

เทคนิคการตรวจสอบขดลวดสเตเตอร์ลัด รอบแบบออนไลน์สำหรับมอเตอร์ เหนี่ยวนำสามเฟส

เฉลิมชาติ มานพ¹⁾ และ ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล²⁾

¹⁾ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ

²⁾ ภาควิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคออนไลน์สำหรับการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยการตรวจจับสัญญาณผลรวมแรงดันไฟฟ้าฉบับพลันที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสหรือเรียกเป็นสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ การประมวลผลโดยใช้วงจรแอนะล็อกที่สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก วิธีการดังกล่าวมอเตอร์จะต้องต่อแบบวอยและไม่ต้องสายนิวตรอล จากผลการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ได้ออกแบบสำหรับการลัดวงจรแบบรอบถึงรอบพบว่า วงจรตรวจจับสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์สามารถตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบที่รอบต่ำๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ขนาดของสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการลัดวงจร

Online Technique to Detect Shorted-Turns in Stator Windings of 3-Phase Induction Motors

Chalermchat Manop¹⁾ and Chanwit Tangsiriworakul²⁾

¹⁾ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

²⁾ Department of Electrical, College of Industrial Technology, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

Abstract

This paper presents an online technique to detect shorted- turns in stator windings of 3 ϕ induction motors. This detection is based on summation of three instantaneous phase voltages which is regarded as a stator fault signal. The technique is implemented by an analog circuit due to its simplicity and low cost. With this method, the machine must be star connected with floating neutral. From experimental results on a 3 ϕ induction motor designed for turn-to-turn short, it is found that the circuit of stator fault signal level is capable of effective detection. The level of stator fault signal increases with number of shorted turns.

Keyword: Induction motor, stator fault, instantaneous voltage, on-line technique.

บทนำ

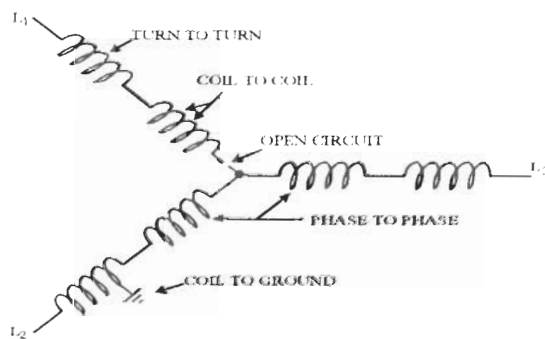
การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์เป็นสาเหตุหนึ่งที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดขึ้นอยู่ในลำดับต้นๆจากสาเหตุสำคัญหลักๆที่ทำให้มอเตอร์เกิดการชำรุดเสียหาย สาเหตุที่ทำให้ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์เสื่อมมาจากปรากฏการณ์จุดร้อน (hotspots) ที่มีสาเหตุมาจากการแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิ ความผิดปกติของอุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม เครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น [M.A. Cash, T.G. Habetler, and G.B. Kliman, 1998] ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เหนี่ยวนำบางส่วนสาเหตุมาจากการลุกลามของปัญหาเพียงเล็กน้อย ดังนั้นถ้ามีการบอกเหตุผิดปกติได้ล่วงหน้าในกรณีที่ยังไม่ร้ายแรงนักก็สามารถวางแผนที่จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายอันอาจจะเกิดขึ้นในด้านต่างๆได้น้อยที่สุด และถึงแม้ว่าจะได้มีการตรวจเช็คอยู่เป็นประจำแล้วก็ตาม ก็อาจจะไม่สามารถตรวจพบสิ่งผิดปกติที่พร้อมจะเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาทำให้ในปัจจุบันเทคนิคออนไลน์ (on-line) จึงเป็นเทคนิคที่นิยมนำมาเฝ้าตรวจตลอดเวลา ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์สำหรับบางกรณีสามารถสังเกตได้ด้วยประสบการณ์ แต่บางกรณีจำเป็นต้องอาศัยสัญญาณที่อยู่ภายในตัวของมอเตอร์มาวิเคราะห์ การวินิจฉัยสามารถใช้สเปคตรัมใน

โดเมนความถี่ (frequency domain) หรือสัญญาณในโดเมนเวลา (time domain) ก็ได้ ซึ่ง
จะพิจารณาถึงความเหมาะสมและความสามารถในการตรวจจับสัญญาณดังกล่าวเป็น
สำคัญ ในบทความนี้ได้นำเสนอการตรวจจับขดลวด สเตเตอร์ลัดรอบ สำหรับมอเตอร์
เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าฉับพลัน (instantaneous voltage) ที่เกิดขึ้น
ในแต่ละเฟสของมอเตอร์นำมารวมกัน (summing) เป็นสัญญาณผลรวมหรือเรียกเป็น
สัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ (stator fault signal) ประมวลผลในลักษณะออนไลน์โดยใช้วงจร
แอนะล็อกที่สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก

โหมดความล้มเหลวของขดลวดสเตเตอร์

โหมดความล้มเหลว (failure) ของขดลวดสเตเตอร์จะแบ่งออกตามชนิด
ของการนำไปสู่การลัดวงจรโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นอย่างน้อย 5 กลุ่มแสดงดังรูปที่ 1
ได้แก่ [A.H. Bonnett, and G.C. Soukup. 1992]

- ก) รอบถึงรอบ (turn to turn)
- ข) ขดลวดถึงขดลวด (coil to coil)
- ค) วงจรเปิด (open circuit)
- ง) เฟสถึงเฟส (phase to phase)
- จ) ขดลวดถึงกราวด์ (coil to ground)



รูปที่ 1 โหมดความล้มเหลวของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
เมื่อขดลวดต่อแบบสตาร์

มอเตอร์ที่มีการพันเป็นแบบสุ่ม (random wound) มักจะถูกนำมาใช้กับงานที่มีการเริ่มต้นบ่อยครั้ง ลวดตัวนำในแต่ละชุดขดลวดที่มีอยู่อย่างมากมายจะเป็นสาเหตุให้มีส่วนเกิดการเคลื่อนที่ (สั่น) ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ซึ่งสาเหตุนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบรอบถึงรอบ ภายใน 1 ชุดขดลวด (coil) และสภาวะนี้จะนำไปสู่ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชุดของขดลวดที่ลัดวงจรนั้น ผลที่ตามมาคือจะทำให้ฉนวนของลวดตัวนำดังกล่าวเสื่อมสภาพลง และสุดท้ายจะทำให้เกิดสภาวะลัดวงจรโดยรวมไปถึงการลัดวงจรลงกราวด์โดยผ่านสล็อตสเตเตอร์ [A.H. Bonnett, and G.C. Soukup, 1992] เมื่อสภาวะดังกล่าวนี้เกิดขึ้นแล้วมอเตอร์อาจจะทำงานต่อหรือหยุดทำงานก็จะขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ แต่ส่วนใหญ่แล้วสาเหตุของการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบจะอยู่เหนือความสามารถของเครื่องป้องกันมอเตอร์ทำให้ไม่สามารถตรวจพบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากเป็นความล้มเหลวที่มีผลน้อยมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะค่อยๆ มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นรวมถึงจะมีการขยายพื้นที่ออกไปด้วย จนกระทั่งเกิดความเสียหายที่ตามมาก็คือฉนวนเฟสหรือกราวด์ถูกทำลาย และจุดนี้จะเป็นสาเหตุโดยตรงที่ทำให้เกิดฟอลต์เนื่องจากเฟสถึงเฟสหรือกราวด์ฟอลต์ (ground fault) ตามมา

จากทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าปัญหาเริ่มแรกจะมาจากการลัดวงจรเพียงจุดเล็กน้อยเท่านั้นคือ รอบถึงรอบ แล้วก็จะลุกลามจนอาจทำให้เกิดอีก 4 สภาวะตามมา ดังนั้นถ้าสามารถตรวจจับการลัดวงจรของขดลวด สเตเตอร์ลัดรอบกรณิรอบถึงรอบได้ก็จะสามารถแก้ไข ปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงเพื่อให้เป็นปกติ และยังสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายให้น้อยลงได้อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากอีก 4 สภาวะที่มีอันตรายสูงกว่ามิตติความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นลดลงไปด้วยเช่นกัน

การตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบโดยใช้ผลรวม แรงดันไฟฟ้าจับพลัน

ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการดังกล่าวนี้จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงหรือการไม่สมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ (impedance, Z) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งโดยความเป็นจริงแล้วค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลายเฟสจะมีความสมดุลกัน แต่ก็อาจจะเกิดกรณีที่ไม่สมดุลได้ ทั้งนี้สาเหตุมาจากอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อเพิ่มเข้ากับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเช่น เครื่องตรวจสถานะสัญญาณ เครื่องวัดต่างๆ เป็นต้น แต่สาเหตุที่สำคัญมักจะมาจากอิมพีแดนซ์ของเฟส [M.A. Cash, T.G. Habetler, and G.B. Kliman, 1998] ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบมูลฐานแล้ว

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

(fundamental) ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าอันดับหนึ่งทั้งสามเฟส ($\vec{V}_{sum}$) ในรูปของเฟสเซอร์ จะมีความสัมพันธ์เป็น

$$\vec{V}_{sum} = \vec{V}_a + \vec{V}_b + \vec{V}_c \quad (1)$$

หรือ

$$\vec{V}_{sum} = Z_a \vec{I}_a + Z_b \vec{I}_b + Z_c \vec{I}_c \quad (2)$$

สำหรับเครื่องจักรกลที่สมดุล ค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสจะเท่ากัน

$$Z_a = Z_b = Z_c \quad (3)$$

ผลรวมของกระแสทั้ง 3 เฟส ก็จะมีค่าเท่ากับ 0

$$\vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c = 0 \quad (4)$$

และจากสมการที่ (1) ถ้าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์มีค่าเป็นเชิงเส้น ก็จะหมายความว่ารวมไปถึงแรงดันไฟฟ้าอันดับหนึ่งด้วย

$$v_a(t) + v_b(t) + v_c(t) = v_{sum}(t) \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) สามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณีได้แก่ กรณีที่ 1 ถ้าไม่มีฟอลต์เนื่องจากความไม่สมดุล (unbalance fault) จะได้

$$v_{sum}(t) = 0 \quad (6)$$

กรณีที่ 2 ถ้าไม่มีฟอลต์เนื่องจากความไม่สมดุลแต่

$$v_{sum}(t) \neq 0 \quad (7)$$

นั่นหมายความว่าเกิดกรณีฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบ

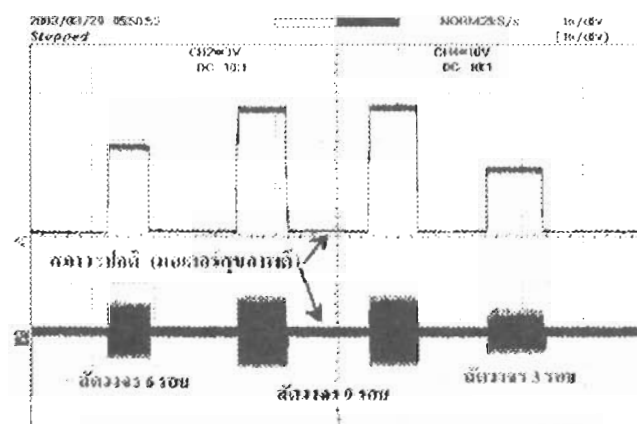
ชุดทดสอบ

ชุดทดสอบที่ออกแบบขึ้นสำหรับการตรวจจับขดลวด สเตเตอร์ลัดรอบกรณีของรอบถึงรอบแสดงดังรูปที่ 2 มอเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นชนิดกรงกระรอก มีพิกัด 2 แรงม้า การพันขดลวดเป็นแบบส้อม มีแรงดัน V_{ac} เท่ากับ $380V_{rms}$ ในการทดสอบมอเตอร์ต่อแบบวายโดยที่จุดต่อร่วมของขดลวดสเตเตอร์ (ϕ) ไม่ต่อเข้ากับสายนิวทรัลของระบบ

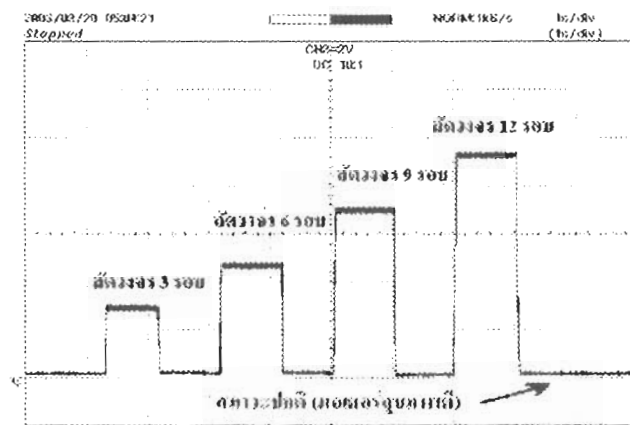
ให้เป็นสัญญาณไฟดีซีและใช้คาปาซิเตอร์ กรองสัญญาณให้เรียบอีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้เพื่อต้องการลดปัญหาของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเนื่องจากวงจรและในขณะที่มอเตอร์ทำงาน สัญญาณสุดท้ายที่ได้นี้จะเรียกเป็นสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากรอบของขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร (ลัดรอบ)

ผลการทดลอง

จากชุดทดสอบนำมาทดลองหาสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ของมอเตอร์ที่ได้แยกแบบขึ้น โดยจะได้ทดสอบที่สภาวะไร้โหลด (no-load) และที่สภาวะมีโหลดแตกต่างกันไปในแต่ละการทดลอง โดยเริ่มจากการทดลองเพื่อศึกษาสัญญาณ V_{sum} และสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์เมื่อเกิดกรณีขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร 6 รอบ 9 รอบ และ 3 รอบ โดยการสับสวิตช์ S_2 S_3 และ S_1 ให้ปิดวงจร (close circuit) และเปิดวงจร (open circuit) เป็นเวลาเพียงชั่วครู่ตามลำดับจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3 ในรูปได้แสดงสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์และสัญญาณ V_{sum} การทดลองต่อมาเพื่อดูระดับของสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ด้วยการสับสวิตช์ดังต่อไปนี้ S_1 S_2 S_3 และ S_4 (ลัดวงจร 12 รอบ) ตามลำดับเช่นเดียวกับการทดลองรูปที่ 3 ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบมากขึ้นระดับของสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์จะมีความมากขึ้นตามไปด้วย

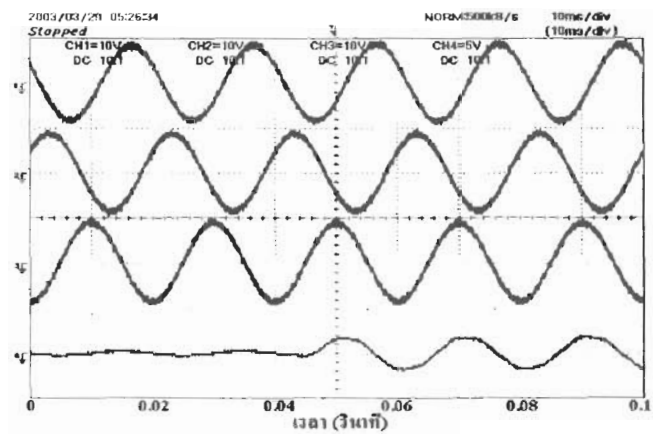


รูปที่ 3 รูปร่างของสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ (บน) และสัญญาณ V_{sum} (ล่าง)



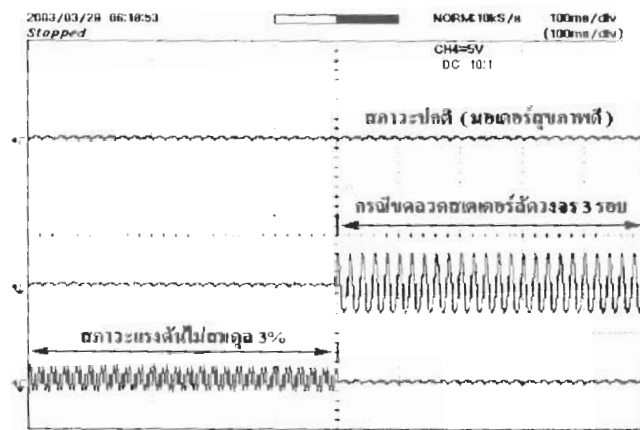
รูปที่ 4 สัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบที่รอบต่าง ๆ กัน

รูปที่ 5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าฉบับหลักทั้ง 3 เฟส (หลังจากลดระดับลงเหลือ 6 V_{rms} ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแล้ว) และรูปสัญญาณ V_{sum} เมื่อเกิดรอบของขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร (3 รอบ) ที่เวลาประมาณ 45 ms จากรูปแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสจะไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสัญญาณแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส A ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ ผลการทดลองรูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงสัญญาณ V_{sum} และสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ภายใต้สภาวะที่ต่างกันตามลำดับได้แก่ ภายใต้สภาวะการทำงานเมื่อมอเตอร์สุขภาพดี เมื่อเกิดกรณีขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร 3 รอบ และเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไม่สมดุล 3% (โดยปกติแล้วถ้าสภาวะแรงดันไม่สมดุลเกินกว่า 3% ควรให้อุปกรณ์ป้องกันทำงาน) จากรูปผลการทดลองทั้ง 2 จะเห็นว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นเนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบจะมีค่ามากกว่ากรณีของสภาวะแรงดันไม่สมดุล (เทียบภายใต้ความผิดปกติเพียงเล็กน้อยที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยไม่ได้หมายความว่าที่สภาวะลัดวงจร 3 รอบจะเทียบได้กับที่สภาวะแรงดันไม่สมดุล 3%) ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้สภาวะแรงดันไม่สมดุลจะมีผลน้อยมากต่อวงจรการตรวจจับที่ได้ออกแบบขึ้น สาเหตุหนึ่งที่เป็นเช่นนั้นเนื่องมาจากจุดร่วมของมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบไม่ได้ต่อเข้ากับจุดนิวทรัลของระบบทำให้แรงดันระหว่างไลน์กับสายนิวทรัลของระบบ (V_{an}) เมื่อเทียบกับสายไลน์กับจุดสตาร์ของมอเตอร์ (V_{ao}) มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าเท่ากันเมื่อสภาวะแรงดันสมดุลและมอเตอร์สุขภาพดี

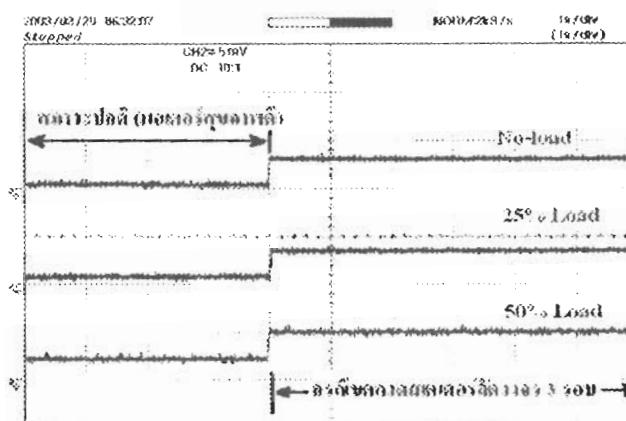


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ V_{sum} เมื่อขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบที่เวลา ~45 ms

สำหรับการทดลองเมื่อมอเตอร์มีโหลดสัญญาณ V_{sum} และสัญญาณ สเตเตอร์ฟอลต์ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 6 และรูปที่ 7 แต่ถ้าในวงจรการตรวจจับสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ดังรูปที่ 2 ไม่มีในส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะทำให้สัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ในสภาวะมอเตอร์ปกติ (มอเตอร์สุขภาพดี) มีระดับของสัญญาณเกิดขึ้นโดยเฉพาะที่พิกัดโหลดมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากกระแสเฟสที่ไหลเพิ่มมากขึ้นตามโหลดมอเตอร์ จะทำให้มีฮาร์โมนิกเกิดขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ฮาร์โมนิกที่สำคัญๆ ที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะมีสาเหตุมาจาก เช่น ความเป็นสล็อตของเครื่องจักรกล (slotting) ความเยื้องศูนย์กลางของช่องอากาศ (air gap eccentricity) เป็นต้น สาเหตุเหล่านี้จะทำให้เกิดมีสัญญาณไปปรากฏในสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ในขณะที่สภาวะปกติ (มอเตอร์สุขภาพดี) ดังผลการทดลองรูปที่ 8 ดังนั้น เพื่อป้องกันการวินิจฉัยที่ผิดพลาด ในวงจรการทดสอบ ควรประกอบไปด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และทดสอบในขณะที่มอเตอร์ไร้โหลด และควรมีอีกหนึ่งวงจรเพื่อตรวจสอบความไม่สมดุลของแรงดัน จากผลการทดลองดังกล่าว เป็นการทดสอบที่สภาวะการทำงานของมอเตอร์ไร้โหลด มีโหลด 25% และมีโหลด 50% อย่างไรก็ตามในแต่ละพิกัดโหลดที่ได้ทดลอง สัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ที่ได้ก็ยังมีขนาดเท่ากันกับในขณะที่มอเตอร์ทำงานไร้โหลด

รูปที่ 6 สัญญาณ V_{sum} ภายใต้สภาวะที่ต่างกัน

รูปที่ 7 สัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ภายใต้สภาวะที่ต่างกัน



รูปที่ 8 เมื่อเกิดการลัดวงจร 3 รอบทดลองที่สภาวะมอเตอร์มีโหลด

สรุป

เทคนิคออนไลน์สำหรับการตรวจจับขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งนี้จากการตรวจจับที่ได้ออกแบบขึ้นสามารถตรวจจับสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ที่จำนวนการลัดวงจรที่รอบต่ำๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระดับของสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของรอบขดลวดที่ลัดวงจร ทั้งนี้ การทดสอบที่สภาวะไว้โหลดจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากฮาร์มอนิกในเครื่องจักรกลน้อยที่สุด นอกจากนี้ผลของสภาวะแรงดันไม่สมดุลยังมีผลต่อการวินิจฉัยด้วย ดังนั้นเพื่อการวินิจฉัยที่ถูกต้องและแม่นยำจึงควรมีอีกรวงจรมุ่งเพื่อบอกถึงระดับของสภาวะแรงดันไม่สมดุล ซึ่งในงานวิจัยต่อไปจะได้เพิ่มในส่วนของวงจรเพื่อเป็นแพลตฟอร์มสำหรับปรับลดสัญญาณเนื่องจากความไม่สมดุลของแรงดัน และรวมไปถึงการวิจัยเมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้โอกาสและทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปี 2546

เอกสารอ้างอิง

- A.H. Bonnett, and G.C. Soukup. 1992. "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors". **IEEE Transactions on Industry Applications**. 28, 4 (July/August): 921-937.
- M.A. Cash, T.G. Habetler, and G.B. Kliman. 1998. Winsulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages". **IEEE Transactions on Industry Applications**. 3, 6 (Novr/Dec) : 1234-1239.
- P. Vas. 1993. Parameter estimation, **condition monitoring and diagnosis of electrical machines**. Oxford: clarendon Press.
- S.B. Lee, R.M. Tallam and T. G. Habetler. 2003. "A robust, on-lines turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix". **IEEE Transactions on Power electronics**. 18, 3 (May): 865-872.