



การคำนวณเส้นโค้งแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ภายใต้การทำงานเป็นเบรกด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Calculation of Braking Torque Curve of Induction Machine Under DC Current Injection

นครินทร์ เปรมปรี* และ พิชัย อารีย์

Nakarin Prempri* and Pichai Aree

กลุ่มวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand

*E-mail: pae-007@hotmail.com, Tel.: 080-609-8224

บทคัดย่อ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสถูกนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม การเบรกเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีความสำคัญมากในกรณีเหตุการณ์ฉุกเฉิน วิธีการเบรกที่ง่ายก็คือการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสเตเตอร์ การเบรกเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้หยุดได้ในช่วงระยะเวลาที่ต้องการมีความจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแรงบิดและกระแสตรงซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาได้จากเส้นโค้งแรงบิด ด้วยเหตุนี้ จึงมีการวิจัยเพื่อคิดค้นวิธีการคำนวณหาเส้นโค้งดังกล่าว แต่ทว่าเส้นโค้งแรงบิดที่คำนวณได้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่เนื่องจากการคำนวณดังกล่าวไม่พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ดังนั้น บทความนี้นำเสนอเทคนิคการปรับปรุงการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าภายใต้สภาวะการทำงานเป็นเบรกด้วยวิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้มีความแม่นยำมากกว่าวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิมด้วยการผนวกผลกระทบจากปรากฏการณ์การอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กและสกินเอฟเฟกต์เข้ากับขั้นตอนการคำนวณ จากการศึกษาพบว่าเส้นโค้งแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอมีความสอดคล้องกับเส้นโค้งที่ได้มาจากการทดสอบมากกว่าเส้นโค้งแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีแบบดั้งเดิมอย่างเป็นที่น่าพอใจ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาช่วงระยะเวลาเบรกได้อย่างมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า

คำสำคัญ: เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส; การเบรกด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง; เส้นโค้งแรงบิด

ABSTRACT

Induction machines have widely been used in many industrial factories. In the case of emergency, braking torque is always needed. One of the simple braking methods is dc current injection. In order to stop the machines in efficient manner with a desired operating time, their accurate speed-torque curves in the braking zone are often required. It has been reported in the open literature that machine's braking torque

curve calculations have not yet been fully completed so far due to an ignorance of their nonlinear effects. Thus, this paper presents an extension to the braking torque-speed curve calculation of induction machines under dc injection braking. The saturation of mutual and rotor-leakage reactances as well as the slip-dependent rotor resistance are entirely taken into account. To validate the proposed model, the braking torque-speed curves between calculation and laboratory measurement are compared. A good agreement is observed in the satisfactory manner. Moreover, an application of the proposed torque-speed curve in determining the machine's braking time is demonstrated. An acceptable accuracy in the breaking times between calculation and measurement approaches is shown.

Keywords: Induction Machine; DC injection current braking; Torque Curve

1. บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสถูกนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทาน และง่ายต่อการบำรุงรักษา เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำดังกล่าวอาจถูกนำไปใช้ให้ทำงานเป็นมอเตอร์ (Motor) หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) แต่ทว่า โดยส่วนใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือสายการผลิตนิยมใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้ทำงานเป็นมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนภาระโหลดทางกล แต่อย่างไรก็ตาม บ่อยครั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและสายการผลิตเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินอาจมีความจำเป็นต้องหยุดเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างฉับพลันเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายแก่สายการผลิต ดังนั้น การเบรกเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสจึงมีความสำคัญ วิธีและหลักการที่จะเบรกมีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธีดังแสดงในรายงานวิจัยที่ [1-11] ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ วิธีการเบรกด้วยระบบเบรกภายนอก (External braking) [1-2] และวิธีการกระตุ้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้สามารถเบรกได้ด้วยตัวของมันเอง (Self excitation braking) [3-11] วิธีการเบรกด้วยระบบเบรกภายนอกเป็นการนำระบบเบรกทางกลหรือตัวเบรกทางไฟฟ้ามาติดตั้งเข้ากับแกนเพลลาของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีความจำเป็นต้องใช้พื้นที่สำหรับการติดตั้ง ในขณะที่เดียวกัน วิธีการกระตุ้นเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เบรกได้ด้วยตัวของมันเองนั้นไม่ต้องใช้พื้นที่สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์จึงเป็นวิธีที่

น่าสนใจ โดยส่วนใหญ่แล้ววิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการเบรกโดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น การเบรกเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีการกลับทางหมุน (Plugging) [3] วิธีการต่อตัวเก็บประจุที่ขดลวดสเตเตอร์ (Capacitor braking) [4] วิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ขดลวดสเตเตอร์ (Zero sequence dynamic braking) [5-7] และวิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสเตเตอร์ (D.C. Injection braking) [8-11]

จากวิธีในข้างต้นนี้วิธีการเบรกที่ง่ายต่อการควบคุมปริมาณแรงบิดเพื่อให้เครื่องจักรกลไฟฟ้ามีช่วงระยะเวลาเบรกได้ตามต้องการก็คือวิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแก่ขดลวด สเตเตอร์และการที่จะเบรกเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้หยุดได้ในระยะเวลาที่ต้องการมีความจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแรงบิดและกระแสตรง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาได้จากเส้นโค้งแรงบิด โดยส่วนใหญ่แล้วเส้นโค้งแรงบิดสามารถวัดได้โดยใช้อุปกรณ์วัดแรงบิดซึ่งต้องใช้พื้นที่สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์และมีราคาแพง ด้วยเหตุนี้ จึงมีการวิจัยเพื่อคิดค้นวิธีการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดขณะเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำงานเป็นเบรกด้วยวิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในสถานะสถานะอยู่ตัว [8-11] โดยส่วนใหญ่หลักการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดสามารถทำได้โดยอาศัยวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส [8] ซึ่งประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความต้านทานของโรเตอร์ ค่ารีแอกแตนซ์ร่วมและรั่วไหลของโรเตอร์ โดยทั่วไปแล้วค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณ

กระแสตรงและความเร็วของโรเตอร์ แต่ทว่าการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดโดยส่วนใหญ่ไม่ได้พิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงดังที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งส่งผลให้เส้นโค้งแรงบิดที่คำนวณได้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่ดังเห็นได้จากรายงานวิจัยที่ [4-11]

ด้วยเหตุนี้ บทความนี้นำเสนอเทคนิคการปรับปรุงการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะการทำงานเป็นเบรกด้วยวิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง การคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดดังกล่าวจะพิจารณาผนวกคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้น ได้แก่ การอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กโรเตอร์และเส้นแรงแม่เหล็กร็วไหลของโรเตอร์ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโรเตอร์ตามความเร็ว นอกจากนี้ ในบทความนี้ทำการศึกษาหารูปแบบของการต่อขดลวดสเตเตอร์ที่ได้ศึกษาเพิ่มเติมจากรายงานวิจัยที่ [12, 13] เพื่อชี้ให้เห็นว่าการต่อขดลวดดังกล่าวรูปแบบใดที่สามารถสร้างปริมาณแรงบิดเพื่อใช้ในการเบรกได้มากที่สุด เส้นโค้งแรงบิดที่คำนวณได้จากเทคนิคที่นำเสนอได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด นอกเหนือจากนี้ บทความนี้สาธิตการประยุกต์ใช้เส้นโค้งแรงบิดด้วยการนำเส้นโค้งที่คำนวณได้ไปใช้ในการคำนวณหาช่วงระยะเวลาเบรก

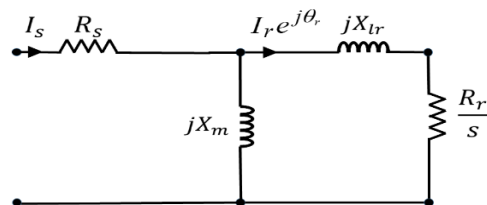
2. เทคนิควิธีคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดขณะเบรก

หัวข้อนี้กล่าวถึงเทคนิคการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้การทำงานเป็นเบรกด้วยวิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ปรากฏการณ์การอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กและสกินเอฟเฟค และสุดท้ายคือขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณแรงบิดในขณะที่ทำการเบรก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสถานะสถานะอยู่ตัวโดยทั่วไปแล้วจะใช้วงจรสมมูลในการคำนวณหาปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตาม ในการประยุกต์ทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานเป็นเบรกด้วยการ

จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์จะทำให้ความถี่ทางไฟฟ้าในขดลวดมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น ค่ารีแอคแตนซ์รีวไหลของขดลวดดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาพิจารณา วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะสามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังในรูปที่ 1 [8]



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้การทำงานเป็นเบรกด้วยวิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ R_s และ R_r คือค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ ตามลำดับ X_m และ X_r คือค่ารีแอคแตนซ์รวมและรีวไหลของโรเตอร์ ตามลำดับ I_r คือค่ากระแสลัพท์ของขดลวดสเตเตอร์ I_r คือค่ากระแสในโรเตอร์ และ θ คือมุมเฟสของกระแสในโรเตอร์ การคำนวณปริมาณแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในขณะที่ทำงานเป็นเบรกสามารถคำนวณได้โดยอาศัยวงจรสมมูล (รูปที่ 1) ซึ่งสมการแรงบิดสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$T_e = \frac{I_r^2 \left(\frac{R_r}{s}\right)}{\omega_{syn}} \quad (1)$$

โดยที่ ω_{syn} คือความเร็วเชิงมุมทางกลของซิงโครนัส โดยทั่วไปแล้วค่าสลิปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถหาได้จาก $s = \frac{\omega_{sm} - \omega_{rm}}{\omega_{syn}}$ แต่ทว่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงที่ขดลวดจะทำให้ความเร็วเชิงมุมทางกลของปริมาณทางไฟฟ้าของสเตเตอร์ (ω_{sm}) มีค่าเท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุนี้ สมการสลิปสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2)

$$s = \frac{-\omega_{rm}}{\omega_{syn}} \quad (2)$$

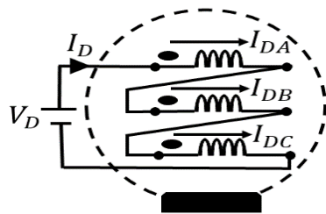
โดยที่ ω_{rm} คือความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์ กระแสโรเตอร์ในสมการที่ (1) สามารถหาได้จากวงจรสมมูล (รูปที่ 1) ด้วยกฎการแบ่งกระแสซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$I_r = \frac{I_s X_m}{\sqrt{\left(\frac{R_r X}{s}\right)^2 + (X_m + X_{lr})^2}} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) พบว่ามีความจำเป็นต้องทราบปริมาณกระแสลัพท์ของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ด้วยการนำปริมาณกระแสตรงที่ไหลในแต่ละเฟสของขดลวดสเตเตอร์มารวมกันทางเวกเตอร์ดังสมการที่ (4)

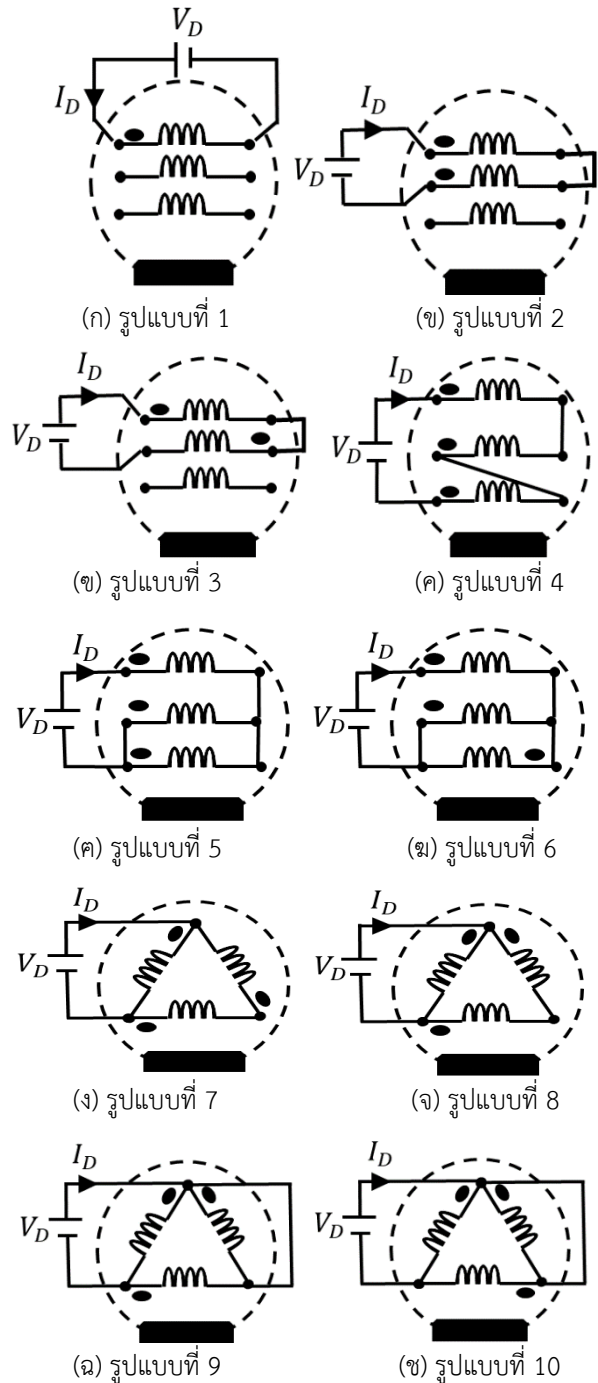
$$I_s = \left| \left(\pm I_{DA} \pm I_{DB} e^{-\frac{j2\pi}{3}} \pm I_{DC} e^{\frac{j2\pi}{3}} \right) \right| \quad (4)$$

โดยที่ I_{DA} , I_{DB} และ I_{DC} คือกระแสตรงที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์ในเฟส เอ บี และซี ตามลำดับ เครื่องหมายบวกหรือลบ (\pm) ที่อยู่หน้าตัวแปรกระแสของแต่ละเฟสถูกกำหนดด้วยทิศทางการไหลของกระแสในเฟสนั้น ๆ เช่น จากรูปที่ 2 พบว่ากระแสไหลเข้าขดลวดสเตเตอร์ (ไหลเข้าเครื่องหมายจุด) ทั้ง 3 เฟส ซึ่งในกรณีนี้ เครื่องหมายที่อยู่หน้าตัวแปรกระแสตรงดังกล่าวจะถูกกำหนดให้มีค่าเป็นบวก โดยที่ V_D และ I_D คือแรงดันและกระแสตรงที่จ่ายให้แก่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2 ตัวอย่างการจ่ายกระแสตรงที่ขดลวดสเตเตอร์

ปริมาณกระแสลัพท์จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสตรงในแต่ละเฟสและรูปแบบการต่อขดลวด จากรายงานวิจัยที่ [3, 8] โดยส่วนใหญ่ขดลวดของเครื่องจักรไฟฟ้าจะถูกต่อในรูปแบบสตาร์ (Star connection) หรือแบบเดลต้า (Delta connection) ดังนั้น เพื่อพิจารณาถึงความหลากหลายของรูปแบบการต่อว่าการต่อรูปแบบใดที่ทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถสร้างปริมาณแรงบิดเพื่อเกิดแรงเบรกได้มากที่สุด รูปแบบการต่อขดลวดนอกเหนือจากที่กล่าวในงานวิจัยข้างต้นจะถูกนำเสนอเพิ่ม รูปแบบการต่อขดลวดสเตเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาของบทความนี้จึงมีทั้งหมด 10 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบของการต่อขดลวดสเตเตอร์

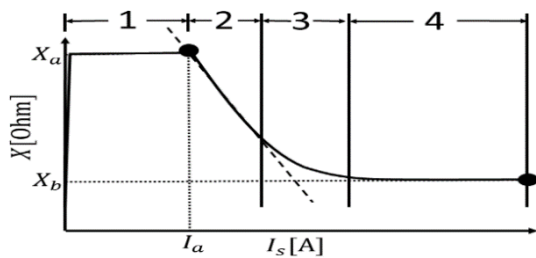
2.2 ปรากฏการณ์การอิมิตัวของเส้นแรงแม่เหล็กและสกินเอฟเฟค

โดยทั่วไปในการคำนวณปริมาณแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ทำงานเป็นมอเตอร์หรือเบรคค่าพารามิเตอร์ (X_m , X_{lr} , R_r) ที่ใช้คำนวณถูกกำหนดให้

คงที่ทุกช่วงความเร็ว [3-11] แต่ทว่า ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น [14-16] ซึ่งมีสาเหตุมาจากปรากฏการณ์การอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก และสกินเอฟเฟค เพื่อคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดให้มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าวิธีดั้งเดิม [8-11] ดังนั้น บทความนี้ นำเสนอการผนวกผลกระทบของปรากฏการณ์ดังกล่าว เข้ากับขั้นตอนการคำนวณซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 ผลกระทบจากการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กต่อค่ารีแอกแตนซ์

ค่ารีแอกแตนซ์ (X_m, X_{lr}) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณกระแสที่ป้อนให้แก่ขดลวดสเตเตอร์และสามารถเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวได้เมื่อจ่ายกระแสตรงมากกว่าค่าพิกัด [9] การเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอกแตนซ์ร่วมหรือรีวไหลของโรเตอร์แสดงได้ดังในรูปที่ 4 (เส้นทึบ)



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอกแตนซ์

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอกแตนซ์ (X) สามารถถูกแบ่งได้เป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงก่อนเกิดสภาวะอิ่มตัว (ช่วงที่ 1) ช่วงเริ่มเกิดสภาวะอิ่มตัว (ช่วงที่ 2 และ 3) และสุดท้ายคือ ช่วงสภาวะอิ่มตัว (ช่วงที่ 4) ดังนั้น ในการผนวกผลกระทบของปรากฏการณ์การอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กเข้ากับขั้นตอนการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดจึงมีความจำเป็นต้องทราบค่ารีแอกแตนซ์ที่ค่ากระแสต่าง ๆ แต่ทว่า โดยส่วนใหญ่แล้วค่ารีแอกแตนซ์ที่สามารถทำการทดสอบได้ จะอยู่ในช่วงที่ 1 ถึง 3 ส่วนการวัดหาค่ารีแอกแตนซ์ในช่วงที่ 4 อาจทำได้ยากเนื่องจากจะต้องป้อนกระแสให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าในปริมาณที่สูงซึ่งอาจทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าได้รับความเสียหายได้ ดังนั้น ฟังก์ชันการอิ่มตัว (Saturation function) จะถูกนำมาใช้ประมาณค่ารีแอกแตนซ์ที่อยู่ในช่วงที่ 4 [14] ด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์

X_a (ค่ารีแอกแตนซ์ก่อนเกิดสภาวะอิ่มตัว), X_b (ค่ารีแอกแตนซ์ในสภาวะอิ่มตัว) และ I_a (ค่ากระแสเริ่มต้นที่ค่ารีแอกแตนซ์เริ่มเข้าสู่การอิ่มตัว) แล้วนำไปแทนค่าในสมการที่ (5) ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวหาได้จากค่ารีแอกแตนซ์ที่ได้วัดในช่วงที่ 2 และ 3 โดยที่ p, q คือค่าสัมประสิทธิ์ที่มีอิทธิพลต่อรูปทรงของเส้นโค้งรีแอกแตนซ์

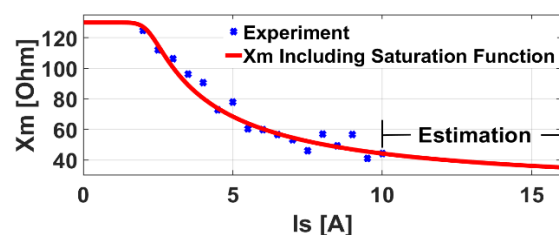
$$X = \frac{X_a - X_b}{1 + (\frac{I_s}{I_a})^p} + X_b \tag{5}$$

เพื่อชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอกแตนซ์ร่วมและรีวไหลของโรเตอร์ มอเตอร์ขนาด 1 kW, 4 pole, 230 V, 2.8 A ประเภทวอเตอร์โรเตอร์ถูกนำมาใช้สาธิตเพื่อวัดค่ารีแอกแตนซ์ดังกล่าว วิธีการวัดค่า X_m และ X_{lr} ที่ค่ากระแส (I_s) ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้คือ วิธีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. excitation) [15] และวิธีการทดสอบล่อโรเตอร์ ตามลำดับ ในการทดสอบวัดค่ารีแอกแตนซ์ดังกล่าวจะวัดในช่วงกระแสตั้งแต่ค่าพิกัดของมอเตอร์ (2.8A) จนถึง 3.5 เท่าของค่าดังกล่าว ค่ารีแอกแตนซ์ที่อยู่ในช่วงกระแสนอกเหนือจากที่ได้กล่าวจะถูกคำนวณด้วยสมการที่ (5) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 1

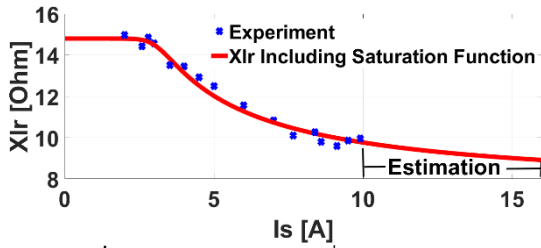
ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการอิ่มตัว

| | X_a | X_b | I_a | p | q |
|----------|-------|-------|-------|-----|-----|
| X_m | 130 | 20 | 2.8 | 11 | 1 |
| X_{lr} | 14.8 | 7.5 | 3.1 | 12 | 1 |

ภายหลังการทดสอบ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า X_m และ X_{lr} ที่ได้จากการทดสอบ (เครื่องหมายจุด) กับที่ได้จากการประมาณด้วยสมการที่ 5 (เส้นทึบ) แสดงได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 5 เส้นโค้งรีแอกแตนซ์ร่วม



รูปที่ 6 เส้นโค้งรีแอกแตนซ์รั่วไหลของโรเตอร์

จากรูปที่ 5 และ 6 พบว่าค่ารีแอกแตนซ์ (X_m , X_{lr}) มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่ากระแส และค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าฟังก์ชันการอิมิตัวที่ใช้ประมาณค่ารีแอกแตนซ์มีค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกต้อง ค่า X_m และ X_{lr} ที่ได้จากการวัดและการประมาณค่าจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดในลำดับถัดไป

2.2.2 ผลกระทบจากปรากฏการณ์สกินเอฟเฟกต์ต่อค่าความต้านทานภายในขดลวดโรเตอร์

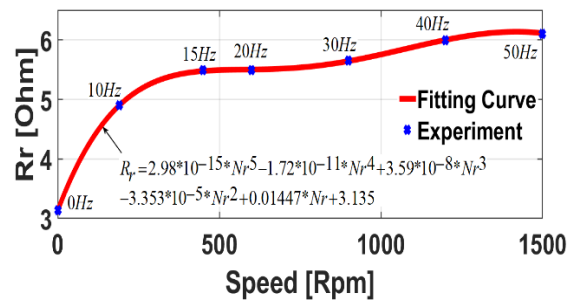
โดยทั่วไปแล้ว ในขณะที่มอเตอร์ทำงานเป็นเบรกจะมีกระแสไหลอยู่ในขดลวดโรเตอร์ซึ่งมีความถี่เปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วรอบในการหมุน ความถี่ของกระแสดังกล่าวจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ของสกินเอฟเฟกต์ (Skin effect) ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ [9] ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาปรากฏการณ์ของสกินเอฟเฟกต์เข้ากับขั้นตอนการคำนวณแรงบิด ความเร็วรอบ (N_r) ของมอเตอร์ขณะทำงานเป็นเบรกมีความสัมพันธ์กับความถี่ของกระแสที่ไหลอยู่ในขดลวดโรเตอร์ f_r () ตามสมการที่ (6) ดังแสดงในรายงานวิจัยที่ [16]

$$N_r = \frac{f_r N_{syn}}{f_{rate}} \quad (6)$$

โดยที่ f_{rate} และ N_{syn} คือความถี่พิกัดและความเร็วซิงโครนัสของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ตามลำดับ จากสมการที่ (6) พบว่าความถี่ของกระแสที่ไหลอยู่ในขดลวดโรเตอร์จะแปรผันตรงตามความเร็วรอบ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องทราบค่าความต้านทานของโรเตอร์ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ซึ่งสามารถทราบได้จากการวัดด้วยวิธีการทดสอบลือกโรเตอร์ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ [16] ด้วยการจ่ายกระแสที่ค่าพิกัดที่มีความถี่แตกต่างกัน (0-50Hz) ให้แก่ขดลวดสเตเตอร์

ในขณะที่โรเตอร์หยุดนิ่ง มอเตอร์ตัวเดิมดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.1 จะถูกนำมาทดสอบ

ภายหลังการทดสอบ ค่าความต้านทานของโรเตอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 7 (เครื่องหมายจุด) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิด ค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดดังกล่าวจะถูกประมาณด้วยเทคนิควิธีการประมาณค่าในช่วง (Curve fitting) ดังแสดงในรูปที่ 7 (เส้นทึบ) จากรูปจะพบว่าความถี่ตั้งแต่ 0 จนถึง 50Hz หรือในช่วงความเร็วตั้งแต่ 0 จนถึง 1500 รอบต่อนาที ค่าความต้านทานของโรเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 3.2 เป็น 6.1 Ohm ในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของวัสดุตัวนำกระแสในโรเตอร์ที่ทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำแปรผกผันแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับค่าความถี่ของกระแสดังกล่าว [9, 16]



รูปที่ 7 ค่าความต้านทานโรเตอร์ที่ความเร็วระหว่าง 0 จนถึง 1500 รอบต่อนาที

2.3 ขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณแรงบิดในขณะเบรก

หัวข้อนี้นำเสนอขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าภายใต้การทำงานเป็นเบรก ขั้นตอนการคำนวณดังกล่าวมีการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ (X_m , X_{lr} , R_r) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการอิมิตัวของเส้นแรงแม่เหล็กและปรากฏการณ์สกินเอฟเฟกต์ดังที่เคยกกล่าวไว้ในข้างต้นโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่ากระแสลัด (I_s) โดยนำค่ากระแสตรงของแต่ละเฟส (I_{DA} , I_{DB} , I_{DC}) แทนค่าลงในสมการที่ (4) และคำนวณหาค่าสลิปโดยแทนค่าความเร็ว (ω_{rm}) ลงในสมการที่ (2)

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ (X_m, X_{lr}, R_r) จากค่ากระแสลัพท์และความเร็วตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่ากระแสในโรเตอร์ (I_r) โดยนำค่ากระแสลัพท์และค่าสลิปที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 แทนค่าลงในสมการที่ (3)

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาปริมาณแรงบิด (T_e) โดยนำค่ากระแสในโรเตอร์ ค่าความต้านทานโรเตอร์ ค่าสลิป และค่าความเร็วเชิงมุมทางกลของซิงโครนัส แทนค่าลงในสมการที่ (1)

3. การตรวจสอบความถูกต้องของเส้นโค้งแรงบิด

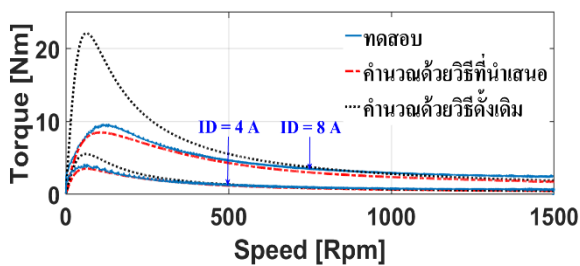
ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการตรวจสอบความถูกต้องของเส้นโค้งแรงบิดด้วยการเปรียบเทียบเส้นโค้งแรงบิดระหว่างที่ได้จากการวัดและคำนวณซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่งมีพิกัดตั้งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2 ถูกนำมาวัดเส้นโค้งแรงบิดในขณะที่ถูกกระตุ้นให้ทำงานเป็นเบรกด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไปในขดลวดสเตเตอร์ เพื่อวัดปริมาณแรงเบรกของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ถูกทดสอบ (ตัวเบรก) ณ ความเร็วต่าง ๆ มอเตอร์ตัวขับถูกนำมาใช้เพื่อปรับเปลี่ยนความเร็วของตัวเบรกจากความเร็วซิงโครนัสจนกระทั่งหยุดหมุน การวัดปริมาณแรงบิดของตัวเบรกมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

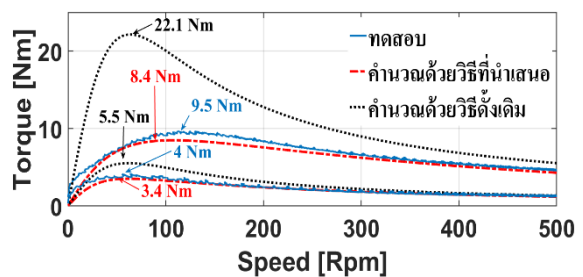
ในขั้นตอนแรก มอเตอร์ตัวขับ (2.2kW) ซึ่งถูกเชื่อมต่อกับตัวเบรก (1kW) ผ่านเซ็นเซอร์วัดแรงบิดดังแสดงในรูปที่

8 ถูกควบคุมให้หมุนที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที ด้วยอินเวอร์เตอร์ภายใต้การทำงานในโหมด V/F ขั้นตอนต่อมาทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงให้กับตัวเบรกเพื่อสร้างแรงบิดต้านการหมุนของมอเตอร์ตัวขับ และบันทึกปริมาณแรงบิดของตัวเบรก ขั้นตอนสุดท้าย เพื่อตรวจวัดปริมาณแรงบิดของตัวเบรกที่ผลิตได้ ณ ความเร็วต่าง ๆ มอเตอร์ตัวขับจะถูกบังคับปรับเปลี่ยนความเร็วด้วยอินเวอร์เตอร์ในโหมดแรมดาว (Ramp down) ให้ลดลงจาก 1,500 รอบต่อนาที จนกระทั่งหยุดนิ่งภายในเวลาประมาณ 30 วินาที สัญญาณแรงบิดและความเร็วที่วัดได้จะถูกส่งไปยังชุดเก็บข้อมูล (DAQ) เพื่อเก็บข้อมูลด้วยอัตรา 20,000 ข้อมูลต่อวินาทีผ่านทางโปรแกรมแลปวิว [17] เพื่อชี้ให้เห็นถึงความถูกต้องเส้นโค้งแรงบิดที่คำนวณได้จากวิธีที่นำเสนอในบทความนี้กับวิธีดั้งเดิมดังที่กล่าวไว้ในรายงานวิจัยที่ [9] จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้มาจากการวัดจริง

ในการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดด้วยวิธีดั้งเดิมค่าพารามิเตอร์ของตัวเบรกสามารถหาได้จากการวัดด้วยวิธีการทดสอบลือกโรเตอร์และในสภาวะไร้อะโหลดซึ่งมีค่าเท่ากับ $X_m=121.56$, $X_{lr}=15.119$ และ $R_r=5.4$ โอห์ม ปริมาณแรงเบรกที่เกิดขึ้นในช่วงความเร็วรอบ (N_r) ที่ใช้ในการทดสอบซึ่งได้จากการวัดและคำนวณแสดงได้ดังในรูปที่ 9 ปริมาณแรงเบรกดังกล่าวเกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสตรง (I_D) ขนาด 4A และ 8A เข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ตามรูปแบบการต่อที่ 1

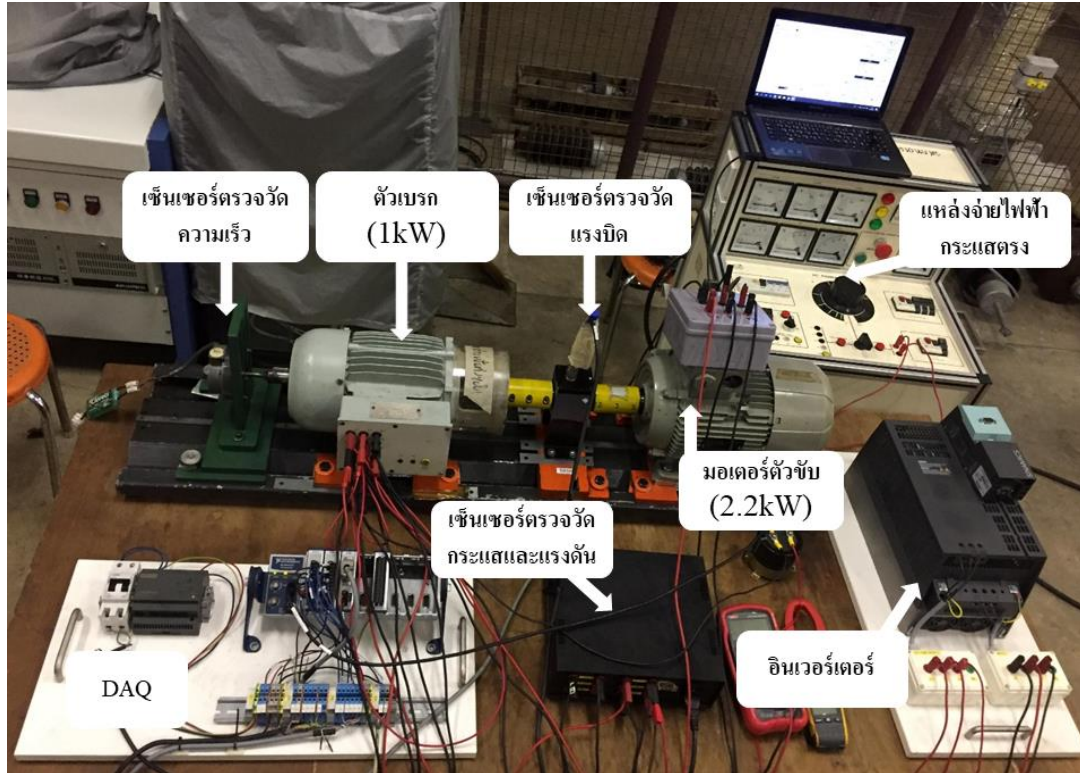


(ก) เส้นโค้งแรงบิด



(ข) แรงบิดในช่วงความเร็วระหว่าง 0 จนถึง 500 รอบต่อนาที

รูปที่ 9 เส้นโค้งแรงบิดจากการเบรก



รูปที่ 8 ระบบทดสอบวัดเส้นโค้งแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำงานเป็นเบรก

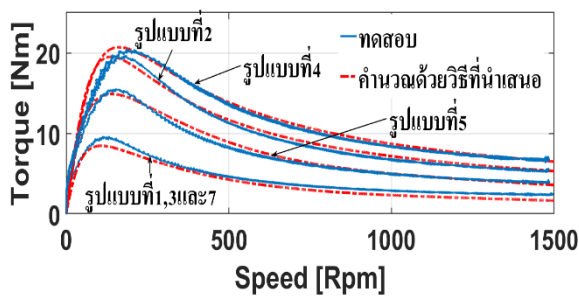
จากรูปที่ 9 พบว่าปริมาณแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอและวิธีดั้งเดิมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้วัดจริงในช่วงความเร็วระหว่าง 500 จนถึง 1,500 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 9(ก) อย่างไรก็ตาม ในช่วงความเร็วระหว่าง 0 จนถึง 500 รอบต่อนาที ปริมาณแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิมจะเริ่มมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 9(ข) เมื่อพิจารณา ค่ายอดของเส้นโค้งแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีดั้งเดิม จะพบว่ามีความสูงมากกว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงอยู่มาก ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการไม่พิจารณาผลกระทบจากปรากฏการณ์การอ้อมตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก และปรากฏการณ์สกินเอฟเฟค ในทางตรงกันข้าม ค่ายอดของเส้นโค้งที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอยังคงมีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ซึ่งค่ายอดดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงอยู่เล็กน้อย

จากผลการเปรียบเทียบเส้นโค้งแรงบิดระหว่างที่ได้จากการคำนวณและวัดจริงชี้ให้เห็นว่าเทคนิคการคำนวณที่นำเสนอมีความแม่นยำมากกว่าเทคนิคการคำนวณด้วยวิธี

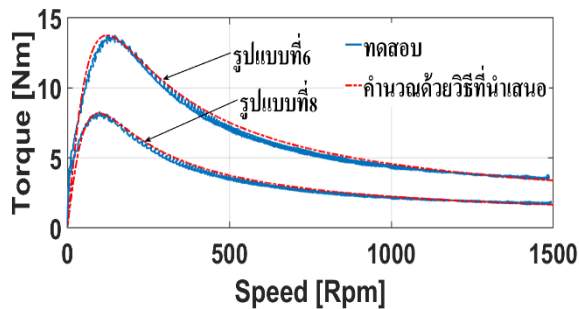
ดั้งเดิม นอกจากนี้ ยังพบว่าหากจ่ายกระแสตรงในปริมาณที่สูงขึ้น ปริมาณแรงบิดหรือแรงเบรกที่เกิดขึ้นก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย เช่น เมื่อสังเกตยอดของเส้นโค้งที่ได้วัดดังแสดงในรูปที่ 9(ข) จะพบว่าค่ายอดของเส้นโค้งที่เกิดจากการเบรกด้วยกระแสตรง 8A มีค่ามากกว่า 4A อยู่ 5.5Nm

ในลำดับถัดไปเป็นการเปรียบเทียบเส้นโค้งแรงบิด ซึ่งได้จากการเบรกด้วยการจ่ายกระแสตรงขนาด 8A ตามรูปแบบการต่อทั้ง 10 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อชี้ให้เห็นว่ารูปแบบการต่อแบบใดที่ทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถสร้างปริมาณแรงเบรกได้มากที่สุด พร้อมกับนำเส้นโค้งแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอมาเปรียบเทียบกับเส้นโค้งที่ได้จากการวัดเพื่อแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการคำนวณที่นำเสนอสามารถถูกนำมาใช้ได้ไม่ว่าจะปรับเปลี่ยนรูปแบบการต่อขดลวดสเตเตอร์เป็นรูปแบบใดครบทั้ง 10 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 10 จากรูปชี้ให้เห็นว่าการต่อขดลวดสเตเตอร์ตามรูปแบบที่ 4 สามารถสร้างปริมาณแรงบิดได้มากที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากการต่อขดลวดสเตเตอร์ตามรูปแบบดังกล่าวสามารถสร้างกระแสลัพท์ได้

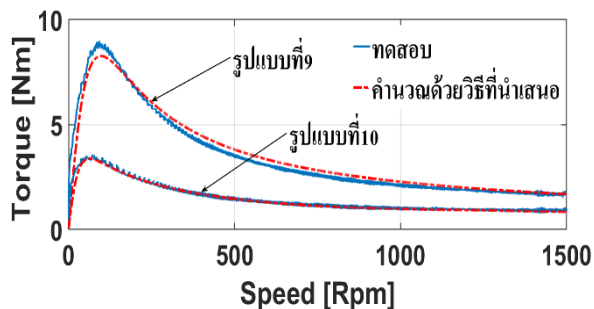
มากที่สุดนั่นเอง ในทางตรงกันข้าม รูปแบบการต่อที่สามารถสร้างกระแสลัพท์ได้น้อยที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือรูปแบบการต่อที่สร้างปริมาณแรงบิดได้น้อยที่สุดคือรูปแบบที่ 10 นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า การต่อขดลวดสเตเตอร์ตามรูปแบบที่ 1, 3 และ 7 สามารถสร้างปริมาณแรงบิดได้เท่ากันเพราะว่ารูปแบบการต่อดังกล่าวสร้างกระแสลัพท์ได้เท่ากัน



(ก) เส้นโค้งแรงบิดจากการเบรกด้วยรูปแบบการต่อที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 7



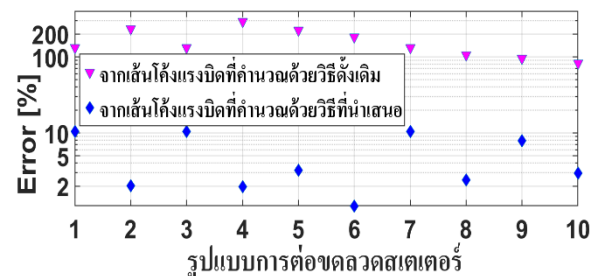
(ข) เส้นโค้งแรงบิดจากการเบรกด้วยรูปแบบการต่อที่ 6 และ 8



(ค) เส้นโค้งแรงบิดจากการเบรกด้วยรูปแบบการต่อที่ 9 และ 10

รูปที่ 10 เส้นโค้งแรงบิดจากการเบรกด้วยการจ่ายกระแสตรงขนาด 8A

การคำนวณหาค่าแรงบิดของการเบรกทั้ง 10 รูปแบบการต่อขดลวดสเตเตอร์ด้วยวิธีดั้งเดิมและที่นำเสนอให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในช่วงความเร็วระหว่าง 1500 จนถึง 500 รอบต่อนาที แต่ว่าค่าแรงบิดสูงสุดที่คำนวณได้จากเทคนิควิธีทั้งสองมีค่าแตกต่างไปจากค่าที่วัดได้ตั้งตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากวิธีทั้งสองในรูปที่ 9 ดังนั้น ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นโค้งแรงบิดจากการเบรกด้วยการจ่ายกระแสตรงขนาด 8A ตามรูปแบบการต่อขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 10 รูปแบบซึ่งได้จากการคำนวณด้วยวิธีทั้งสองดังกล่าวถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้เพื่อแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าแรงบิดสูงสุด

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นโค้งที่คำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ทุกรูปแบบการต่อขดลวดสเตเตอร์ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียง 11 เปอร์เซ็นต์ แต่หว่าค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นโค้งที่คำนวณด้วยวิธีดั้งเดิมมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 จนถึง 200 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าเทคนิคการคำนวณที่นำเสนอนี้ให้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำมากกว่าแบบดั้งเดิม

4. การประยุกต์ใช้เส้นโค้งแรงบิดในการคำนวณหาช่วงระยะเวลาเบรก

การควบคุมมอเตอร์ให้สามารถหยุดได้ทันที่นั่นมีความสำคัญมาก ระยะเวลาในการเบรกมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสที่จ่ายให้แก่ขดลวดสเตเตอร์ [18, 19] ด้วยเหตุนี้ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้

เส้นโค้งแรงบิดเพื่อคำนวณหาช่วงระยะเวลาเบรกและทำการตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลองที่ได้จากการวัด

ในการทดสอบจะนำมอเตอร์ต่อเข้ากับโหลดทางกล ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากโรเตอร์ของมอเตอร์ขนาด 11 kW ดังแสดงในรูปที่ 12 ขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



นำมอเตอร์ตัวที่ทดสอบมาขับโหลดทางกลด้วยความเร็วรอบ 1453 รอบต่อนาที การเบรกเริ่มต้นด้วยการสั่งแมกเนติกคอนแทคเตอร์ให้ปลดกระแสไฟฟ้าสลับออกจากตัวมอเตอร์ จากนั้น ทำการต่อแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไปที่ขั้วลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ตามรูปแบบการต่อที่ 5 (รูปที่ 3) ในขณะเดียวกัน สัญญาณความเร็วของมอเตอร์จะถูกบันทึกเพื่อวัดช่วงระยะเวลาเบรก การทดลองดังกล่าวได้ถูกทำซ้ำที่ค่ากระแสตั้งแต่ 0.25 ถึง 10A เพื่อวัดระยะเวลาเบรกที่ค่ากระแสดังกล่าว

เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าของระยะเวลาเบรกที่คำนวณได้จากเส้นโค้งแรงบิดกับค่าที่ได้จากการวัด การคำนวณระยะเวลาเบรกสามารถประยุกต์ใช้จากสมการที่ (7) ด้วยการแทนค่าปริมาณแรงบิดและความเร็วตั้งแต่ที่มอเตอร์เริ่มทำงานเป็นเบรก ($T_{Braking,k=1}, \omega_{rm,k=1}$) จนกระทั่งหยุดหมุน ($T_{Braking,k=n}, \omega_{rm,k=n}$) ดังแสดงในรายงานวิจัยที่ [8]

$$BrakingTime = J \sum_{k=1}^n \frac{\omega_{rm,k} - \omega_{rm,k+1}}{T_{Braking,k}} \quad (7)$$

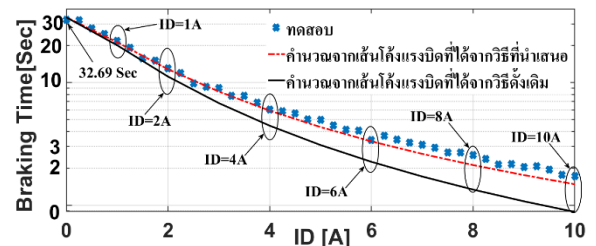
โดยที่

$$T_{Braking} = T_e - F\omega_{rm} - T_d \quad (8)$$

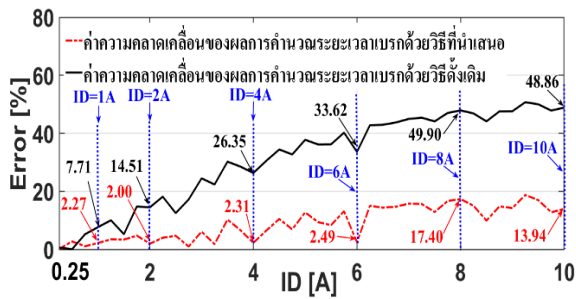
F คือแรงเสียดทาน T_d คือแรงบิดต้านก่อนที่โรเตอร์จะเริ่มขยับและ J คือโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ร่วมกับโหลดทางกล ค่าพารามิเตอร์ F , T_d และ J ของทั้งระบบ

สามารถวัดได้ด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยที่ [20] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.008N, 0.2Nm และ 0.0904kg.m² ตามลำดับ

ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการคำนวณโดยใช้สมการที่ (7) ซึ่งกำหนดให้ค่า $\omega_{rm,k} - \omega_{rm,k+1}$ เท่ากับ 0.01 ช่วงระยะเวลาเบรกที่คำนวณได้โดยอาศัยเส้นโค้งแรงบิดจากวิธีที่นำเสนอ (เส้นประ) และวิธีดั้งเดิม (เส้นทึบ) ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ (เครื่องหมายจุด) แสดงดังในรูปที่ 13



จากผลการทดสอบในรูปที่ 13 จะเห็นว่าหากปล่อยให้มอเตอร์หยุดหมุนด้วยตนเองโดยไม่จ่ายกระแสตรงเข้าไปยังขั้วลวดสเตเตอร์ มอเตอร์จะใช้เวลาในการเบรก 32.69 วินาที อย่างไรก็ตาม เมื่อจ่ายกระแสตรงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจนถึง 10A พบว่าช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการเบรกลดลงลำดับถัดไป จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการคำนวณเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของช่วงระยะเวลาเบรกที่คำนวณได้โดยอาศัยเส้นโค้งแรงบิดที่ได้จากวิธีที่นำเสนอและวิธีดั้งเดิม พบว่าการผนวกความไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเข้ากับขั้นตอนการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดทำให้ผลการคำนวณช่วงระยะเวลาเบรกมีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบ เพอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณช่วงระยะเวลาเบรกแสดงได้ดังในรูปที่ 14 โดยที่เส้นประและเส้นทึบคือค่าความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณช่วงระยะเวลาเบรกโดยอาศัยเส้นโค้งแรงบิดที่ได้จากวิธีที่นำเสนอและวิธีดั้งเดิมตามลำดับ



รูปที่ 14 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณระยะเวลาเบรก

จากรูปที่ 14 พบว่าเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสที่จ่ายให้แก่ขดลวดสเตเตอร์ แต่ทว่าเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณดังกล่าวจากวิธีที่นำเสนอ (เส้นประ) น้อยกว่าวิธีดั้งเดิม (เส้นทึบ) อย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากเส้นโค้งแรงบิดที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า ดังนั้นการคำนวณหาช่วงระยะเวลาเบรกซึ่งอาศัยเส้นโค้งแรงบิดดังกล่าวจึงถูกต้อง

5. สรุป

บทความนี้เสนอเทคนิคการปรับปรุงการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดของเครื่องจักรกลไฟฟ้าภายใต้การทำงานเป็นเบรกด้วยวิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าวิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม โดยผนวกผลกระทบจากปรากฏการณ์การอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็กและสกินเอฟเฟกต์เข้ากับขั้นตอนการคำนวณ

ผลการเปรียบเทียบระหว่างเส้นโค้งแรงบิดที่ได้จากการคำนวณและจากการวัดทั้ง 10 รูปแบบของการต่อขดลวดสเตเตอร์แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการคำนวณที่นำเสนอให้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าเทคนิควิธีการคำนวณแบบดั้งเดิม และยังพบอีกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามารถสร้างปริมาณแรงเบรกได้มากที่สุดเมื่อต่อขดลวดสเตเตอร์ตามรูปแบบที่ 4 เนื่องจากการต่อขดลวดสเตเตอร์ตามรูปแบบดังกล่าวสามารถสร้างกระแสลัพท์ได้มากที่สุด นอกจากนี้ บทความนี้เสนอการประยุกต์ใช้เส้นโค้งแรงบิดเพื่อคำนวณหาช่วงระยะเวลาเบรก จากผลการทดสอบพบว่าการผนวกความไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเข้ากับขั้นตอนการคำนวณเส้นโค้งแรงบิดส่งผลให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำนำไปสู่ผลการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดที่นำเสนอในบทความนี้สามารถนำไปใช้ควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้สร้างแรงเบรกให้หยุดได้อย่างทันท่วงทีด้วยการจ่ายปริมาณกระแสที่เหมาะสม

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สัญญาριθุนเลขที่ ท 003/1/2563

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bordovsky, P., Adibpoor, S.H., Murrenhoff, H. and Reinertz, O. Simulation of an Active Disc Brake with a Hydro-Mechanical Torque Control. Global Fluid Power Society PhD Symposium, July 18-20, Samara, Russia, 2018.
- [2] Yazdanpanpanah, R. and Mirsalim, M. Axial-flux Wound-Excitation Eddy-Current Brakes: Analytical Study and Parametric Modeling. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014; 50(6): 1-10.
- [3] Rongmei, P. L., Shimi, S. L., Chatterji, S. and Sharma, V. K. A Novel Fast Braking System for Induction Motor. *International journal of engineering and innovative technology*, 2012; 1(6): 65-69.

- [4] Ejiogu, E. C. and Tanno, Y. Capacitor Self-Excitation Braking of the Induction Motor. IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 15-19, Maui, HI, USA, 1993; 891-895.
- [5] Brown, J.E. and Butler, O.I. The Zero-Sequence and Performance of Three-Phase Induction Motors. *Proc. IEE*, 1954; 101: 219-224.
- [6] Grantham, C. Zero-sequence Dynamic Braking and Parameter Determination. *Proc. IEE*, 1983; 130: 392-398.
- [7] Alshamasin, M.S. Control of Zero Sequence Braking for a Three-Phase Induction Motor Operating from Single-Phase Supply with a Controlled Capacitor. *Journal of applied sciences*, 2012; 12(24): 2616-2620.
- [8] Harrison, D. The Dynamic Braking of Induction Motors. *Proc. IEE*, 1956; 103: 121-129.
- [9] Say, M.G. Design of Alternating Current Machines. London: PITMAN, 1949.
- [10] Krishnamurthy, M.R. D.C. Dynamic Braking for Direct Determination of Rotor Impedance and Power Factor of Induction Machines. *Proc. IEE*, 1964; 111: 1299-1304.
- [11] Somers, C., Moussa, C. and Habbad, K. A. Emergency D. C. Injection Braking System. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), March 17-19, Seville, Spain, 2015.
- [12] นครินทร์ เปรมปรี และ พิชัย อารีย์. เทคนิคการคำนวณหาเส้นโค้งแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะทำงานเป็นเบรกด้วยวิธีการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42, 30 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน, เดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา, 2562.
- [13] Aree, P. and Prempri, N. Torque-Speed Curve of DC Braking Induction Motors Including Saturation Effect. The 6th International Conference on Engineering Energy and Environment, November 27-29, Ambassador Hotel Bangkok, Bangkok, Thailand, 2019
- [14] Pedra, J., Candela, I. and Barrera, A. Saturation Model for Squirrel Cage Induction Motor. *Electric power systems research*, 2009; 79(7): 1054-1061.
- [15] Stankovic', A.V., Benedict, A.V., John, V., Lipo, T.A. A Novel Method for Measuring Induction Machine Magnetizing Inductance. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003; 39: 1257-1263
- [16] Sen, P.C. Principles of Electrical Machines and Power Electronic. 3th edition, NJ: Wiley, 2014.
- [17] LabVIEW User Manual. USA, 2014.
- [18] การเบรกอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส ด้วยระบบไฟฟ้า. 2546. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.tinamics.com>.
- [19] Produc Manual. KIMO Drive Technology. [Online] available: <https://www.kimo.de.com>.
- [20] Giri, F. AC Electric Motors Control Advanced Design Techniques and Applications. Wiley, 2013.