บทที่ ๕

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

๕.๑ ข้อสรุป

จากตารางเปรียบเทียบที่ ๕.๑ จะเห็นว่าเมื่อเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล มอเตอร์ตัวนี้จะสามารถให้กำลังงานออกที่เพลาได้ ๐.๕ แรงม้า โดยมีกระแสในแต่ละสายประมาณ ๐.๔ แอมแปร์ ซึ่งถ้าดูในภาคผนวก (ตารางการใช้ลวด) จะพบว่าถ้ามีกระแสประมาณ ๐.๔ แอมแปร์ไหลในลวดทองแดงเบอร์ ๒๓ SWG. จะทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแส (current density) เท่ากับ ๒๐๐๐ แอมแปร์/ตารางนิ้ว ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานที่นิยมใช้กัน ในกรณีที่เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล เมื่อมอเตอร์จ่ายกำลังงานออกที่เพลา ๐.๕ แรงม้า จะมีกระแส ไหลในแต่ละสายประมาณ ๑.๓ แอมแปร์ ซึ่งถ้าดูในตารางการใช้ลวดก็จะพบว่าเกิดความหนาแน่นของกระแสอยู่ในช่วง ๒๕๐๐ – ๓๐๐๐ แอมแปร์/ตารางนิ้ว ซึ่งก็อยู่ในช่วงมาตรฐานที่นิยมใช้เช่นกัน

ส่วนคุณสมบัติในการทำงานของมอเตอร์ด้านอื่น ๆ ก็เป็นธรรมดาที่ว่าเมื่อจ่ายกำลังงานออกที่เพลาเท่ากันคือ ๐.๕ แรงม้า ขณะที่เกิดสนามแม่เหล็กแบบต่างกัน คุณสมบัติเหล่านั้นย่อมแตกต่างกันไปด้วย แต่จากตารางเปรียบเทียบที่ ๕.๑ จะเห็นได้ว่า การวิจัยครั้งนี้ได้พยายามทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ประสิทธิภาพ, เพาเวอร์แฟคเตอร์, แรงบิดที่ full load, แรงบิดขณะสตาร์ท ที่ความเร็วทั้งสอง เกิดความแตกต่างกันน้อยที่สุด และยังมีค่าสูงใกล้เคียงกับของมอเตอร์มาตรฐานที่ทำขายในท้องตลาด ซึ่งออกแบบมาเฉพาะเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล หรือ ๖ โพล เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ ๕.๑ เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์ เมื่อเกิดสนามแม่เหล็ก แบบ ๔ โพล และ ๖ โพล

ที่ค่าแรงดันระหว่างสาย ๓๘๐ โวลท์	๔ โพล	๖ โพล
เมื่อไม่มีโหลด (no Load)		
กระแสเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสาย (แอมแปร์)	๐.๒๓	๐.๙๖
กำลังงานเข้าสเตเตอร์ทั้งหมด (วัตต์)	๓๓.๕	๑๐๕
กำลังงานสูญเสียในลวดทองแดงทั้งหมด (วัตต์)	๓.๓๙๖	๕๙.๑๖
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กทั้งหมด (วัตต์)	๒๓.๘๕	๔๓.๘๓
กำลังงานสูญเสียเนื่องจากความฝืด และลมต้าน (วัตต์)	๖.๒๕	๒
ความเร็วที่เพลาของมอเตอร์ (รอบ/นาที)	๑๔๖๐	๙๘๐
สลิป	๐.๐๒๖	๐.๐๒
ความต้านทานของขดลวดต่อเฟสของสเตเตอร์ (โอมห์)	๒๑.๔๐	๒๑.๔๐
เมื่อจ่ายกำลังออกที่เพลา ๐.๕ แรงม้า		
กระแสเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสาย (แอมแปร์)	๐.๘๖๒๕	๑.๒๖๗
กำลังงานเข้าสเตเตอร์ทั้งหมด (วัตต์)	๔๙๖.๗๒	๕๖๗
กำลังงานสูญเสียในลวดทองแดงของสเตเตอร์ทั้งหมด (วัตต์)	๔๗.๗๕	๑๐๓.๐๖
กำลังงานสูญเสียในลวดทองแดงของโรเตอร์ทั้งหมด (วัตต์)	๔๕.๘๗	๔๕.๑๑
กำลังงานสูญเสียในแกนเหล็กทั้งหมด (วัตต์)	๒๓.๘๕	๔๓.๘๓
กำลังงานเข้าโรเตอร์ (วัตต์)	๔๑๘.๘๗	๔๑๘.๑๑
แรงบิด (full load torque) (ฟุต-ปอนด์)	๑.๙๗๕	๒.๘๓
ประสิทธิภาพ (%)	๗๕.๐	๖๕.๗๘
เพาเวอร์แฟคเตอร์	๐.๘๗๕	๐.๖๘
ความเร็วที่เพลาของมอเตอร์ (รอบ/นาที)	๑๓๓๕	๙๔๐
สลิป	๐.๑๑	๐.๐๖
ค่าสูงสุด (Maxima)		
กำลังงานออกที่เพลาสูงสุด (แรงม้า)	๐.๗	๑.๑๑
แรงบิดสูงสุด (pull out torque) (ฟุต-ปอนด์)	๓.๗๑๗	๘.๑๓๑๒
อัตราส่วนของ full load torque/pull out torque	๐.๕๓	๐.๓๕
แรงบิดขณะสตาร์ท (starting torque) (ฟุต-ปอนด์)	๓.๐๔	๖.๕๗๕
อัตราส่วนของ starting torque/full load torque	๑.๕๔	๒.๓๒๓
อุณหภูมิสูงสุดขณะทำงานที่ ๑๑๐ % full load (องศาเซลเซียส)	๔๙.๔	๕๙.๓

๕.๒ ข้อเสนอแนะ

การที่ได้นำมอเตอร์ขนาด ๒ แรงม้ามาดัดแปลง เป็นขนาด ๐.๕ แรงม้า ทำให้เห็นว่าไม่เป็นการประหยัด แต่ที่ต้องทำเช่นนี้เพราะมีข้อจำกัดทางด้านวัสดุ กล่าวคือ ในตอนแรกที่ทำการวิจัยนั้นมีจุดประสงค์ที่จะดัดแปลงมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิด ๓ เฟส ขนาด ๐.๕ แรงม้า ซึ่งแต่เดิมมีความเร็วซิงโครนัสค่าเดียว คือ ๑๕๐๐ รอบ/นาที ให้เป็นมอเตอร์ขนาด ๐.๕ แรงม้าที่สามารถเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัสได้เป็น ๑๐๐๐ และ ๑๕๐๐ รอบต่อนาที แต่จากการคำนวณในบทที่ ๓ จะเห็นว่าถ้าต้องการให้คุณสมบัติในการทำงานของมอเตอร์ขณะเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล และ ๖ โพล ใกล้เคียงกัน ก็จะต้องเพิ่มจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ขึ้นอีก ๔๕ % การที่จะออกแบบสร้างสเตเตอร์สำหรับมอเตอร์สองความเร็ว ขนาด ๐.๕ แรงม้าให้สามารถพันขดลวดได้ตามต้องการ เพียงตัวเดียวเพื่อการวิจัยในครั้งนี้ก็เป็นการสิ้นเปลืองมาก ดังนั้นวิธีเดียวที่ทำได้ก็คือต้องนำมอเตอร์ขนาดใหญ่กว่า ๐.๕ แรงม้า ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้นำมอเตอร์ขนาด ๒ แรงม้ามาทำการดัดแปลง เพราะมี slot กว้างพอที่จะบรรจุขดลวดสเตเตอร์เพิ่มได้อีก ๔๕ % โดยเพียงต้องการทราบว่าวิธีการนี้จะถูกต้องและใช้ได้ผลหรือไม่เท่านั้น ซึ่งก็เป็นที่แน่นอนว่าคุณสมบัติในการทำงานของมอเตอร์ตัวนี้ย่อมจะดีน้อยกว่าที่ควรจะเป็น เพราะได้นำสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับมอเตอร์ขนาด ๒ แรงม้า มาดัดแปลงให้เป็นมอเตอร์ขนาด ๐.๕ แรงม้า ดังนั้นถ้ามอเตอร์ตัวนี้เป็นมอเตอร์ขนาด ๐.๕ แรงม้าที่ออกแบบขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อให้เปลี่ยนความเร็วได้ คือ มีโรเตอร์ที่ใช้กับมอเตอร์ขนาด ๐.๕ แรงม้า สเตเตอร์มี slot กว้างขึ้นอีก ๔๕ % และมี magnetic path ที่ออกแบบมาให้เหมาะสมกับทั้งกรณี ๔ โพล และ ๖ โพล คุณสมบัติในการทำงานย่อมจะดีมากกว่านี้อย่างแน่นอน แม้กระนั้นก็ตามผลการทดสอบคุณสมบัติในการทำงานซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ ๕.๑ ก็ยังนับว่าอยู่ในขั้นที่น่าพอใจ จึงสรุปได้ว่าวิธีการเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัสเป็น ๑๐๐๐ และ ๑๕๐๐ รอบ/นาที ที่คิดขึ้นมานี้สามารถใช้ได้ผลเป็นอย่างดี และในทางอุตสาหกรรมเพื่อการค้าก็ไม่จำเป็นต้องนำมอเตอร์ขนาดใหญ่ถึง ๒ แรงม้ามาดัดแปลง ถ้าได้มีการออกแบบสเตเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล และ ๖ โพล กล่าวคือมี slot ที่กว้างขึ้น และอาจต้องใช้เหล็กชนิดที่มี high flux density มาทำเป็น laminated sheet สำหรับประกอบเป็น stator core ก็จะ

ทำให้มอเตอร์ขนาด ๐.๕ แรงม้า ซึ่งสามารถเปลี่ยนความเร็วได้เป็น ๑๐๐๐ และ ๑๕๐๐ รอบ/นาทีมีขนาดเท่ากับมอเตอร์ความเร็วเดียวขนาด ๐.๕ แรงม้า และยังใช้โรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด ๐.๕ แรงม้า ที่มีความเร็วเดียวได้อีกด้วย

จากการที่นำสเตเตอร์และโรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด ๒ แรงม้า มาใช้เป็นมอเตอร์ขนาด ๐.๕ แรงม้านี้ ที่จริงแล้วมอเตอร์ต้นแบบที่ดัดแปลงขึ้นมามิได้มีขนาดเพียง ๐.๕ แรงม้าเท่านั้น แต่ขณะเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล และ ๖ โพล สามารถจ่ายกำลังงานออกที่เพลาสูงสุดได้ถึง ๐.๗ แรงม้าและ ๑.๑๑ แรงม้า ตามลำดับ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วก็ไม่นิยมที่จะให้ค่า rating ของมอเตอร์มีค่าเท่ากับค่าสูงสุด ดังนั้นจึงได้ตั้งค่า rating ไว้เพียง ๐.๕ แรงม้าตามที่ต้องการเท่านั้น ถ้าจะตั้งค่า rating ไว้เท่ากับ ๐.๗ แรงม้า เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล และ ๖ โพล จะมีกระแสไหลเข้าสเตเตอร์ในแต่ละสายเท่ากับ ๑.๗๕ และ ๑.๕๖ แอมแปร์ตามลำดับ (ได้จากรูปที่ ๔.๕ และ ๔.๑๑) ซึ่งถ้าดูจากตารางที่ ๑ (ตารางการใช้ลวดทองแดง) ในภาคผนวก ก. จะพบว่าถ้ามีกระแส ๑.๗๕ และ ๑.๕๖ แอมแปร์ ไหลผ่านลวดทองแดงเบอร์ ๒๓ SWG. ความหนาแน่นของกระแสก็ยังมีค่าต่ำกว่า ๔๐๐๐ แอมแปร์/ตารางนิ้ว ซึ่งยังอยู่ในช่วงมาตรฐานที่ใช้ได้ แต่เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ลวดทองแดงที่มี insulation อยู่ใน class"A" ซึ่งเป็น class ที่มีราคาถูกที่สุดและทนความร้อนได้ต่ำที่สุด คือทนความร้อนได้สูงสุดประมาณ ๑๐๕°C เท่านั้น เพราะฉนั้นถ้ากำหนด rating ของมอเตอร์ตัวนี้ไว้เท่ากับ ๐.๗ แรงม้า เมื่อใช้งานที่ full load ค่า current density ย่อมจะสูงมากกว่าขณะที่จ่ายกำลังงานออก ๐.๕ แรงม้า ซึ่งอาจเป็นเหตุให้มอเตอร์มีอุณหภูมิสูงเกินกว่าที่ insulation ของลวดทองแดงใน class นี้จะทนได้ ดังนั้นถ้าจะใช้ลวดทองแดงที่มี insulation อยู่ใน class ที่ดีกว่านี้ คือสามารถทนความร้อนได้สูงถึง ๑๘๐°C - ๒๐๐°C ก็จะทำให้สามารถตั้ง rating ของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นมานี้ให้สูงกว่า ๐.๕ แรงม้าได้

ในการวิจัยครั้งนี้การพันขดลวดสเตเตอร์ได้ใช้ช่วงคอล์ย (pitch) เท่ากับ ๗ ร่อง เพื่อต้องการทำให้ลักษณะการพันขดลวดสเตเตอร์ขณะเกิดสนามแม่เหล็กแบบ

๔ โพลเหมือนกับของ **conventional motor** ทุกประการ ในกรณีที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล จะทำให้เกิด pitch ratio มากกว่า ๑ ซึ่งไม่เป็นที่นิยมใช้กัน จากการที่ได้ทดลองพันมอเตอร์อีกลูกหนึ่ง และใช้ช่วงคอล์ย (pitch) เท่ากับ ๖ ร่อง จะทำให้ขณะเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๖ โพล มีค่า **pitch ratio** เท่ากับ ๑ **(full pitch)** พอดี ส่วนค่า winding factor ขณะเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล และ ๖ โพล จะมีค่าเท่ากับ ๐.๘๓๑๒ และ ๐.๖๔๔ ตามลำดับ โดยจะให้คุณสมบัติในการทำงานที่ความเร็วทั้งสองดีขึ้นกว่าเดิมอีกเล็กน้อย อาจเป็นเพราะเมื่อใช้ช่วงคอล์ย (pitch) เท่ากับ ๖ ร่อง ขณะเกิดสนามแม่เหล็กแบบ ๔ โพล 3^{rd}. **harmonic** จะถูกกำจัดออกไปได้หมดสิ้น และเมื่อเกิด ๔ โพล หรือ ๖ โพล ก็ตาม stator copper loss จะลดลง เนื่องจากการที่ทำให้ความยาวของลวดทองแดงสั้นลงนั้นเท่ากับเป็นการลดความต้านทานในวงจรของสเตเตอร์ด้วย ดังนั้นในการสร้างครั้งต่อไปจึงควรที่จะใช้ช่วงคอล์ยเท่ากับ ๖ ร่อง เพราะจะให้คุณสมบัติในการทำงานที่ดีขึ้นดังกล่าวมาแล้ว

ส่วนในเรื่องสวิทซ์ควบคุมความเร็วนั้น ในการใช้งานจริง ๆ ก็ควรจะได้มีการพัฒนาต่อไป โดยอาจใช้ magnetic switch เข้าช่วย ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์สามารถทำได้โดยใช้สวิทซ์ควบคุมแบบกดปุ่ม (push button switch) ที่กระทัดรัดกว่านี้