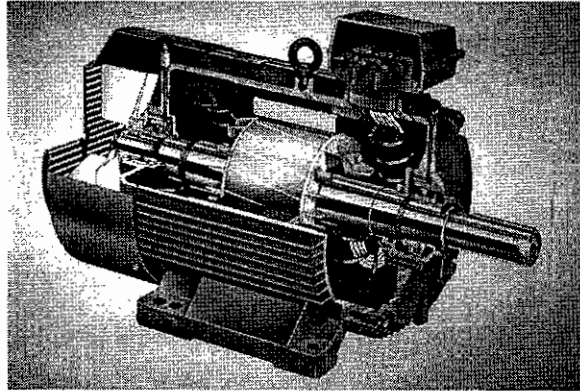


บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three-phase Induction Motor)

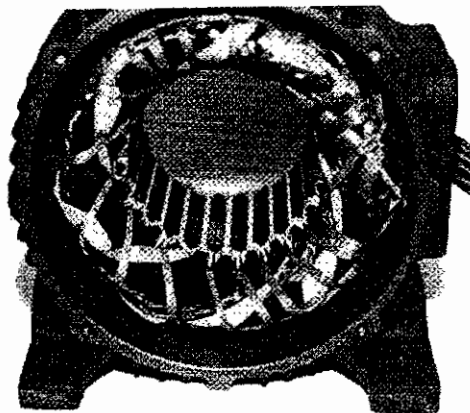


รูปที่ 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า มอเตอร์อินดักชัน มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่หมุน (Rotor)

2.1.1 ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator)

ส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส หรือสเตเตอร์ ซึ่งจะทำมาจากแผ่นเหล็ก ลามิเนทบางๆ อัดซ้อนกันหลายๆแผ่น และทำเป็นช่องสลีตไว้เพื่อบรรจุขดลวด กล่าวคือ สเตเตอร์ จะมีหน้าที่ยึดขดลวดอาร์เมเจอร์ที่บรรจุอยู่ในช่องสลีต



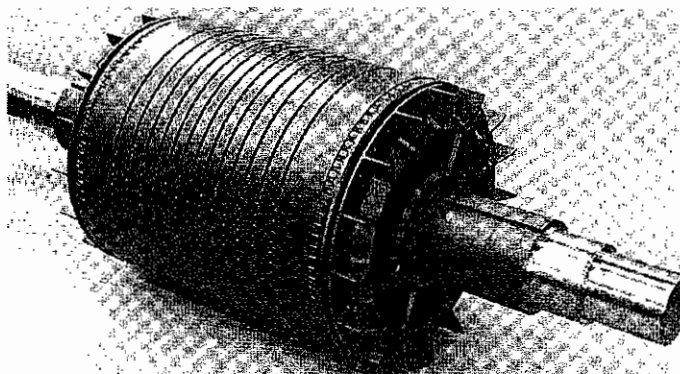
รูปที่ 2.2 ส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส หรือที่เรียกว่า สเตเตอร์

2.1.2 ส่วนที่หมุน หรือตัวหมุน (Rotor)

โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor)

มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้ เรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage induction motor) มีประมาณ 90% ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทั้งนี้เนื่องจากทำได้ง่ายและทนทาน โดยประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอก และถูกทำให้เป็นช่องสลิตขนานกันเพื่อบรรจุตัวนำของตัวหมุนลงในช่องสลิตนั้น ตัวนำที่ฝังเป็นแท่งทองแดง โดยในหนึ่งสลิตจะบรรจุตัวนำเพียง 1 แท่งเท่านั้น ปลายสุดของแท่งตัวนำทั้ง 2 ด้านจะถูกฉลุดวงจรเข้าด้วยกันอย่างถาวร จึงไม่สามารถที่จะนำความต้านทานจากภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจรตัวหมุนเพื่อช่วยในการเริ่มหมุนได้ สลิตของตัวหมุนจะวางให้มีลักษณะที่ไม่ขนานกับเพลา โดยเฉียงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้มอเตอร์หมุนได้เร็ว ด้วยการลดการฮัมของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic hum) และช่วยในการลดการเกิดการลัดของตัวหมุนอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่ที่พื้นของสเตเตอร์กับโรเตอร์ ส่วนโรเตอร์แบบอื่นๆ ก็มีลักษณะคล้ายกันกับตัวหมุนโรเตอร์แบบกรงกระรอก โดยประกอบด้วยแท่งเหล็กทรงกระบอกคั่น มอเตอร์จะหมุนได้ขึ้นอยู่กับผลของการเกิดกระแสไหลวนในแท่งเหล็กของโรเตอร์



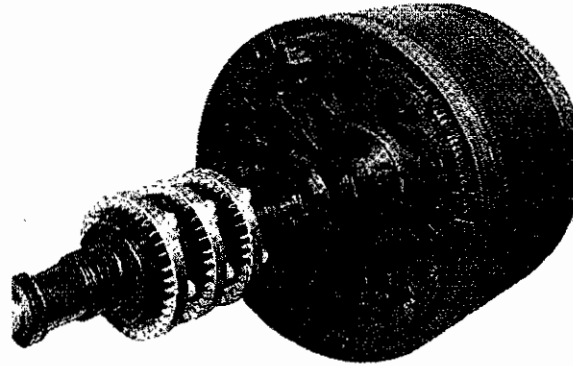
รูปที่ 2.3 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2. โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ หรือโรเตอร์แบบวาล์ว หรือเฟสวาล์ว

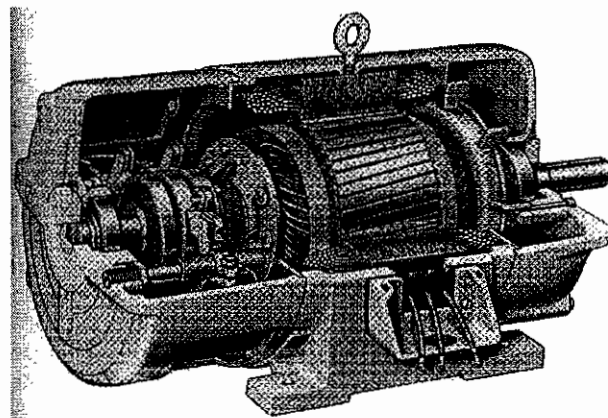
(Wound-rotor or phase wound-rotor)

มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้ เรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ หรือเฟสวาล์วมอเตอร์ หรือสลีปรिंगมอเตอร์ (Wound-rotor induction motor or Slip-rings motor) พบมากในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส การพันขดลวดจะเป็นแบบ 2 ชั้นเหมือนกับขดลวดที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ภายในโรเตอร์จะถูกต่อแบบสตาร์มีปลายสายออกมา 3 เส้นต่อเข้ากับสลีปรिंगที่ติดกับเพลาของโรเตอร์ซึ่งมีแปรงถ่านติดตั้งอยู่ และมีข้อจำกัดคือ ที่โรเตอร์ต้องมี

จำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์ เราสามารถนำความต้านทานจากภายนอกที่ต่อแบบสตาร์มาต่อเข้ากับสลิปริงที่ต่อมาจากขลวดในโรเตอร์แบบขลวดพันรอบ โรเตอร์ เพื่อเพิ่มแรงบิดเริ่มหมุน เมื่อมอเตอร์หมุนเข้าสู่ความเร็วปกติ สลิปริงจะถูกลัดวงจร ทำให้โรเตอร์ทำงานเหมือนกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก



รูปที่ 2.4 โรเตอร์แบบขลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound-rotor) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบขลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound-rotor induction motor)

2.2 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Basic Induction Motor Concepts)

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีพื้นฐานใกล้เคียงกับมอเตอร์ไฟฟ้าเชิงโรตัส ซึ่งสามารถอธิบายหลักการพื้นฐานและสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.1 การเหนี่ยวนำให้เริ่มหมุนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้ขลวดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุน เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กของสนามแม่เหล็กหมุนเคลื่อนตัวตัดตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นและเนื่องจากโรเตอร์ถูกลัดวงจรจึงเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงบิดเหนี่ยวนำเป็นผลให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน หลังจากที่โรเตอร์หมุนด้วย

ความเร็วรอบคงตัวหรือความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ เนื่องมาจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้างสนามแม่เหล็ก (B_s) มีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา ความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนสามารถหาได้จากสมการ แสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

โดยที่ n_s = ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน [r/min or rpm]

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก [ขั้ว]

f = ความถี่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ [Hz]

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ตัวนำโรเตอร์สามารถหาได้จาก

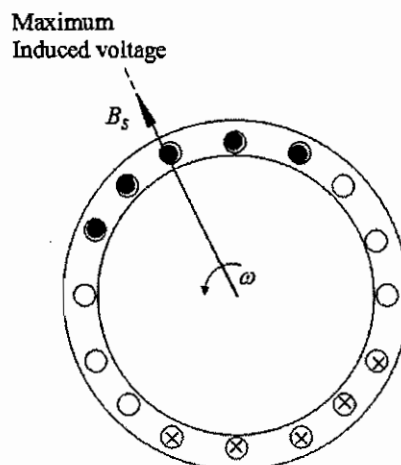
$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (2.2)$$

โดยที่ e_{ind} = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำโรเตอร์

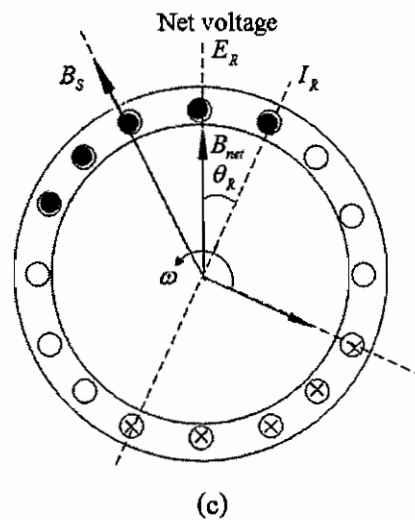
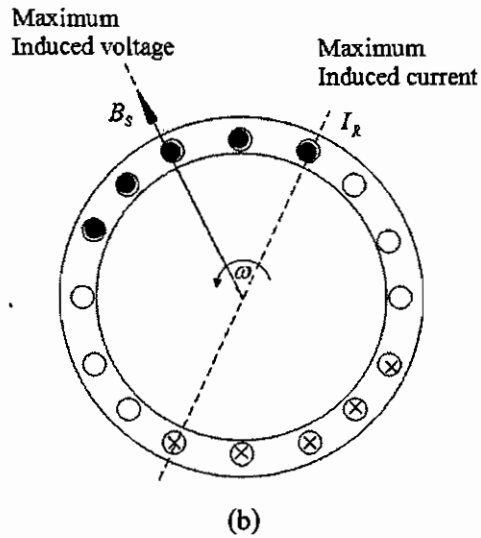
v = ความเร็วในการเคลื่อนตัวตัดฟลักแม่เหล็กของตัวนำโรเตอร์

B = ความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็กของขดลวดที่สเตเตอร์

l = ความยาวของตัวนำโรเตอร์ที่เคลื่อนตัวตัดกับฟลักแม่เหล็ก



(a)



- รูปที่ 2.6** แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ตัวนำโรเตอร์ (a) สนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำโรเตอร์
 (b) แรงดันไฟฟ้าที่โรเตอร์จะสร้างกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำโรเตอร์ซึ่งจะตามหลังแรงดันไฟฟ้า
 (c) กระแสไฟฟ้าในตัวนำโรเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็ก และเกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในตัวนำโรเตอร์ B_R

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ในตัวนำโรเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำที่สเตเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ตัวนำโรเตอร์กับสนามแม่เหล็กของแกนโรเตอร์ด้านบนจะสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กทางด้านขวา โดยแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านบนจะพุ่งออกจากหน้ากระดาษและ

แรงดันเหนี่ยวนำด้านล่างจะมีทิศทางเข้า ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวโรเตอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อตัวนำโรเตอร์ได้ถูกเหนี่ยวนำ กระแสสูงสุดของตัวนำโรเตอร์จะนำหน้าแรงดันสูงสุดของโรเตอร์ กระแสที่ไหลในตัวนำโรเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็ก และเกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในตัวนำโรเตอร์ (B_R) ซึ่งจะเหนี่ยวนำเกิดปฏิสัมพันธ์กับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สเตเตอร์ ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่โรเตอร์ (τ_{ind}) ดังสมการ

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S \quad (2.3)$$

แรงบิด (τ_{ind}) ที่เกิดขึ้นจะทำให้โรเตอร์หมุนไปได้ด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ถ้าความเร็วของโรเตอร์เท่ากับความเร็วซิงโครนัส ค่า e_{ind} และ τ_{ind} จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นการเร่งความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงไม่สามารถทำให้ความเร็วของโรเตอร์มีค่าเท่ากับความเร็วซิงโครนัสได้

การกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำได้ง่ายเพียงแค่สลับสายไฟคู่ใดคู่หนึ่งที่จ่ายให้ขดลวดที่สเตเตอร์เท่านั้นก็จะทำให้สนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์หมุนกลับทิศทางได้ นับได้ว่าเป็นข้อดีอีกอย่างหนึ่งของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.2.2 โรเตอร์สลลิป (Rotor Slip)

การเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่แกนของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความเร็วโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุน และเนื่องจากพฤติกรรมของการเหนี่ยวนำมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับแรงดันและกระแสของโรเตอร์ ตัวแปรที่ถูกใช้ในการหาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุน หาได้จากความเร็วสลลิป (n_{slip}) ซึ่งสามารถหาได้จากผลต่างของความเร็วซิงโครนัสและความเร็วโรเตอร์ ดังสมการนี้คือ

$$n_{slip} = n_s - n_r \quad (2.4)$$

โดยที่ n_{slip} = ความเร็วสลลิป [rpm]

n_s = ความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ [rpm]

n_r = ความเร็วที่แกนเพลลาของโรเตอร์ [rpm]

จากสมการสามารถนำไปหาค่าสลลิป (s) ซึ่งจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ได้จากสมการนี้ คือ

$$s = \frac{n_{slip}}{n_s} (\times 100\%) \quad (2.5)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} (\times 100\%) \quad (2.6)$$

สมการนี้สามารถเขียนในรูปของความเร็วเชิงมุม ω [rad/sec] ดังนี้

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} (\times 100\%) \quad (2.7)$$

จากสมการจะพบว่า ค่าสลลิป (s) จะขึ้นอยู่กับจุดทำงานของมอเตอร์ ซึ่งที่สภาวะการทำงาน ส่วนใหญ่ค่าสลลิป (s) จะมีค่า $0 < s < 1$ ถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ คือ 0-100 % ดังนั้น $n_r < n_s$ เสมอ (n_r หมุนในทิศทางเดียวกับ n_s) ถ้าโรเตอร์หมุนที่ความเร็วซิงโครนัส $n_r = n_s$ ค่าสลลิปจะมีค่าเป็น ศูนย์ ($s = 0$) หรือ 0 % ซึ่งเปรียบได้กับการทำงานของมอเตอร์ที่สภาวะไม่มีโหลด แต่ถ้าโรเตอร์หยุดนิ่งไม่มีการหมุน $n_r = 0$ ค่าสลลิปจะมีค่าเท่ากับหนึ่ง ($s = 1$) หรือ 100 %

นอกจากนั้นเราสามารถหาค่าความเร็วทางกลของแกนเพลารอเตอร์ในเทอมของความเร็วซิงโครนัสและค่าสลลิป โดยหาจากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) ดังนี้

$$n_r = (1-s)n_s \quad (2.8)$$

$$\text{หรือ } \omega_r = (1-s)\omega_s \quad (2.9)$$

2.2.3 ความถี่ทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (The Electrical Frequency on the Rotor)

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดจากการเหนี่ยวนำของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่คั้วโรเตอร์ ซึ่งความถี่ทางไฟฟ้าที่โรเตอร์จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ $f_r = f$ ในขณะที่โรเตอร์ยังไม่หมุน แต่เมื่อโรเตอร์เริ่มมีการหมุน ความถี่ของโรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลลิป (s) ดังสมการ คือ

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.10)$$

และความถี่โรเตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการนี้คือ

$$f_r = sf \quad (2.11)$$

โดยที่ f_r = ความถี่โรเตอร์ [Hz]

f = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า [Hz]

เมื่อแทนสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.11) จะได้ว่า

$$f_r = \frac{n_s - n_r}{n_s} f$$

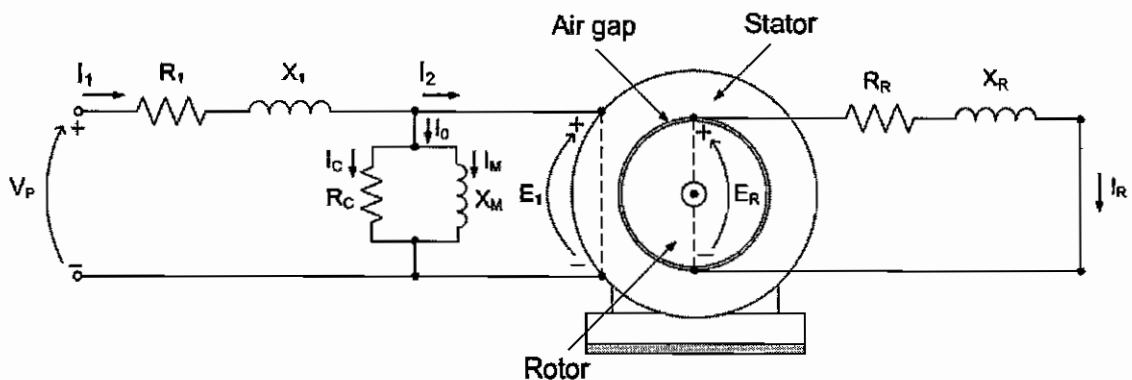
และจาก $n_s = \frac{120f}{P}$

ดังนั้น จะได้ว่า $f_r = \frac{P}{120}(n_s - n_r) \quad (2.12)$

2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(The Equivalent Circuit of an Induction Motor)

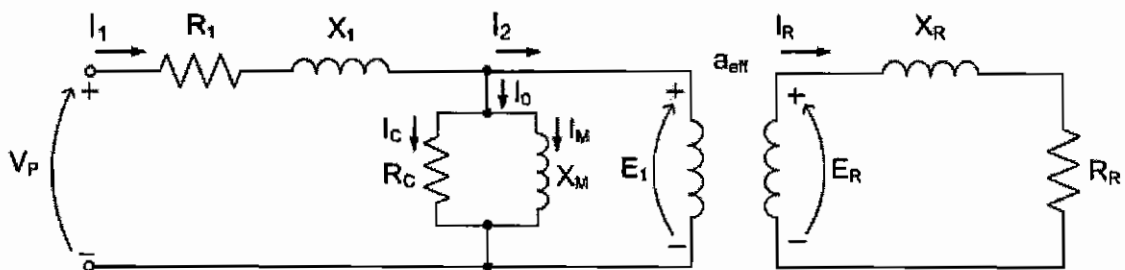
การจ่ายหรือถ่ายโอนพลังงานจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำได้เช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยชุดขดลวดที่สเตเตอร์เปรียบเสมือนกับชุดขดลวดปฐมภูมิ และชุดขดลวดที่โรเตอร์เปรียบเสมือนกับชุดขดลวดทุติยภูมิ แต่จะมีความแตกต่างกันอยู่ตรงที่ชุดขดลวดที่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกกลัดวงจรไว้ ดังนั้นวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจึงคล้ายกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.3.1 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเทียบกับของหม้อแปลงไฟฟ้า

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการอธิบายถึงหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 จากรูปวงจรจะมีความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำร่วม (Self-inductance) ทางด้านขดลวดปฐมภูมิ (ขดลวดสเตเตอร์) ความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์คือ R_1 และค่ารีแอกแตนซ์รีวไหลของขดลวดสเตเตอร์ คือ X_1 ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่อยู่ทางด้านอินพุตของวงจร โดย V_P คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ขดลวดสเตเตอร์

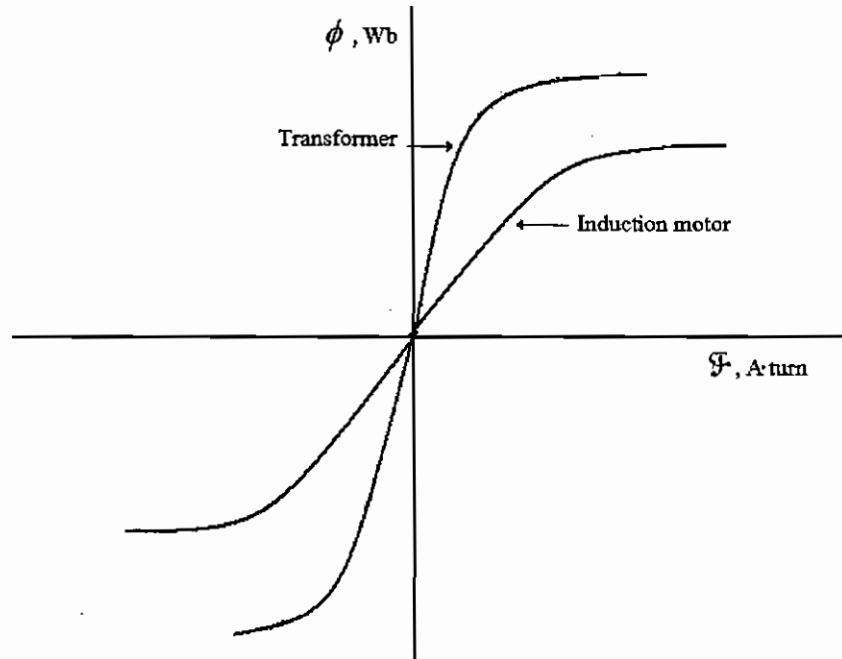


รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเทียบกับของหม้อแปลงไฟฟ้า

ฟลักซ์ในแกนเหล็กจะเป็นตัวที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ E_1 เปรียบเทียบได้กับส่วนที่เป็นแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Magnetomotive-force) - เส้นโค้งของฟลักซ์ (Magnetization curve) ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะได้ดังรูปที่ 2.9 จะสังเกตได้ว่าความชันของเส้นโค้งฟลักซ์-แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าจะน้อยกว่าเส้นโค้งของหม้อแปลงไฟฟ้า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีช่องว่างอากาศเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งจะส่งผลให้ค่ารีล็กแตนซ์ของฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างขดลวดทางด้านปฐมภูมิและขดลวดทางด้านทุติยภูมิมีค่าลดลง ในส่วนของค่ารีล็กแตนซ์สูงที่เกิดจากช่องว่างอากาศบอกให้ทราบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กจะส่งผลต่อระดับของฟลักซ์ อย่างไรก็ตาม ค่ารีล็กแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก X_M ในวงจรสมมูลจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับของหม้อแปลงไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ E_1 สามารถรวมกับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ E_R ได้ถ้าเราทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ แต่การหาอัตราส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกทำได้ยากเพราะไม่มีความแตกต่างของขดลวดที่จะแยกได้อย่างชัดเจน

แรงดันไฟฟ้า E_R เกิดขึ้นมาจากกระแสที่ไหลในโรเตอร์ โดยการลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ



รูปที่ 2.9 เส้นโค้งของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Magnetomotive-force)
- เส้นโค้งของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetization curve)
ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านปฐมภูมิและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะเป็นองค์ประกอบที่เหมือนกันกับวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแตกต่างจากวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าตรงที่ความถี่ของโรเตอร์ที่ก่อให้เกิดแรงดัน E_R และค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ที่ประกอบด้วยความต้านทานของชุดขดลวดที่โรเตอร์ R_R และรีแอกแตนซ์รีวัตินของชุดขดลวดโรเตอร์ jX_R

2.3.2 วงจรสมมูลของโรเตอร์

เมื่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านขดลวดที่สเตเตอร์เหนี่ยวนำขดลวดที่โรเตอร์ โดยทั่วไป ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กด้านสเตเตอร์จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านของโรเตอร์ ในสภาวะการเคลื่อนที่ที่โรเตอร์หยุดนิ่ง เราเรียกว่า Locked-rotor หรือ Blocked-rotor ซึ่งจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ ส่วนแรงดันที่มีค่าน้อยมากจะเกิดขึ้นเมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเทียบเท่าความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ผลที่ได้คือไม่มีการเคลื่อนที่นั่นเอง แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ความเร็วโรเตอร์ค่าต่างๆ เป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าสลิป (s) ดังสมการนี้ คือ

$$E_R = sE_{LR} \quad (2.13)$$

โดยที่ $E_R =$ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่สภาวะการทำงานปกติ
 $E_{LR} =$ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำของโรเตอร์ที่สภาวะ โรเตอร์ถูกยึดไม่ให้หมุน

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางด้านของโรเตอร์ จะประกอบด้วยค่าความต้านทานของชุดขดลวดที่โรเตอร์ R_R และค่ารีแอกแตนซ์รีวัตต์ไหลของชุดขดลวดโรเตอร์ jX_R ความต้านทานของชุดขดลวดที่โรเตอร์ R_R เป็นค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับค่าสลิป ขณะที่รีแอกแตนซ์รีวัตต์ไหลของชุดขดลวดที่โรเตอร์จะมีผลของค่าสลิปมาเกี่ยวข้องด้วย

รีแอกแตนซ์รีวัตต์ไหลของชุดขดลวด โรเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าอินดักแตนซ์ของโรเตอร์และความถี่ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เกิดในโรเตอร์ เมื่อกำหนดให้ L_R เป็นค่าอินดักแตนซ์ของทางด้านโรเตอร์ จะสามารถหาค่ารีแอกแตนซ์รีวัตต์ไหลของชุดขดลวดที่โรเตอร์ได้จาก

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R$$

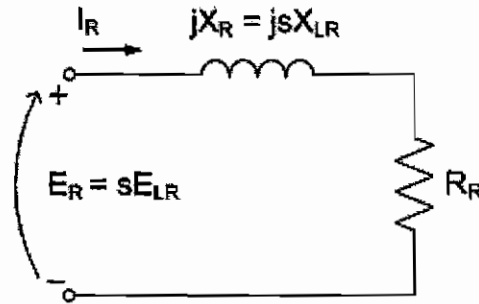
จากสมการ $f_r = sf$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi sf L_R \\ &= s(2\pi f L_R) \\ &= sX_{LR} \end{aligned} \quad (2.14)$$

โดยที่ $X_{LR} =$ รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ขณะที่โรเตอร์ถูกยึดไม่ให้มีการหมุน
 วงจรสมมูลของโรเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 และค่ากระแสไฟฟ้าที่ชุดขดลวดของโรเตอร์ จะหาได้จาก

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{E_R}{R_R + jX_R} \\ I_R &= \frac{sE_{LR}}{R_R + jsX_{LR}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\text{หรือ} \quad I_R = \frac{E_{LR}}{R_R/s + jX_{LR}} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สังเกตว่าสมการที่(2.16) ค่าอิมพีแดนซ์ของ โรเตอร์มีค่าเท่ากับ

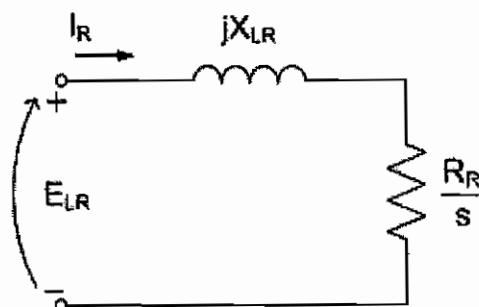
$$Z_{R,eq} = \frac{R_R}{s} + jX_{LR} \quad (2.17)$$

และวงจรสมมูลของโรเตอร์จะได้ดังรูปที่ 2.11 จากวงจรแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่โรเตอร์จะเท่ากับ E_{LR} และมีค่าอิมพีแดนซ์รวมเป็น $Z_{R,eq}$ ค่ากระแสที่ไหลในชุดขดลวดโรเตอร์สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟเทียบกับความเร็วรอบของโรเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.12

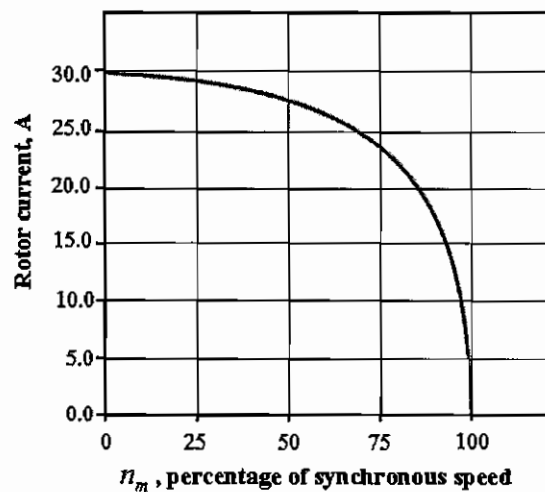
ที่ค่าสลิปค่าต่ำๆ เทอมของ $R_R/s \gg X_{LR}$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของโรเตอร์จะแปรตามค่าสลิปเป็นเชิงเส้น แต่ที่ค่าสลิปสูงๆ ค่า X_{LR} จะมีค่ามากกว่า R_R/s มาก ส่งผลให้กระแสมีค่าเข้าใกล้ค่าที่สภาวะคงตัว (Steady-state value)

2.3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลสุดท้ายของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอ้างถึงวงจรสมมูลของ โรเตอร์ที่ถูกอ้างอิงจากส่วนของสเตเตอร์ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลโรเตอร์ที่สนใจค่าของสลิปในความต้านทาน R_R



รูปที่ 2.12 กระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ค่าต่างๆ

แรงดัน, กระแสและค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าปกติสามารถอ้างอิงจากทางด้านปฐมภูมิได้โดยอาศัยอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อ a คือ ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า (Turns ratio) ดังสมการนี้ คือ

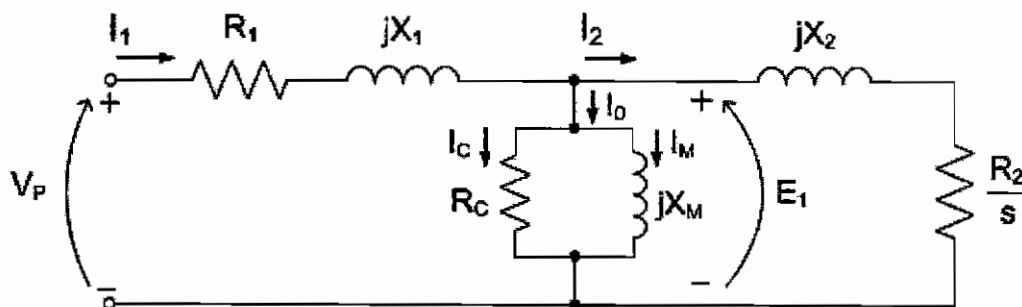
$$V_P = V'_S = aV_S \quad (2.18)$$

$$I_P = I'_S = \frac{I_S}{a} \quad (2.19)$$

และ $Z'_S = a^2 Z_S \quad (2.20)$

ถ้าอัตราส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ a_{eff} (Effective turns ratio) จะสามารถเปลี่ยนค่าของแรงดันที่โรเตอร์ได้เป็น

$$E_1 = E'_{LR} = a_{eff} E_{LR} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

หาค่ากระแสได้จาก

$$I_2 = I'_R = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (2.22)$$

และหาค่าอิมพีแดนซ์ของโรเตอร์ได้จาก

$$Z_2 = Z'_{R,eq} = a_{eff}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{LR} \right) \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) จะอธิบายได้ว่า

$$R_2 = R'_R = a_{eff}^2 R_R \quad (2.24)$$

$$X_2 = X'_{LR} = a_{eff}^2 X_{LR} \quad (2.25)$$

ดังนั้นวงจรสมมูลสุดท้ายที่ได้เป็นดังรูปที่ 2.13

จากสมการที่ (2.21-2.25)

E_1 = แรงดันไฟฟ้า E_{LR} ที่อ้างอิงจากวงจรสเตเตอร์

I_2 = กระแสไฟฟ้า I_R ที่อ้างอิงจากวงจรสเตเตอร์

Z_2 = อิมพีแดนซ์ $Z_{R,eq}$ ที่อ้างอิงจากวงจรสเตเตอร์

R_2 = ความต้านทาน R_R ที่อ้างอิงจากวงจรสเตเตอร์

X_2 = รีแอกแตนซ์ X_{LR} ที่อ้างอิงจากวงจรสเตเตอร์

2.4 คุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วสามารถวิเคราะห์ได้จากพฤติกรรมที่เกิดจากสนามแม่เหล็กภายในโรเตอร์ ดังนั้นสมการทั่วไปของแรงบิดจะหาได้จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.4.1 การเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิด

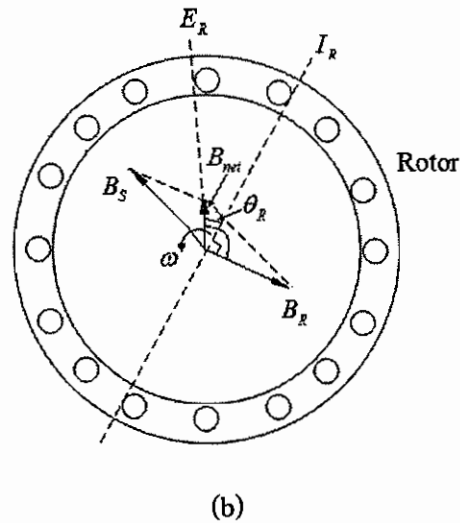
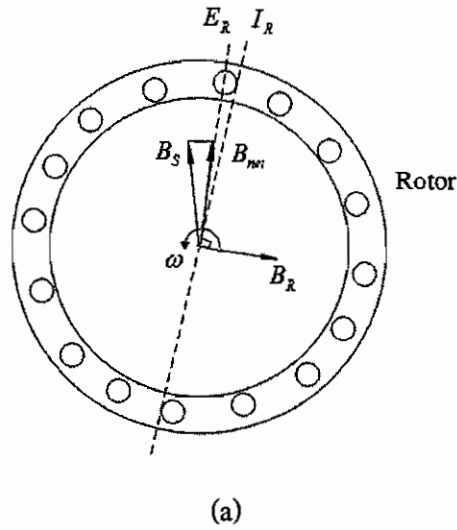
จากรูปที่ 2.14 (a) แสดงหลักการทำงานของโรเตอร์แบบกรงกระรอกในสถานะที่ไม่มีภาระหรือมีภาระเบาและมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็ก B_{net} เกิดขึ้นจากกระแสสนามแม่เหล็ก I_M ที่ไหลในวงจรสมมูล ขนาดของกระแสสนามแม่เหล็ก B_{net} จะเป็นสัดส่วนกับแรงดัน E_1 ถ้ากำหนดให้ E_1 เป็นค่าคงที่ สนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ก็จะคงที่ด้วย ซึ่งรวมถึงแรงดัน E_1 ก็จะแปรผันตามโพล เนื่องจากแรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ของสเตเตอร์คือ R_1 และ X_1 แต่อย่างไรก็ตามแรงดันที่ตกคร่อมจะมีค่าน้อยมาก จึงถือเป็นค่าคงที่ได้

ในสถานะที่ไม่มีภาระของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ความเร็วสลลิปที่โรเตอร์จะมีค่าน้อยมาก ความสัมพันธ์ของการหมุนระหว่างโรเตอร์และสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยมากและความถี่ที่โรเตอร์ก็จะมีค่าน้อยมากด้วย อันเนื่องมาจากแรงดัน E_R ที่ถูกเหนี่ยวนำที่แกนของโรเตอร์และกระแส I_R ที่ไหลมีค่าน้อยมากเช่นกัน เพราะความถี่ของโรเตอร์มีค่าน้อยจึงทำให้รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และกระแสสูงสุดที่โรเตอร์ I_R จะอินเฟสกับแรงดันที่โรเตอร์ E_R ดังนั้น ผลที่เกิดจากกระแสที่โรเตอร์จะได้สนามแม่เหล็ก B_R แรงบิดที่ถูกสร้างขึ้น สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_{net} \quad (2.26)$$

และหาขนาดได้จาก

$$\tau_{ind} = kB_R B_{net} \sin \delta \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.14 (a) สนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะโหลดเบา
(b) สนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะโหลดหนัก

จากรูปที่ 2.14 (b) แสดงหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สภาวะมีโหลดหรือมีภาระหนัก กระแสที่โรเตอร์ และมุม δ จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของ B_R จะส่งผลทำให้แรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากมุม δ ($\sin \delta, \delta > 90^\circ$) และเมื่อแรงบิดเข้าใกล้แรงบิดสูงสุดภาระที่แกนเพลลาจะเพิ่มขึ้นเพราะค่าของ $\sin \delta$ จะลดลงมากกว่าที่ B_R จะเพิ่มขึ้น ที่สภาวะดังกล่าวแรงบิดเหนี่ยวนำจะลดลงจนกระทั่งมอเตอร์หยุดหมุน จากสมการที่ (2.27) เราสามารถพิจารณาถึงพฤติกรรมของมอเตอร์ ได้ดังนี้

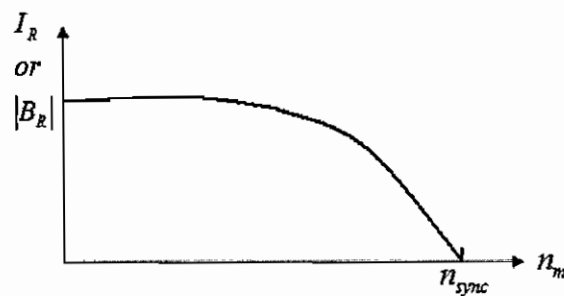
1. B_R สนามแม่เหล็กของโรเตอร์เป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลในแกนโรเตอร์เมื่อโรเตอร์ยังไม่ถึงจุดไม่อิมตัว กระแสที่ไหลในโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าสลิปหรือความเร็ว

ลดลง จากสมการ $I_R = \frac{E_{LR}}{R_R/s + jX_{LR}}$ สามารถพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 2.15 (a)

2. B_{net} สนามแม่เหล็กภายในตัวมอเตอร์เป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้า E_1 และเป็นค่าประมาณคงที่ กราฟการเปรียบเทียบระหว่าง B_{net} และความเร็วของมอเตอร์เป็นดังรูปที่ 2.15 (b)

3. $\sin \delta$ เป็นมุมระหว่าง B_{net} และ B_R จากรูปที่ 2.14 (b) จะได้ว่า

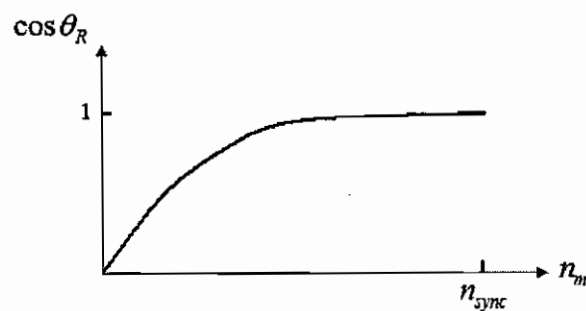
$$\delta = \theta_R + 90^\circ \quad (2.28)$$



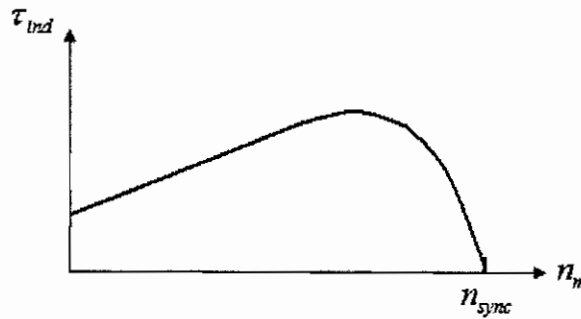
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 2.15 กราฟแสดงคุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

อย่างไรก็ตาม $\sin \delta = \sin(\theta_R + 90^\circ) = \cos \theta_R$ ซึ่งเป็นค่าตัวประกอบกำลังของส่วน
โรเตอร์ สามารถหาค่าได้จากสมการนี้คือ

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{X_R}{R_R} \quad (2.29)$$

$$= \tan^{-1} sX_{LR} \quad (2.30)$$

จะได้ว่า

$$PF_R = \cos \theta_R$$

$$PF_R = \cos \left(\tan^{-1} \frac{sX_{LR}}{R_R} \right) \quad (2.31)$$

จากสมการ (2.31) สามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 2.15 (c)

เมื่อแรงบิดเหนี่ยวนำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับทั้งสามค่าที่กล่าวมานั้น คุณสมบัติของแรงบิด-
ความเร็วในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถนำมาอธิบายได้ใหม่ โดยการพล็อตกราฟระหว่าง
แรงบิด-ความเร็วได้ดังรูปที่ 2.15 (d)

จากเส้นโค้งคุณลักษณะที่ได้เราสามารถแบ่งขอบเขตออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเราเรียกว่า
“low-slip region” ในช่วงนี้ ค่าสลิปของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามค่าโหลดและความเร็วที่
โรเตอร์จะลดลงเป็นเชิงเส้นตามค่าโหลดที่เพิ่มขึ้น การทำงานในช่วงนี้จะไม่คำนึงถึงรีแอกแตนซ์ที่
โรเตอร์ จึงประมาณว่าค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเป็นหนึ่งเมื่อกระแสที่โรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น
ตามค่าสลิป ช่วงขอบเขตของสภาวะการทำงานปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเราถือว่าอยู่ในช่วง
นี้ทั้งหมด

ช่วงที่สองของกราฟเราเรียกว่า “moderate slip region” ในช่วงนี้ความถี่ของโรเตอร์จะมีค่าสูงมาก และขนาดของรีแอกแตนซ์จะมีค่าใกล้เคียงกับความต้านทานที่โรเตอร์ ในช่วงนี้กระแสของโรเตอร์จะเพิ่มขึ้นไม่เร็วเท่ากับช่วงแรก ค่าตัวประกอบกำลังก็จะเริ่มลดลงและแรงบิดสูงสุดก็จะเกิดที่จุดเดียวกันนี้ด้วย

ช่วงสุดท้ายของกราฟเราเรียกว่า “high-slip region” เป็นช่วงที่แรงบิดเหนี่ยวนำจะลดลงเมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้น กระแสที่โรเตอร์ก็จะลดลงอย่างมากส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังลดลงตามไปด้วย

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แรงบิดพูลเอาต์จะมีค่าเป็น 200 ถึง 250 เปอร์เซ็นต์ของแรงบิดขณะที่มีภาระสูงสุด และแรงบิดเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 150 เปอร์เซ็นต์หรือมีค่าใกล้เคียงกับแรงบิดขณะที่มีภาระสูงสุด

2.4.2 สมการแรงบิดเหนี่ยวนำที่เกิดจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การหาแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์สามารถหาได้จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และแผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในการหาแรงบิดเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังนี้คือ

$$\tau_{ind} = \tau_{conv} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} \quad (2.32)$$

$$= \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (2.33)$$

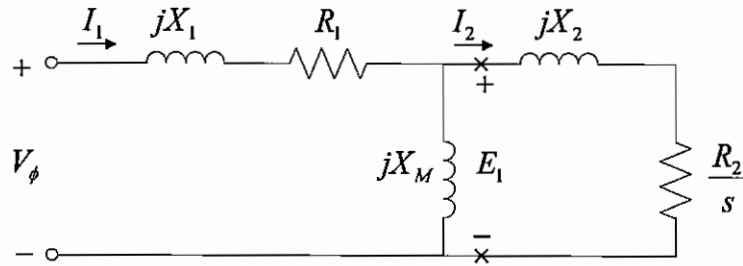
สมการสุดท้ายจะถูกใช้เมื่อความเร็วเชิง โครนัสเป็นค่าคงที่ เมื่อ ω_s เป็นค่าคงที่เราก็จะสามารถเข้าใจได้ว่ากำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศจะทำให้เกิดแรงบิดเหนี่ยวนำขึ้นที่มอเตอร์ เมื่อกล่าวถึงวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.16 จากรูปเป็นวงจร 1 เฟสซึ่งเราจะเห็นได้ว่า

$$P_{AG,1\phi} = I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.34)$$

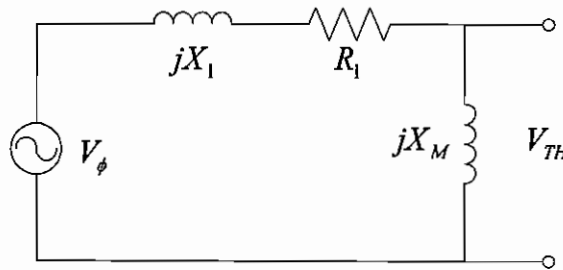
ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่เกิดในช่องว่างอากาศรวมสามารถหาได้จาก

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.35)$$

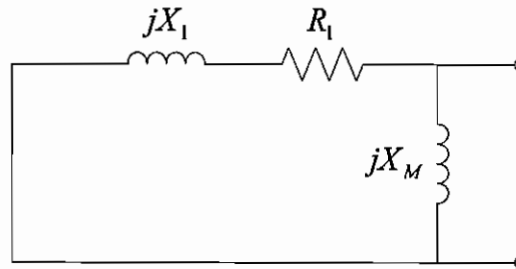
ถ้าเราหาค่ากระแส I_2 ได้เราก็จะทราบค่าของกำลังไฟฟ้าที่เกิดในช่องว่างอากาศและค่าแรงบิดเหนี่ยวนำ แต่อย่างไรก็ตามเราจะหากระแส I_2 โดยใช้วิธีของเทวินิน



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



(a)



(b)

รูปที่ 2.17 (a) วงจรหาค่าแรงดันเทวินิน (b) วงจรหาค่าอิมพีแดนซ์เทวินิน

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังรูปที่ 2.16 จะใช้วิธีของเทวินินในการหา
วงจรสมมูลของเทวินินได้โดยใช้กฎการแบ่งแรงดันคือ

$$\begin{aligned}
 V_{TH} &= V_{\phi} \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} \\
 &= V_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M}
 \end{aligned}$$

หาขนาดของแรงดันเทวินินคือ

$$V_{TH} = \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} V_\phi \quad (2.36)$$

ถ้า $X_M \gg X_1$ และ $X_M \gg R_1$ ขนาดของแรงดันเทวินินสามารถประมาณค่าได้
ดังนี้

$$V_{TH} = V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (2.37)$$

หาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลเทวินินได้จาก

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M}$$

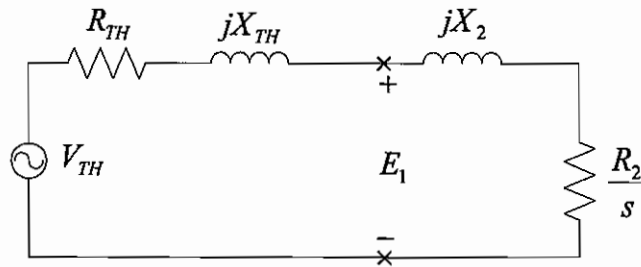
$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (2.38)$$

เพราะว่า $X_M \gg X_1$ และ $X_M + X_1 \gg R_1$ ค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะมี
ค่าประมาณดังนี้คือ

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (2.39)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (2.40)$$

จะได้วงจรสมมูลดังรูป



รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลเทวินิน

จากวงจรจะหาค่ากระแสได้จาก

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (2.41)$$

$$= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_2/s + jX_{TH} + jX_2} \quad (2.42)$$

ขนาดของกระแสคือ

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (2.43)$$

หาค่ากำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศได้จาก

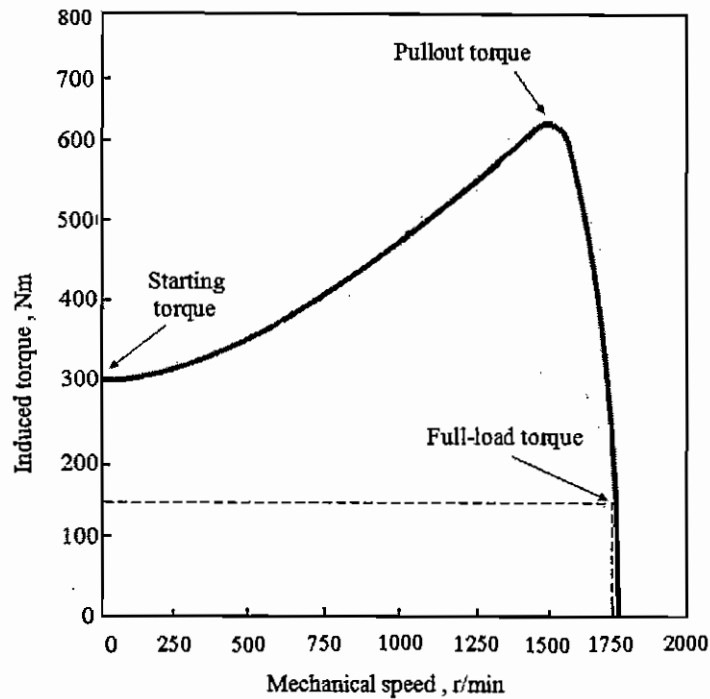
$$\begin{aligned} P_{AG} &= 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \\ &= \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \end{aligned} \quad (2.44)$$

และแรงบิดเหนี่ยวนำที่แกนโรเตอร์หาค่าได้จาก

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_s \left[(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \quad (2.45)$$

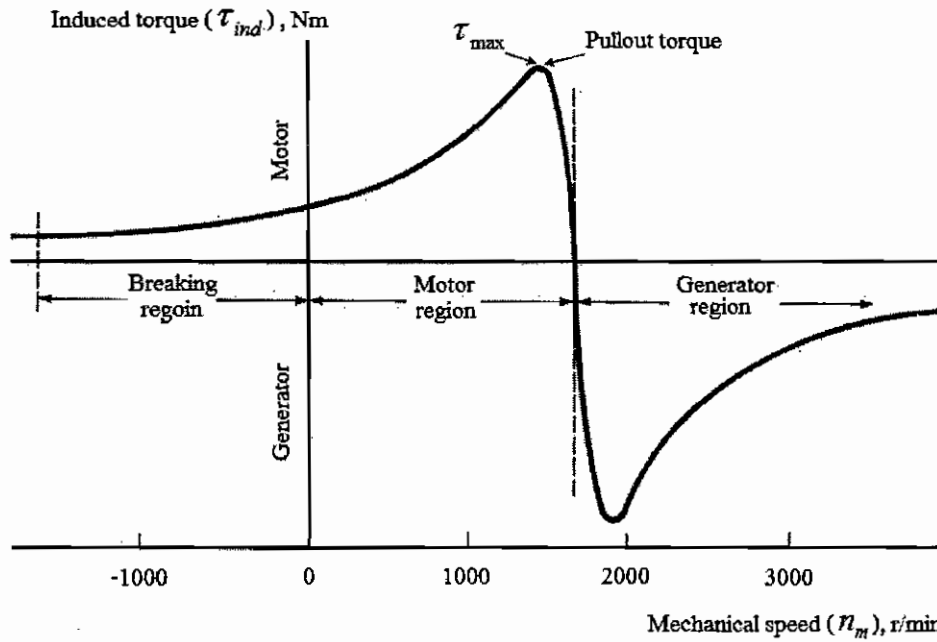
กราฟแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเทียบกับความเร็ว จะ ได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 เส้นโค้งคุณลักษณะของแรงบิดเทียบกับความเร็วในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสทำให้ทราบถึงข้อมูลการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังนี้

1. แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นศูนย์ที่ความเร็วซิงโครนัส
2. เส้นโค้งแรงบิด-ความเร็วเกือบเป็นเชิงเส้นในช่วงระหว่างแรงบิดขณะไม่มีภาระกับแรงบิดขณะที่มีภาระเต็มที่ ซึ่งจะเรียกช่วงนี้ว่า ย่านการทำงานปกติของมอเตอร์
3. มีแรงบิดสูงสุด แรงบิดนี้เรียกว่า Pullout torque หรือ Breakdown torque จะมีค่าเป็น 2-3 เท่าของแรงบิดที่พิกัดขณะจ่ายโหลดเต็มที่



รูปที่ 2.20 เส้นโค้งคุณลักษณะของแรงบิดเทียบกับความเร็วในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และแสดงช่วงการทำงานของมอเตอร์

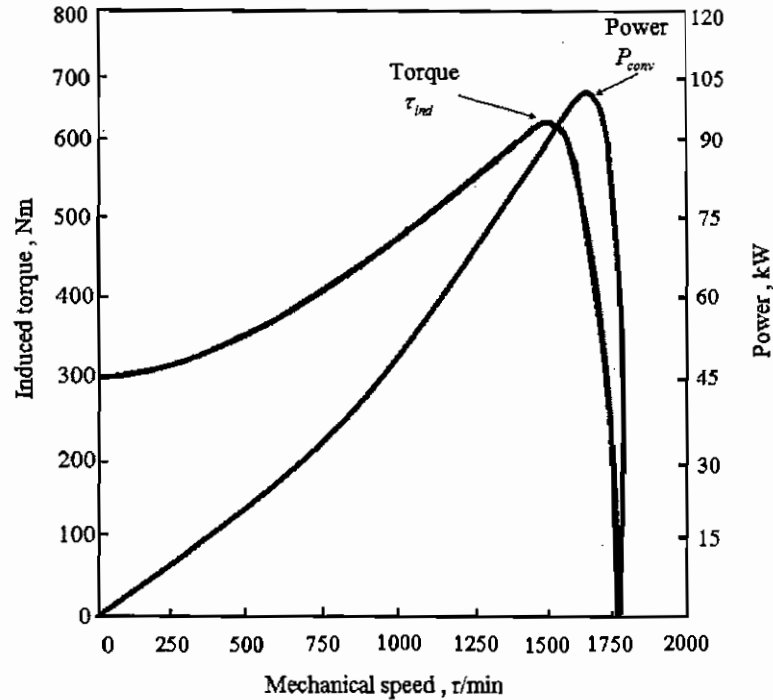
4. มีแรงบิดเริ่มต้นหมุนมากกว่าแรงบิดที่พิกัดเล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์จึงเริ่มต้นขับโหลด หรือต่อกับโหลดขณะเริ่มต้นหมุนได้ทันที โดยแรงบิดที่โหลดนั้นจะต้องไม่มากกว่าแรงบิดที่พิกัด

5. ถ้าโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำถูกขับด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วซิงโครนัส แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะกลับทิศทางและมอเตอร์ดังกล่าวจะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนกำลังงานทางกลให้เป็นกำลังงานทางไฟฟ้า

6. การสลับสายคู่ใดคู่หนึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนทิศทาง มอเตอร์จึงหมุนกลับทิศทางได้ แต่ก่อนที่จะกลับทิศทางนั้นจะมีอยู่จุดหนึ่งที่มอเตอร์หยุดอยู่กับที่อย่างรวดเร็วซึ่งเราเรียกว่า Plugging ซึ่งนำมาสู่หลักการในการควบคุมมอเตอร์รูปแบบหนึ่ง

กำลังทางกลที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศการหมุน หาค่าได้จากสมการ

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_r = \tau_{conv} \omega_r$$



รูปที่ 2.21 แรงบิดเหนี่ยวนำ และกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เทียบกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 4 ขั้ว

จากเส้น โคนี้จะสังเกตเห็นว่ากำลังสูงสุดที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นที่ความเร็วมากกว่าจุดที่เกิดค่าแรงบิดสูงสุด และค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะที่มอเตอร์กลับทิศทางการหมุนจะมีค่าเป็นศูนย์

2.4.3 แรงบิดสูงสุดในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อแรงบิดเหนี่ยวนำที่เกิดในช่องว่างอากาศสูงสุดมีค่าเท่ากับ P_{AG}/ω_s และกำลังที่ช่องว่างอากาศสูงสุดจะมีค่าเท่ากับกำลังตกคร่อมที่รีแอกแตนซ์ R_2/s ก็ต่อเมื่อค่ารีแอกแตนซ์มีค่าสูงสุด ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อขนาดของรีแอกแตนซ์ R_2/s มีค่าเท่ากับขนาดอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย โดยพิจารณาจากวงจรรูปที่ 2.18 ซึ่งอิมพีแดนซ์ที่แหล่งจ่ายของวงจรสมมูลคือ

$$Z_{source} = R_{TH} + jX_{TH} + jX_2 \quad (2.46)$$

กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดได้เมื่อ

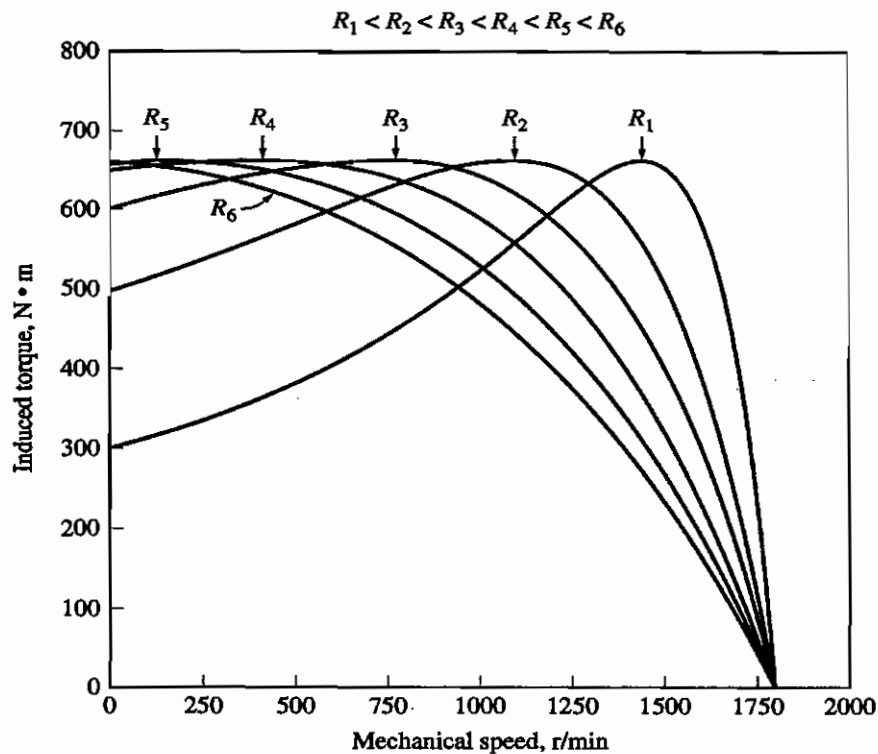
$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (2.47)$$

ดังนั้น ค่าสลิปที่แรงบิดสูงสุดสามารถหาได้จาก

$$s_{\max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (2.48)$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าสลิปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความต้านทานของโรเตอร์ สามารถหาค่าแรงบิดสูงสุดได้จากการแทนค่าสมการที่ (2.48) ลงในสมการที่ (2.45) สมการแรงบิดสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ

$$\tau_{\max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_s \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]} \quad (2.49)$$



รูปที่ 2.22 ผลของความต้านทานโรเตอร์ที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์

คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดดาวด์โรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.22 มอเตอร์ชนิดนี้สามารถเพิ่มค่าความต้านทานที่โรเตอร์ได้โดยต่อความต้านทานภายนอกเข้า

กับสลีปริ่ง จากภาพจะสังเกตเห็นว่าเมื่อค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบต่ำลง แต่ระดับค่าสูงสุดของแรงบิดจะยังคงที่เท่ากับทุกค่าความต้านทาน

ข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดขดลวดพันรอบ โรเตอร์ คือสามารถเริ่มเดินได้ขณะที่มีภาระมาก ๆ ซึ่งค่าความต้านทานที่ต่อเข้าไปยังวงจรรโรเตอร์จะช่วยเพิ่มแรงบิดได้ตามที่ต้องการ แต่ในทางตรงกันข้ามค่าความต้านทานที่ต่อเข้าไปในวงจรจะถูกปลดออกเมื่อแรงบิดหมุนด้วยความเร็วที่เข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัสที่สภาวะการทำงานปกติ