การเฝ้าตรวจสภาวะและวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำบนพื้นฐาน SVM โดยใช้สัญญาณกระแสและแรงดัน

โอภาส ศิริครรชิตถาวร[1]* และ เฉลิมชาติ มานพ[2]

บทคัดย่อ

ในบทความนี้นำเสนอการตรวจจับและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์บนพื้นฐานการวิเคราะห์สัญญาณกระแสและแรงดันโดยการแยกแยะด้วย SVM ทั้งนี้การดึงคุณลักษณะเฉพาะอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันในรูปแบบขององค์ประกอบแรงดัน *dq*0 ซึ่งการนำเสนอองค์ประกอบแรงดัน *dq*0 นี้ ได้มาจากการแปลงเวกเตอร์ปาร์ค และหลังจากนั้นได้นำมาพิจารณาร่วมกับสเปคตรัมฟอลต์สัญญาณกระแสสเตเตอร์ (เทคนิคของ MCSA) เพื่อใช้เป็นคุณลักษณะเฉพาะสอนให้กับ SVM การแยกแยะด้วย SVM ดังกล่าวจะถูกพัฒนาให้สามารถทำการแยกแยะได้แบบหลายการแยกแยะเพื่อการตรวจสอบสภาวะความสมบูรณ์และฟอลต์สเตเตอร์ของมอเตอร์ที่นำมาทดสอบ จากผลการทดลองสมรรถนะของการแยกแยะโดยใช้องค์ประกอบแรงดัน *dq*0 เพียงอย่างเดียว เปรียบเทียบกับการนำองค์ประกอบแรงดัน *dq*0 ร่วมกับเทคนิค MCSA พบว่าสามารถให้ความถูกต้องมากกว่า 98% และ 99% ตามลำดับ

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำ SVM ฟอลต์สเตเตอร์ การวินิจฉัยฟอลต์ MCSA

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 6323 อีเมล: o_pas@hotmail.com

รับเมื่อ 26 กันยายน 2555 ตอบรับเมื่อ 21 มกราคม 2556

SVM-Based Induction Motor Monitoring and Diagnosis Using Voltage and Current Signature

Opas Sirikunchittavorn[1]* and Chalermchat Manop[2]

Abstract

In this paper, the stator fault detection and diagnosis based on voltage and current analysis together with SVM classifier are presented. Specific feature extraction is on the basis of voltage signature analysis in a form of *dq*0 voltage components. The proposed *dq*0 voltage components are obtained by using Park's vector transformation. Then all *dq*0 voltage components are combined with the stator-fault current spectrums (Motor Current Sgnature Analysis, MCSA) as the input features. A SVM based multi-class classifier is then developed and applied to distinguish health conditions and different stator fault conditions. The experimental results on the performance of classification have shown that the *dq*0 voltage components compared with the *dq*0 voltage including MCSA delivers a high accuracy rate, exceeding 98% and 99% respectively.

Keyword: Induction Motor, SVM, Stator Fault, Fault Diagnosis, MCSA

[1] Assistant Professor, Department of Electronic Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

[2] Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 6323, E-mail: o_pas@hotmail.com

Received 26 September 2012; Accepted 21 January 2013

1. บทนำ

การทำนายความความล้มเหลว (Failure) ที่เกิดขึ้นกับส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) กำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent) ที่ทำให้ผลการทำนายมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ประโยชน์ของการตรวจจับ และรวมถึงขั้นตอนการวินิจฉัยความล้มเหลวของมอเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพจะสามารถทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงลงได้ รวมถึงผลกระทบความเสียหาย จากกระบวนการผลิตที่ต้องหยุดชะงักไปอีกด้วย [1]

ในปัจจุบันเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นดังกล่าว โรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมาก ได้ให้ความสำคัญของการเฝ้าตรวจสภาวะมอเตอร์ (Motor Condition Monitoring) ทั้งนี้เทคนิคที่ใช้ในการเฝ้าตรวจสภาวะที่ยังมีการวิจัยกันอย่างกว้างขวาง คือการวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor Current Signature Analysis, MCSA) แต่การวิจัยในบทความนี้จะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้สัญญาณแรงดันเพียงอย่างเดียว และนำมาพิจารณาร่วมกับสัญญาณกระแสมอเตอร์ด้วย นอกจากนี้แล้วในบทความนี้ยังเป็นการประยุกต์ใช้อัลกอริธึมของ SVM (Support Vector Machine) สำหรับการวินิจฉัยความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ทั้งสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแส ซึ่งจะได้เปรียบเทียบให้เห็นผลการวินิจฉัยในบทความนี้

2. วิเคราะห์ความล้มเหลวตัวนำสเตเตอร์

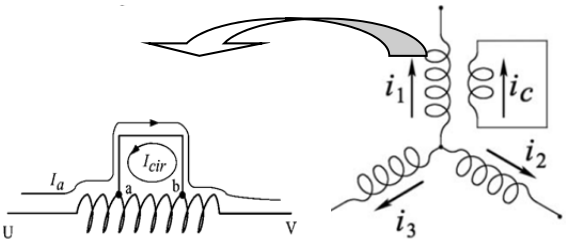
ปัจจัยที่มีผลต่อการชำรุดเสียหาย ของฉนวนตัวนำสเตเตอร์ มีสาเหตุมาจากความเค้น (Stresses) ที่กระทำกับขดลวดซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมของฉนวนก่อนกำหนดเวลาที่สำคัญๆ ได้แก่ ผลของความร้อน กล่าวคือ ความร้อนที่เกิดจากการเสื่อมของอายุ (Aging) ความร้อนที่เกิดจากการมีโหลดเกิน (Thermal Overloading) เป็นต้น ผลเนื่องมาจากไฟฟ้า ซึ่งมักพบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้กับแรงดันที่เกินกว่า 600 V ขึ้นไป โดยที่พื้นผิว

รูปที่ 1 รูปจริงของตัวนำสเตเตอร์ลัดวงจร (http://arcsy-stems.businesstobusinessblog.ws)

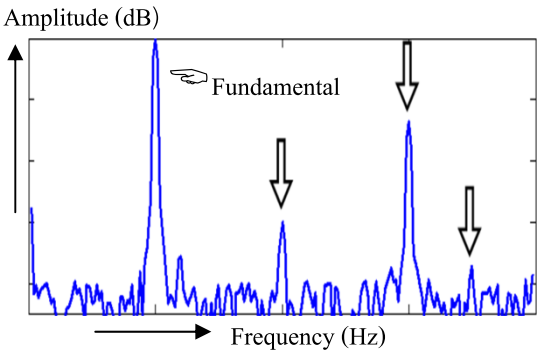
ของฉนวนลวดตัวนำ จะมีลักษณะของความชื้นและสิ่งสกปรกสะสม ทำให้เกิดกระแสดิสชาร์จ (Discharge) ลงกราด์เป็นเหตุให้เกิดความเผาไหม้เป็นจุดเล็กๆ ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพลง รวมถึงปรากฏการณ์โคโรนา (Corona) ที่มักพบในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้แรงดันสูงเกินกว่า 5 kV อีกด้วย

แรงทางกลก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ตัวนำสเตเตอร์ล้มเหลวได้โดยแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นสาเหตุทำให้ขดลวดเกิดการสั่นสะเทือน และเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายที่ฉนวนตัวนำ นอกจากนี้แล้วผลเนื่องมาจากการทำงานภายใต้สิ่งแวดล้อมที่แย่ก็ส่งผลเสียต่อตัวนำได้เช่นกัน กล่าวคือเครื่องจักรกลไฟฟ้าควรทำงานในสภาวะอากาศที่แห้ง สะอาด และควรมีช่วงเวลาในการดูแลบำรุงรักษา ปัญหาหนึ่งที่มีการกล่าวถึงก็คือ การจับตัวของไอน้ำบนตัวนำสเตเตอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสภาวะลัดวงจรผ่านสลอตสเตเตอร์ลงกราวด์ได้ [2] ในรูปที่ 1 แสดงการลัดวงจรของตัวนำสเตเตอร์แบบรอบถึงรอบ (Turn-to-turn Short) ที่เกิดขึ้นจริงในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

สำหรับการวิเคราะห์ฟอลต์สเตเตอร์นี้ สามารถวิเคราะห์ได้โดยถ้าเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส ต่อแบบวาย และไม่ได้ต่อสายนิวตรอลระหว่างแหล่งจ่ายกับจุด



รูปที่ 2 การพิจารณาลักษณะการลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ 3 ตัวอย่างสเปคตราแรงดัน v_{an} ด้วยวิธีวินโดว์ FFT เมื่อฟอลต์ที่ต้องการตรวจจับแสดงด้วยลูกศร

นิวตรอลของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สมการแรงดันสำหรับขดลวดสเตเตอร์ในรูปแบบเมตริก จะเป็นดังสมการที่ (1)-(2) โดยหากขดลวดสเตเตอร์ในเฟส A เกิดสภาวะลัดวงจรระหว่างจุด a กับ b จะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Circulate current, I_{cir}) แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 วงจรที่อิสระต่อกัน นั่นคือวงจรที่เกิดจากกระแส i_1 และวงจรที่เกิดจากกระแส i_c เมื่อ กระแส i_1 คือกระแสเฟสทั้งนี้กระแส i_c (I_{cir}) จะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MMFs) ในทิศทางตรงข้ามกันกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักที่สร้างโดยขดลวดเฟส ส่งผลให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักลดลง [3]

ทั้งนี้หากค่าอินดักแตนซ์ (L_{ABC}) ในมอเตอร์ไม่สมมาตร (Asymmetric) จะสามารถแยกพิจารณาได้เป็นดังสมการที่ (3) ซึ่งแยกพิจารณาได้เป็น 2 องค์ประกอบ เทอมแรกแสดงในสมการที่ (4) คือส่วนสมดุลของเมตริกอินดักแตนซ์สเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่พิจารณามาจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความสมดุล ($L_{constant}$) และในเทอมที่ 2 แสดงในสมการที่ (5) จะเป็นส่วนความไม่สมมาตรของเมตริกอินดักแตนซ์สเตเตอร์ ที่มีสาเหตุมาจากการเกิดฟอลต์สเตเตอร์ ($L_{varying}$) [4], [5]

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

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

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

$$L_{constant} = \begin{vmatrix} L_{\sigma s} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{\sigma s} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{\sigma s} + L_{ms} \end{vmatrix} \quad (4)$$

$$L_{varying} = \begin{vmatrix} \Delta L_1 cos(\varphi_0) & -\Delta L_2 cos(\varphi_2) & -\Delta L_2 cos(\varphi_1) \\ -\Delta L_2 cos(\varphi_2) & \Delta L_1 cos(\varphi_1) & -\Delta L_2 cos(\varphi_0) \\ -\Delta L_2 cos(\varphi_1) & -\Delta L_2 cos(\varphi_0) & \Delta L_1 cos(\varphi_2) \end{vmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ x คือแรงดันเฟส A, B และ C, v_{xn} คือแรงดันตกคร่อมระหว่างเฟส x กับตำแหน่งนิวตรอล R_x คือค่าความต้านทานของชุดขดลวดสเตเตอร์เฟส x, I_x คือค่ากระแสสเตเตอร์ที่ไหลในเฟส x, Ψ_x คือฟลักซ์เชื่อมโยงเฟส x (Flux Linkage), v_{on} คือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างจุดสตาร์มอเตอร์กับตำแหน่งนิวตรอลของระบบ $\varphi_0 = h\theta f$, $\varphi_1 = h(\theta f - 2\pi/3)$, $\varphi_2 = h(\theta f + 2\pi/3)$ เมื่อ θf คือตำแหน่งของความไม่สมดุล h คือความเร็วของการหมุนของความไม่สมดุลที่สัมพันธ์กับความเร็วโรเตอร์ ΔL_1 และ ΔL_2 เป็นการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลในเทอมของค่าองค์ประกอบตามแนวทแยงมุมและนอกแนวทแยงมุมตามลำดับ ทั้งนี้สมการแรงดันเหนี่ยวนำสเตเตอร์ลัดรอบ (e_{st}) ที่เกิดขึ้นในขดลวดสเตเตอร์สามารถหาได้จาก

$$e_{st} = -\frac{d\Psi_{st}}{dt} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) พบว่าถ้าจำนวนของการลัดรอบมากขึ้นจะทำให้ e_{st} มีค่าเพิ่มขึ้น และตำแหน่งความถี่ของสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ (f_{st}) ที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) ทั้งนี้ทางด้านพฤติกรรมขององค์ประกอบความถี่ ในรูปคลื่นฟลักซ์ช่องอากาศในฟังก์ชันของการลัดรอบ จะขึ้นอยู่กับค่าความถี่มูลฐาน (f_1) จำนวนขั้วแม่เหล็ก (p) สลิป (s) n คือ 1, 2, 3, ... และ k คือ 1, 3, 5, ... ในรูปที่ 3 แสดงสเปคตราแรงดันเฟสสเตเตอร์ด้วยวิธีวินโดว์ FFT เพื่อตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ที่เกิดขึ้น

$$f_{st} = f_1\left\{\frac{n}{p}(1-s)\pm k\right\} \tag{7}$$

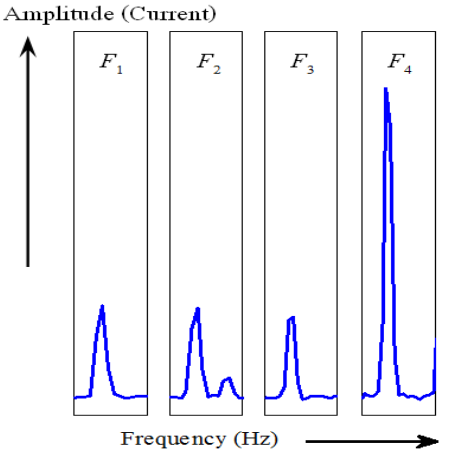
3. สัญญาณที่นำมาวินิจฉัย

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบแรงดัน $dq0$ สำหรับนำมาตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์และทำการแยกแยะเพื่อการวินิจฉัย ซึ่งองค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ที่นำเสนอนี้จะได้มาจากแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละเฟสของมอเตอร์กับจุดต่อวาย (Y) เรียกเป็น v_{aY}, v_{bY} และ v_{cY} ต่อมาจึงได้ใช้การแปลงเวกเตอร์ปาร์ค แล้วได้สัญญาณชุดใหม่เป็น v_d, v_q และ v_0 ทั้งนี้การแปลงเวกเตอร์ปาร์ค (Park's Vector) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้ [6],[7]

$$\begin{bmatrix} v_d(n) \\ v_q(n) \\ v_0(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{aY}(n) \\ v_{aY}(n) \\ v_{aY}(n) \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$v_{a,b,c}(n) = v_{a,b,c_f1}(n) + v_{a,b,c_fst}(n) \tag{9}$$

เมื่อ $n = 0, 1, 2, \ldots, N\text{-}1$ และ N คือจำนวนของข้อมูลทั้งหมด โดยแนวคิดของการพิจารณานี้ได้แยกพิจารณาระหว่างสัญญาณมูลฐาน (Fundamental) และสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์แสดงดังสมการที่ (9) กล่าวคือการดึงคุณลักษณะเฉพาะในสมการที่ (8) นี้จะถูกนำมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น คือเป็นการเลือกพิจารณาเฉพาะสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์เพียงอย่างเดียว โดยการเลือกเฉพาะย่านความถี่ที่มันเกิดขึ้นเท่านั้น โดยการ



รูปที่ 4 สเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์สำหรับใช้เป็นคุณลักษณะเฉพาะในส่วนของเทคนิค MCSA

พิจารณาสมการที่ (7) ในอันดับ k=1 แล้วนำมาทำการประมวลผลเรียกชื่อใหม่เป็น (v_{a,b,c_fst}) ทั้งนี้จะได้มีการแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ส่วนแรกสำหรับการพิจารณาองค์ประกอบแรงดัน d และ q เรียกเป็น vd_{fst} และ vq_{fst} ตามลำดับแสดงวิธีการคำนวณดังสมการที่ (10) สำหรับการคำนวณค่าองค์ประกอบแรงดันศูนย์ (v_{0_f1}) ได้ใช้เฉพาะองค์ประกอบสัญญาณแรงดันมูลฐานเท่านั้น (v_{a,b,c_f1}) ทำให้สมการที่ (8) เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (11)

$$\begin{bmatrix} v_{d_f_{st}}(n) \\ v_{q_f_{st}}(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{a_f_{st}}(n) \\ v_{b_f_{st}}(n) \\ v_{c_f_{st}}(n) \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\left[v_{0_f1}(n)\right] = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{a_f1}(n) \\ v_{b_f1}(n) \\ v_{c_f1}(n) \end{bmatrix} \tag{11}$$

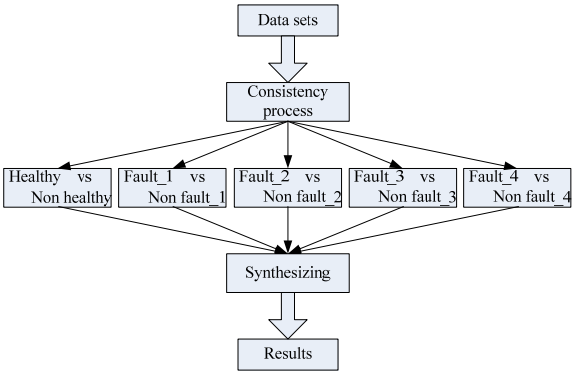
นอกจากนี้สัญญาณที่นำมาวินิจฉัยร่วมด้วย คือ สัญญาณกระแสสเตเตอร์ (Motor Current Signature Analysis, MCSA) โดยเป็นการพิจารณาจากสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลขั้นสูงสำหรับทำให้สเปคตรัมฟอลต์

สเตเตอร์มีความโดดเด่นชัดเจนสามารถตรวจจับและนำมาวิเคราะห์ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาก็ประสบความสำเร็จของการประยุกต์ใช้เทคนิค MCSA สำหรับการวินิจฉัยมอเตอร์กรณีฟอลต์สเตเตอร์ดังกล่าว [8] แต่ในงานวิจัยนี้อัลกอริธึมของกระบวนการขั้นต้นที่ได้ออกแบบไว้ก็สามารถตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ในสัญญาณกระแสมอเตอร์ได้เป็นอย่างดีเช่นกัน โดยสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์ที่ตรวจจับได้นี้จะถูกนำมาใช้เป็นคุณลักษณะเฉพาะสำหรับสอนให้กับ SVM ทั้งนี้การแบ่งระดับความรุนแรงและการออกแบบสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยมีลักษณะเช่นเดียวกับการออกแบบโดยใช้เทคนิคองค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ด้วยการจัดเรียงลำดับของคุณลักษณะเฉพาะได้พิจารณาจากตำแหน่งความถี่ของฟอลต์สเตเตอร์ดังนี้ คือการแทนฟอลต์สเตเตอร์ที่ตำแหน่ง $k{:}n$ ได้แก่ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, และ 1:5 ตามลำดับโดยแทนลงในสมการที่ (7) ทำให้พบว่าในแต่ละช่วงความถี่ของมันจะพบว่ามีเพียงสเปคตรัมเดียวที่มีความโดดเด่นซึ่งก็คือสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์ที่ต้องการตรวจจับนั่นเอง [9]

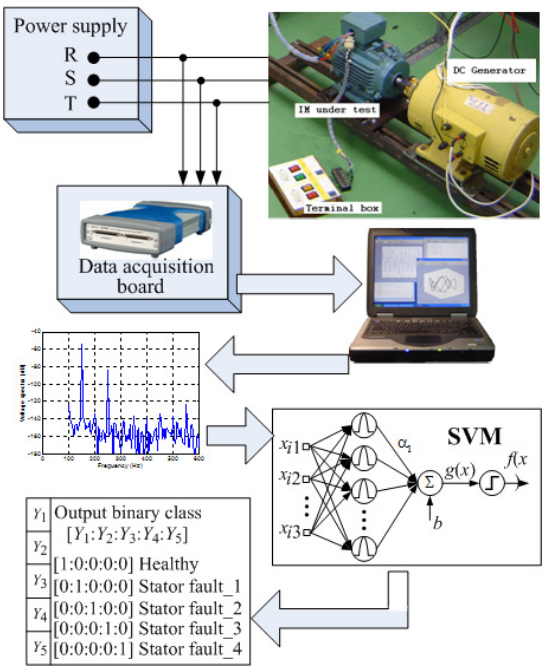
4. การแยกแยะด้วย SVM

การแยกแยะด้วย SVM ในลักษณะหลายคลาสสำหรับการประมวลผลขั้นสรุปผล (Post-processing) นั้นมีวิธีการแสดงในรูปที่ 5 โดยข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะจะได้ถูกนำมาใช้สำหรับทำการสอนและการทดสอบเพื่อวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้เทคนิคของ SVM สำหรับวิธีการวินิจฉัย ฟอลต์สเตเตอร์ที่ได้นำเสนอโดยใช้โปรแกรม JAVA ทั้งนี้เพื่อลดความซับซ้อนของสมการจึงได้ใช้ไลบรารี่ LIBSVM ที่สร้างขึ้นโดย Chin-Jen Lin ที่สามารถซ่อนความซับซ้อนของเทคนิค SVM ทำให้ผู้พัฒนาโปรแกรมสามารถพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้เทคนิค SVM ได้ง่ายขึ้น ซึ่งมีวิธีการอย่างละเอียดแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [10] และได้ใช้เคอร์เนล RBF (Radial Basis Function Kernel) ในการประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ 2 ค่าได้แก่ C และ γ

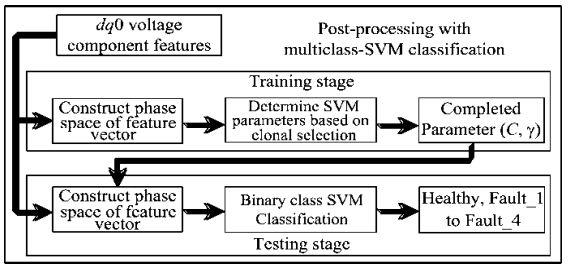
จากอัลกอริธึมของ SVM แบบหลายคลาสที่ได้กล่าวมานี้ เป็นการพัฒนามาจากการแยกแยะด้วย SVM ในแต่ละไบนารีมารวมกัน ซึ่งสามารถนำมาทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยความรุนแรงที่แตกต่างกัน 5 สภาวะ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบคลาสต่อคลาสด้วยผลของเอาต์พุตที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 6 โดยการใช้ SVM ที่มีวิธีการแบบ *one-against- the-rest* สำหรับการแยกแยะแบบไบนารีทั้ง 5 SVM โดยในแต่ละโมเดลของ SVM ได้ถูกสอนด้วย 1 ชุดข้อมูลของสภาวะมอเตอร์ที่มี



รูปที่ 5 อัลกอริธึมการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วย SVM



รูปที่ 6 ขั้นตอนการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วย SVM ในการวิจัยนี้



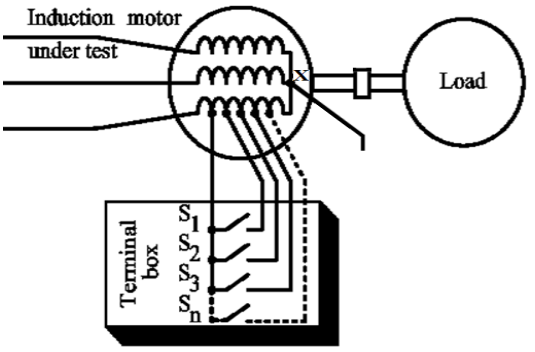
รูปที่ 7 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้การแยกแยะด้วย SVM

สุขภาพดี (Healthy Motor Condition) และอีก 4 โมเดลถูกสอนด้วยชุดข้อมูลของฟอลต์สเตเตอร์ ที่ความรุนแรง 4 สภาวะ ซึ่งทำให้ได้เมตริกมุ่งหมายเอาต์พุตมีมิติเป็น 1 แถวชุดข้อมูลเอาต์พุต ซึ่งมีด้วยกัน 5 คอลัมน์คือ $[Y_1\ Y_2\ Y_3\ Y_4\ Y_5]_{1\times5}$ แสดงให้เห็นในส่วนของ Output Binary Class ในรูปที่ 6

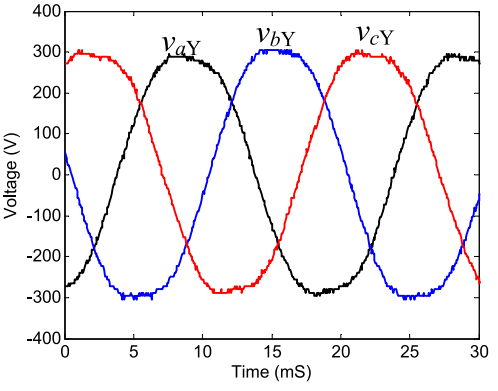
ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ C และ γ หมายถึงพารามิเตอร์เคอร์เนลของฟังก์ชันเรเดียลเบสิส (Radial Basis Function-specific Kernel Parameter) ซึ่งได้จากการปรับของโมเดล SVM กระบวนการปรับค่าทั้ง 2 นี้โดยใช้กริดเซิร์ช (Grid Search) ที่มีค่ามากกว่าสเปสของ C-γ ซึ่งค่าที่เหมาะสมของทั้ง C และ γ จะได้โดยการสอนโมเดล SVM ด้วย 4 ใน 5 ส่วนของชุดข้อมูลสำหรับการสอน และ 1 ใน 5 ส่วนสำหรับทดสอบโมเดล โดยจะเลือกโมเดลที่ให้ค่าผิดพลาดในการแยกแยะน้อยที่สุด (Validation data) ทั้งนี้ค่า C และ γ ที่ได้มานี้จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับนำมาใช้ใน LIBSVM เพื่อความเป็นไปได้ของการประมาณค่าและการสร้างฟังก์ชันสำหรับการประมาณค่าฟอลต์สเตเตอร์ในเทอมของความน่าจะเป็น ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้แสดงในลักษณะบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 7

5. ผลการทดลอง

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดลองมีพิกัด 2 Hp ใช้กับความถี่ 50 Hz 4 ขั้วแม่เหล็ก ในขณะทดสอบขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบวายจ่ายแรงดัน V_{ab} เท่ากับ 380 V_{rms} ใน 1 เฟสมีจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์เท่ากับ



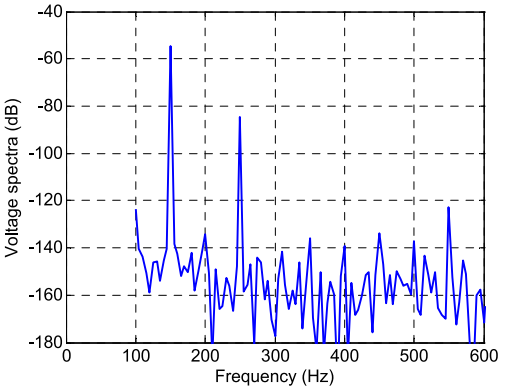
รูปที่ 8 ลักษณะของการต่อลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 9 สัญญาณแรงดันทั้ง 3 เฟสที่จ่ายให้กับมอเตอร์เมื่อเกิดสภาวะฟอลต์สเตเตอร์ 4%

282 รอบ มอเตอร์ถูกออกแบบให้ชุดของขดลวดเฟส W มีจุดต่อที่แยกออกมาสำหรับการทดสอบแสดงในรูปที่ 8 โดยมีลักษณะของการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เริ่มจาก 0%, 1%, 2%, 3% และ 4% ของจำนวนรอบทั้งหมด

ในการทดลองเริ่มจากข้อมูลสัญญาณแรงดันเฟสที่ตกคร่อมในแต่ละชุดขดลวดสเตเตอร์จะถูกตรวจจับและลดทอนโดยใช้โพรบแรงดัน การประมวลผลเริ่มจากข้อมูลของสัญญาณแรงดันจะถูกกรองด้วยตัวกรองวินโดว์ชนิดฮานนิ่ง (Hanning) ที่มีข้อดีคือจะทำให้การรั่วไหลของสเปคตรัม (Spectrum Leakage) มีค่าลดลง ต่อจากนั้นแปลงไปยังโดเมนความถี่โดยใช้อัลกอริธึมของ FFT เพื่อตรวจสอบและตรวจจับสเปคตรัมของฟอลต์สเตเตอร์เพื่อการวินิจฉัยต่อไป

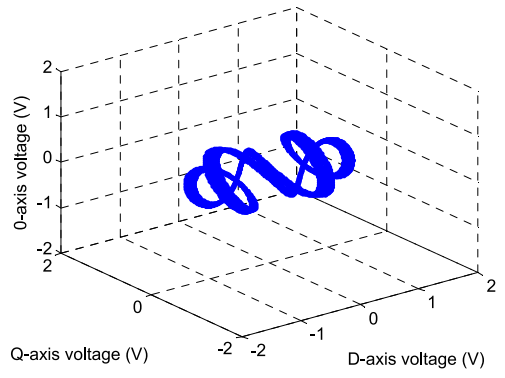


รูปที่ 10 สเปคตราแรงดัน v_{aY} ของรูปที่ 9

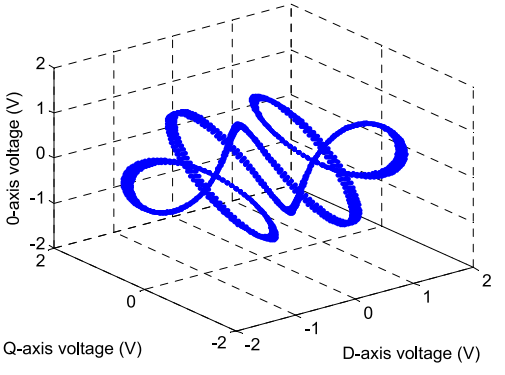
ผลการทดลองในรูปที่ 9 แสดงสัญญาณแรงดันทั้ง 3 เฟส เมื่อทำการวัดที่ขั้วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่สภาวะฟอลต์สเตเตอร์ลัดรอบ 4% และเมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์และผ่านการแปลงด้วย FFT แสดงผลการทดลองในรูปที่ 10 ในหน่วย dB เมื่อความถี่มูลฐานถูกกรองทิ้งไป เนื่องจากต้องการพิจารณาเฉพาะฟอลต์สเตเตอร์เพียงอย่างเดียว ก่อนใช้สมการที่ (10) ประมวลผลในลำดับต่อไป และพิจารณาเฉพาะสัญญาณความถี่มูลฐานด้วยสมการที่ (10)

ในการประเมินสมรรถนะของอัลกอริธึมสำหรับการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ที่ได้ออกแบบขึ้นนี้ ในขั้นต้นได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมของแต่ละองค์ประกอบแรงดัน โดยได้แยกออกเป็น 3 สัญญาณตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้แก่ องค์ประกอบแรงดัน v_{d_fst} สัญญาณองค์ประกอบแรงดัน v_{d_fst} และสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน v_{0_f1} ซึ่งการพัฒนาสัญญาณองค์ประกอบ v_{0_f1} นี้เพื่อแก้ปัญหาผลของฮาร์มอนิกที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของความถี่มูลฐานที่เกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ ที่สำคัญๆ ได้แก่ แกนเหล็กอิ่มตัวแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุล ซึ่งจะสามารถทำให้สัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ปรากฏขึ้นมาได้ (โดยจะไปปรากฏในสัญญาณ v_{d_fst} และ v_{q_fst} ซึ่งอาจจะปะปนรวมอยู่ในช่วงความถี่ของฟอลต์สเตเตอร์ได้) อย่างไรก็ตามในการวินิจฉัยมอเตอร์นี้ได้ควบคุมให้แหล่งจ่ายไฟมีระดับของแรงดันที่สมดุล เพื่อการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

การทดลองดังกล่าวพบว่าขนาดของสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน v_{d_fst}, v_{q_fst}, และ v_{0_f1} จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

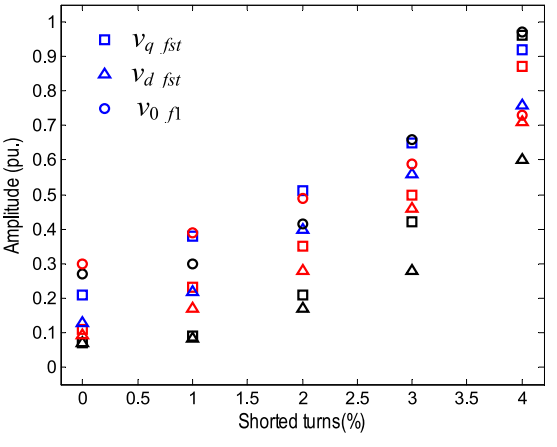


(ก)

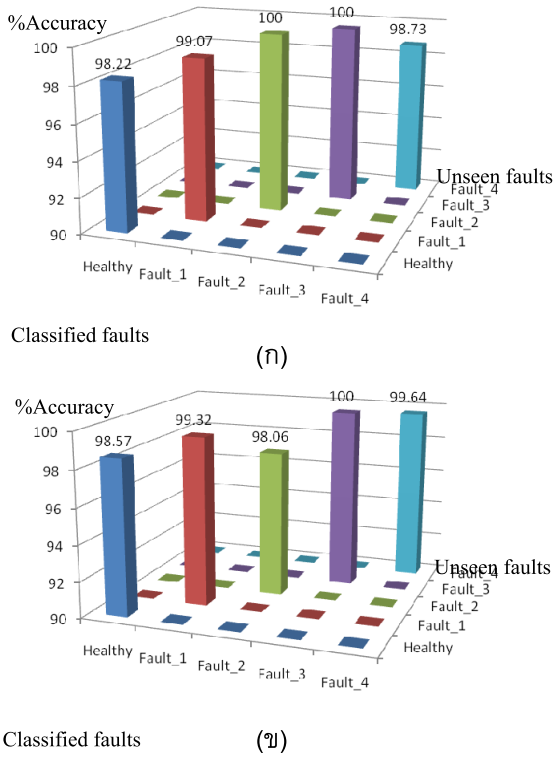


(ข)

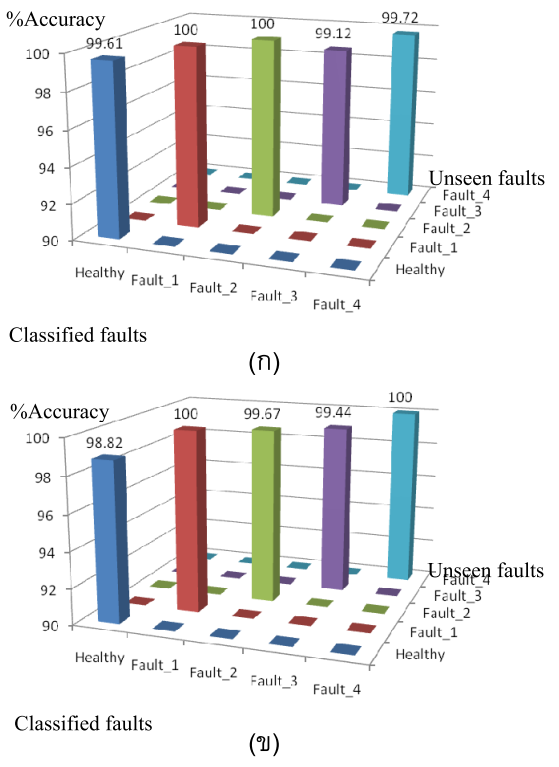
รูปที่ 11 เปรียบเทียบสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน v_{d_fst}, v_{q_fst}, และ v_{0_f1} เมื่อพล็อตในลักษณะ 3D (ก) กรณีลัดรอบ 2% (ข) กรณีลัดรอบ 4%



รูปที่ 12 เปรียบเทียบค่าประสิทธิผลขององค์ประกอบแรงดัน v_{d_fst}, v_{q_fst}, และ v_{0_f1} เมื่อการลัดรอบต่างกัน



รูปที่ 13 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้ SVM กับสัญญาณแรงดันเพียงอย่างเดียว (ก) กรณีทดสอบที่สภาวะ No Load และ (ข) กรณีทดสอบที่สภาวะ Full Load



รูปที่ 14 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้ SVM ร่วมกับสัญญาณแรงดันและกระแส (ก) กรณีทดสอบที่สภาวะ No Load และ (ข) กรณีทดสอบที่สภาวะ Full Load

ตามความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปแบบวงโคจรที่เพิ่มกว้างขึ้นสัมพันธ์กับสภาวะความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ใน 3 มิติ (3D) แสดงในรูปที่ 11 จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางที่เป็นไปได้ของการนำมาวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยเทคนิคที่นำเสนอ โดยในรูปที่ 12 ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนอีกครั้งหนึ่งถึงการเพิ่มปริมาณขึ้นในหน่วยของค่าประสิทธิผลต่อระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ที่สูงขึ้น

จากการทดสอบสมรรถนะการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งได้ออกแบบโดยใช้เทคนิคของ SVM ที่ได้นำเสนอนี้ สามารถทำได้โดยการทดสอบกับข้อมูลของฟอลต์สเตเตอร์ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน (Unseen Fault) ทั้งนี้หลังจากทำการสอนแล้วจะได้ค่าพารามิเตอร์ C และ γ ที่เหมาะสม แล้วจึงได้ทำการวินิจฉัยมอเตอร์กับข้อมูลฟอลต์สเตเตอร์ใหม่ ผลการทดลองการประเมินสมรรถนะของระบบหลายการแยกแยะด้วยเทคนิค SVM ของแต่ละความรุนแรงฟอลต์สเตเตอร์สามารถแสดงได้ในรูปที่ 13 จากผลการทดลองทั้งสองกรณีนี้ยืนยันได้ว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ได้อย่างถูกต้องมากกว่า 98%

อีกการทดลองหนึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับเทคนิค MCSA โดยใช้ 4 สเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์ตามที่ได้กล่าวมาทำให้มีข้อมูลอินพุตหรือคุณลักษณะเฉพาะที่นำมาใช้สอนมีจำนวนเพิ่มขึ้นแสดงดังสมการที่ (12) ผลการทดลองการประเมินสมรรถนะของระบบหลายการแยกแยะด้วยเทคนิค SVM ของแต่ละความรุนแรงฟอลต์สเตเตอร์

สามารถแสดงได้ในรูปที่ 14 จากผลการทดลองทั้งสองกรณีนี้ยืนยันได้ว่าเทคนิคองค์ประกอบแรงดัน *dq*0 ร่วมกับเทคนิค MCSA สามารถทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ได้อย่างถูกต้องมากกว่า 99%

$$X=[v_{d_fst}, v_{q_fst}, v_{0_f1}, i_{st_1}, i_{st_2}, i_{st_3}, i_{st_4}]_{1\times7} \quad (12)$$

จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการใช้สัญญาณองค์ประกอบแรงดันเพียงอย่างเดียว กับกรณีที่ใช้สัญญาณกระแสสเตเตอร์นำมาร่วมพิจารณาด้วย พบว่าผลการวินิจฉัยเปรียบเทียบดังกล่าวให้ความแม่นยำด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากกว่า 98% และ 99% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเพียง 1% จะไม่ได้มีผลต่อความแม่นยำมากนักแต่เมื่อพิจารณาในด้านของความน่าเชื่อถือแล้ว การตรวจวิเคราะห์ในลักษณะของการพิจารณาทั้งสัญญาณแรงดันและกระแสแล้วย่อมทำให้เกิดความน่าเชื่อถือได้มากกว่า

6. สรุป

การตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ที่นำเสนอในบทความนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SVM ในการแยกแยะและวินิจฉัยถึงระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ที่ปรากฏ ทั้งนี้จากการทดลองเมื่อใช้สัญญาณแรงดันสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส แล้วนำมาผ่านการแปลงปาร์คด้วยวิธีการที่นำเสนอทำให้ได้ 3 คุณลักษณะเฉพาะสอนให้กับ SVM ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการใช้สเปคตรัมฟอลต์กระแสสเตเตอร์ 4 อันดับในสัญญาณกระแสสเตเตอร์ (รวมเป็น 7 คุณลักษณะเฉพาะ) ผลการทดลองที่ได้ สามารถทำให้การวินิจฉัยระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ที่ได้มีความแม่นยำสูงขึ้น ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากกว่า 99%

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] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three–phase squirrel–cage induction motors," *IEEE Trans. on Industry Appl.*, vol. 28, no. 4, pp. 921–937, July/ Aug. 1992.

[3] 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.

[4] 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.

[5] P. Garcia, F. Briz, M. W. Degner, and A. B. Diez, "Diagnostics of induction machines using the zero sequence voltage," *IEEE–IAS Annu. Meeting*, pp. 735–742, Oct. 2004.

[6] 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.

[7] P. C. Krause, *Analysis of electric machinery*, McGraw–Hill Book Company, 1986.

[8] C. Tangsiriworakul and C. Manop, "Stator fault diagnosis in induction motors based on SVM classification," *The Journal of KMUTNB*, vol. 21, no. 3, Sep.–Dec. 2011 (in Thai).

[9] J. Thammaprasit, C. Manop, C. Tangsiriworakul, and S. Tadsuan, "A diagnosis of stator winding short turns winding in induction motors using MCSA," *EECON–27*, Khon Kaen University, 11–12 Nov. 2547 (in Thai).

[10] C. C. Chang and C. J. Lin, "LIBSVM: A library for support vector machines, software available." [Online]. Available : www.csie.ntu.edu.tw