

การวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำบนพื้นฐานการแยกแยะด้วย SVM Stator Fault Diagnosis in Induction Motors Based on SVM Classification

ชาณุวิทย์ ตั้งสิริวรกุล^{1*} และ เฉลิมชาติ มานพ²
Chanwit Tangsiriworakul^{1*} and Chalermchat Manop²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ SVM (Support Vector Machine) เทคนิคที่นำเสนออยู่บนพื้นฐานการวิเคราะห์องค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ร่วมกับสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ในกระแสสเตเตอร์ ซึ่งการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ได้ใช้การแปลงฟูเรียร์เร็วร่วมกับตัวกรองวินโดว์เพื่อลดการรั่วไหลของสเปกตรัม ข้อมูลขององค์ประกอบแรงดัน $d, q, 0$ และสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ 4 อันดับจะถูกนำมาสอนให้กับ SVM โดยผลการทดลองโมเดลที่นำเสนอสามารถทำการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ได้อย่างแม่นยำด้วยความถูกต้องสูงมาก

คำสำคัญ: การแยกแยะ การวินิจฉัย ฟอลต์สเตเตอร์ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ซัพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีน

Abstract

This paper presents a technique for the classification and diagnosis of stator winding shorted turns in three phase induction motors using the

support vector machine (SVM). This technique is based on the analysis of $dq0$ voltage components and stator fault spectrums in the stator current. In the frequency domain, the fast Fourier transform and window filter technique are proposed in order to reduce spectrum leakage. The prepared $d, q, 0$ voltage components and four spectrums of stator fault were used as the features for training the SVM. The experimental results show that the proposed model diagnosed the stator faults with very high accuracy.

Keywords: Classification, Diagnosis, Stator Fault, Induction Motor, Support Vector Machine

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) ได้ถูกนำมาใช้งานมากที่สุดในหลายการประยุกต์ใช้ ทั้งนี้เนื่องจากมีความไว้วางใจได้สูง มีความแข็งแรงทนทาน ค่าการบำรุงรักษาต่ำ ราคาถูก มีความเชื่อถือได้ในการทำงานที่สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การทำนายความล้มเหลว

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

* Corresponding Author, Tel. 0-2913-2500 Ext. 6322, E-mail: cwtk@kmutnb.ac.th.

(Failure) ที่เกิดขึ้นกับส่วนประกอบต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำประเภทนี้ กำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายๆ ท่าน เนื่องจากสามารถทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาลงได้ รวมถึงความเสียหายจากกระบวนการผลิตที่ต้องหยุดชะงักไปอีกด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เน้นเฉพาะทางด้านเทคนิคสำหรับการตรวจจับฟอลต์ เช่น ฟอลต์ที่เกิดจากปัญหาของขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding) ฟอลต์ที่เกิดจากปัญหาของรองลื่น (Bearing) ฟอลต์ที่เกิดจากปัญหาของแท่งตัวนำโรเตอร์ (Rotor Bar) และอื่นๆ [1] ซึ่งปัญหาในการวินิจฉัยคือในบางเทคนิคจะเป็นการตรวจจับโดยใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ที่มีราคาแพง และบางเทคนิคอาจจะมีผลกระทบต่อมอเตอร์ (Invasive)

สำหรับในบทความนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine) หรือ SVM สำหรับการวินิจฉัยความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์บนพื้นฐานของการวิเคราะห์สัญญาณองค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ร่วมกับการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor Current Signature Analysis, MCSA) ซึ่งการนำเสนอนี้จะได้นำข้อมูลของในแต่ละองค์ประกอบของแรงดัน d, q และศูนย์ (Zero) รวมทั้งสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ในกระแสสเตเตอร์ 4 อันดับ ประกอบรวมเป็น 7 คุณลักษณะเฉพาะ (Feature) สอนให้กับ SVM ต่อไป ซึ่งในบทความอ้างอิงที่ [2], [3] ได้ประสบผลสำเร็จในการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้ SVM หรือ NN มาแล้ว แต่ที่เพิ่มเติมขึ้นในบทความนี้คือการประยุกต์ใช้เทคนิค MCSA เข้ามาเป็นข้อมูลอินพุตสอนให้กับ SVM อีกทางหนึ่งด้วย

2. ฟอลต์สเตเตอร์

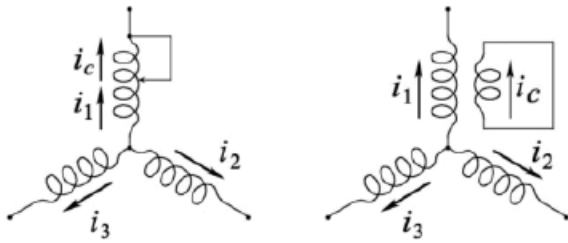
มอเตอร์ที่มีการพันเป็นแบบสุ่ม (Random Wound) มักจะถูกนำมาใช้กับงานที่มีการเริ่มเดินบ่อยครั้ง ลวดตัวนำในแต่ละขดขดลวดที่มีอยู่อย่างมากมายจะเป็นสาเหตุทำให้มีบางส่วนเกิดการเคลื่อนที่ (สั่น) ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ซึ่งสาเหตุนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบ

รอบถึงรอบภายใน 1 ชุดขดลวด การลัดวงจรดังกล่าวจะนำไปสู่ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชุดของขดลวดที่ลัดวงจรนั้น ผลที่ตามมาคือจะทำให้จำนวนของลวดตัวนำดังกล่าวเสื่อมสภาพลง และสุดท้ายจะทำให้เกิดสภาวะลัดวงจรโดยรวมไปถึงการลัดวงจรลงกราวด์โดยผ่านสล็อตสเตเตอร์ เมื่อสภาวะดังกล่าวนี้เกิดขึ้นแล้ว มอเตอร์อาจจะทำงานต่อหรือหยุดทำงานก็จะขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ แต่ส่วนใหญ่แล้วสาเหตุของการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบจะอยู่เหนือความสามารถของเครื่องป้องกันมอเตอร์ ทำให้ไม่สามารถตรวจพบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ ความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะค่อยๆ มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นรวมถึงจะมีการขยายพื้นที่ออกไป จนกระทั่งเกิดความเสียหายที่รุนแรงตามมา คือฉนวนเฟสหรือกราวด์ถูกทำลาย และจุดนี้จะเป็นสาเหตุโดยตรงที่ทำให้เกิดฟอลต์เนื่องจากเฟสถึงเฟสหรือกราวด์ฟอลต์ (Ground Fault) [4]

จากทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าปัญหาเริ่มแรกมาจากการลัดวงจรเพียงจุดเล็กน้อยเท่านั้นคือ รอบถึงรอบ แล้วก็จะลุกรามทำให้เกิดอีก 4 สภาวะตามมาก็คือ การลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ → การลัดวงจรระหว่างขดลวดถึงขดลวด → การลัดวงจรระหว่างเฟสถึงเฟส → การลัดวงจรระหว่างเฟสถึงกราวด์ → และวงจรเปิด ดังนั้น ถ้าสามารถตรวจจับการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์กรณีรอบถึงรอบได้ ก็จะสามารถแก้ไขปรับปรุงหรือวางแผนการซ่อมบำรุงได้ล่วงหน้า ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายให้น้อยลงได้อีกด้วย

สำหรับการอธิบายถึงพฤติกรรมการเกิดสภาวะลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบของชุดขดลวดหรือเรียกเป็นสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Circulate Current, I_C) โดยสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 วงจรที่อิสระต่อกันแสดงในรูปที่ 1

ทั้งนี้กระแส I_C จะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MMFs) ในทิศทางตรงข้ามกันกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักที่สร้างโดยขดลวดเฟส ส่งผลให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักลดลงสำหรับการลัดวงจรหลายๆ รอบสามารถวิเคราะห์โดยใช้วิธีการเดียวกันนี้ได้ [5], [6]



รูปที่ 1 ลักษณะขดลวดสเตเตอร์ (ซ้าย) เกิดการลัดวงจรใน 1 เฟส และ (ขวา) วงจรอย่างง่ายสำหรับการพิจารณา [6]



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์กรณีเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ [7]

ผลที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบจะส่งผลให้ MMFs มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและทำให้ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance) ระหว่างเฟสกับขดลวดสเตเตอร์วงจรอื่นในมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในและผลของความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างรอบขดลวดซึ่งจะมีค่าที่เท่ากันในแต่ละขดลวดและเป็นสัดส่วนกันในแต่ละชั้นลวดตัวนำ ซึ่งก็จะเป็นผลให้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (Impedance) มีความสมดุลกัน แต่ถ้าเกิดสภาวะรอบขดลวดลัดวงจรเกิดขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำร่วมและของมันเองมีการเปลี่ยนแปลงไป

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างเฟสที่ไม่สมดุล และด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตำแหน่งของการลัดรอบนั้น [7]

สัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ที่เกิดขึ้นจะมีเฟสใหม่ โดยในที่นี้จะเรียกเป็นเฟส f_{st} ซึ่งเมื่อขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ต่อเป็นแบบสตาร์ สมการทั่วไปของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยใช้วงจรสเตเตอร์กรณีเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบสามารถพิจารณาได้จาก

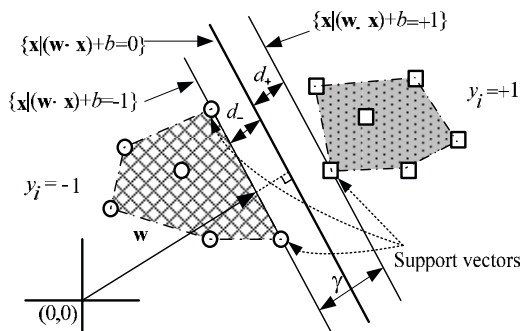
$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & -R_b & 0 & 0 \\ 0 & R_b & -R_c & 0 \\ -R_a & 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{st} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{st} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \\ \Psi_{st} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ทั้งนี้ฟลักซ์สลิปเนื่อง Ψ_{st} (Flux Linkage) จะขึ้นอยู่กับกระแสในแต่ละเฟสรวมถึงเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นด้วย ทำให้แรงดันเหนี่ยวนำสเตเตอร์ลัดรอบ (e_{st}) ที่เกิดขึ้นในขดลวดมีสมการเป็น (2) และเมื่อนำมาหารด้วย R_{st} ก็จะได้เป็น I_{st} และสำหรับองค์ประกอบความถี่ในรูปคลื่นฟลักซ์ช่องอากาศในฟังก์ชันของการลัดรอบ (f_{st}) จะมีสมการเป็น (3)

$$e_{st} = -\frac{d\Psi_{st}}{dt} \quad (2)$$

$$f_{st} = f_1 \left\{ \frac{n}{p}(1-s) \pm k \right\} \quad (3)$$

เมื่อ x แทนเฟส a, b หรือ c ดังนั้น V_{sx} คือแรงดันตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์เฟส x, R_x คือความต้านทานสเตเตอร์เฟส x, i_x คือกระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์เฟส x และ Ψ_{sx} คือฟลักซ์สลิปเนื่องสเตเตอร์เฟส x, f_1 คือค่าความถี่มูลฐาน p คือจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก s คือค่าสลิป n คือ 1, 2, 3, ... และ k คือ 1, 3, 5, ...



รูปที่ 3 ตัวอย่างการแบ่งกลุ่ม (□ และ ○) ด้วย SVM

3. การวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์บนพื้นฐานของ SVM

3.1 ทฤษฎีของ SVM

ปัจจุบันมีนักวิจัยเป็นจำนวนมากที่ได้นำเทคนิคการรู้จำรูปแบบ (Pattern Recognition) สำหรับนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการตรวจจับและวินิจฉัยฟอลต์เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่สำคัญคือเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมหรือนิวรอลเน็ตเวิร์ค (Neural Networks, NN) ซึ่งก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ การรู้จักอีกเทคนิคหนึ่งซึ่งกำลังเป็นที่สนใจจากนักวิจัยจำนวนมากคือซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน หรือ SVM ทั้งนี้เนื่องจาก SVM เป็นเทคนิคหนึ่งของเทคนิคการเรียนรู้ด้วยเครื่องจักร (Machine Learning) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานที่เกี่ยวข้องกับการจดจำรูปแบบ ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีข้อเด่นหลายประการเมื่อเทียบกับเทคนิค NN และเทคนิคอื่น โดยหลักการของ SVM คือการสร้างไฮเปอร์เพลนที่เหมาะสมบนระนาบของข้อมูลตัวอย่าง (Training Data) เพื่อแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน (โดยสมมติว่ากลุ่มข้อมูลตัวอย่างสามารถแบ่งแยกออกจากกันได้) ในการสร้างไฮเปอร์เพลนที่เหมาะสม จะนิยามระยะห่างระหว่างจุดของข้อมูลที่อยู่ใกล้กับไฮเปอร์เพลนมากที่สุดทั้งสองด้าน คือ d_+ และ d_- ระยะมาร์จิ้น γ เกิดจากระยะ $d_+ + d_-$ เพราะฉะนั้นไฮเปอร์เพลนที่เหมาะสม คือไฮเปอร์เพลนที่มีค่ามาร์จิ้น γ กว้างที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3 โดยข้อมูลตัวอย่างที่อยู่บนขอบของมาร์จิ้น γ จะถูกเรียกว่าซัพพอร์ตเวกเตอร์ (Support Vector) [8] จุดเด่นของ SVM อยู่ตรงที่มีการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดย

อาศัยหลักการลดความเสี่ยงเชิงโครงสร้างให้ต่ำสุด ซึ่งแตกต่างจาก NN ที่ใช้หลักการลดความเสี่ยงทดลองให้ต่ำสุด และ SVM ไม่ต้องมีการกำหนดจำนวนของชั้นซ่อน เนื่องจากมีชั้นซ่อนเพียงชั้นเดียวเรียกแทนว่าปริภูมิลักษณะเด่น ซึ่งใช้สำหรับสร้างระนาบเกินที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแทนกลุ่มข้อมูล ข้อแตกต่างอีกประการคือ SVM จะใช้ข้อมูลอินพุต หรือซัพพอร์ตเวกเตอร์ที่เกิดจากการฝึกสอนเป็นเวกเตอร์นำหน้าระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นซ่อนแล้วยังใช้เวลาในขั้นตอนการเรียนรู้น้อยกว่าแต่ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องมากกว่า [9]

3.2 การดึงคุณลักษณะเฉพาะ

หลักการของการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้อยู่บนพื้นฐานของความไม่สมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟส ซึ่งผลที่ตามมาคือการเกิดขึ้นของสัญญาณฮาร์มอนิกทั้งในสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสโดยที่ระดับความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับจำนวนของรอบขดลวดสเตเตอร์ที่ลัดวงจรดังสมการที่ (2) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวิเคราะห์หองค์ประกอบแรงดัน $dq0$ สำหรับนำมาตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์และทำการแยกแยะเพื่อการวินิจฉัย ซึ่งองค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ที่นำเสนอนี้จะได้มาจากแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละเฟสของมอเตอร์กับจุดต่อวาย (Y) เรียกเป็น v_{aY}, v_{bY} และ v_{cY} ต่อมาจึงได้ทำการแปลงเวกเตอร์ปาร์ค แล้วได้สัญญาณชุดใหม่เป็น v_d, v_q และ v_0 ทั้งนี้การแปลงเวกเตอร์ปาร์ค (Park's Vector) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้ [10]

$$\begin{bmatrix} v_d(n) \\ v_q(n) \\ v_0(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{aY}(n) \\ v_{bY}(n) \\ v_{cY}(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

เมื่อ $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ และ N คือจำนวนของข้อมูลทั้งหมด

ทั้งนี้ที่ผ่านมามีการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ เช่น ในเอกสารอ้างอิงที่ [11] ได้ทำการวินิจฉัยโดยใช้วิธี

เวกเตอร์ปาร์คนสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์นี้เป็นการรวมกันของสัญญาณมูลฐาน สัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ และรวมถึงสัญญาณฟอลต์อื่นๆ อีกด้วย ข้อปัญหาดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในบทความนี้ คือเป็นการเลือกพิจารณาสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์เพียงอย่างเดียว โดยการเลือกเฉพาะย่านความถี่ที่มันเกิดขึ้นเท่านั้น โดยการพิจารณาสมการที่ (3) ในอันดับ $k=\pm 1$ แล้วนำมาทำการประมวลผลเรียกชื่อใหม่เป็น (v_{a,b,c_fst}) ทั้งนี้จะได้มีการแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญได้แก่ส่วนแรกสำหรับการพิจารณาองค์ประกอบแรงดัน d และ q เรียกเป็น v_{d_fst} และ v_{q_fst} ตามลำดับ ทำให้ได้สมการใหม่สำหรับการคำนวณหาองค์ประกอบแรงดัน d และ q คือ

$$\begin{bmatrix} v_{d_fst}(n) \\ v_{q_fst}(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a_fst}(n) \\ v_{b_fst}(n) \\ v_{c_fst}(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

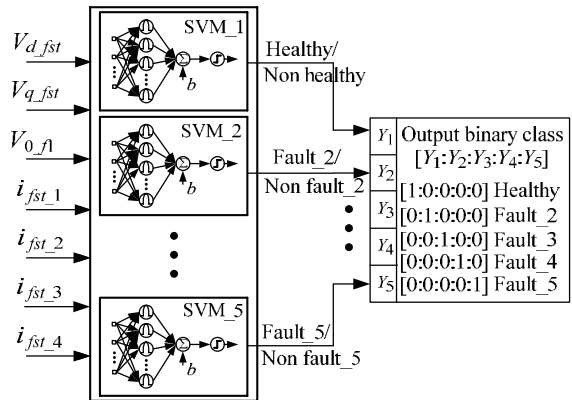
ส่วนสำคัญที่ 2 คือการคำนวณหาองค์ประกอบแรงดันศูนย์ (v_{0_fl}) โดยได้ใช้เฉพาะองค์ประกอบสัญญาณแรงดันมูลฐานเท่านั้น (v_{a,b,c_fl}) ซึ่งประสบความสำเร็จในการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์มาแล้วใน [12] ทำให้สมการที่ (4) ถูกพัฒนาสำหรับการหาองค์ประกอบแรงดันศูนย์ได้ดังสมการ

$$v_{0_fl}(n) = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a_fl}(n) \\ v_{b_fl}(n) \\ v_{c_fl}(n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

4. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

4.1 การออกแบบอัลกอริธึมการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์

อัลกอริธึมของ SVM แบบหลายคลาสที่ได้ออกแบบขึ้นสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากการแยกแยะในแต่ละโบนารี่รวมกัน เช่น SVM_2 กล่าวคือ



รูปที่ 4 โมเดลการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วย SVM

ใช้ Fault_2 จะให้ค่า Output Binary Class เป็นลอจิก 1

ไม่ใช่ Fault_2 จะให้ค่า Output Binary Class เป็นลอจิก 0

ซึ่งเมื่อนำในแต่ละโมเดลของ SVM มารวมกันแล้วสามารถนำมาทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยความรุนแรงที่แตกต่างกัน 4 สภาวะ ได้แก่ ลัดวงจร 1%, 2%, 3% และ 4% ของจำนวนรอบทั้งหมดใน 1 เฟส โดยจะเป็นการเปรียบเทียบคลาสต่อคลาสด้วยผลของเอคต์พุตที่แตกต่างกัน ในแต่ละโมเดลของ SVM ได้ถูกสอนด้วย 1 ชุดข้อมูลของสภาวะมอเตอร์ที่มีสุขภาพดี (Healthy Motor Condition) และอีก 4 โมเดลถูกสอนด้วยชุดข้อมูลของฟอลต์สเตเตอร์ สรุปแล้ว SVM ที่ได้ออกแบบขึ้นจะมี 5 โมเดล (5 เอคต์พุต) ทั้งนี้ข้อมูลอินพุตหรือคุณลักษณะเฉพาะที่นำมาใช้จะประกอบไปด้วย ดังนี้

$$X = [v_{d_fst}, v_{q_fst}, v_{0_fl}, i_{st_1}, i_{st_2}, i_{st_3}, i_{st_4}] \quad (7)$$

เมื่อ v_{dq0} คือการพิจารณาให้อยู่ในค่าประสิทธิภาพ (Root Mean Square, RMS) และ i_{st_1-4} คือการพิจารณาในค่าขนาดของสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์ 4 ตำแหน่งโดยการแทนค่า ($n:k$) ลงในสมการที่ (3) ดังนี้ 1:1, 2:1, 3:1 และ 4:1 ซึ่งทำให้ได้ตำแหน่งของฟอลต์สเตเตอร์อยู่ในช่วงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ช่วงตำแหน่งของฟอลต์สแตเตอร์ที่ลำดับ $k=+1$

ที่อันดับ n ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงโหลด (No $\leftrightarrow$ Full load, Hz)			
$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$
73.17-75.00	96.33-100.00	119.50-125.00	142.67-150.00

ทั้งนี้ในแต่ละโมเดลของ SVM จะถูกสอนด้วยชุดข้อมูลที่สัมพันธ์กับโมเดลนั้นภายใต้สภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่สภาวะโหลดต่างๆ กัน ในส่วนของเอาต์พุตหรือเมตริกมุ่งหมายกำหนดให้มีมิติเป็น 1 แถวชุดข้อมูล ซึ่งมีด้วยกัน 5 คอลัมน์คือ $[Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 Y_5]_{1 \times 5}$ ทั้งนี้จุดมุ่งหมายเอาต์พุตคือ 0 และ 1 จะสอดคล้องกับข้อมูลการแยกแยะซึ่งนำเสนอในตารางที่ 2 สำหรับอัลกอริทึมการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์ด้วย SVM ที่นำเสนอนี้ได้สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB SIMULINK

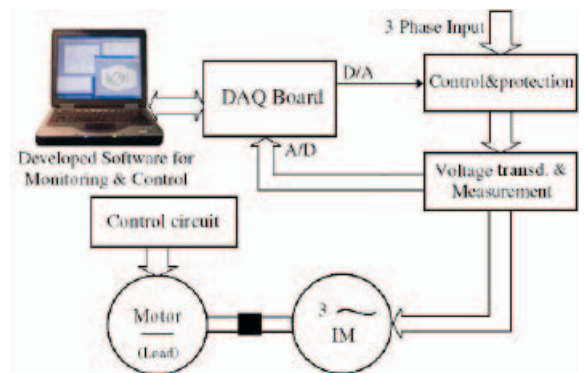
ตารางที่ 2 การแบ่งแยกความรุนแรงของฟอลต์สแตเตอร์

SVM number	Classification	Target
1 (Healthy)	Healthy	[1 : 0 : 0 : 0 : 0]
2 (Fault_2)	1% shorted turn	[0 : 1 : 0 : 0 : 0]
3 (Fault_3)	2% shorted turn	[0 : 0 : 1 : 0 : 0]
4 (Fault_4)	3% shorted turn	[0 : 0 : 0 : 1 : 0]
5 (Fault_5)	4% shorted turn	[0 : 0 : 0 : 1 : 0]

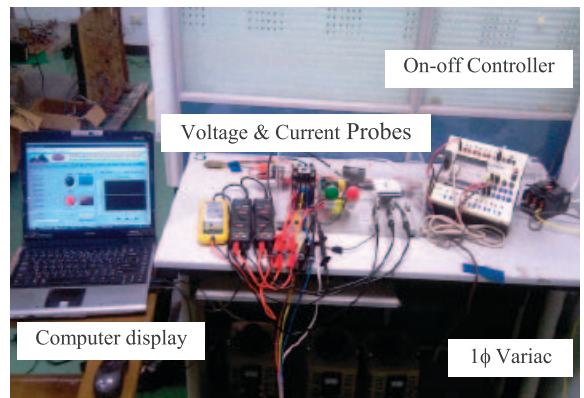
4.2 การออกแบบการจำลองฟอลต์สแตเตอร์

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดสอบมีพิกัด 2 แรงม้า ใช้กับความเร็ว 50 เฮิร์ต 4 ขั้วแม่เหล็ก ขดลวดต่อแบบวายที่แรงดัน V_{ab} เท่ากับ $380 V_{rms}$ ใน 1 เฟสมีจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์เท่ากับ 282 รอบ มอเตอร์ถูกออกแบบให้ชุดของขดลวดเฟส W มีจุดต่อที่แยกออกมาสำหรับการทดสอบ โดยมีลักษณะของการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เริ่มจาก 1%, 2%, 3% และ 4% ของจำนวนรอบทั้งหมด

รูปที่ 5 แสดงชุดทดลองซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำพร้อมโหลด (มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง) มีชุด

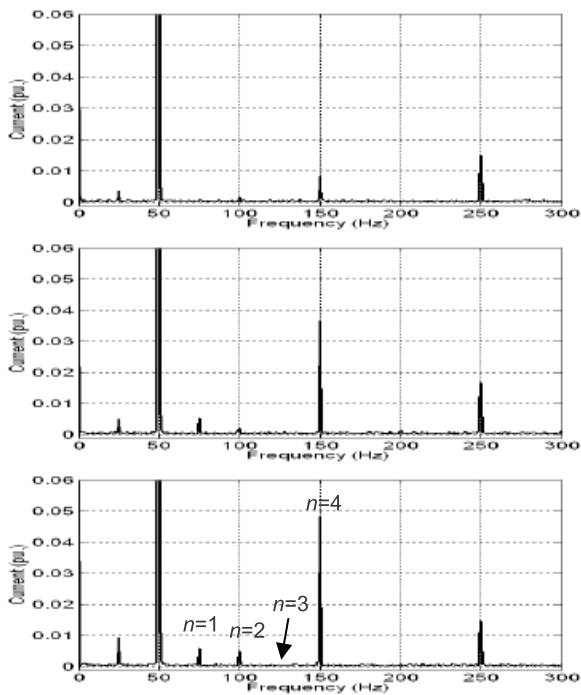


รูปที่ 5 ชุดทดลอง



รูปที่ 6 รูปจริงของการทดลอง

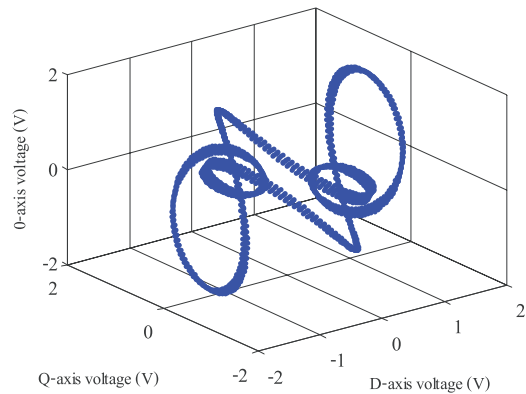
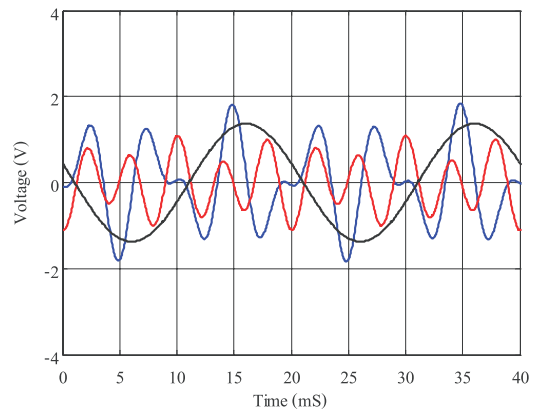
วัดสัญญาณแรงดันสำหรับตรวจจับแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละชุดขดลวดของมอเตอร์ ทั้งนี้ที่จุดสายของขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์ไม่ได้ต่อเชื่อมกับสายนิวตรอลของแหล่งจ่ายไฟ และมีชุดวัดสัญญาณกระแสสเตเตอร์ (รวมเป็น 4 สัญญาณอินพุต) หลังจากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวมาลดระดับให้มีความเหมาะสมก่อนใช้การ์ด DAQ เก็บข้อมูลซึ่งถูกควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB โดยได้ออกแบบให้โปรแกรม MATLAB สามารถใช้งานในลักษณะ GUI เพื่อรับสัญญาณดังกล่าวได้ พร้อมส่งสัญญาณไปควบคุมเพื่อตัดหรือต่อระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้อีกด้วย รูปจริงที่ใช้ในการทดสอบและวินิจฉัยมอเตอร์แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของฟลด์สเตเตอร์ที่ลำดับ n ต่างๆ กรณี (บน) มอเตอร์มีความสมบูรณ์ (กลาง) ที่สภาวะลัดรอบ 2% และ (ล่าง) ที่สภาวะลัดรอบ 4%

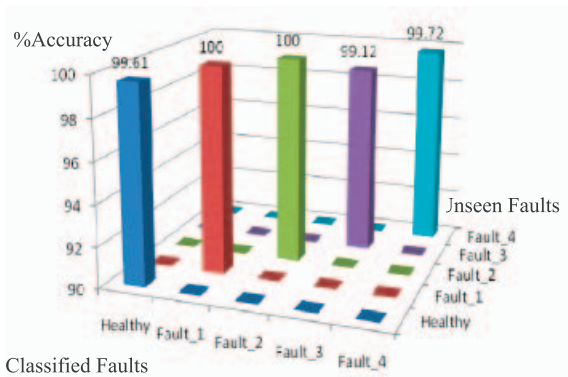
5. ผลการทดลอง

การพิจารณาเพื่อการดึงคุณลักษณะเฉพาะของเทคนิค MCSA ได้แสดงผลการทดลองในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นการทดลองในสภาวะมอเตอร์ทำงานที่โหลดเบาภายใต้สภาวะฟลด์สเตเตอร์ที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ซึ่งพบว่าตำแหน่งของฟลด์สเตเตอร์ได้เกิดขึ้นตรงตามตารางที่ 1 โดยได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงพฤติกรรมของฟลด์สเตเตอร์ที่ได้เปลี่ยนแปลงตามระดับความรุนแรงของจำนวนการลัดรอบในชุดขดลวด [13] จากผลการทดลองนี้ยังพบว่า ถึงแม้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะที่สมบูรณ์ก็ตาม ก็สามารถเกิดสัญญาณฮาร์มอนิกฟลด์ขึ้นมาได้ (มีความถี่เดียวกันกับสัญญาณฟลด์สเตเตอร์) ตัวอย่างของสเปกตรัมฮาร์มอนิกที่มีความถี่ซ้อนทับกันและถือได้ว่ามีความสำคัญคือฮาร์มอนิกที่เป็นสามเท่า (Triplen Harmonics) ซึ่งสามารถเกิด

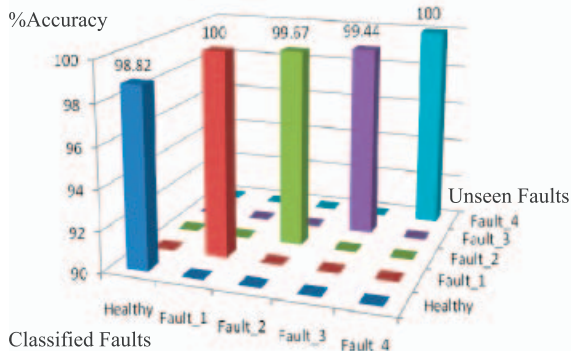


รูปที่ 8 องค์ประกอบแรงดัน $dq0$ กรณีขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบ 4% (รูปบน) เมื่อพิจารณาในแต่ละสัญญาณองค์ประกอบแรงดันในโดเมนเวลา (รูปล่าง) เมื่อพิจารณาในลักษณะของวงโคจรด้วยการพล็อตแบบ 3 มิติ

ขึ้นได้โดยมีสาเหตุมาจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก (Core Saturation) แหล่งจ่ายแรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance) และความไม่สมดุลของขดลวดสเตเตอร์หรือโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Machine Structural Unbalance) [2] ซึ่งผลการทดลองในรูปที่ 7 ได้แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่ความถี่ 150 Hz และ 250 Hz ที่สภาวะมอเตอร์สมบูรณ์ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับนำไปสอนให้กับ SVM ด้วย รูปที่ 8 แสดงลักษณะขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ กรณีขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ 9 เปอร์เซนต์ความถูกต้องของการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้ SVM กับวิธีการที่นำเสนอ (No Load)



รูปที่ 10 เปอร์เซนต์ความถูกต้องของการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้ SVM กับวิธีการที่นำเสนอ (Full Load)

ลัดรอบ 4% เมื่อพิจารณาในแกนเวลาและเมื่อพิจารณาในลักษณะของวงโคจรด้วยการพล็อตแบบ 3 มิติ โดยพบว่าเมื่อระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้องค์ประกอบแรงดัน $dq0$ มีวงโคจรที่กว้างขึ้นตามไปด้วยการทดสอบสมรรถนะการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ซึ่งใช้เทคนิคของ SVM ที่ได้นำเสนอนี้ สามารถทำได้โดยการทดสอบกับข้อมูลของฟอลต์สเตเตอร์ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน (Unseen Fault) ผลการทดลองดังกล่าวนี้แสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ภายใต้สภาวะการทำงานที่โหลดเบาและโหลดเต็มตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้นี้ยืนยันได้ว่าเทคนิค

ที่นำเสนอ สามารถทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ได้อย่างถูกต้องมากกว่า 98%

สำหรับการพิจารณาค่าความเป็นไปได้ของการประมาณค่าการแยกแยะฟอลต์สเตเตอร์ในตารางความสับสนที่ 3 ได้พิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (The Root Mean Squared Error, RMSE) ซึ่งสามารถทำได้โดยพิจารณาจากความแตกต่างของระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์จริงกับค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งค่าตัวเลข 0 และ 1 หมายถึงกลุ่มของข้อมูลในการแยกแยะแบบไบนารีที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการเลือกความเป็นไปได้ของการแยกแยะผลการพิจารณาค่า RMSE ของการทดลองในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงในตารางที่ 3 โดยได้แสดงถึงค่าความผิดพลาดของการทดสอบการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ระหว่างข้อมูลเอาต์พุตจริงกับเป้าหมายของระบบการวินิจฉัย ซึ่งแสดงถึงกระบวนการสอนนี้มีความสมบูรณ์ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.232

ตารางที่ 3 ค่า RMSE ของการวินิจฉัยในรูปที่ 9 และ 10

RMSE of SVM	Healthy	Fault_2	Fault_3	Fault_4	Fault_5
No Load	0.154	0.206	0.232	0.213	0.160
Full Load	0.197	0.225	0.134	0.177	0.203

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์บนพื้นฐานการนำมาพิจารณาร่วมกันของสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน $dq0$ และสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ในกระแสสเตเตอร์ ทั้งนี้การแยกแยะระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ได้ใช้เทคนิคของ SVM จากการทดลองระบบการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ที่ได้ออกแบบขึ้นกับฟอลต์สเตเตอร์ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน พบว่าสามารถทำการวินิจฉัยระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ได้อย่างแม่นยำด้วยค่าความถูกต้องสูง (มากกว่า 98.5%) ซึ่งเปอร์เซนต์ความถูกต้องของการวินิจฉัย

ที่ได้นี้จะสูงกว่าระบบที่พิจารณาเฉพาะเทคนิคองค์ประกอบแรงดัน $dq0$ หรือเทคนิคของ MCSA ที่เคยได้ทำการวินิจฉัยมาแล้ว นอกจากนี้ยังทำให้ระบบดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีกว่าด้วยค่า RMSE 0.232 เท่านั้น

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย ด้วยทุนงบประมาณ ประจำปี 2553

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp.719-729, Dec. 2005.
- [2] C. Manop, V. Kinnares, and S. Chunwiphat, "SVM-based stator fault diagnosis for induction motors using DQ0 voltage components," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 6, no. 10, pp. 4539-4553, Oct. 2010.
- [3] เฉลิมชาติ มานพ, ศิริพร เสงเกียรติกศักดิ์, สุพจน์ จันทวีวัฒน์ และชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล, "การวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม," การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ครั้งที่ 6, 5-7 พฤษภาคม 2553.
- [4] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel cage induction motors," *IEEE Trans. Industry Application*, vol.28, pp. 921-937, July/Aug. 1992.
- [5] G. M. Joksimovic and J. Penman, "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors," *IEEE Trans. on Industrial Elect.*, vol. 47, no. 5, pp. 1078-1084, Oct. 2000.
- [6] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. A. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," *IEEE Trans. on Industrial Elect.*, vol. 55, no. 12, pp. 4109-4126, Dec. 2008,
- [7] H. W. Penrose and J. Jette, "Static motor circuit analysis: an introduction to theory and application," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 16, no. 4, pp. 6-10, July/Aug. 2000.
- [8] N. Cristianini and J. S. Taylor, *An introduction to supportvector machines and other kernel-based learning methods*, Cambridge University Press, 2000.
- [9] E. Zheng, P. Li, and Z. Song, "Performance analysis and comparison of neural networks and support vector machines classifier," *Proc. of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hangzhou, China, vol. 5, pp. 4232-4235, 2004.
- [10] P. C. Krause, *Analysis of electric machinery*, McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [11] F. Zidani, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, and M.S. NaitSaid, "Induction motor stator faults diagnosis by a current concordia pattern-based fuzzy decision system," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 18, no. 4, pp. 469-475, Dec. 2003.
- [12] M. A. Cash, T. G. Habetler, and G. B. Kliman, "Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1234-1239, Nov./Dec. 1998.
- [13] จิรพันธ์ ธรรมประสิทธิ์, เฉลิมชาติ มานพ, ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล และสิริวิช ทัดสวน "การวินิจฉัยขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ MCSA," EECON-27, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ณ โรงแรมโซฟิเทล ราชอาณัติ จังหวัดขอนแก่น, 11-12 พฤศจิกายน 2547, หน้า 101-104.