi\omega\sin(\omega t - 240^\circ) \quad \text{V}$$

โดยในแต่ละชุดหรือแต่ละเฟสของขดลวดมีจำนวนรอบเท่ากับ N_{ph}

และค่าแรงดันสูงสุดในแต่ละเฟสของขดลวดทั้ง 3 ชุด จะมีค่าเท่ากับ

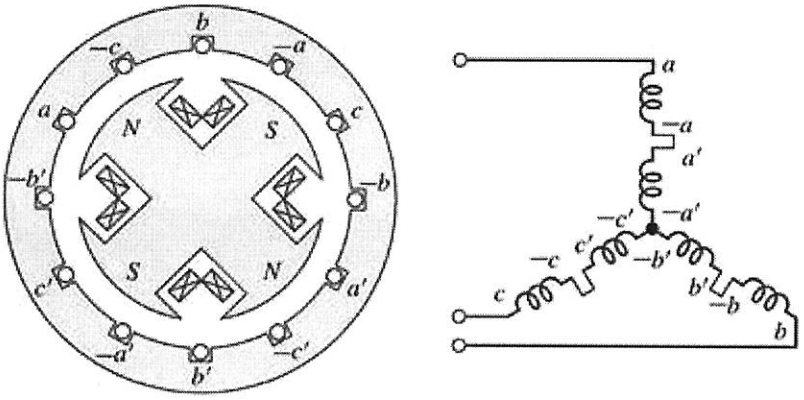
$$E_{\max} = N_{\text{ph}}\phi\omega$$

ซึ่ง $\omega = 2\pi f$ จึงได้ $E_{\max} = 2\pi N_{\text{ph}} \phi f$

และแรงเคลื่อนไฟฟ้า rms ณ เฟสใดเฟสหนึ่ง ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จึงมีค่า

$$E_A = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_{\text{ph}} \phi f = \sqrt{2}\pi N_{\text{ph}} \phi f = 4.44 N_{\text{ph}} \phi f \qquad (1\text{-}13)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้า rms ที่ขั้ว (terminal) ของเครื่องจักรกล จะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อของขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 ขดด้วย โดยสามารถต่อเป็นแบบ Y หรือ Δ อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยถ้าต่อเป็นแบบ Y แรงเคลื่อนไฟฟ้า rms ที่ขั้วจะมีค่าเป็น $\sqrt{3}E_A$ แต่ถ้าต่อแบบ Δ จะมีค่าเป็น E_A รูปที่ 1.18 เป็นการยกตัวอย่างการต่อขดลวดสเตเตอร์แบบ Y (ในแต่ละเฟสต่อร่วมกันแบบอนุกรม) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่มี 4 ขั้ว



รูปที่ 1.18 การต่อขดลวดสเตเตอร์แบบ Y ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ 4 ขั้ว [3]

<u>ตัวอย่างที่ 1.1</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 2 ขั้ว มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดเท่ากับ 0.2 T ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็ว 3600 r/min สเตเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 m ยาว 0.3 m มีขดลวดพันอยู่ 15 รอบต่อขด และขดลวดต่อกันแบบ Y จงหา

(a) แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส ที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา

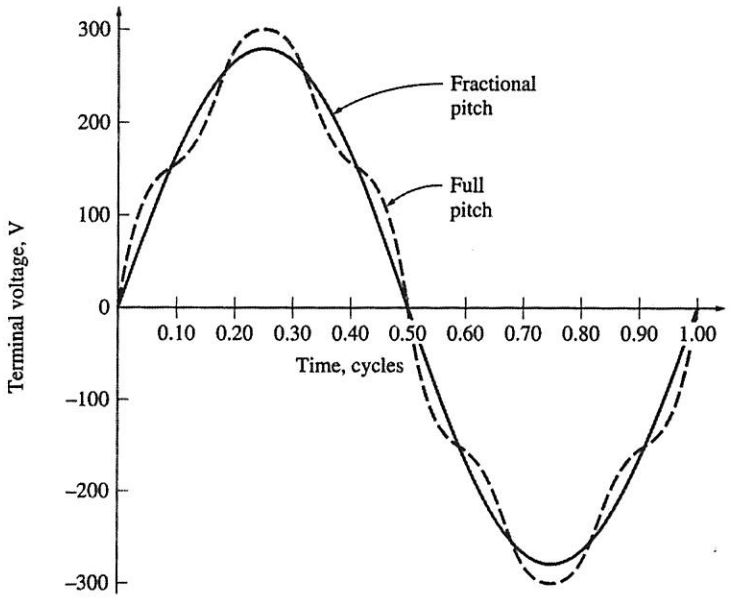
(b) แรงเคลื่อนไฟฟ้า rms ในแต่ละเฟส

(c) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว

Sol^{n}

1.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเมื่อพิจารณาระยะพิตช์ (Coil Pitch) และขดลวดวางตัวแบบกระจาย (Distribution Winding)

ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ จะมีอยู่ 2 ปัจจัยคือ ระยะพิตช์ของขดลวดและการวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้พัน โดยรายละเอียดเหล่านี้ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 1.2 ที่ผ่านมา ซึ่งสามารถสรุปได้คือ การพันขดลวดแบบระยะพิตช์เศษส่วน (fractional pitch หรือ chorded winding) จะช่วยขจัดฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำของขดลวด แต่จะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบระยะพิตช์เต็ม (full pitch หรือ pole pitch โดยเท่ากับ 180° ทางไฟฟ้า) ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำที่ลดลงนี้จะอยู่ในรูปของตัวประกอบพิตช์ (pitch factor: k_p) รูปที่ 1.19 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะแรงดันที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อพิจารณาระหว่างระยะพิตช์เศษส่วนและระยะพิตช์เต็ม



รูปที่ 1.19 การเปรียบเทียบแรงดันที่ขั้วของระยะพิตช์เศษส่วนและระยะพิตช์เต็ม [2]

ระยะพิตช์เต็มทางไฟฟ้าจะมีมุมเท่ากับ 180° ทางไฟฟ้า โดยมุมของระยะพิตช์เต็มทางกล (ρ_p) หาได้จาก

$$\rho_p = \frac{360°}{P} \qquad \text{(องศาทางกล)} \tag{1-14}$$

เมื่อ P คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก

ดังนั้นจึงสามารถหาระยะพิตช์เศษส่วน (ρ) ซึ่งเป็นมุมทางไฟฟ้าได้จาก

$$\rho = \frac{\theta_m}{\rho_p} \times 180° \qquad \text{(องศาทางไฟฟ้า)} \tag{1-15}$$

เมื่อ θ_m คือมุมองศาทางกลที่เป็นความถ่างของขดลวดเทียบกับระยะพิตช์เต็มทางกล (ρ_p) และตัวประกอบพิตช์ (pitch factor: k_p) ของขดลวดสามารถแสดงได้ดังนี้

$$k_p = \sin\frac{\rho}{2} \tag{1-16}$$

ดังนั้นจึงได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาเทอมตัวประกอบพิตช์เป็น

$$E_A = 4.44 N_{\text{ph}} k_p \phi f \tag{1-17}$$

จากสมการที่ (1-17) จะสังเกตเห็นว่า การพันขดลวดแบบระยะพิตช์เศษส่วนจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแบบระยะพิตช์เต็ม (เนื่องจากขนาดของ k_p จะมีค่าไม่เกิน 1) แต่การพันแบบระยะพิตช์เศษส่วนจะช่วยกำจัดฮาร์มอนิกได้ ซึ่งฮาร์มอนิกที่ต้องกำจัดจะมีเฉพาะฮาร์มอนิกเลขคี่ (odd harmonic ซึ่งประกอบด้วย 3, 5, 7, 9 และ ...) ส่วนผลของฮาร์มอนิกเลขคู่ (even harmonic) จะไม่ปรากฏในแรงดันเหนี่ยวนำ ทั้งนี้เพราะมีความสมมาตรของรูปคลื่นแรงดันรอบแกนกลางของฟลักซ์โรเตอร์จึงทำให้หักล้างกันหมดอยู่แล้ว

ตัวประกอบพิตช์ของขดลวดที่ความถี่ฮาร์มอนิกค่าต่างๆ แสดงได้ดังนี้

$$k_{p\nu} = \sin\frac{\nu\rho}{2} \tag{1-18}$$

เมื่อ ν คือหมายเลขของฮาร์มอนิก โดยฮาร์มอนิกที่ ν หมายถึงจำนวน ν เท่าของความถี่หลักมูลฐาน (fundamental frequency)

จากสมการที่ (1-18) จะสังเกตเห็นว่าฮาร์มอนิกบางตัวในแรงดันเหนี่ยวนำ สามารถกำจัดได้โดยสมบรูณ์จากการทำ $\frac{\nu\rho}{2}$ ให้เท่ากับ 180° หรือ 360°, 540°, 720°, ... ก็ได้ (ควรจะเลือกมุมที่ให้ความถ่างค่าสูงที่สุด เพราะจะได้แรงดันมีค่าสูงสุด และยังกำจัดฮาร์มอนิกที่ต้องการได้อีกด้วย) เช่นจะไม่ปรากฏฮาร์มอนิกที่ 3 ในคลื่นแรงดันถ้า $\frac{3\rho}{2} = 180°$ นั่นคือ $\rho = 120°$ ซึ่งก็คือการพันขดลวดให้มีความถ่างเป็น 2/3 ของระยะขั้วแม่เหล็ก ด้วยความถ่างของขดลวดนี้จะทำให้แรงดันที่เป็นผลมาจากฮาร์มอนิกผลคูณของเลข 3 (หรือที่เรียกว่า triplen harmonic อาทิเช่น ฮาร์มอนิกที่ 9, 15, 21 และ ...) จะมีค่าเป็นศูนย์ไปด้วย

สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ที่ต่อแบบ Y หรือ Δ จะไม่ปรากฏฮาร์มอนิกที่ 3 ขึ้นในคลื่นของแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากขดลวดถูกต่อกันในลักษณะที่กำจัดฮาร์มอนิกที่ 3 ออกไป และเป็นทำนองเดียวกันนี้กับ triplen harmonic ด้วย แต่ยังคงเหลือฮาร์มอนิกที่ 5, 7, 11, 13 และ ... ที่ยังคงส่งผลต่อแรงดัน โดยลำดับของฮาร์มอนิกที่สูงขึ้นจะส่งผลต่อรูปคลื่นแรงดันในปริมาณที่ลดลง ดังนั้นเราจึงสามารถละทิ้งฮาร์มอนิกที่สูงๆ ได้

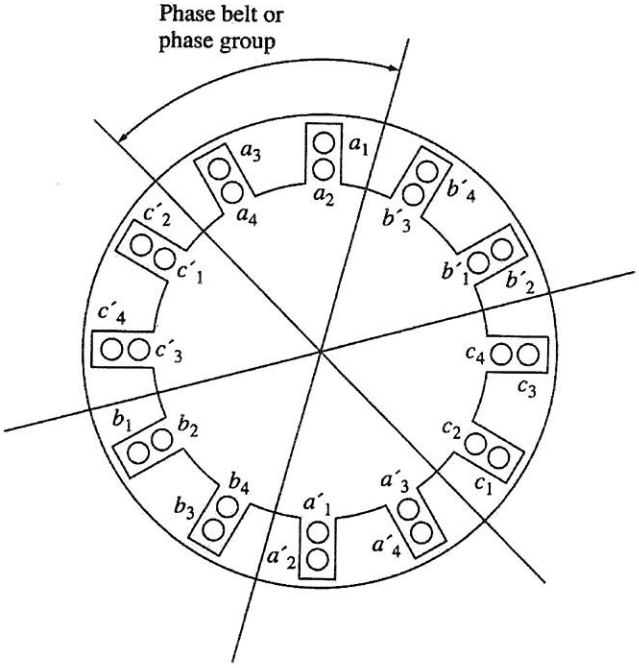
<u>ตัวอย่างที่ 1.2</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส 2 ขั้ว ขดลวดสเตเตอร์พันถ่าง 5/6 จงหาตัวประกอบพิตช์ของขดลวดที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 1, 3, 5, 7 และ 9

<u>Sol^{n}</u>

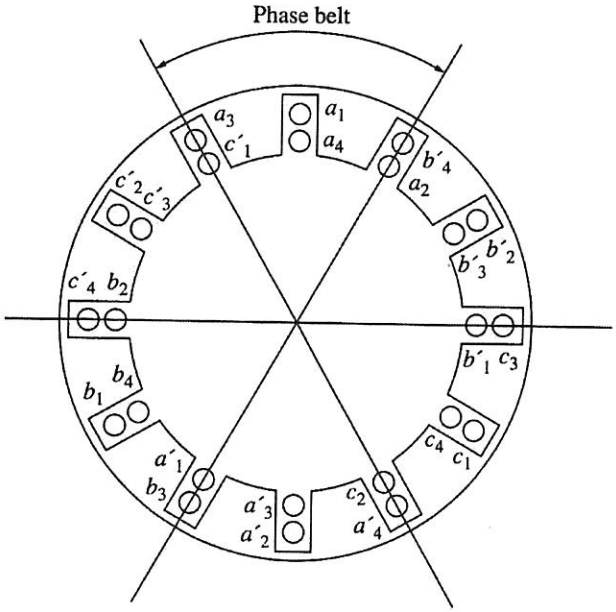
ส่วนเมื่อพิจารณาถึงการวางตัวของขดลวดสเตเตอร์ในร่องจะมีอยู่สองลักษณะคือ การวางตัวแบบรวม (concentrate) หมายถึง กลุ่มของขดลวดหรือกลุ่มของเฟสที่ใช้พันวางตัวอยู่ในร่องเดียวกัน โดยหัวข้อที่ผ่านๆ มาจะศึกษาเฉพาะการวางตัวแบบนี้ และแบบที่สองคือการวางตัวแบบกระจาย (distribution) หมายถึง กลุ่มของขดลวดหรือกลุ่มของเฟสที่ใช้พันวางตัวในแต่ละร่องแยกกันภายในแนวเฟสหรือกลุ่มเฟสนั้น (phase belt or phase group) ซึ่งการวางตัวของขดลวดในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับส่วนใหญ่จะเป็นแบบกระจาย ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดผลกระทบของฮาร์มอนิกจากการวางตัวของขดลวดแบบรวม แต่เนื่องจากในการวางตัวของขดลวดแบบรวม กลุ่มของขดลวดจะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กได้พร้อมกัน แต่การวางตัวของขดลวดแบบกระจายซึ่งมีขดลวดอยู่ในร่องที่แยกกัน แรงดันเหนี่ยวนำของขดลวดจึงเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการวางตัวของขดลวดแบบกระจายจึงมีค่าน้อยกว่าการวางตัวของขดลวดแบบรวม ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำที่น้อยลงนี้จะอยู่ในรูปของตัวประกอบการกระจาย (distribution factor หรือ breadth factor: k_d)

รูปที่ 1.20 เป็นการแสดงเครื่องจักรกล 2 ขั้ว การวางตัวของขดลวดสเตเตอร์เป็นแบบกระจาย (distribution) ระยะพิตช์เต็ม (full pitch) และพันขดลวดแบบสองชั้น (double layer winding; 1 slot = 2 coil side = 1 coil) ซึ่งจากรูป แต่ละเฟสจะมีขดลวดอยู่ 4 ขด วางตัวภายในแนวเฟสหรือกลุ่มเฟสนั้น (phase belt or phase group) โดยถ้าเครื่องจักรมี 2 ขั้ว ก็จะปรากฏแนวเฟสมา 6 phase belt (โดยทั่วไปแล้ว phase belt ทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ $3P$ เมื่อ P คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก) และจากรูปจะปรากฏ 2 slots per belt (ทั้งนี้เพราะแต่ละเฟสจะมีขดลวด 4 ขด อยู่ใน belt และพันแบบสองชั้น) ส่วนรูปที่ 1.21 จะมีค่าต่างๆ เท่ากับรูปที่ 1.20 ทุกประการ ยกเว้นมีค่า coil pitch = 5/6 หรือ 150° ทางไฟฟ้า และในแต่ละร่องอาจจะมีเฟสผสมกันอยู่

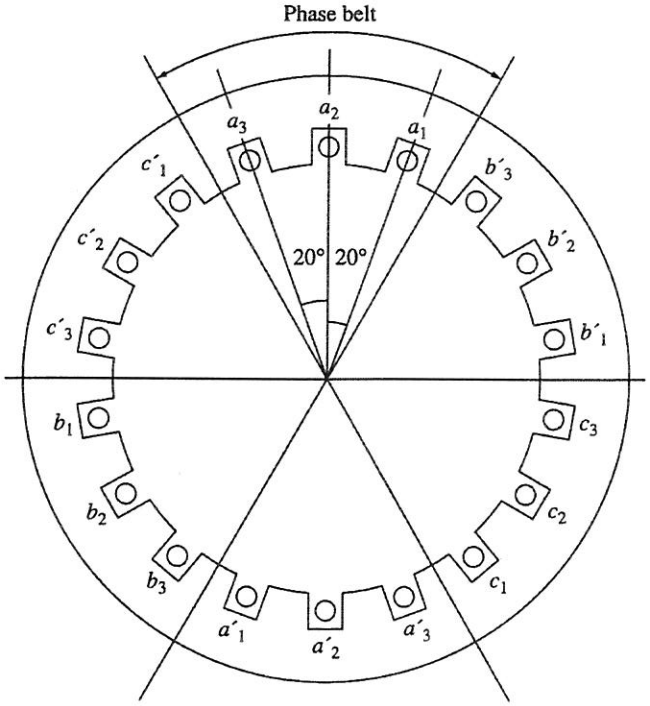
รูปที่ 1.22 เป็นการแสดงเครื่องจักรกล 2 ขั้ว การวางตัวของขดลวดสเตเตอร์เป็นแบบกระจาย (distribution) ระยะพิตช์เต็ม (full pitch) และพันขดลวดแบบชั้นเดียว (single layer winding; 1 slot = 1 coil side = 1/2 coil) ซึ่งจากรูป แต่ละเฟสจะมีขดลวดอยู่ 3 ขด มีมุมทางไฟฟ้าระหว่างร่องหรือเรียกว่าพิตช์ของร่อง (slot pitch: γ) เท่ากับ 20° ทางไฟฟ้า



รูปที่ 1.20 แสดงเครื่องจักรกล 2 ขั้ว พันแบบสองชั้น ระยะพิตช์เต็ม [2]



รูปที่ 1.21 แสดงเครื่องจักรกล 2 ขั้ว พันแบบสองชั้น ระยะพิตช์เศษส่วน [2]



รูปที่ 1.22 แสดงเครื่องจักรกล 2 ขั้ว พันแบบชั้นเดียว ระยะพิตช์เต็ม [2]

ตัวประกอบการกระจาย (distribution factor หรือ breadth factor: k_d) ของขดลวดสามารถแสดงได้ดังนี้

$$k_d = \frac{\sin(n\gamma/2)}{n\sin(\gamma/2)} \tag{1-19}$$

เมื่อ γ คือมุมทางไฟฟ้าระหว่างร่องหรือพิตช์ของร่อง (slot pitch) และ n คือร่องต่อแนวเฟส (slot per phase belt) หรือร่องต่อเฟสต่อขั้ว (slot/phase/pole) นั่นเอง

ตัวประกอบการกระจายของขดลวดที่ความถี่ฮาร์มอนิกค่าต่างๆ แสดงได้ดังนี้

$$k_{d\nu} = \frac{\sin(n\nu\gamma/2)}{n\sin(\nu\gamma/2)} \tag{1-20}$$

เมื่อ ν คือหมายเลขของฮาร์มอนิก โดยฮาร์มอนิกที่ ν หมายถึงจำนวน ν เท่าของความถี่หลักมูลฐาน (fundamental frequency)

ดังนั้นจึงได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อพิจารณาเทอมตัวประกอบพิตช์ร่วมกับตัวประกอบการกระจายเป็น

$$E_A = 4.44 N_{\text{ph}} k_p k_d \phi f \tag{1-21}$$

ผลคูณระหว่าง k_p และ k_d จะเรียกว่าตัวประกอบชุดขดลวด (winding factor: $k_w = k_p k_d$) ดังนั้น

$$E_A = 4.44 N_{\text{ph}} k_w \phi f \tag{1-22}$$

และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เป็นผลจากความถี่ฮาร์มอนิกค่าต่างๆ แสดงได้ดังนี้

$$E_v = 4.44 N_{\text{ph}} k_{pv} k_{dv} \phi_v f_v \tag{1-23}$$

เมื่อ v คือหมายเลขของฮาร์มอนิก

ดังนั้นจึงได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีฮาร์มอนิกปนอยู่คือ

$$E_A = \sqrt{E_1^{\,2} + E_3^{\,2} + E_5^{\,2} + ... + E_v^{\,2}} \tag{1-24}$$

<u>ตัวอย่างที่ 1.3</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส 2 ขั้ว 48 ร่อง ขดลวดสเตเตอร์พันถ่าง 13/24 พันแบบสองชั้น จงหาตัวประกอบพิตช์ (k_p) และตัวประกอบการกระจาย (k_d) ของขดลวด

<u>Sol^{n}</u>

<u>ตัวอย่างที่ 1.4</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส 2 ขั้ว ขดลวดต่อกันแบบ Y พันแบบสองชั้น พันถ่าง 150° ทางไฟฟ้า พันแบบกระจายโดยแต่ละเฟสจะมีขดลวดอยู่ 4 ขด แต่ละขดพัน 10 รอบ โรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 3000 r/min และฟลักซ์ต่อขั้วคือ 0.019 Wb จงหา

(a) มุมระหว่างร่องหรือพิตช์ของร่อง (slot pitch) ทางกล และทางไฟฟ้า

(b) ความถ่างของขดลวดเป็นจำนวนร่อง (stator span)

(c) ขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟส

(d) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว

<u>Sol^{n}</u>

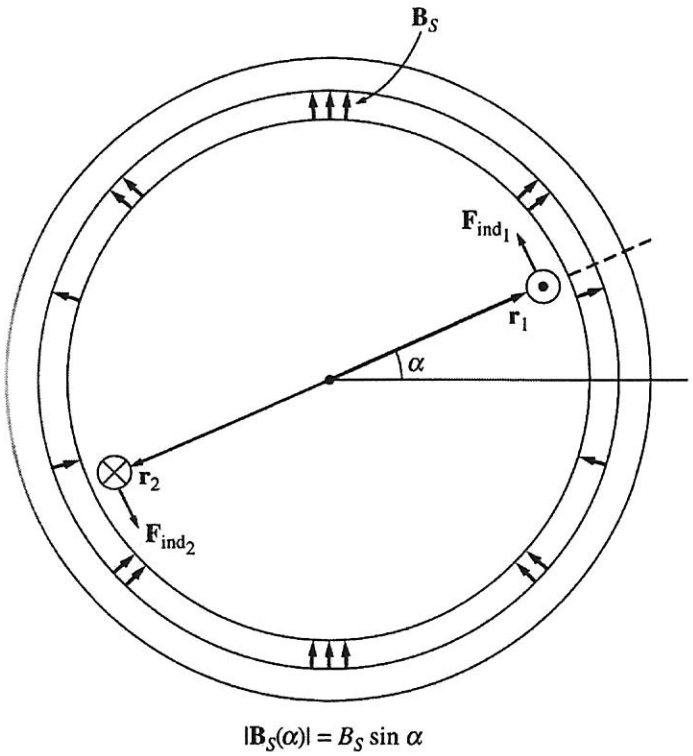
<u>ตัวอย่างที่ 1.5</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 1500 kVA, 6 ขั้ว 60 Hz 72 ร่อง พันแบบสองชั้น มี 4 coil side / slot แต่ละขดพัน 120 รอบ พันกระจายไปโดยรอบโดยมี coil pitch 9/12 ถ้าฟลักซ์ต่อขั้ว $\phi_1 = 0.01$ Wb เมื่อ $\phi_3 = 0.003$ Wb, $\phi_5 = 0.002$ Wb และ $\phi_7 = 0.0014$ Wb จงหาแรงดันต่อเฟส และแรงดันระหว่างคู่สาย ถ้าขดลวดของเครื่องจักรต่อกันแบบ Y

<u>Sol^n</u>

1.7 แรงบิดเหนี่ยวนำของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับภายใต้การทำงานสภาวะปกติ จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นทั้งจากโรเตอร์และจากสเตเตอร์ ซึ่งการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างสนามแม่เหล็กทั้งสองจะทำให้เกิดแรงบิดเหนี่ยวนำขึ้นภายในเครื่องจักร จากหัวข้อที่ 1.4.2 เป็นการอธิบายการเกิดแรงบิดเหนี่ยวนำในวงรอบปิดของเส้นลวดตัวนำในขณะที่หมุน ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าในหัวข้อนี้สนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ค่าสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์จะมีค่าไม่คงที่ โดยแสดงได้ด้วยสมการที่ (1-25) หรืออธิบายได้ดังรูปที่ 1.23

$$B_S(\alpha) = B_S \sin\alpha \tag{1-25}$$



รูปที่ 1.23 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ [2]

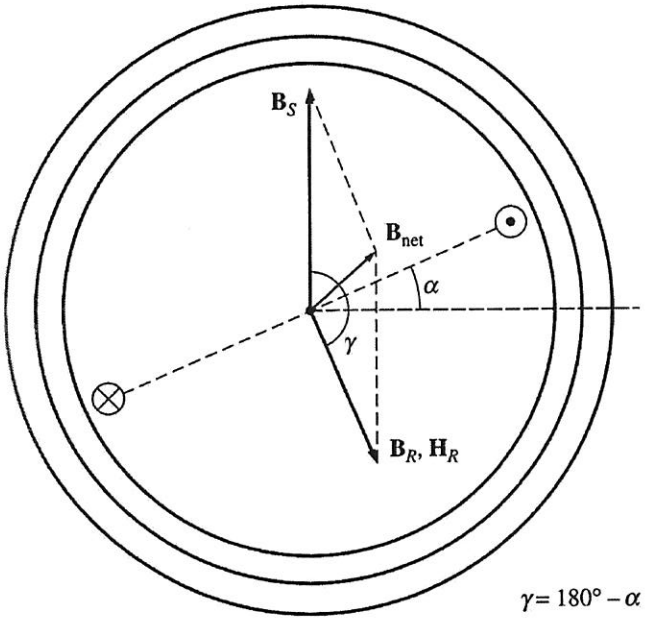
แต่ถึงอย่างไรก็ตาม หลักการในการเกิดแรงบิดเหนี่ยวนำในหัวข้อที่ 1.4.2 ก็ยังคงใช้ได้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับในหัวข้อนี้ ต่างกันแต่เพียงสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ในหัวข้อนี้จะมีค่าไม่คงที่ จึงได้แรงบิดเหนี่ยวนำบริเวณเส้นลวดตัวนำของโรเตอร์เมื่อพิจารณารูปที่ 1.23 ดังสมการที่ (1-26)

$$\tau_{ind} = 2rilB_S \sin\alpha \qquad \text{(ทวนเข็มนาฬิกา)} \tag{1-26}$$

และจากรูปที่ 1.24 เมื่อมีกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำที่โรเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ ($\mathbf{B}_R$) อีกตัวหนึ่ง (โดยทิศทางได้จากการประยุกต์ใช้กฎมือขวากับขดลวดตัวนำ) ดังนั้นจากหัวข้อที่ 1.4.2 ที่ผ่านมา จึงได้แรงบิดเหนี่ยวนำในรูปของผลคูณไขว้ (cross product) แสดงได้ดังนี้

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S \tag{1-27}$$

โดยที่ k จะมีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า และค่าความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (permeability: μ) ในวัสดุนั้นๆ ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่



รูปที่ 1.24 การเกิดแรงบิดเหนี่ยวนำจากผลของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์และโรเตอร์ [2]

ผลรวมของสนามแม่เหล็กลัพธ์ ($\mathbf{B}_{\text{net}}$) จะเป็นการรวมกันทางเวกเตอร์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้น

$$\mathbf{B}_{\text{net}} = \mathbf{B}_R + \mathbf{B}_S$$

หรือ $\mathbf{B}_S = \mathbf{B}_{\text{net}} - \mathbf{B}_R$ จากสมการที่ (1-27) จึงได้

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_R \times (\mathbf{B}_{\text{net}} - \mathbf{B}_R)$$

$$= k(\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{\text{net}}) - k(\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_R)$$

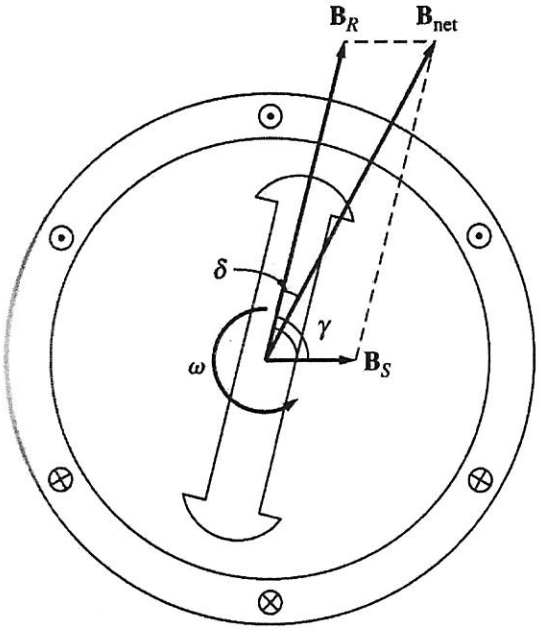
เนื่องจากผลคูณไขว้ของเวกเตอร์ตัวมันเองจะมีค่าเป็นศูนย์ จึงได้

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{\text{net}} \tag{1-28}$$

หรือแสดงแรงบิดเหนี่ยวนำอยู่ในรูปขนาดได้เป็น

$$\tau_{\text{ind}} = kB_R B_{\text{net}} \sin\delta \tag{1-29}$$

เมื่อ δ คือมุมระหว่าง $\mathbf{B}_R$ และ $\mathbf{B}_{\text{net}}$ หรือแสดงเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 1.25



รูปที่ 1.25 การเกิดแรงบิดเหนี่ยวนำจากผลของสนามแม่เหล็กโรเตอร์และสนามแม่เหล็กลัพธ์ [2]

1.8 กำลังงานและกำลังงานสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะรับกำลังงานกลที่ขาเข้าและจ่ายกำลังงานไฟฟ้าที่ขาออก ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับจะรับกำลังงานไฟฟ้าที่ขาเข้าและจ่ายกำลังงานกลที่ขาออก โดยระหว่างการถ่ายโอนกำลังงานจะมีกำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นในกระบวนการเสมอ

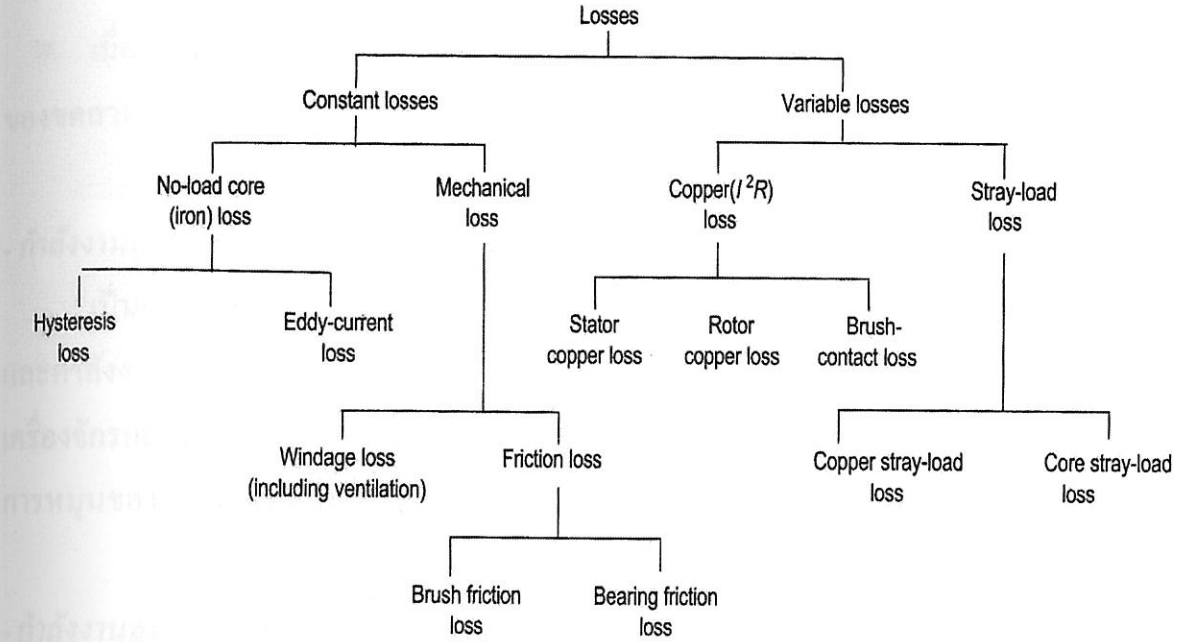
ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{1-30}$$

หรือ $$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}} \times 100\%, \qquad \eta = \frac{P_{in} - P_{losses}}{P_{in}} \times 100\% \tag{1-31}$$

1.8.1 กำลังงานสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

ไดอะแกรมการจำแนกชนิดของกำลังงานสูญเสียทั้งหมดในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแสดงได้ในรูปที่ 1.26



รูปที่ 1.26 ไดอะแกรมการจำแนกชนิดของกำลังงานสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้า [6]

โดยกำลังงานสูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับประกอบไปด้วยกำลังงานสูญเสียอยู่ 4 ประเภทพื้นฐาน ดังนี้

- กำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดง (electrical losses or copper losses or I^2R losses)

เป็นกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดต่างๆ ทั้งในสเตเตอร์ (ขดลวดอาร์เมเจอร์) และในโรเตอร์ (ขดลวดสนาม) โดยกำลังงานสูญเสียนี้จะอยู่ในรูปของความร้อน เมื่อพิจารณาเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส จะได้กำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์เป็น

$$P_{SCL} = 3I_A^2 R_A \tag{1-32}$$

เมื่อ I_A เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์แต่ละเฟส และ R_A เป็นค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์แต่ละเฟส

ส่วนกำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดงที่โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส (เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกพิจารณาแยกในบทที่กล่าวถึงต่อไป) จะมีค่าเป็น

$$P_{RCL} = I_F^2 R_F \tag{1-33}$$

เมื่อ I_F เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดสนามที่โรเตอร์ และ R_F เป็นค่าความต้านทานของขดลวดสนาม

- กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (core losses)

เป็นกำลังงานสูญเสียที่ประกอบด้วยกำลังงานสูญเสียจากฮีสเตอริซีส (hyteresis losses) และกำลังงานสูญเสียกระแสวน (eddy current losses) ซึ่งเป็นผลจากการนำโลหะมาทำเป็นเครื่องจักรกล กำลังงานสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก และความเร็วในการหมุนของสนามแม่เหล็ก

- กำลังงานสูญเสียทางกล (mechanical losses)

เป็นกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน (friction) และแรงต้านลม (windage) ในเครื่องจักรกล ซึ่งการสูญเสียทางกลและการสูญเสียในแกนเหล็ก บ่อยครั้งจะถูกรวมเข้าด้วยกันแล้วเรียกว่า กำลังงานสูญเสียในขณะที่หมุนตัวเปล่า (no-load rotational losses)

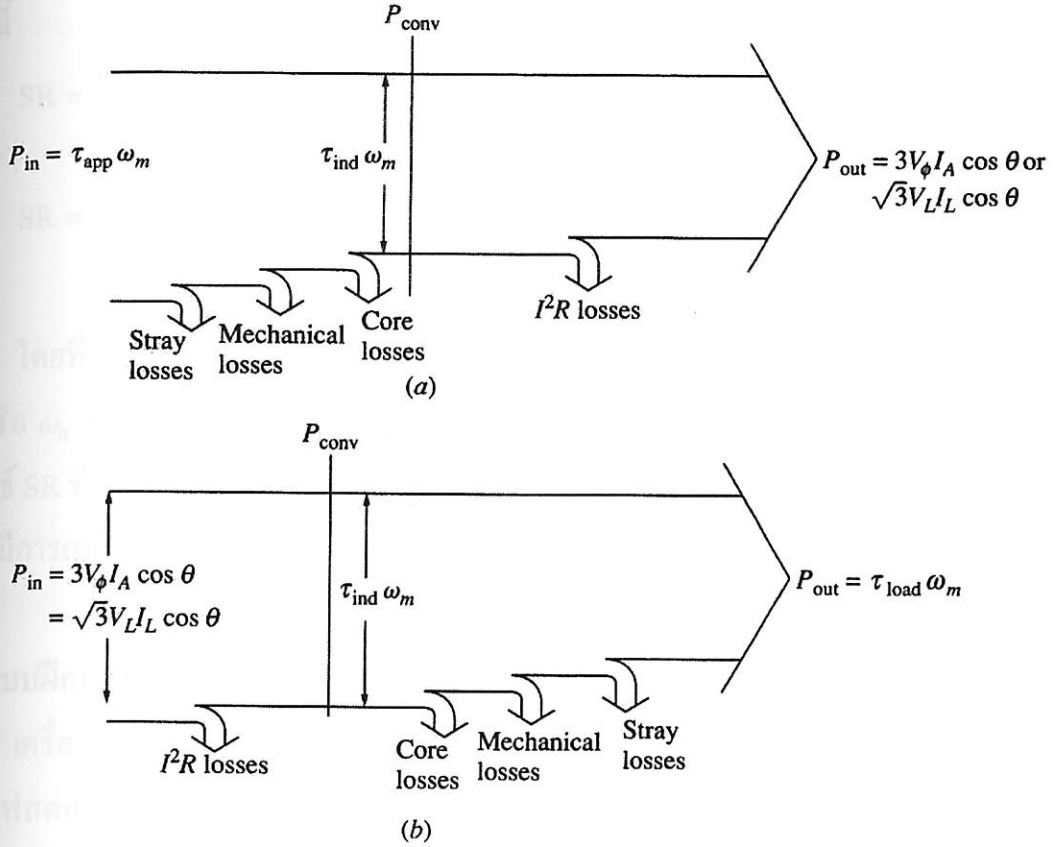
- กำลังงานสูญเสียสเตรย์หรือกำลังงานสูญเสียอื่นๆ (stray load losses or miscellaneous losses)

เป็นกำลังงานสูญเสียที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยปกติแล้วจะให้มีค่าเป็น 1% ของกำลังงานพิกัดขาออก

1.8.2 ไดอะแกรมการไหลของกำลังงาน (Power-Flow Diagram)

ไดอะแกรมการไหลของกำลังงานจะใช้อธิบายการไหลของกำลังงานเมื่อเครื่องจักรกลทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงด้วยรูปที่ 1.27 (a) หรือทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าดังแสดงด้วยรูปที่ 1.27 (b) ซึ่งกำลังงานที่เกิดขึ้นในขณะที่เปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (เครื่องกำเนิดไฟฟ้า) หรือเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล (มอเตอร์ไฟฟ้า) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}} \cdot \omega_m \tag{1-34}$$



รูปที่ 1.27 ไดอะแกรมการไหลของกำลังงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ [2]

1.9 การคุมค่าแรงดัน (Voltage Regulation) และการคุมค่าความเร็ว (Speed Regulation)

การคุมค่าแรงดัน (voltage regulation: VR) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความสามารถของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการรักษาระดับแรงดันที่ขั้วให้คงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\text{VR} = \frac{V_{\text{nl}} - V_{\text{fl}}}{V_{\text{fl}}} \times 100\% \tag{1-35}$$

โดยที่ V_{nl} คือแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะที่ไร้โหลด (no-load) และ V_{fl} คือแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะที่โหลดเต็มพิกัด (full-load) ดังนั้นถ้าผลลัพธ์ VR ที่ได้มีค่าน้อย ก็จะถือว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีคุณสมบัติที่ดีในการรักษาระดับแรงดันเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

เช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้า สิ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถของมอเตอร์ไฟฟ้าในการรักษาระดับความเร็วที่เพลาให้คงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงก็คือ (speed regulation: SR) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\text{SR} = \frac{n_{\text{nl}} - n_{\text{fl}}}{n_{\text{fl}}} \times 100\% \tag{1-36}$$

หรือ $$\text{SR} = \frac{\omega_{\text{nl}} - \omega_{\text{fl}}}{\omega_{\text{fl}}} \times 100\% \tag{1-37}$$

โดยที่ n_{nl} หรือ ω_{nl} คือความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าในขณะที่หมุนตัวเปล่า (no-load) และ n_{fl} หรือ ω_{fl} คือความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าในขณะที่ขับโหลดเต็มพิกัด (full-load) ดังนั้นถ้าผลลัพธ์ SR ที่ได้มีค่าน้อย ก็จะถือว่ามอเตอร์ไฟฟ้ามีคุณสมบัติที่ดีในการรักษาระดับความเร็วเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

1.10 แบบฝึกหัดท้ายบท

1.1) เครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส 4 ขั้ว 12 ร่อง มีขดลวดพันอยู่ 40 รอบต่อขด ทุกๆ ขดลวดในแต่ละเฟสต่อกันแบบอนุกรม และขดลวดทั้ง 3 เฟส ต่อกันแบบ Δ ฟลักซ์ต่อขั้วมีค่า 0.060 Wb และความเร็วในการหมุนของสนามแม่เหล็กมีค่า 1800 r/min

(a) จงหาความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวด (Ans : 60 Hz)

(b) จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (Ans : $V_{\phi} = V_T = 1280$ V)

1.2) เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส ต่อกันแบบ Y, 50 Hz, 2 ขั้ว มีขดลวดพันอยู่ 2000 รอบต่อเฟส จงหาค่าฟลักซ์ในโรเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (ระหว่างสาย) มีค่า 6 kV (Ans : 0.0078 Wb)

1.3) เครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส 2 ขั้ว 2 ร่อง ถ้าพันขดลวดแบบระยะพิตช์เศษส่วน จงหาระยะพิตช์ที่ดีที่สุดในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ 5 ที่เป็นส่วนประกอบของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Ans : 4/5)

1.4) เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส 4 ขั้ว 96 ร่อง พันขดลวดแบบสองชั้น (มี 2 ขดลวดต่อร่อง) ประกอบด้วย 4 รอบต่อขด และมี coil pitch 19/24

(a) จงหาค่า slot pitch และ coil pitch ในหน่วยองศาทางไฟฟ้า (Ans : coil pitch = 142.5°, slot pitch = 7.5°)

(b) จงหาค่าตัวประกอบพิตช์ ตัวประกอบการกระจาย และตัวประกอบชุดขดลวด (winding factor) ของขดลวดชุดนี้ (Ans : $k_p = 0.947$, $k_d = 0.956$, $k_w = 0.905$)

1.5) เครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส 4 ขั้ว 48 ร่อง ขดลวดพันแบบสองชั้น พันถ่าง 5/6 และมี 10 รอบต่อขด ทุกๆ ขดในแต่ละเฟสต่อกันแบบอนุกรม และขดลวดทั้ง 3 เฟส ต่อกันแบบ Δ ฟลักซ์ต่อขั้วมีค่า 0.054 Wb และความเร็วในการหมุนของสนามแม่เหล็กมีค่า 1800 r/min

(a) จงหาตัวประกอบพิตช์ของขดลวด (Ans : 0.966)

(b) จงหาตัวประกอบการกระจายของขดลวด (Ans : 0.958)

(c) จงหาความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวด (Ans : 60 Hz)

(d) จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฟสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (Ans : $V_\phi = V_T = 2132$ V)

1.6) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส ต่อกันแบบ Y, 6 ขั้ว ขดลวดสเตเตอร์พัน 6 ร่องต่อขั้ว แบบระยะพิตช์เศษส่วน และพันแบบสองชั้น โดยมี 8 รอบต่อขดลวด ตัวประกอบการกระจายมีค่า $k_d = 0.956$ ตัวประกอบพิตช์มีค่า $k_p = 0.981$ และฟลักซ์ต่อขั้วมีค่า 0.02 Wb เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนด้วยความเร็ว 1200 r/min จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้ (Ans : 831 V)

1.7) เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส ต่อกันแบบ Y, 50 Hz, 2 ขั้ว 18 ร่อง พันขดลวดแบบสองชั้น (มี 1 ขดลวดต่อร่อง) ประกอบด้วย 60 รอบต่อขด และมี coil pitch 8/9 จงหาค่าฟลักซ์ในโรเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (ระหว่างสาย) มีค่า 6 kV (Ans : 0.046 Wb)

1.8) จงหาระยะพิตช์ในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ 7 ที่เป็นส่วนประกอบของแรงเคลื่อนไฟฟ้าในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ และจงออกแบบจำนวนร่องที่น้อยที่สุดกับเครื่องจักรกลนี้ซึ่งมี

8 ขั้ว โดยให้สอดคล้องกับค่าความถ่างของขดลวด พร้อมทั้งหาค่าตัวประกอบพิตช์เมื่อพิจารณาฮาร์มอนิกที่ 5 (Ans : 154.3°, 56 slot, 0.434)

บทที่ 2
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
(Synchronous Generator)

2.1 หลักการและโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

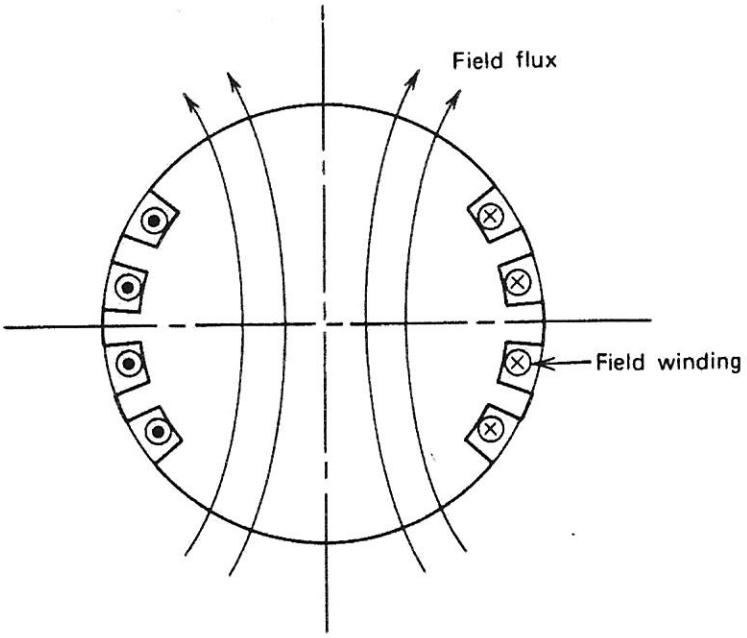
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (synchronous generator) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยกระแสไฟตรงที่จ่ายให้ขดลวดสนามที่โรเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ จากนั้นโรเตอร์จะถูกหมุนด้วยตัวขับจากแหล่งต้นกำลังภายนอก (ป้อนพลังงานกลเข้าไป) จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่โรเตอร์ไปหมุนตัดผ่านขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 ชุด ที่วางทำมุมกัน 120° ทางไฟฟ้า จึงเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้ง 3 เฟสขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ (ได้พลังงานไฟฟ้าออกมา) โดยขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อเฟสหาได้จากในบทที่ 1 ที่ผ่านมาคือ

$$E_A = 4.44 N_{\text{ph}} \phi f \tag{2-1}$$

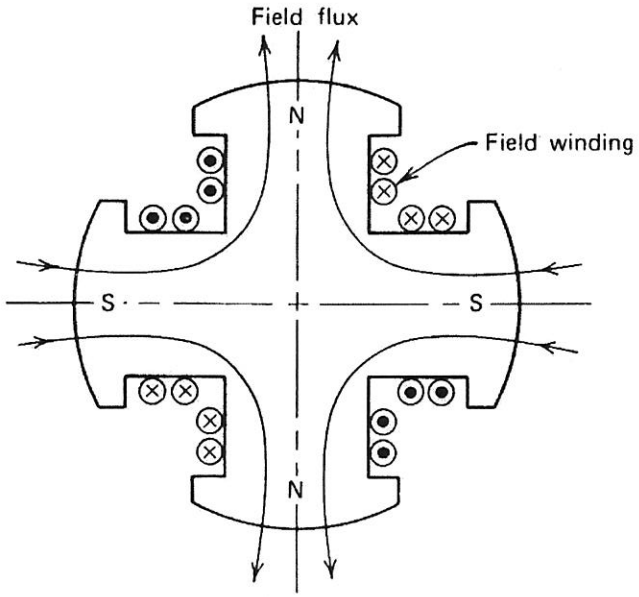
โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับ ฟลักซ์แม่เหล็ก ความถี่หรือความเร็วรอบของการหมุน และโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสและมีทิศทางเดียวกันกับที่โรเตอร์หมุนไป โดยมีอัตราเร็วในการหมุนที่เท่ากัน ($n_s = n_m$) ดังนั้นจากหัวข้อที่ 1.3 เรื่องสนามแม่เหล็กหมุนที่ผ่านมา จึงได้ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์คือ

$$n_m = \frac{120 f_e}{P} \tag{2-2}$$

สำหรับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กจะมีลักษณะของขั้วแม่เหล็กอยู่ 2 แบบ คือ ขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (nonsalient pole หรืออาจเรียกว่า cylindrical rotor หรือ round rotor) ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.1 ซึ่งฟลักซ์ในช่องอากาศ (air-gap) จะมีความสม่ำเสมอ และขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.2 ซึ่งฟลักซ์ในช่องอากาศจะไม่สม่ำเสมอ และโดยปกติแล้วขั้วแม่เหล็กไม่ยื่นจะมีขั้วแม่เหล็กอยู่ 2 และ 4 ขั้ว ในขณะที่ขั้วแม่เหล็กยื่นจะมีขั้วแม่เหล็กอยู่ 4 ขั้ว หรือมากกว่า



รูปที่ 2.1 โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น 2 ขั้ว ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส [5]



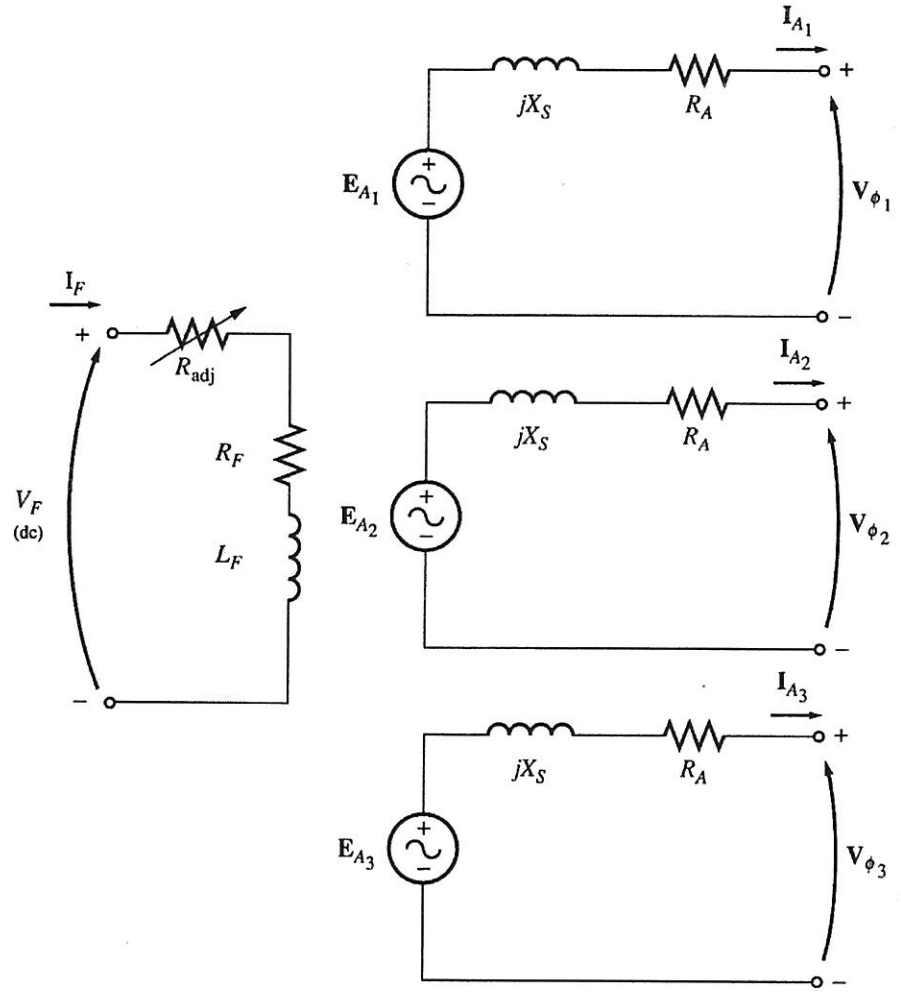
รูปที่ 2.2 โรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น 4 ขั้ว ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส [5]

2.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การอธิบายคุณลักษณะต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในบทนี้ทั้งหมด จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีโรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (nonsalient pole หรือ cylindrical rotor) เท่านั้น เนื่องจากขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าแบบนี้ ฟลักซ์ในช่องอากาศจะมีการกระจาย

ตัวอย่างสม่ำเสมอ จึงง่ายที่จะนำมาพิจารณาก่อนในขั้นต้น ส่วนผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) ซึ่งฟลักซ์ในช่องอากาศกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ จะได้รับการกล่าวถึงในบทถัดๆ ไป

รูปที่ 2.3 เป็นการแสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในแต่ละเฟส โดยแสดงแบบจำลองของวงจรสมมูลนี้*ต่อเฟส*ได้ดังสมการที่ (2-3) เมื่อ $\mathbf{E}_A$ คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเฟส (internal voltage หรืออาจเรียกว่า generated voltage) รายละเอียดได้กล่าวผ่านมาแล้วในบทที่ 1 ส่วน $\mathbf{V}_\phi$ คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าขาออกต่อเฟส (output voltage) และ $\mathbf{I}_A$ คือกระแสอาร์เมเจอร์ต่อเฟส โดยถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสจะไหลออกจาก $\mathbf{E}_A$ เข้าสู่ $\mathbf{V}_\phi$ (ถ้าพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสจะไหลในทิศทางตรงกันข้าม) ส่วน R_A คือค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ต่อเฟส และ X_S คือค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (synchronous reactance) ของขดลวดต่อเฟส



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในแต่ละเฟส [2]

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi + R_A\mathbf{I}_A + jX_S\mathbf{I}_A$$

หรือ

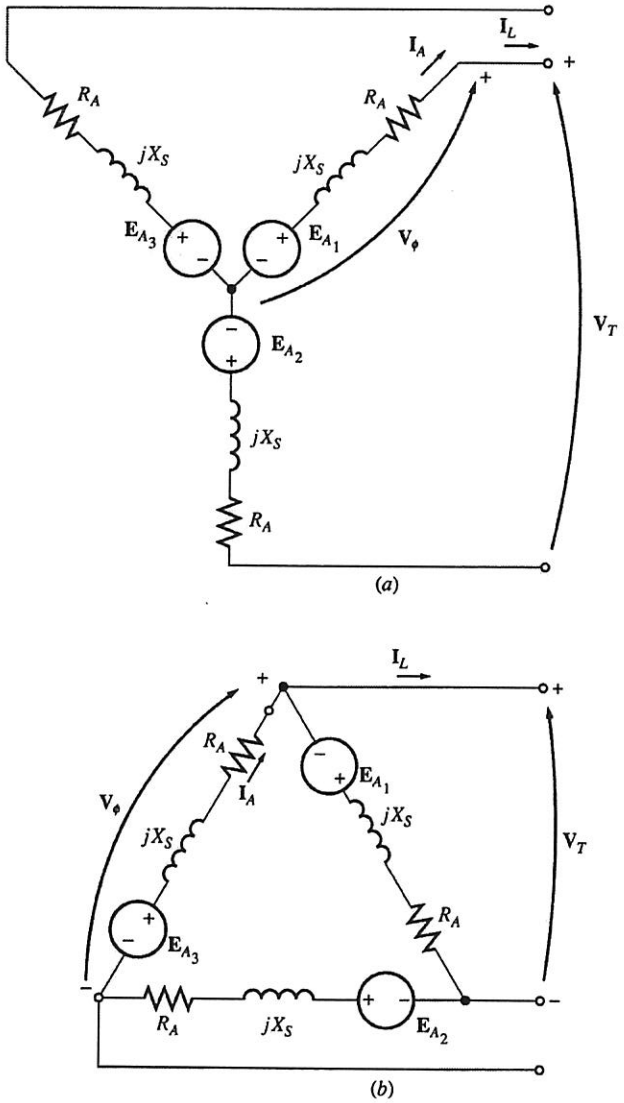
$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - R_A\mathbf{I}_A - jX_S\mathbf{I}_A \qquad (2\text{-}3)$$

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (terminal voltage: $\mathbf{V}_T$) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ จะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อของขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส โดยสามารถต่อเป็นแบบ Y หรือ Δ อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งถ้าต่อเป็นแบบ Y ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.4 (a) จะได้

$$V_T = \sqrt{3}V_\phi \qquad (2\text{-}4)$$

และถ้าต่อเป็นแบบ Δ ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.4 (b) จะได้

$$V_T = V_\phi \qquad (2\text{-}5)$$

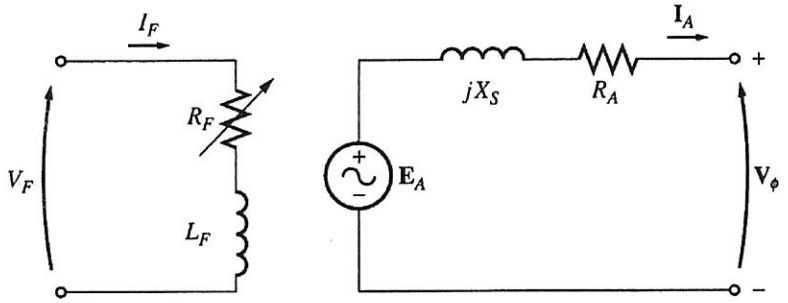


รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อต่อแบบ Y และ Δ ตามลำดับ [2]

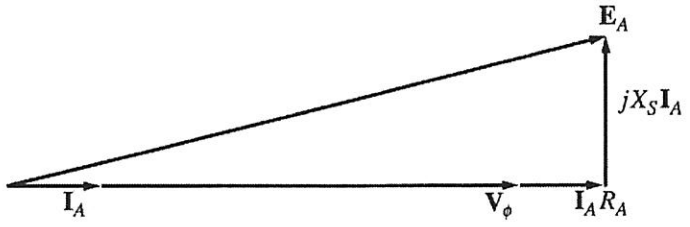
2.3 เฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับออกมา ซึ่งโดยทั่วไปเราจะแสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ออกมานี้ในรูปของเฟเซอร์ (phasor) โดยเมื่อกล่าวถึงเฟเซอร์ใดๆ จะต้องคำนึงถึงทั้งขนาด (magnitude) และทิศทางหรือมุม (angle) จึงเป็นที่มาของการเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะได้กล่าวถึงในหัวข้อนี้

รูปที่ 2.5 เป็นการแสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อเฟส ซึ่งมีแบบจำลองของวงจรสมมูล*ต่อเฟส*แสดงได้ดังสมการที่ (2-3) ที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายโหลดที่มีตัวประกอบกำลังเป็น 1 (unity power factor; PF = 1.0) ซึ่งเป็นโหลดที่มีเฉพาะค่าความต้านทาน (purely resistive load) $\mathbf{V}_\phi$ และ $\mathbf{I}_A$ จะมีเฟสเดียวกัน (inphase) จึงสามารถเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6 (สมมติให้ $\mathbf{V}_\phi$ คือเฟเซอร์อ้างอิงซึ่งทำมุม 0°)

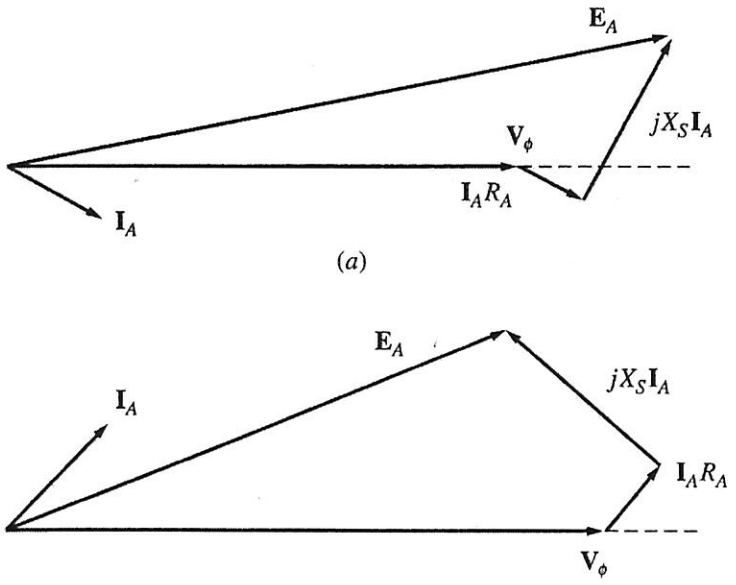


รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อเฟส [2]



รูปที่ 2.6 เฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อจ่ายโหลดที่มี PF = 1.0 [2]

แต่ถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายโหลดที่มีตัวประกอบกำลังล้าหลัง (lagging power factor) ซึ่งเป็นโหลดประเภทตัวเหนี่ยวนำ (inductive load) $\mathbf{I}_A$ จะมีเฟสตามหลัง (lag) $\mathbf{V}_\phi$ อยู่ จึงเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อจ่ายโหลดที่มี PF ล้าหลัง ได้ดังรูปที่ 2.7 (a) และถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายโหลดที่มีตัวประกอบกำลังนำหน้า (leading power factor) ซึ่งเป็นโหลดประเภทตัวเก็บประจุ (capacitive load) $\mathbf{I}_A$ จะมีเฟสนำหน้า (lead) $\mathbf{V}_\phi$ อยู่ จึงเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อจ่ายโหลดที่มี PF นำหน้า ได้ดังรูปที่ 2.7 (b)

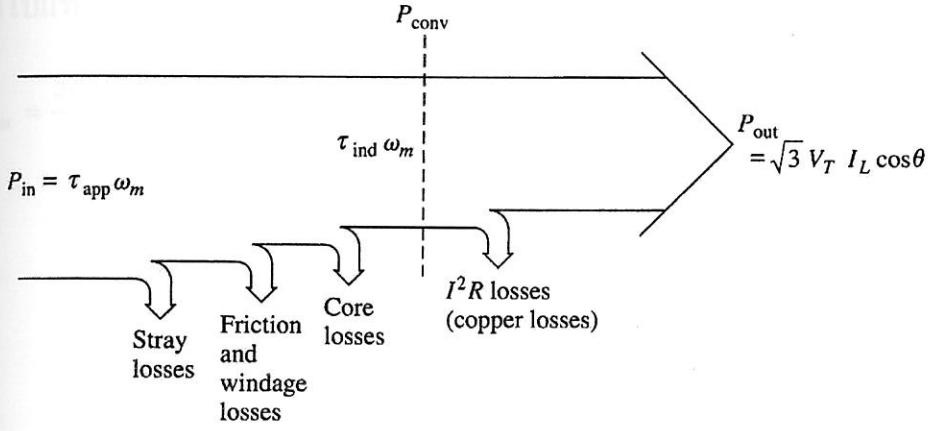


รูปที่ 2.7 เฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มี PF ล้าหลังและนำหน้า ตามลำดับ [2]

จากรูปที่ 2.6 และ 2.7 ซึ่งเป็นการพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จะสังเกตเห็นว่า $\mathbf{E}_A$ ที่ปรากฏจะมีมุมเป็นค่าบวกเสมอ (ถ้าพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้า $\mathbf{E}_A$ จะมีมุมเป็นค่าลบ) ส่วนถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่มี PF ล้าหลัง จะได้ $E_A\cos\delta > V_\phi$ แต่ถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มี PF นำหน้า จะได้ $E_A\cos\delta < V_\phi$ เมื่อ δ คือมุมระหว่าง $\mathbf{E}_A$ และ $\mathbf{V}_\phi$

2.4 กำลังและแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จะเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาจมีตัวขับทางกลหรือตัวต้นกำลัง (prime mover) เป็น เครื่องยนต์ดีเซล (diesel engine) กังหันไอน้ำ (steam turbine) กังหันน้ำ (water turbine) หรืออื่นๆ เพื่อขับให้โรเตอร์หมุน โดยความเร็วในการขับโรเตอร์นั้นจะต้องคงที่ เพราะถ้าความเร็วไม่คงที่จะทำให้ความถี่ทางไฟฟ้าที่ได้ออกมามีค่าไม่คงที่ด้วย โดยทั่วไปกำลังงานขาออกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังงานขาเข้า เนื่องจากมีการสูญเสียต่างๆ เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งแสดงไดอะแกรมการไหลของกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมการไหลของกำลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [2]

กำลังไฟฟ้าจริง (real power) ขาออก ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 3 เฟส แสดงได้โดย

$$P_{out} = \sqrt{3}V_T I_L \cos\theta \qquad (2\text{-}6)$$

หรือ

$$P_{out} = 3V_\phi I_A \cos\theta \qquad (2\text{-}7)$$

และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power) ขาออก หาได้โดย

$$Q_{out} = \sqrt{3}V_T I_L \sin\theta \qquad (2\text{-}8)$$

หรือ

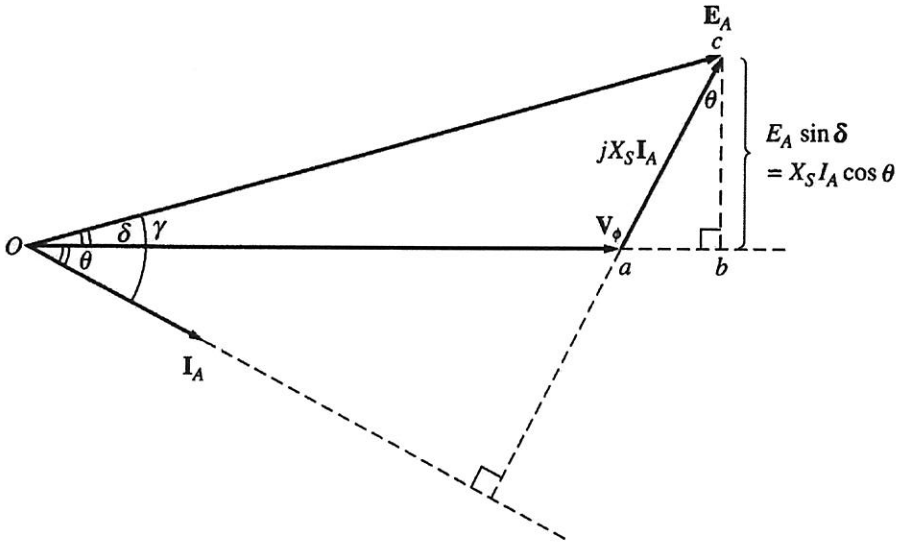
$$Q_{\text{out}} = 3V_{\phi} I_A \sin\theta \tag{2-9}$$

ถ้าละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_A) (เนื่องจาก $X_S >> R_A$) จะง่ายต่อการหาค่ากำลังงานขาออกโดยประมาณ โดยการพิจารณาเฟเซอร์ไดอะแกรมจากรูปที่ 2.9 ซึ่งในรูปขนาดความยาวของ bc จะมีค่าเท่ากับ $E_A \sin\delta$ หรือ $X_S I_A \cos\theta$ ดังนั้น

$$I_A \cos\theta = \frac{E_A \sin\delta}{X_S}$$

นำไปแทนในสมการที่ (2-7) จึงได้

$$P_{\text{out}} = \frac{3V_{\phi} E_A \sin\delta}{X_S} \tag{2-10}$$



รูปที่ 2.9 เฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ [2]

สมการที่ (2-10) นี้เป็น P_{out} โดยประมาณเนื่องจากสมมติให้ $R_A = 0$ ซึ่งเมื่อไม่มี R_A ก็จะไม่ปรากฏกำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดง (electrical losses or copper losses) ดังนั้นในสมการที่ (2-10) จึงได้ $P_{\text{out}} = P_{\text{conv}}$ ด้วย

สมการที่ (2-10) แสดงกำลังงานที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมุม δ ระหว่าง $\mathbf{V}_\phi$ และ $\mathbf{E}_A$ โดยมุม δ นี้ จะถูกเรียกว่ามุมกำลังหรือมุมแรงบิด (power angle หรือ torque angle หรือ load angle) ซึ่งถ้า $\delta = 90^\circ$ จะได้กำลังงานสูงสุด (maximum power) ดังนี้

$$P_{\max} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S} \tag{2-11}$$

โดยทั่วไปแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้งานจริงเมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัด (full-load) มุม δ จะอยู่ระหว่าง 15 ถึง 20° เท่านั้น

จากหัวข้อที่ 1.7 ในบทที่ผ่านมา แรงบิดเหนี่ยวนำของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงได้เป็น

$$\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{\text{net}} \tag{2-12}$$

หรือแสดงอยู่ในรูปขนาดได้เป็น

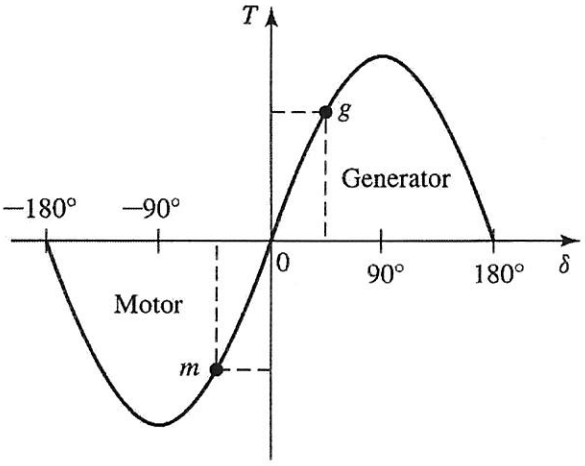
$$\tau_{\text{ind}} = kB_R B_{\text{net}} \sin\delta \tag{2-13}$$

เมื่อ δ คือมุมระหว่างสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์และสนามแม่เหล็กลัพธ์ ซึ่งก็คือมุมแรงบิด (torque angle) นั่นเอง โดย $\mathbf{B}_R$ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า $\mathbf{E}_A$ และ $\mathbf{B}_{\text{net}}$ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า $\mathbf{V}_\phi$ ส่วน δ จะเป็นมุมระหว่าง $\mathbf{E}_A$ และ $\mathbf{V}_\phi$ ซึ่งเหมือนกับมุม δ ระหว่าง $\mathbf{B}_R$ และ $\mathbf{B}_{\text{net}}$

การหาสมการแรงบิดเหนี่ยวนำ (τ_{ind}) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดำเนินการผ่านสมการที่ (2-10) โดยเราทราบ $P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}} \cdot \omega_m$ ดังนั้นจึงได้

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{3V_\phi E_A \sin\delta}{\omega_m X_S} \tag{2-14}$$

คุณลักษณะของมุมแรงบิด (torque angle) δ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส แสดงได้ด้วยรูปที่ 2.10 โดยมุม δ จะมีค่าเป็นบวกเมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และมีค่าเป็นลบเมื่อพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้า และจะสังเกตเห็นว่าสมการที่ (2-14) จะแสดงค่าแรงบิดเหนี่ยวนำในเทอมของปริมาณทางไฟฟ้า ส่วนสมการที่ (2-12) จะแสดงค่าแรงบิดเหนี่ยวนำในเทอมของปริมาณทางแม่เหล็ก



รูปที่ 2.10 คุณลักษณะของมุมแรงบิด (torque angle) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส [2]

2.5 การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

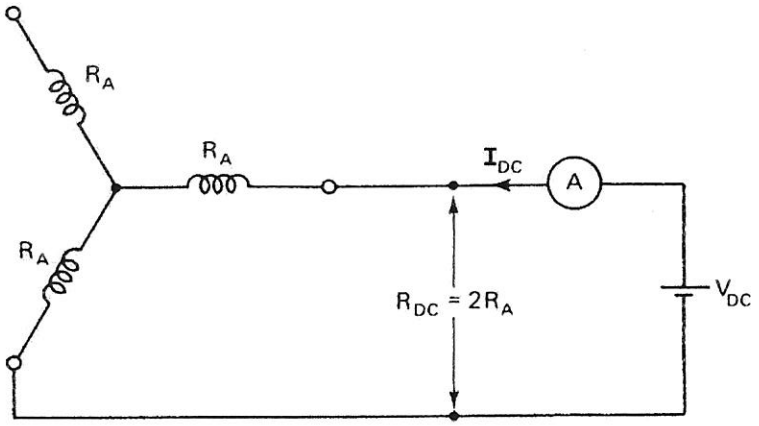
การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_A) สามารถดำเนินการได้โดยผ่านวิธีโวลต์-แอมป์ (volt-amp method) ส่วนค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (X_S) สามารถดำเนินการได้โดยผ่านการทดสอบในขณะเปิดวงจร (open-circuit test) และทดสอบในขณะลัดวงจร (short-circuit test) ควบคู่กัน

2.5.1 การหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_A)

สามารถหาได้โดยผ่านวิธีโวลต์-แอมป์ (volt-amp method) โดยการป้อนแรงดันไฟตรง (V_{DC}) เข้าไปในขดลวดอาร์เมเจอร์ด้วยค่าที่เหมาะสม จากนั้นทำการวัดกระแสไฟตรง (I_{DC}) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ ($R_{A,DC}$) ซึ่งการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้ไม่ปรากฏผลของค่ารีแอกแตนซ์ การทดสอบด้วยวิธีนี้ก็ยังไม่ให้ผลของ R_A ที่ถูกต้องแท้จริง เนื่องจาก R_A เมื่อพิจารณาไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่าสูงกว่าเมื่อพิจารณาไฟฟ้ากระแสตรง (ผลของปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) เมื่อความถี่สูงขึ้น) โดยในทางปฏิบัติถ้าต้องการค่าที่แท้จริงที่เรียกว่าค่าความต้านทานประสิทธิผลของอาร์เมเจอร์ (effective resistance of the armature: $R_{A,eff}$) จะต้องคูณด้วยตัวเลขระหว่าง 1.2 – 1.5

สำหรับการต่อขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้ง 3 เฟส เป็นแบบ Y ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.11 กระแสไฟตรงที่ได้จากการทดสอบนี้จะไหลผ่านขดลวดซึ่งมีความต้านทานอยู่ 2 ขด $R_{DC} = 2R_A$ จึงได้ $I_{DC} = \dfrac{V_{DC}}{2R_A}$ หรือ

$$R_A = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \tag{2-15}$$



รูปที่ 2.11 การหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์โดยวิธีโวลต์-แอมป์ เมื่อต่อขดลวดแบบ Y [6]

ส่วนการต่อขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้ง 3 เฟส เป็นแบบ Δ การดำเนินการทำได้โดยแปลง Δ เป็น Y ก่อน แล้วพิจารณาโดยใช้หลักการเดิม จึงได้

$$R_A = \frac{3V_{DC}}{2I_{DC}} \tag{2-16}$$

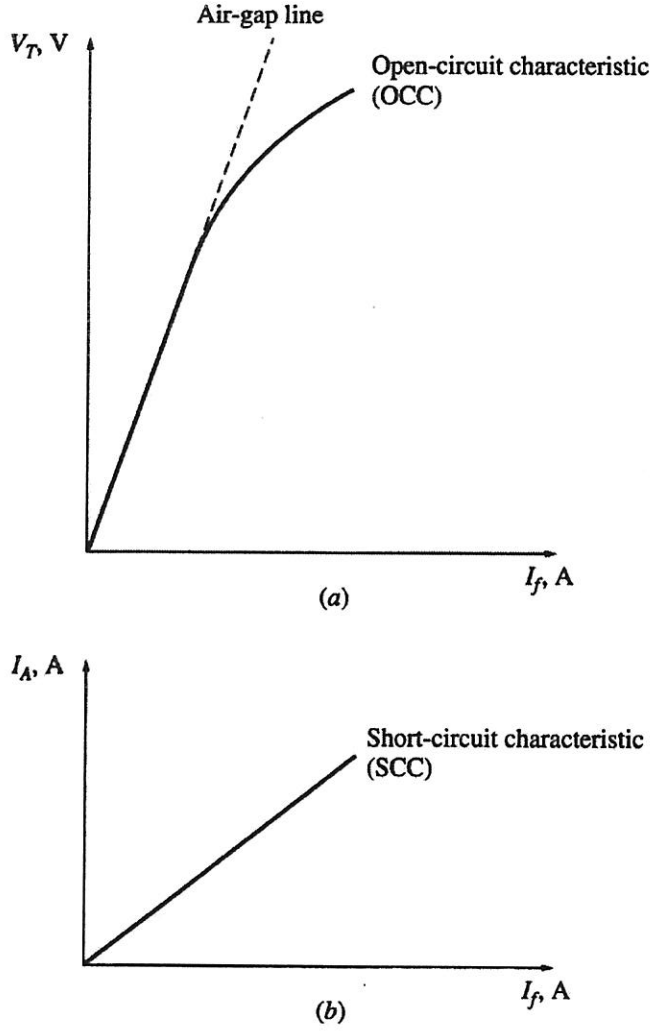
2.5.2 การหาค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (X_S)

สามารถดำเนินการได้โดยผ่านการทดสอบในขณะเปิดวงจร (open-circuit test) และทดสอบในขณะลัดวงจร (short-circuit test) ควบคู่กันไป ดังนี้

- ทดสอบในขณะเปิดวงจร (open-circuit test)

ดำเนินการได้โดยขับให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหมุนที่ความเร็วพิกัด (rated speed) ในสภาวะไร้โหลด (no load) จากนั้นตั้งค่ากระแสสนาม I_f ให้เป็นศูนย์ก่อนแล้วค่อยๆ ทำการปรับกระแสสนามขึ้นไปที่ละระดับ ทำการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (ไม่มีโหลด $I_A = 0$ จึงได้ $E_A = V_\phi$) นำค่าที่อ่านได้ไปพล็อตกราฟระหว่าง E_A หรือ V_T เทียบกับ I_f โดยรูปกราฟที่ปรากฏจะถูกเรียกว่ากราฟคุณลักษณะเมื่อเปิดวงจร (open-circuit characteristic: OCC หรือ saturation curve) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.12 (a) ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่า

กราฟในช่วงแรกจะเป็นเชิงเส้นและจะเริ่มเป็นเส้นโค้งในช่วงท้าย ทั้งนี้เพราะฟลักซ์แม่เหล็กเกิดการอิ่มตัว (saturation) แต่ในบริเวณช่องอากาศ (air-gap) จะไม่มีการอิ่มตัวของฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลจากค่าความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance) ในช่องอากาศที่มีปริมาณสูงมากถ้าเทียบกับบริเวณอื่น จึงส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศมีความเป็นเชิงเส้น (air-gap line หรือ unsaturation line) ดังแสดงในรูป

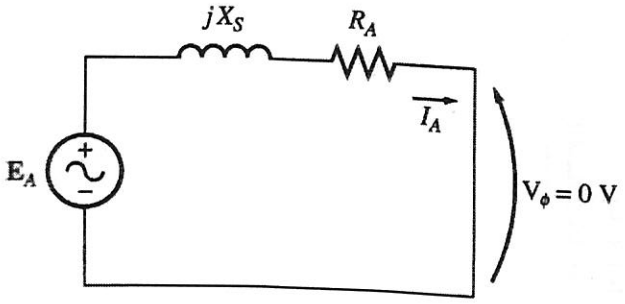


รูปที่ 2.12 กราฟคุณลักษณะเมื่อเปิดวงจร (OCC) และลัดวงจร (SCC) ตามลำดับ [2]

- *ทดสอบในขณะลัดวงจร (short-circuit test)*

ดำเนินการได้โดยขับให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหมุนที่ความเร็วพิกัด จากนั้นทำการลัดวงจรที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังแสดงเป็นวงจรสมมูลในรูปที่ 2.13 ตั้งค่ากระแสสนาม I_f ให้เป็นศูนย์ก่อนแล้วค่อยๆ ทำการปรับกระแสสนามขึ้นไปที่ละระดับ ทำการวัด

ค่ากระแสอาร์เมเจอร์ I_A นำค่าที่อ่านได้ไปพล็อตกราฟระหว่าง I_A เทียบกับ I_f โดยรูปกราฟที่ปรากฏจะถูกเรียกว่ากราฟคุณลักษณะเมื่อลัดวงจร (short-circuit characteristic: SCC) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.12 (b)



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อทำการลัดวงจรที่ขั้ว [2]

เมื่อทำการลัดวงจรที่ขั้วดังรูปที่ 2.13 จะหากระแสอาร์เมเจอร์ได้จาก

$$\mathbf{I}_A = \frac{\mathbf{E}_A}{R_A + jX_S}$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดจึงได้

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}}$$

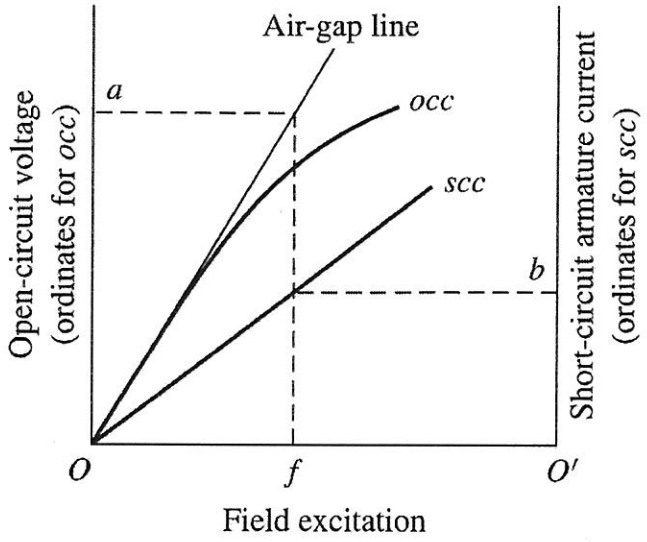
ดังนั้นค่าซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ในเครื่องจักร จึงมีค่าเป็น

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_A}{I_A} \approx \frac{E_{A,oc}}{I_{A,sc}} \quad (\text{ณ } I_f \text{ค่าเดียวกัน}) \tag{2-17}$$

ถ้า $X_S >> R_A$ จึงประมาณได้ว่า

$$X_S \approx \frac{E_{A,oc}}{I_{A,sc}} \quad (\text{ณ } I_f \text{ค่าเดียวกัน}) \tag{2-18}$$

จากสมการที่ (2-18) ค่า $E_{A,oc}$ จะได้จากการทดสอบในขณะเปิดวงจร (ดูได้จากกราฟ OCC) ซึ่งต้องเป็นค่าต่อเฟส และค่า $I_{A,sc}$ จะได้จากการทดสอบในขณะลัดวงจร (ดูได้จากกราฟ SCC) ซึ่งต้องเป็นค่าต่อเฟสเช่นกัน ซึ่งค่า $E_{A,oc}$ และ $I_{A,sc}$ ที่ได้มาต้องเป็นค่าที่พิจารณา ณ กระแสสนาม I_f เดียวกัน ดังแสดงเป็นตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.14

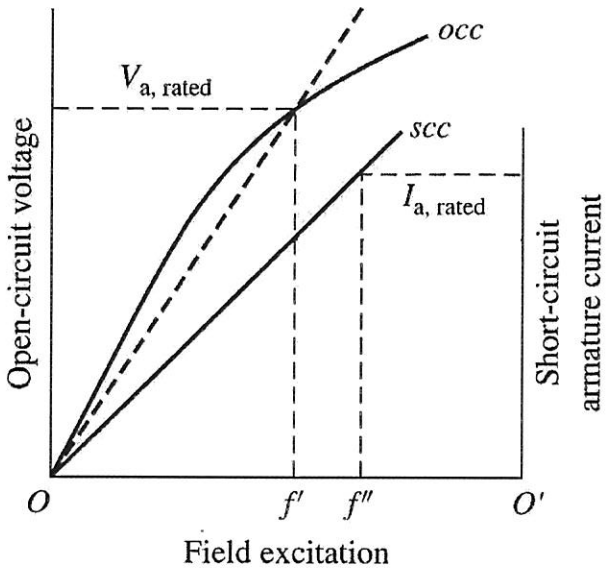


รูปที่ 2.14 กราฟคุณลักษณะเมื่อเปิดวงจรและลัดวงจร ณ กระแสสนามเดียวกัน [3]

2.5.3 การหาค่าอัตราส่วนวงจรลัด (Short-Circuit Ratio: SCR)

ค่าอัตราส่วนวงจรลัด (SCR) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนิยามได้จาก สัดส่วนของกระแสสนามที่ให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วพิกัด (rated voltage) เมื่อพิจารณาขณะเปิดวงจร ต่อกระแสสนามที่ให้ค่ากระแสอาร์เมเจอร์พิกัด (rated current) เมื่อพิจารณาขณะลัดวงจร ดังตัวอย่างการแสดงการหา SCR ในรูปที่ 2.15 โดยค่า SCR หาได้จาก

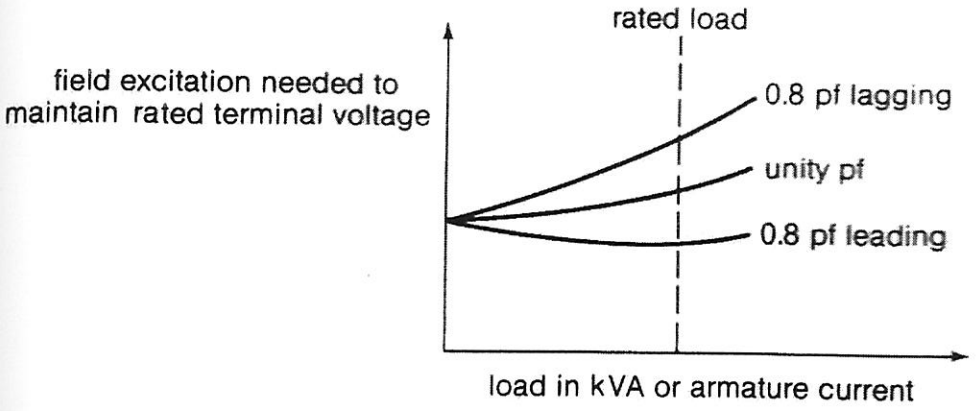
$$\text{SCR} = \frac{Of'}{Of''} \tag{2-19}$$



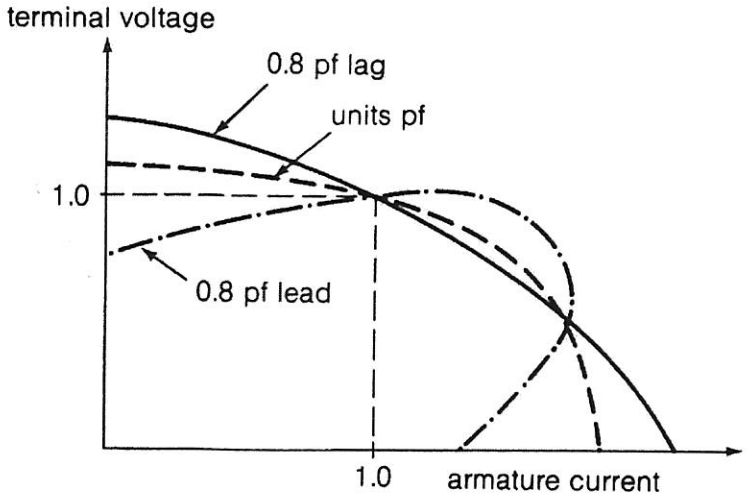
รูปที่ 2.15 การแสดงการหาค่าอัตราส่วนวงจรลัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [3]

2.6 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในสภาวะคงตัว (Steady-State)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้ว (terminal voltage) กระแสสนามกระตุ้น (filed excitation) กระแสอาร์เมเจอร์ ตัวประกอบกำลัง และประสิทธิภาพ เป็นลักษณะสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสที่จำเป็นต้องทราบในการปฏิบัติงาน ถ้าสมมติให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คงที่ค่าหนึ่ง และมีตัวประกอบกำลังคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลด กระแสสนามกระตุ้นจะปรับเปลี่ยนเพื่อทำให้แรงดันที่ขั้วของเครื่องมีค่าคงที่ ดังแสดงด้วยรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสสนามและค่ากระแสอาร์เมเจอร์ที่รักษาแรงดันที่ขั้วให้มีค่าคงที่ในแต่ละเส้นนั้นๆ หรืออาจเรียกกราฟนี้ว่า เส้นโค้งคุมค่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผสม (compounding curve) ส่วนรูปที่ 2.17 เป็นการแสดงเส้นโค้งคุณลักษณะแรงดัน-กระแส (volt-ampere) เมื่อกระแสสนามมีค่าคงที่ในแต่ละเส้นนั้นๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส



รูปที่ 2.16 คุณลักษณะของเส้นโค้งคุมค่าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผสม [7]



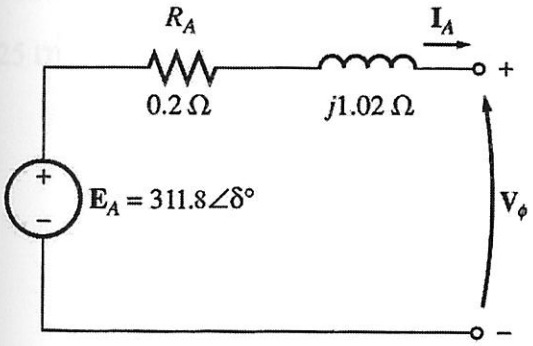
รูปที่ 2.17 คุณลักษณะแรงดัน-กระแสเมื่อกระแสสนามคงที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [7]

<u>ตัวอย่างที่ 2.1</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 200 kVA, 480 V, 50 Hz ต่อแบบ Y ดำเนินการทดสอบที่กระแสสนามค่าพิกัด 5 A และผลการทดสอบที่ได้เป็นดังนี้

- $V_{T,OC}$ ที่พิกัด I_F วัดได้ 540 V
- $I_{L,SC}$ ที่พิกัด I_F วัดได้ 300 A
- เมื่อป้อนแรงดันไฟตรง 10 V เข้าที่ขั้วทั้งสอง วัดกระแสได้ 25 A

จงหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์และค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ พร้อมแสดงวงจรสมมูล

Sol^{n}



ตัวอย่างที่ 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 250 kVA, 660 V, 60 Hz ต่อแบบ Y มีค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.10 Ω และค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ 1.40 Ω จงหาการคุมค่าแรงดัน (VR) เมื่อจ่ายโหลดมีตัวประกอบกำลัง 0.866 ล้าหลัง

Sol^{n}

ตัวอย่างที่ 2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 500 kVA, 2300 V จงหาการคุมค่าแรงดัน (VR) เมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดที่ตัวประกอบกำลัง 0.866 ล้าหลัง จากผลที่ได้จากการทดสอบดังนี้

- DC resistance test: $V_{L\text{-}L} = 8$ V, $I_L = 10$ A
- Open-circuit test: $I_f = 25$ A, $V_{L\text{-}L} = 1408$ V
- Short-circuit test: $I_f = 25$ A, $I_{SC} = 126$ A = rated full-load current

กำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อแบบ Y และค่าความต้านทานประสิทธิผลของอาร์เมเจอร์มีค่าเป็น 1.25 เท่า ของความต้านทานที่วัดได้

Sol^{n}

ตัวอย่างที่ 2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 2000 kVA, 2300 V มีค่าความต้านทานกระแสตรงของอาร์เมเจอร์ระหว่างขั้วเท่ากับ 0.032 Ω ค่ากระแสสนาม 32 A จากแหล่งจ่ายไฟตรง 250 V โดยมีค่ากำลังงานสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลมเป็น 12.8 kW และกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กรวมทั้งกำลังงานสูญเสียสเตรย์เป็น 10.6 kW จงคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะโหลดเต็มพิกัดที่ตัวประกอบกำลัง 0.80 ล้าหลัง ซึ่งกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อแบบ Y และค่าความต้านทานประสิทธิผลของอาร์เมเจอร์มีค่าเป็น 1.25 เท่า ของความต้านทานกระแสตรง

Sol^{n}

ตัวอย่างที่ 2.5 การทดสอบเครื่องจักรกลซิงโครนัสขนาด 45 kVA, 220 V, 60 Hz, ต่อแบบ Y, 6 ขั้ว ผลที่ได้เป็นดังนี้

- จาก open-circuit characteristic: แรงดันระหว่างคู่สาย = 220 V, กระแสสนาม = 2.84 A
- จาก air-gap line: แรงดันระหว่างคู่สาย = 202 V, กระแสสนาม = 2.20 A
- จาก short-circuit characteristic

กระแสอาร์เมเจอร์ (A)	118	152
กระแสสนาม (A)	2.20	2.84

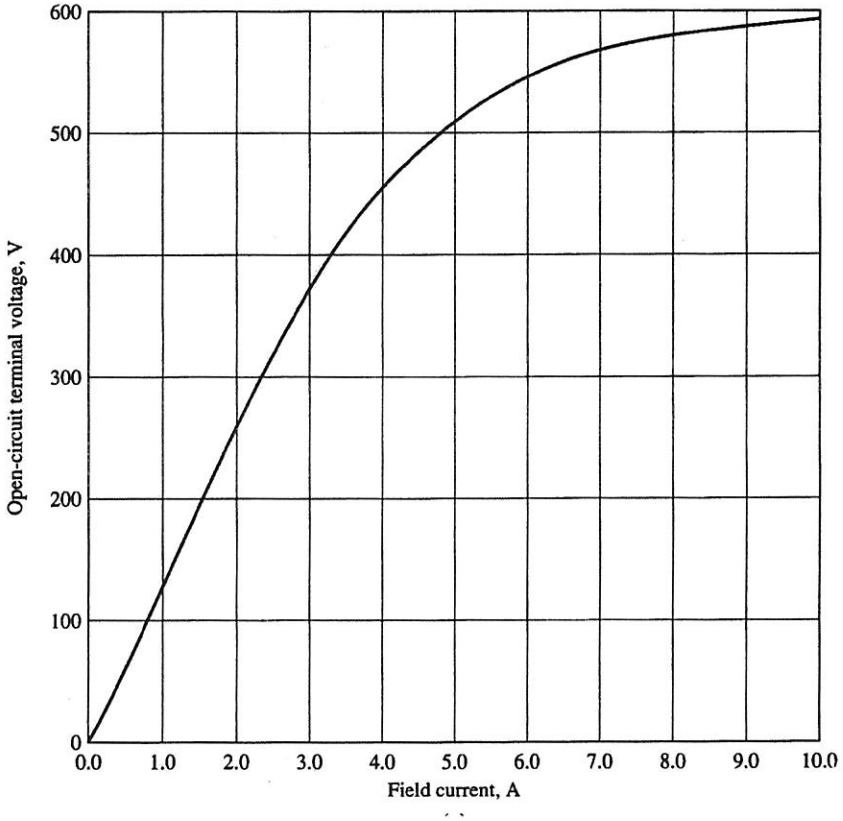
จงคำนวณหาค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์จากผลเมื่อไม่มีการอิ่มตัว (unsaturated) และเมื่อมีการอิ่มตัว (saturated) ที่แรงดันพิกัดตามลำดับ โดยแสดงเป็นค่าโอหม์ต่อเฟสและค่าต่อหน่วย (per unit) ซึ่งมีพิกัดของเครื่องเป็นค่าฐาน พร้อมทั้งหาค่าอัตราส่วนวงจรลัด (SCR) ของเครื่อง

Sol^{n}

1) พิจารณาซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เมื่อไม่มีการอิ่มตัว (unsaturated)

2) พิจารณาซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เมื่อมีการอิ่มตัว (saturated)

ตัวอย่างที่ 2.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 480 V, 60 Hz, ต่อแบบ Δ, 4 ขั้ว มี OCC แสดงได้ดังรูป มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ 0.1 Ω และค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ 0.015 Ω ที่โหลดเต็มพิกัด (full-load) เครื่องจักรจ่าย 1200 A ที่ 0.8 PF lagging โดยมีค่ากำลังงานสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลมเป็น 40 kW และกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก 30 kW ละทิ้งกำลังงานสูญเสียในวงจรสนาม จงหา



(a) ความเร็วในการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(b) กระแสสนามที่ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว ในขณะไร้โหลดมีค่าเท่ากับ 480 V

(c) กระแสสนามที่ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วยังคงรักษาค่าไว้เท่ากับ 480 V เมื่อจ่ายโหลด 1200 A ที่ 0.8 PF lagging พร้อมแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรม

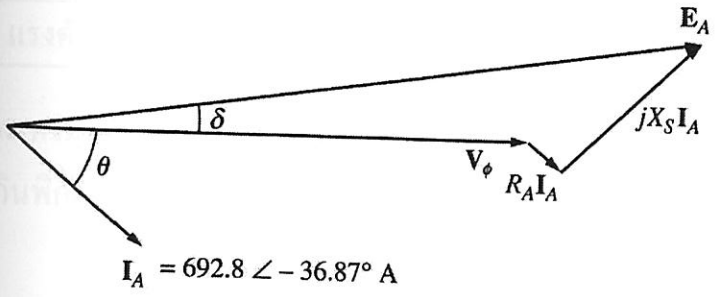
(d) กำลังงานที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายออกไป กำลังงานของตัวต้นกำลัง และประสิทธิภาพ

(e) ถ้าปลดโหลดออกทันที จะเกิดอะไรขึ้นกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว

(f) กระแสสนามที่ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วยังคงรักษาค่าไว้เท่ากับ 480 V เมื่อจ่ายโหลด 1200 A ที่ 0.8 PF leading

Sol^{n}

พร้อมเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังนี้



<u>ตัวอย่างที่ 2.7</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 1500 kVA, 5500 V, 60 Hz, ต่อแบบ Y มีค่าความต้านทานประสิทธิผลของอาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.36 Ω ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 8.53 Ω และมี OCC แสดงได้ดังตาราง

กระแสสนาม (A)	150	250	350	400
แรงดันที่ขั้วระหว่างสาย (V)	5100	6500	7100	7300

จงคำนวณหามุมกำลัง (power angle: δ) ค่ากระแสนาม และการคุมค่าแรงดัน (VR) เมื่อเครื่องทำงานเกินพิกัด (over load) 20% ที่แรงดันพิกัด และที่ตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง

<u>Sol^{n}</u>

ตัวอย่างที่ 2.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 480 V, 50 Hz, ต่อแบบ Y, 6 ขั้ว มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ต่อเฟส 1.0 Ω กระแสอาร์เมเจอร์ที่โหลดเต็มพิกัดมีค่าเป็น 60 A ที่ 1.0 PF โดยมีค่ากำลังงานสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลมเป็น 1.5 kW และกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก 1.0 kW ไม่คิดความต้านทานอาร์เมเจอร์ จึงไม่ปรากฏกำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดง กระแสสนามถูกปรับเพื่อทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วเป็น 480 V ที่สภาวะไร้โหลด, จงหา

(a) ความเร็วในการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

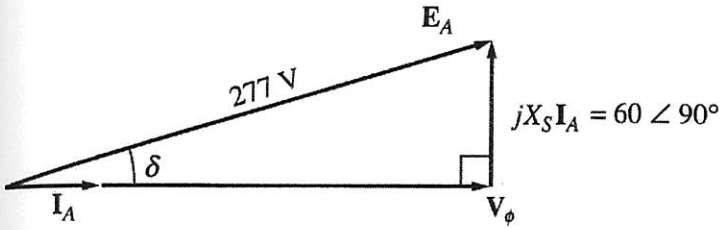
(b) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วเมื่อจ่ายโหลดที่พิกัด

(c) ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(d) แรงบิดที่เพลาของตัวต้นกำลังที่โหลดเต็มพิกัด และแรงบิดเหนี่ยวนำ

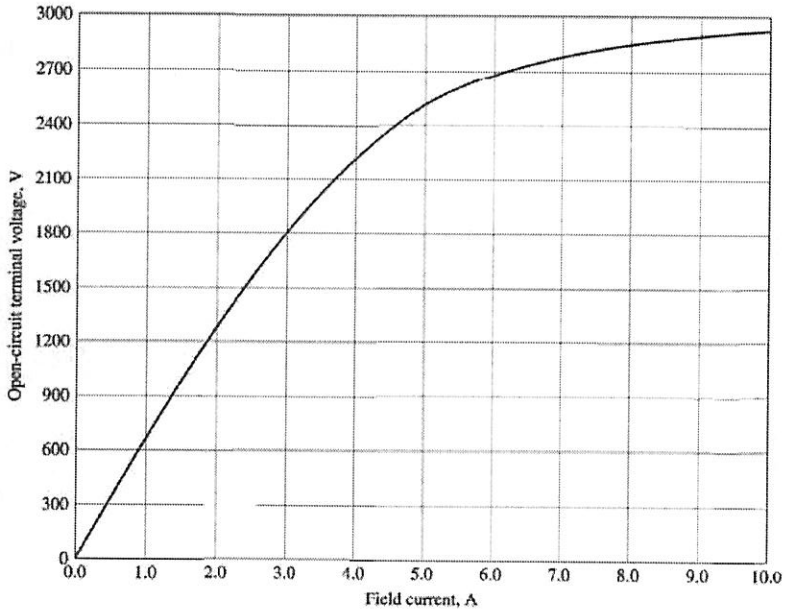
(e) ค่าการคุมค่าแรงดัน (VR)

Sol^{n}


$\mathbf{E}_A$
277 V
$jX_S\mathbf{I}_A = 60 \angle 90°$
δ
$\mathbf{I}_A$
$\mathbf{V}_\phi$

2.7 แบบฝึกหัดท้ายบท

2.1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 2300 V, 1000 kVA, 0.8 PF lagging, 60 Hz, 2 ขั้ว ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 1.1 Ω และค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.15 Ω ที่ความถี่ 60 Hz กำลังงานสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลมมีค่า 24 kW และกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กมีค่า 18 kW กราฟคุณลักษณะเมื่อเปิดวงจร (OCC) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงได้ดังรูป



(a) จงหากระแสสนามที่ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า V_T = 2300 V เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในสภาวะไร้โหลด (Ans : 4.25 A)

(b) จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่พิกัด (Ans : 1537∠7.4° V)

(c) จงหากระแสสนามที่ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า V_T = 2300 V เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่พิกัด (Ans : 5.9 A)

(d) จงหากำลังงานและแรงบิดของตัวต้นกำลังที่จ่ายให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Ans : P_{in} = 870.4 kW, τ_{app} = 2.31 kN·m)

(e) จงหาการคุมค่าแรงดัน (VR) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Ans : 15.7%)

(f) จงหาการคุมค่าแรงดัน (VR) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าทำงานที่โหลดเต็มพิกัด ตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า (Ans : -8.4%)

(g) จงหาการคุมค่าแรงดัน (VR) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถ้าทำงานที่โหลดเต็มพิกัด ตัวประกอบกำลัง 1.0 (Ans : 4.9%)

2.2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 13.8 kV, 10 MVA, 0.8 PF lagging, 60 Hz, 2 ขั้ว ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 12 Ω และค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์เท่ากับ 1.5 Ω

(a) จงหา E_A เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่พิกัด (Ans : 12,040 V)

(b) จงหามุมแรงบิด (torque angle) เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่พิกัด (Ans : 17.6°)

(c) ถ้ากระแสสนามมีค่าคงที่ จงหากำลังงานขาออกสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Ans : 24 MW)

2.3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 100 MVA, 12.5 kV, 0.85 PF lagging, 50 Hz, 2 ขั้ว ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ต่อหน่วยเท่ากับ 1.1 และค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ต่อหน่วยเท่ากับ 0.012

(a) จงหาซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ และความต้านทานอาร์เมเจอร์ในหน่วยโอหม์ (Ans : $X_S = 1.716\Omega$, $R_A = 0.0187\Omega$)

(b) จงหา E_A เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่พิกัด พร้อมทั้งค่ามุมแรงบิด (Ans : E_A = 13,590 V, δ=27.6°)

(c) เมื่อละทิ้งกำลังงานสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จงหาแรงบิดของตัวต้นกำลังที่เพลา เมื่อเครื่องจักรทำงานที่โหลดเต็มพิกัด (Ans : τ_{shaft} = 270,000 N·m)

2.4) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส ต่อแบบ Y พิกัด 120 MVA, 13.2 kV, 0.8 PF lagging, 60 Hz มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 0.9 Ω ละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ จงหาการคุมค่าแรงดัน (VR) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Ans : 45.9%)

2.5) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส ต่อแบบ Y พิกัด 25 MVA, 13.8 kV, 2 ขั้ว 60 Hz ผลการทดสอบในขณะเปิดวงจร (open-circuit test) และค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าบริเวณช่องอากาศ (air-gap) แสดงได้ดังนี้

Open-circuit test					
Field current, A	320	365	380	475	570
Line voltage, kV	13.0	13.8	14.1	15.2	16.0
Extrapolated air-gap voltage, kV	15.4	17.5	18.3	22.8	27.4

และผลการทดสอบในขณะลัดวงจร (short-circuit test) แสดงได้ดังนี้

Short-circuit test					
Field current, A	320	365	380	475	570
Armature current, A	1040	1190	1240	1550	1885

เมื่อความต้านทานอาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับ 0.24 Ω

(a) จงหาซิงโครนัสรีแอกแตนซ์จากผลเมื่อไม่มีการอิ่มตัว (unsaturated) ทั้งค่าในหน่วยโอหม์และค่าต่อหน่วย (Ans : 8.52 Ω, 1.12 p.u.)

(b) จงหาซิงโครนัสรีแอกแตนซ์โดยประมาณจากผลเมื่อมีการอิ่มตัว (saturated) ที่กระแสสนาม 380 A ทั้งค่าในหน่วยโอหม์และค่าต่อหน่วย (Ans : 6.57 Ω, 0.862 p.u.)

(c) จงหาซิงโครนัสรีแอกแตนซ์โดยประมาณจากผลเมื่อมีการอิ่มตัว (saturated) ที่กระแสสนาม 475 A ทั้งค่าในหน่วยโอหม์และค่าต่อหน่วย (Ans : 5.66 Ω, 0.743 p.u.)

(d) จงหาค่าอัตราส่วนวงจรลัด (SCR) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Ans : 1.14)

2.6) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 20 MVA, 12.2 kV, 0.8 PF lagging ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ต่อหน่วยเท่ากับ 1.1 ละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์

(a) จงหาซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในหน่วยโอหม์ (Ans : 8.18 Ω)

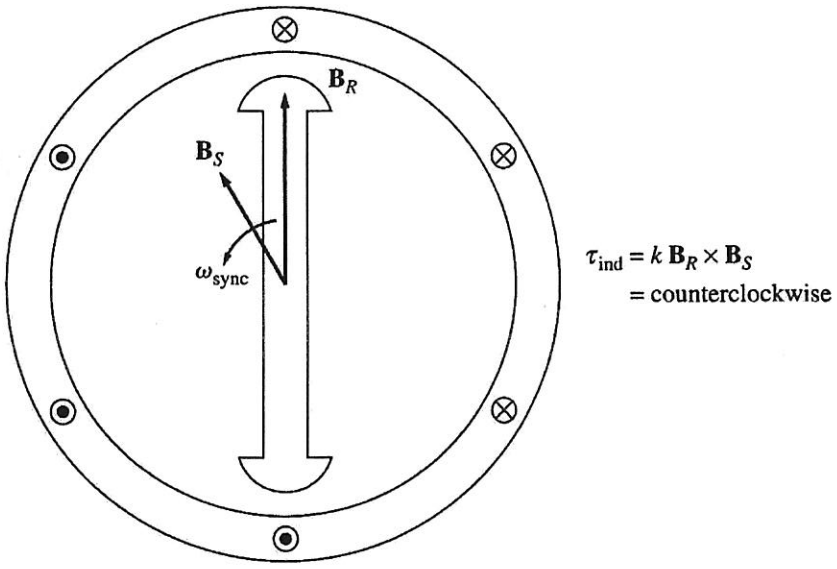
(b) จงหาค่า $\mathbf{E}_A$ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่พิกัด (Ans : 13,230∠27.9° V)

(c) จงหาค่า $\mathbf{I}_A$ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่พิกัด (Ans : $946\angle -36.87°$ A)

(d) ตอนเริ่มต้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่พิกัด ถ้า $\mathbf{E}_A$ ลดลง 5% จงหา $\mathbf{I}_A$ ค่าใหม่ (Ans : $894\angle -32.2°$ A)

บทที่ 3
มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส
(Synchronous Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส (synchronous motor) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยกระแสไฟตรงที่จ่ายให้ขดลวดสนามที่โรเตอร์ (I_F) จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ขึ้นที่โรเตอร์ ($\mathbf{B}_R$) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสที่มี 2 ขั้ว ส่วนการป้อนไฟกระแสสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามชุด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (rotating magnetic field) ขึ้นที่สเตเตอร์ ($\mathbf{B}_S$) ดังได้เคยกล่าวรายละเอียดของการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนไว้แล้วในหัวข้อที่ 1.3 ที่ผ่านมา ซึ่งเมื่อเกิดสนามแม่เหล็กทั้งสองขึ้นในเครื่องจักร ($\mathbf{B}_R$ และ $\mathbf{B}_S$) จะทำให้เกิดแรงบิดเหนี่ยวนำขึ้น ส่งผลให้โรเตอร์หมุนได้ด้วยความเร็วซิงโครนัส ($n_m = n_s$) ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นในสเตเตอร์



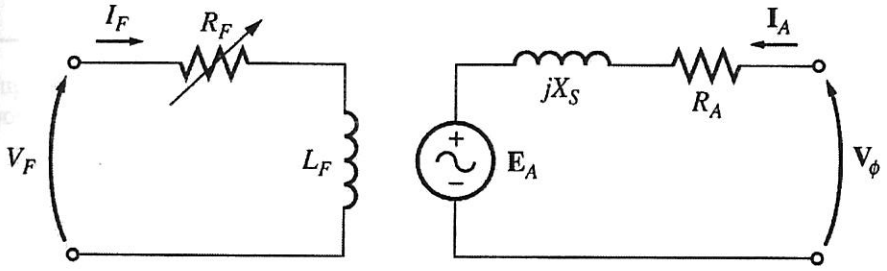
รูปที่ 3.1 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสที่มี 2 ขั้ว [2]

3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสและเฟเซอร์ไดอะแกรม

การอธิบายคุณลักษณะต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสในบทนี้ทั้งหมด จะกล่าวถึงเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีโรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (nonsalient pole หรือ cylindrical rotor) เท่านั้น ซึ่งฟลักซ์ในช่องอากาศจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่วนผลของมอเตอร์

ไฟฟ้าที่ใช้โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) ซึ่งฟลักซ์ในช่องอากาศกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ จะได้รับการกล่าวถึงในบทถัดไป

รูปที่ 3.2 เป็นการแสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสต่อเฟส ซึ่งมีลักษณะเหมือนกันกับวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ทุกประการ จะต่างกันแต่เพียงทิศทางในการไหลของกระแสอาร์เมเจอร์ $\mathbf{I}_A$ เท่านั้น ซึ่งจะมีทิศทางที่ตรงกันข้าม โดยเมื่อพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้า กระแสอาร์เมเจอร์จะไหลออกจาก $\mathbf{V}_\phi$ เข้าสู่ $\mathbf{E}_A$ (ถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสอาร์เมเจอร์จะไหลออกจาก $\mathbf{E}_A$ เข้าสู่ $\mathbf{V}_\phi$) จึงแสดงแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสต่อเฟสได้ดังสมการที่ (3-1) พร้อมเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์เมื่อจ่ายโหลดที่มี PF นำหน้า และ PF ล้าหลัง ได้ดังรูปที่ 3.3 (a) และ 3.3 (b) ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าในกรณีเมื่อพิจารณามอเตอร์ เวกเตอร์ผลลัพธ์จะไปบรรจบกันที่ $\mathbf{V}_\phi$ ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว $\mathbf{V}_T$ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ จะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อของขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส โดยสามารถต่อเป็นแบบ Y หรือ Δ ได้ อย่างใดอย่างหนึ่ง



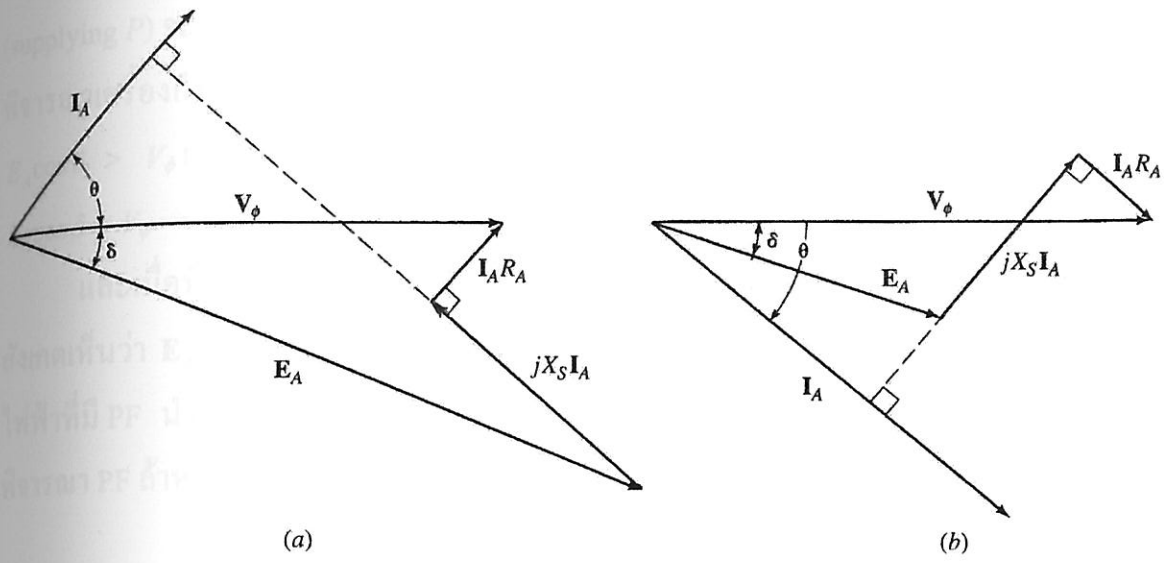
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสต่อเฟส [2]

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A + R_A\mathbf{I}_A + jX_S\mathbf{I}_A$$

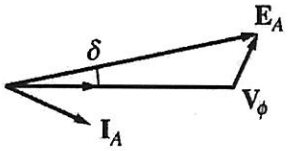
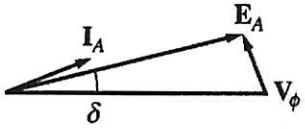
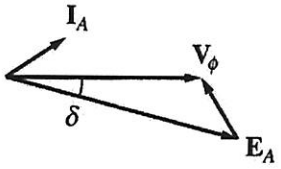
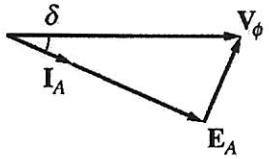
หรือ

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi - R_A\mathbf{I}_A - jX_S\mathbf{I}_A \qquad (3\text{-}1)$$

ส่วนรูปที่ 3.4 เป็นการแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เคยแสดงผ่านมาแล้วในบทที่ 2 เปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งเฟเซอร์ไดอะแกรมที่แสดงนี้ ได้ละทิ้งค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (R_A)



รูปที่ 3.3 เฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ซิงโครนัสที่มี PF นำหน้าและล้าหลัง ตามลำดับ [6]

	Supply reactive power Q $E_A \cos\delta > V_\phi$	Consume reactive power Q $E_A \cos\delta < V_\phi$
Supply power P Generator $\mathbf{E}_A$ leads $\mathbf{V}_\phi$		
Consume power P Motor $\mathbf{E}_A$ lags $\mathbf{V}_\phi$		

รูปที่ 3.4 เฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส [2]

จากรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง (supplying P) จะสังเกตเห็นว่า $\mathbf{E}_A$ ที่ปรากฏจะมีมุมนำหน้า $\mathbf{V}_\phi$ เสมอ (มุม δ เป็นค่าบวก) โดยถ้าพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มี PF ล้าหลัง ซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (supplying Q) จะได้ $E_A\cos\delta > V_\phi$ แต่ถ้าพิจารณา PF นำหน้า ซึ่งรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (consuming Q) จะได้ $E_A\cos\delta < V_\phi$

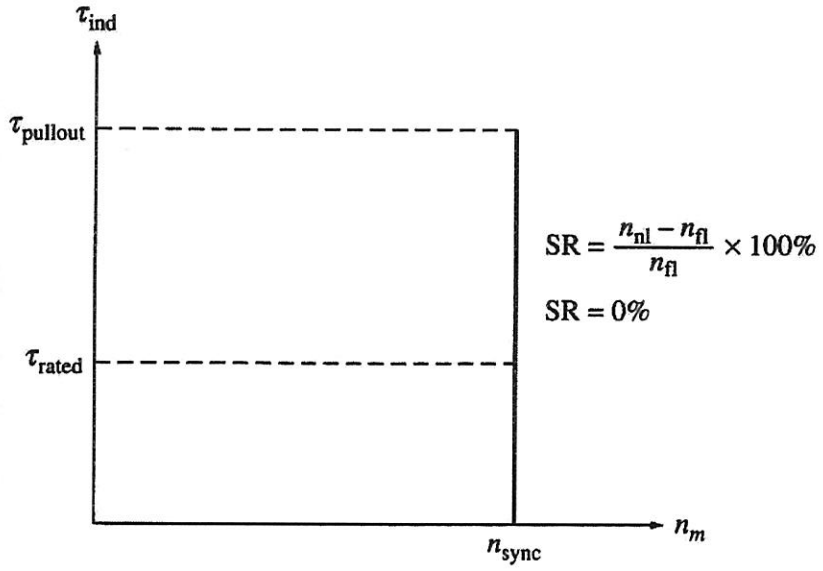
และเมื่อพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งรับกำลังไฟฟ้าจริง (consuming P) จะสังเกตเห็นว่า $\mathbf{E}_A$ ที่ปรากฏจะมีมุมล้าหลัง $\mathbf{V}_\phi$ เสมอ (มุม δ เป็นค่าลบ) โดยถ้าพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าที่มี PF นำหน้า ซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (supplying Q) จะได้ $E_A\cos\delta > V_\phi$ แต่ถ้าพิจารณา PF ล้าหลัง ซึ่งรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (consuming Q) จะได้ $E_A\cos\delta < V_\phi$

3.2 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสในสภาวะคงตัว (Steady-State)

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสภายใต้โหลดที่มีการเปลี่ยนแปลง และผลของการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสนาม I_F ที่มีต่อมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา จะได้ละทิ้งค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยคิดว่า $X_S >> R_A$

3.2.1 เส้นโค้งคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็ว (Torque-Speed Characteristic Curve)

มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสในสภาวะคงตัวเมื่อพิจารณาในขณะมีโหลดหรือไร้โหลด จะหมุนด้วยความเร็วคงที่เท่ากับความเร็วซิงโครนัสเสมอ ทั้งนี้เพราะมอเตอร์ไฟฟ้าจะรับกำลังไฟฟ้ามาจากบัสอนันต์ (infinite bus) ซึ่งมีความถี่ทางไฟฟ้าและแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าคงที่ จึงส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์ในสภาวะคงตัวมีค่าคงที่ด้วย ถึงแม้ว่าโหลดของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม รูปที่ 3.5 เป็นการแสดงกราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ความเร็วของมอเตอร์ในสภาวะคงตัวจะหมุนด้วยความเร็วคงที่ที่ความเร็วซิงโครนัส (n_{sync}) ทั้งในขณะที่ไม่มีโหลด ($\tau_{\text{ind}} = 0$) ในขณะทำงานที่โหลดพิกัด (τ_{rated}) ขึ้นไปจนถึงการทำงานเกินพิกัดที่แรงบิดสูงสุด (maximum torque: τ_{max}) หรือแรงบิดผละออก (pullout torque: τ_{pullout}) ที่มอเตอร์จะสามารถทำงานได้ ดังนั้นจึงได้การคุมค่าความเร็ว (speed regulation: SR) ของมอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 3.5 คุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส [2]

จากสมการแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสที่ผ่านมา

$$\tau_{ind} = kB_R B_{net} \sin\delta$$

หรือ

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A \sin\delta}{\omega_m X_S} \tag{3-2}$$

แรงบิดสูงสุดหรือแรงบิดผละออกจะเกิดขึ้นเมื่อมุม $\delta = 90°$ ซึ่งโดยปกติแล้วแรงบิดสูงสุดจะมีค่าประมาณ 3 เท่าของแรงบิดพิกัด

$$\tau_{max} = kB_R B_{net}$$

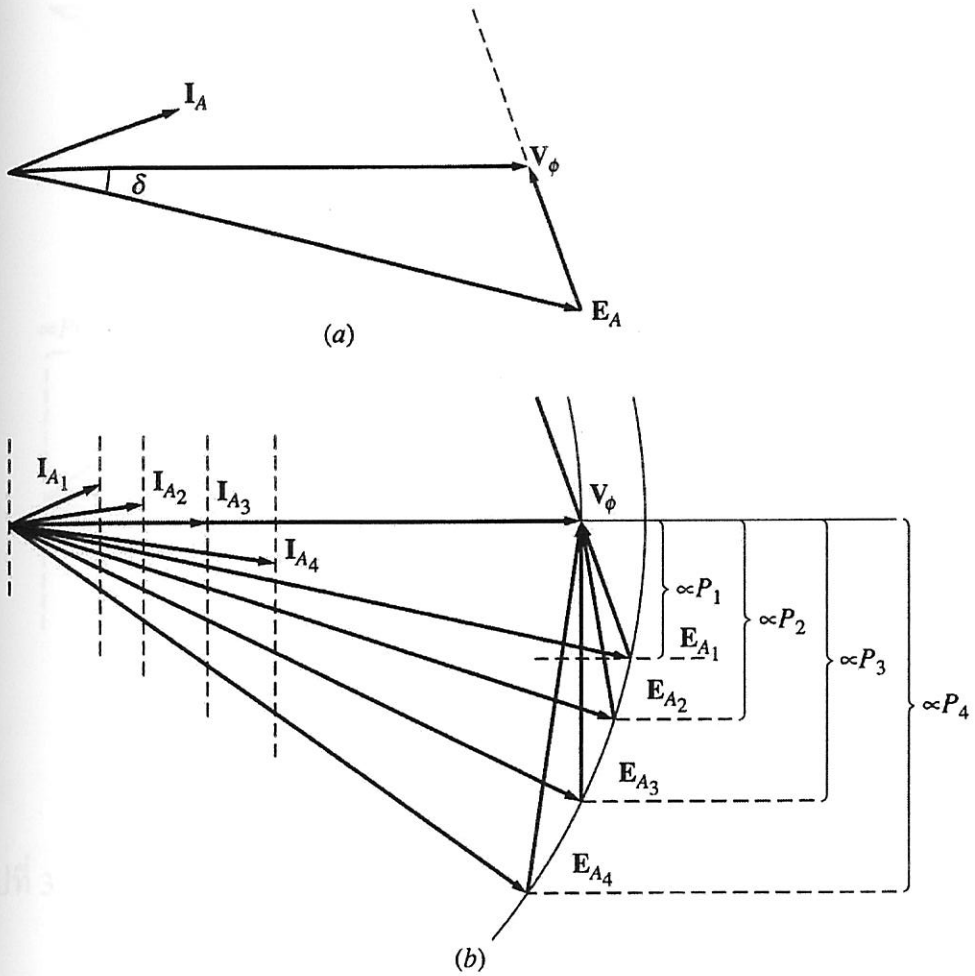
หรือ

$$\tau_{max} = \frac{3V_\phi E_A}{\omega_m X_S} \tag{3-3}$$

3.2.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส

ในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสแล้วโหลดเกิดมีการเปลี่ยนแปลง ค่าแรงบิดเหนี่ยวนำ τ_{ind} ในมอเตอร์จะมีการปรับแปลงเพื่อรักษาให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสต่อไป โดยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ด้วยตัวอย่างการพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสที่เริ่มต้นจากการจ่ายโหลดที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า (PF leading) ดังแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมด้วยรูปที่ 3.6 (a)

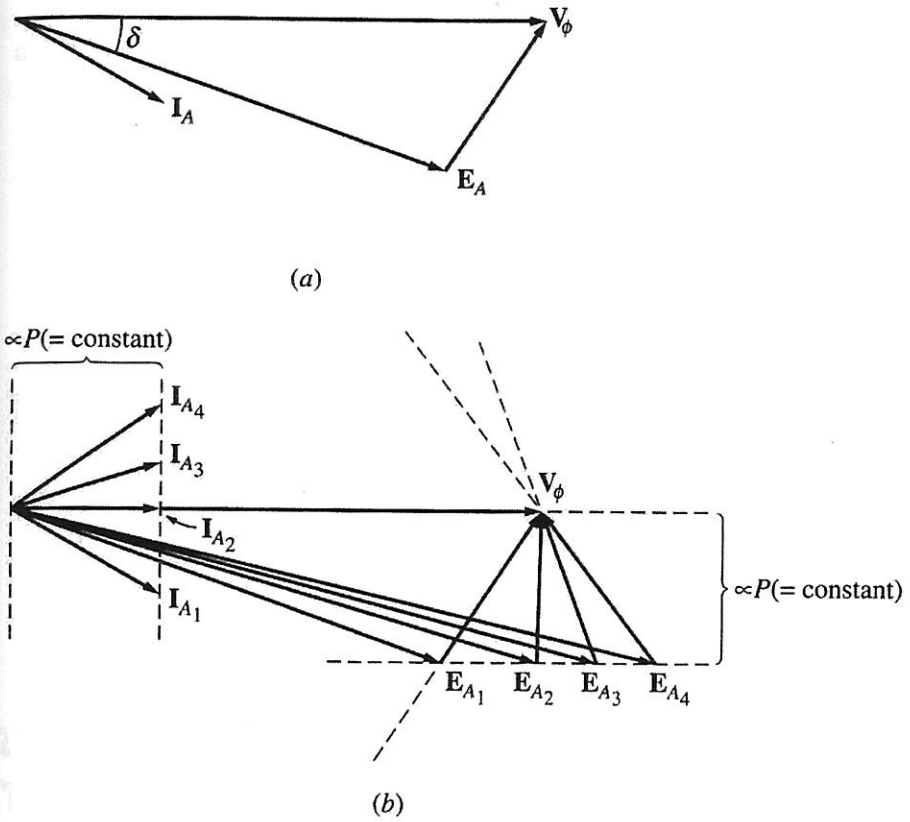
ถ้ามอเตอร์มีโหลดมากระทำที่เพลามากขึ้น โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วลดลงน้อยกว่าความเร็วตั้งต้นเล็กน้อย จึงส่งผลให้มุมแรงบิด (torque angle) δ มีมุมกว้างขึ้น ดังนั้นแรงบิดเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่สูงขึ้นจนเท่ากับความเร็วซิงโครนัสที่ตั้งต้นด้วยความรวดเร็ว ซึ่งในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงและพิจารณาที่สภาวะคงตัว *ขนาดของ $\mathbf{E}_A$ จะมีค่าคงที่* เนื่องจากกระแสสนามและความเร็วในการหมุนไม่มีการเปลี่ยนแปลง กำลังไฟฟ้า P (แปรผันกับ $E_A \sin\delta$) จะมีค่าสูงขึ้นตามโหลดที่มากขึ้น ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.6 (b) ปริมาณ $jX_S\mathbf{I}_A$ ที่ลากจาก $\mathbf{E}_A$ ไป $\mathbf{V}_\phi$ ก็มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น $\mathbf{I}_A$ จึงต้องมีค่าสูงขึ้นด้วย และจากรูปที่ 3.6 (b) ยังสังเกตเห็นว่า มุมของตัวประกอบกำลัง θ จะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยเริ่มเปลี่ยนตั้งต้นจากตัวประกอบกำลังที่มีมุมนำหน้าไปเป็นตัวประกอบกำลังที่มีมุมล้าหลังมากขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 3.6 ผลจากการเปลี่ยนแปลงโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส [2]

3.2.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส

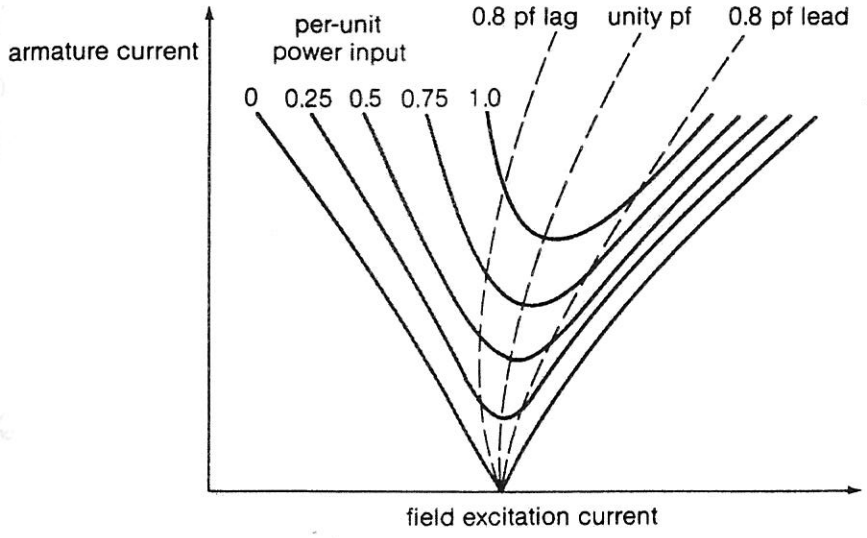
ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส สามารถอธิบายได้ด้วยตัวอย่างการพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสที่เริ่มต้นจากการจ่ายโหลดที่ตัวประกอบกำลังล้าหลัง (PF lagging) ดังแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมด้วยรูปที่ 3.7 (a) ถ้าทำการเพิ่มกระแสสนาม I_F ให้แก่มอเตอร์ ขนาดของ $\mathbf{E}_A$ จะมีค่าสูงขึ้น แต่จะไม่ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) (แปรผันกับ $E_A \sin\delta$ หรือ $I_A \cos\theta$) ที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสนามจะไม่มีผลต่อความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ และโหลดก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ประกอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วก็มีค่าคงที่ ดังนั้นในขณะที่กระแสสนามมีการเปลี่ยนแปลงและพิจารณาที่สภาวะคงตัว *ค่ากำลังไฟฟ้า P จะมีค่าคงที่* ดังแสดงด้วยรูปที่ 3.7 (b)



รูปที่ 3.7 ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสนามของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส [2]

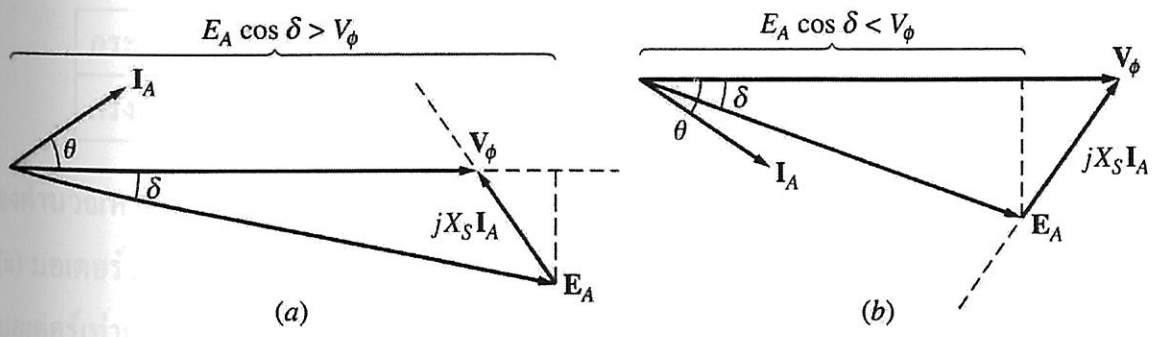
จากรูปที่ 3.7 (b) จะสังเกตเห็นว่า $\mathbf{E}_A$ มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ $\mathbf{I}_A$ จะมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้ง โดยที่ $\mathbf{E}_A$ ค่าต่ำๆ ตัวประกอบกำลังจะล้าหลัง มอเตอร์เป็นโหลดประเภทตัวเหนี่ยวนำ (inductive load) จึงรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (consuming Q) ส่วนที่ $\mathbf{E}_A$ ค่าสูงๆ ตัวประกอบกำลังจะนำหน้า มอเตอร์เป็นโหลดประเภทตัวเก็บประจุ (capacitive load) จึงจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (supplying Q)

ส่วนรูปที่ 3.8 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_A เทียบกับ I_F ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งถูกเรียกว่าเส้นโค้งตัววี (V curve) ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะเส้นโค้งมีรูปร่างคล้ายตัววี ตัววีที่เรียงซ้อนกันนั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างของระดับกำลังไฟฟ้า P ที่เกิดขึ้น ถ้าพิจารณาในแต่ละเส้นโค้ง (แต่ละ per-unit power input) จะเห็นว่า I_A มีค่าต่ำที่สุดที่ตัวประกอบกำลังเป็นหนึ่ง (unity pf) และย่านของค่า I_F จากค่าศูนย์ไปจนถึงค่า I_F ที่ให้ I_A ต่ำที่สุดจะเป็นย่านที่ตัวประกอบกำลังล้าหลัง (PF lagging) ส่วนย่านของค่า I_F จากที่ให้ I_A ต่ำที่สุดไปในทาง I_F ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นย่านที่ตัวประกอบกำลังนำหน้า (PF leading)



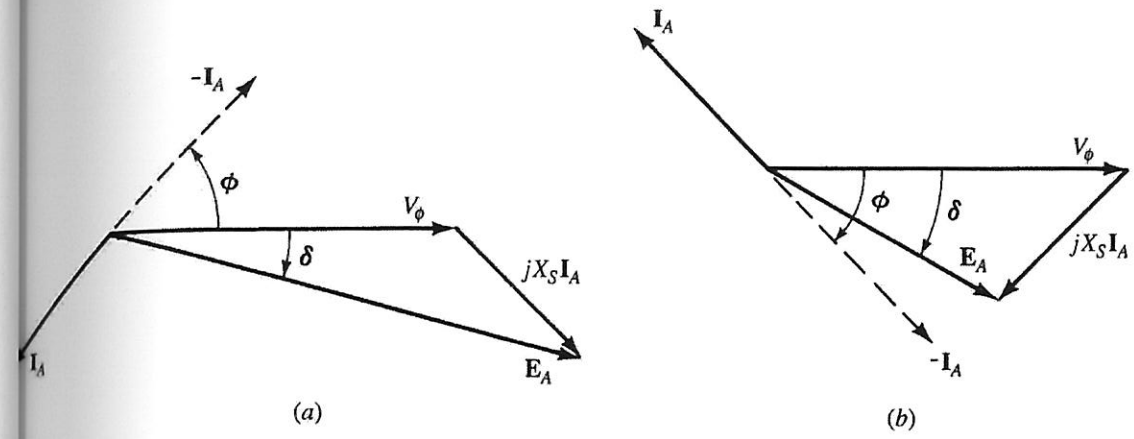
รูปที่ 3.8 เส้นโค้งตัววี (V curve) ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส [7]

จากรูปที่ 3.9 (a) เป็นการพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อ PF นำหน้า โดยเมื่อฉายเฟเซอร์ $\mathbf{E}_A$ ไปบน $\mathbf{V}_\phi$ จะได้ $E_A\cos\delta > V_\phi$ ซึ่งในกรณีนี้กระแสสนามที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะมีค่ามาก จึงอาจเรียกว่ากรณีกระตุ้นเกิน (overexcited) ส่วนรูปที่ 3.9 (b) เป็นการพิจารณาเมื่อ PF ล้าหลัง โดยเมื่อฉายเฟเซอร์ $\mathbf{E}_A$ ไปบน $\mathbf{V}_\phi$ จะได้ $E_A\cos\delta < V_\phi$ ซึ่งในกรณีนี้กระแสสนามที่ป้อนเข้ามอเตอร์จะมีค่าน้อย จึงอาจเรียกว่ากรณีกระตุ้นขาด (underexcited)



รูปที่ 3.9 เฟเซอร์ไดอะแกรมในกรณีกระตุ้นเกิน (overexcited) และกระตุ้นขาด (underexcited) ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส ตามลำดับ [2]

การเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสยังสามารถเขียนให้อยู่ในแบบเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ ซึ่งถ้าเขียนในลักษณะนี้แล้ว เวกเตอร์ผลลัพธ์จะไปรวมกันที่ $\mathbf{E}_A$ แทน ดังแสดงได้ด้วยรูปที่ 3.10



ปที่ 3.10 เฟเซอร์ไดอะแกรมในกรณีกระตุ้นเกินและกระตุ้นขาดของมอเตอร์ไฟฟ้า ตามลำดับ เมื่อแสดงในรูปแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [6]

<u>อย่างที่ 3.1</u> มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 1000 kVA, 13200 V, 60 Hz, ต่อแบบ Y มีค่าความนทานประสิทธิผลของอาร์เมเจอร์ต่อหน่วยเท่ากับ 0.0114 Ω ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ต่อวยเท่ากับ 0.418 Ω และมี OCC แสดงได้ดังตาราง

กระแสสนาม (A)	50	110	140	150
แรงดันที่ขั้วระหว่างสาย (V)	8800	15600	17250	18900

ำนวณหามุมกำลัง (power angle: δ) และค่ากระแสนาม เมื่อ

มอเตอร์รับกำลังงานเข้า 1000 kW ที่ตัวประกอบกำลัง 1.0 แรงดันของแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้เตอร์เท่ากับ 13200 V

ถ้ากระแสสนามถูกทำให้เพิ่มขึ้นจนมีตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า ในขณะที่ยังคงรับกำลังเขาเข้าและแรงดันของแหล่งจ่ายไฟค่าเดิม

Sol"

<u>ตัวอย่างที่ 3.2</u> มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 75 hp, 440 V, 900 r/min, ต่อแบบ Y มีค่าความต้านทานประสิทธิผลของอาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.15 Ω ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 2.0 Ω เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัดโหลดและมีตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า จงหา

(a) มุมแรงบิด (torque angle: δ)

(b) P_{conv}

สมมติให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพ (รวมกำลังงานสูญเสียในขดลวดสนาม) เท่ากับ 90%

<u>Sol^n</u>

ตัวอย่างที่ 3.3 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 415 V, 8 ขั้ว, 60 Hz, 900 r/min, ต่อแบบ Δ ผลของการปรับกระแสสนามกระตุ้นทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced EMF) มีค่า 520 V และมุมแรงบิด (torque angle: δ) เท่ากับ 12° ค่าซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ $Z_s = 0.5 + j4.0\ \Omega$ กำลังงานสูญเสียจากการหมุนตัวเปล่า (rotational losses) เท่ากับ 2000 W จงหา

(a) กระแสในสาย

(b) ตัวประกอบกำลัง

(c) กำลังงานขาออก

(d) ประสิทธิภาพ

(e) กำลังแรงม้า (horsepower) ที่เพลา และแรงบิด

Sol^n

ตัวอย่างที่ 3.4 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 2200 V ต่อแบบ Y ละทิ้งค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 2.6 Ω กำลังงานขาเข้ามีค่า 820 kW ในขณะที่กระแสสนามกระตุ้นให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ (counter EMF) มีค่า 2800 V จงคำนวณหา

(a) มุมแรงบิด (torque angle: δ)

(b) กระแสในสาย และตัวประกอบกำลัง

Sol^{n}

ตัวอย่างที่ 3.5 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส ต่อแบบ Y ละทิ้งค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 12 Ω มอเตอร์รับกำลังงานขาเข้า 12000 kW ที่แรงดัน 13200 V ผลของการปรับกระแสสนามทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระตุ้น (excitation voltage) มีค่า 9000 V/ϕ จงหา

(a) มุมกำลัง

(b) กระแสอาร์เมเจอร์ และตัวประกอบกำลัง

Sol^{n}

ตัวอย่างที่ 3.6 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสต่อกับแรงดันที่พิกัด ละทิ้งค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ และซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ต่อหน่วยมีค่า 0.577 จงหา

(a) ค่าโหลดสูงสุด (P_{max}) เมื่อกระแสสนามถูกปรับให้ตัวประกอบกำลังมีค่า 1.0 ที่โหลดเต็มพิกัด

(b) กระแสอาร์เมเจอร์และตัวประกอบกำลังขณะที่มอเตอร์หลุดซิงโครไนซ์

Sol^{n}

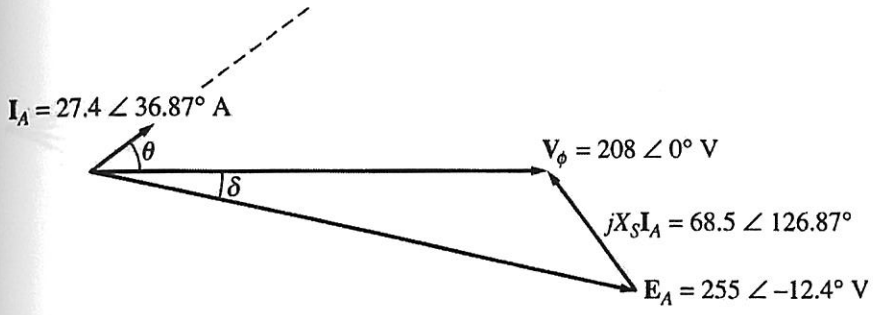
ตัวอย่างที่ 3.7 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 208 V, 45 kVA, 60 Hz, 0.8 PF leading, ต่อแบบ Δ, ละทิ้งค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ และซิงโครนัสรีแอกแตนซ์มีค่า 2.5 Ω กำลังงานสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานและแรงต้านลมเท่ากับ 1.5 kW และกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กเท่ากับ 1.0 kW ตั้งต้นจากการที่เพลาขับโหลด 15 hp และมอเตอร์มีตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า

(a) จงเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ และจงหาค่า $\mathbf{I}_A, I_L$ และ $\mathbf{E}_A$

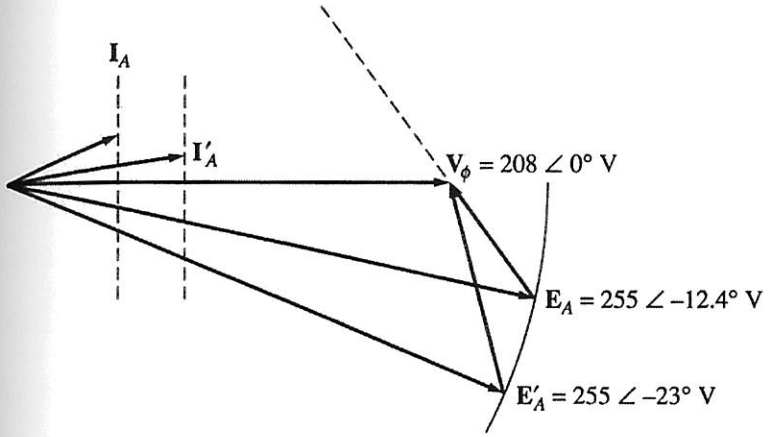
(b) สมมติให้เพลาขับโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 30 hp จงเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์พร้อมทั้งหาค่า $\mathbf{I}_A, I_L$ และ $\mathbf{E}_A$ ในขณะที่โหลดเปลี่ยน รวมทั้งตัวประกอบกำลังค่าใหม่

Sol^n

พร้อมเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ได้ดังนี้



พร้อมเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ได้ดังนี้



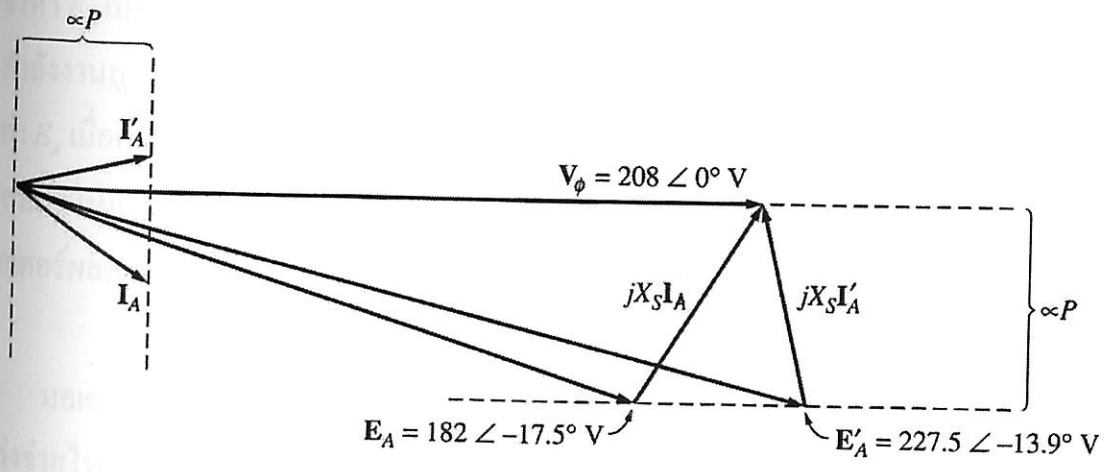
<u>ตัวอย่างที่ 3.8</u> จากตัวอย่างที่ 3.7 ถ้าตั้งต้นจากการที่เพลาขับโหลด 15 hp และมอเตอร์มีตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลัง

(a) จงหาค่า $\mathbf{I}_A$ และ $\mathbf{E}_A$

(b) ถ้าฟลักซ์ของมอเตอร์เพิ่มขึ้น 25% จงเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรม พร้อมทั้งหาค่า $\mathbf{E}_A$ และ $\mathbf{I}_A$ รวมทั้งตัวประกอบกำลังค่าใหม่

<u>Sol^n</u>

พร้อมเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ได้ดังนี้



3.3 แบบฝึกหัดท้ายบท

3.1) มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 480 V, 60 Hz, 4 ขั้ว รับกระแส 50 A จากแหล่งจ่าย ที่ตัวประกอบกำลัง 1.0 และทำงานที่โหลดเต็มพิกัด สมมติให้มอเตอร์ไม่มีกำลังงานสูญเสีย

(a) จงหาแรงบิดขาออกของมอเตอร์ (Ans : 221 N·m)

(b) จงหาขนาดของกระแสในสาย ถ้าตัวประกอบกำลังถูกปรับให้มีค่า 0.8 นำหน้า (Ans: 62.5 A)

3.2) มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 480 V, 60 Hz, 400 hp, 0.8 PF leading, 6 ขั้ว ต่อแบบ Δ มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 1.1 Ω ละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ และไม่พิจารณากำลังงานสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านลม และกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก

(a) ถ้าตอนเริ่มต้นมอเตอร์จ่ายกำลัง 400 hp ที่ 0.8 PF lagging จงหาขนาดและมุมของ $\mathbf{E}_A$ และ $\mathbf{I}_A$ (Ans : $\mathbf{E}_A = 384\angle -36.4° \text{ V}$, $\mathbf{I}_A = 259\angle -36.87° \text{ A}$)

(b) จงหาแรงบิดที่มอเตอร์ผลิตได้ พร้อมแรงบิดเหนี่ยวนำ (induced torque) สูงสุดของมอเตอร์ (Ans : $\tau_{shaft} = 2{,}375$ N·m, $\tau_{max} = 4{,}000$ N·m)

(c) ถ้า $|\mathbf{E}_A|$ เพิ่มขึ้น 15% จงหาขนาดของกระแสอาร์เมเจอร์ค่าใหม่ พร้อมทั้งตัวประกอบกำลัง (Ans : $I_A = 227$ A, PF = 0.913 lagging)

3.3) มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 480 V, 100 kW, 0.85 PF leading, 50 Hz, 6 ขั้ว ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 1.5 Ω ละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ และไม่พิจารณากำลังงานสูญเสียในขณะที่หมุนตัวเปล่า (rotational losses)

(a) จงหา E_A เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัด (Ans : 429 V)

(b) กำลังงานสูงสุดที่มอเตอร์ผลิตได้ เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัด (Ans : 238 kW)

(c) ค่า E_A เมื่อความเร็วของมอเตอร์กลายเป็น 300 rpm (Ans : 129 V)

(d) สมมติให้แรงดัน V_ϕ ที่จ่ายให้มอเตอร์ ลดลงเป็นสัดส่วนเหมือนกับ E_A จงหากำลังงานสูงสุดที่มอเตอร์ผลิตได้ เมื่อความเร็วของมอเตอร์มีค่า 300 rpm (Ans : 71.5 kW)

3.4) มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 208 V ต่อแบบ Y รับกระแส 40 A ที่ตัวประกอบกำลัง 1.0 จากแหล่งจ่ายไฟ 208 V โดยกระแสสนามมีค่า 2.7 A ค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 0.8 Ω และสมมติให้กราฟคุณลักษณะในขณะเปิดวงจร (open-circuit) มีความเป็นเชิงเส้น

(a) จงหามุมแรงบิด (torque angle) (Ans : $-14.9°$)

(b) กระแสสนามจะมีค่าเท่าไรที่ทำให้มอเตอร์ทำงานที่ 0.85 PF leading (Ans : 3.20 A)

(c) จงหามุมแรงบิดค่าใหม่ (Ans : $-12.5°$)

3.5) เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 2.0 Ω และค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.4 Ω ถ้า $\mathbf{E}_A = 460\angle -8° \text{ V}$ และ $\mathbf{V}_\phi = 480\angle 0° \text{ V}$ เครื่องจักรกลนี้จะทำหน้าที่เป็นมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าจริง P พร้อมทั้งกำลังรีแอกทีฟ Q ปริมาณเท่าใด ที่เครื่องจักรอาจรับหรืออาจจ่ายกำลังให้แก่ระบบไฟฟ้า (Ans : มอเตอร์, $P = 47.7$ kW, $Q = 8.07$ kVAR)

3.6) มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 480 V, 100 kW, 0.85 PF leading, 50 Hz, 4 ขั้ว ต่อแบบ Y ที่โหลดเต็มพิกัดจะมีประสิทธิภาพเท่ากับ 91% ค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.08 Ω และค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 1.0 Ω จงหาปริมาณต่างๆ เหล่านี้เมื่อมอเตอร์ทำงานที่โหลดเต็มพิกัด

(a) แรงบิดขาออก (Ans : 637 N·m)

(b) กำลังงานขาเข้า (Ans : 110 kW)

(c) n_m (Ans : 1500 rpm)

(d) $\mathbf{E}_A$ (Ans : $375\angle -21.8°$ V)

(e) $|\mathbf{I}_A|$ (Ans : 156 A)

(f) P_{conv} (Ans : 104.2 kW)

(g) $P_{\text{mech}}+P_{\text{core}}+P_{\text{stray}}$ (Ans : 4.2 kW)

3.7) มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส 440 V ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 1.5 Ω กระแสสนามถูกปรับให้มุมแรงบิด δ มีค่าเท่ากับ 28° เมื่อได้รับกำลังงาน 90 kW จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

(a) จงหาขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายใน $\mathbf{E}_A$ (Ans : 377 V)

(b) จงหาขนาดและมุมของกระแสอาร์เมเจอร์ พร้อมทั้งตัวประกอบกำลังในมอเตอร์ (Ans : $\mathbf{I}_A = 129\angle 24°$ A , PF = 0.914 leading)

(c) ถ้ากระแสสนามยังคงมีค่าคงที่ จงหากำลังงานสูงสุดที่มอเตอร์สามารถให้ได้ (Ans : 191.5 kW)

3.8) มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 460 V, 200 kVA, 0.80 PF leading, 400 Hz, 6 ขั้ว ต่อแบบ Y ละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ และมีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ต่อหน่วยเท่ากับ 0.50 สมมติให้มอเตอร์ไม่มีกำลังงานสูญเสีย

(a) จงหาความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ (Ans : 8,000 rpm)

(b) แรงบิดขาออก เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัด (Ans : 191 N·m)

(c) แรงเคลื่อนไฟฟ้าภายใน เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัด (Ans : $362\angle -17.1°\,\text{V}$)

(d) ถ้ากระแสสนามยังคงมีค่าคงที่ จงหากำลังงานขาออกสูงสุดของมอเตอร์ (Ans : 545 kW)

3.9) มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส 100 hp, 440 V, 0.8 PF leading ต่อแบบ Δ มีค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์เท่ากับ 0.22 Ω และค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 3.0 Ω ประสิทธิภาพเมื่อทำงานที่โหลดเต็มพิกัดมีค่า 89%

(a) จงหากำลังงานขาเข้า เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัด (Ans : 83.8 kW)

(b) กระแสในสายและกระแสเฟส เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัด (Ans : I_L = 137 A, I_ϕ = 79.4 A)

(c) กำลังรีแอกทีฟ ที่อาจถูกรับหรืออาจถูกจ่ายโดยมอเตอร์ (Ans : ถูกจ่ายโดยมอเตอร์เท่ากับ 62.9 kVAR)

(d) แรงเคลื่อนไฟฟ้าภายใน $\mathbf{E}_A$ (Ans : $603\angle -19.5°\,\text{V}$)

(e) กำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์ (stator copper losses) (Ans : 4.16 kW)

(f) P_{conv} (Ans : 79.6 kW)

(g) ถ้า E_A ลดลง 10% จงหากำลังรีแอกทีฟ ที่อาจถูกรับหรืออาจถูกจ่ายโดยมอเตอร์ (Ans : ถูกจ่ายโดยมอเตอร์เท่ากับ 28.3 kVAR)

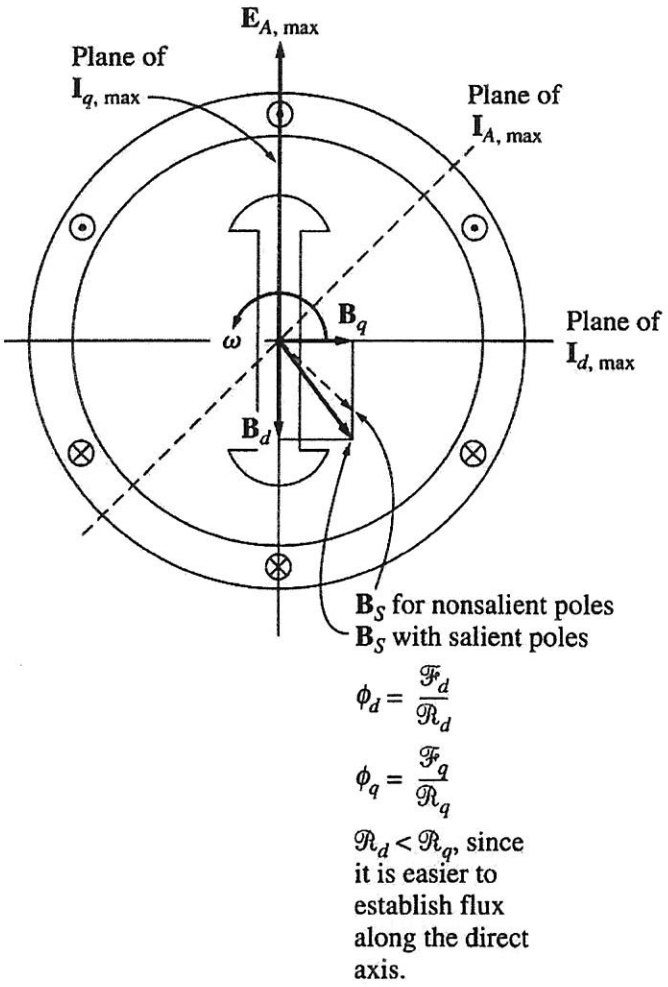
บทที่ 4
ทฤษฎีขั้วแม่เหล็กยื่นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส
(Salient-Pole Theory of Synchronous Machine)

ในบทนี้จะได้อธิบายถึง ผลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) โดยฟลักซ์ในช่องอากาศของโรเตอร์แบบนี้จะมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการพิจารณาจึงแตกต่างกับโรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (nonsalient pole) จากบทที่ผ่านมา

4.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการอธิบายเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่นโดยพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเมื่อพิจารณามอเตอร์ไฟฟ้าก็ต่างกันแต่เพียงทิศทางในการไหลของกระแสอาร์เมเจอร์ $\mathbf{I}_A$ เท่านั้น

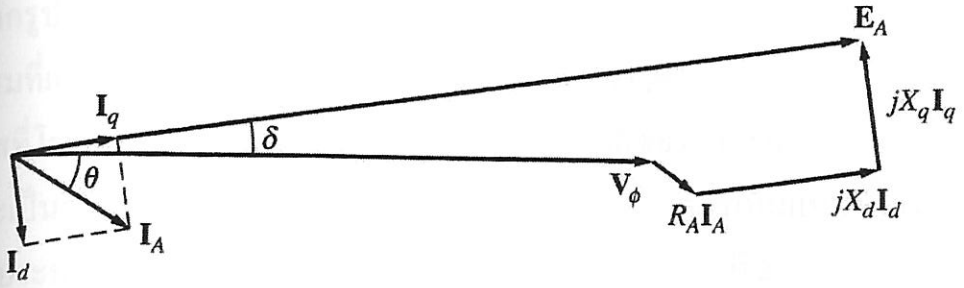
รูปที่ 4.1 เป็นการแสดงโรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่นที่มี 2 ขั้ว ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยถ้าโหลดมีตัวประกอบกำลังล้าหลัง (PF lagging) ระนาบของกระแสอาร์เมเจอร์สูงสุด $\mathbf{I}_{A,\max}$ จะตามหลังระนาบของแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในสูงสุด $\mathbf{E}_{A,\max}$ ดังแสดงได้ในรูป ในกรณีพิจารณาโรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น กระแสอาร์เมเจอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่สเตเตอร์ ($\mathbf{B}_S$) เป็นมุมล้าหลังกระแสไป 90° พอดี แต่ในกรณีที่พิจารณาโรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่น สนามแม่เหล็ก $\mathbf{B}_S$ จะไม่ล้าหลังกระแสด้วยมุม 90° ทั้งนี้เป็นผลมาจาก ฟลักซ์ในช่องอากาศของโรเตอร์แบบนี้กระจายตัวไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งช่องอากาศ โดยสนามแม่เหล็ก $\mathbf{B}_S$ จะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กตามแกนในแนวตรง (direct-axis) $\mathbf{B}_d$ และสนามแม่เหล็กตามแกนขวาง (quadrature-axis) $\mathbf{B}_q$ ดังแสดงด้วยรูป ซึ่ง $\mathbf{B}_d$ หรือ ϕ_d จะมีขนาดมากกว่า $\mathbf{B}_q$ หรือ ϕ_q ทั้งนี้เพราะค่าความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance) ตามแกนในแนวตรง $\mathcal{R}_d$ มีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานแม่เหล็กตามแกนขวาง $\mathcal{R}_q$



รูปที่ 4.1 หลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น [2]

จากที่อธิบายมาข้างต้น เนื่องจากช่องอากาศไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นโรเตอร์แบบขั้วแม่เหล็กยื่นจึงไม่สามารถพิจารณาเฉพาะซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ X_S อย่างเดียวได้ โดยจะต้องพิจารณาแบ่งเป็น 2 แกน ซึ่งประกอบด้วยซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวตรง (direct synchronous reactance: X_d) และซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวขวาง (quadrature synchronous reactance: X_q) โดย $X_q < X_d$ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่า X_q จะอยู่ระหว่าง 0.6-0.7 เท่าของค่า X_d แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อเฟสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น จึงแสดงได้ดังสมการที่ (4-1) และเขียนเฟเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.2

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_\phi + R_A\mathbf{I}_A + jX_d\mathbf{I}_d + jX_q\mathbf{I}_q \qquad (4\text{-}1)$$



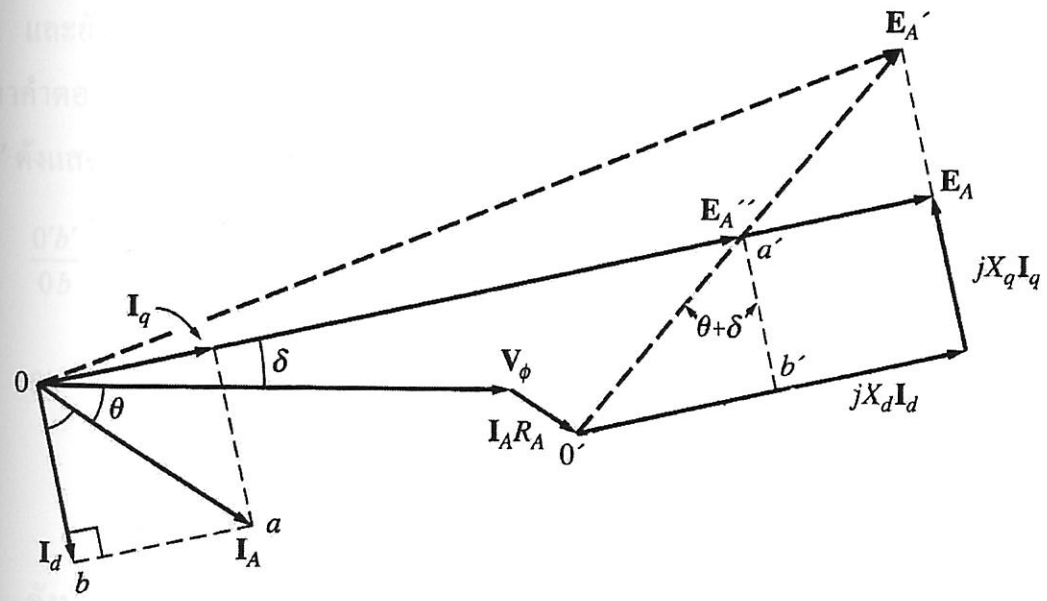
รูปที่ 4.2 เฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กยื่น [2]

จากรูปที่ 4.2 จึงได้ความสัมพันธ์ของกระแสตามแกนในแนวตรง I_d และกระแสตามแกนขวาง I_q เป็น

$$I_d = I_A \sin(\theta + \delta) \tag{4-2}$$

$$I_q = I_A \cos(\theta + \delta) \tag{4-3}$$

ซึ่งจากสมการที่ (4-2) และ (4-3) จะหาขนาด I_d และ I_q เพื่อนำไปแทนในสมการที่ (4-1) ได้นั้น จะต้องทราบมุมกำลัง (power angle) δ เสียก่อน ซึ่งเราสามารถทราบมุม δ ตั้งแต่เริ่มต้นได้ผ่านการพิจารณาเฟเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการหามุมกำลัง (power angle) ผ่านเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [2]

จากรูปที่ 4.3 เฟเซอร์ไดอะแกรมที่ลากด้วยเส้นทึบ ($\mathbf{E}_A$) จะเหมือนกับเฟเซอร์ไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 4.2 ทุกประการ ซึ่งก็คือเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่นนั่นเอง ส่วนเฟเซอร์ไดอะแกรมที่ลากด้วยเส้นประ ($\mathbf{E}'_A$) จะเป็นการพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (โดยทั่วไปจะประมาณ $X_S = X_d$) ดังได้เคยพิจารณาผ่านมาแล้วในบทที่ 2

และจากรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยม $0'a'b'$ จะได้

$$0'a' = \frac{a'b'}{\cos(\theta+\delta)}$$

$$= \frac{X_q I_q}{\cos(\theta+\delta)} = \frac{X_q I_A \cos(\theta+\delta)}{\cos(\theta+\delta)}$$

$$= X_q I_A$$

ดังนั้นพิจารณาเฟเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 4.3 จึงได้

$$\mathbf{E}''_A = \mathbf{V}_\phi + R_A \mathbf{I}_A + jX_q \mathbf{I}_A \qquad (4\text{-}4)$$

ซึ่งเราจะพิจารณาหามุม δ โดยผ่านสมการที่ (4-4) นี้ ทั้งนี้เพราะ $\mathbf{E}_A$ ขนานกับ $\mathbf{E}''_A$ ดังนั้นจึงใช้มุม δ ตัวเดียวกัน

และยังสามารถหาขนาดของ E_A ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของขนาด E''_A ได้ (เพื่อเลี่ยงการหาคำตอบโดยใช้สมการที่ (4-1)) โดยการพิจารณาสามเหลี่ยม $0ab$ เทียบกับสามเหลี่ยม $0'a'b'$ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ได้ดังนี้

$$\frac{0'b'}{0b} = \frac{0'a'}{0a}$$

$$0'b' = \frac{0'a'}{0a} \times 0b = \frac{X_q I_A}{I_A} \times I_d$$

$$= X_q I_d$$

ดังนั้นจากรูปที่ 4.3 จึงได้ $E_A - E''_A = X_d I_d - X_q I_d = (X_d - X_q) I_d$ จึงได้ขนาดของ E_A ในรูปความสัมพันธ์ของ E''_A ดังสมการที่ (4-5)

$$E_A = E''_A + (X_d - X_q) I_d \qquad (4\text{-}5)$$

4.2 กำลังและแรงบิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น

จากกำลังไฟฟ้าขาออกเมื่อละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (cylindrical rotor) ดังที่เคยได้แสดงมาแล้วในบทที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกแสดงได้ดังสมการ

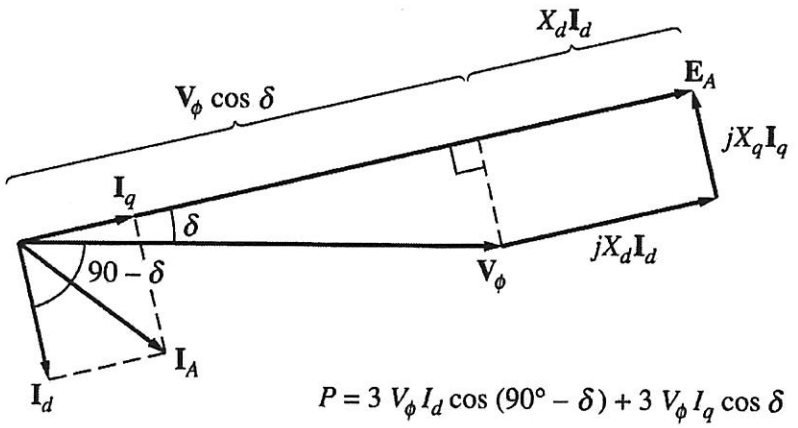
$$P_{\text{out}} = \frac{3V_\phi E_A \sin\delta}{X_S} \tag{4-6}$$

ส่วนในบทนี้จะเป็นการพิจารณาเมื่อโรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) โดยกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีโรเตอร์เป็นแบบนี้ จะเกิดจากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสตามแกนในแนวตรง (P_d) และกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสตามแกนขวาง (P_q)

$$P_{\text{out}} = P_d + P_q \tag{4-7}$$

และจากการพิจารณาสูตรในรูปทั่วไปของกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสทั้ง 3 เฟส จะแสดงได้คือ $P_{\text{out}} = 3V_\phi I_A \cos\theta$ ดังนั้นในลักษณะเดียวกันกับสมการนี้ เมื่อพิจารณาด้วยรูปที่ 4.4 ประกอบ สมการที่ (4-7) จึงกลายเป็น

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= 3V_\phi I_d \cos(90^\circ - \delta) + 3V_\phi I_q \cos\delta \\ &= 3V_\phi I_d \sin\delta + 3V_\phi I_q \cos\delta \end{aligned} \tag{4-8}$$



รูปที่ 4.4 แสดงการหากำลังขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น [2]

จากรูปที่ 4.4 กระแสตามแกนในแนวตรง หาได้จาก

$$X_d I_d = E_A - V_\phi \cos\delta$$

$$I_d = \frac{E_A - V_\phi \cos\delta}{X_d} \tag{4-9}$$

และกระแสตามแกนขวาง หาได้จาก

$$X_q I_q = V_\phi \sin\delta$$

$$I_q = \frac{V_\phi \sin\delta}{X_q} \tag{4-10}$$

แทนสมการที่ (4-9) และ (4-10) ลงในสมการที่ (4-8) จึงได้

$$P_{\text{out}} = 3V_\phi\left(\frac{E_A - V_\phi \cos\delta}{X_d}\right)\sin\delta + 3V_\phi\left(\frac{V_\phi \sin\delta}{X_q}\right)\cos\delta$$

$$= \frac{3V_\phi E_A}{X_d}\sin\delta + 3V_\phi^2\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin\delta\cos\delta$$

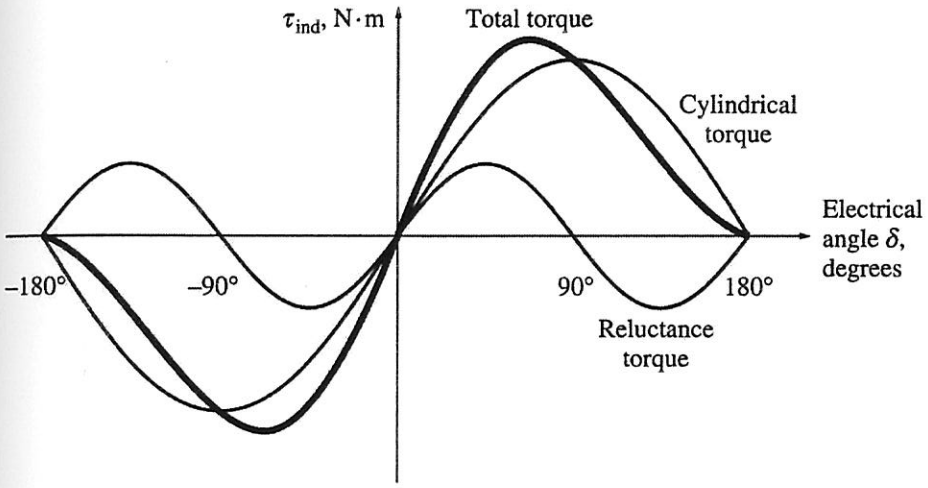
ซึ่ง $\sin\delta\cos\delta = \frac{1}{2}\sin 2\delta$ ดังนั้นจึงลดรูปเหลือ

$$P_{\text{out}} = \frac{3V_\phi E_A}{X_d}\sin\delta + \frac{3V_\phi^2}{2}\left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q}\right)\sin 2\delta \tag{4-11}$$

โดยเทอมแรกของสมการที่ (4-11) จะเหมือนกับกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาโรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (cylindrical rotor) ส่วนเทอมสองที่เพิ่มขึ้นมานั้นเป็นกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากแรงบิดความต้านแม่เหล็ก (reluctance torque) ในเครื่องจักร ดังนั้นกำลังงานสูงสุด (maximum power) จะไม่เกิดขึ้นที่มุม $\delta = 90°$ เหมือนเมื่อพิจารณาโรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่นแล้ว โดยจะเกิดกำลังงานสูงสุดก่อนที่มุม δ จะถึง $90°$ และกำลังงานสูงสุดมีค่ามากกว่าอยู่เล็กน้อยด้วยเมื่อเทียบกัน

ส่วนแรงบิดเหนี่ยวนำ (τ_{ind}) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น ซึ่ง $\tau_{\text{ind}} = P_{\text{conv}} / \omega_m$ จึงแสดงได้ดังสมการที่ (4-12) และแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดเหนี่ยวนำของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเทียบกับมุม δ ได้ดังรูปที่ 4.5

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{3V_\phi E_A}{\omega_m X_d}\sin\delta + \frac{3V_\phi^2}{2\omega_m}\left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q}\right)\sin 2\delta \qquad (4\text{-}12)$$



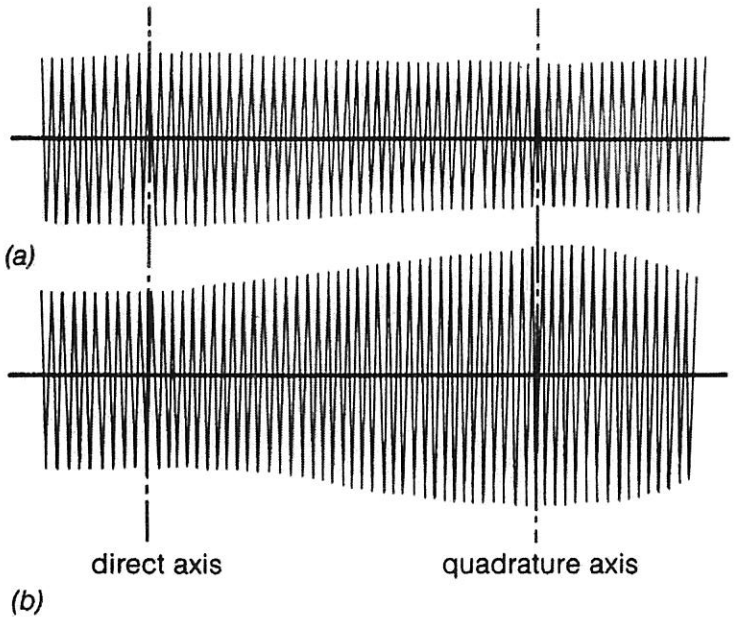
รูปที่ 4.5 แรงบิดเหนี่ยวนำของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กยื่น [2]

4.3 การทดสอบหาค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวตรงและซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวขวาง

การหาค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวตรง X_d และซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวขวาง X_q จะใช้การทดสอบที่เรียกว่าการทดสอบสลิป (slip test) ซึ่งกระทำได้โดยการจ่ายแรงดันสมดุล 3 เฟส ที่ค่าต่ำๆ ให้แก่ขดลวดอาร์เมเจอร์ในขณะที่เครื่องยังไม่มีการกระตุ้นจากกระแสสนาม จากนั้นหมุนเครื่องด้วยความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วซิงโครนัสเล็กน้อย ในสภาวะเช่นนี้ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดอาร์เมเจอร์ จะค่อยๆ เคลื่อนตัวผ่านขั้วแม่เหล็ก และเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์ตามความถี่สลิป (slip frequency) ของเครื่องจักร โดยกระแสอาร์เมเจอร์จะมีค่าสูงสุด (maximum) เมื่อแกนตามขวาง (quadrature-axis) ทับกันกับแกนคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf wave) และจะต่ำสุด (minimum) เมื่อแกนในแนวตรง (direct-axis) ทับกันกับแกนคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ส่วนแรงดันที่จ่ายเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ก็จะเปลี่ยนแปลงผกผันกับค่ากระแสอาร์เมเจอร์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงดันตกที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ในสายที่เข้า

ตัวเครื่อง ออสซิลโลแกรมของการทดสอบสลิป (slip test oscillogram) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และสามารถหาค่า X_d และ X_q ได้จากความสัมพันธ์

$$X_d = \frac{V_{\max}}{I_{\min}} \quad \text{และ} \quad X_q = \frac{V_{\min}}{I_{\max}}$$



รูปที่ 4.6 ออสซิลโลแกรมทดสอบสลิป (a) แรงดันที่เปลี่ยนแปลง (b) กระแสที่เปลี่ยนแปลง [7]

ตัวอย่างที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 480 V, 60 Hz, ต่อแบบ Δ, 4 ขั้ว มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวตรง 0.1 Ω และค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ในแนวขวาง 0.075 Ω ละทิ้งค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ ที่โหลดเต็มพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่าย 1200 A ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง จงหา

(a) แรงเคลื่อนไฟฟ้าภายใน $\mathbf{E}_A$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โหลดเต็มพิกัด โดยสมมติให้โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น มีค่ารีแอกแตนซ์เท่ากับ X_d

(b) แรงเคลื่อนไฟฟ้าภายใน $\mathbf{E}_A$ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โหลดเต็มพิกัด โดยสมมติให้โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น

Sol^n

ตัวอย่างที่ 4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่นมีค่า X_d และ X_q ต่อหน่วยเท่ากับ 1.00 และ 0.60 ตามลำดับ ละทิ้งค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ จงคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระตุ้น (excitation voltage) ต่อหน่วย เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่พิกัดและตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง

Sol^n

ตัวอย่างที่ 4.3 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส ต่อแบบ Y มีค่าความต้านทานประสิทธิผล 0.94 Ω มีค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวแกน (X_d) 20 Ω และค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวตั้งฉาก (X_q) 12 Ω เมื่อมอเตอร์ต่อเข้ากับแรงดัน 12000 V จะมีกระแสไหลในสาย 50 A ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า จงหากำลังงานที่จ่ายเข้ามอเตอร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระตุ้น (excitation voltage)

Sol^n

ตัวอย่างที่ 4.4 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กยื่น ต่อแบบ Y, 60 Hz, 1732 V มีกระแสไหลเข้า 100 A ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 นำหน้า มุมกำลังวัดได้ 17.1° ละทิ้งค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ จงหา

(a) ค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวตั้งฉาก (X_q) ของมอเตอร์

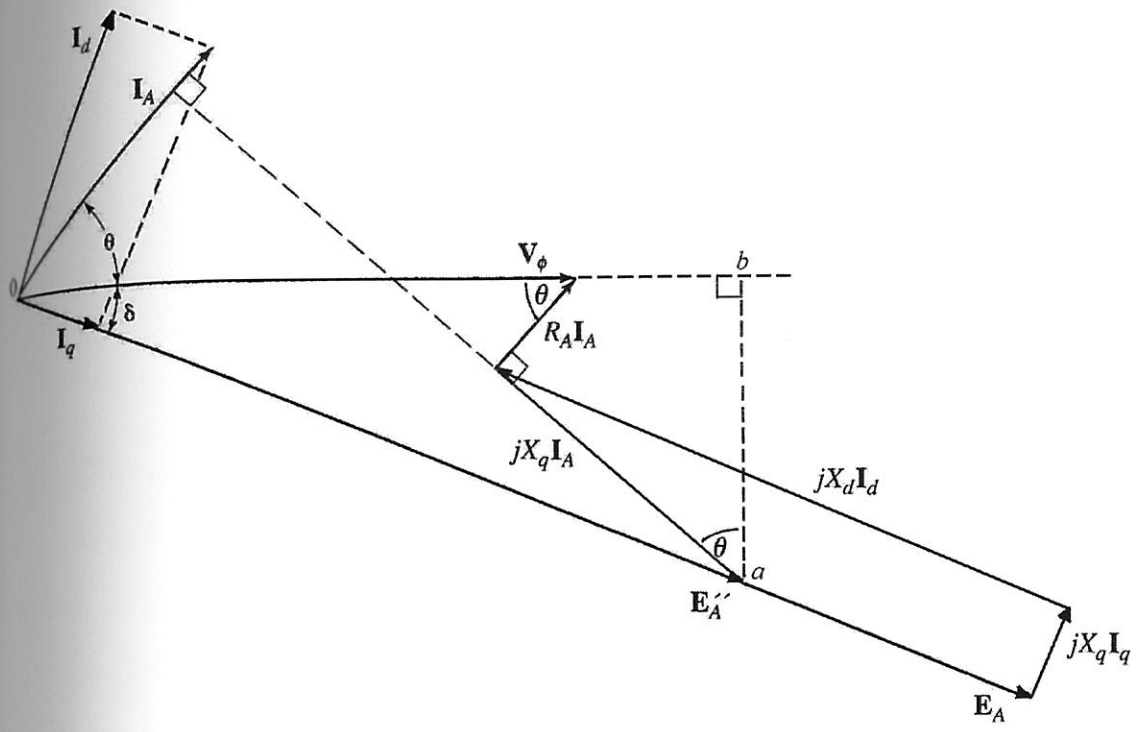
(b) ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระตุ้น (excitation voltage) มีค่า 1544 V/ϕ จงหาค่ารีแอกแตนซ์ตามแนวแกน (X_d) ของมอเตอร์

Sol^n

ตัวอย่างที่ 4.5 จงเขียน d-q เฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสกรณีกระตุ้นเกิน (overexcited) และจากเฟเซอร์ไดอะแกรมนี้ จงแสดงให้เห็นว่า

$$\tan\delta = \frac{I_A X_q \cos\theta + I_A R_A \sin\theta}{V_\phi + I_A X_q \sin\theta - I_A R_A \cos\theta}$$

Sol^n เฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กยื่นที่ leading PF แสดงได้ดังนี้



<u>ตัวอย่างที่ 4.6</u> มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 2000 hp, 2300 V, 60 Hz ต่อแบบ Y มีค่า X_d = 1.95 Ω และ X_q = 1.40 Ω ละทิ้งค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมด จงหาค่าสูงสุดของกำลังงานกลที่มอเตอร์ตัวนี้จะให้ได้ ถ้ามอเตอร์ต่อกับแหล่งจ่ายไฟอนันต์ที่พิกัดแรงดันและพิกัดความถี่ ค่ากระแสสนามถูกปรับให้มีค่าคงที่ที่ทำให้ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์มีค่า 1.0 ที่พิกัดโหลด และการเพิ่มโหลดให้กับเพลาจะค่อยๆ ดำเนินการ โดยไม่ให้เกิดการแกว่งที่โรเตอร์

<u>Sol^n</u>

4.4 แบบฝึกหัดท้ายบท

4.1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) มีค่า X_d ต่อหน่วยเท่ากับ 1.0 และค่า X_q ต่อหน่วยเท่ากับ 0.7 เมื่อเครื่องจักรจ่ายกระแสโหลดเต็มพิกัดที่พิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วมีค่า 3.3 kV และตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง จงหาแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระตุ้น (excitation voltage or internally generated emf) พร้อมทั้งค่ากำลังงานต่อหน่วยสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้

4.2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 3 เฟส แบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) ต่อแบบ Y มีพิกัด 20 kVA, 220 V ละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ และรีแอกแตนซ์มีค่า $X_d = 4\,\Omega$, $X_q = 2\,\Omega$ เมื่อเครื่องจักรจ่ายโหลดเต็มพิกัดที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง จงหา

(a) มุมกำลัง (power angle)

(b) การคุมค่าแรงดัน (VR)

(c) กำลังงานที่ผลิตได้

4.3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) ทำงานที่พิกัดแรงดันโดยจ่ายกระแสพิกัดที่ตัวประกอบกำลังล้าหลังเป็นมุม 15° มีค่า X_d ต่อหน่วยเท่ากับ 1.2 และค่า X_q ต่อหน่วยเท่ากับ 0.8 จงหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระตุ้นต่อหน่วยและมุมกำลัง

4.4) การทดสอบสลิป (slip test) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส พิกัด 5 kVA, 240 V, 60 Hz ได้ผลดังนี้

Line-to-line, V:	200 maximum	180 minimum
Line current, A:	12 maximum	8 minimum

จงหาค่า X_d และ X_q ทั้งค่าในหน่วยโอหม์และค่าต่อหน่วย โดยสมมติให้ขดลวดอาร์เมเจอร์ต่อกันแบบ Y และถ้าขดลวดอาร์เมเจอร์ต่อกันแบบ Δ จงหาค่า X_d และ X_q ทั้งค่าในหน่วยโอหม์และค่าต่อหน่วย

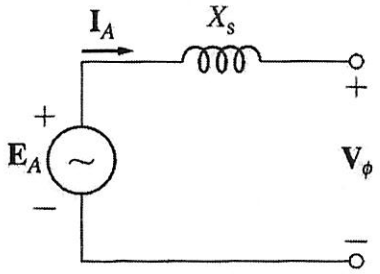
บทที่ 5

การเชื่อมต่อกับระบบภายนอก การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสภาวะชั่วครู่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

(Connected to an External System, Parallel of Generator and Synchronous Generator Transient)

5.1 การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบภายนอก

การอธิบายการเชื่อมต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบภายนอกในหัวข้อนี้ ซึ่งระบบภายนอกอาจจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรืออื่นๆ ก็ได้ จะเป็นการพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่โรเตอร์เป็นแบบขั้วแม่เหล็กไม่ยื่น (nonsalient pole หรือ cylindrical rotor) ซึ่งจากหัวข้อที่ 2.4 ในบทที่ 2 ที่ผ่านมา ถ้าละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_A) (เนื่องจาก $X_S >> R_A$) ดังแสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเฟสได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งมีรีแอกแตนซ์ X_S คั่นอยู่ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้า $\mathbf{E}_A$ และ $\mathbf{V}_\phi$ โดยค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แสดงได้คือ

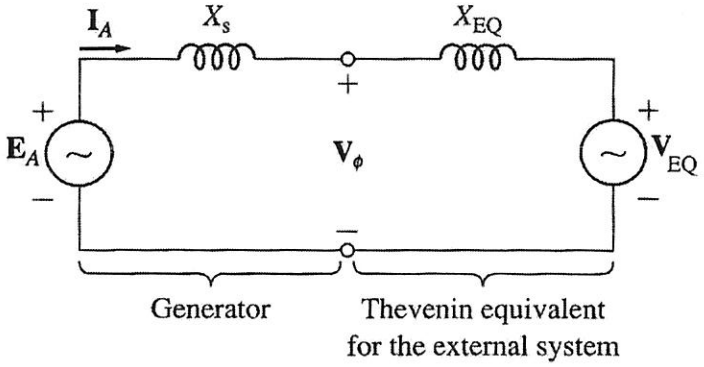


รูปที่ 5.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ [3]

$$P_{\text{out}} = \frac{3E_A V_\phi}{X_S} \sin\delta \tag{5-1}$$

เมื่อนำระบบภายนอกมาเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสดังแสดงด้วยรูปที่ 5.2 โดยระบบภายนอกที่นำมาต่อเชื่อมนี้ จะพิจารณาเป็นวงจรสมมูลของเทวินิน (Thevenin equivalent) แล้ว โดยจะปรากฏแรงเคลื่อนไฟฟ้า $\mathbf{V}_{\text{EQ}}$ ต่ออนุกรมกับรีแอกแตนซ์ X_{EQ} อยู่ ดังนั้น

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 5.2 จึงมีรีแอกแตนซ์ X_S อนุกรมกับรีแอกแตนซ์ X_{EQ} คั่นอยู่ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้า $\mathbf{E}_A$ และ $\mathbf{V}_{EQ}$ จึงได้กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับระบบภายนอก แสดงได้ดังสมการที่ (5-2)



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อเชื่อมต่อกับระบบภายนอก [3]

$$P_{\text{out}} = \frac{3E_A V_{EQ}}{X_S + X_{EQ}} \sin\delta \tag{5-2}$$

โดยที่ δ คือมุมกำลัง (power angle) ที่วัดระหว่าง $\mathbf{E}_A$ และ $\mathbf{V}_{EQ}$ ซึ่งถ้า $\delta = 90^\circ$ ก็จะได้กำลังงานสูงสุด (maximum power)

<u>ตัวอย่างที่ 5.1</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 75 MVA, 13.8 kV มีรีแอกแตนซ์ X_S ต่อหน่วยเท่ากับ 1.35 เชื่อมต่อกับระบบภายนอกซึ่งมีรีแอกแตนซ์ X_{EQ} ต่อหน่วยเท่ากับ 0.23 และแรงเคลื่อนไฟฟ้า V_{EQ} ต่อหน่วยเท่ากับ 1.0 โดยทั้งระบบจะใช้พิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นค่าฐาน จงหาค่ากำลังงานสูงสุด $P_{\max}$ ทั้งค่าต่อหน่วยและค่า MW ที่จ่ายให้แก่ระบบภายนอก ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า E_A ยังคงค่าต่อหน่วยไว้ที่ 1.0

Sol[a]

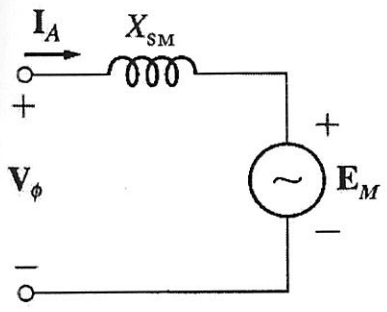
ตัวอย่างที่ 5.2 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 2000 hp, 2300 V, 1.0 PF, 30 ขั้ว, 60 Hz ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 1.95 Ω ละทิ้งค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมด จงหากำลังงานและแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์

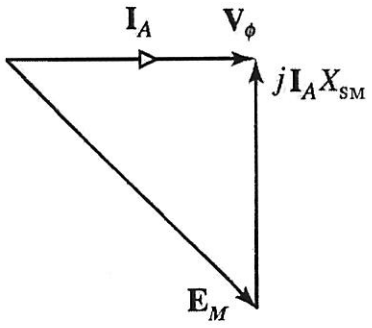
(a) เมื่อรับกำลังไฟฟ้าจากบัสอนันต์ (infinite bus) 60 Hz, 2300 V โดยสมมติให้กระแสสนามของมอเตอร์ถูกปรับเพื่อรักษาตัวประกอบกำลังให้มีค่าคงที่ที่ 1.0 ขณะทำงานที่ค่าพิกัด

(b) ถ้ามอเตอร์ไม่ได้ต่อกับบัสอนันต์อย่างข้อ (a) แต่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 1500 kVA, 2300 V, 2 ขั้ว, 3600 r/min ที่ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 2.65 Ω เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกขับที่ความเร็วพิกัด และกระแสสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ถูกปรับเพื่อให้ตัวประกอบกำลังมีค่า 1.0 และได้พิกัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วในขณะทำงานเต็มพิกัด

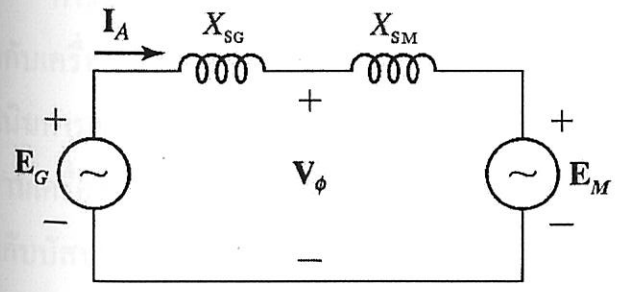
Sol[b]

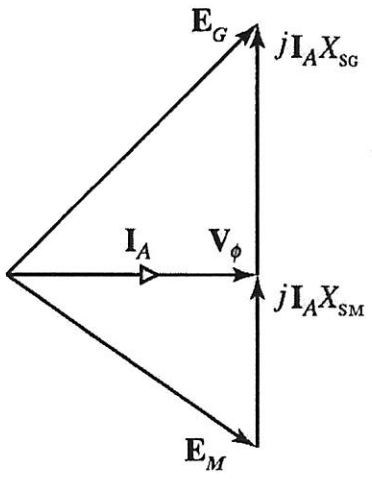
(a) แสดงวงจรสมมูลพร้อมเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ที่รับกำลังไฟฟ้าจากบัสอนันต์ได้ดังนี้





(b) แสดงวงจรสมมูลพร้อมเฟเซอร์ไดอะแกรมของมอเตอร์ที่รับกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังนี้





5.2 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ปัจจุบันการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ปรากฏเพียงแก่ 1 เครื่อง เห็นมีแต่เพียงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฉุกเฉิน (emergency generator) เท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดนั้น จะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมากกว่า 1 เครื่อง ขนานกันอยู่ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะ ระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายเครื่องจะมีความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดที่มีอยู่เป็นจำนวนมากได้ และยังเพิ่มความน่าเชื่อถือให้แก่ระบบไฟฟ้า โดยถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดขัดข้องหรือหยุดเครื่องเพื่อบำรุงรักษา ก็ยังคงมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องอื่นช่วยจ่ายโหลดแทนได้

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความหมายถึง การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกเครื่องหนึ่ง หรือการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับบัสบาร์ โดยการดำเนินการเช่นนี้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะถูกเรียกว่าการซิงโครไนซ์ (synchronizing) ซึ่งในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสดังแสดงด้วยรูปที่ 5.3 หรืออาจเป็นการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับบัสบาร์ จะต้องคำนึงถึง

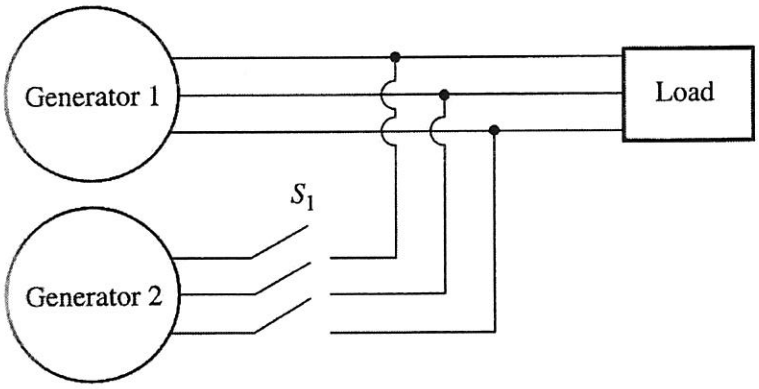
1. แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (rms) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสอง จะต้องมีขนาด (magnitude) เท่ากัน ซึ่งสามารถดูได้จากโวลต์มิเตอร์ (voltmeter)

2. ลำดับเฟส (phase sequence) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสอง จะต้องเหมือนกัน โดยสามารถตรวจสอบได้จากการใช้หลอดไฟซิงโครไนซ์ (synchronizing lamp)

3. มุมเฟส (phase angle) ในแต่ละเฟสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสอง จะต้องมีมุมเดียวกัน (in phase) โดยสามารถตรวจสอบได้จากการใช้ซิงโครสโคป (synchroscope) หรืออาจใช้หลอดไฟซิงโครไนซ์

4. ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสอง จะต้องมีค่าเท่ากัน โดยสามารถตรวจสอบได้จากการใช้ซิงโครสโคปเช่นกัน

โดยถ้าไม่คำนึงถึงหลักการทั้ง 4 ข้อ ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแล้ว อาจทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่จะขนานเข้าไปและระบบโดยรวมเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 5.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้าด้วยกัน [2]

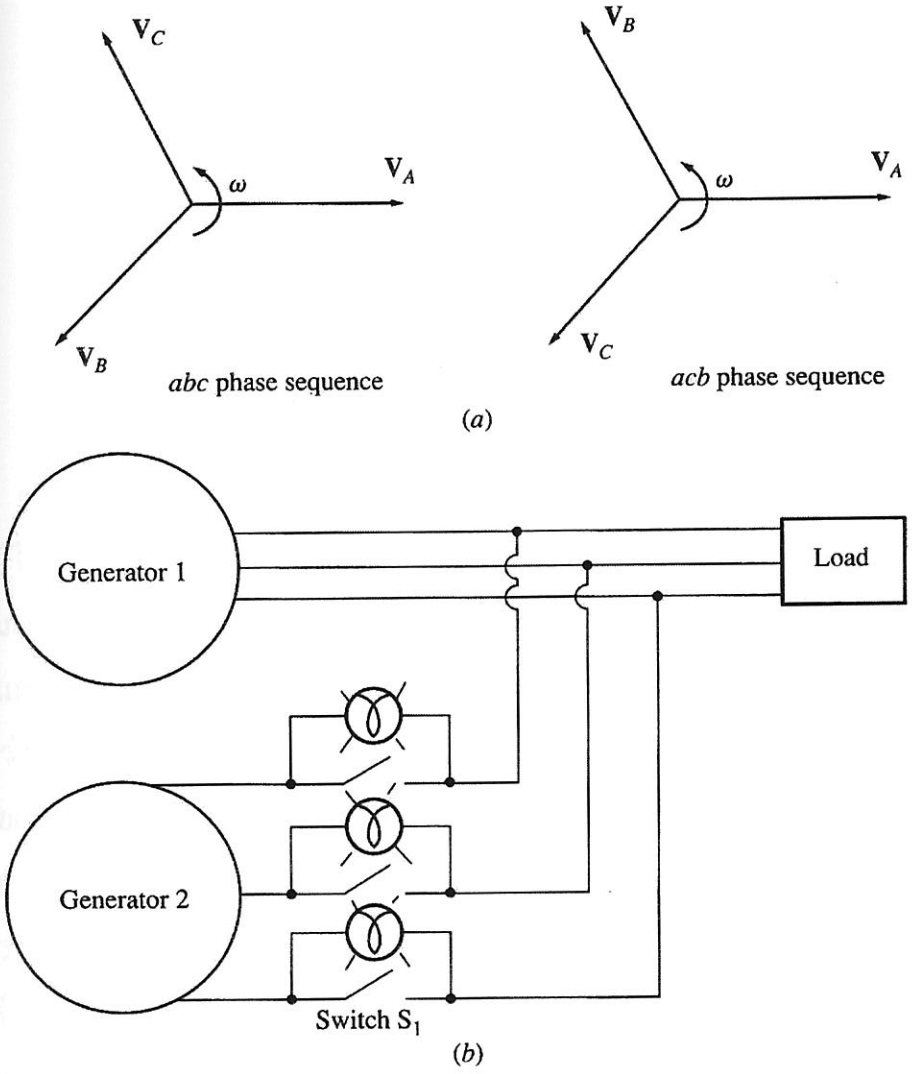
5.2.1 ขั้นตอนในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

จากเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจึงมีขั้นตอนในการปฏิบัติโดยทั่วไปดังนี้

1. ตรวจสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (rms) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองให้มีขนาดเท่ากัน โดยทำการปรับกระแสสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาขนาน จนกระทั่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าเท่ากันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหลัก โดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า

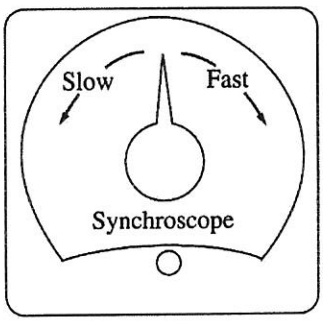
2. ตรวจสอบลำดับเฟส (phase sequence) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองว่าลำดับเฟสเหมือนกันหรือไม่ ซึ่งอาจเป็นลำดับเฟสบวกหรือเรียกว่าลำดับเฟส *abc* (positive sequence or *abc* phase sequence) หรืออาจเป็นลำดับเฟสลบหรือเรียกว่าลำดับเฟส *acb* (negative sequence or *acb* phase sequence) ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.4 (a) ซึ่งสามารถดำเนินการตรวจสอบได้หลายวิธี เช่น ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induction motor) 3 เฟส ขนาดเล็กๆ ต่อเข้ากับขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาขนาน โดยแยกกันต่อทีละครั้งแล้วดูทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยถ้าทิศทางการหมุนกลับทางกันแสดงว่าลำดับเฟสไม่เหมือนกัน ให้ทำการสลับเฟสคู่ใดคู่หนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาขนาน เพื่อจะได้ลำดับเฟสที่เหมือนกัน

การตรวจสอบลำดับเฟสอีกวิธีหนึ่งคือ การใช้หลอดไฟซิงโครไนซ์ 3 หลอด หรือที่เรียกว่า วิธี 3 หลอดติดดับ (three-light-bulb method) ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.4 (b) โดยถ้าหลอดไฟทั้ง 3 หลอดสว่าง (ขณะนี้มุมเฟสจะแตกต่างกันมาก) และดับ (ขณะนี้มุมเฟสจะแตกต่างกันน้อย) ไม่พร้อมกัน ทั้งๆ ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเท่ากันแล้ว แสดงว่าลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองไม่เหมือนกัน เราต้องทำการสลับเฟสคู่ใดคู่หนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาขนานเพื่อให้หลอดไฟทั้ง 3 หลอดสว่างและดับพร้อมๆ กัน เมื่อดำเนินการได้แล้ว ในจังหวะที่หลอดไฟทั้ง 3 หลอดดับสนิท (ลำดับเฟสเหมือนกันแล้ว ยังมุมเฟสเดียวกัน (in phase) ด้วย) จึงทำการสับสวิตช์เพื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าด้วยกัน โดยเมื่อสับสวิตช์แล้วหลอดไฟซิงโครไนซ์ทั้ง 3 หลอดจะดับสนิทหมด ทั้งนี้เพราะความต่างศักย์ที่คร่อมหลอดไฟมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 5.4 แสดงลำดับเฟสและแสดงการตรวจสอบลำดับเฟสแบบวิธี 3 หลอดติดดับ [2]

3. ตรวจสอบมุมเฟสของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองว่ามีมุมเฟสเดียวกัน (in phase) หรือไม่ วิธีที่ง่ายที่สุดคือการใช้วิธี 3 หลอดติดดับดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น โดยในจังหวะที่หลอดไฟทั้ง 3 หลอดดับสนิทนั้น ก็คือมุมเฟสมีค่าเดียวกัน แต่วิธีการนี้ยังไม่มีความแม่นยำมากนัก วิธีการตรวจสอบมุมเฟสที่แม่นยำคือการใช้ซิงโครสโคป (synchroscope) ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.5 ซึ่งพิจารณาจากเข็มของซิงโครสโคป โดยถ้าเข็มของซิงโครสโคปชี้ขึ้นข้างบนในตำแหน่งตรงกลางพอดี แสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองมีมุมเฟสเดียวกัน (in phase: 0°) จึงทำการสับสวิตช์เพื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าด้วยกันได้ แต่ถ้าเข็มของซิงโครสโคปชี้ลงข้างล่างในตำแหน่งตรงกลางพอดี ก็แสดงว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองมีมุมเฟสกลับกันพอดี (out-of-phase: 180°)

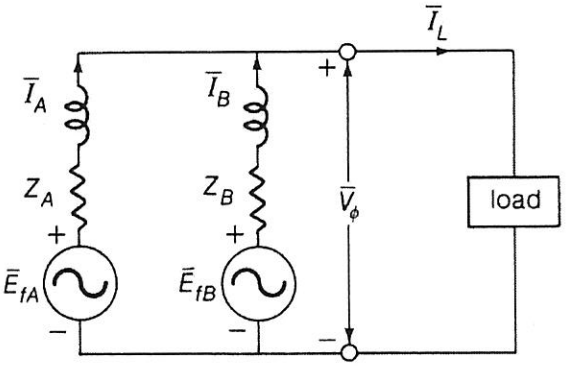


รูปที่ 5.5 ซิงโครสโคป [2]

4. ตรวจสอบความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสอง ว่ามีค่าเท่ากันหรือไม่ โดยการตรวจสอบก็ใช้ซิงโครสโคปเช่นกัน ซึ่งถ้าความถี่หรือความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาขนานมีค่ามากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหลัก เข็มของซิงโครสโคปจะชี้ไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.5 แต่ถ้าความถี่หรือความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะนำมาขนานมีค่าน้อยกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหลัก เข็มของซิงโครสโคปจะชี้ไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองจะมีความถี่หรือความเร็วเท่ากันเมื่อเข็มของซิงโครสโคปชี้ขึ้นข้างบนในตำแหน่งตรงกลางพอดี

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ต้องการความมีเสถียรภาพสูง การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปในระบบจะทำโดยอัตโนมัติโดยการนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความถูกต้องและแม่นยำสูงที่สุด

<u>ตัวอย่างที่ 5.3</u> เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 6.6 kV ต่อแบบ Y จำนวน 2 เครื่องขนานกันอยู่ ดังแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูป ช่วยกันจ่ายโหลดขนาด 3000 kW ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง ค่าซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ของเครื่อง A เท่ากับ $0.5 + j10\ \Omega$ และเครื่อง B เท่ากับ $0.4 + j12\ \Omega$

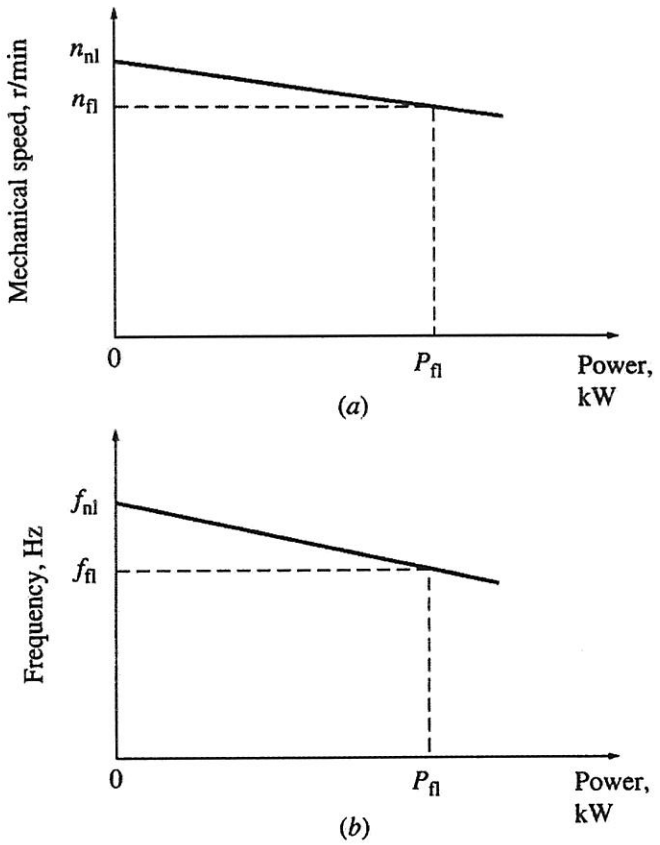


ถ้ากระแสสนามของเครื่อง A ถูกปรับให้จ่ายโหลด 150 A ที่ตัวประกอบกำลังล้าหลัง และบังคับให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองแบ่งกันจ่ายโหลดในปริมาณที่เท่ากัน จงคำนวณหากระแสอาร์เมเจอร์ ตัวประกอบกำลัง แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระตุ้น และมุมกำลัง ของแต่ละเครื่อง

Sol^n

5.2.2 คุณลักษณะความถี่-กำลังไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้า-กำลังรีแอกทีฟ

โดยทั่วไปแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะถูกขับให้หมุนด้วยตัวต้นกำลัง (prime mover) ที่ได้รับแหล่งพลังงานจากกังหันไอน้ำ (steam turbine) เป็นส่วนใหญ่ แต่ยังคงมีแหล่งพลังงานจากอย่างอื่นอีก อาทิเช่น เครื่องยนต์ดีเซล (diesel engine) กังหันแก๊ส (gas turbine) กังหันน้ำ (water turbine) และกังหันลม (wind turbine) เป็นต้น โดยเมื่อระบบมีความต้องการกำลังไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น ความเร็วในการหมุนของตัวต้นกำลังก็จะมีค่าลดลง โดยลดลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) แต่เนื่องด้วยกลไกของตัวบังคับ (governor mechanism) จึงบังคับให้การลดค่าลงของความเร็วของตัวต้นกำลังมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงความสัมพันธ์ได้ด้วยรูปที่ 5.6 (a) และเนื่องจากความถี่ทางไฟฟ้า (f_e) ก็มีความสัมพันธ์แบบเป็นสัดส่วนกับความเร็วที่เพลา (n_m) ดังนั้นความถี่ทางไฟฟ้าจึงมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับกำลังไฟฟ้าด้วย ดังแสดงคุณลักษณะความถี่-กำลังไฟฟ้า (frequency-power) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ดังรูปที่ 5.6 (b) และคุณลักษณะนี้จะมีความสำคัญอย่างมากในการอธิบายการขนานกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว-กำลังไฟฟ้า และ ความถี่-กำลังไฟฟ้า ตามลำดับ [2]

จากคุณลักษณะความถี่-กำลังไฟฟ้า ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสดังแสดงในรูปที่ 5.6 (b) จึงเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$P = s_P(f_{nl} - f_{sys}) \tag{5-3}$$

เมื่อ P = กำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

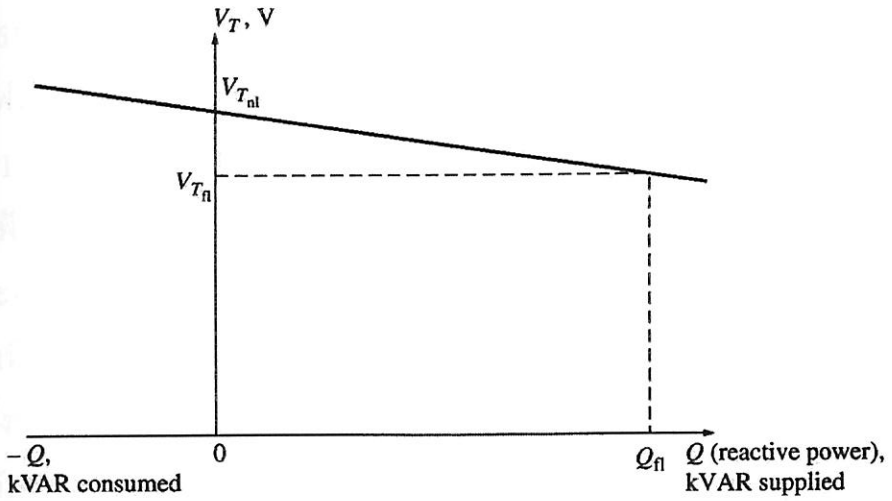
f_{nl} = ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด (สามารถตั้งค่าได้ (set point))

f_{sys} = ความถี่ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงาน (ถ้าที่โหลดเต็มพิกัด: $f_{sys} = f_{fl}$)

s_P = ความชันของเส้นกำลังไฟฟ้า ในหน่วย kW/Hz หรือ MW/Hz

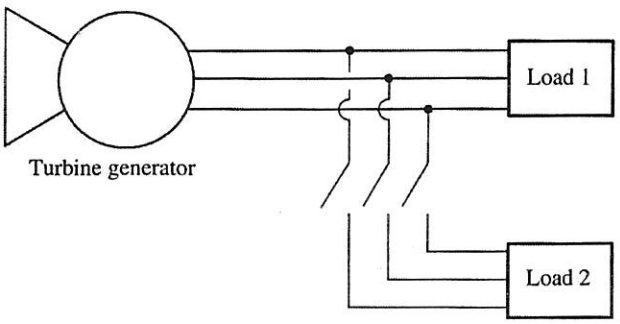
ในทำนองเดียวกัน เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอกทีฟ (Q) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว (V_T) โดยจากที่ผ่านมาถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายโหลดที่มีตัวประกอบกำลังล้าหลัง แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วจะมีค่าลดลง แต่ถ้าจ่ายโหลดที่มีตัวประกอบกำลัง

นำหน้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงคุณลักษณะแรงเคลื่อนไฟฟ้า-กำลังรีแอกทีฟ (voltage-reactive power) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ดังรูปที่ 5.7 และได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบเดียวกันกับสมการที่ (5-3)



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว-กำลังรีแอกทีฟ [2]

พิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส 1 เครื่อง ที่จ่ายโหลดตามลำพัง กำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) จะถูกจ่ายออกไปโดยขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานของโหลด ซึ่งค่ากำลัง P และ Q จะไม่สามารถควบคุมได้ผ่านตัวบังคับ (governor) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ ณ กำลัง P ค่านี้ เราสามารถที่จะกำหนดความถี่ในขณะที่เครื่องทำงาน (f_{sys}) ได้ โดยการตั้งค่าตัวบังคับ (governor set point) ให้ไปปรับความถี่ในขณะไม่มีโหลด (f_{nl}) ไว้ตามที่ได้คำนวณ และในทำนองเดียวกัน ณ กำลัง Q ค่านี้ เราก็สามารถที่จะกำหนดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้โดยการควบคุมค่ากระแสสนาม



ตัวอย่างที่ 5.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องหนึ่งขณะจ่ายโหลดแสดงได้ดังรูป โหลดชุดที่ 2 ต่อแบบขนานกับโหลดชุดแรก เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความถี่ในขณะไม่มีโหลดมีค่า 61.0 Hz และมีความชันของเส้นกำลังไฟฟ้า (s_P) เท่ากับ 1 MW/Hz โหลดชุดที่ 1 รับกำลังไฟฟ้าจริง 1000 kW ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง ขณะที่โหลดชุดที่ 2 รับกำลังไฟฟ้าจริง 800 kW ที่ตัวประกอบกำลัง 0.707 ล้าหลัง

(a) ก่อนที่จะสับสวิทช์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความถี่เท่าใด

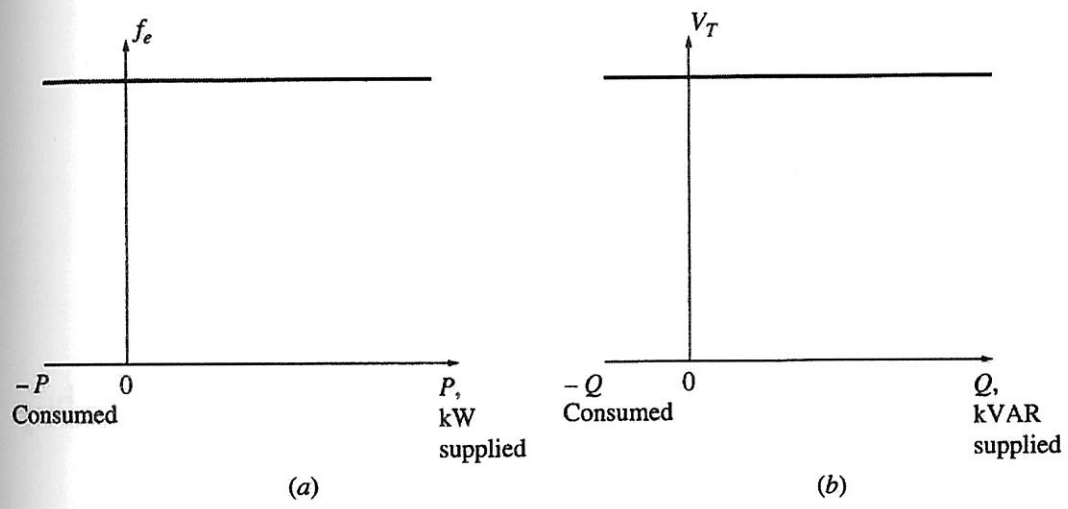
(b) ภายหลังที่โหลดชุดที่ 2 สับเข้ากับระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความถี่เท่าใด

(c) ภายหลังที่โหลดชุดที่ 2 สับเข้ากับระบบ จะมีวิธีการอย่างไรให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานที่ความถี่เท่ากับเมื่อยังไม่สับสวิทช์เข้า

Sol^{n}

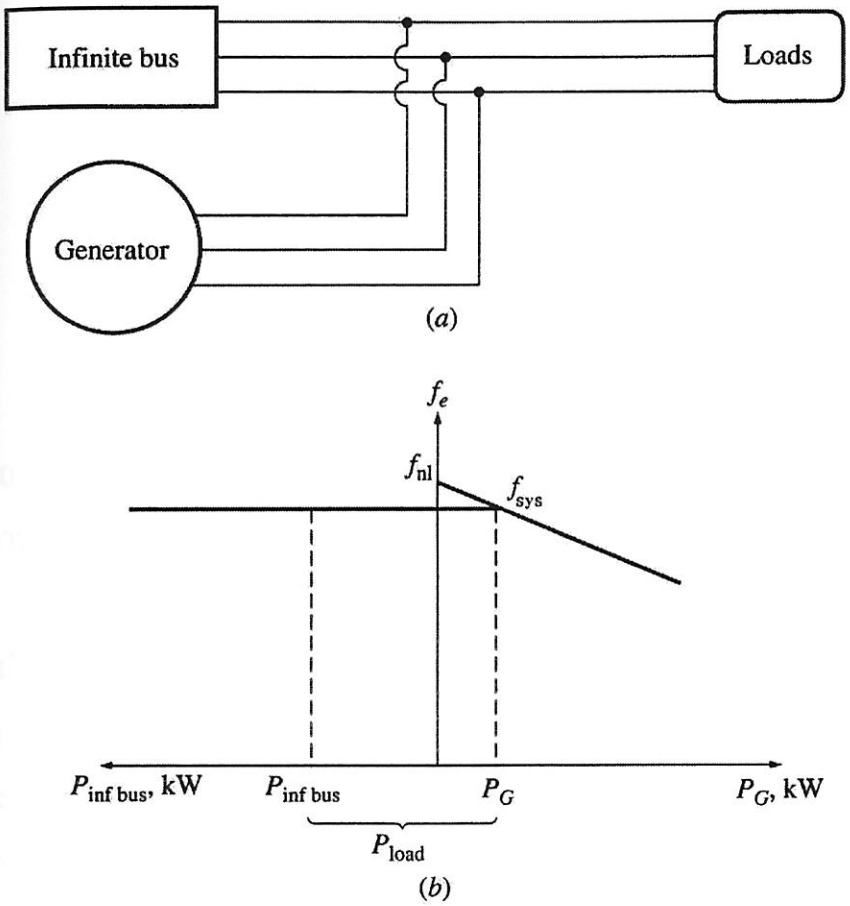
5.2.3 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสถูกต่อเข้ากับระบบกำลังไฟฟ้า จะไม่มีผลกระทบใดจากการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปในระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่นี้เลย เพราะถือว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเข้าไปเป็นเพียงส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่งของระบบกำลังไฟฟ้าเท่านั้น การอธิบายระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่นี้จะใช้หลักการของบัสอนันต์ (infinite bus) ซึ่งหมายถึงระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ความถี่และแรงเคลื่อนไฟฟ้าของระบบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า (มีค่าคงที่) เมื่อจ่ายกำลัง P และ Q ปริมาณเท่าใดให้แก่โหลดก็ตาม ดังแสดงคุณลักษณะความถี่-กำลังไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้า-กำลังรีแอกทีฟ ของบัสอนันต์ได้ดังรูปที่ 5.8



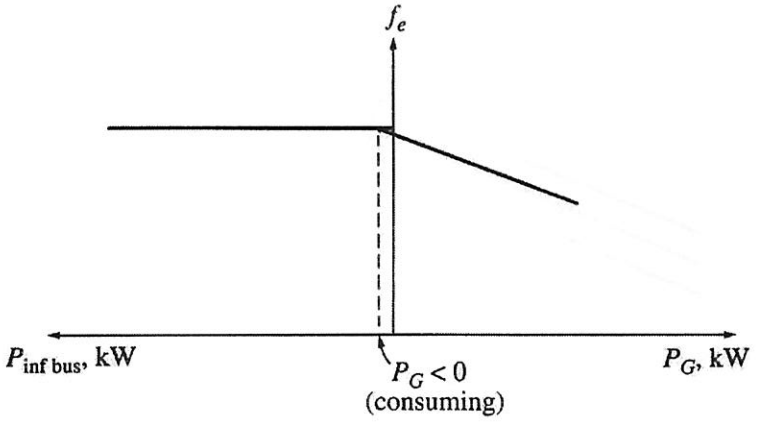
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่-กำลังไฟฟ้า และ แรงเคลื่อนไฟฟ้า-กำลังรีแอกทีฟ ของบัสอนันต์ ตามลำดับ [2]

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับบัสอนันต์ที่กำลังจ่ายโหลดอยู่แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 (a) และสามารถอธิบายคุณลักษณะความถี่-กำลังไฟฟ้าของทั้งบัสอนันต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อเข้าด้วยกันได้ดังไดอะแกรมรูปที่ 5.9 (b) ซึ่งเรียกไดอะแกรมในลักษณะเช่นนี้ว่า ไดอะแกรมโครงบ้าน (house diagram) เนื่องจากมีลักษณะเหมือนกับรูปโครงบ้านนั่นเอง จากไดอะแกรมโครงบ้านนี้จะสังเกตเห็นว่า ความถี่ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงาน (f_{sys}) จะมีค่าเดียวกันกับความถี่ของบัสอนันต์ (โดยก่อนทำการขนาน ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดจะต้องมีค่ามากกว่าความถี่ของบัสอนันต์) และบัสอนันต์กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดในปริมาณทั้งหมดเท่ากับ P_{load} ($P_{\text{load}} = P_{\text{inf bus}} + P_G$)



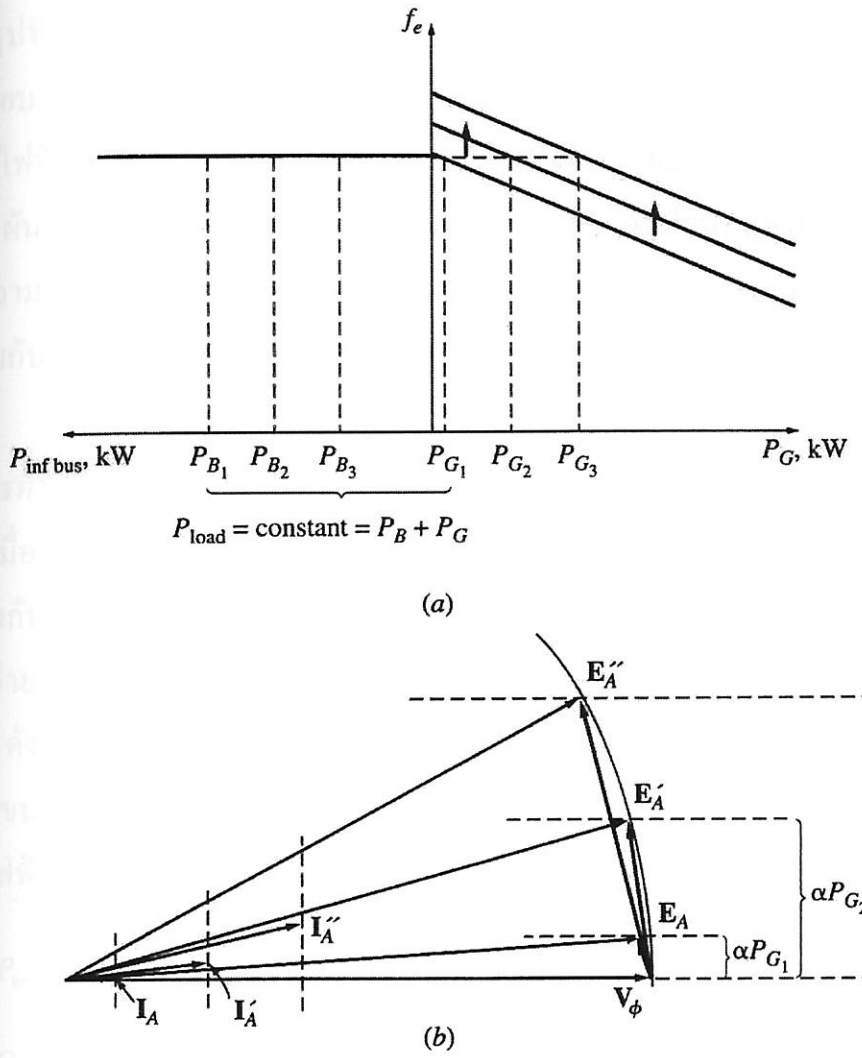
รูปที่ 5.9 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับบัสอนันต์ และไดอะแกรมโครงบ้าน [2]

ในกรณีที่ก่อนการขนาน ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะไม่มีโหลดมีค่าน้อยกว่าความถี่ของบัสอนันต์ จะได้ไดอะแกรมโครงบ้านแสดงดังรูปที่ 5.10 ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมามีค่าเป็นลบ (รับกำลังไฟฟ้า (consuming P) แทนการจ่าย) จึงมีผลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นมอเตอร์แทน

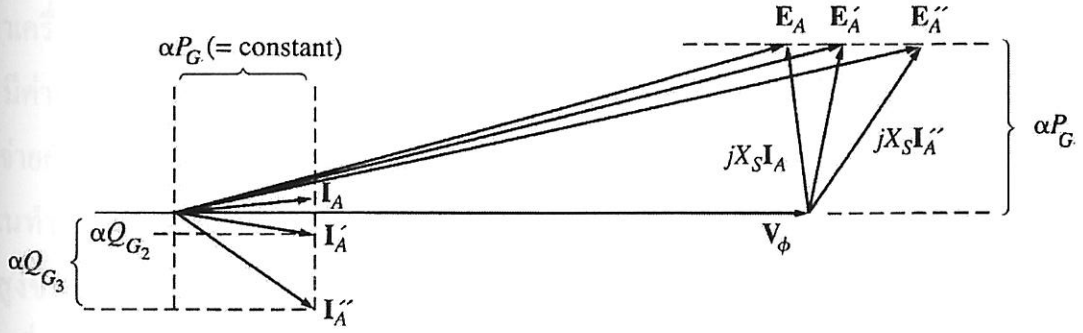


รูปที่ 5.10 ไดอะแกรมโครงบ้านของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับบัสอนันต์ เมื่อก่อนการขนานความถี่ของเครื่องกำเนิดขณะไม่มีโหลดมีค่าน้อยกว่าความถี่ของบัสอนันต์ [2]

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับบัสอนันต์เรียบร้อยแล้ว ถ้าทำการตั้งค่าตัวบังคับ (governor set point) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใหม่ ให้ความถี่ในขณะไม่มีโหลด (f_{nl}) มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงไดอะแกรมโครงบ้านได้ดังรูปที่ 5.11 (a) จะได้เส้นความถี่-กำลังไฟฟ้ายกตัวสูงขึ้น แต่ทั้งนี้ความถี่ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงาน (f_{sys}) ก็ยังคงค่าเท่าเดิมที่ความถี่เดียวกับบัสอนันต์ ดังนั้นจากรูปที่ 5.11 (a) จึงได้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับบัสอนันต์ให้แก่โหลดตัวเดิม ในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น และแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อความถี่ในขณะไม่มีโหลดมีค่าสูงขึ้น ได้ดังรูปที่ 5.11 (b) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ขนาดของ $\mathbf{E}_{\text{A}}$ จะมีค่าคงที่ ทั้งนี้เพราะกระแสสนามและความเร็วในการหมุนของตัวต้นกำลังไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนกำลังไฟฟ้า P_G (แปรผันกับ $E_A \sin\delta$) จะมีค่าสูงขึ้นตามค่าความถี่ในขณะไม่มีโหลดที่มากขึ้น และจากการกระทำเช่นนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายโหลดด้วยตัวประกอบกำลังนำหน้ามากขึ้น จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (consuming Q) แทนการจ่าย ซึ่งถ้าต้องการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (supplying Q) ตามเดิม จะต้องมีการปรับค่ากระแสสนามร่วมด้วย



รูปที่ 5.11 ไดอะแกรมโครงบ้านและเฟเซอร์ไดอะแกรมของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับบัสอนันต์ เมื่อความถี่ในขณะไม่มีโหลดมีค่าสูงขึ้น [2]



รูปที่ 5.12 เฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขนานเข้ากับบัสอนันต์ เมื่อกระแสสนามมีค่าสูงขึ้น [2]

รูปที่ 5.12 เป็นการแสดงเฟเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขนานเข้ากับบัสอนันต์เรียบร้อยแล้ว แล้วเพิ่มค่ากระแสสนามให้สูงขึ้น ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ขนาดของ $\mathbf{E}_A$ พร้อมทั้งกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q_G (แปรผันกับ $I_A \sin\theta$) จะมีค่าสูงขึ้น แต่จะไม่ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้า P_G (แปรผันกับ $E_A \sin\delta$ หรือ $I_A \cos\theta$) ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสสนามจะไม่มีผลต่อความเร็วในการหมุนของตัวต้นกำลัง และตัวบังคับ (governor) ก็ไม่ได้ถูกปรับแปลงประกอบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วก็มีค่าคงที่

5.2.4 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อขนานเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเช่นกัน

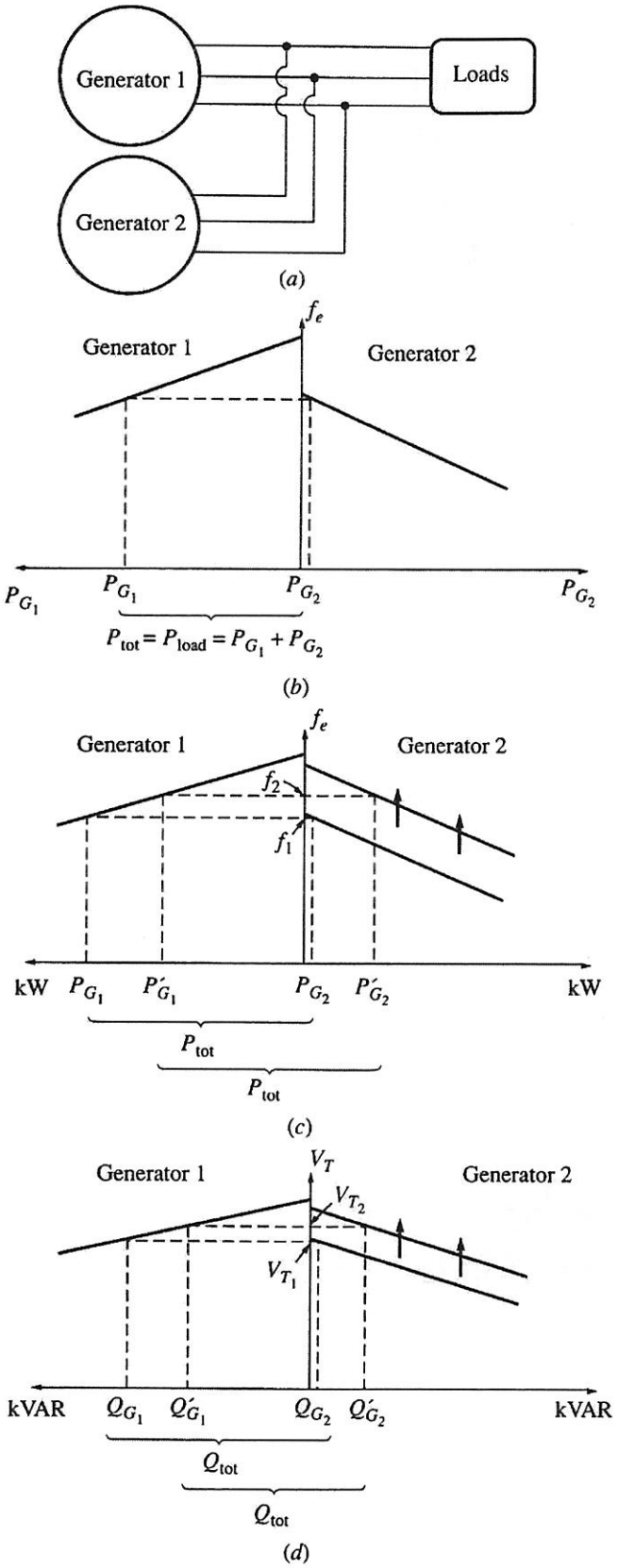
เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสถูกต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในพิกัดที่ใกล้เคียงกันเพื่อช่วยกันจ่ายโหลด ดังแสดงด้วยรูปที่ 5.13 (a) ผลรวมของกำลังไฟฟ้าทั้ง P และ Q ที่ถูกจ่ายโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองจะต้องมีค่าเท่ากับปริมาณของ P และ Q ที่โหลดต้องการ ดังแสดงได้ด้วยสมการที่ (5-4) และ (5-5) ตามลำดับ และแสดงไดอะแกรมโครงบ้านของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าด้วยกันได้ดังรูปที่ 5.13 (b) ซึ่งมีความถี่ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองทำงานร่วมกัน (f_{sys}) อยู่ค่าหนึ่ง

$$P_{tot} = P_{load} = P_{G1} + P_{G2} \tag{5-4}$$

$$Q_{tot} = Q_{load} = Q_{G1} + Q_{G2} \tag{5-5}$$

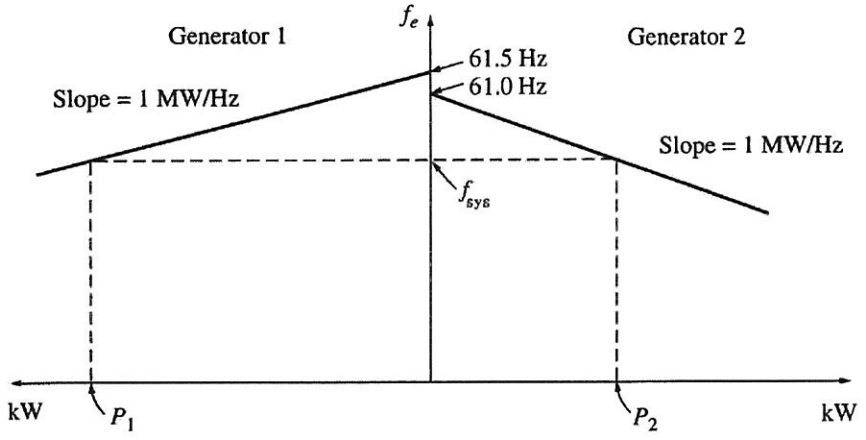
เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้าด้วยกันเรียบร้อยแล้ว ถ้าทำการตั้งค่าตัวบังคับ (governor set point) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ใหม่ ให้ความถี่ในขณะไม่มีโหลด (f_{nl}) มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงไดอะแกรมโครงบ้านได้ดังรูปที่ 5.13 (c) จะได้เส้นความถี่-กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ยกตัวสูงขึ้น จึงได้ความถี่ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองทำงานร่วมกัน (f_{sys}) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก f_1 ไปเป็น f_2 ดังนั้นจากรูปที่ 5.13 (c) จึงได้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง (P) ร่วมกับเครื่องที่ 1 ให้แก่โหลดในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น

ในทำนองเดียวกันนี้ ถ้าทำการเพิ่มค่ากระแสสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ใหม่ ให้มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงไดอะแกรมในรูปที่ 5.13 (d) จะได้เส้นแรงเคลื่อนไฟฟ้า-กำลังรีแอกทีฟของเครื่องที่ 2 ยกตัวสูงขึ้น จึงได้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองทำงานร่วมกันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก V_{T1} ไปเป็น V_{T2} และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 จะจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) ร่วมกับเครื่องที่ 1 ให้แก่โหลดในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 5.13 ไดอะแกรมโครงบ้านของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่องเข้าด้วยกัน ประกอบกับพิจารณาเมื่อความถี่ในขณะไม่มีโหลดและกระแสสนามมีค่าสูงขึ้น ตามลำดับ [2]

ตัวอย่างที่ 5.5 ไดอะแกรมโครงบ้าน (house diagram) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 เครื่อง ที่ต่อขนานกันเพื่อจ่ายโหลดแสดงได้ดังรูป เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 1 มีความถี่ในขณะไม่มีโหลดมีค่า 61.5 Hz และมีความชันของเส้นกำลังไฟฟ้า s_{P1} เท่ากับ 1 MW/Hz เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 มีความถี่ในขณะไม่มีโหลดมีค่า 61.0 Hz และมีความชันของเส้นกำลังไฟฟ้า s_{P2} เท่ากับ 1 MW/Hz เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงให้แก่โหลด 2.5 MW ที่ตัวประกอบกำลัง 0.8 ล้าหลัง



(a) จงหาความถี่ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองทำงานร่วมกัน และกำลังไฟฟ้าในแต่ละเครื่องที่จ่ายให้แก่โหลด

(b) ถ้าโหลดมีปริมาณเพิ่มขึ้นอีก 1 MW จงหาความถี่ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองทำงานร่วมกัน และกำลังไฟฟ้าในแต่ละเครื่องที่จ่ายให้แก่โหลด

(c) ถ้าโหลดมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างข้อ (b) และทำการตั้งค่าตัวบังคับ (governor set point) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ให้ความถี่ในขณะไม่มีโหลดมีค่าสูงขึ้นอีก 0.5 Hz จงหาความถี่ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองทำงานร่วมกัน และกำลังไฟฟ้าในแต่ละเครื่องที่จ่ายให้แก่โหลด

Sol^n

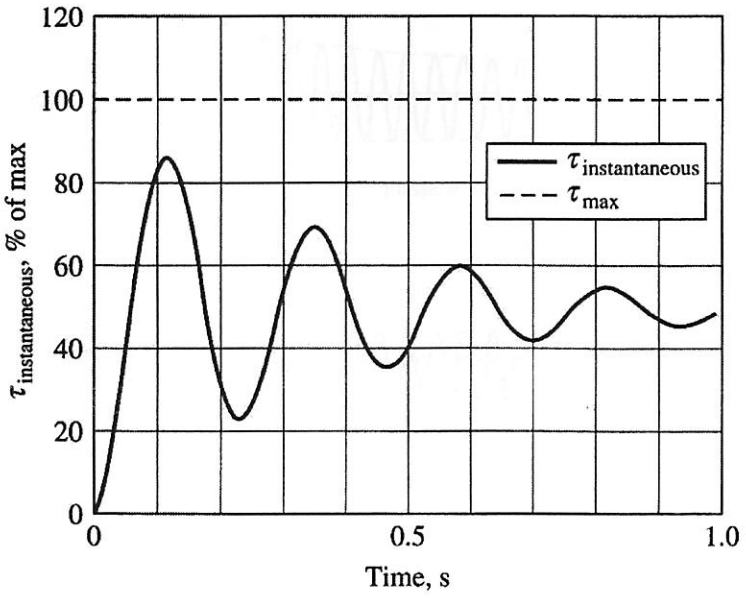
5.3 สภาวะชั่วครู่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เมื่อแรงบิดที่เพลาที่ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน จะเกิดสภาวะชั่วครู่ (transient) ของผลตอบสนองขึ้นด้วยเวลาที่รวดเร็วก่อนที่จะลู่เข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) สภาวะชั่วครู่ยังเกิดขึ้นเมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมาขนานเข้ากับระบบกำลังไฟฟ้าหลักด้วย

ความมีเสถียรภาพ (stability) ของการเกิดสภาวะชั่วครู่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถพิจารณาได้จากค่าแรงบิดเหนี่ยวนำ (τ_{ind}) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ได้เคยกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4 ของบทที่ 2 โดยแรงบิดสูงสุด (maximum torque) จะมีค่าเป็น

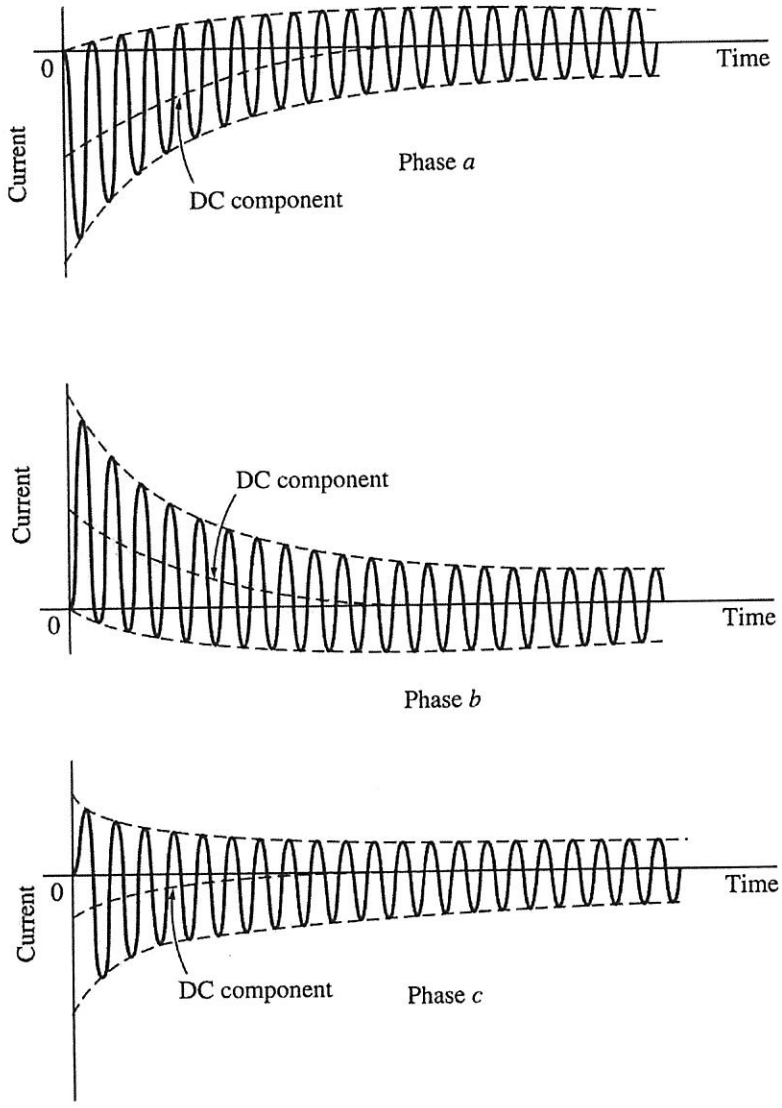
$$\tau_{\max} = \frac{3V_\phi E_A}{\omega_m X_S} \tag{5-6}$$

เมื่อโหลดถูกต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างฉับพลัน ความเร็วที่เพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะหมุนช้าลงจนกระทั่ง $\tau_{\text{ind}} = \tau_{\text{load}}$ โดยมีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสของระบบไฟฟ้าหลัก แต่เนื่องจากโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเฉื่อย (inertia) อยู่มาก จึงทำให้แรงบิดเหนี่ยวนำเกิดการสั่นกวัดแกว่ง (oscillation) ดังแสดงในรูปที่ 5.14 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะขาดเสถียรภาพ (unstable) ทันที ถ้าผลตอบสนองของแรงบิด ณ เวลาใดๆ มีค่ามากกว่าแรงบิดสูงสุด

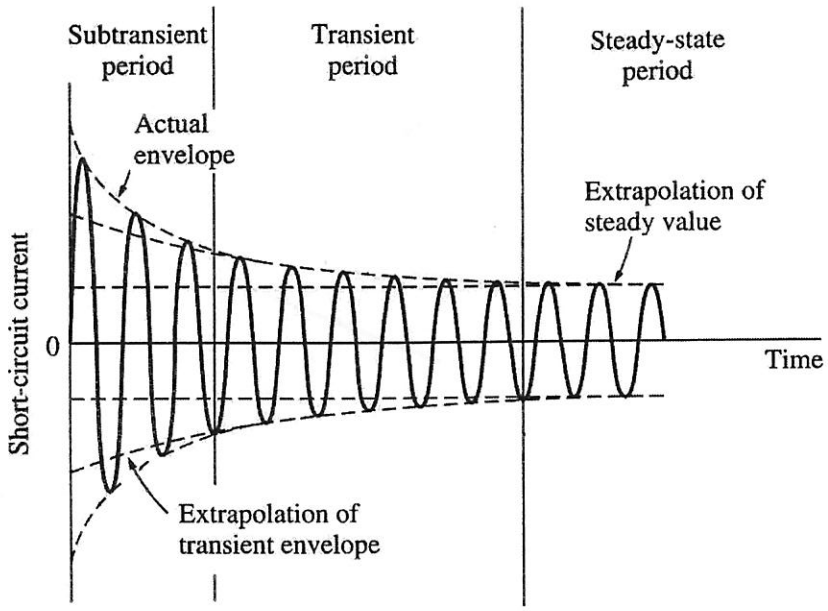


รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองของแรงบิดเมื่อโหลดถูกต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างกะทันหัน [2]

สภาวะชั่วครู่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่อเกิดการลัดวงจร (short-circuit) จะมีความรุนแรงมากเมื่อปลายสายที่ขั้วทั้ง 3 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการลัดวงจรขึ้น (three-phase fault) ซึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังจะเรียกการลัดวงจรว่าความผิดพร่อง (fault) โดยการเกิดสภาวะชั่วครู่จากการลัดวงจรนี้ จะสังเกตปรากฏการณ์ต่างๆ ได้ชัดเจนกว่าการเกิดสภาวะชั่วครู่จากการเปลี่ยนโหลด เมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในแต่ละเฟสหรือที่เรียกว่ากระแสผิดพร่อง (fault current) ดังแสดงในรูปที่ 5.15 โดยสภาวะชั่วครู่ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสจะเป็นผลมาจากองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสตรง (dc component) รวมกับองค์ประกอบที่มีความสมมาตรของไฟฟ้ากระแสสลับ (symmetrical ac component) โดยโหมดองค์ประกอบที่มีความสมมาตรของไฟฟ้ากระแสสลับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.16



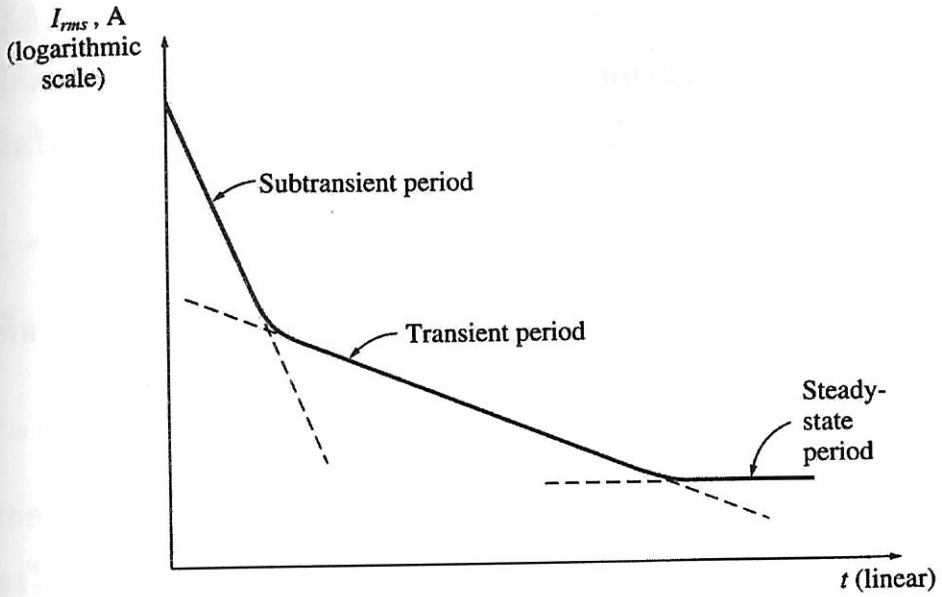
รูปที่ 5.15 กระแสผิดพร่องในแต่ละเฟส เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเกิดการลัดวงจร [2]



รูปที่ 5.16 กระแสผิดพร่องในโหมดองค์ประกอบที่มีความสมมาตรของไฟฟ้ากระแสสลับ [2]

จากรูปที่ 5.16 จะสังเกตเห็นว่า เราจะแบ่งช่วงเวลา (period) ของการสั่นกวัดแกว่งออกเป็น 3 ช่วง โดยในช่วงเวลาแรกภายหลังที่เกิดความผิดพร่อง กระแสสลับจะมีค่าขึ้นสูงและตกลงด้วยความรวดเร็ว เราจะเรียกช่วงเวลานี้ว่า ช่วงเวลาชั่วแวบ (subtransient period) หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ซึ่งจะเรียกช่วงเวลานี้ว่า ช่วงเวลาชั่วครู่ (transient period) และช่วงเวลาภายหลังจากที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วจะถูกเรียกว่า ช่วงเวลาคงตัว (steady-state period)

ขนาดของกระแส rms ในโหมดองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาในสเกลกึ่งลอการิทึม (semilogarithmic scale) สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.17 ซึ่งจะทำให้เราทราบค่าคงที่ทางเวลา (time constant) ในแต่ละช่วงเวลาของกระแสผิดพร่อง กระแส rms ที่ไหลในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่างช่วงเวลาชั่วแวบ (subtransient period) จะถูกเรียกว่ากระแสชั่วแวบ (subtransient current) แทนด้วยสัญลักษณ์ I'' โดยมีค่าคงที่ทางเวลาของช่วงเวลานี้แทนด้วยสัญลักษณ์ T'' ส่วนกระแส rms ที่ไหลในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระหว่างช่วงเวลาชั่วครู่ (transient period) จะถูกเรียกว่ากระแสชั่วครู่ (transient current) แทนด้วยสัญลักษณ์ I' โดยมีค่าคงที่ทางเวลาของช่วงเวลานี้แทนด้วยสัญลักษณ์ T' และเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว เราจะเรียกกระแส rms ในช่วงเวลานี้ว่ากระแสคงตัว (steady-state current) แทนด้วยสัญลักษณ์ I_{SS}



รูปที่ 5.17 ค่าคงที่ทางเวลาในแต่ละช่วงเวลาของกระแสผิดพร่อง [2]

โดยเมื่อ E_A คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ X_S คือซิงโครนัสรีแอกแตนซ์ (synchronous reactance) จะได้

$$I_{SS} = \frac{E_A}{X_S} \tag{5-7}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อ X' และ X'' คือรีแอกแตนซ์ชั่วครู่ (transient reactance) และรีแอกแตนซ์ชั่วแวบ (subtransient reactance) ตามลำดับ จึงได้

$$I' = \frac{E_A}{X'} \tag{5-8}$$

$$I'' = \frac{E_A}{X''} \tag{5-9}$$

และขนาดกระแส rms ของกระแสผิดพร่องที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ณ เวลาใดๆ แสดงได้ดังสมการที่ (5-10)

$$I(t) = (I'' - I')e^{-t/T''} + (I' - I_{SS})e^{-t/T'} + I_{SS} \tag{5-10}$$

ตัวอย่างที่ 5.6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาด 100 MVA, 13.8 kV, 60 Hz ต่อแบบ Y ทำงานที่แรงดันพิกัดและไม่มีโหลด เมื่อเกิดการลัดวงจรทั้ง 3 เฟส (three-phase fault) ขึ้นที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีค่ารีแอกแตนซ์ต่อหน่วย (per unit) ดังนี้

$$X_S = 1.0 \qquad X' = 0.25 \qquad X'' = 0.12$$

และค่าคงที่ทางเวลา (time constant) ดังนี้

$$T' = 1.10\,\text{s} \qquad T'' = 0.04\,\text{s}$$

มีองค์ประกอบเริ่มแรกของไฟฟ้ากระแสตรง (dc component) เฉลี่ยเป็น 50% ขององค์ประกอบเริ่มแรกของไฟฟ้ากระแสสลับ (ac component)

(a) จงหาค่ากระแสไฟฟ้าในโหมดองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อเริ่มแรกเกิดการผิดพร่อง

(b) จงหาค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมด (โหมดองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสสลับรวมกับกระแสตรง) เมื่อเริ่มแรกเกิดการผิดพร่อง

(c) จงหาค่ากระแสไฟฟ้าในโหมดองค์ประกอบของไฟฟ้ากระแสสลับ ที่เวลาผ่านไป 2 คาบ (cycle) และที่เวลา 5 วินาที

Sol^{n}

5.4 แบบฝึกหัดท้ายบท

5.1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 480 V, 375 kVA, 0.8 PF lagging ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 0.4 Ω และละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ซิงโครนัสพิกัด 480 V, 80 kW, 0.8 PF leading ต่อแบบ Y มีค่าซิงโครนัสรีแอกแตนซ์เท่ากับ 1.1 Ω และละทิ้งค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสถูกปรับให้แรงดันที่ขั้วมีค่า 480 V เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัดกำลัง และตัวประกอบกำลัง 1.0

(a) จงหาค่า $\mathbf{E}_A$ ของเครื่องจักรกลทั้งสอง (Ans : $\mathbf{E}_{A,g} = 280\angle 7.9°$ V, $\mathbf{E}_{A,m} = 297\angle -20.9°$ V)

(b) มุมกำลัง (power angle) (Ans : 25.9°)

5.2) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 480 V, 100 kW, 2 ขั้ว 3 เฟส 60 Hz ตัวต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสภาวะไร้โหลดหมุนด้วยความเร็ว 3630 r/min และในสภาวะโหลดเต็มพิกัดหมุนด้วยความเร็ว 3570 r/min โดยเครื่องจักรนี้จะทำงานขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสพิกัด 480 V, 75 kW, 4 ขั้ว 60 Hz ซึ่งตัวต้นกำลังในสภาวะไร้โหลดหมุนด้วยความเร็ว 1800 r/min และในสภาวะโหลดเต็มพิกัดหมุนด้วยความเร็ว 1785 r/min ร่วมกันจ่ายโหลดขนาด 100 kW ที่ 0.85 PF lagging

(a) จงหาความถี่ในขณะทำงานของระบบ (Ans : 59.8 Hz)

(b) จงหากำลังไฟฟ้าในแต่ละเครื่องที่จ่ายให้แก่โหลด (Ans : P_{G1} = 70 kW, P_{G2} = 30 kW)

5.3) สถานีจ่ายไฟฟ้าในระบบกำลัง ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจำนวน 4 เครื่อง พิกัด 120 MVA, 15 kV, 0.85 PF lagging ต่อขนานกันอยู่ ตัวบังคับ (governor) ถูกปรับให้ความถี่ลดลง 3 Hz จากขณะไม่มีโหลดจนถึงมีโหลดเต็มพิกัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เครื่อง ต่างจ่ายกำลังไฟฟ้าคงที่ขนาด 75 MW ที่ความถี่ 60 Hz ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 4 (swing generator) จะทำหน้าที่ปรับความถี่ของระบบให้คงค่าไว้ที่ 60 Hz อยู่เสมอ ถึงแม้ว่าโหลดทั้งระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตาม

(a) ในขณะเวลาหนึ่ง โหลดทั้งระบบมีขนาดเป็น 260 MW ที่ความถี่ 60 Hz จงหาความถี่ในขณะไม่มีโหลดในแต่ละเครื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Ans : $f_{nl1} = f_{nl2} = f_{nl3}$ = 62.21 Hz, f_{nl4} = 61.03 Hz)

(b) ถ้าโหลดทั้งระบบมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 290 MW และไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนตัวบังคับ (governor) จงหาความถี่ของระบบค่าใหม่ (Ans : 59.78 Hz)

(c) จงหาความถี่ในขณะไม่มีโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ 4 ที่ทำหน้าที่คงค่าความถี่ของระบบไว้ที่ 60 Hz (Ans : 61.91 Hz)

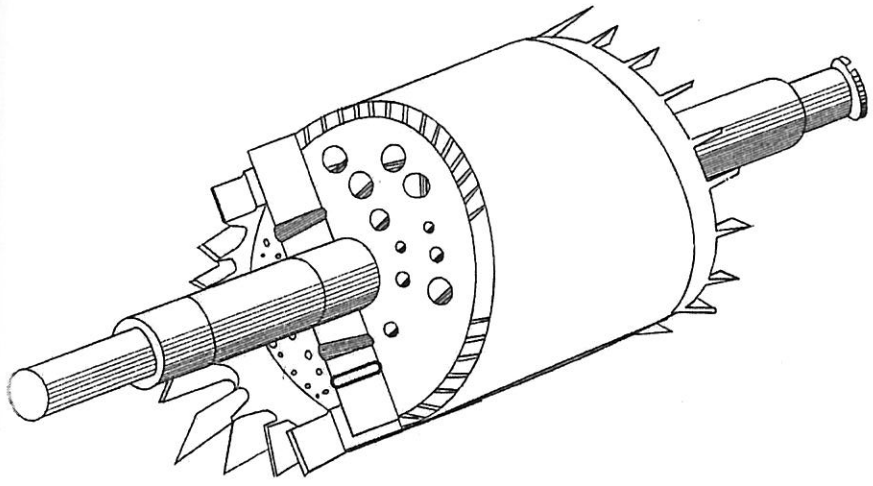
บทที่ 6
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
(3-Phase Induction Motor)

ในบรรดาเครื่องต้นกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน มอเตอร์จะเป็นเครื่องต้นกำลังที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมทั่วๆไป ทั้งนี้เป็นเพราะมอเตอร์สามารถผันแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลได้โดยง่าย และมีราคาของพลังงานถูกเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้จากแหล่งอื่นๆ มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีการใช้งานที่ไม่ยุ่งยาก ราคาถูก ทนทาน และไม่ต้องการการดูแลบำรุงรักษามากนัก ในทางปฏิบัติถือได้ว่าเป็นมอเตอร์ที่ให้ความเร็วเกือบคงที่ตลอดย่านการทำงาน ซึ่งเหมาะกับการใช้งานทางอุตสาหกรรมและอื่นๆ แทบทุกประเภท จนอาจกล่าวได้ว่า ในปัจจุบันกว่าร้อยละ 90 ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรูปเครื่องต้นกำลังจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเกือบทั้งหมด นิโคลา เทสลา (Nikola Tesla) ได้เสนอแนวความคิดเพื่อทำให้ เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์ โรเตอร์สามารถที่จะหมุนได้โดยไม่ต้องป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ขดลวดโรเตอร์เหมือนอย่างเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสที่ศึกษาผ่านมา โดยกระแสในขดลวดโรเตอร์เกิดขึ้นได้เนื่องจากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าจากขดลวดสเตเตอร์ เทสลาได้จดสิทธิบัตรสิ่งประดิษฐ์อันเลื่องชื่อนี้เมื่อปี ค.ศ.1888 และสิ่งประดิษฐ์ของเทสลาได้รับการปรับปรุงทั้งทางด้านโครงสร้างและคุณสมบัติต่างๆ ให้พัฒนาขึ้นเรื่อยๆ หรือที่เราเรียกกันโดยทั่วไปว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motor) ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ผลิตออกมาหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดเล็กแบบใช้กับไฟกระแสสลับเฟสเดียวขนาดไม่ถึง 1 แรงม้า จนถึงขนาดใหญ่ที่ใช้กับไฟกระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งให้แรงม้าถึง 10,000 แรงม้า

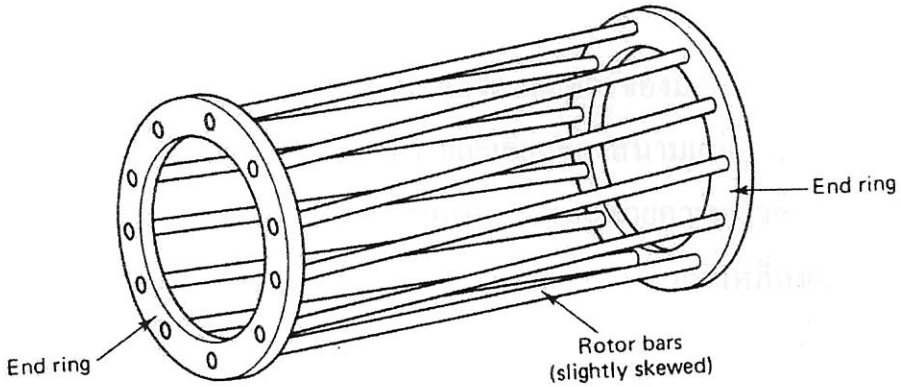
6.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีโครงสร้างแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ สเตเตอร์ (stator) หรือส่วนที่อยู่กับที่ และโรเตอร์ (rotor) หรือส่วนที่หมุน โดยสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเหมือนกันกับสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสทุกประการ และได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อที่ 1.2 ของบทที่ 1 ส่วนโครงสร้างของโรเตอร์นั้นจะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

โครงสร้างของโรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเป็นแบบกรงกระรอก (squirrel cage) หรือเป็นแบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งประมาณ 90% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้โรเตอร์แบบกรงกระรอก ทั้งนี้เพราะโรเตอร์ชนิดนี้ทำได้ง่ายและทนทานที่สุด แสดงโรเตอร์แบบกรงกระรอกได้ดังรูปที่ 6.1 ลักษณะโครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอกจะประกอบไปด้วย แกนโรเตอร์ ขดลวดโรเตอร์ ใบพัดระบายความร้อน และเพลา แกนโรเตอร์จะทำด้วยแผ่นลามิเนต มีลักษณะกลม เซาะผิวภายนอกให้เป็นร่องโดยรอบ ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลา บริเวณระหว่างร่องรอบๆ ขอบกับรูตรงกลางแผ่น จะถูกเจาะเป็นรูไว้เพื่อช่วยในการระบายความร้อนและให้โรเตอร์มีน้ำหนักเบา แผ่นลามิเนตเหล่านี้จะถูกอัดเข้าด้วยกันเรียกว่าแกนโรเตอร์ ส่วนขดลวดโรเตอร์ที่จะถูกฝังในร่องของแกนโรเตอร์ จะไม่เป็นเส้นลวดเล็กๆ เหมือนกับลักษณะของขดลวดสเตเตอร์ แต่จะมีลักษณะเป็นแท่งตัวนำ (rotor bar) ที่ฝังเข้าไปในร่องให้แน่น ซึ่งอาจจะเป็นทองแดง โลหะผสม หรืออะลูมิเนียม ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำจะถูกยึดด้วยตัวนำรูปวงแหวน (end ring) เพื่อลัดวงจรไฟฟ้าไว้อย่างถาวรด้วยการบัดกรีหรือเชื่อมด้วยไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะนำความต้านทานจากภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจรโรเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนได้ จึงทำให้ได้ตัวนำที่มีโครงสร้างเหมือนกับกรงกระรอกดังแสดงด้วยรูปที่ 6.2 ร่องของโรเตอร์เพื่อใช้ฝังแท่งตัวนำจะไม่อยู่ในลักษณะที่ขนานกับเพลา แต่จะวางให้มีลักษณะเฉียงเล็กน้อยเพื่อลดการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กฮัม (megnetic hum) อันเป็นสาเหตุของการเกิดเสียงและการสั่นสะเทือนในมอเตอร์

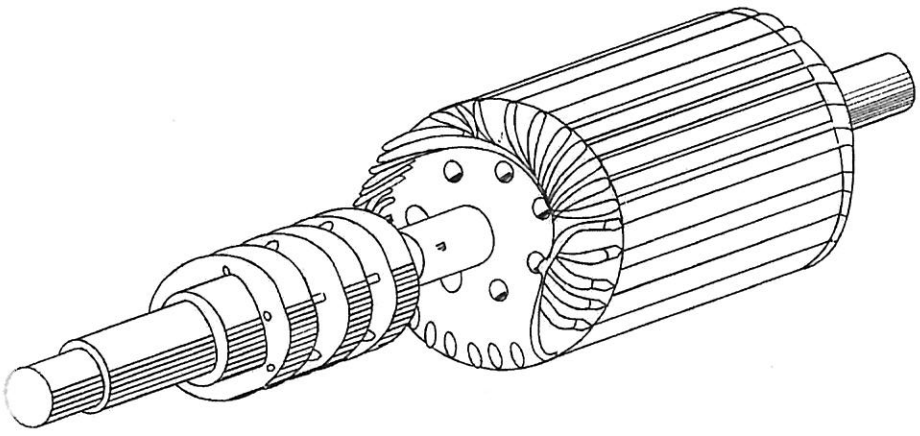


รูปที่ 6.1 โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก [6]



รูปที่ 6.2 ลักษณะตัวนำของโรเตอร์แบบกรงกระรอก [6]

โรเตอร์แบบขดลวดพันหรือแบบวงแหวนลื่น (wound rotor or slip-ring) แสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 6.3 ในโรเตอร์ชนิดนี้ภายในจะต่อแบบสตาร์ (Y) และมีปลายสายออกมา 3 ปลายต่อเข้ากับสลิป-ริงที่ติดกับเพลาของโรเตอร์นั้น โดยโรเตอร์ชนิดนี้สามารถที่จะนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์ต่อเข้ากับสลิป-ริงของโรเตอร์ เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนของมอเตอร์ เป็นการเพิ่มแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์ แต่เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนเข้าสู่ความเร็วปกติแล้ว สลิป-ริงจะถูกลัดวงจรกลายสภาพไปเป็นเหมือนกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก



รูปที่ 6.3 โครงสร้างของโรเตอร์แบบขดลวดพันหรือแบบวงแหวนลื่น [6]

6.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อป้อนไฟกระแสสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 3 ชุด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์ รายละเอียดของสนามแม่เหล็กหมุนได้เคยกล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 1.3 ของบทที่ 1 สนามแม่เหล็กหมุนจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (n_s) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบที่จ่ายให้มอเตอร์ (f_e) และจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (P) ดังแสดงได้ด้วยสมการที่ (6-1)

$$n_s = \frac{120 f_e}{P} \quad \text{(หน่วยรอบต่อนาที (revolution per minute: rpm))} \tag{6-1}$$

หรือ $\omega_s = \frac{4\pi f_e}{P}$ (หน่วยเรเดียนต่อวินาที (radian per second: rad/sec))

ขณะที่โรเตอร์หยุดอยู่กับที่ สนามแม่เหล็กหมุนดังกล่าวจะเคลื่อนที่ตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ มีผลทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรของโรเตอร์ และเนื่องจากวงจรโรเตอร์ถูกทำให้ลัดวงจร โดยวงแหวนทั้งส่วนหัวและท้าย จึงทำให้เกิดกระแสไหลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ จึงเกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ ($\tau_{\text{ind}} = k\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S$) ส่งผลให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัสไปในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหมุน ถ้าความเร็วของโรเตอร์ (n_r) เท่ากับความเร็วซิงโครนัส จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ แรงบิดที่โรเตอร์จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการเร่งความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจึงไม่สามารถทำให้ความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้

6.3 สลิปและความถี่ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโรเตอร์

ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส (n_s) และความเร็วของโรเตอร์ (n_r) จะเรียกว่า ความเร็วสลิป (slip speed) และค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วสลิปต่อความเร็วซิงโครนัสจะเรียกว่า สลิป (slip: s) ซึ่งแสดงได้คือ

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \tag{6-2}$$

หรือ $$\%s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \tag{6-3}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (6-2) จึงได้ความเร็วของโรเตอร์ คือ

$$n_r = (1-s)n_s \tag{6-4}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า หากค่าสลิปเป็น 0 จะหมายถึง ความเร็วของโรเตอร์มีค่าเท่ากับความเร็วซิงโครนัส โดยจะเกิดขึ้นได้เมื่อพิจารณาในขณะไม่มีโหลด (no load) ส่วนในกรณีที่สลิปมีค่าเป็น 1 จะหมายถึงความเร็วของโรเตอร์มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งก็คือมอเตอร์ไม่ได้หมุนนั่นเอง

ในขณะที่โรเตอร์ยังไม่หมุนหรือหยุดอยู่กับที่นั้น ความถี่ไฟฟ้าของโรเตอร์ (f_r) จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (f_e) ที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ แต่เมื่อมอเตอร์หรือโรเตอร์เริ่มหมุน ความถี่ไฟฟ้าของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์ (relative speed) หรือความเร็วสลิป ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (6-5) และความถี่ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในโรเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อโรเตอร์หมุนที่ความเร็วซิงโครนัส

$$f_r = s \cdot f_e \tag{6-5}$$

<u>ตัวอย่างที่ 6.1</u> มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 10 hp, 208 V, 4 ขั้ว, 60 Hz, ต่อแบบ Y โดยมอเตอร์ทำงานที่โหลดเต็มพิกัด (full-load) ที่ค่าสลิป 5%

(a) จงหาความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์

(b) จงหาความเร็วของมอเตอร์ที่ค่าพิกัดโหลด (rated load)

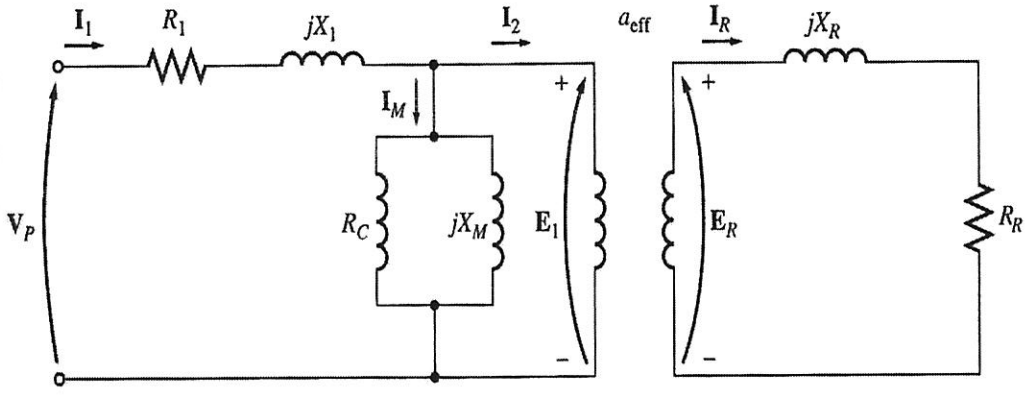
(c) จงหาความถี่ไฟฟ้าของโรเตอร์ที่ค่าพิกัดโหลด

(d) จงหาแรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ที่ค่าพิกัดโหลด

<u>Sol^n</u>

6.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

จากการพิจารณาโครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังที่กล่าวมา จะเห็นว่ามีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า คือแรงดันในวงจรของโรเตอร์เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของวงจรสเตเตอร์ โดยการเปรียบขดลวดโรเตอร์ของมอเตอร์คือขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) ของหม้อแปลง ส่วนขดลวดสเตเตอร์ก็คือขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) นั่นเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกิดขึ้นทางวงจรของโรเตอร์ จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านวงจรสเตเตอร์ด้วย วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ*ต่อเฟส* ที่เกิดจากการประยุกต์การนำวงจรสมมูลของหม้อแปลงมาพิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟส [2]

วงจรสมมูลดังรูปที่ 6.4 ยังไม่พร้อมที่จะนำไปใช้งาน เนื่องจากมีการเชื่อมโยงระหว่างวงจรสเตเตอร์และโรเตอร์ผ่านฟลักซ์เชื่อมโยงที่อยู่ในรูปของอัตราส่วนขดลวดประสิทธิผล (effective turn ratio: a_{eff}) ดังนั้นการดำเนินงานแปลงเป็นวงจรสมมูลที่นำไปใช้งานได้จะใช้หลักการเช่นเดียวกับวงจรสมมูลของหม้อแปลง กล่าวคือ อิมพีแดนซ์จากวงจรโรเตอร์จะถูกโอนย้ายมาที่สเตเตอร์ผ่านการคูณปรับด้วยฟังก์ชัน a_{eff} โดยค่าพารามิเตอร์ของสเตเตอร์จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าพารามิเตอร์ทางวงจรของโรเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายหลักการนี้ได้ด้วยการตั้งต้นที่แบบจำลองวงจรของโรเตอร์ (rotor circuit model)

วงจรของโรเตอร์จะประกอบด้วยความต้านทาน R_R และรีแอกแตนซ์ X_R ค่าแรงดันเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ E_R จะขึ้นอยู่กับความเร็วสัมพัทธ์หรือความเร็วสลิป โดยถ้าให้ E_{R0} คือแรงดันเหนี่ยวนำในวงจรโรเตอร์ขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่งหรือเรียกว่าสภาวะที่โรเตอร์ถูกยึด (locked-rotor) ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่สลิป s ใดๆ จึงมีค่าเท่ากับ

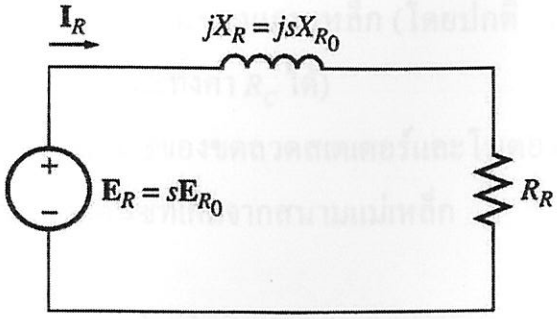
$$E_R = s\,E_{R0} \tag{6-6}$$

ในวงจรโรเตอร์ค่าความต้านทาน R_R จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับสลิป s ใดๆ ในขณะที่รีแอกแตนซ์ X_R จะขึ้นอยู่กับสลิป s เนื่องจาก X_R มีความสัมพันธ์กับความถี่ แสดงได้ดังนี้

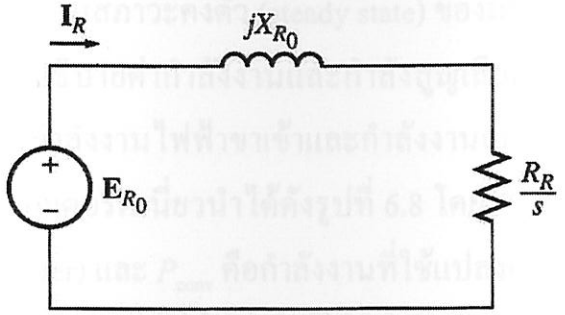
$$X_R = 2\pi f_r L_R = 2\pi s f_e L_R = s(2\pi f_e L_R) = s\,X_{R0} \tag{6-7}$$

ซึ่ง X_{R0} คือรีแอกแตนซ์ในวงจรโรเตอร์ขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่งหรือที่โรเตอร์ถูกยึด

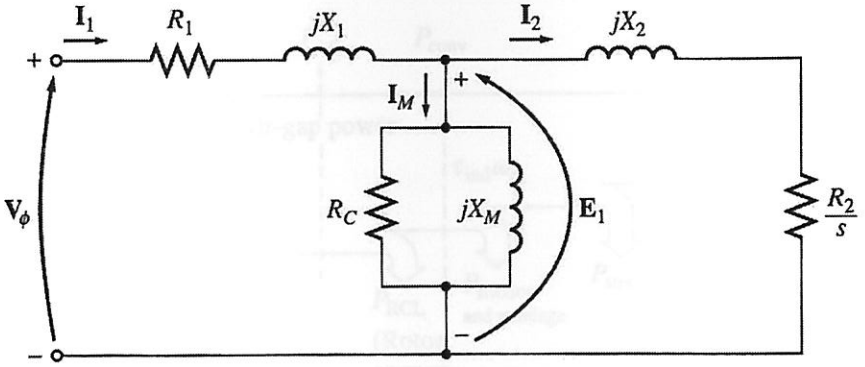
จากผลที่ปรากฏจึงแสดงวงจรสมมูลของโรเตอร์ที่แสดงอยู่ในรูปของแรงดันเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าสลิปได้ดังรูปที่ 6.5 หรืออาจแสดงอยู่ในรูปของแรงดันเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่มีค่าคงที่ดังรูปที่ 6.6 ซึ่งรูปที่ 6.6 นี้ ก็คือแบบจำลองวงจรโรเตอร์ที่จะถูกย้ายไปทางด้านสเตเตอร์ โดยใช้หลักการย้ายข้างของหม้อแปลงผ่านตัวคูณปรับ a_{eff} (รายละเอียดการย้ายข้างจะไม่ขอกล่าวไว้ในที่นี้) ดังนั้นจึงได้วงจรสมมูลที่สมบรูณ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์โดยผ่านการคูณปรับ a_{eff}แล้ว แสดงได้ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.5 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่แสดงในรูปของแรงดันเหนี่ยวนำที่มีการเปลี่ยนแปลง [2]



รูปที่ 6.6 วงจรสมมูลของโรเตอร์ที่แสดงในรูปของแรงดันเหนี่ยวนำที่มีค่าคงที่ [2]



รูปที่ 6.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์ [2]

โดยที่ V_ϕ คือ แรงดันที่จ่ายให้ขดลวดสเตเตอร์

$\mathrm{I}_1, \mathrm{I}_2$ คือ กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

I_M คือ กระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

R_1, R_2 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

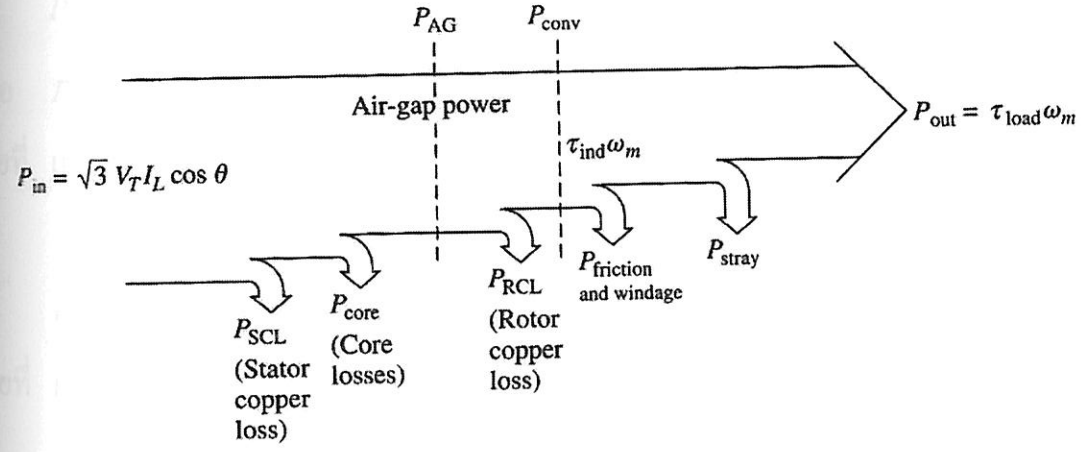
R_C คือ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก (โดยปกติ R_C จะมีค่าสูงกว่า X_M มาก ดังนั้นจึงอาจละทิ้งค่า R_C ได้)

X_1, X_2 คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ

X_M คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

6.5 กำลังงานและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปที่ 6.7 จะช่วยในการอธิบายการทำงานและพิจารณาถึงคุณลักษณะต่างๆ ในสภาวะคงตัว (steady state) ของมอเตอร์ให้เข้าใจและชัดเจนมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยในการอธิบายค่ากำลังงานและกำลังสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ได้โดยง่าย ความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าขาเข้าและกำลังงานกลขาออกแสดงเป็นไดอะแกรมการไหลของกำลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 6.8 โดย P_{AG} คือกำลังงานที่ใช้ถ่ายโอนข้ามช่องอากาศ (air-gap power) และ P_{conv} คือกำลังงานที่ใช้แปลงผันกำลังไฟฟ้าไปเป็นกำลังกล หรืออาจเรียกว่ากำลังงานภายใน (internal power) ส่วน $P_{F\&W}$, P_{stray} และ P_{core} ในบางครั้งอาจรวมเป็นก้อนเดียวกันเรียกว่ากำลังงานสูญเสียจากการหมุนตัวเปล่า (rotational losses)



รูปที่ 6.8 ไดอะแกรมการไหลของกำลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ [3]

พิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่อเฟสในรูปที่ 6.7 ประกอบกับไดอะแกรมการไหลของกำลังงานในรูปที่ 6.8 จะทำให้เราสามารถหาค่ากำลังงานและกำลังสูญเสียต่างๆ ได้ดังนี้

กำลังงานขาเข้า: $P_{\text{in}} = 3V_{\phi} I_{\phi} \cos\theta = \sqrt{3}\, V_T I_L \cos\theta$ (6-8)

กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์: $P_{\text{SCL}} = 3I_1^2 R_1$ (6-9)

กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก: $P_{\text{core}} = 3(E_1^2 / R_C)$ (6-10)

$P_{\text{AG}} = P_{\text{in}} - P_{\text{SCL}} - P_{\text{core}}$ (6-11)

หรือ $P_{\text{AG}} = 3I_2^2 (R_2/s)$ (6-12)

หรือ เพื่อไม่ให้ต้องเสียเวลาหาค่า I_2 ในสมการที่ (6-12) ด้วยวิธีการแบ่งกระแส (current divider) จึงอาจเลี่ยงไปใช้สูตร $P_{\text{AG}} = 3I_1^2 R_{\text{f}}$ ได้ เมื่อ R_{f} คือส่วนของจำนวนจริงระหว่างการขนานกันระหว่าง jX_M และ $\frac{R_2}{s} + jX_2$ (พิจารณาวงจรสมมูลรูปที่ 6.7 ประกอบ โดยที่ละทิ้งค่า R_C)

กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์: $P_{\text{RCL}} = 3I_2^2 R_2$ (6-13)

หรือ $P_{\text{RCL}} = s\, P_{\text{AG}}$ (6-14)

$$P_{\text{conv}} = P_{\text{AG}} - P_{\text{RCL}} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (6\text{-}15)$$

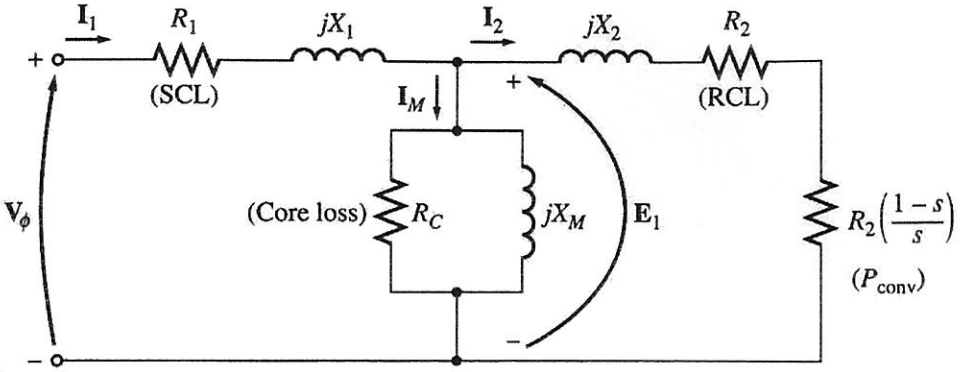
หรือ $P_{\text{conv}} = (1-s)\, P_{\text{AG}}$ (6-16)

โดยที่ แรงบิดเหนี่ยวนำหรือแรงบิดภายใน (internal torque): $\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_m} = \frac{P_{\text{AG}}}{\omega_s}$ (6-17)

กำลังงานขาออก: $P_{\text{out}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{F\&W}} - P_{\text{stray}}$ (6-18)

โดยที่ แรงบิดที่เพลา: $\tau_{\text{shaft}} = \tau_{\text{load}} = \tau_{\text{out}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega_m}$ (6-19)

จากกำลังงานและกำลังสูญเสียต่างๆ ที่ปรากฏ บางครั้งเพื่อง่ายต่อการพิจารณาจึงอาจแบ่งความต้านทานในส่วนของวงจรโรเตอร์ที่ปรากฏในวงจรสมมูลรูปที่ 6.7 เป็น 2 ส่วน เพื่อแยก P_{RCL} กับ P_{conv} ให้เห็นอย่างชัดเจน ดังแสดงด้วยวงจรสมมูลรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แยก P_{RCL} กับ P_{conv} ให้เห็นอย่างชัดเจน [2]

ตัวอย่างที่ 6.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 480 V 50 hp ถูกป้อนด้วยกระแส 60 A ที่ 0.85 PF lagging กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์มีค่า 2 kW และ 700 W ตามลำดับ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลมมีค่า 600 W และกำลังงานสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กมีค่า 1800 W ส่วนกำลังงานสูญเสียสเตรย์ (stray loss) ถูกละทิ้ง จงคำนวณหา

(a) กำลังงานช่องอากาศ P_{AG}

(b) กำลังงานภายใน P_{conv}

(c) กำลังงานขาออก P_{out}

(d) ประสิทธิภาพของมอเตอร์

Sol^{n}

ตัวอย่างที่ 6.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 ขั้ว 60 Hz ทำงานที่ความเร็ว 3502 r/min ที่กำลังงานขาเข้า 15.7 kW และกระแสที่ไหลตรงขั้วเท่ากับ 22.6 A เมื่อความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์มีค่า 0.20 Ω จงหาค่ากำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์

Sol^{n}

ตัวอย่างที่ 6.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว 60 Hz ทำงานที่สลิป 3 % และกระแสในแต่ละเฟสของโรเตอร์มีค่า 200 A โดยที่วงจรโรเตอร์ต่อแบบ Y ค่าความต้านทานต่อเฟสมีค่า 0.03 Ω จงหา

(a) กำลังงานช่องอากาศ

(b) กำลังงานภายใน และแรงบิดภายใน

(c) กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์

Sol^{n}

<u>ตัวอย่างที่ 6.5</u> มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว ต่อแบบ Y, 460 V, 25 hp, 60 Hz มีค่าอิมพิแดนซ์ต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์คือ

$R_1 = 0.641\,\Omega$ $R_2 = 0.332\,\Omega$

$X_1 = 1.106\,\Omega$ $X_2 = 0.464\,\Omega$ $X_M = 26.3\,\Omega$

กำลังงานสูญเสียจากการหมุนตัวเปล่า (rotational loss) มีค่า 1100 W และสมมติให้มีค่าคงที่ ซึ่งกำลังงานสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กถูกรวมเป็นก้อนอยู่ในนี้แล้ว สำหรับสลิป 2.2 % ที่พิกัดแรงดันและพิกัดความถี่ จงคำนวณหา

(a) ความเร็ว

(b) กระแสสเตเตอร์

(c) ตัวประกอบกำลัง

(d) P_{conv} และ P_{out}

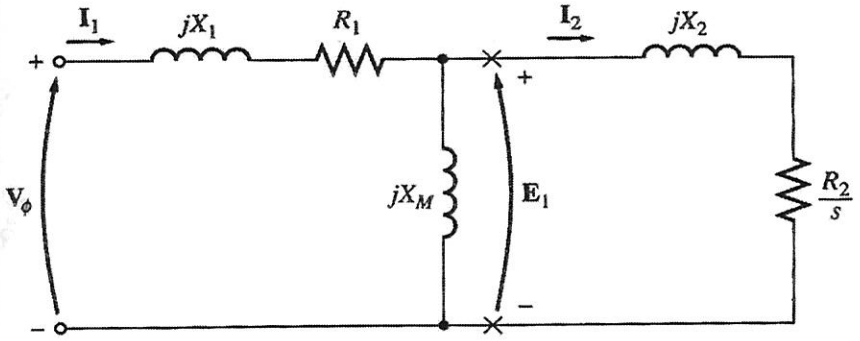
(e) τ_{ind} และ τ_{load}

(f) ประสิทธิภาพ

Sol^n

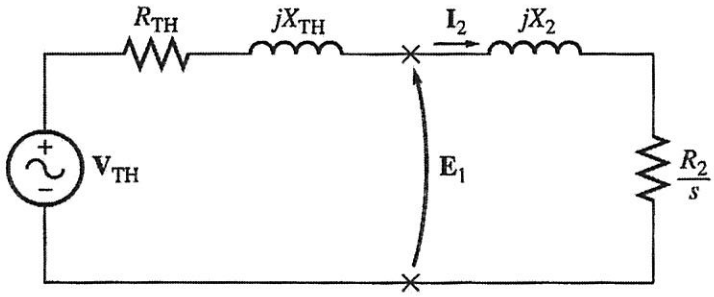
6.6 การหาแรงบิดและกำลังงานโดยใช้ทฤษฎีเทวินิน (Thevenin's Theorem)

โดยส่วนใหญ่เพื่อง่ายต่อการคำนวณ ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก R_C ซึ่งแสดงในวงจรสมมูลรูปที่ 6.7 มักจะถูกละทิ้ง เนื่องจากมีค่ามากกว่าค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก X_M อยู่มาก ดังนั้นจึงแสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์เมื่อไม่พิจารณาผลของ R_C ได้ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยประมาณ [2]

การหากระแสโรเตอร์ (I_2) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าแรงบิดเหนี่ยวนำ (τ_{ind}) สามารถคำนวณได้โดยง่ายโดยใช้วงจรสมมูลของเทวินินเข้าช่วย ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อประยุกต์ทฤษฎีเทวินิน [2]

จากการพิจารณารูปที่ 6.10 ประกอบกับรูปที่ 6.11 จึงได้แรงดันเทวินินคือ

$$\mathbf{V}_{TH} = \mathbf{V}_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M}$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาดจึงได้

$$V_{\text{TH}} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \tag{6-20}$$

และจะได้อิมพีแดนซ์เทวินินคือ

$$Z_{\text{TH}} = R_{\text{TH}} + jX_{\text{TH}} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \tag{6-21}$$

ดังนั้นจึงคำนวณกระแสโรเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{V}_{\text{TH}}}{R_{\text{TH}} + R_2/s + jX_{\text{TH}} + jX_2}$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะขนาด

$$I_2 = \frac{V_{\text{TH}}}{\sqrt{(R_{\text{TH}} + R_2/s)^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2}} \tag{6-22}$$

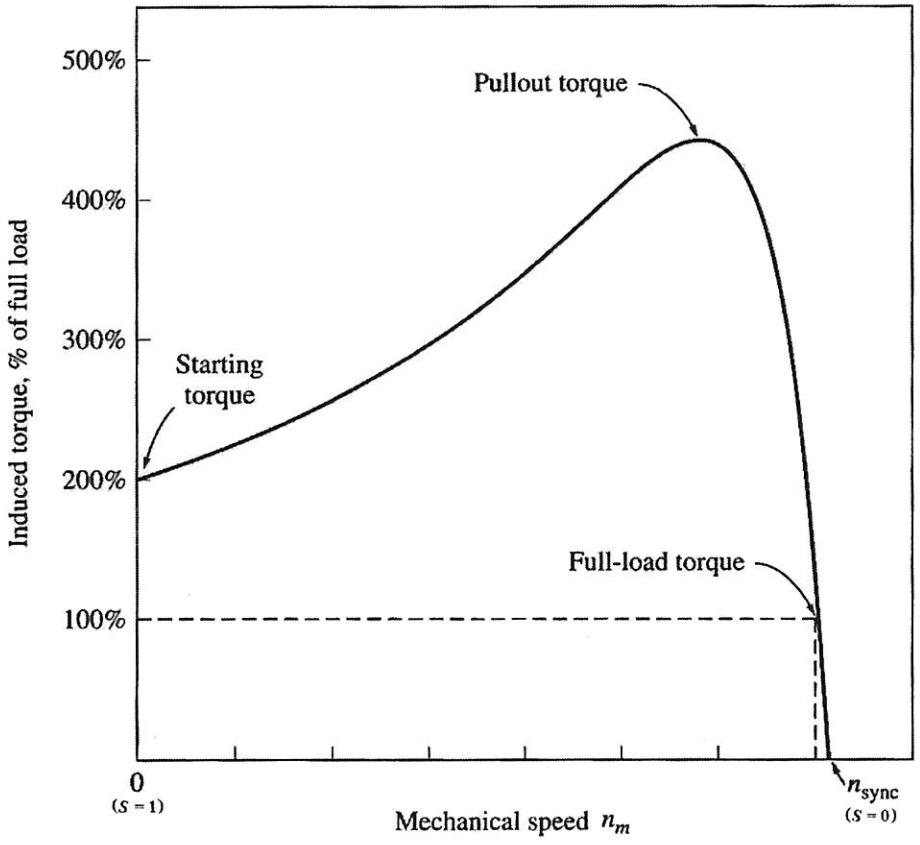
เราสามารถคำนวณกำลังงานผ่านช่องอากาศได้จาก

$$P_{\text{AG}} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{3V_{\text{TH}}^2 R_2/s}{(R_{\text{TH}} + R_2/s)^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2} \tag{6-23}$$

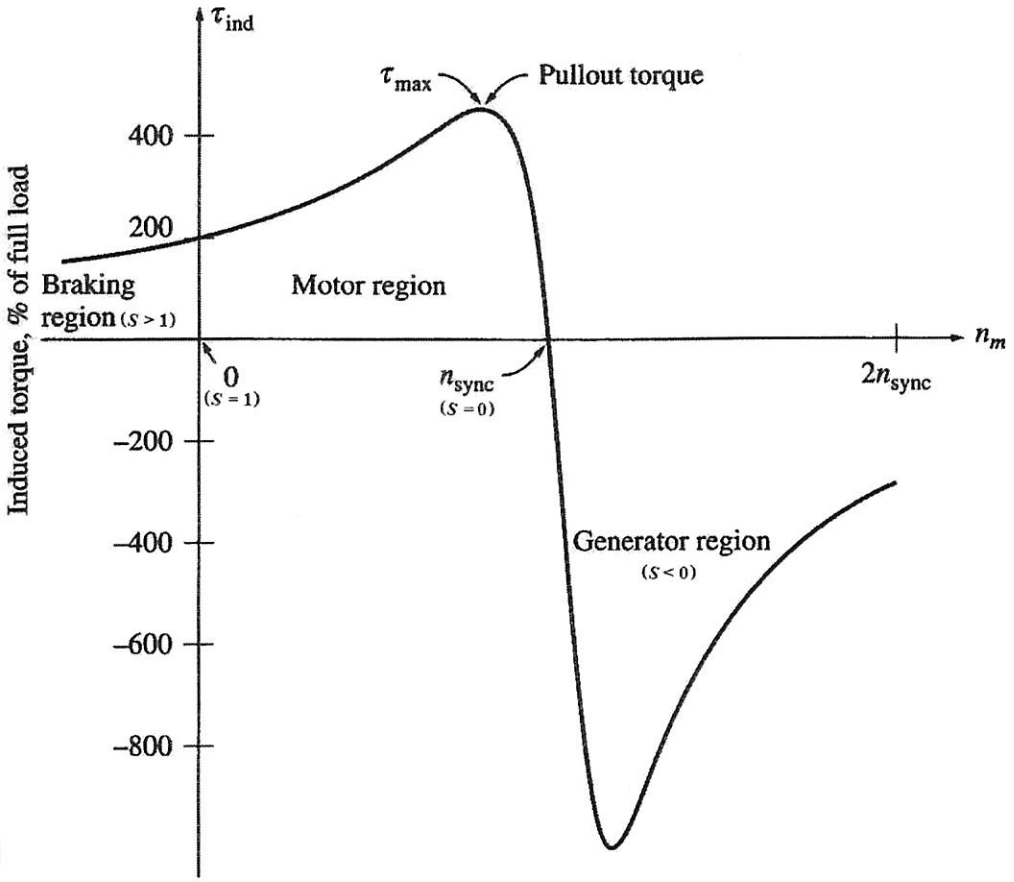
และคำนวณแรงบิดเหนี่ยวนำได้จาก

$$\tau_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{AG}}}{\omega_s} = \frac{3V_{\text{TH}}^2 R_2/s}{\omega_s\left[(R_{\text{TH}} + R_2/s)^2 + (X_{\text{TH}} + X_2)^2\right]} \tag{6-24}$$

การพล็อตกราฟคุณลักษณะแรงบิดเหนี่ยวนำเทียบกับความเร็ว (T-S Curve) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ แสดงได้ในรูปที่ 6.12 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ามอเตอร์จะมีย่านการทำงานที่ค่าสลิปน้อยมากประมาณ 0.01-0.05 (1-5 %) โดยช่วงระหว่างสภาวะไร้โหลด (no load) ถึงโหลดเต็มพิกัด (full-load) จะมีค่าเป็นเชิงเส้น และค่าแรงบิดสูงสุด (maximum torque or pullout torque or breakdown torque) จะมีค่าประมาณ 2-3 เท่าของแรงบิดพิกัด (full-load torque) และสามารถแสดงเป็นย่านการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 6.13 โดยที่ $s > 0$ เครื่องจะทำงานเป็นมอเตอร์แต่ถ้า $s > 1$ จะเป็นสภาวะการเบรกของมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์จะหมุนกลับทางในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุน ส่วน $s < 0$ เครื่องจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดในกรณีที่เพิ่มความเร็วของมอเตอร์เข้าที่เพลาจนมีค่ามากกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน และกำลังงานที่จ่ายให้มอเตอร์จากแหล่งจ่ายจะไหลย้อนกลับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายประการ เนื่องจากไม่มีขดลวดสนามเหมือนอย่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำไม่สามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟ (reactive power) ออกไปได้

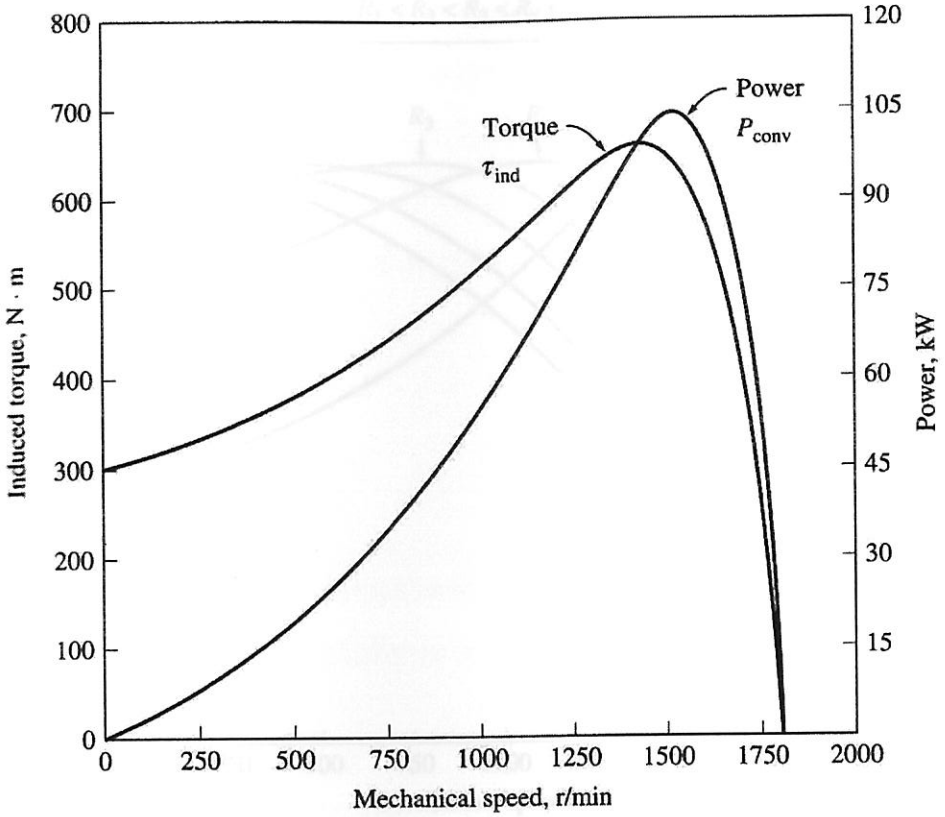


รูปที่ 6.12 เส้นกราฟคุณลักษณะ T-S ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2]



รูปที่ 6.13 T-S Curve ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งที่ทำงานเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [2]

เมื่อนำแรงบิดเหนี่ยวนำ $\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$ จากสมการที่ (6-24) มาพล็อตเทียบกับความเร็วของมอเตอร์พร้อมกับกำลังงานภายใน $P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m$ ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.14 จะสังเกตเห็นว่า กำลังงานภายในจะมีค่าเป็นศูนย์ในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่องแต่แรงบิดเหนี่ยวนำจะไม่เป็นศูนย์ และความเร็วที่มอเตอร์ให้แรงบิดเหนี่ยวนำสูงสุดประกอบกับให้กำลังงานภายในสูงสุดจะไม่ใช่ความเร็ว (สลิป) ณ จุดเดียวกัน ซึ่งค่าแรงบิดเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุดเมื่อ P_{AG} มีค่ามากที่สุด ซึ่งก็คือกำลังงานที่ถูกจ่ายให้ $\frac{R_2}{s}$ ในรูปที่ 6.11 มีค่าสูงสุดนั่นเอง (หลักการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power transfer))



รูปที่ 6.14 กราฟแรงบิดเหนี่ยวนำและกำลังงานภายในเทียบกับความเร็วของมอเตอร์ [2]

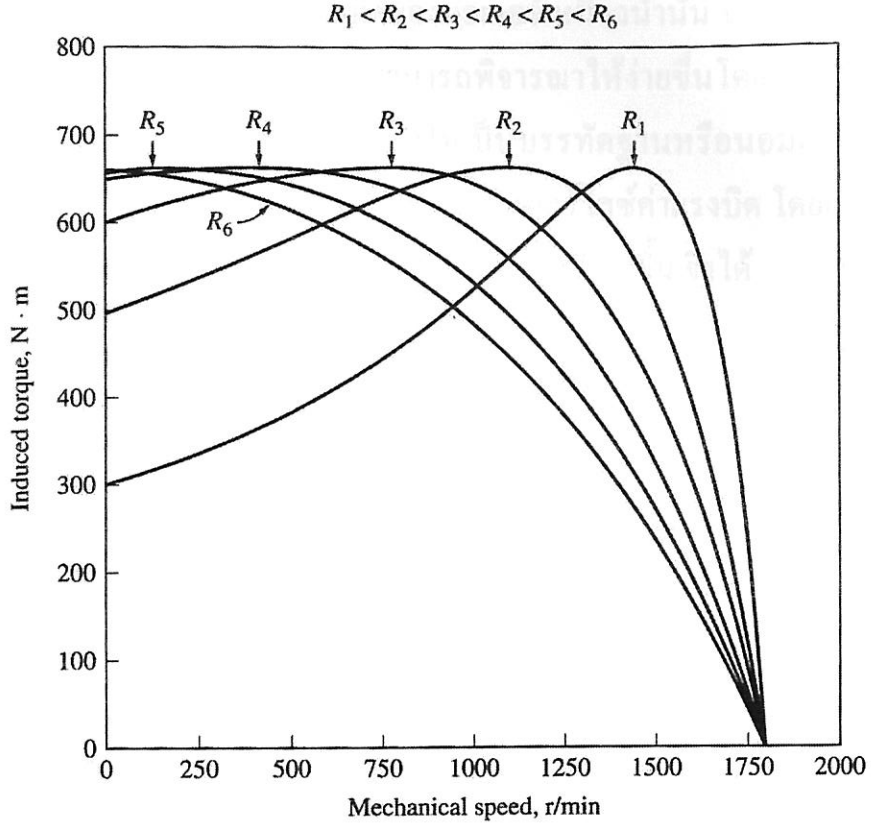
หลักการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อขนาดอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าเท่ากับขนาดอิมพีแดนซ์ทางด้านแหล่งจ่าย ดังนั้นจากรูปที่ 6.11 จึงเกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อ

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \tag{6-25}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (6-25) สลิปที่ทำให้เกิดค่าแรงบิดสูงสุดคือ

$$s_{maxT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \tag{6-26}$$

ซึ่งจากสมการที่ (6-26) จะสังเกตเห็นว่า s_{maxT} จะแปรผันโดยตรงกับความต้านทานของโรเตอร์ R_2 พร้อมแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 6.15 ซึ่งเป็นการแสดง T-S Curve ของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดขดลวดพัน (wound rotor) เมื่อความต้านทานในวงจรโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.15 T-S Curve ของมอเตอร์เมื่อความต้านทานในวงจรโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง [2]

ค่าแรงบิดสูงสุดสามารถคำนวณได้โดยการแทน s_{maxT} ไปในสมการที่ (6-24) จึงได้แรงบิดสูงสุดแสดงได้ดังสมการที่ (6-27) ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าแรงบิดจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังสองของแหล่งจ่ายแรงดัน และ τ_{max} จะไม่ขึ้นอยู่กับความต้านทานโรเตอร์เหมือนอย่าง s_{maxT}

$$\tau_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_s\left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}\right]} \qquad (6\text{-}27)$$

จากรูปที่ 6.15 จะสังเกตเห็นว่าถ้าความต้านทานโรเตอร์เพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์ที่ทำให้ได้แรงบิดสูงสุดจะมีค่าลดลง (สลิปสูงขึ้น) แต่แรงบิดสูงสุดก็ยังคงมีค่าคงที่ เพราะฉะนั้นจึงเห็นข้อดีของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดขดลวดพัน ที่ความต้านทานโรเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำหรับการขับโหลดหนักๆ ในช่วงเริ่มเดินเครื่อง

และจะสังเกตเห็นว่า สมการแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้น จะประกอบด้วยค่าตัวแปรต่างๆ ค่อนข้างมาก ซึ่งลักษณะเช่นนี้เราสามารถพิจารณาให้ง่ายขึ้นโดยการหาสัดส่วนของค่าแรงบิดเปรียบเทียบกัน หรือที่เรียกว่าการทำให้เป็นบรรทัดฐานหรือนอมอร์ไลซ์ (normalize) นั่นเอง จากสมการที่ (6-24) และ (6-27) เมื่อทำการนอมอร์ไลซ์ค่าแรงบิด โดยการ*ละทิ้ง*ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ ($R_1 = 0$) เพื่อการดำเนินงานที่ง่ายขึ้น จึงได้

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{maxT}} + \frac{s_{maxT}}{s}} \tag{6-28}$$

ตัวอย่างที่ 6.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดขดลวดพัน (wound rotor) 3 เฟส 4 ขั้ว ต่อแบบ Y, 460 V, 25 hp, 60 Hz มีค่าอิมพิแดนซ์ต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์คือ

$R_1 = 0.641\ \Omega$ $R_2 = 0.332\ \Omega$

$X_1 = 1.106\ \Omega$ $X_2 = 0.464\ \Omega$ $X_M = 26.3\ \Omega$

(a) จงหาแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ และแรงบิดสูงสุดนี้เกิดขึ้นที่ความเร็วและสลิปเท่าใด

(b) จงหาแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่อง

(c) ถ้าความต้านทานของโรเตอร์เพิ่มเป็นสองเท่า จงหาความเร็วที่ทำให้เกิดค่าแรงบิดสูงสุด และแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องค่าใหม่

Sol^n

<u>ตัวอย่างที่ 6.7</u> มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6 ขั้ว ต่อแบบ Y, 220 V, 10 hp, 60 Hz มีค่าอิมพิแดนซ์ต่อเฟสที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์คือ

$R_1 = 0.3\,\Omega$ $R_2 = 0.15\,\Omega$

$X_1 = 0.5\,\Omega$ $X_2 = 0.2\,\Omega$ $X_M = 15\,\Omega$

(a) จงหาค่ากระแสโหลด (I_2) ที่เทียบมาทางด้านสเตเตอร์ แรงบิดภายใน (internal torque) และกำลังงานภายใน (internal power) ที่สลิปเท่ากับ 0.02

(b) จงหาค่าแรงบิดภายในสูงสุด พร้อมค่าสลิปและค่าความเร็วที่เกิดแรงบิดสูงสุดนี้

(c) จงหาแรงบิดภายในตอนเริ่มเดินเครื่อง พร้อมค่า I_2 ที่เกิดแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องนี้

<u>Sol^n</u>

ตัวอย่างที่ 6.8 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว ต่อแบบ Y, 230 V, 10 hp, 60 Hz ให้แรงบิดภายในเต็มพิกัดที่สลิป 0.04 โดยมอเตอร์ต่อเข้ากับสายส่งที่มีแรงดันและความถี่ที่พิกัดของมอเตอร์ และทิ้งกำลังงานสูญเสียจากการหมุนตัวเปล่า (rotational loss) และค่าคงที่ต่างๆ ของมอเตอร์เทียบมาทางด้านสเตเตอร์มีดังนี้

$R_1 = 0.36\,\Omega$

$X_1 = X_2 = 0.47\,\Omega$

$X_M = 15.5\,\Omega$

(a) จงหาค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์

(b) จงหาค่าแรงบิดภายในสูงสุด ที่แรงดันและความถี่พิกัด พร้อมค่าสลิปที่ให้แรงบิดสูงสุดนี้

(c) จงหาแรงบิดภายในตอนเริ่มเดินเครื่อง ที่แรงดันและความถี่พิกัด

Sol^n

ตัวอย่างที่ 6.9 มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดขดลวดพัน 3 เฟส 50 hp 440 V 4 ขั้ว ให้กำลังงานขาออกเต็มพิกัดที่ความเร็ว 1746 rpm เมื่อต่อเข้ากับแรงดันและความถี่ที่ค่าพิกัดของมอเตอร์โดยที่วงแหวนลื่น (slip-ring) ถูกลัดวงจรไว้ แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์ให้ได้ที่แรงดันและความถี่พิกัดมีค่าเท่ากับ 200 % ของแรงบิดเต็มพิกัด ความต้านทานต่อเฟสของขดลวดโรเตอร์เท่ากับ 0.1 Ω และทิ้งกำลังงานสูญเสียจากการหมุนตัวเปล่า และกำลังงานสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์

(a) จงหากำลังงานสูญเสียในขดลวดโรเตอร์ ที่โหลดเต็มพิกัด

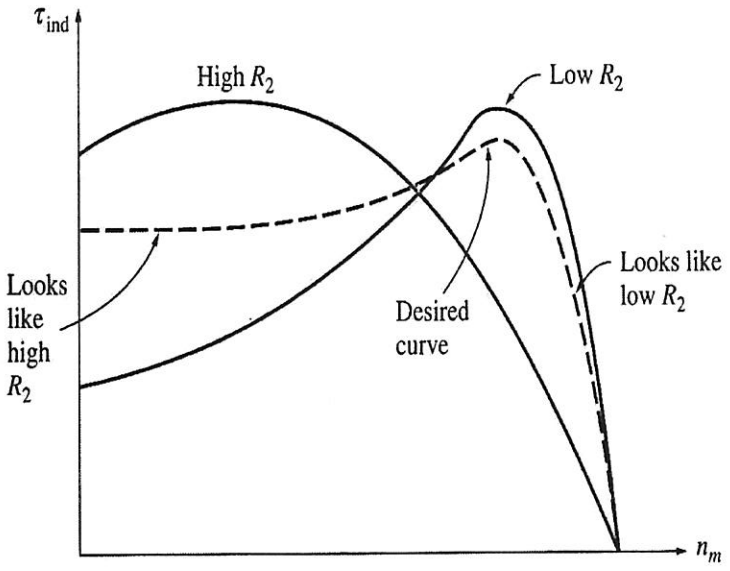
(b) จงหาความเร็วของมอเตอร์ ณ จุดที่ให้แรงบิดสูงสุด

(c) จงหาค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ที่จะต้องนำมาต่อเพิ่ม เพื่อให้ได้แรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องสูงสุด

Sol^{n}

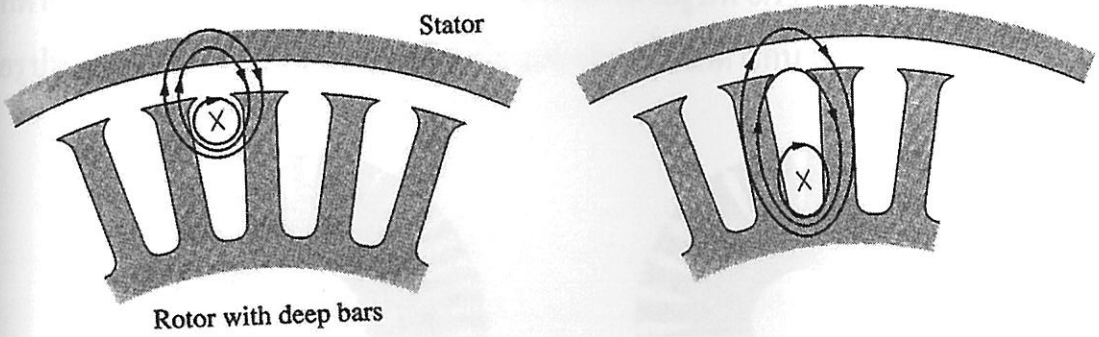
6.7 ชั้นคุณสมบัติ (class) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 6.15 ซึ่งเป็นการแสดง T-S Curve เมื่อความต้านทานในวงจรโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ถ้าความต้านทานของโรเตอร์ R_2 มีค่าสูง แรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีสำหรับคุณลักษณะเช่นนี้ แต่การที่ความต้านทานของโรเตอร์มีค่าสูง ก็จะส่งผลเสียทางด้านประสิทธิภาพเมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะปกติเนื่องจากมีกำลังงานสูญเสียในตัวต้านทาน ดังนั้นการออกแบบวงจรของโรเตอร์ จึงต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อเสียต่างๆ ประกอบกันด้วย ดังการแสดง T-S Curve ในรูปที่ 6.16 ที่ได้จากการพิจารณาค่าความต้านทานของโรเตอร์ตามการออกแบบ



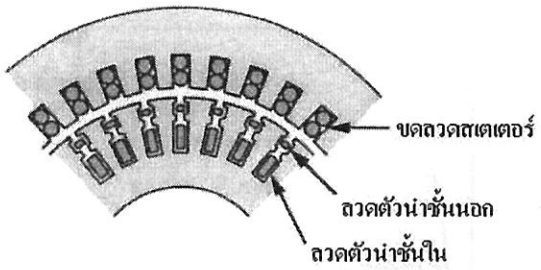
รูปที่ 6.16 T-S Curve จากการพิจารณาค่าความต้านทานของโรเตอร์ตามการออกแบบ [2]

อิมพีแดนซ์ (impedance) ของโรเตอร์ชนิดกรงกระรอกในมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวนำในกรงกระรอกให้ใหญ่หรือเล็กลง หรืออาจทำได้โดยการเลือกร่องให้ลึกหรือตื้นขึ้น การออกแบบให้ร่องของโรเตอร์ลึกเพื่อใช้วางตัวนำ หรือที่เรียกว่า แท่งโรเตอร์ฝังลึก (deep-bar rotor) ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.17 จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรั่วสูง เพื่อจะได้รีแอกแตนซ์ X_2 สูง และจากผลเส้นแรงแม่เหล็กรั่วสูงนี้ ในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง จะทำให้กระแสไหลหนาแน่นที่บริเวณผิวตัวนำ (skin effect) แต่หลังจากที่มอเตอร์เริ่มหมุนแล้ว ความถี่ของกระแสที่โรเตอร์จะลดลง จึงทำให้กระแสไหลหนาแน่นบริเวณผิวตัวนำลดลงด้วย จากผลที่เกิดขึ้นนี้ จึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์มีค่ามากในขณะที่มอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง และจะลดลงเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนผ่านไป



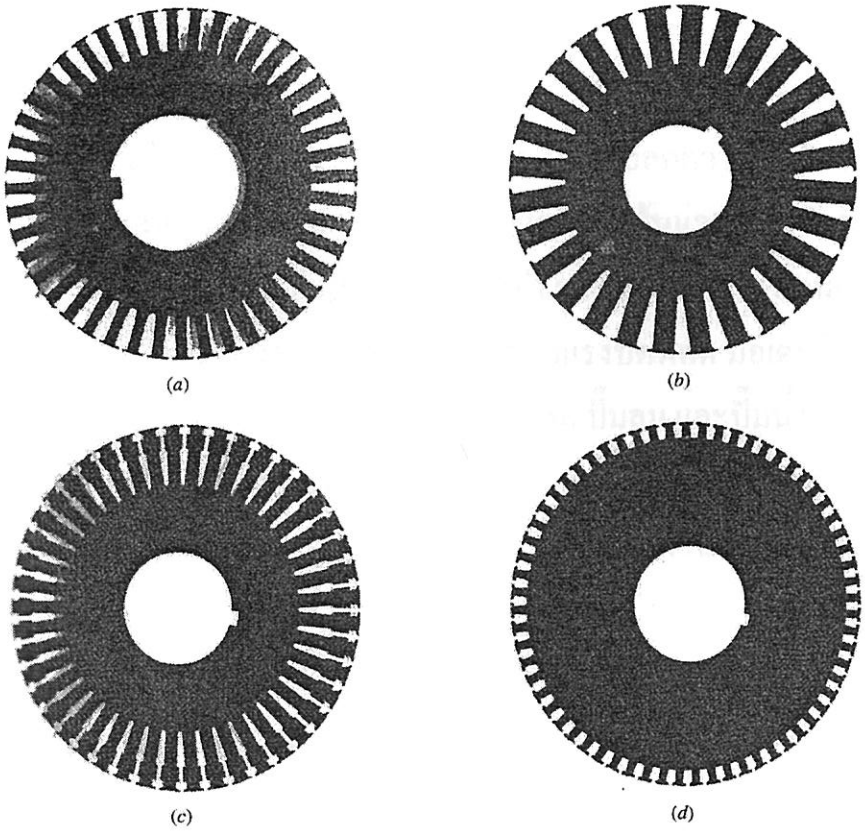
รูปที่ 6.17 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วของโรเตอร์กรงกระรอกร่องลึก [2]

อีกทั้งยังมีการพัฒนาการทำงานของมอเตอร์ให้ดีขึ้น โดยการใช้ลวดตัวนำในโรเตอร์เป็นสองชุด (double-cage rotor) ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.18 ซึ่งลวดตัวนำชั้นในจะมีขนาดใหญ่กว่าลวดตัวนำชั้นนอก ดังนั้นลวดตัวนำชั้นในจึงมีความต้านทานต่ำและมีรีแอกแตนซ์สูงกว่าลวดตัวนำชั้นนอก ซึ่งในภาวะเริ่มเดินเครื่องนั้น ความถี่ของกระแสที่โรเตอร์จะเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่จ่าย ทำให้รีแอกแตนซ์ของลวดตัวนำชั้นในมีค่ามากกว่าลวดตัวนำชั้นนอก ดังนั้นจึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในลวดตัวนำชั้นนอกมากขึ้น ส่งผลให้แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าสูง จากนั้นเมื่อความเร็วใกล้กับความเร็วซิงโครนัส ความถี่ของกระแสที่โรเตอร์จะลดลงอย่างรวดเร็ว และกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความต้านทานของลวดตัวนำทั้งสองเอง ดังนั้นจึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลมากในลวดตัวนำชั้นใน การสูญเสียจากความต้านทานจึงลดลง และมอเตอร์ก็จะทำงานเหมือนกับมอเตอร์กรงกระรอกโดยทั่วๆ ไป

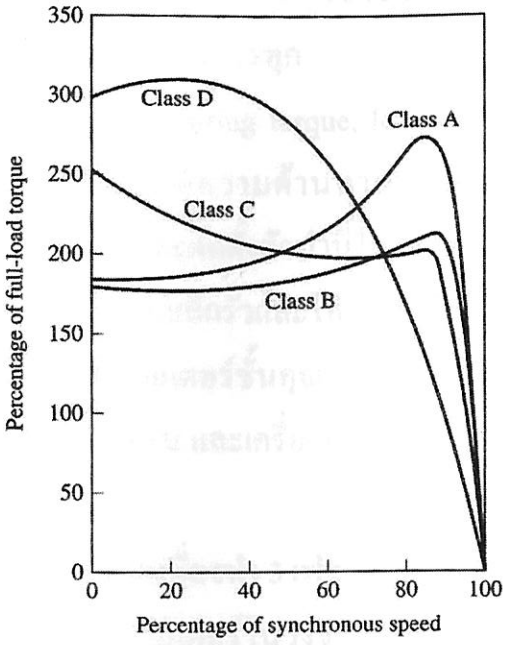


รูปที่ 6.18 โรเตอร์กรงกระรอกที่มีลวดตัวนำสองชุด

NEMA (national electrical manufacturers association) ได้แบ่งประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ออกเป็น 4 ประเภท คือ ชั้นคุณสมบัติ (class) A, B, C และ D โดยจะมีความแตกต่างกันไปตามลักษณะร่องของโรเตอร์ ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.19 และมี T-S Curve ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.20 โดยแต่ละชั้นคุณสมบัติจะมีรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนี้



รูปที่ 6.19 ลักษณะร่องต่างๆ ตามชั้นคุณสมบัติของโรเตอร์กรงกระรอก:
(a) class A, (b) class B, (c) class C, (d) class D [2]



รูปที่ 6.20 T-S Curve ตามชั้นคุณสมบัติต่างๆ [2]

1) ชั้นคุณสมบัติ A (normal starting torque, normal starting current, low slip at full load) มอเตอร์ประเภทนี้มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำขนาดใหญ่เพื่อลดความต้านทาน แต่ร่องตัวนำจะไม่ลึกลงไปในแกนเหล็กมาก เพื่อลดความต้านทานจากค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว กระแสขณะเริ่มเดินเครื่องจึงค่อนข้างสูง อาจสูงถึงประมาณ 5-6 เท่า ของกระแสพิกัด ส่วนแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องอยู่ในระดับปกติ ซึ่งมีค่าประมาณ 200% ของแรงบิดพิกัด มอเตอร์ชั้นคุณสมบัติ A มักจะนำไปใช้กับเครื่องจักรทั่วไป เช่น พัดลม เครื่องเป่าลม ปั๊มลม และปั๊มน้ำ

2) ชั้นคุณสมบัติ B (normal starting torque, low starting current, low slip at full load) มอเตอร์ประเภทนี้ตัวนำถูกวางในร่องลึก เพื่อเพิ่มความต้านทานจากค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว กระแสขณะเริ่มเดินเครื่องจึงมีค่าลดลงเหลือประมาณ 3-4 เท่า ของกระแสพิกัด ส่วนแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าประมาณเท่ากับชั้นคุณสมบัติ A ทั้งนี้เป็นผลจากลักษณะร่องที่ลึกขึ้น และค่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อเทียบกับชั้นคุณสมบัติ A มอเตอร์ชั้นคุณสมบัติ B จะนำไปใช้งานเช่นเดียวกับชั้นคุณสมบัติ A

3) ชั้นคุณสมบัติ C (high starting torque, low starting current, low slip at full load) มอเตอร์ประเภทนี้มีตัวนำสองชั้น เพื่อให้แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าสูง ซึ่งจะมีค่าประมาณ 250% ของแรงบิดพิกัด ส่วนกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าประมาณ 3-4 เท่า ของกระแส

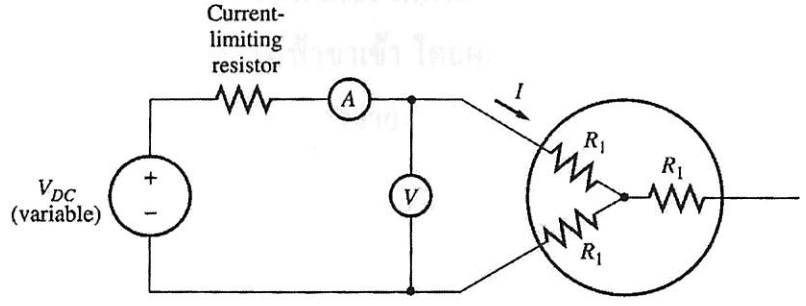
พิกัด มอเตอร์ชั้นคุณสมบัติ C มักจะนำไปใช้กับเครื่องจักรที่เกี่ยวกับการส่งผ่านกำลังและมีความฝืด เช่น สายพาน เครื่องกด และเครื่องบรรทุก

4) ชั้นคุณสมบัติ D (very high starting torque, low starting current, high slip at full load) มอเตอร์ประเภทนี้ใช้ตัวนำที่มีความต้านทานสูง กระแสขณะเริ่มเดินเครื่องจึงมีค่าประมาณ 3-4 เท่า ของกระแสพิกัด และติดตั้งตัวนำนี้ในตำแหน่งที่ใกล้กับผิวนอกของโรเตอร์ เพื่อลดความต้านทานจากค่าเส้นแรงแม่เหล็กรั่วและให้แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าสูง ซึ่งจะมีค่าประมาณ 300% ของแรงบิดพิกัด มอเตอร์ชั้นคุณสมบัติ D มักจะนำไปใช้กับเครื่องจักรที่มีโหลดเพิ่มและลดอยู่ตลอดเวลา เช่น เครน และเครื่องปั๊มโลหะ เป็นต้น

6.8 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

ในการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะอาศัย การทดสอบกระแสตรง (dc test) หรืออาจเรียกว่าวิธีโวลต์-แอมป์ (volt-amp method) การทดสอบสภาวะไร้โหลด (no load test) และการทดสอบยึดโรเตอร์ (locked-rotor test or blocked-rotor test)

1) การทดสอบกระแสตรง (dc test) ใช้การป้อนแรงดันไฟตรงเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ แล้วทำการวัดกระแสที่จ่ายให้ขดลวด ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.21 จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟตรงที่ป้อนให้ขดลวดสเตเตอร์ จึงคำนวณหาค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์ R_1 ได้ (ในการทดสอบนี้ค่ารีแอกแตนซ์จะมีค่าเป็นศูนย์) อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานที่ได้จะขึ้นอยู่กับการต่อขดลวดทดสอบของมอเตอร์ด้วยว่าต่อแบบ Y หรือ Δ



รูปที่ 6.21 การทดสอบกระแสตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [2]

จากรูปที่ 6.21 เป็นการทดสอบมอเตอร์ที่ต่อแบบ Y ซึ่งแรงดันที่จ่ายจะตกคร่อมขดลวดอยู่ 2 ขั้ว จากทั้งหมด 3 ขั้ว ดังนั้นความต้านทานทั้งหมดที่กระแสไหลผ่านใน 2 ขดลวด จะมีค่าเท่ากับ $2R_1$ จึงได้ $I_{DC} = \frac{V_{DC}}{2R_1}$ หรือ

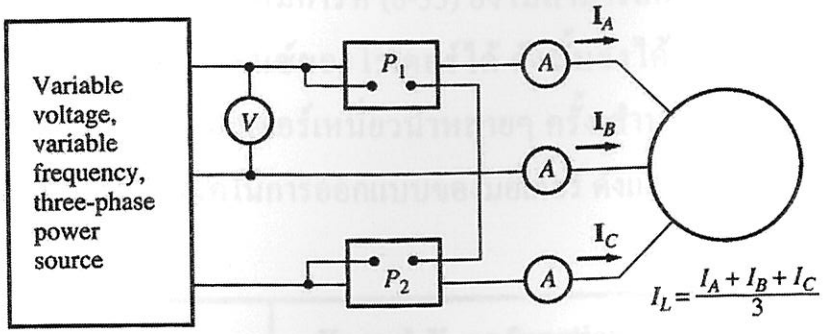
$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \tag{6-29}$$

และถ้าทดสอบมอเตอร์ที่ต่อแบบ Δ ควรแปลงให้เป็น Y ก่อน แล้วค่อยพิจารณาโดยใช้หลักการเดิม จึงได้

$$R_1 = \frac{3V_{DC}}{2I_{DC}} \tag{6-30}$$

2) การทดสอบสภาวะไร้โหลด (no load test) เนื่องจากไม่มีการขับโหลดที่เพลาของมอเตอร์ ($s = 0$) ดังนั้นเมื่อทำการป้อนไฟเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่จ่าย (P_{in}) ก็คือกำลังสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์ ($P_{SCL} = 3I_1^2R_1$) บวกกับกำลังงานที่เอาชนะขณะที่มอเตอร์หมุนตัวเปล่า ($P_{rot} = P_{core} + P_{F\&W} + P_{stray}$) ซึ่งในการศึกษานี้จะถือว่ากำลังงานสูญเสียนี้มีค่าคงที่ตลอดย่านการทำงาน ถึงแม้ว่ากำลังงานสูญเสียบางตัวอาจจะเปลี่ยนค่าได้ตามสภาวะการจ่ายโหลดก็ตาม วงจรที่ใช้ทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.22 ซึ่งประกอบไปด้วยมิเตอร์วัดแรงดันและวัดกระแส รวมถึงมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้า 2 ตัว ทำการต่อมิเตอร์วัดกระแสและแรงดันเพื่อวัดกระแสในสายและแรงดันระหว่างคู่สายที่เข้ามอเตอร์จึงได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6-31) (ละทิ้ง R_C เนื่องจากมีค่าใหญ่มากถ้าเทียบกับ X_M) ในส่วนของมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้านั้นทำการต่อโดยใช้วิธีวัตต์สองค่า (two-watt method) เพื่อวัดกำลังไฟฟ้าขาเข้า โดยผลรวมของ W_1 และ W_2 จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าขาเข้า P_{in} ที่มอเตอร์รับจากแหล่งจ่าย

$$Z_{nl} = \frac{V_\phi}{I_\phi} \approx X_1 + X_M \tag{6-31}$$



รูปที่ 6.22 การทดสอบสภาวะไร้โหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [2]

3) การทดสอบยึดโรเตอร์ (locked-rotor test) วงจรที่ใช้ทดสอบเหมือนกับวงจรทดสอบสภาวะไร้โหลดทุกประการ แต่ต่างกันที่จะจับยึดโรเตอร์ไว้ไม่ให้หมุน ($s = 1$) เมื่อทำการป้อนไฟจากแหล่งจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ สลิป $s = 1$ ค่า R_2/s จึงมีค่าน้อยเท่ากับ R_2 ดังนั้นจึงมองวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นแค่เพียงการอนุกรมกันของ X_1 , R_1 , X_2 และ R_2 ซึ่งก็คล้ายกับการทดสอบลัดวงจร (short circuit test) ของหม้อแปลงไฟฟ้านั่นเอง จากการทดสอบจึงได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{\text{in}}}{\sqrt{3} V_T I_L} \tag{6-32}$$

$$Z_{\text{LR}} = \frac{V_\phi}{I_\phi} \angle \theta = R_{\text{LR}} + jX_{\text{LR}} \tag{6-33}$$

$$R_{\text{LR}} = R_1 + R_2 \tag{6-34}$$

ในการทดสอบบางครั้ง เราอาจจะป้อนแหล่งจ่ายด้วยความถี่ที่ไม่เท่ากับความถี่พิกัดในการทำงานของเครื่องได้ ในกรณีเช่นนี้ ค่ารีแอกแตนซ์ที่ได้ต้องมีการคูณปรับด้วยอัตราส่วนระหว่างความถี่พิกัด (f_{rated}) กับความถี่ที่ทดสอบ (f_{test}) จึงได้

$$X_{\text{LR}} = \frac{f_{rated}}{f_{test}} X_{\text{LR}}{}' = X_1 + X_2 \tag{6-35}$$

อย่างไรก็ตาม จะพบว่าในสมการที่ (6-35) ยังไม่สามารถคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ของสเตเตอร์แยกอิสระจากรีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ได้ ดังนั้นจึงได้แสดงข้อกำหนดของการออกแบบที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายๆ ครั้ง สำหรับแยกค่ารีแอกแตนซ์เป็นอิสระออกจากกัน ตามแต่ละชนิดในการออกแบบของมอเตอร์ ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.23

	X_1 and X_2 as functions of X_{LR}	
Rotor Design	X_1	X_2
Wound rotor	$0.5\ X_{LR}$	$0.5\ X_{LR}$
Design A	$0.5\ X_{LR}$	$0.5\ X_{LR}$
Design B	$0.4\ X_{LR}$	$0.6\ X_{LR}$
Design C	$0.3\ X_{LR}$	$0.7\ X_{LR}$
Design D	$0.5\ X_{LR}$	$0.5\ X_{LR}$

รูปที่ 6.23 สัดส่วนการแยกค่ารีแอกแตนซ์สำหรับการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2]

<u>ตัวอย่างที่ 6.10</u> ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 7.5 hp, 4 ขั้ว, 208 V, 60 Hz, class A ต่อแบบ Y ซึ่งมีกระแสพิกัดเท่ากับ 28 A

DC test: $V_{DC} = 13.6$ V $I_{DC} = 28.0$ A

No-load test: $V_T = 208$ V $f = 60$ Hz

$I_A = 8.12$ A, $I_B = 8.20$ A, $I_C = 8.18$ A $P_{in} = 420$ W

Locked-rotor test: $V_T = 25$ V $f = 15$ Hz

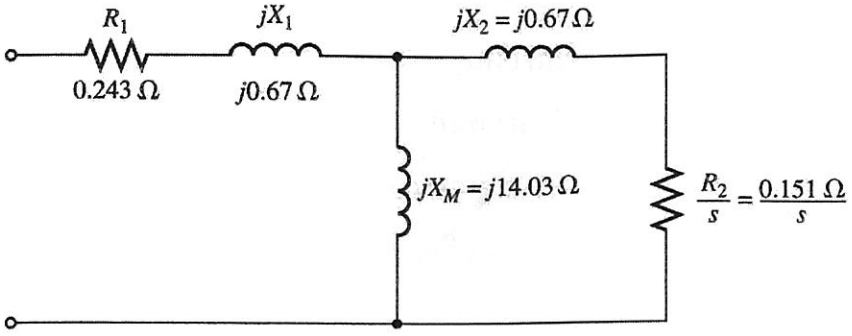
$I_A = 28.1$ A, $I_B = 28.0$ A, $I_C = 27.6$ A $P_{in} = 920$ W

(a) จงหาวงจรสมมูลของมอเตอร์

(b) จงหาค่าสลิปที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด และค่าแรงบิดสูงสุดค่านั้น

Sol^{n}

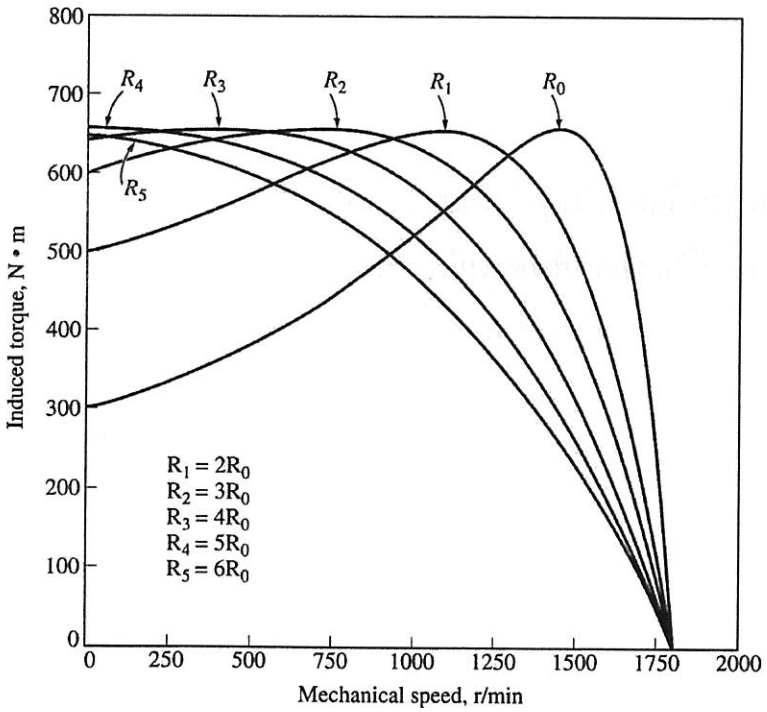
จึงเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังนี้



6.9 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่สร้างได้ง่ายและราคาถูก มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และแทบจะไม่ต้องการการบำรุงรักษา การควบคุมความเร็วของมอเตอร์มีความสำคัญอย่างยิ่งในแต่ละการทำงาน ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำจะควบคุมความเร็วได้ยากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งนี้เพราะความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับค่าสลิปและความเร็วซิงโครนัส ($n_r = (1\text{-}s)\, n_s$ โดยที่ $n_s = 120 f_e / P$) โดยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถแบ่งออกเป็นวิธีได้ดังนี้

1) ควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในวงจรของโรเตอร์ (rotor-resistance control) โดยค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทานของโรเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 6.24 การควบคุมความเร็วแบบนี้จะกระทำกับมอเตอร์ชนิดขดลวดพัน (wound rotor) โดยเป็นวิธีการที่ง่ายและสะดวก แต่มอเตอร์ชนิดนี้จะมีราคาสูง



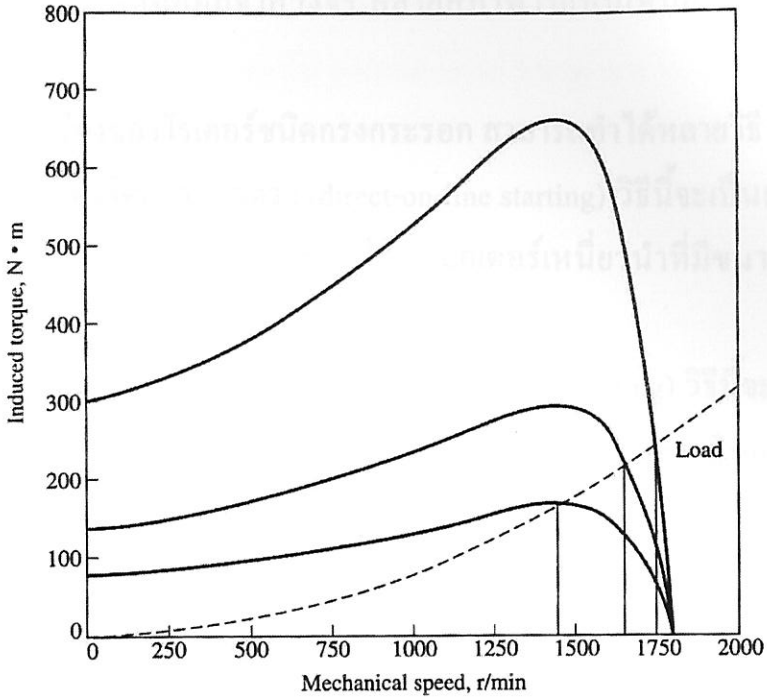
รูปที่ 6.24 การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของวงจรโรเตอร์ [2]

2) ควบคุมความเร็วโดยการพันขดลวดสเตเตอร์เพื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้ว (control of stator pole or pole changing) เป็นวิธีการที่ง่าย นิยมใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอก ซึ่งความเร็วของมอเตอร์จะแปรผกผันกับจำนวนขั้วของมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วต่างกันโดยที่ความถี่ของสายส่งเท่ากันย่อมจะมีจำนวนขั้วที่ต่างกัน ขดลวดสเตเตอร์สามารถออกแบบให้ต่อกันเพื่อเปลี่ยนจำนวนขั้วจาก 2 เป็น 4 หรือจาก 4 เป็น 6 ได้

3) ควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟ (control of supply frequency) เครื่องแปลงความถี่ที่ใช้กันโดยทั่วๆ ไปจะประกอบด้วย 2 ชนิด คือชนิดอินเวอร์เตอร์ (inverter) โดยชนิดนี้จะแปลงไฟกระแสสลับจากแหล่งจ่ายให้เป็นไฟกระแสตรงเสียก่อน ซึ่งใช้ไทริสเตอร์เป็นตัวเรกติไฟร์ จากนั้นไฟกระแสตรงจะถูกตัดออกเป็นช่วงๆ (chopped) ตามความถี่ที่ต้องการซึ่งก็อาศัยไทริสเตอร์ จึงได้ไฟกระแสสลับที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ และชนิดไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (cycloconverter) โดยชนิดนี้สัญญาณไฟกระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟจะถูกตัดออกเป็นช่วงด้วยไทริสเตอร์ และรวมคลื่นที่ถูกตัดเป็นช่วงนี้เข้าด้วยกัน เพื่อได้ไฟกระแสสลับตามความถี่ที่ต้องการ

4) ควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ (voltage control) ดังแสดงด้วยรูปที่ 6.25 โดยจากรูปจะสังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายจะทำให้ T-S Curve ของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นความเร็วที่จุดทำงานจึงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย วิธีนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก ทั้งนี้เพราะถึงแม้แรงดันที่จ่ายจะเปลี่ยนแปลงไปมาก ค่าของความเร็วก็จะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก และถ้าเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันมากไปอีก ก็จะทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก จนกระทั่งไม่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้เพราะจากสมการแรงบิดภายในของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับแรงดันขาเข้ายกกำลังสอง

อย่างไรก็ตามมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเหมาะสมกับงานที่ต้องการความเร็วคงที่ เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วซิงโครนัส ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลงแล้ว ส่วนใหญ่จะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง ประกอบกับค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น โดยถ้าจะเน้นที่งานที่ต้องการเปลี่ยนแปลงความเร็วแล้วควรจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 6.25 การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ [2]

6.10 การเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อป้อนแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะมีกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องประมาณ 6 เท่าของกระแสไฟฟ้าที่โหลดเต็มพิกัด และมีแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องประมาณ 1.5 เท่าของแรงบิดที่โหลดเต็มพิกัด ซึ่งกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องในปริมาณที่สูงนี้ จะส่งผลกระทบให้เกิดความเสียหายและอันตรายต่อมอเตอร์ได้ ดังนั้นในขณะเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จึงจำเป็นต้องทราบถึงวิธีการต่างๆ เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าสูงเกินไป

การเริ่มเดินเครื่องของโรเตอร์ชนิดขดลวดพันหรือชนิดวงแหวนลื่น (wound rotor or slip-ring) ทำได้โดยต่อขดลวดสเตเตอร์เข้าโดยตรงกับแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส โดยที่วงจรของโรเตอร์ที่ต่อกับสลิป-ริงจะต่อเข้ากับความต้านทานจากภายนอกที่ปรับค่าได้ (variable resistance) ที่ต่อแบบสตาร์ (Y) อยู่ ค่าของกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องสามารถควบคุมได้โดยการปรับที่ความต้านทานปรับค่าได้นี้ ซึ่งการเพิ่มค่าความต้านทานเข้าไปในวงจรของโรเตอร์ จะทำให้กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าลดลง ในขณะที่แรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าสูงขึ้น เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนเข้าสู่ความเร็วปกติแล้ว สลิป-ริงจะถูกลัดวงจรทำให้ความ

ต้านทานจากภายนอกถูกตัดออกจากวงจร กลายสภาพไปเป็นเหมือนกับโรเตอร์ชนิดกรงกระรอก (squirrel cage)

การเริ่มเดินเครื่องของโรเตอร์ชนิดกรงกระรอก สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1) เริ่มเดินเครื่องโดยการต่อตรง (direct-on-line starting) วิธีนี้จะเป็นการต่อมอเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส โดยตรง ซึ่งนิยมใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขนาดเล็กๆ ไม่เกิน 10 แรงม้า

2) เริ่มเดินเครื่องโดยการสวิตช์วาย-เดลต้า (wye-delta starting) วิธีนี้จะใช้กับมอเตอร์ที่มีการทำงานในสภาวะปกติเป็นแบบ Δ โดยการใช้สวิตช์สองทางต่อเป็นแบบ Y ตอนเริ่มเดินเครื่องและเป็นแบบ Δ เมื่อมอเตอร์หมุนเข้าสู่สภาวะปกติ ประโยชน์ของการต่อแบบ Y ตอนเริ่มเดินเครื่อง จะทำให้กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องลดลงเป็น 1/3 เท่าของการต่อแบบ Δ เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยตรง (ทั้งนี้เพราะอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วสายของการต่อแบบ Y มีค่าเป็น 3 เท่าของการต่อแบบ Δ เมื่อพิจารณาที่แรงดันสายค่าเดียวกัน) และค่าแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องจะลดลงเป็น 1/3 เท่าของการต่อแบบ Δ เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยตรง (ทั้งนี้เพราะเมื่อต่อแบบ Y แรงดันเฟสจะมีค่าเป็น $1/\sqrt{3}$ เท่าของแรงดันสาย และแรงบิดของมอเตอร์ก็สัมพันธ์กับค่ากำลังสองของแหล่งจ่ายแรงดัน)

3) เริ่มเดินเครื่องโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต (autotransformer starting) วิธีนี้ประกอบด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโตและสวิตช์ ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโตจะช่วยในการลดระดับแรงดันที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ โดยอาจแบ่งเป็น 3 ระดับคือ 80% 65% หรือ 50% ของแรงดันที่จ่าย จึงส่งผลให้กระแสและแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าลดลงตาม โดยถ้าลดระดับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ไป x เท่าของแรงดันปกติ จะทำให้กระแสและแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องมีค่าลดลงไป x^2 เท่า และเมื่อมอเตอร์หมุนได้ประมาณ 80% ของความเร็วปกติแล้ว จะสวิตช์หม้อแปลงออกจากวงจรเพื่อทำให้มอเตอร์ได้รับแรงดันเต็มพิกัด

4) เริ่มเดินเครื่องโดยใช้ความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ต่ออนุกรมกับมอเตอร์ (stator-impedance starting) ดำเนินการได้โดยอนุกรมค่าความต้านทาน (หรืออิมพีแดนซ์) แทรกเข้าไปในสายของแหล่งจ่ายเพื่อจำกัดค่ากระแสขณะเริ่มเดินเครื่อง และค่าความต้านทานนี้จะถูกลัดวงจรออกเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนเข้าสู่ความเร็วปกติ วิธีนี้จะไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากประสิทธิภาพต่ำซึ่งเกิดจากการต่อความต้านทานภายนอกเข้าไป

6.11 แบบฝึกหัดท้ายบท

6.1) มอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดขดลวดพัน (wound rotor) ขนาด 208 V, 2 ขั้ว, 60 Hz พิกัด 15 hp วงจรสมมูลของมอเตอร์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังนี้

$R_1 = 0.200\ \Omega$ $R_2 = 0.120\ \Omega$ $X_M = 15.0\ \Omega$

$X_1 = 0.410\ \Omega$ $X_2 = 0.410\ \Omega$

$P_{mech} = 250$ W $P_{stray} \approx 0$ $P_{core} = 180$ W

สำหรับสลิปมีค่า 0.05 จงหา

(a) กระแสในสาย I_L (Ans : 44.8 $\angle$-25.5° A)

(b) กำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์ P_{SCL} (Ans : 1205 W)

(c) กำลังงานช่องอากาศ P_{AG} (Ans : 13.4 kW)

(d) กำลังงานที่ใช้แปลงผันกำลังไฟฟ้าไปเป็นกำลังกล P_{conv} (Ans : 12.73 kW)

(e) แรงบิดเหนี่ยวนำ τ_{ind} (Ans : 35.5 N·m)

(f) แรงบิดโหลด τ_{load} (Ans : 34.3 N·m)

(g) ประสิทธิภาพ (Ans : 84.5 %)

(h) ความเร็วของมอเตอร์ในหน่วย rpm และ rad/s (Ans : 3420 rpm or 358 rad/s)

6.2) สำหรับปัญหาในข้อ 6.1 จงหาสลิปที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด พร้อมค่าแรงบิดสูงสุด (Ans : $s_{maxT} = 0.144$, $\tau_{max} = 53.1$ N·m)

6.3) สำหรับปัญหาในข้อ 6.1 จงหาค่าความต้านทานในวงจรโรเตอร์ (เทียบมาทางด้านสเตเตอร์แล้ว) ที่ต้องเพิ่มเข้ามาเพื่อทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดในขณะเริ่มเดินเครื่อง (Ans : R_2 ต้องเพิ่มเข้ามาอีก 0.713 Ω)

6.4) มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 440 V, 2 ขั้ว, 50 Hz ต่อแบบ Y พิกัด 75 kW วงจรสมมูลของมอเตอร์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังนี้

$R_1 = 0.075\ \Omega$ $R_2 = 0.065\ \Omega$ $X_M = 7.2\ \Omega$

$X_1 = 0.17\ \Omega$ $X_2 = 0.17\ \Omega$

$P_{F\&W} = 1.0$ kW $P_{stray} = 150$ W $P_{core} = 1.1$ kW

สำหรับสลิปมีค่า 0.04 จงหา

(a) กระแสในสาย I_L (Ans : 149.4 $\angle$-18.3° A)

(b) ตัวประกอบกำลัง (Ans : 0.949 lagging)

(c) กำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์ P_{SCL} (Ans : 5022 W)

(d) กำลังงานช่องอากาศ P_{AG} (Ans : 103 kW)

(e) กำลังงานที่ใช้แปลงผันกำลังไฟฟ้าไปเป็นกำลังกล P_{conv} (Ans : 98.9 kW)

(f) แรงบิดเหนี่ยวนำ τ_{ind} (Ans : 327.9 N·m)

(g) แรงบิดโหลด τ_{load} (Ans : 327.6 N·m)

(h) ประสิทธิภาพ (Ans : 89.4 %)

(i) ความเร็วของมอเตอร์ในหน่วย rpm และ rad/s (Ans : 2880 rpm or 301.6 rad/s)

6.5) สำหรับปัญหาในข้อ 6.4 จงหาค่าแรงบิดสูงสุด พร้อมสลิปที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด (Ans : $\tau_{max} = 704$ N·m, $s_{maxT} = 0.189$)

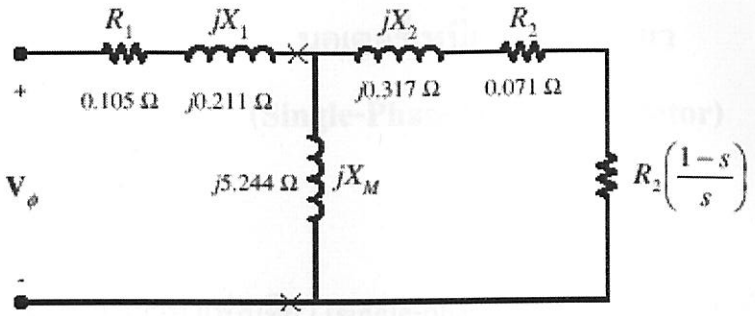
6.6) ถ้ามอเตอร์ในข้อ 6.4 ถูกจ่ายด้วยแหล่งกำเนิด 440 V, 60 Hz จงหาค่าแรงบิดสูงสุด พร้อมสลิปที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด (Ans : $\tau_{max} = 507$ N·m, $s_{maxT} = 0.159$)

6.7) ผลการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 25 hp, 6 ขั้ว, 208 V, 60 Hz, class B ต่อแบบ Y แสดงได้ดังนี้

No load:	208 V, 22.0 A, 1200 W, 60 Hz
Locked rotor:	24.6 V, 64.5 A, 2200 W, 15 Hz
DC test:	13.5 V, 64 A

จงหาวงจรสมมูลของมอเตอร์

Ans :



6.8) มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 460 V, 4 ขั้ว, 60 Hz ต่อแบบ Y พิกัด 50 hp มอเตอร์มีแรงบิดเหนี่ยวนำ (induced torque) ที่โหลดเต็มพิกัดที่สลิป 3.8% ความถี่ 60 Hz และ 460 V วงจรสมมูลของมอเตอร์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังนี้

$R_1 = 0.33\ \Omega$ $X_M = 30\ \Omega$

$X_1 = 0.42\ \Omega$ $X_2 = 0.42\ \Omega$

กำลังงานสูญเสียทางกล กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก และกำลังงานสูญเสียสเตรย์ ไม่ถูกนำมาพิจารณา

(a) จงหาค่าความต้านทานโรเตอร์ R_2 (Ans : 0.172 Ω)

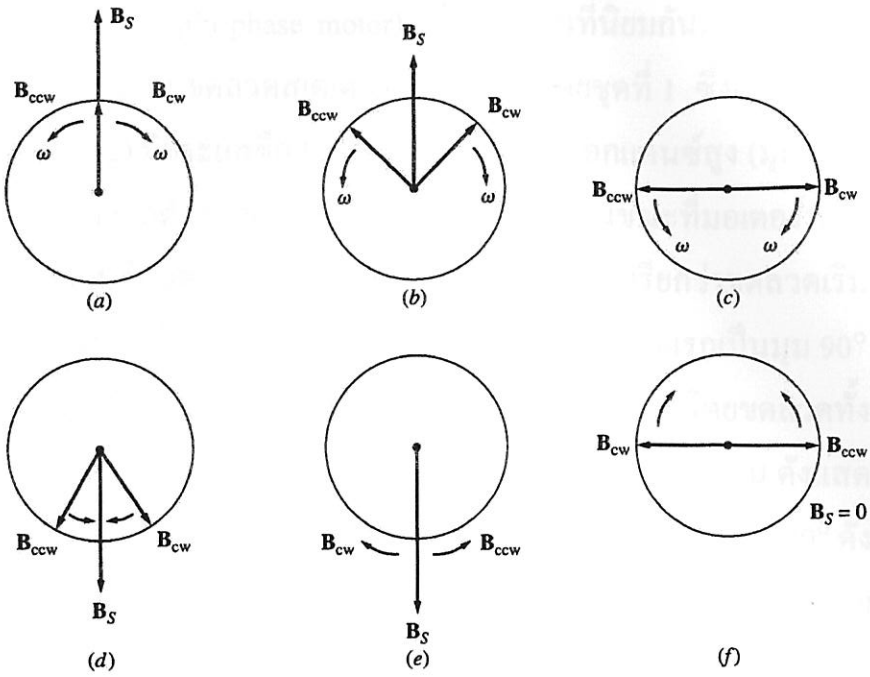
(b) จงหา s_{maxT} , τ_{max} และความเร็วของโรเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุด (Ans : $s_{maxT} = 0.192$, $\tau_{max} = 448$ N·m, $n_m = 1454$ r/min)

(c) จงหาแรงบิดในขณะเริ่มเดินเครื่อง (Ans : 199 N·m)

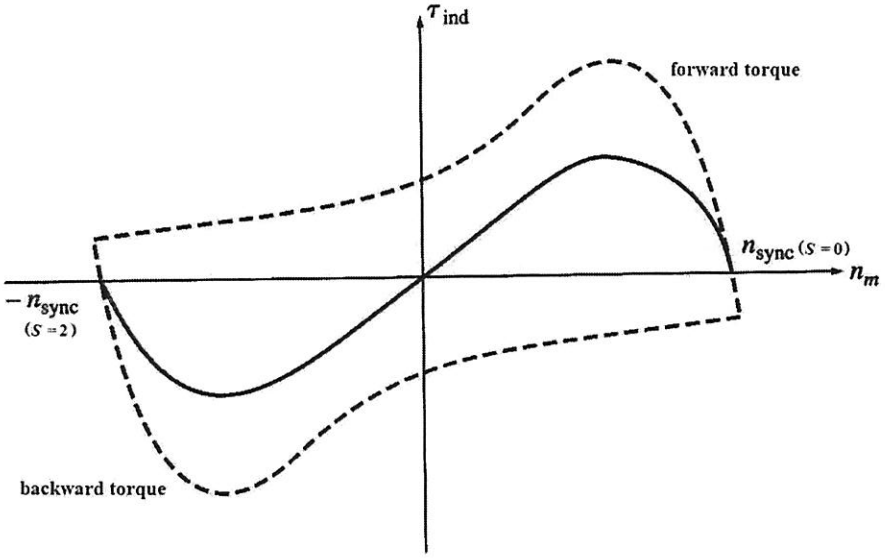
บทที่ 7
มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว
(Single-Phase Induction Motor)

7.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (single-phase induction motor) หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับที่นิยมใช้กันมาก ถึงแม้ว่าลักษณะสมบัติและสมรรถนะต่างๆ จะไม่ดีเทียบเท่ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยจะมีโครงสร้างคล้ายกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เพียงแต่ขดลวดสเตเตอร์มีการพันขดลวดเป็นแบบเฟสเดียวและต่อเข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว มอเตอร์ชนิดนี้แหล่งจ่ายไฟหาได้ง่าย มีใช้กันอยู่ทั่วไปตามบ้านเรือน มีขนาดเล็ก ให้กำลังงานไม่สูงมาก ส่วนใหญ่มีกำลังพิกัดต่ำกว่า 1 แรงม้า เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีมอเตอร์นี้เป็นส่วนประกอบ ได้แก่ พัดลม เครื่องซักผ้า เครื่องปรับอากาศขนาดเล็ก เป็นต้น ส่วนข้อเสียของมอเตอร์ชนิดนี้ที่สำคัญคือ ไม่มีแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่อง เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ไม่ได้หมุน เพียงแต่สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นกลับไปกลับมาที่สเตเตอร์เท่านั้น จึงไม่สามารถเหนี่ยวนำให้โรเตอร์หมุนได้ อีกทั้งตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพต่ำ การอธิบายลักษณะสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวนี้อธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ (double-revolving-field theory) โดยแทนสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในตัวสเตเตอร์ด้วยเวกเตอร์ 2 เวกเตอร์ ที่มีทิศทางการหมุนตรงกันข้ามดังแสดงด้วยรูปที่ 7.1 สนามแม่เหล็กทั้งสองที่หมุนรอบสเตเตอร์จะหมุนตัดกับโรเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และเป็นผลให้เกิดแรงบิดขึ้น โดยจะมีแรงบิดเกิดขึ้น 2 ค่า ซึ่งเรียกว่าแรงบิดไปข้างหน้า (forward torque) และแรงบิดย้อนหลัง (backward torque) โดยมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน ดังนั้นแรงบิดลัพธ์ของมอเตอร์จึงได้จากผลรวมของแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กทั้งสอง ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.2 โดยแสดงให้เห็นถึงแรงบิดทั้งสองและผลรวมของแรงบิดที่สลิประหว่าง 0 – 2 โดยที่ตำแหน่งหยุดนิ่งหรือตำแหน่งเริ่มเดินเครื่อง แรงบิดลัพธ์จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงมีการคิดค้นอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้มอเตอร์เฟสเดียวสามารถเริ่มเดินเครื่องด้วยตัวเองได้ โดยจะต้องมีตัวช่วยหมุนทำให้เกิดแรงบิดและอัตราเร่งให้มอเตอร์หมุนได้



รูปที่ 7.1 การแสดงทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ [2]

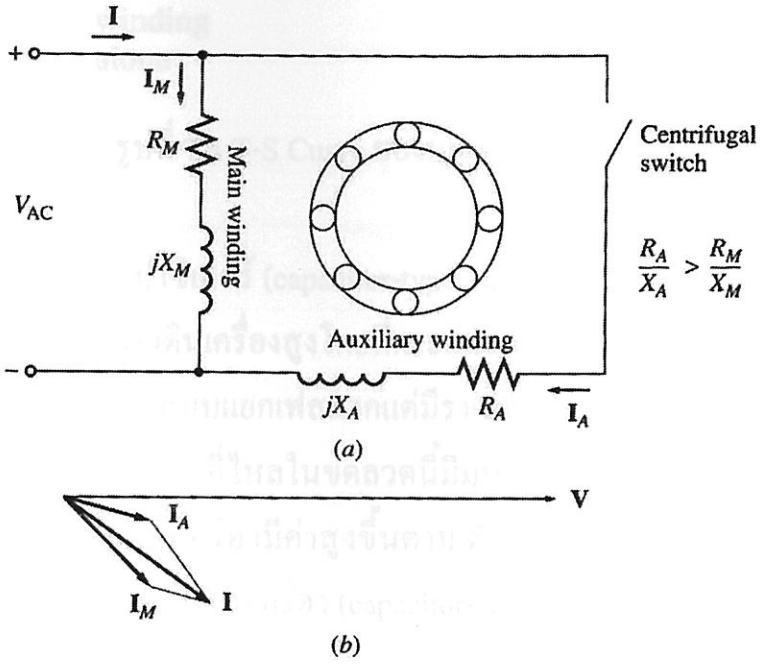


รูปที่ 7.2 T-S Curve ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส [2]

7.2 การเกิดแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่อง

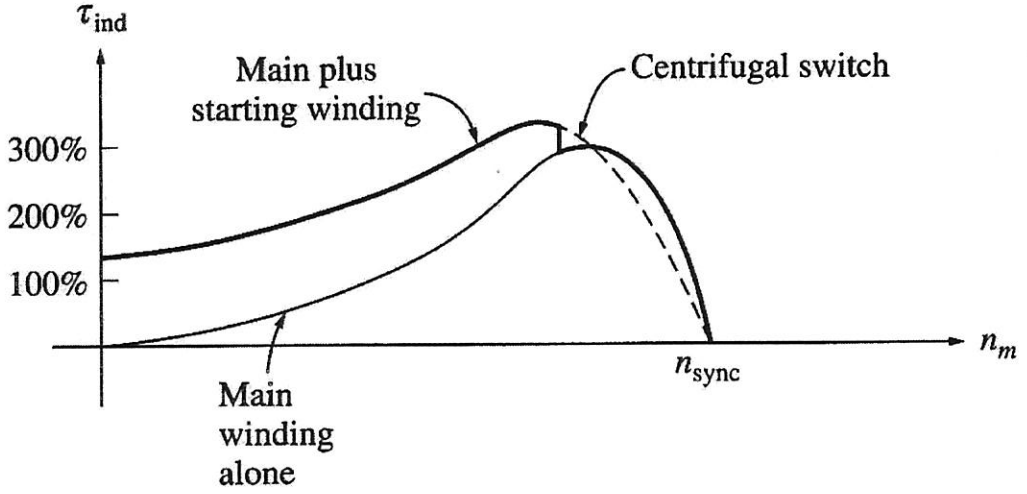
กระบวนการผลิตมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสโดยทั่วๆ ไป จะมีวิธีการที่ทำให้เกิดแรงบิดขณะเริ่มเดินเครื่องได้หลายวิธี โดยสามารถอธิบายได้ตามการแยกชนิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก ได้ดังนี้

1) มอเตอร์แยกเฟส (split-phase motor) วิธีการนี้เป็นที่นิยมกันมากในการผลิตมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวในปัจจุบัน ขดลวดสเตเตอร์จะมี 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ซึ่งเป็นขดลวดหลักหรือขดลวด M (main winding) มีกระแสชื่อ I_M ไหลผ่าน จะมีค่ารีแอกแตนซ์สูง (มุมล้าหลังมาก) แต่ค่าความต้านทานของขดลวดต่ำ ขดลวดชุดนี้จะใช้เป็นชุดหมุนในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ส่วนชุดที่ 2 ซึ่งเป็นขดลวดช่วยหรือขดลวด A (auxiliary winding) หรือเรียกว่าขดลวดเริ่มเดินเครื่อง (starting winding) มีกระแสชื่อ I_A ไหลผ่าน จะพันห่างจากขดลวดชุดแรกเป็นมุม 90° ทางไฟฟ้า ขดลวดชุดนี้จะออกแบบให้มีค่ารีแอกแตนซ์ต่ำแต่ค่าความต้านทานสูง โดยขดลวดทั้งสองจะต่อขนานกัน และต่อเข้ากับสายส่งจ่ายไฟอันเดียวกัน ซึ่งมีกระแสชื่อ I ไหลผ่าน ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.3(a) มอเตอร์แบบนี้จะออกแบบให้ I_M และ I_A มีมุมเฟสแตกต่างกันประมาณ 30° ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.3(b) โดยจะทำให้เกิดฟลักซ์แตกต่างเฟสกันมีผลทำให้เกิดแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่อง ลักษณะการจัดขดลวดจะคล้ายกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 เฟส แต่เฟสเดียวจะต่างตรงที่ค่ากระแสและอิมพีแดนซ์ของขดลวดทั้งสองจะมีค่าไม่เท่ากัน สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจึงไม่สม่ำเสมอเหมือนอย่างมอเตอร์โพลีเฟส (polyphase) โดยทั่วๆ ไป แต่ก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องได้



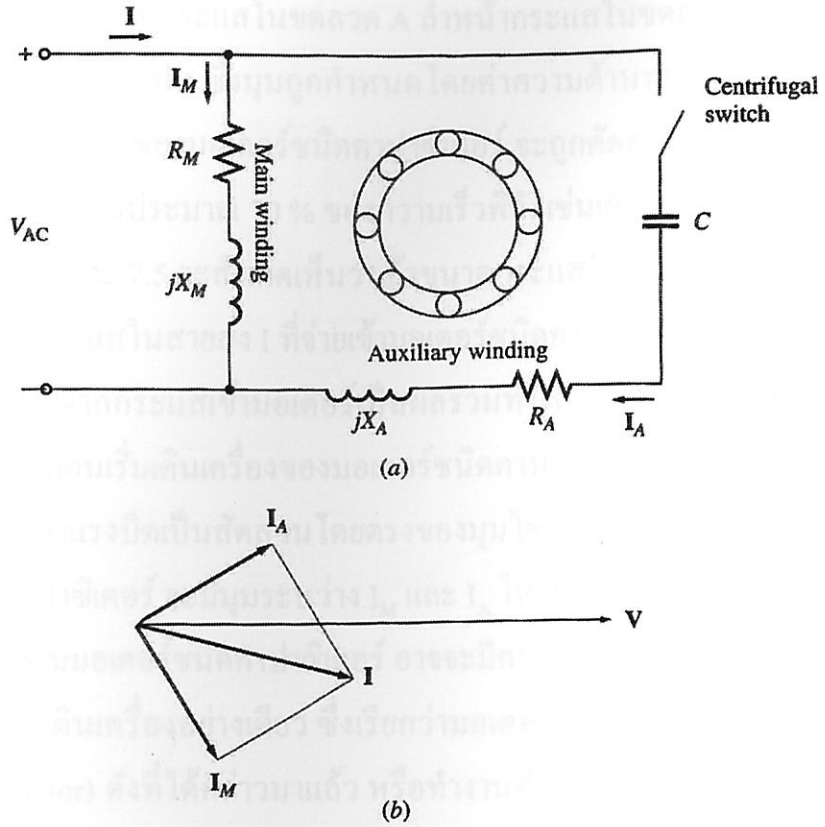
รูปที่ 7.3 ลักษณะของมอเตอร์แยกเฟส [2]

ขดลวด A มีหน้าที่ช่วยให้เกิดแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่อง ซึ่งจะมีค่าความต้านทานสูง โดยขดลวดนี้จะมีขนาดเล็กไม่เหมาะที่จะต่อไว้กับสายส่งตลอดเวลา เนื่องจากจะเกิดความร้อนสูงและทำให้ขดลวดไหม้เสียหายได้ ดังนั้นในการออกแบบจะมีสวิทช์ตัวหนึ่งต่ออนุกรมเข้ากับขดลวดชุดนี้เรียกว่าสวิทช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์ (centrifugal switch) เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนและเพิ่มความเร็วขึ้นจนได้ประมาณ 70 % ของความเร็วพิกัด สวิทช์ตัวนี้ก็จะเปิด ตัดขดลวด A ออกจากสายส่ง ขดลวด M จะทำหน้าที่ต่อไป และเมื่อหยุดทำงานสวิทช์ตัวนี้จะปิดเพื่อรอการเริ่มเดินเครื่องครั้งใหม่ ซึ่งสามารถแสดง T-S Curve ของมอเตอร์แยกเฟสได้ดังรูปที่ 7.4

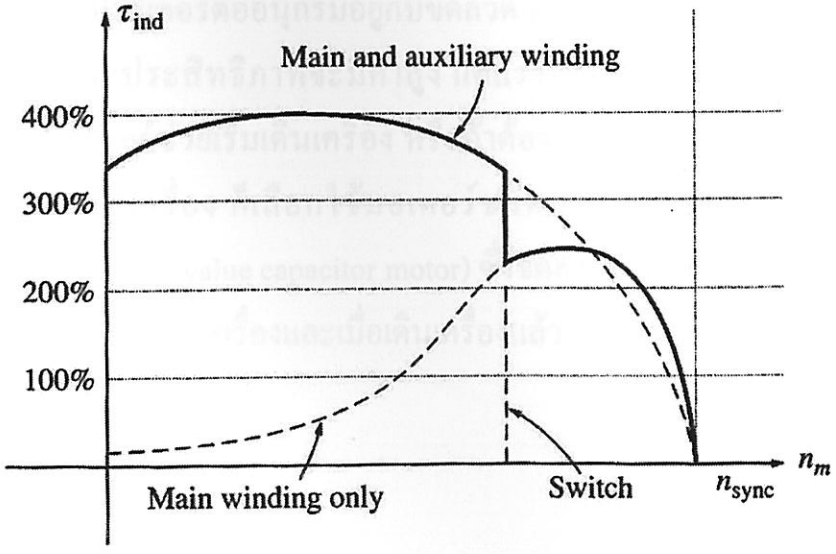


รูปที่ 7.4 T-S Curve ของมอเตอร์แยกเฟส [2]

2) มอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ (capacitor-type motor) ข้อได้เปรียบที่สำคัญของมอเตอร์แบบนี้คือ ให้แรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องสูงโดยที่กระแสตอนเริ่มเดินเครื่องไม่สูงมากนัก มอเตอร์แบบนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับแบบแยกเฟสมากแต่มีราคาสูงกว่า โดยขดลวด A จะถูกต่ออนุกรมไว้กับคาปาซิเตอร์เพื่อให้กระแสที่ไหลในขดลวดนี้มีมุมเฟสที่แตกต่างกับขดลวด M ได้มากขึ้นเพื่อจะได้แรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องมีค่าสูงขึ้นตาม ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.5 และ 7.6 ซึ่งเป็นมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่อง (capacitor-start motor)



รูปที่ 7.5 ลักษณะของมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่อง [2]

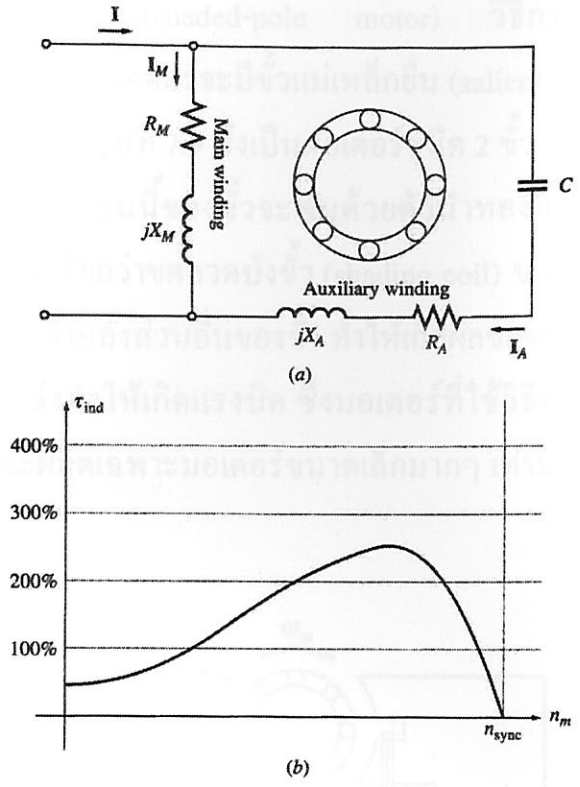


รูปที่ 7.6 T-S Curve ของมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่อง [2]

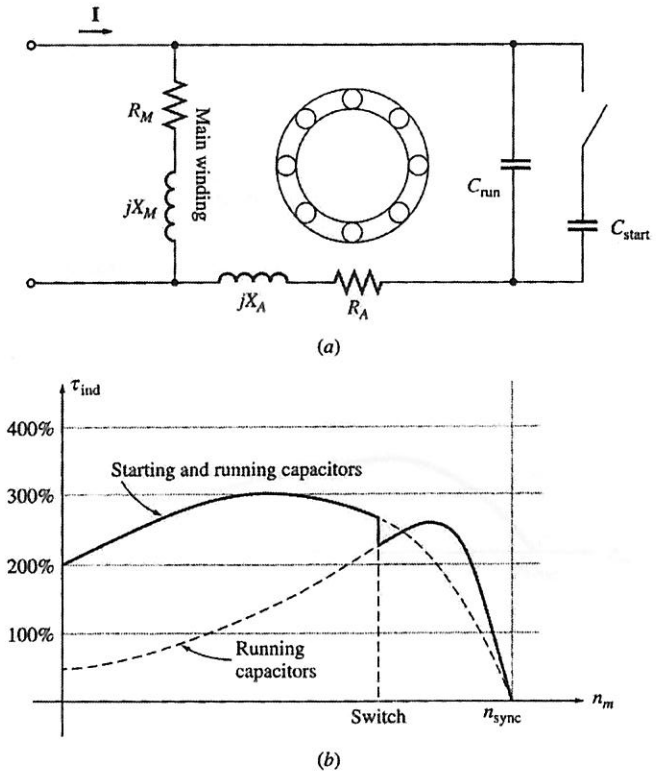
คาปาซิเตอร์จะทำให้กระแสในขดลวด A ล้ำหน้ากระแสในขดลวด M เป็นมุมได้มากกว่าที่ได้จากมอเตอร์แบบแยกเฟส ซึ่งมุมถูกกำหนดโดยค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดเท่านั้น ขดลวด A ของมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ จะถูกตัดออกจากสายส่งด้วยสวิทช์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์ ที่ความเร็วประมาณ 70 % ของความเร็วพิกัดเช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 7.3 และ 7.5 จะสังเกตเห็นว่า ถ้าขนาดกระแสในขดลวดทั้งสองของมอเตอร์ทั้ง 2 แบบมีค่าเท่ากัน กระแสในสายส่ง I ที่จ่ายเข้ามอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ จะมีค่าน้อยกว่ามอเตอร์แยกเฟส ทั้งนี้เนื่องจากกระแสเข้ามอเตอร์เป็นผลรวมทางเฟสเซอร์ของกระแสจากขดลวดทั้งสอง และค่าแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ จะมีค่ามากกว่ามอเตอร์แยกเฟส ทั้งนี้เนื่องจากค่าแรงบิดเป็นสัดส่วนโดยตรงของมุมไซน์ระหว่างกระแสของขดลวดทั้งสอง ซึ่งมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ จะมีมุมระหว่าง I_M และ I_A ใหญ่กว่ามอเตอร์แยกเฟส

อย่างไรก็ตามมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ อาจจะมีการต่อตัวเก็บประจุได้หลายแบบ โดยให้ทำงานในขณะเริ่มเดินเครื่องอย่างเดียว ซึ่งเรียกว่ามอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่อง (capacitor-start motor) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว หรือทำงานทั้งในขณะเริ่มเดินเครื่องและเดินเครื่องแล้ว ซึ่งเรียกว่ามอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์แยกถาวรหรือมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่องและคาปาซิเตอร์หลัก (permanent split-capacitor motor or capacitor-start-and-run motor) ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.7 ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่อง แต่จะมีคาปาซิเตอร์ต่ออนุกรมอยู่กับขดลวด A ตลอดเวลา ซึ่งมีข้อดีคือที่สภาวะปกติตัวประกอบกำลังและประสิทธิภาพจะมีค่าสูง แต่แรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องจะมีค่าต่ำกว่ามอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่อง หรือถ้าต้องการให้มอเตอร์ทำงานได้ดีทั้งสภาวะปกติและตอนเริ่มเดินเครื่อง ก็เลือกใช้มอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์สองค่า (capacitor-start, capacitor-run motor or two-value capacitor motor) ซึ่งขดลวด A จะประกอบด้วยคาปาซิเตอร์ 2 ตัว เพื่อใช้สำหรับตอนเริ่มเดินเครื่องและเมื่อเดินเครื่องแล้ว ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.8

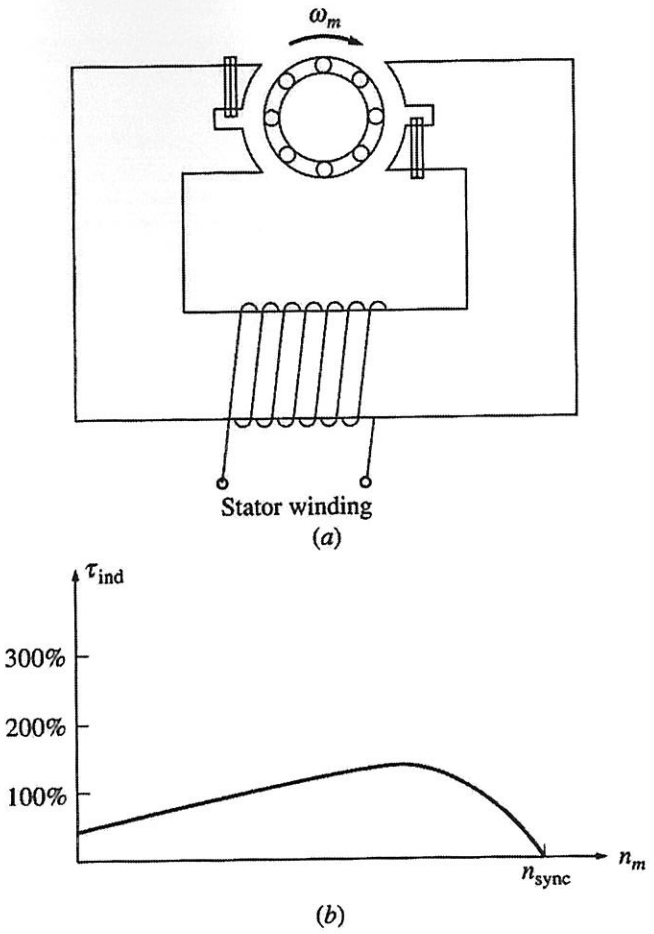


รูปที่ 7.7 ลักษณะของมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่องและคาปาซิเตอร์หลัก [2]



รูปที่ 7.8 ลักษณะของมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์สองค่า [2]

3) มอเตอร์แบบบังขั้ว (shaded-pole motor) วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีราคาถูก ประสิทธิภาพไม่สูงนัก โดยที่สเตเตอร์จะมีขั้วแม่เหล็กยื่น (salient pole) ออกมา โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.9 ซึ่งเป็นมอเตอร์ชนิด 2 ขั้ว ที่สเตเตอร์ถูกพันโดยรอบไว้ด้วยขดลวดสเตเตอร์ และที่ส่วนนี้ของขั้วจะพันด้วยตัวนำทองแดงโดยปลายทั้งสองต่อเข้าด้วยกันในลักษณะลัดวงจร เรียกว่าขดลวดบังขั้ว (shading coil) ขดลวดที่เสริมเข้าไปนี้จะทำให้ฟลักซ์ของส่วนที่ตัวมันพันล้าหลังส่วนอื่นของขั้ว ทำให้เกิดผลของฟลักซ์ในช่องอากาศคล้ายกับเป็นสนามแม่เหล็กหมุน จึงทำให้เกิดแรงบิด ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้วิธีการนี้ จะให้แรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่องต่ำ ส่วนใหญ่จะผลิตเฉพาะมอเตอร์ขนาดเล็กมากๆ เท่านั้น ขนาด 1/20 แรงม้า หรือน้อยกว่า



รูปที่ 7.9 ลักษณะของมอเตอร์แบบบังขั้ว [2]

<u>ตัวอย่างที่ 7.1</u> มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่องขนาด 2.5 kW, 120 V, 60 Hz มีค่าพารามิเตอร์สำหรับขดลวดหลัก (M) และขดลวดช่วย (A) ดังนี้

$Z_M = 4.5 + j3.7\ \Omega$

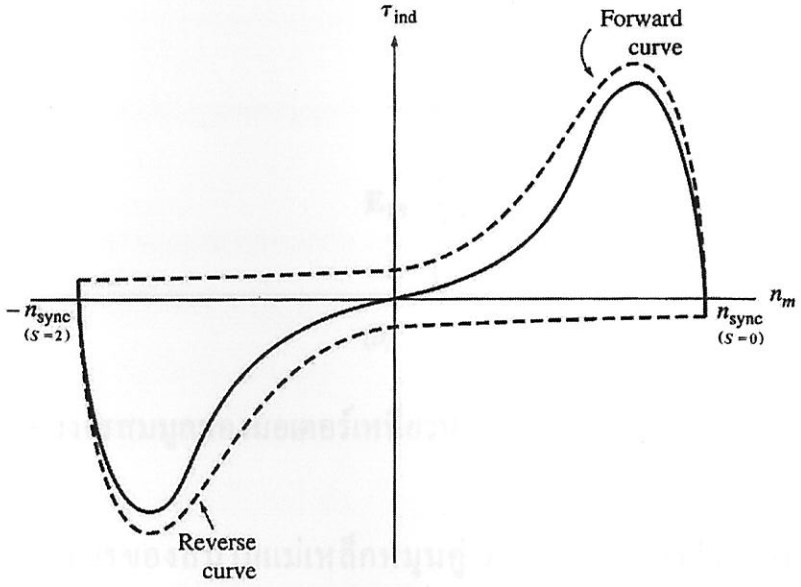
$Z_A = 9.5 + j3.5\ \Omega$

จงหาขนาดของคาปาซิเตอร์ที่นำมาต่อเข้ากับขดลวดช่วยตอนเริ่มเดินเครื่อง เพื่อทำให้มุมของกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องในขดลวดทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน

<u>Sol^n</u>

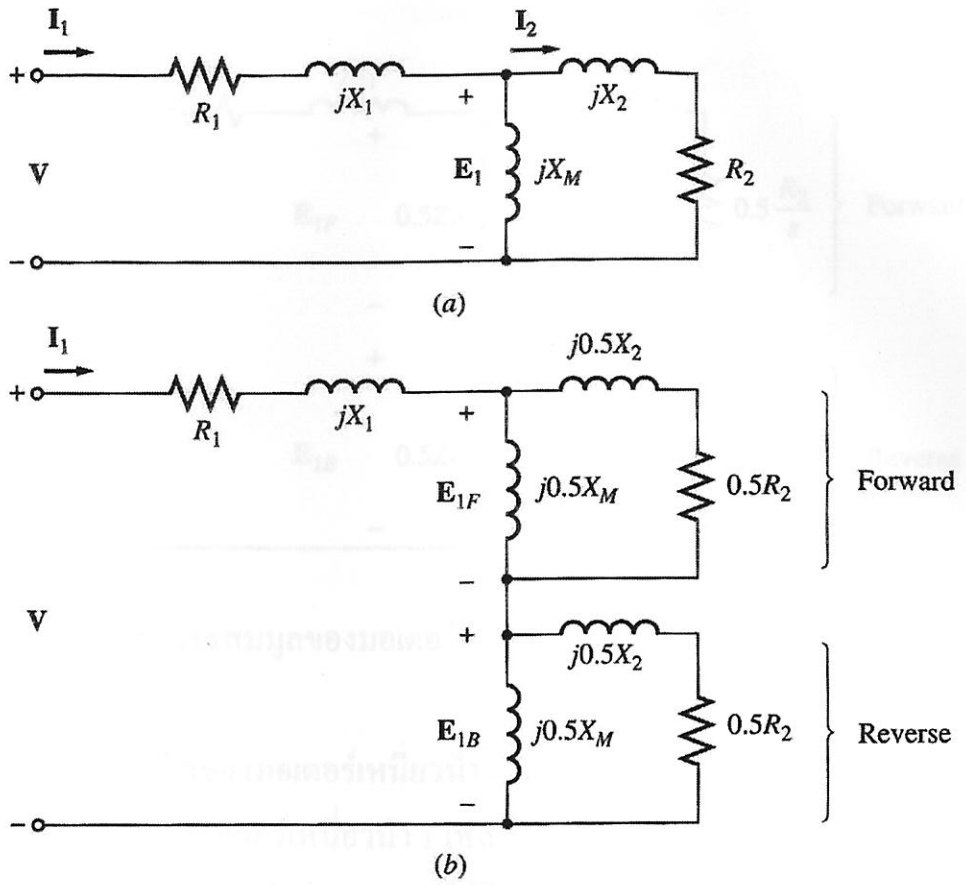
7.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

จากทฤษฎีสนามแม่เหล็กหมุนคู่ (double-revolving-field theory) ที่ใช้อธิบายลักษณะสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยการแทนคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก 2 คลื่น ที่มีขนาดเท่ากันเคลื่อนที่สวนทางกันด้วยความเร็วซิงโครนัส ซึ่งประกอบด้วยคลื่นที่วิ่งไปข้างหน้า (forward magnetic field) และคลื่นที่วิ่งย้อนหลัง (reverse magnetic field) จึงทำให้เกิด T-S Curve แสดงได้ดังรูปที่ 7.10 โดยค่าสลิปจะอยู่ระหว่าง 0 – 2



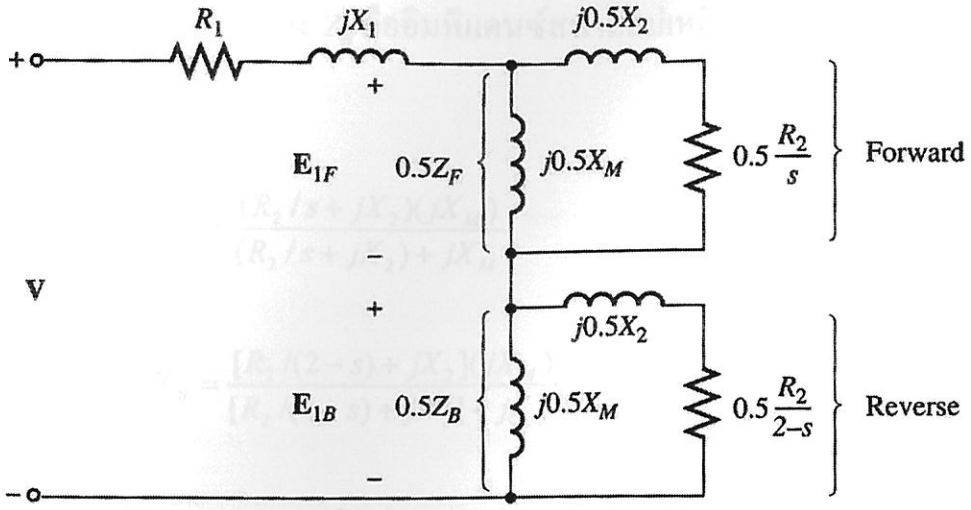
รูปที่ 7.10 T-S Curve ที่เกิดจากคลื่นที่วิ่งไปข้างหน้าและคลื่นที่วิ่งย้อนหลัง [2]

จากรูปที่ 7.10 จะสังเกตเห็นว่า มอเตอร์จะไม่มีแรงบิดตอนเริ่มเดินเครื่อง แต่ถ้าทำให้เกิดแรงบิดขึ้นด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งที่อธิบายในข้างต้น มอเตอร์จะหมุนและเร่งความเร็วขึ้นจนถึงความเร็วพิกัดได้ ซึ่งสนามแม่เหล็กคู่ทั้งสองจะทำให้เกิดแรงบิดมีลักษณะสมบัติเช่นเดียวกับแรงบิดที่ได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ที่เกิดจากการประยุกต์วงจรสมมูลของหม้อแปลงเช่นกันกับ 3 เฟส โดยเทียบมาทางด้านสเตเตอร์แล้วแสดงได้ดังรูปที่ 7.11(a) ซึ่งจากรูปวงจรสมมูล ส่วนของกำลังงานสูญเสียในแกนเหล็ก (P_{core}) จะไม่แสดงอยู่ในรูป โดยจะพิจารณาแบบรวมเป็นก้อนเดียวกันกับ $P_{F\&W}$, P_{stray} แล้วเรียกว่ากำลังงานสูญเสียจากการหมุนตัวเปล่า (P_{rot}) และเป็นวงจรสมมูลขณะที่โรเตอร์ยังไม่หมุน



รูปที่ 7.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ขณะที่โรเตอร์ยังไม่หมุน [2]

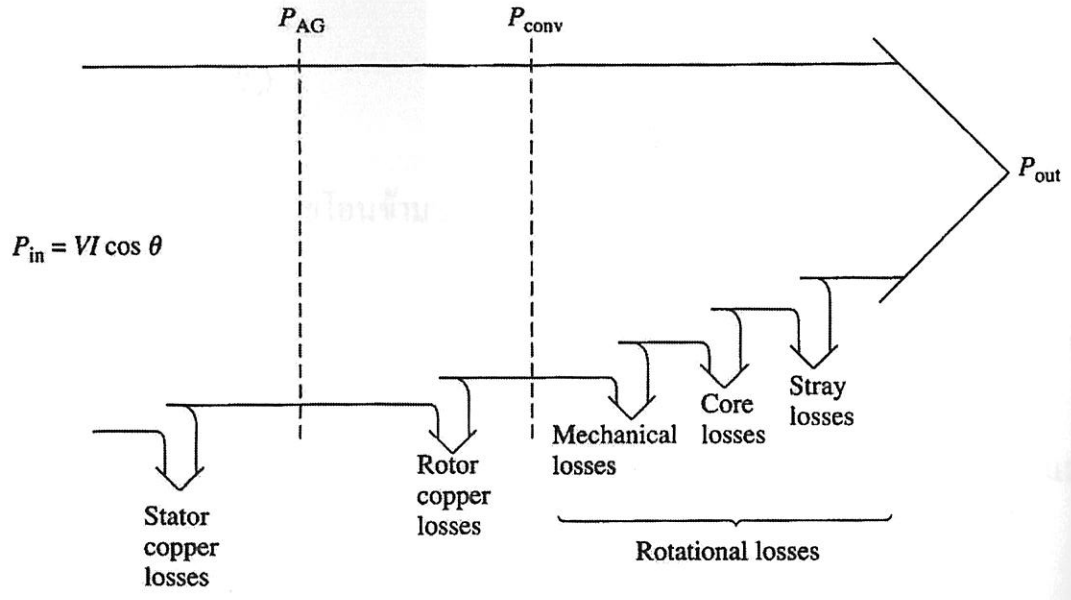
เมื่อใช้หลักการของสนามแม่เหล็กหมุนคู่ วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กันได้ โดยแต่ละส่วนจะเป็นผลเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้า และสนามแม่เหล็กที่หมุนย้อนหลัง ดังแสดงด้วยรูปที่ 7.11(b) ซึ่งเมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้าขณะที่โรเตอร์มีการหมุน ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหรือความเร็วซิงโครนัส (n_s) กับความเร็วของโรเตอร์ จะถูกกำหนดด้วยค่า s เช่นเดียวกับเมื่อพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ดังนั้นในส่วนของความต้านทานในวงจรโรเตอร์ที่เป็นผลจากสนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้าขณะที่โรเตอร์มีการหมุน จะมีค่าเท่ากับ $0.5R_2/s$ ส่วนเมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กที่หมุนย้อนหลังขณะที่โรเตอร์มีการหมุน ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วซิงโครนัส ($-n_s$) กับความเร็วของโรเตอร์ จะถูกกำหนดด้วยค่า $2-s$ ดังนั้นในส่วนของความต้านทานในวงจรโรเตอร์ที่เป็นผลจากสนามแม่เหล็กที่หมุนย้อนหลังขณะที่โรเตอร์มีการหมุน จะมีค่าเท่ากับ $0.5R_2/(2-s)$ จึงได้วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสในรูปท้ายสุดขณะที่โรเตอร์มีการหมุน แสดงได้ดังรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ขณะที่โรเตอร์หมุน [2]

7.4 กำลังงานและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส

วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ในรูปที่ 7.12 จะช่วยในการอธิบายค่ากำลังงานและกำลังสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ได้โดยง่าย ความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าขาเข้าและกำลังงานกลขาออกแสดงเป็นไดอะแกรมการไหลของกำลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ได้ดังรูปที่ 7.13 ซึ่งก็มีลักษณะคล้ายคลึงกับเมื่อพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส



รูปที่ 7.13 ไดอะแกรมการไหลของกำลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส [2]

เมื่อพิจารณารูปที่ 7.12 เพื่อใช้คำนวณค่ากระแสสเตเตอร์ที่ป้อนให้แก่มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส โดยกำหนดให้ Z_F และ Z_B คืออิมพีแดนซ์สนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้าและหมุนย้อนหลังตามลำดับ จะได้

$$Z_F = R_F + jX_F = \frac{(R_2/s + jX_2)(jX_M)}{(R_2/s + jX_2) + jX_M} \tag{7-1}$$

$$Z_B = R_B + jX_B = \frac{[R_2/(2-s) + jX_2](jX_M)}{[R_2/(2-s) + jX_2] + jX_M} \tag{7-2}$$

ดังนั้นจึงได้กระแสสเตเตอร์ I_1 คือ

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{V}}{R_1 + jX_1 + 0.5Z_F + 0.5Z_B} \tag{7-3}$$

กำลังงานที่ใช้ถ่ายโอนข้ามช่องอากาศ (air-gap power) ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้าและหมุนย้อนหลัง สามารถคำนวณได้ในสมการที่ (7-4) และ (7-5) ตามลำดับ

$$P_{\mathrm{AG},F} = I_1^2(0.5R_F) \tag{7-4}$$

$$P_{\mathrm{AG},B} = I_1^2(0.5R_B) \tag{7-5}$$

จึงหากำลังงานที่ใช้ถ่ายโอนข้ามช่องอากาศสุทธิได้เป็น

$$P_{\mathrm{AG}} = P_{\mathrm{AG},F} - P_{\mathrm{AG},B} \tag{7-6}$$

จากความรู้ที่ได้จากการพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในบทที่ผ่านมา จึงได้แรงบิดเหนี่ยวนำหรือแรงบิดภายใน (internal torque) มีค่าดังสมการที่ (7-7)

$$\tau_{\mathrm{ind}} = \frac{P_{\mathrm{AG}}}{\omega_s} \tag{7-7}$$

และกำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์สามารถหาได้จากผลรวมของกำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้าและกำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่หมุนย้อนหลัง

$$P_{\text{RCL}} = P_{\text{RCL},F} + P_{\text{RCL},B} \tag{7-8}$$

จากความรู้ที่ได้จากการพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสในบทที่ผ่านมา จึงได้กำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่หมุนไปข้างหน้าและกำลังงานสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่หมุนย้อนหลัง ดังสมการที่ (7-9) และ (7-10) ตามลำดับ

$$P_{\text{RCL},F} = s\, P_{\text{AG},F} \tag{7-9}$$

$$P_{\text{RCL},B} = (2 - s)\, P_{\text{AG},B} \tag{7-10}$$

และกำลังงานที่ใช้แปลงผันกำลังไฟฟ้าไปเป็นกำลังกลหรือเรียกว่ากำลังงานภายใน (internal power) จึงหาได้จาก

$$P_{\text{conv}} = (1 - s)\, P_{\text{AG}} \tag{7-11}$$

หรือ

$$P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}}\, \omega_m \tag{7-12}$$

กำลังงานภายในที่ได้ยังไม่ใช่กำลังงานขาออก เนื่องจากมีกำลังงานสูญเสียเนื่องจากการหมุนตัวเปล่ารวมอยู่ด้วย โดยในการใช้งานจริงมอเตอร์จะมีความเร็วเกือบคงที่ ค่ากำลังงานสูญเสียเนื่องจากการหมุนตัวเปล่าถือว่ามีค่าคงที่ได้ ดังนั้นจึงสามารถหากำลังงานขาออกได้คือ

$$P_{\text{out}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{rot}} \tag{7-13}$$

$$P_{\text{out}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{core}} - P_{\text{F\&W}} - P_{\text{stray}} \tag{7-14}$$

โดยที่ แรงบิดที่เพลา: $\tau_{\text{shaft}} = \dfrac{P_{\text{out}}}{\omega_m}$ (7-15)

<u>ตัวอย่างที่ 7.2</u> มอเตอร์แยกเฟสขนาด 1/3 hp, 110 V, 60 Hz, 6 ขั้ว มีค่าอิมพิแดนซ์ดังนี้

$R_1 = 1.52\,\Omega$ $R_2 = 3.13\,\Omega$

$X_1 = 2.10\,\Omega$ $X_2 = 1.56\,\Omega$ $X_M = 58.2\,\Omega$

กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กมีค่า 35 W และกำลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลมพร้อมกำลังงานสูญเสียสเตรย์มีค่า 16 W สำหรับสลิป 5 % ที่พิกัดแรงดันและพิกัดความถี่ จงคำนวณหา

(a) ความเร็ว

(b) กระแสสเตเตอร์ และตัวประกอบกำลัง

(c) P_{in}

(d) P_{AG}

(e) P_{conv}, τ_{ind}

(f) P_{out}, τ_{load}

(g) ประสิทธิภาพ

<u>Sol$^{\text{n}}$</u>

<u>ตัวอย่างที่ 7.3</u> มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่องขนาด 1/4 hp, 110 V, 60 Hz, 4 ขั้ว มีค่าอิมพิแดนซ์ดังนี้

$R_{1,\text{main}} = 2.02\,\Omega \qquad R_{2,\text{main}} = 4.12\,\Omega$

$X_{1,\text{main}} = 2.79\,\Omega \qquad X_{2,\text{main}} = 2.12\,\Omega \qquad X_{M,\text{main}} = 66.8\,\Omega$

กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กมีค่า 24 W และกำลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืดและแรงต้านลมมีค่า 13 W สำหรับสลิป 0.05 จงหาค่ากระแสสเตเตอร์ ตัวประกอบกำลัง กำลังงานขาออก ความเร็ว แรงบิด และประสิทธิภาพ เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัดแรงดันและพิกัดความถี่ โดยขดลวดช่วยเริ่มเดินเครื่องถูกเปิดออก

<u>Sol^{n}</u>

7.5 แบบฝึกหัดท้ายบท

7.1) มอเตอร์แยกเฟสขนาด 1/3 hp, 120 V, 60 Hz, 4 ขั้ว มีค่าอิมพิแดนซ์ดังนี้

$R_1 = 1.80\ \Omega$ $X_1 = 2.40\ \Omega$ $X_M = 60\ \Omega$

$R_2 = 2.50\ \Omega$ $X_2 = 2.40\ \Omega$

กำลังงานสูญเสียในขณะที่หมุนตัวเปล่า (rotational losses) มีค่าคงที่เท่ากับ 51 W ถ้าสลิปเท่ากับ 0.05 จงคำนวณหา

(a) กำลังงานขาเข้า (Ans : 450 W)

(b) กำลังงานช่องอากาศ (Ans : 371 W)

(c) P_{conv} (Ans : 352 W)

(d) P_{out} (Ans : 301 W)

(e) τ_{ind} (Ans : 1.97 N·m)

(f) τ_{load} (Ans : 1.68 N·m)

(g) ประสิทธิภาพ (Ans : 66.9 %)

(h) ตัวประกอบกำลัง (Ans : 0.713 lagging)

7.2) สำหรับปัญหาในข้อ 7.1 เมื่อมอเตอร์เริ่มเดินเครื่อง ขดลวดช่วย (auxiliary winding) จะถูกเปิดออกเมื่อมอเตอร์เร่งความเร็วขึ้นไปถึง 400 r/min จงหาแรงบิดเหนี่ยวนำ (induced torque) ที่ผลิตได้จากขดลวดหลัก (main winding) และถ้าสมมติให้กำลังงานสูญเสียในขณะที่หมุนตัวเปล่ามีค่าคงที่เท่ากับ 51 W มอเตอร์จะยังคงเร่งความเร็วได้ต่อไปหรือมอเตอร์จะมีความเร็วตกลง (Ans : τ_{ind} = 1.00 N·m, P_{conv} จะมีค่าเท่ากับ 41.6 W ซึ่งน้อยกว่าค่า P_{rot} ดังนั้นความเร็วของมอเตอร์จึงต้องตกลง)

7.3) มอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์ช่วยเริ่มเดินเครื่องขนาด 1.5 hp, 220 V, 50 Hz, 2 ขั้ว มีค่าอิมพิแดนซ์ดังนี้

$R_1 = 1.40\ \Omega$ $X_1 = 2.01\ \Omega$ $X_M = 105\ \Omega$

$R_2 = 1.50\ \Omega$ $X_2 = 2.01\ \Omega$

กำลังงานสูญเสียในขณะที่หมุนตัวเปล่ามีค่าคงที่เท่ากับ 291 W ถ้าสลิปเท่ากับ 5% จงคำนวณหา

(a) กระแสสเตเตอร์ (Ans : 13.0 $\angle$-27.0° A)

(b) ตัวประกอบกำลัง (Ans : 0.891 lagging)

(c) กำลังงานขาเข้า (Ans : 2548 W)

(d) P_{AG} (Ans : 2184 W)

(e) P_{conv} (Ans : 2075 W)

(f) P_{out} (Ans : 1843 W)

(g) τ_{ind} (Ans : 6.95 N·m)

(h) τ_{load} (Ans : 6.18 N·m)

(i) ประสิทธิภาพ (Ans : 72.3 %)

7.4) สำหรับปัญหาในข้อ 7.3 จงหาแรงบิดเหนี่ยวนำ ถ้ามอเตอร์ทำงานที่สลิป 5% และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้วมีค่า (a) 190 V, (b) 208 V, (c) 230 V (Ans : (a) = 5.16 N·m, (b) = 6.22 N·m, (c) 7.61 N·m)

บรรณานุกรม

[1] Alger, P. L., *Induction machines: their behaviour and uses*, 2nd edition, Gordon and Breach Publishers, Amsterdam, 1970.

[2] Chapman, S. J., *Electric machinery fundamentals*, 4th edition, McGraw-Hill, New York, 2005.

[3] Fitzgerald, A. E., Kingsley, Jr, C., and Umans, S. D., *Electric machinery*, 5th edition, McGraw-Hill, New York, 1990.

[4] Kenjo, T., *Electric motors and their controls: an introduction*, Oxford University Press, New York, 1991.

[5] Nasar, S. A., and Unnewehr, L. E., *Electromechanics and electric machines*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1983.

[6] Ryff, P. F., *Electric machinery*, 2nd edition, Prentice-Hall, New Jersey, 1994.

[7] Sarma, M. S., *Electric machines: steady-state theory and dynamic performance*, 2nd edition, West Publishing Company, New York, 1994.

[8] ไพบูลย์ ไชยนิล, *การแปลงผันพลังงานกลไฟฟ้า 2*, 2529.