บทที่ 3
ความสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

โดยปกติแล้ว เครื่องจักรกลไฟฟ้าจะประกอบด้วยชิ้นส่วนหลายชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดความสูญเสียต่างๆ ขึ้นได้ และความสูญเสียต่างๆ เหล่านี้ก็สามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ หลายปัจจัย ทั้งจากโครงสร้างทางไฟฟ้า ทางกล และการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า

3.1 ประเภทของความสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(Type of Losses in Induction Motor)

ความสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. ความสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์และโรเตอร์
   (Stator and Rotor copper losses)
2. ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)
3. ความสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานและแรงลมต้าน (Friction and Windage losses)
4. ความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด (Stray load loss)

ถ้าแบ่งตามสภาวะการรับภาระการทำงานหรือโหลดของมอเตอร์ ความสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จะแบ่งได้ดังนี้

1. ความสูญเสียในสภาวะที่มอเตอร์ไม่ต้องรับภาระการทำงานหรือไม่มีโหลด (No-load losses) โดยจะมีค่าคงที่เกิดขึ้นเมื่อเราป้อนพลังงานให้กับมอเตอร์ หรืออาจเรียกว่า ความสูญเสียคงที่ (Fixed losses) ซึ่งมีค่าประมาณ 30% ของค่าความสูญเสียรวมในมอเตอร์ตัวหนึ่งๆ และเกิดขึ้นไม่ว่ามอเตอร์จะหมุนตัวเปล่า หรือใช้งานอยู่ก็ตาม ประกอบไปด้วย
   1.1 ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)
   1.2 ความสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานและแรงลมต้าน
   (Friction and Windage losses)
2. ความสูญเสียในสภาวะที่มอเตอร์ต้องรับภาระหรือโหลดที่เกิดขึ้น (Load losses) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโหลดของมอเตอร์ ซึ่งเป็นค่าของส่วนที่เหลือ 70% ของค่าความสูญเสียทั้งหมด ประกอบไปด้วย
   2.1 ความสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์และโรเตอร์
   (Stator and Rotor copper losses)
   2.2 ความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด (Stray load loss)

3.1.1 ความสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Losses)

เป็นความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ถือว่ามีค่ามากที่สุด และอยู่ในรูปของความร้อน เป็นความสูญเสียในชุดขดลวดทองแดงที่ส่วนของสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็คือเป็นผลของความต้านทานของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำที่สเตเตอร์ ตัวนำที่โรเตอร์ และวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์ ซึ่งในมอเตอร์ซิงโครนัส ค่าความสูญเสียในส่วนนี้จะคงที่ เพราะว่ามอเตอร์ทำงานในสภาวะปกติที่กระแสสนาม (Field current) ในชุดขดลวดโรเตอร์คงที่ ส่วนในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ค่าความสูญเสียในส่วนนี้ ทั้งที่สเตเตอร์และโรเตอร์ จะเปลี่ยนตามค่ากระแสไฟฟ้าไลน์กำลังสอง (I^2_{Line})

โดยปกติแล้ว ความสูญเสียในขดลวดทองแดง จะคำนวณจากความต้านทานกระแสตรงของขดลวดที่อุณหภูมิ $75^{\circ}C$

3.1.2 ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss)

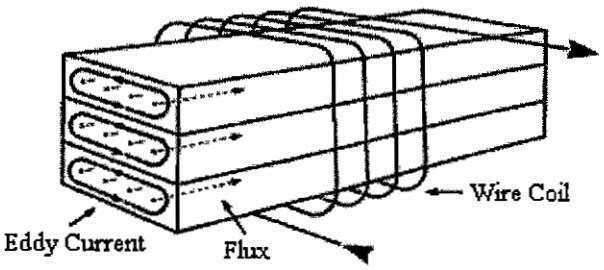
เป็นความสูญเสียกำลังไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากโลหะของเครื่องจักรกล สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็คือความสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก ทำให้เกิดกำลังสูญเสียเมื่อมีการใช้งาน โดยความสูญเสียในแกนเหล็ก จะประกอบไปด้วย ความสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy-current loss) และความสูญเสียฮิสเตอริซิส (Hysteresis loss) ในวงจรแม่เหล็กของมอเตอร์

ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่สเตเตอร์ ในทางปฏิบัติแล้ว ความสูญเสียนี้ถือว่ามีค่าคงที่

แต่ในส่วนของค่าความสูญเสียในแกนเหล็กที่โรเตอร์ จะไม่นำมาพิจารณา (ไม่คำนึงถึง) เพราะว่า ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่โรเตอร์ขณะที่มอเตอร์ทำงานในสภาวะปกตินั้น จะมีค่าน้อยมาก

ความสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy-Current Loss)

เป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับแกนเหล็ก ก็คือเกิดจากการเหนี่ยวนำในตัวแกนเหล็กที่สเตเตอร์ และเนื่องจากแกนเหล็กมีค่าความต้านทานต่ำ หรือถ้าเราพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับที่ไหลผ่านแผ่นโลหะทึบ จะมีสภาพเหมือนกับมีขดลวดตัวนำวนเป็นรอบๆ บนแผ่นโลหะ เกิดเป็นกระแสไหลวนบนลวดตัวนำสมมติ หรือแผ่นโลหะดังกล่าว โดยกระแสวงนอกสุดจะมีขนาดมากกว่าวงใน และหากแผ่นโลหะนี้มีค่าความต้านทานต่ำก็จะยิ่งทำให้กระแสไหลวนมีค่ามากยิ่งขึ้น



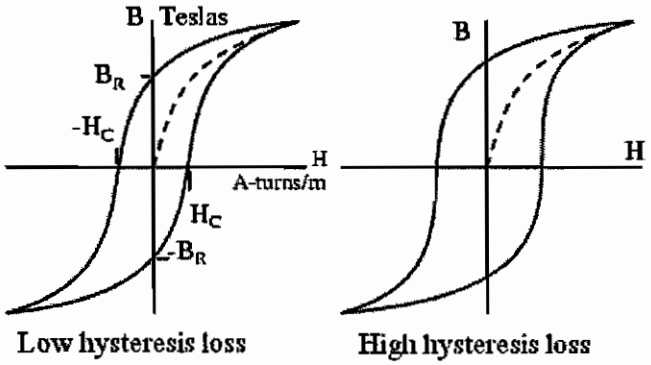
รูปที่ 3.1 ความสูญเสียจากกระแสไหลวน

กรณีของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนในโรเตอร์ พิจารณาจากโรเตอร์ ซึ่งเป็นแกนโลหะทรงกระบอกทึบที่หมุนในขั้วแม่เหล็ก ทำให้โลหะทรงกระบอกตัดเส้นแรงแม่เหล็ก และแรงดันไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำขึ้นจากกฎของฟาราเดย์ตามความยาวของโรเตอร์ แล้วทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นในโรเตอร์ เนื่องจากความต้านทานของโรเตอร์มีค่าต่ำมาก ซึ่งเมื่อคิดค่าความสูญเสียเป็นความสูญเสียที่ขดลวดทองแดง (I^2R) แล้วจะเกิดความร้อนขึ้น

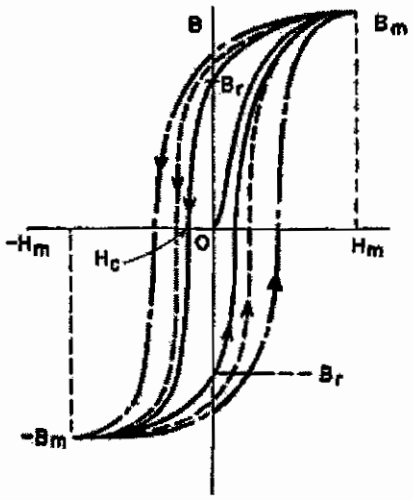
กำลังสูญเสียจากกระแสไหลวน จะขึ้นอยู่กับ กำลังสองของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux), ความถี่ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่าย และความหนาแน่นของแผ่นโลหะ

ความสูญเสียฮิสเตอริซิส (Hysteresis Loss)

เป็นความสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กตามความถี่ไฟฟ้าที่ 50 Hz หรือ 50 ไซเคิล/วินาที ทำให้เกิดการสูญเปล่า ซึ่งก็คือการที่โลหะหมุนในสนามแม่เหล็กคงที่ เมื่อโลหะมีการหมุนในสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดสภาพแม่เหล็กขึ้นในตัวโลหะนั้น โดยสภาพแม่เหล็กในโลหะจะกลับไปกลับมาเป็นช่วงๆ แม้ว่าจะมีสนามแม่เหล็กคงที่ หรือเป็นความสูญเสียที่เกิดจากการกลับตัวไป-มาของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic revesal) ที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ หรือแกนเหล็กที่สเตเตอร์ รวมทั้งยังเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของขั้วแม่เหล็ก (N,S)



รูปที่ 3.2 เส้นโค้งฮิสเตอริซิสสำหรับความสูญเสียฮิสเตอริซิส



รูปที่ 3.3 วงเส้นโค้งฮิสเตอริซิสกระแสตรงและกระแสสลับ

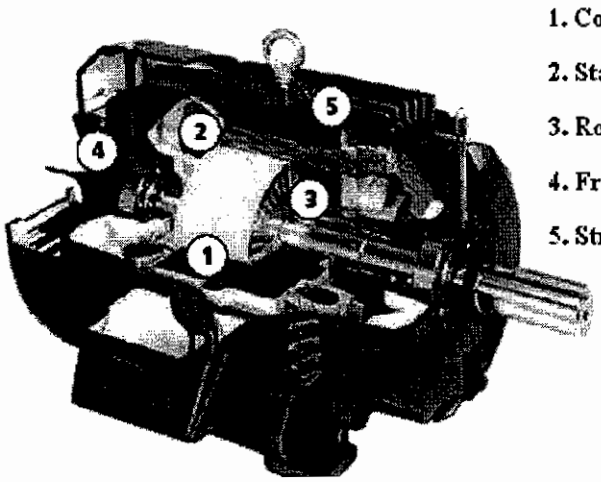
3.1.3 ความสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานและแรงลมต้าน (Friction and Windage Losses)

เป็นความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากความเสียดทานซึ่งจะเกิดขึ้นจากความฝืดของแบริ่ง (Bearing) และแปรงถ่าน (Brushes) ของมอเตอร์ และความสูญเสียที่เกิดจากแรงลมต้านซึ่งจะเกิดขึ้นจากพัดลมระบายความร้อนของมอเตอร์ และแรงฉุดของลมที่โรเตอร์ (สำหรับมอเตอร์แบบเปิด, IP23) รวมไปถึงกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในการระบายอากาศภายในเครื่องจักรกล ในบางครั้งอาจเรียกความสูญเสียเหล่านี้ว่า ความสูญเสียทางกล (Mechanical loss) ความสูญเสียนี้จะคงที่เมื่อมีความเร็วคงที่ และเมื่อนำความสูญเสียเหล่านี้ไปรวมกับความสูญเสียในแกนเหล็ก จะเรียกรวมกันว่าเป็น ความสูญเสียจากการหมุน (Rotational loss)

3.1.4 ความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด (Stray Load Loss)

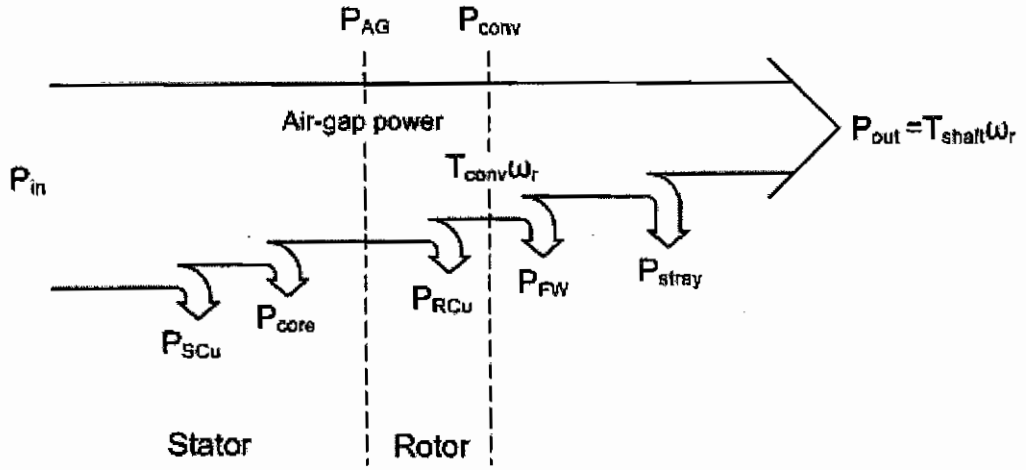
เป็นความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่นอกเหนือจากความสูญเสียโดยทั่วไป ก็คือความสูญเสียที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด แต่ความสูญเสียนี้ก็ถือเป็นส่วนหนึ่งของความสูญเสียรวมทั้งหมด ซึ่งความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลดเป็นความสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในกำลังสูญเสียฮิสเตอริซิส กำลังสูญเสียจากกระแสไหลวน เป็นผลที่เกิดจากความถี่ในแกนเหล็กที่โรเตอร์ ค่ากระแสฮาร์โมนิกในตัวนำของโรเตอร์ขณะที่มีโหลด และจากเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage flux) ที่เกิดจากกระแสของโหลด เนื่องจากกระแสไฟฟ้าของโหลดนั้นจะมีผลทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของเส้นแรงแม่เหล็กไปได้บ้าง ความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลดประกอบไปด้วยกำลัง 2 ส่วน คือ กำลังสูญเสียที่เกิดในสภาวะความถี่ไฟฟ้าหลักมูล (Fundamental frequency) และกำลงสูญเสียที่เกิดในสภาวะความถี่ไฟฟ้ามีค่าสูง (High frequency) แต่ความสูญเสียในส่วนนี้จะยุ่งยากมากในการวัด ดังนั้นโดยปกติแล้วจึงถือว่าความสูญเสียในส่วนนี้มีค่าประมาณ 1 % ของกำลังไฟฟ้าด้านออกของเครื่องจักรกล

3.2 ความสูญเสียในส่วนต่างๆ และแผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า (Losses and the Power-Flow Diagram)



1. Core loss or Iron loss
2. Stator copper loss
3. Rotor copper loss
4. Friction and Windage losses
5. Stray load loss

รูปที่ 3.4 ความสูญเสียในส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า

เมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้า (Input power : P_{in}) ให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำรวมทั้งเกิดความสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์ (Stator copper loss : P_{SCu}) และความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss : P_{core}) ที่สเตเตอร์ และเมื่อสนามแม่เหล็กหมุนที่อยู่ในช่องว่างอากาศ (Air-gap) ระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ ตัดผ่านตัวนำในโรเตอร์ จะทำให้เกิดความสูญเสียในขดลวดทองแดงที่โรเตอร์ (Rotor copper loss : P_{RCu}) โดยกำลังไฟฟ้าที่เกิดจาก

สนามแม่เหล็กหมุนในช่องว่างอากาศ เรียกว่า กำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ (Air-gap power : P_{AG}) ซึ่งก็คือกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโรเตอร์

เมื่อดูจากแผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า เมื่อนำค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงที่โรเตอร์ลบออกจากกำลังไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ ก็จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ หรือกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล (Power is converted from electrical to mechanical form or Developed mechanical power : P_{conv}) และเมื่อโรเตอร์มีการหมุนจะเกิดความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานและแรงลมต้าน (Friction and Windage losses : P_{FW}) ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความสูญเสียทางกล (Mechanical loss) และยังมีการเกิดความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด (Stray load loss : P_{stray})

โดยกำลังไฟฟ้าด้านออกจากมอเตอร์ (Output power : P_{out}) จะเป็นพลังงานกลที่อยู่ในรูปของแรงบิดที่จ่ายออกมา หรือแรงบิดที่แกนเพลาของโรเตอร์ (T_{shaft}) คูณอยู่กับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (ω_r)

และจากแผนภาพแสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจะไม่ปรากฏความสูญเสียในแกนเหล็กที่โรเตอร์เพราะความสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นเพียงบางส่วนของวงจรสเตเตอร์และโรเตอร์เท่านั้น เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนที่ความเร็วเข้าใกล้ความเร็วซิงโครนัส สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของโรเตอร์จะมีค่าน้อยมาก และความสูญเสียในแกนเหล็กของโรเตอร์จึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความสูญเสียในแกนเหล็กที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ ดังนั้นจึงมีความสูญเสียในแกนเหล็กเฉพาะที่สเตเตอร์เท่านั้น ซึ่งความสูญเสียนี้จะอยู่ในรูปของความต้านทาน R_C ในวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

3.3 ค่าความสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แยกเป็นส่วนต่างๆ ที่สภาวะการทำงานเต็มพิกัด

หากจะสรุปค่าความสูญเสียเป็นร้อยละที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ และองค์ประกอบที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดความสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พอสรุปได้ว่า ค่าความสูญเสียในมอเตอร์เมื่อทำงานเต็มพิกัด (Full load losses) จากค่าความสูญเสียทั้งหมด (100 %) สามารถแยกออกเป็นความสูญเสียในส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ความสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์ 40 %
- ความสูญเสียในแกนเหล็ก 20 %
- ความสูญเสียในขดลวดทองแดงโรเตอร์ 25 %
- ความสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานและแรงลมต้าน 5 %
- ความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด 10 %

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความสูญเสียภายในมอเตอร์ไฟฟ้า 4 ขั้ว

ความสูญเสียในมอเตอร์	ค่าประมาณ	องค์ประกอบที่ทำให้เกิดความสูญเสีย
1. ความสูญเสียในขดลวดทองแดงที่สเตเตอร์	35-40 %	ขนาดตัวนำของสเตเตอร์
2. ความสูญเสียในขดลวดทองแดงที่โรเตอร์	15-25 %	ขนาดตัวนำของโรเตอร์
3. ความสูญเสียในแกนเหล็ก	15-25 %	ชนิดและปริมาณวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็ก
4. ความสูญเสียที่เกิดจากความเสียดทานและแรงลมต้าน	5-10 %	พัดลมและแบริ่ง
5. ความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด	5-10 %	การออกแบบจากโรงงาน

3.4 วิธีช่วยลดค่าความสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์

ในการจะเลือกซื้อ หรือเลือกใช้มอเตอร์นั้น คนส่วนใหญ่ก็จะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของมอเตอร์เป็นสำคัญ ซึ่งประสิทธิภาพของมอเตอร์ ถูกกำหนดค่าโดย กำลังไฟฟ้าด้านออกของมอเตอร์ (Watt output) หารด้วยกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (Watt input) หรือกำลังไฟฟ้าด้านออกของมอเตอร์ หารด้วยกำลังไฟฟ้าด้านออกของมอเตอร์รวมกับกำลังที่สูญเสียไป (Watt losses)

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

หรือ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{Losses}} \times 100\%$$

โดยกำหนดให้ค่ากำลัง 1 แรงม้าทางกลมีค่าเท่ากับ 746 วัตต์ ของกำลังทางไฟฟ้า

ตารางที่ 3.2 แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์ตามมาตรฐานต่าง ๆ

มาตรฐาน	ประสิทธิภาพที่โหลดเต็มที่ (%)	
	7.5 hp	20 hp
CSA C390	80.3	86.9
NEMA MG-1	80.3	86.9
IEC-34.2	82.3	89.4
JEC-37	85.0	90.4

- มาตรฐาน CSA (ประเทศคานาดา) : ได้รวมค่าความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลดไว้ด้วย และวัดค่าเหล่านี้โดยวิธีการทางอ้อมตามมาตรฐาน IEEE 112

- มาตรฐาน NEMA (ประเทศสหรัฐอเมริกา) : คำนวณหาค่าความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลดโดยวิธีการทางอ้อมตามมาตรฐาน IEEE 112

- มาตรฐาน IEC (กลุ่มประเทศยุโรป) : สมมติค่าความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลดโดยกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 % ของกำลังที่ป้อนเข้า และยอมให้มีการกำหนดค่าคาดเคลื่อนของประสิทธิภาพได้

- มาตรฐาน JEC (ประเทศญี่ปุ่น) : สมมติว่าไม่มีความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด

หมายเหตุ : ความแตกต่างของมาตรฐานอยู่ที่การวัดค่าความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด

ในการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์จำเป็นต้องลดค่าความสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ ซึ่งค่าความสูญเสียต่าง ๆ ในมอเตอร์นั้น บริษัทผู้ผลิตมอเตอร์สามารถออกแบบและพัฒนาให้มีค่าลดลงได้ โดยการปรับปรุงส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

<u>การลดค่าความสูญเสียที่ขดลวดสเตเตอร์</u>

- เพิ่มขนาดของช่องใส่ขดลวดที่สเตเตอร์
- เลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม
- ใช้ลวดตัวนำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น

<u>การลดค่าความสูญเสียที่ขดลวดโรเตอร์</u>

- เลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม
- เพิ่มขนาดของแท่งโรเตอร์ หรือลวดตัวนำ และตัว End Rings

<u>การลดค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก</u>

- ใช้แกนเหล็กที่บางลง ฉาบด้วยสารที่เป็นฉนวนไฟฟ้า มาอัดซ้อนกันหลายๆแผ่น หรือที่เรียกกันว่า แกนเหล็กลามิเนท (Laminated core)
  (ช่วยลดค่าความสูญเสียจากกระแสไหลวน)
- ใช้เหล็กที่มีคุณภาพที่ดีกว่าเดิม เหล็กที่มีค่าสัมประสิทธ์ฮิสเตอร์ริซิสต่ำ โดยทั่วไปจะใช้เหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนพิเศษที่มีคุณภาพสูง
  (ช่วยลดค่าความสูญเสียฮิสเตอร์ริซิส)
- เพิ่มความยาวของแกนเหล็กเพื่อลดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ต้องการ

<u>การลดค่าความสูญเสียจากความเสียดทานและลมระบายความร้อน</u>

- ปรับปรุงรูปแบบของแบริ่ง พัดลม และช่องระบายอากาศ เพื่อช่วยลดแรงเสียดทานขณะมอเตอร์หมุน อีกทั้งยังสามารถเพิ่มอัตราการไหลวนของอากาศ

<u>การลดค่าความสูญเสียปลีกย่อยเนื่องจากโหลด</u>

- ออกแบบให้เหมาะสมที่สุด และควบคุมเอาใจใส่ดูแลในกรรมวิธีการผลิต เนื่องจากถ้าคุณภาพของเหล็กดีขึ้น ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล ก็จะลดลง
  (การวัดค่าหรือลดความสูญเสียชนิดนี้ จะทำได้ยากมาก)