



เทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อแรงดันขาดหายไปหนึ่งเฟส โดยใช้ตัวเก็บประจุร่วมกับสายนิวทรัล

ณัฐพงศ์ ตันธนุช* และ พิชัย อารีย์

กลุ่มวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและเครื่องจักรกลไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2564 3001 ต่อ 3224 อีเมล: tanthanuch1@engr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.11.005

รับเมื่อ 24 พฤษภาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 10 กรกฎาคม 2562 ตอรับเมื่อ 30 สิงหาคม 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 19 พฤศจิกายน 2562

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

มอเตอร์เหนี่ยวนำถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม มอเตอร์จะมีปริมาณกระแสสูงและสมรรถนะแรงบิดที่ด้อยลงหากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเกิดขาดหายไปหนึ่งเฟสเนื่องจากความบกพร่องของแหล่งจ่าย หรือเกิดความชำรุดเสียหายของระบบป้องกัน หรือรีโวลต์เซอร์ทำการปลดกระแสตัดวงจร เป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางปรับปรุงสมรรถนะแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการต่อจุดนิวทรัลของมอเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายเพื่อให้ทำงานเป็นมอเตอร์สองเฟสทันทีที่เกิดการขาดหายของกระแสไฟฟ้าไปหนึ่งเฟส พร้อมทั้งนำเสนอเทคนิควิธีการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการช่วยทำให้เกิดความสมดุลของกระแสระหว่างเฟสซึ่งเป็นการลดปัญหากระแสเกินพิกัด โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 4 กรณี คือ กรณีแรกต่อมอเตอร์แบบสามเฟสสมดุลที่ไม่มีการต่อจุดนิวทรัลเข้ากับแหล่งจ่าย กรณีที่สองแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ขาดหายไปหนึ่งเฟส กรณีที่สามต่อสายนิวทรัลของมอเตอร์กับแหล่งจ่ายเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟส และกรณีที่สี่ต่อตัวเก็บประจุนุกรมกับเฟสที่แรงดันไฟฟ้าขาดหายไป จากการทดสอบพบว่า การต่อสายนิวทรัลผนวกกับการใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับขดลวดของมอเตอร์เฉพาะเฟสที่เกิดการขาดหายไปของกระแสไฟฟ้าจะทำให้มอเตอร์ยังคงมีสมรรถนะแรงบิดที่ดี อีกทั้งปริมาณกระแสขาเข้าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งช่วยทำให้มอเตอร์ยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างต่อเนื่องขณะที่เกิดกระแสไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟส

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำ สมรรถนะแรงบิด สายนิวทรัล ตัวเก็บประจุ



Techniques for Improving Torque Performance of Three Phase Induction Motor under Single Phasing Condition Using Capacitor and Neutral Wire

Nutthaphong Tanthanuch* and Pichai Aree

Power System and Electrical Machine Research Group, Electrical and Computer Engineering Department, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathum Thani, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2564 3001 Ext. 3224, E-mail: tanthanuch1@enr.tu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.11.005

Received 24 May 2019; Revised 10 July 2019; Accepted 30 August 2019; Published online: 19 November 2019

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Induction motors are widely used in industrial applications. When the induction motors lose one of their three-phase line voltages due to a faulty power supply or single-pole tripping of recloses, they become single phasing. They will continue to run, however, they will draw current more than their rated values. The motor's torque performances are also degraded. Therefore, this paper presents a method for improving the motor performance under the loss of one phase voltage by connecting the star points between the motor and the power sources using the neutral lead. The additional capacitor is also employed to reduce the degrees of current unbalance. The experiment is conducted into four study cases: three-phase balance with no neutral connection, loss of one phase voltage, loss of one phase voltage with the neutral wire connection, and capacitor connected in series with the phase-loss winding. The study results show that the neutral wire and the additional capacitor connected in series with the phase-loss winding of motor help to improve the motor's running torque and to reduce the unbalanced current within the acceptable level. This proposed method allows the induction motors to keep running without damage when they experience a one-phase loss of voltage.

Keywords: Induction Motor, Torque Performance, Neutral Wire, Capacitor

Please cite this article as: N. Tanthanuch and P. Aree, "Techniques for improving torque performance of three phase induction motor under single phasing condition using capacitor and neutral wire," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 1, pp. 48–59, Jan.–Mar. 2020 (in Thai).

1. บทนำ

ในปัจจุบันมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสได้ถูกนำใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เนื่องจากมีความแข็งแรงทนทานและราคาถูก [1] โดยทั่วไปแล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสต้องการกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าครบทั้งสามเฟส ในบางครั้งเป็นไปได้ที่แรงดันไฟฟ้าอาจมาไม่ครบสามเฟส เนื่องจากเกิดความบกพร่องของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากสถานีส่งไฟฟ้า [2]–[6] หรืออาจเกิดจากภาวะโวลต์เฟสใดเฟสหนึ่งมีปริมาณกระแสสูงเกินจนทำให้ฟิวส์ในเฟสนั้นๆ ขาดไป ในปัจจุบันนี้ การไฟฟ้ามีแนวโน้มการเพิ่มความมั่นคงและความน่าเชื่อถือให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าด้วยการปลดกระแสลัดวงจรเฉพาะเฟสที่เกิดการลัดวงจรออกไปเท่านั้น เช่น หากเกิดการลัดวงจรชนิดสายเดี่ยวลงกราวด์ รีโกลสเซอร์จะทำงานด้วยการปลดสายส่งเส้นที่เกิดการลัดวงจรออกไปเพียงเส้นเดียวเท่านั้น [7], [8] ทำให้มอเตอร์เกิดสภาวะกระแสไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟส [9], [10] ในกรณีนี้มอเตอร์จะไม่สามารถทำงานได้เต็มพิกัดใช้กระแสเกิน และอาจเกิดความเสียหายต่อมอเตอร์ได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องปลดมอเตอร์ออกจากการทำงาน [10]–[12]

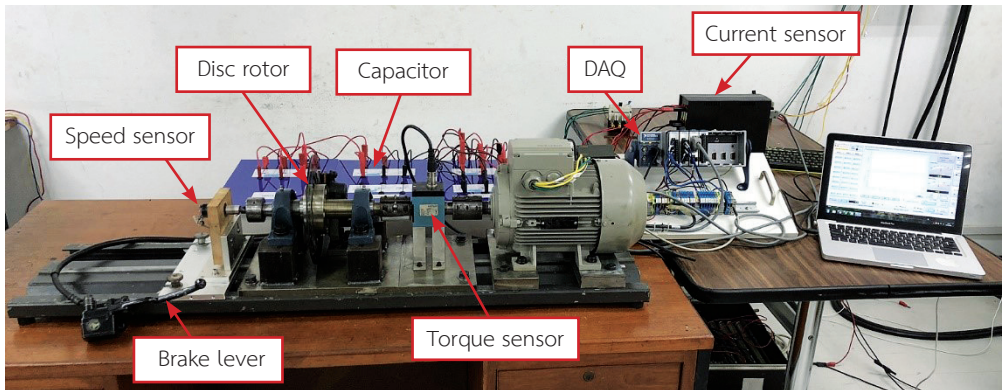
การศึกษาวิจัยในกรณีนี้มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานขณะกระแสไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟสนั้นมีอยู่น้อย [13]–[15] เนื่องจากในทางปฏิบัติจะมีเพียงแค่มอเตอร์ขนาดเล็กเท่านั้นที่ผู้ใช้ยอมให้ทำงานขณะเกิดสภาวะกระแสไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟสเนื่องจากมีได้จัดระบบป้องกันที่ดีให้แก่มอเตอร์ ส่วนกรณีมอเตอร์ขนาดใหญ่จะมีระบบป้องกันช่วยปลดมอเตอร์ออกจากระบบไฟฟ้าเพื่อป้องกันความเสียหาย ถึงแม้ว่าผู้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นแหล่งต้นกำลังจะไม่ต้องการให้มอเตอร์ทำงานขณะที่มีกระแสไฟฟ้ามาไม่ครบสามเฟส แต่ในบางครั้งก็มีความจำเป็นที่ต้องให้มอเตอร์ดังกล่าวขับโหลดซึ่งสำคัญมากๆ ต่อไปอีกช่วงระยะเวลาหนึ่งเพราะไม่ต้องการให้กระบวนการผลิตเกิดการหยุดชะงักเสียหาย ด้วยเหตุนี้ จึงควรศึกษาหาเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อแรงดันไฟฟ้าหายไปหนึ่งเฟสเพื่อให้มอเตอร์ยังคงสามารถทำงานขับโหลดทางกลได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นบทความนี้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ด้วยการต่อสายนิวทรัลของมอเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายเฉพาะช่วงเวลาที่เกิดการขาดหายไปหนึ่งของแรงดันขาเข้าเฟสใดเฟสหนึ่งเท่านั้น พร้อมกับการประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับขดลวดของมอเตอร์ที่เกิดการขาดหายไปของกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมปริมาณกระแสในแต่ละเฟสให้มีปริมาณที่ใกล้เคียงกันและมีให้สูงเกิดพิกัดมาจนเป็นอันตรายต่อมอเตอร์ อีกทั้งนำเสนอเทคนิควิธีการคำนวณหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม และทำการทดสอบมอเตอร์จริงเพื่อแสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ยังคงมีสมรรถนะแรงบิดที่ดีและมีปริมาณกระแสอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สามารถเดินเครื่องทำงานต่อไปได้อีกขณะที่เกิดกระแสไฟฟ้าหายไปหนึ่งเฟส

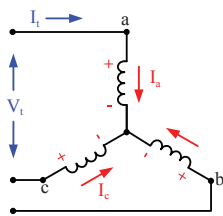
2. ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 กิโลวัตต์ 400 โวลต์ กระแส 4.7 แอมแปร์ ที่ความเร็ว 1420 รอบต่อนาที ระบบทดสอบแสดงดังในรูปที่ 1 จากรูปจะเห็นว่ามอเตอร์ดังกล่าวถูกต่อเข้ากับเซนเซอร์วัดแรงบิด โดยที่ปลายอีกข้างหนึ่งของเซนเซอร์จะถูกต่อเข้ากับเพลลาของระบบจานเบรก ระบบเบรกดังกล่าวประกอบด้วยจานเบรกและตัวไฮดรอลิกแผ่นเบรก ระบบเบรกจะทำงานด้วยการบีบแบนเบรกเพื่อส่งให้น้ำมันซึ่งไหลออกจากปั๊มเบรกเข้าสู่ตัวไฮดรอลิกดันผ้าเบรกเลื่อนเข้าไปกดกับแผ่นจานเบรกทำให้เกิดความฝืดเป็นการเพิ่มภาระทางกลให้แก่มอเตอร์ ส่งผลให้มอเตอร์มีความเร็วลดลงจากสภาวะไร้อหลดจนหยุดนิ่ง ในช่วงเวลาดังกล่าวแรงบิดของมอเตอร์จะถูกตรวจจับด้วยเซ็นเซอร์วัดแรงบิด และกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์จะถูกวัดผ่านฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ (Hall-effect Sensor) สัญญาณแรงบิด กระแสไฟฟ้า และความเร็วจะถูกส่งไปที่ชุดเก็บข้อมูล (Data Acquisition System; DAQ) ซึ่งต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมแลปวิว [16] ในการทดลองสัญญาณข้อมูลจะถูกจัดเก็บด้วยอัตราการสุ่ม เท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ และทำการขจัดสัญญาณรบกวนด้วยการใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Filter) [17]

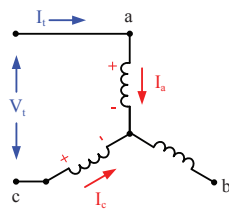
การศึกษาแบ่งออกเป็น 4 กรณีในกรณีแรก (รูปที่ 2 (ก)) พิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสทำงานโดยที่ได้รับแรงดัน



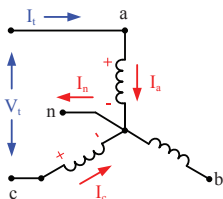
รูปที่ 1 ระบบที่ใช้ทดสอบ



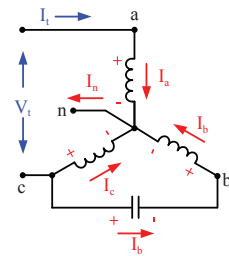
(ก)



(ข)



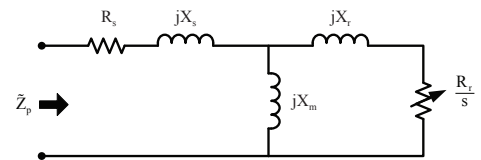
(ค)



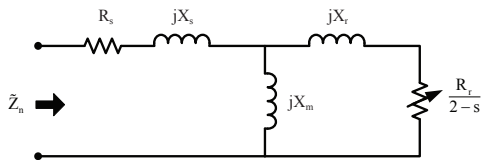
(ง)

รูปที่ 2 รูปแบบการต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบ

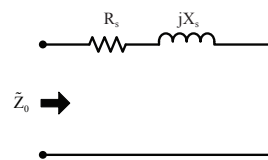
สามเฟสสมดุลและจุดนิวทรัลของมอเตอร์ไม่ได้ต่อเข้ากับจุดนิวทรัลของแหล่งจ่าย กรณีที่สองสมมุติว่าเกิดเหตุการณ์แรงดันไฟฟ้า (เฟสบี) ขาดหายไปหนึ่งเฟส [รูปที่ 2 (ข)] กรณีที่สามเป็นการจำลองสถานการณ์ศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์หากจุดนิวทรัลของมอเตอร์และแหล่งจ่ายถูกต่อเข้าด้วยกันผ่านสายนิวทรัลทันทีที่เกิดการขาดหายไปของกระแสไฟฟ้า [รูปที่ 2 (ค)] และกรณีสุดท้ายเป็นการประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุเข้ากับกรณีศึกษาที่สามเพื่อช่วยลดปริมาณกระแสของมอเตอร์และช่วยเพิ่มสมรรถนะแรงบิดของมอเตอร์ [รูปที่ 2 (ง)]



(ก) ลำดับบวก



(ข) ลำดับลบ



(ค) ลำดับศูนย์

รูปที่ 3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

3. การออกแบบตัวเก็บประจุเพื่อลดความไม่สมดุลของปริมาณกระแส

หัวข้อนี้นำเสนอเทคนิคการหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการลดความไม่สมดุลของปริมาณกระแสไฟฟ้าในกรณีที่เกิดการขาดหายไปของกระแสไฟฟ้าไปหนึ่งเฟส โดยใช้วงจรสมมูลลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในรูปที่ 3 [18]

แอดมิตแตนซ์ของมอเตอร์ในแต่ละลำดับหาได้ตั้งสมการที่ (1)-(3)

ณัฐพงศ์ ตันทนุช และ พิชัย อารีย์, “เทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อแรงดันขาดหายไปหนึ่งเฟสโดยใช้ตัวเก็บประจุร่วมกับสายนิวทรัล.”

$$\begin{aligned}\tilde{Y}_p &= \frac{1}{\tilde{Z}_p} \\ &= \frac{\left(\frac{R_r}{s} + jX_r + jX_m\right)}{(R_s + jX_s)\left(\frac{R_r}{s} + jX_r + jX_m\right) + (jX_m)\left(\frac{R_r}{s} + jX_r\right)} \quad (1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{Y}_n &= \frac{1}{\tilde{Z}_n} \\ &= \frac{\left(\frac{R_r}{2-s} + jX_r + jX_m\right)}{(R_s + jX_s)\left(\frac{R_r}{2-s} + jX_r + jX_m\right) + (jX_m)\left(\frac{R_r}{2-s} + jX_r\right)} \quad (2)\end{aligned}$$

$$\tilde{Y}_0 = \frac{1}{\tilde{Z}_0} = \frac{1}{R_s + jX_s} \quad (3)$$

จากรูป 2 (ง) เมื่อต่อสายนิวทรัลระหว่างมอเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า แรงดันเฟสเอและเฟสซีจะมีมุมเฟสหน้าหน้าแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ (Terminal Voltage; \tilde{V}_t) เท่ากับ 30 องศา และ 150 องศา ตามลำดับ ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$\tilde{V}_a = \frac{\tilde{V}_t}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{6}} \quad (4)$$

$$\tilde{V}_c = \frac{\tilde{V}_t}{\sqrt{3}} e^{j\frac{5\pi}{6}} \quad (5)$$

และสามารถเขียนสมการสมดุลแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$\tilde{V}_t = \tilde{V}_a - \tilde{V}_c \quad (6)$$

$$\tilde{V}_b = \tilde{V}_c + jX_c \tilde{I}_b \quad (7)$$

เมื่อ X_c คือ ขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกับขดลวดของมอเตอร์

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลำดับศูนย์กับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละเฟส ดังสมการที่ (8)

$$\tilde{V}_0 = (\tilde{V}_a + \tilde{V}_b + \tilde{V}_c) / 3 \quad (8)$$

โดยใช้หลักการขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) ร่วมกับสมการที่ (4) และ (5) ทำให้สามารถเขียนสมการที่ (6)–(8) ใหม่ได้เป็นสมการที่ (9)–(11)

$$\tilde{V}_t = (1-a)\tilde{V}_p + (1-a^2)\tilde{V}_n \quad (9)$$

$$(a^2-a)\tilde{V}_p + (a-a^2)\tilde{V}_n = jX_c(a^2\tilde{Y}_p\tilde{V}_p + a\tilde{Y}_n\tilde{V}_n + \tilde{Y}_0\tilde{V}_0) \quad (10)$$

$$\tilde{V}_0 = j\frac{\tilde{V}_t}{2\sqrt{3}} + \frac{a^2}{2}\tilde{V}_p + \frac{a}{2}\tilde{V}_n \quad (11)$$

เมื่อ a คือ โอเปอเรเตอร์ที่ใช้ในการหมุนเฟสเซอร์ไปเป็นมุม 120 องศา ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

แทนค่า \tilde{V}_0 ลงในสมการที่ (10) จะได้

$$\begin{aligned}\left(a^2 - a - jX_c a^2 \tilde{Y}_p - jX_c \frac{a^2}{2} \tilde{Y}_0\right) \tilde{V}_p \\ = -\frac{X_c \tilde{V}_t \tilde{Y}_0}{2\sqrt{3}} + \left(a^2 - a + jX_c a \tilde{Y}_n + jX_c \frac{a}{2} \tilde{Y}_0\right) \tilde{V}_n \quad (12)\end{aligned}$$

จากนั้นแทนสมการที่ (12) ลงในสมการที่ (9) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันลำดับบวกและแรงดันลำดับลบกับแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ดังสมการที่ (13) และ (14)

$$\tilde{V}_p = \left(\frac{-j\sqrt{3} + X_c (\tilde{Y}_n + \tilde{Y}_0) e^{-j\frac{5\pi}{6}}}{-j3\sqrt{3} - \sqrt{3}X_c (\tilde{Y}_p + \tilde{Y}_n + \tilde{Y}_0)} \right) \tilde{V}_t \quad (13)$$

$$\tilde{V}_n = \left(\frac{-j\sqrt{3} + X_c \tilde{Y}_p e^{j\frac{5\pi}{6}}}{-j3\sqrt{3} - \sqrt{3}X_c (\tilde{Y}_p + \tilde{Y}_n + \tilde{Y}_0)} \right) \tilde{V}_t \quad (14)$$

แฟกเตอร์ความไม่สมดุลของปริมาณกระแสไฟฟ้า (Ratio of Current Unbalance Factor; IUF) ที่ไหลเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำหาได้จากอัตราส่วนของขนาดกระแสลำดับลบต่อขนาดกระแสลำดับบวก คำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$IUF = \frac{I_n}{I_p} = \frac{Y_n V_n}{Y_p V_p}$$

$$= \frac{Y_n \sqrt{Y_p^2 X_c^2 + (-\sqrt{3}(\sqrt{3} \sin(\phi_p) + \cos(\phi_p)) Y_p) X_c + 3}}{Y_p \sqrt{(Y_n^2 + Y_0^2 + 2Y_n Y_0 \cos(\phi_n - \phi_0)) X_c^2 + (-\sqrt{3}(\sqrt{3} Y_n \sin(\phi_n) + \sqrt{3} Y_0 \sin(\phi_0)) X_c - Y_n \cos(\phi_n) - Y_0 \cos(\phi_0)) X_c + 3}} \quad (15)$$

เมื่อ Y_p, Y_n และ Y_0 คือ ขนาดของแอดมิตแตนซ์ลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์

ϕ_p, ϕ_n และ ϕ_0 คือ มุมเฟสของอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ลำดับลบ และลำดับศูนย์

และสามารถเขียนสมการที่ (15) ให้อยู่ในรูปแบบของสมการเศษส่วนพหุนามที่ขึ้นกับขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุดังแสดงในสมการที่ (16)

$$IUF = K_1 \sqrt{\frac{K_2 X_c^2 + K_3 X_c + 3}{K_4 X_c^2 + K_5 X_c + 3}} \quad (16)$$

โดยค่าคงที่ต่างๆ ในสมการที่ (16) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (17)-(21)

$$K_1 = \frac{Y_n}{Y_p} \quad (17)$$

$$K_2 = Y_p^2 \quad (18)$$

$$K_3 = -\sqrt{3}(\sqrt{3} \sin(\phi_p) + \cos(\phi_p)) Y_p \quad (19)$$

$$K_4 = Y_n^2 + Y_0^2 + 2Y_n Y_0 \cos(\phi_n - \phi_0) \quad (20)$$

$$K_5 = -\sqrt{3} \left(\sqrt{3} Y_n \sin(\phi_n) + \sqrt{3} Y_0 \sin(\phi_0) - Y_n \cos(\phi_n) - Y_0 \cos(\phi_0) \right) \quad (21)$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (16) เทียบกับขนาดอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ และจัดให้เท่ากับศูนย์ ได้เป็นสมการที่ (22) ซึ่งพหุนามกำลังสอง

$$AX_c^2 + BX_c + C = 0 \quad (22)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในสมการที่ (22) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (23)-(25)

$$A = 0.5K_1(K_2K_5 - K_3K_4) \quad (23)$$

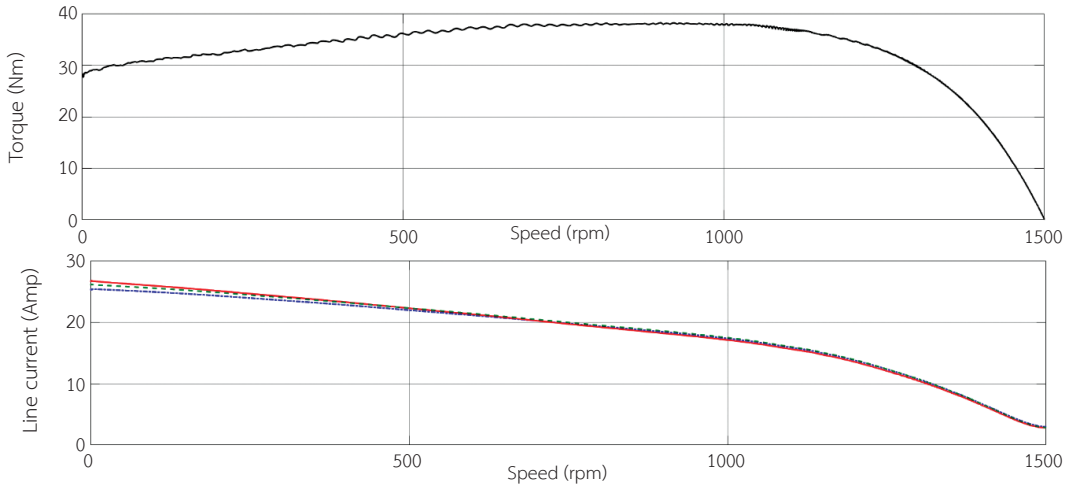
$$B = 3K_1(K_2 - K_4) \quad (24)$$

$$C = 1.5K_1(K_3 - K_5) \quad (25)$$

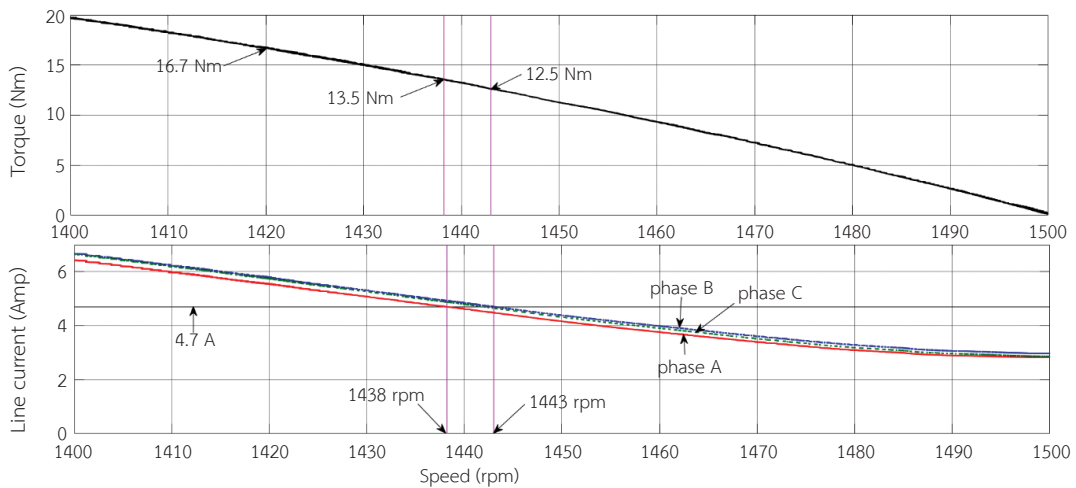
ผลเฉลยของสมการที่ (22) ที่มากที่สุด คือขนาดตัวเก็บประจุที่ทำให้แฟกเตอร์ความไม่สมดุลของปริมาณกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุด

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

หัวข้อนี้กล่าวถึงผลการทดสอบตามกรณีศึกษาดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 กรณีแรกศึกษาสมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การจ่ายแรงดันสามเฟสสมดุลโดยที่ยังไม่ได้มีการต่อสายนิวทรัลระหว่างมอเตอร์กับแหล่งจ่าย การทดลองเริ่มต้นด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ตัวที่ทำการทดสอบ จากนั้นทำการวัดปริมาณแรงบิด ความเร็ว และกระแสไฟฟ้าในสภาวะสถานะอยู่ตัวขณะที่ทำการค่อยๆ เบรกมอเตอร์อย่างช้าๆ จนกระทั่งหยุดหมุน เส้นโค้งแรงบิด และเส้นโค้งกระแสถูกบันทึกด้วยใช้ DAQ ซึ่งต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมแลปวิวัดแสดงในรูปที่ 4 รูปขยายเฉพาะบริเวณย่านความเร็วปรกติที่มอเตอร์ถูกนำมาใช้งาน แสดงดังรูปที่ 5 จากรูปจะเห็นว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นมอเตอร์ใหม่มีปริมาณกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้จะมีขนาดต่อเฟสเท่ากัน ปริมาณกระแสต่อเฟสที่น้อยที่สุดได้แก่เฟสเอ



รูปที่ 4 เส้นโค้งแรงบิดและกระแสกรณีต่อกับแรงดันสามเฟส

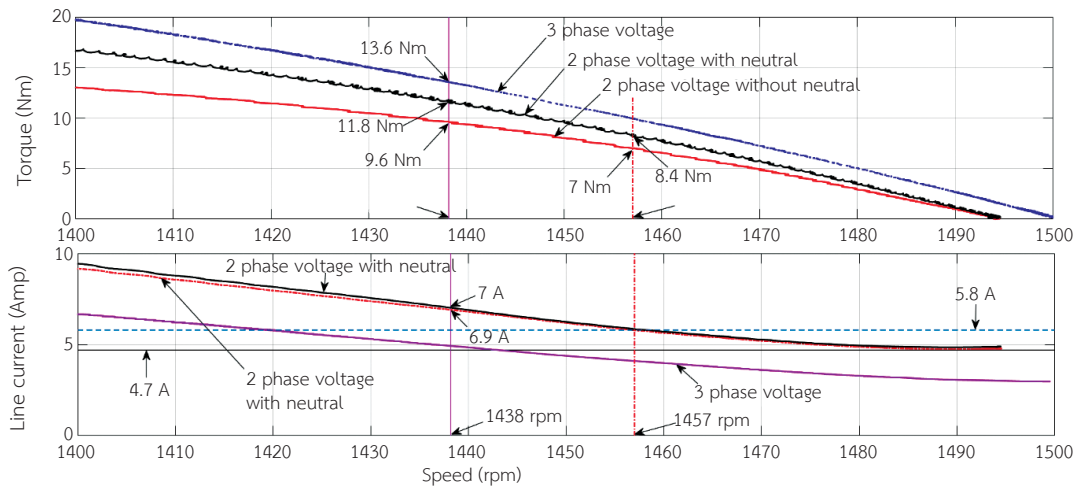


รูปที่ 5 รูปขยายเส้นโค้งแรงบิดและกระแสกรณีต่อกับแรงดันสามเฟส

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณโหลดทางกลของมอเตอร์ผ่านทางเบรก แรงบิดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นพร้อมกับปริมาณกระแสขาเข้า ปริมาณกระแสเฟสซีและเฟสซีมีค่าเท่ากับพิกัด 4.7 แอมแปร์ ที่ความเร็วประมาณ 1,443 รอบต่อนาที ขณะที่กระแสเฟสเอถึงค่าพิกัดที่ความเร็วต่ำกว่าประมาณ 1,438 รอบต่อนาที หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ขณะที่ปริมาณกระแสเฟสเอถึงพิกัด ขนาดของกระแสเฟสซีและเฟสซีได้เกินพิกัดไปประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ หากยอมให้ค่ากระแสของทั้งสองเฟสดังกล่าวเกินได้เล็กน้อย ความเร็ว

1,438 รอบต่อนาที ถูกจัดว่าเป็นความเร็วพิกัดของมอเตอร์ตัวนี้ซึ่งเมื่ออ่านค่าจากเส้นโค้งแรงบิดจะพบว่ามอเตอร์ผลิตแรงบิดได้ 13.5 นิวตันเมตร ซึ่งผลิตกำลังไฟฟ้าขาออกได้ประมาณ 2 กิโลวัตต์ กำลังไฟฟ้าขาออกที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ระบุไว้จากป้ายประมาณ 200 วัตต์ นอกจากนี้จะพบว่ามอเตอร์ไม่สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วที่ระบุไว้ตามป้าย 1,420 รอบต่อนาที ได้เนื่องจากมีปริมาณกระแสไฟฟ้าเกินค่าพิกัดมากถึง 1.23 เท่า (5.8 แอมแปร์)

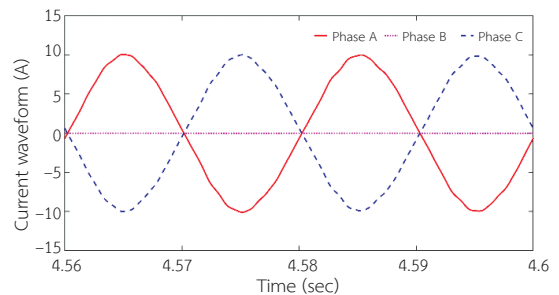
ลำดับต่อไปเป็นกรณีศึกษาที่สองซึ่งจะทำการปลด



รูปที่ 6 เส้นโค้งแรงบิดและกระแสกรณีแรงดันขาดหายไปหนึ่งเฟส

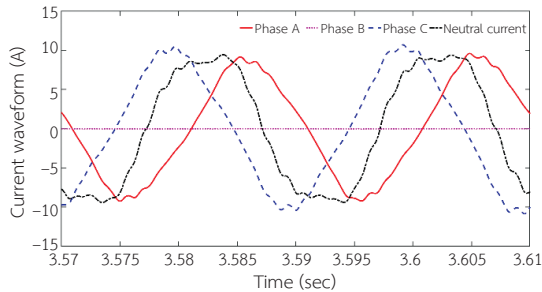
แรงดันเฟสออกไปเพียงเฟสเดียว กรณีนี้เป็นการจำลองสถานการณ์ที่แรงดันขาดหายไปหนึ่งเฟส แรงบิดและกระแสของมอเตอร์ขณะไม่ได้ต่อสายนิวทรัลแสดงดังในรูปที่ 6 จากรูปจะเห็นว่ามอเตอร์มีปริมาณกระแสเพิ่มสูงขึ้นถึง 147 เปอร์เซ็นต์ (6.9 แอมแปร์) ที่ความเร็วพิกัด (1,438 รอบต่อนาที) ในขณะที่แรงบิดลดลงเหลือ 70 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเหตุนี้ จึงควรปลดมอเตอร์ออกจากการทำงานเนื่องจากกระแสเกิน หากมอเตอร์ถูกออกแบบไว้ให้ทำงานเกินพิกัดได้ 1.23 เท่าของกระแสพิกัด (5.8 แอมแปร์) มอเตอร์สามารถจ่ายแรงบิดได้ประมาณ 7 นิวตันเมตร ที่ความเร็ว 1,457 รอบต่อนาที เพื่อเป็นการเพิ่มแรงบิดให้แก่มอเตอร์ในขณะที่กระแสไฟฟ้ายาวไปหนึ่งเฟส (เฟสบี) จะทำการต่อจุดร่วมระหว่างมอเตอร์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้วยสายนิวทรัล (กรณี 3) จากรูปที่ 6 จะพบว่ามอเตอร์มีศักยภาพในการสร้างแรงบิดเพิ่มขึ้น ขณะที่กระแสขาเข้ามอเตอร์ที่ความเร็วพิกัดยังคงมีค่าแตกต่างกัน น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่สอง หากยอมให้มอเตอร์ทำงานเกินพิกัดด้วยค่ากระแสเท่ากับค่าเดิมที่กำหนดไว้คือ 1.23 เท่า มอเตอร์จะสามารถจ่ายแรงบิดได้เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1.4 นิวตันเมตร ด้วยเหตุนี้สายนิวทรัลจึงมีความสำคัญช่วยเพิ่มแรงบิดให้แก่มอเตอร์ในกรณีที่แรงดันเฟสใดเฟสหนึ่งขาดหายไป

สาเหตุที่ทำให้แรงบิดของมอเตอร์มีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อ



รูปที่ 7 สัญญาณกระแสกรณีไม่มีสายนิวทรัล

ต่อสายนิวทรัล สามารถอธิบายได้จากรูปคลื่นกระแสของมอเตอร์ซึ่งถูกบันทึกไว้ในขณะที่มอเตอร์ทำงานจ่ายโหลดที่ความเร็ว 1,438 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 7 กระแสเฟสเอและเฟสซีมีเฟสตรงกันข้ามกันทันทีที่เกิดกระแสไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟส ซึ่งหมายความว่ามอเตอร์สามเฟสทำงานเป็นมอเตอร์หนึ่งเฟส ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แรงบิดลดลงอย่างมาก สำหรับในกรณีที่สายนิวทรัลถูกนำมาเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์กับแหล่งจ่ายจะพบว่ากระแสเฟสเอและเฟสซีของมอเตอร์นั้นมีมุมเฟสแตกต่างอยู่ 120 องศา ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งหมายความว่ามอเตอร์สามเฟสทำงานเป็นมอเตอร์สองเฟส สายนิวทรัลซึ่งเชื่อมต่อระหว่างจุดร่วมของมอเตอร์และแหล่งจ่ายจะบังคับให้เกิดมุมเฟสแตกต่างระหว่างกระแสของสองเฟสที่เหลือ ดังนั้นมอเตอร์จึงทำงานแบบสองเฟสและสามารถ

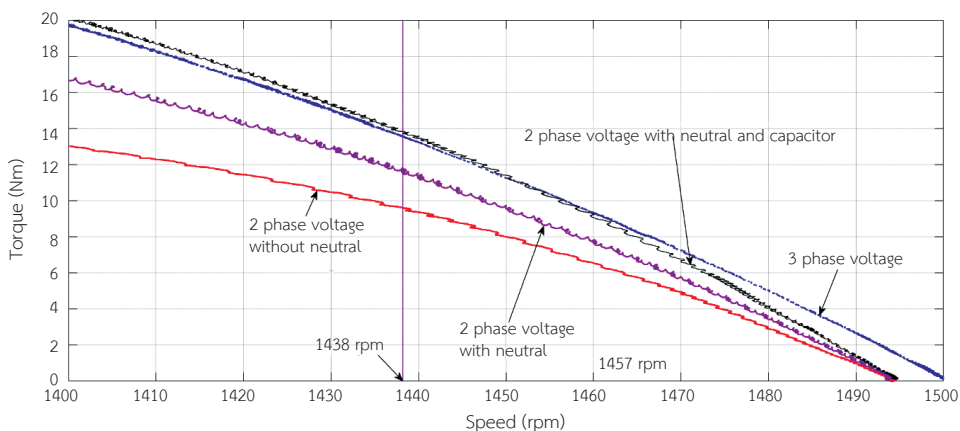


รูปที่ 8 สัญญาณกระแสกรณีมีสายนิวทรัล

สร้างแรงบิดได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม กระแสที่ไหลผ่านสายนิวทรัลจะมีปริมาณที่ค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับกระแสในแต่ละเฟสของมอเตอร์ ดังนั้นการออกแบบสายนิวทรัลจะต้องไม่ทำให้สายมีขนาดเล็กเกินไปโดยคำนึงถึงขีดความสามารถในการรองรับกระแสด้วย

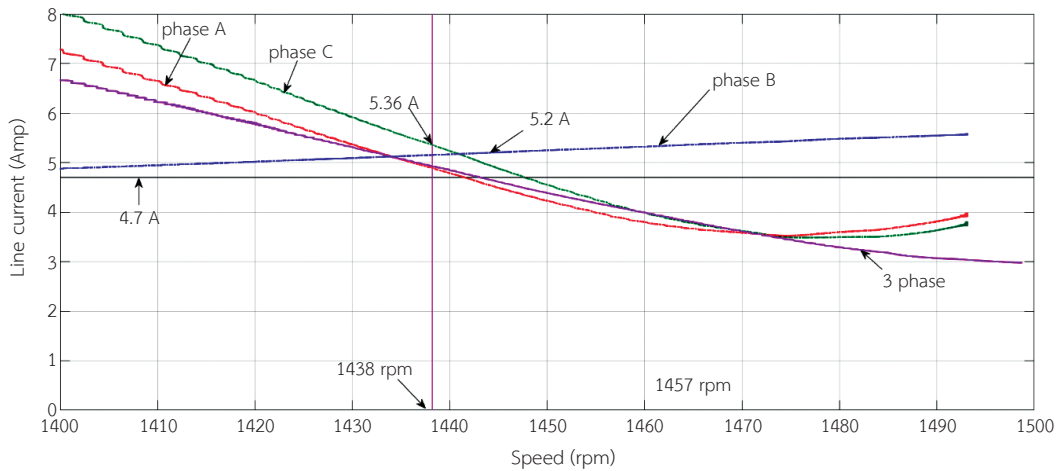
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

V_i	400 V
f	50 Hz
p	4
R_s	3.46 Ω
R_r	2.56 Ω
X_s	4.40 Ω
X_r	4.40 Ω
X_m	63.42 Ω

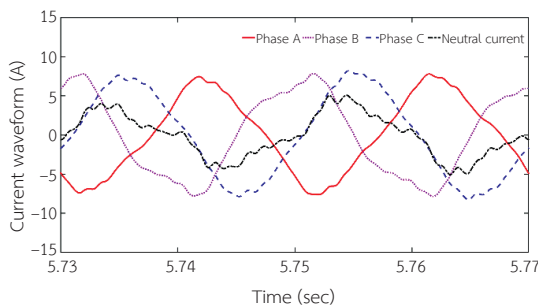


รูปที่ 9 การเปรียบเทียบแรงบิดเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุ

เพื่อที่จะลดปริมาณกระแสที่มอเตอร์ใช้ขณะที่เกิดกระแสไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟส กรณีที่สี่จะถูกนำทดสอบด้วยการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับขดลวดดังแสดงในรูปที่ 2 (ง) ในขั้นตอนแรกจะทำการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความถี่ที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุด้วยสมการที่ (22) ตั้งขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3 ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก จากการคำนวณจะพบว่าค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 40 ไมโครฟารัด ภายหลังจากการประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุประเภทน้ำมันเพียงหนึ่งตัวมาต่อเข้ากับมอเตอร์ที่ทำการทดสอบดังวงจรตามรูปที่ 2 (ง) เส้นโค้งแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดแสดงดังในรูปที่ 9 จากรูปจะเห็นว่ามอเตอร์มีความสามารถในการผลิตแรงบิดที่สูงขึ้นเทียบเคียงกับกรณีที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าครบสามเฟส ดังนั้นมอเตอร์จึงมีความสามารถในการจ่ายแรงบิดเพื่อขับโหลดทางกลได้ ปริมาณกระแสที่มอเตอร์ใช้ในแต่ละเฟสสำหรับกรณีที่ติดตั้งตัวเก็บประจุแสดงดังในรูปที่ 10 จากรูปจะเห็นว่าปริมาณกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์มีค่าลดลงจากเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตัวเก็บประจุ (รูปที่ 6) หากพิจารณาที่ความเร็วพิกัด เฟสที่มีปริมาณกระแสมากที่สุดได้แก่ เฟสซี ซึ่งจะมีค่าสูงเกินกว่าค่าพิกัดอยู่เพียง 1.14 เท่า ดังนั้นการประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุด้วยค่าที่เหมาะสมจะช่วยลดความไม่สมดุลของกระแส รูปที่ 11 แสดงรูปคลื่นกระแส



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบกระแสเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุ



รูปที่ 11 สัญญาณกระแสกรณีมีสายนิวทรัลและติดตั้งตัวเก็บประจุ

ของมอเตอร์ในขณะที่ต่อตัวเก็บประจุและทำงานที่ความเร็ว 1,438 รอบต่อนาที จากรูปจะเห็นว่ากระแสที่ชดเชยด้วยตัวเก็บประจุทำให้กระแสในแต่ละเฟสมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ต่อตัวเก็บประจุ (รูปที่ 8) นอกจากนี้กระแสนิวทรัลมีค่าลดลงกว่าเดิมทำให้มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่จำเป็นต้องปลดมอเตอร์ออกจากการทำงานเมื่อเกิดเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟส ซึ่งจะเป็นการป้องกันการหยุดชะงักการทำงานของโหลดที่สำคัญที่ต้องใช้แหล่งต้นกำลังขับอย่างต่อเนื่องในกระบวนการผลิต

5. อภิปรายผลและสรุป

บทความนี้นำเสนอเทคนิควิธีที่จะทำให้มอเตอร์

เหนียวทำงานได้อย่างต่อเนื่องเมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟสด้วยการต่อสายนิวทรัลพร้อมกับตัวเก็บประจุ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการที่กระแสไฟฟ้าขาดหายไปหนึ่งเฟสทำให้สมรรถนะแรงบิดของมอเตอร์ลดลงและพร้อมทั้งดึงปริมาณกระแสเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาพบว่า การต่อสายนิวทรัลระหว่างมอเตอร์และแหล่งจ่ายที่ที่เกิดการขาดหายไปของกระแสไฟฟ้าไปหนึ่งเฟสช่วยทำให้มอเตอร์ทำงานเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าสองเฟสและสามารถสร้างแรงบิดได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้มีสายนิวทรัล นอกจากนี้บทความนี้นำเสนอเทคนิควิธีการคำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมช่วยลดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าขณะเกิดการขาดหายไปของกระแสไฟฟ้าไปหนึ่งเฟส จากการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอคำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บประจุซึ่งนำมาต่ออนุกรมร่วมกับเฟสที่กระแสไฟฟ้าขาดหายไปพบว่าตัวเก็บประจุดังกล่าวสามารถลดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี กระแสในแต่ละเฟสมีค่าใกล้เคียงกันและไม่เกินพิกัด ทำให้มอเตอร์ยังสามารถขับโหลดต่อไปได้โดยไม่เกิดความเสียหายแก่กระบวนการผลิต เนื่องจากการหยุดชะงักการทำงานของมอเตอร์ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของเทคนิคที่นำเสนอคือต้องมีการต่อสายนิวทรัลซึ่งทำให้มอเตอร์ต้องมีรูปแบบการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์เท่านั้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques for induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 1, pp. 106–114, 2005.
- [2] W. H. Kersting, "Causes and effects of unbalanced voltages serving an induction motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 165–170, 2001.
- [3] W. H. Kersting, "Causes and effects of single-phasing induction motors," in *Rural Electric Power Conference*, USA, 2004, pp. A4.
- [4] R. A. Walling, R. Saint, R. C. Dugan, J. Burke, and L. A. Kojovic, "Summary of distributed resources impact on power delivery systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1636–1644, July 2008.
- [5] P. E. Sutherland and T. A. Short, "Effect of single-phase reclosing on industrial loads," in *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, USA, 2006, pp. 2636–2644.
- [6] M. Sudha and P. Anbalagan, "A novel protecting method for induction motor against faults due to voltage unbalance and single phasing," in *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Taiwan, 2007, pp. 1144–1148.
- [7] E. Agamloh, S. Peele, and J. Grappe, "Induction motor single-phasing performance under distribution feeder recloser operations," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 2, pp. 1568–1576, Mar.–Apr. 2014.
- [8] E. B. Agamloh, S. Peele, and J. Grappe, "Response of motor thermal overload relays and phase monitors to power quality events," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 6, pp. 5336–5344, Nov.–Dec. 2016.
- [9] W. H. Kersting, "Causes and effects of single-phasing induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 6, pp. 1499–1505, Nov.–Dec. 2005.
- [10] A. Tozune, "Balanced operation of three-phase induction motor with asymmetrical stator windings connected to single-phase supply system," *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, vol. 138, no. 4, pp. 167–174, Jul. 1991.
- [11] R. G. Harley, E. B. Makram, and E. G. Duran, "The effects of unbalanced networks and unbalanced faults on induction motor transient stability," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3, no. 2, pp. 398–403, Jun. 1998.
- [12] P. Pillay, P. Hofmann, and M. Manyage, "Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over or undervoltages," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 4, pp. 485–491, Dec. 2002.
- [13] C. H. Saleno, J. R. Camacho, L. M. Neto, and R. G. Mendonca, "The asymmetrical three-phase induction motor fed by single phase source: Comparative performance analysis," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, USA, 1997, pp. MB1/14.1-MB1/14.3
- [14] T. F. Chan, "Performance analysis of a three-phase induction generator connected to a single-phase power system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 3, pp. 205–213, Sep. 1998.
- [15] J. H. H. Alwash, "Predicting performance of

three-phase induction motors connected to single-phase supplies,” *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 143, no. 4, pp. 339–344, Jul. 1996.

[16] LabVIEW User Manual , USA, 2014.

[17] W.S. Steven, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, 2nd ed., San Diego: California Technical Publishing, 1999.

[18] C. F. Wagner and R. D. Evans, *Symmetrical Components*. New York: McGraw-Hill, 1933.

ดังนี้

$$A = 0.0130$$

$$B = -1.0626$$

$$C = 2.3189$$

จากนั้นทำการหาผลเฉลยของสมการที่ (22) ได้เท่ากับ

$$X_{c1} = 2.2437$$

$$X_{c2} = 79.5920$$

ภาคผนวก

ก. การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสม

การคำนวณค่าความจุไฟฟ้าสามารถทำได้ด้วยการนำค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากตารางที่ 1 แทนลงในสมการที่ (17)–(21) และสมการที่ (23)–(25) โดยใช้ความเร็วพิกัดของมอเตอร์ ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์ตามสมการที่ (22)

ขนาดตัวเก็บประจุที่ทำให้แฟกเตอร์ความไม่สมดุลของปริมาณกระแสไฟฟ้ามีน้อยที่สุดหาได้จากสมการที่ (ก.1)

$$C_{add} = \frac{1}{2\pi f \cdot \max(X_{c1}, X_{c2})} \quad (\text{ก.1})$$

ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เหมาะสมเท่ากับ 40 ไมโครฟารัด