

การเฝ้าตรวจสอบและป้องกันอันตรายสำหรับสุขภาพเครื่องจักรกลไฟฟ้า

เฉลิมชาติ มานพ^{1*} ศิริพร เสงเกียรติศักดิ์² และ สุพจน์ จันทร์วิวัฒน์²

บทคัดย่อ

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการผลิตและส่วนสำคัญของการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า ในบทความนี้จึงได้นำเสนอระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์เพื่อตรวจสอบและแสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้สัญญาณที่สำคัญของมอเตอร์จะถูกวัดและจัดเก็บเพื่อประมวลผลหาประเภทของฟอลต์ (Faults) โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ส่วนภาคซอฟต์แวร์ได้ออกแบบและสามารถทำการอินเตอร์เฟซได้ในลักษณะผู้ใช้แบบกราฟิก (GUI) ด้วย โปรแกรม MATLAB จากผลการทดลองระบบการป้องกันที่ได้พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าหากเกิดฟอลต์ขึ้นในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ระบบสามารถส่งข้อความเพื่อการแจ้งเตือนออกที่หน้าจอและหยุดการทำงานของมอเตอร์ได้ ซึ่งการทดสอบนี้ประสบความสำเร็จในการตรวจจับฟอลต์และการป้องกันมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : มอเตอร์เหนี่ยวนำ, การเฝ้าตรวจสอบสถานะ, การป้องกัน, โครงข่ายประสาทเทียม, การบำรุงรักษา

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: kmchaler@kmitl.ac.th รับเมื่อ 23 สิงหาคม 2556 ตอรับเมื่อ 29 เมษายน 2557

Intelligent Condition Monitoring and Protection for Electrical Machine Health

Chalermchat Manop^{1*} Siriporn Hengkiatisak² and Suphot Chunwiphat²

Abstract

Electric motors used in industry are an important part of production process and concerning about energy conserving. In this paper, we present a condition monitoring system for industrial electric motors. The system has been designed to monitor and to display operating conditions of the running motor in order to keep the machine operated efficiently. Significant signals of motor are measured, recorded and then processed to find out any kind of faults using artificial neural network. The software is designed and implemented with graphical user interface (GUI) in MATLAB program for interfacing with on-line data acquisition (DAQ) card. Experimental results show that the computer-based protection method developed, if any fault was observed during any online operation of the motor, a warning message appeared on the PC's monitor screen, and then, the motor was stopped. The test was successful in detecting the faults and protection of motor.

Keywords : Induction motor, condition monitoring, protection, artificial neural network , maintenance

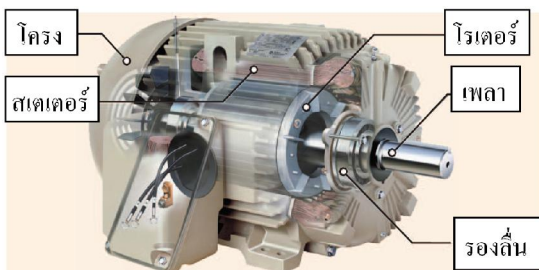
¹ School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

² Department of Electronic Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

* Corresponding author, E-mail: kmchaler@kmitl.ac.th Received 23 August 2013, Accepted 29 April 2014

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) ถูกนำมาใช้งานในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ซึ่งการประยุกต์ใช้เหล่านี้จะสังเกตเห็นได้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ นำมาใช้ในพัดลม (Fan) เครื่องเป่า (Blower) สายพาน (Conveyor) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) เครน (Crane) ปั๊ม (Pump) เครื่องหั่น (Shredder) งานกลั่น (Refiner) ชิลเลอร์ (Chiller) เป็นต้น และถึงแม้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำโดยเฉพาะที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก (Squirrel-cage rotor) ที่แสดงในรูปที่ 1 จะมีความแข็งแรงสูงก็ตาม แต่ก็ยังพบอัตราความล้มเหลว (Failure rate) ได้บ่อยครั้งที่เกิดขึ้นกับส่วนต่างๆ ของมอเตอร์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมหนัก เช่น ปูนซีเมนต์ (Cement) เหมืองแร่ (Mining) กระดาษ (Paper) พบว่าอัตราความล้มเหลวของมอเตอร์ยังมีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าใช้จ่ายจากความล้มเหลวของมอเตอร์ถือเป็นต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการที่ต้องซ่อมบำรุง (Repair) หรือการเปลี่ยน (Replacement) การกำจัด (Removal) รวมถึงการติดตั้ง (Installation) และการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากระบวนการผลิตอีกด้วย [1-2]



รูปที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีโรเตอร์หล่อขึ้นเป็นแบบกรงกระรอก

จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ (Motor condition monitoring) ได้ถูกเลือกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะสามารถทำให้กระบวนการผลิตที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ตาม แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ที่สำคัญได้แก่ ความเค้น (Stress) ที่มีส่วนประกอบของมอเตอร์เองเป็นจุดอ่อนที่อาจทำให้เกิดความเสียหายและหยุดทำงานได้ การเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์จึงถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าที่กำลังทำงานอยู่ ซึ่งเป็นการพัฒนาความน่าเชื่อถือและการคงสภาพของมอเตอร์ไว้เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายทางด้านธุรกิจที่ร้ายแรงที่มีสาเหตุมาจากความเสียหายของมอเตอร์ ที่มักจะเกิดขึ้น โดยไม่ได้คาดคิดไว้มาก่อนได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ให้สามารถทำการตรวจจับพอลต์ และป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์ พร้อมทั้งแสดงผลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต นอกจากนี้แล้วยังเป็นการพัฒนาแบบพึ่งตนเอง ลดการนำเข้าจากต่างประเทศอีกด้วย

2. ระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ระบบเฝ้าติดตามสถานะการทำงาน และการป้องกันเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นของคณะผู้วิจัยนี้สามารถทำการวัดและติดตามการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า พร้อมทั้งสามารถจัดเก็บข้อมูลไว้ในลักษณะฐานข้อมูล รวมถึงการแสดงผลที่ได้ออกมาในรูปแบบของกราฟเพื่อให้ทราบถึงปริมาณต่างๆ ที่ได้ใช้ไปในแต่ละวัน ทั้งนี้ระบบดังกล่าวได้แบ่งออกเป็น

ระบบฮาร์ดแวร์ (Hardware) ซอฟต์แวร์ (Software) และ ส่วนประกอบอื่นที่สำคัญดังต่อไปนี้

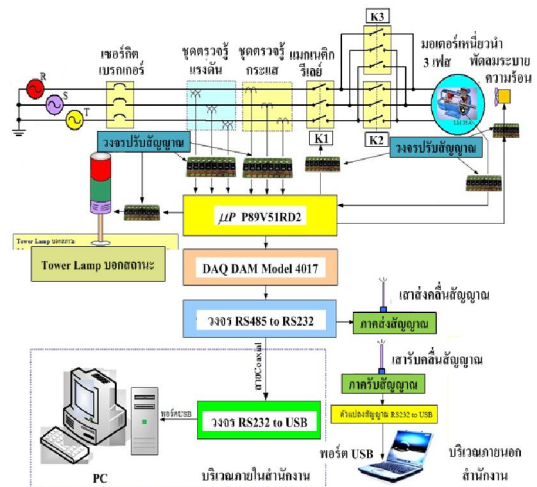
2.1 แนะนำเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

ส่วนประกอบหนึ่ง ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน ร่วมกับระบบตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ คือการสื่อสารแบบไร้สายและการผสมผสานกันทาง อิเล็กทรอนิกส์ สิ่งต่างๆ เหล่านี้ได้ทำให้เกิดเป็น เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks, WSN) ขึ้นมา คุณลักษณะที่ถือเป็นเอกลักษณ์ของ WSN มีหลายอย่าง เช่น การปรับตัวเข้ากับสภาวะแวดล้อม ความถูกต้องที่แม่นยำสูง การจัดระบบตัวอุปกรณ์เอง ความสามารถที่ชาญฉลาด ราคาต่ำ โดยความรุดหน้า อย่างรวดเร็วต่างๆ เหล่านี้ได้ทำให้ WSN มีโครงสร้างที่ ดีสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกันสำหรับ ประเมินการใช้พลังงาน และตรวจสอบสถานะการ ทำงานของเครื่องจักร [3-5]

ระบบแบบเดิมของการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ใน โรงงานถูกทำให้เกิดขึ้นมา โดยจะอยู่ในรูประบบการ สื่อสารผ่านสายอันเกิดมาจากสายเคเบิลสื่อสาร และ เซ็นเซอร์ที่มีหลากหลายประเภท โดยปรกติค่าใช้จ่าย ของการติดตั้งและการดูแลรักษาของสายเคเบิลเหล่านี้ จะสูงมากกว่าราคาของชุดเซ็นเซอร์เองซะอีก แต่ด้วย ความก้าวหน้าของอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กระดับไมโคร (Micro-electromechanical) และการสื่อสารแบบไร้สายใน ปัจจุบัน ได้ก่อให้เกิดการใช้งานที่มีราคาถูก ใช้ กำลังไฟฟ้าน้อย รูปแบบการใช้งานที่มากมายของ เซ็นเซอร์ และอุปกรณ์ควบคุม และการเข้ามาของ เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ดำเนินการควบคุมจำนวนมากนั้น เป็นผลมาจากการพัฒนาระบบเครือข่ายแบบไร้สาย ดังกล่าว ที่สำคัญเช่นการร่วมกันทำงานของการประเมิน

การใช้พลังงานและการเฝ้าตรวจสอบสถานะการทำงาน ของมอเตอร์ นอกจากนี้แล้วยังก่อให้เกิดระบบการจัด การพลังงานที่ชาญฉลาดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมที่ ได้มีการนำระบบนี้เข้าไปใช้อีกด้วย

ระบบเครือข่ายไร้สายที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นในระบบ WSN นั้นได้ตั้งเป้าหมายเพื่อที่จะทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง ให้ต่ำ และจะต้องใช้พลังงานที่ต่ำเป็นประการแรก ส่วน อัตราการส่งข้อมูลและความเชื่อถือได้ในระบบนั้นจะ ถูกพิจารณารองลงมา เมื่อความต้องการที่จะทำให้ระบบ WSN นั้นมีราคาที่ไม่สูงมากนักเพื่อใช้สำหรับการ ตรวจสอบและการควบคุมการทำงานที่จำเป็นลงลงมา ในที่นี้พักอาศัย การค้า และการใช้งานด้านอุตสาหกรรม ได้ก่อให้เกิดเครือข่ายไร้สายในพื้นที่ส่วนบุคคล (LR-WPANS) ซึ่งต่อมาได้กลายมาเป็นมาตรฐาน IEEE 802.15.4 คุณสมบัติเด่นๆ ของ LR-WPANS/IEEE 802.15.4 มีหลายอย่าง เช่น ความสามารถการปรับตัวเข้ากับ สภาวะต่าง ความชาญฉลาด ความจำกัดความ ผิดพลาด ความถูกต้องในการตรวจจับ เป็นต้น

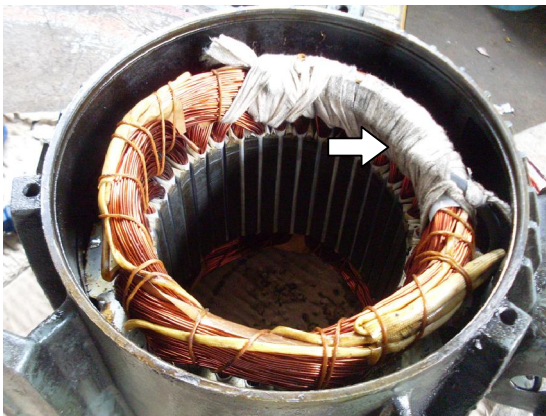


รูปที่ 2 ฮาร์ดแวร์ของระบบเฝ้าติดตามสถานะการทำงาน และการป้องกันฟอลต์เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้น

2.2 ฮาร์ดแวร์ของระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์

ในการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ของระบบเฝ้าติดตามสถานะการทำงานและการป้องกันเครื่องจักรกลไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 2 มีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

ก. ส่วนตรวจจับสัญญาณ ใช้สำหรับเพื่อการตรวจรู้ปริมาณของสัญญาณภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ได้แก่ หม้อแปลงกระแสเพื่อการตรวจรู้ปริมาณกระแสที่ไหลเข้าเครื่องจักรกลไฟฟ้า หม้อแปลงแรงดันสำหรับการตรวจรู้ปริมาณแรงดันในแต่ละเฟส และใช้อิซี LM35A สำหรับการตรวจรู้ค่าอุณหภูมิที่ลวดตัวนำของเครื่องจักรกลไฟฟ้า รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งอิซี LM35A ที่ติดตั้งอยู่กับลวดตัวนำสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ติดตั้งอิซี LM35A เพื่อการตรวจรู้ค่าของอุณหภูมิของลวดตัวนำสเตเตอร์ (สรชี้)

ข. ส่วนประมวลผลสัญญาณ ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเมื่อประมวลผลแล้วพบความผิดปกติ (External faults) จะแสดงผลออกหน้าจอ หรือสั่งให้มอเตอร์พัลลัมทำการระบายความร้อน กรณีลวดตัวนำสเตเตอร์มีอุณหภูมิที่เกินกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้

ค. ส่วนแสดงผลออกหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยสัญญาณที่ออกจากส่วนประมวลผลจะถูกส่งไปยังส่วนแสดงผลโดยผ่านเสาส่งคลื่นสัญญาณแบบไร้สาย (Wireless) ไปยังตัวเสารับคลื่นสัญญาณที่ถูกติดตั้งอยู่ที่ส่วนแสดงผล

ในส่วนของการแสดงผลนั้นจะสามารถเฝ้าติดตามสถานะเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้ โดยผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ซึ่งในความเป็นจริงแล้วข้อมูลที่จะถูกติดตั้งอยู่ห่างจากตัวเครื่องจักร ทั้งนี้ ในส่วนของผู้ปฏิบัติงานก็จะสามารถเห็นค่าสัญญาณได้เช่นเดียวกัน โดยอาจจะทำเป็นชุดแสดงผลเล็กๆ เท่าที่จำเป็น ติดตั้งไว้ในส่วนของชุดรับสัญญาณติดอยู่กับชุดเครื่องจักร ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าของสัญญาณที่จำเป็นต้องแสดงให้ทราบ ได้แก่ ค่าของสัญญาณแรงดันและกระแสในแต่ละเฟส ค่าอุณหภูมิภายในของเครื่องจักรกลไฟฟ้า และค่าอัตราของเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส เป็นต้น

3. เทคโนโลยีการตรวจจับและวินิจฉัยฟอลต์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

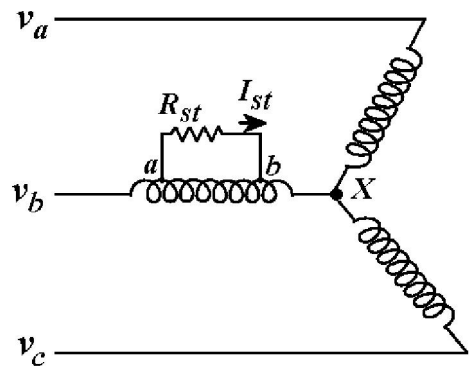
การค้นหาฟอลต์และวินิจฉัยในบทความนี้ได้แบ่งแยกฟอลต์ของมอเตอร์ออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ฟอลต์ภายนอก (External fault) ซึ่งมีสาเหตุมาจากปัญหาของแหล่งจ่ายไฟ และฟอลต์ภายใน (Internal fault) ซึ่งมีสาเหตุมาจากปัญหาของมอเตอร์เอง โดยในการวิจัยนี้ได้เน้นการตรวจจับฟอลต์ภายในที่เกิดขึ้นจากความล้มเหลว (Failure) ของตัวนำ สเตเตอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์การเกิดขึ้นสูงจากปัญหาการล้มเหลวของมอเตอร์ด้วยสาเหตุต่างๆ

3.1 การตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ด้วยเทคนิค MCSA

เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor current signature analysis, MCSA) เป็นเทคนิคหนึ่งในหลายวิธีที่สามารถทำการวินิจฉัยฟอลต์มอเตอร์ได้เป็นอย่างดีและเป็นที่ยอมรับมาประยุกต์ใช้งานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและเป็นเทคนิคที่ง่ายไม่ซับซ้อน โดยหลักการตรวจจับฟอลต์ของวิธีการนี้อยู่บนพื้นฐานการตรวจจับสเปกตรัมฟอลต์ที่มีสาเหตุมาจากความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์ ซึ่งจะเกิดขึ้นปะปนรวมอยู่ในสัญญาณกระแสสเตเตอร์ อย่างไรก็ตามการค้นหาและตรวจจับสเปกตรัมฟอลต์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีนั้นจำเป็นต้องใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเข้ามาช่วยด้วย

โดยผลที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบจะส่งผลให้ MMFs มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและทำให้ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance) ระหว่างเฟสมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในและผลของความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างรอบขดลวดจะมีค่าเท่ากันในแต่ละขดขดลวดและเป็นสัดส่วนกันในแต่ละชั้นลวดตัวนำ ซึ่งก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (Impedance) มีความสมดุลกัน แต่ถ้าเกิดสภาวะรอบขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจรขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำร่วมและของมันเองมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างเฟสที่ไม่สมดุล และด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตำแหน่งของการลัดรอบ [6] นอกจากนี้แล้วสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นจะมีเฟสใหม่โดยในที่นี้จะเรียกเป็นเฟส f_{st} และเมื่อขดลวดสเตเตอร์ต่อเป็นแบบวาย (Star) และไม่ได้ต่อ

สายนิวตรอลระหว่างแหล่งจ่ายกับจุดนิวตรอลของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สมการแรงดันสำหรับขดลวดสเตเตอร์ใน 1 เฟสแสดงในสมการที่ (1)-(2) ทั้งนี้หากเครื่องจักรกลไฟฟ้าไม่สมมาตร (Asymmetric) เมตริกอินดักแตนซ์ (Inductance) ซึ่งแสดงในสมการที่ (3) สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 องค์ประกอบ [7] แสดงในสมการที่ (4) โดยเทอมแรกคือส่วนสมดุลของเมตริกอินดักแตนซ์สเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่พิจารณาจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความสมดุลและในเทอมที่ 2 จะเป็นส่วนความไม่สมมาตรของเมตริกอินดักแตนซ์สเตเตอร์ที่มีสาเหตุมาจากการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ ในรูปที่ 4 แสดงลักษณะการลัดวงจรในตัวนำสเตเตอร์ดังกล่าว



รูปที่ 4 ลักษณะการลัดวงจรในตัวนำสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบรอบถึงรอบสำหรับนำมาวิเคราะห์

$$|v_{xx}| = |R_x| |I_x| + \frac{d|\Psi_x|}{dt} + v_{on} \quad (1)$$

$$|\Psi_x| = |L_{ABC}| |I_x| \quad (2)$$

$$L_{ABC} = L_{constant} + L_{varying} \quad (3)$$

$$L_{ABC} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & M & M \\ M & L_{ls} + L_{ms} & M \\ M & M & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta L_1 \cos(\varphi_0) & M & M \\ M & L_{cs} + L_{ms} & M \\ M & M & L_{cs} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (4)$$

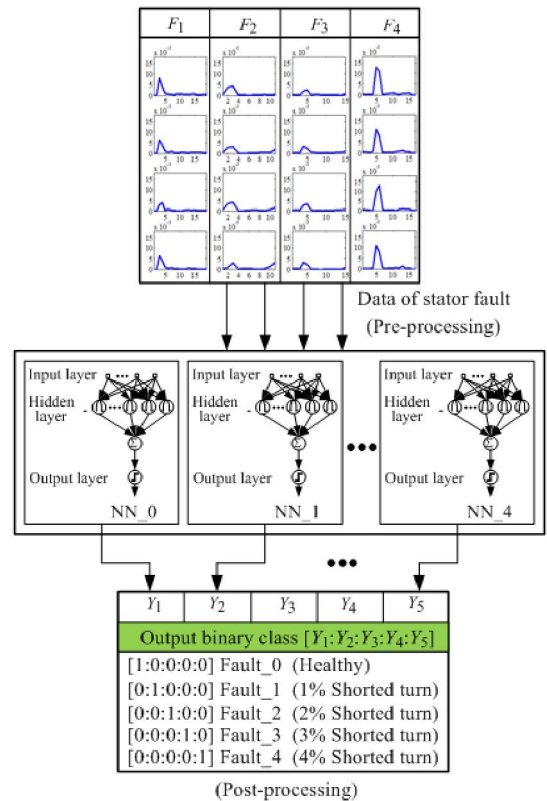
เมื่อ x คือเฟส A, B หรือ C, X คือจุดต่อสายของมอเตอร์, L_{ls} คืออินดักแตนซ์รั่วไหล, L_{ms} คืออินดักแตนซ์เหนี่ยวนำ, และ M คือ $L_{ms}/2$ ทั้งนี้ฟลักซ์สืบเนื่อง Ψ_x ใน (5) จะสัมพันธ์กับกระแสในแต่ละเฟส รวมถึงเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นด้วย ขนาดของแรงดันเหนี่ยวนำสเตเตอร์ลัดรอบ (e_{st}) ที่เกิดขึ้นในสัญญาณกระแสสเตเตอร์ที่มีสาเหตุมาจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบสามารถหาได้จาก

$$e_{st} = -\frac{d\Psi_{st}}{dt} \quad (5)$$

จากสมการแรงดันของฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งถ้านำมาหารด้วย R_{st} จะได้เป็น I_{st} แสดงในรูปที่ 4 และถ้าจำนวนของการลัดรอบมากขึ้นจะทำให้ e_{st} มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย ทางด้านพฤติกรรมขององค์ประกอบความถี่ในรูปแบบคลื่นฟลักซ์ช่องอากาศในฟังก์ชันของการลัดรอบจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่มูลฐาน (f_1) จำนวนขั้วแม่เหล็ก (p) และสลิป (s) ดังสมการ

$$f_{st} = f_1 \left\{ \frac{m}{p} (1-s) \pm k \right\} \quad (6)$$

เมื่อ f_{st} คือความถี่ของฟอลต์สเตเตอร์, m คือ 1, 2, 3, ... และ k คือ 1, 3, 5, ... [8] สเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์นี้ จะเกิดขึ้นรวมอยู่ในหลายสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์ แต่อาจจะมีขนาดที่แตกต่างกันได้ตามพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงการรวมอยู่ในสัญญาณกระแสสเตเตอร์ด้วย [9-10]



รูปที่ 5 ขั้นตอนการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

3.2 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมและการประยุกต์ใช้

โครงข่ายประสาทเทียมคือระบบการคำนวณที่สร้างเลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์เพื่อใช้

ประโยชน์ในการคาดคะเนเหตุการณ์จากข้อมูลที่มีอยู่ ประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neural) ซึ่งจำลองมาจากการทำงานของระบบสมองมนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function, f) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight, w) และค่าไบแอส (Bias, b) เป็นเครื่องมือจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาท โดยที่เซลล์ประสาทหลายๆ ตัวจะถูกเชื่อมต่อกันทำให้เกิดเป็นลักษณะของโครงข่ายเป็นชั้นๆ หรือที่เรียกว่า ชั้น (Layer) ซึ่งเซลล์ประสาทแต่ละตัวที่อยู่ในชั้นเดียวกันจะไม่มีการเชื่อมต่อถึงกัน [11]

อัลกอริทึมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายคลาสที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากการแยกแยะด้วยโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละไบนารีมารวมกัน ซึ่งสามารถนำมาทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยความรุนแรงที่ต่างกัน 5 สภาวะได้แก่ สภาวะมอเตอร์สุขภาพดี ตัวนำสเตเตอร์ลัดรอบ 1%, 2%, 3% และ 4% ตามลำดับ โดยจะเป็นการเปรียบเทียบคลาสต่อคลาสด้วยผลของเอาต์พุตที่แตกต่างกัน ในแต่ละโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกสอนด้วย 1 ชุดข้อมูลของสภาวะมอเตอร์ที่มีสุขภาพดี (Healthy motor condition) และอีก 4 โมเดลถูกสอนด้วยชุดข้อมูลของฟอลต์สเตเตอร์ (Stator fault condition) สรุปแล้วโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ออกแบบขึ้นมี 5 อินพุตคือ

$$Input = [i_{st_1}, i_{st_2}, i_{st_3}, i_{st_4}]_{1 \times 5} \quad (7)$$

เมื่อ i_{st_1-4} คือขนาดของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ในสมการ (6) ที่ตำแหน่ง $m:k$ ดังนี้ 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 ซึ่งถูกกำหนดเป็น F_1, F_2, F_3 และ F_4 ตามลำดับ ในส่วนของ

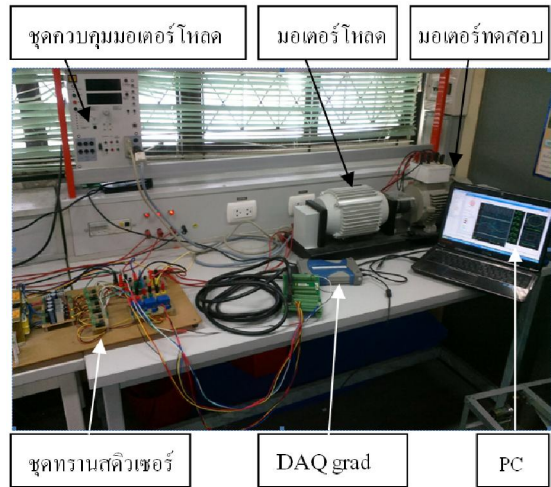
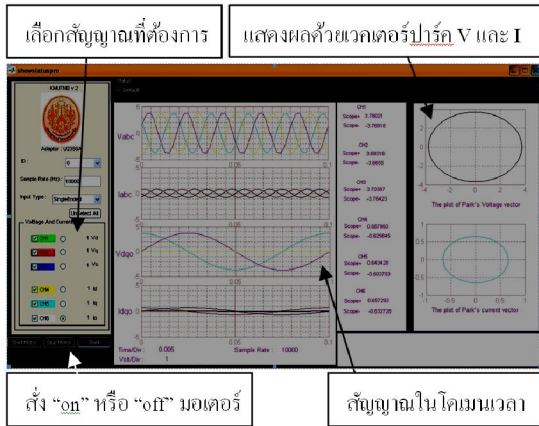
เอาต์พุตหรือเมตริกมุ่งหมายกำหนดให้มีมิติเป็น 1 แถว ชุดข้อมูลเอาต์พุต ซึ่งมีด้วยกัน 5 คอลัมน์คือ $[Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5]_{1 \times 5}$ ทั้งนี้จุดมุ่งหมายเอาต์พุตระหว่าง 0 และ 1 จะสอดคล้องกับผลการแยกแยะฟอลต์ที่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi Layer Neural Networks) โดยในส่วนของการฝึกสอนจะใช้อัลกอริทึมแบ็คพรอพาคชัน (Back Propagation) และใช้ฟังก์ชันแอคติเวชัน (Activation Function) ชนิดซิกมอยด์ (Sigmoid) เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของความน่าจะเป็นซึ่งใช้ทำนายระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์

ข้อมูลของฟอลต์สเตเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกนำมาสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งใช้ 50-60 ชุดข้อมูลต่อคลาสสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการสอน ทั้งนี้อัลกอริทึมการแยกแยะด้วยโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอนี้ ได้สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB

4. ผลการทดลอง

การออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับการแสดงผลการฝ้าตรวจนั้นสามารถแสดงค่าปริมาณของสัญญาณที่ทำการตรวจวัดได้ตลอดเวลา ซึ่งการแสดงผลออกที่หน้าจอคอมพิวเตอร์นี้จะสามารถมองเห็นในลักษณะของกราฟทำให้สามารถทราบได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ทำการวัดเปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาใด โดยมีรายละเอียดรูปแบบการแสดงผลในรูปที่ 6 โดยผลการฝ้าตรวจสภาวะมอเตอร์ที่ได้นี้ แสดงสภาวะไม่พบฟอลต์ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผลการแปลงเวกเตอร์พาร์ค (Park's vector) [12] ที่มีลักษณะการโคจรเป็นวงกลมหมายความว่าทั้งแหล่งจ่ายแรงดันและกระแส 3 เฟสมี

ความสมดุล (No fault) ทั้งนี้รูปจริงของระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะและป้องกันมอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นทั้งหมดแสดงในรูปที่ 7

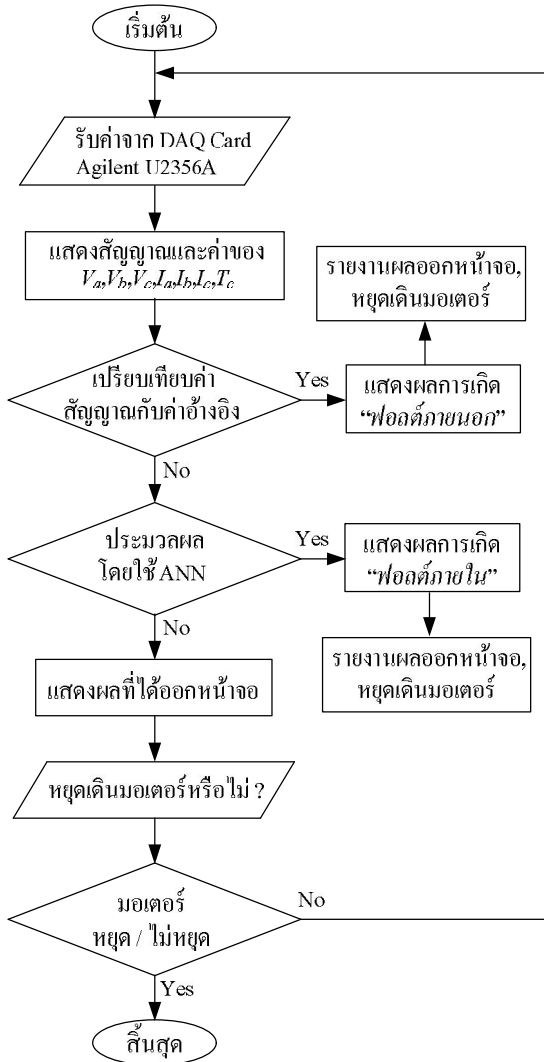


รูปที่ 7 ส่วนประกอบของระบบการเฝ้าตรวจสอบสถานะและป้องกันมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 6 หน้าจอแสดงผลการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น เมื่อช่วงที่แสดงผลเวกเตอร์ปาร์กแรงดัน = ±4 และเวกเตอร์ปาร์กกระแส = ±1

จากการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งมักเกิดขึ้นได้บ่อยครั้งกับมอเตอร์ในอุตสาหกรรม คือ ความเสียหายที่เกิดจากปัญหาภายในของมอเตอร์เอง (Internal fault) และปัญหาจากแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสซึ่งพิจารณาได้เป็นฟอลต์จากภายนอก (External faults) ที่มีจะเกิดขึ้นในลักษณะของไฟดับหรือขาดหายไปบางเฟส เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายแก่ทางผู้ประกอบการเป็นอย่างมาก ที่สำคัญคือเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นบ่อยครั้งจะเป็นสาเหตุทำให้มอเตอร์ล้มเหลวได้ จำเป็นต้องนำมอเตอร์ไปซ่อมแซม ซึ่งผลสำคัญที่ตามมาคือทำให้เกิดความล่าช้าในการส่งสินค้า และถ้าเกินกำหนดเวลาก็จะทำให้เสียค่าปรับต้นทุนของสินค้าเพิ่มขึ้น ที่สำคัญคือส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของลูกค้าอีกด้วย

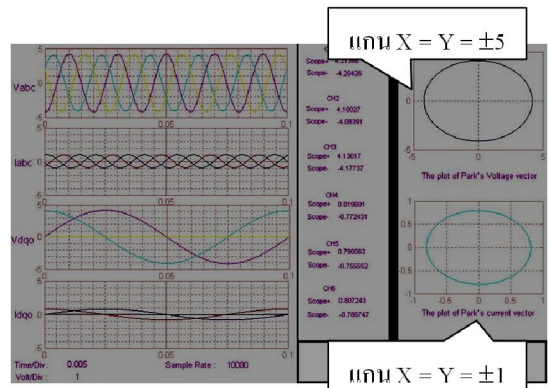
จากปัญหาที่กล่าวมา ระบบเฝ้าตรวจสอบสถานะและป้องกันมอเตอร์ ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จึงสามารถป้องกันฟอลต์ที่เกิดขึ้นได้แก่ กรณีแหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสไม่ปรากฏ แหล่งจ่ายไฟเฉพาะเฟส A, B หรือ C ไม่ปรากฏ เฟส A, B หรือ C ลัดวงจรลงกราวด์ เฟส A, B หรือ C ลัดวงจรถึงกัน สถานะแรงดันหรือกระแสเฟส A, B หรือ C มีระดับสูงและต่ำกว่าปกติ สถานะแรงดันไม่สมดุลสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ และอุณหภูมิ (T_c) มอเตอร์สูงเกินกว่าค่าปกติ จากที่กล่าวมานี้จะพิจารณาเป็นฟอลต์ภายนอก ทั้งนี้ฟอลต์ภายนอกจะถูกทำการค้นหาและตรวจจับก่อนฟอลต์ภายใน ในลักษณะของ If-Then กล่าวคือได้มีการกำหนดค่าไว้สำหรับการเปรียบเทียบ ซึ่งถ้ามีการตรวจพบฟอลต์ภายนอก ซอฟต์แวร์จะทำการแสดงผลออกหน้าจอ พร้อมทั้งรอรับสัญญาณเพื่อหยุดการทำงานของมอเตอร์ ดังโฟลว์ชาร์ต (Flowchart) การทำงานของซอฟต์แวร์ประมวลผลแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 โพลีชาร์ตการทำงานของซอฟต์แวร์ของระบบเฟ้าตรวจสถานะและป้องกันมอเตอร์อัจฉริยะที่ได้พัฒนาขึ้น

การทดลองการเกิดฟอลต์ภายนอกได้จำลองโดยใช้การปรับจากหม้อแปลง 1 เฟส จำนวน 3 ชุด จ่ายให้กับมอเตอร์เพื่อการทดสอบ ได้แก่ กรณีการเกิดขึ้นของฟอลต์ภายนอกที่เกิดจากกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 3% แสดงผลการทดลองในรูปที่ 9 โดย

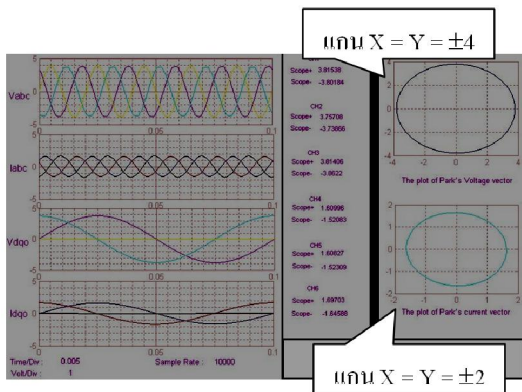
สามารถแสดงผลการเฟ้าตรวจได้อย่างถูกต้อง โดยการพิจารณาจากรูปของการแปลงเวกเตอร์ปาร์ก ซึ่งพบว่าวงโคจรของเวกเตอร์ปาร์กจะกว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีสภาวะมอเตอร์มีสุขภาพดีในผลการเฟ้าตรวจรูปที่ 6 การทดลองอีกกรณีหนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบที่ได้พัฒนาขึ้น ได้แก่กรณีฟอลต์เนื่องจากมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดเกิน (Over load) แสดงผลการเฟ้าตรวจสถานะในรูปที่ 10 โดยพบว่าวงโคจรของเวกเตอร์ปาร์กจะแฉะกว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีสภาวะมอเตอร์มีสุขภาพดี ทั้งนี้การปลดวงจรของมอเตอร์ออกจากแหล่งจ่ายไฟ สามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนในผลการทดลองรูปที่ 11 ที่มีสาเหตุมาจากกรณีเกิดสภาวะแรงดันไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 6%



รูปที่ 9 หน้าจอแสดงผลของระบบเฟ้าตรวจฟอลต์พบว่าเกิดสภาวะแรงดันไม่สมดุลสูงกว่าปกติ 3%

การทดลองต่อมาเป็นการตรวจพบฟอลต์ภายในกรณีตัวนำสเตเตอร์ลัดรอบ 4% โดยสามารถทำการปลดแหล่งจ่ายไฟออกพร้อมทั้งแสดงผลการวินิจฉัยออกหน้าจอได้อย่างถูกต้องแสดงผลการปลดวงจรในรูปที่ 12 ทั้งนี้หลังจากปลดแหล่งจ่ายไฟออกไปแล้ว แต่ค่าสัญญาณแรงดันยังคงปรากฏอยู่ เนื่องจากตำแหน่ง

ทรานส์ฟิวดอร์แรงดันถูกติดตั้งไว้ที่หน้าแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor) ดังนั้นหลังจากปลดมอเตอร์ออกแล้ว (หยุดจ่ายไฟแล้ว) ระบบยังคงรับข้อมูลสัญญาณแรงดันจากแหล่งจ่ายมาวินิจฉัยได้ตลอดเวลาทั้งนี้เพื่อป้องกันฟอลต์ภายนอกที่สำคัญคือปัญหาของแหล่งจ่ายไฟนั่นเอง



รูปที่ 10 หน้าจอแสดงผลของระบบเฝ้าตรวจฟอลต์พบว่าเกิดสถานะมอเตอร์มีโหลดเกิน

5. สรุปผล

จากการทดลองการใช้งานระบบเฝ้าตรวจสถานะและป้องกันมอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถเฝ้าตรวจสถานะและแจ้งเตือนเมื่อเกิดมีฟอลต์ประเภทต่างๆได้อย่างถูกต้อง โดยสามารถเฝ้าตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์ได้ตลอดเวลาที่กระบวนการผลิตดำเนินการอยู่และนำไปสู่การป้องกันมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์และวินิจฉัยความล้มเหลวของมอเตอร์ได้ต่อไปอีกด้วย ทั้งนี้ในด้านของการสื่อสารข้อมูลยังสามารถทำการรับ-ส่งได้ทั้งแบบผ่านสายและในแบบไร้สาย นอกจากนี้การประยุกต์ใช้งานที่เพิ่มขึ้นในปัจจุบันซึ่งกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก คือการแสดงผลสถานะการใช้พลังงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เพื่อการบริหาร

จัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 11 หน้าจอแสดงการทำงานของมอเตอร์ และหยุดการทำงานเมื่อตรวจพบความผิดปกติจากฟอลต์ภายนอกด้วยสถานะแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสมีค่าสูงกว่าปกติ 6 %PVUR



รูปที่ 12 หน้าจอแสดงการทำงานของมอเตอร์ และหยุดการทำงานเมื่อตรวจพบความผิดปกติจากฟอลต์ภายในด้วยสถานะตัวนำเตเตอร์ลัดรอบ 4%

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ด้วยทุนงบประมาณ ประจำปี 2554 และขอขอบคุณนายวิริยะ นิมอ่อง นายสิทธิพงษ์ ไชยจิตร และนายฉัตรวัฒน์ มุลรัตน์ ไชย นักศึกษาภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ช่วยในการทดลองครั้งนี้ด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu, and T. G. Habetler, "A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems," *IEEE Trans. Industrial Electronics* 55 (12), 2008, pp. 4127-4136.
- [2] J. Vico and R. Hunt, "Principles in motor protection," *IEEE Industry applications magazine*, 2011, pp. 52-61.
- [3] B. Lu, L. Wu, T. G. Habetler, R. G. Harley and J. A. Gutierrez, "On the application of wireless sensor networks in condition monitoring and energy usage evaluation for electric machines," *31st Industrial Electronics Society Conference (IECON 2005)*, 2005, pp. 2674-26796.
- [4] L. Hou and N. W. Bergmann, "Novel industrial wireless sensor networks for machine condition monitoring and fault diagnosis," *IEEE Instrumentation and measurement* 61 (10), 2012, pp. 2787-2798.
- [5] N. Tangtong, "Electrical control via RF wireless module," *The Journal of Industrial Technology* 6 (1), 2010, pp. 33-37. (in Thai)
- [6] H. W. Penrose and J. Jette, "Static motor circuit analysis: an introduction to theory and application," *IEEE Electrical Insulation Magazine* 16 (4), 2000, pp. 6-10.
- [7] P. Garcia, F. Briz, M. W. Degner and A. B. Diez, "Diagnostics of induction machines using the zero sequence voltage," *IEEE-IAS Annu. Meeting*, 2004, pp. 735-742.
- [8] S. Nandi, H. A. Toliyat and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review," *IEEE Trans. Energy Conversion* 20 (4), 2005, pp.719-729.
- [9] A. M. Knight and S. P. Bertani, "Mechanical fault detection in a medium-sized induction motor using stator current monitoring," *IEEE Trans. Energy Conversion* 20 (4), 2005, pp. 753-760.
- [10] J. Thummaprasit, C. Manop, C. Tangsiriworakul, and S. Tadsuan "A diagnosis of stator winding short turns in induction motors using MCSA," *Electrical Engineering Conference (EECON-27)*, Khon Kaen University 11-12, 2004, pp. 101-104. (in Thai)

- [11] B. Li, M. Y. Chow, Y. Tipsuwan and J. C. Hung, “Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis,” *IEEE Trans. Industrial Electronics* 47 (5), 2000, pp.1060-1069.
- [12] J. M. Cardoso, S. M. A. Cruz and D. S. B. Fonseca, “Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by park's vector approach,” *IEEE Trans. Energy Conversion* 14 (3), 1999, pp.595-598.