



การพัฒนา MATLAB GUI สำหรับการวินิจฉัยฟอลต์มอเตอร์เหนี่ยวนำ

ชาญชัย กุศลจิตกรณ์* ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล และ เอกลักษณ์ ภูญชรจันทร์

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เฉลิมชาติ มานพ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

* ผู้มีพันธฺ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-1859-0206 อีเมล: ckj@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.03.008

รับเมื่อ 22 กรกฎาคม 2559 ตอปรับเมื่อ 4 ตุลาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 31 มีนาคม 2560

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ และฟอลต์โรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำบนพื้นฐาน GUI ของโปรแกรม MATLAB การตรวจจับฟอลต์เหล่านี้ ได้ใช้การตรวจจับจากสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นจากความล้มเหลวของสเตเตอร์และโรเตอร์ เทคนิคการวิเคราะห์ที่สำคัญคือการวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor Current Signature Analysis: MCSA) สำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์ได้เลือกใช้วิธีการอัจฉริยะ 2 วิธีคือ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine: SVM) โดยโปรแกรมจะเริ่มต้นในการวิเคราะห์เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลที่สำคัญเข้ามาคือข้อมูลกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ในโดเมนเวลา แล้วโปรแกรมจะวิเคราะห์และแสดงผลในหน้าต่างของ MATLAB GUI ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการอ่านผลและการวางแผนการบำรุงรักษา ทั้งนี้สมรรถนะการแยกแยะฟอลต์มอเตอร์เหนี่ยวนำได้ผลความถูกต้องมากกว่า 85%

คำสำคัญ: MATLAB GUI, การวินิจฉัยฟอลต์, การวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์, ความล้มเหลวของมอเตอร์, เทคนิคปัญญาประดิษฐ์



Development of MATLAB GUI for Induction Motor Fault Diagnosis

Chanchai Kusoljittakorn* Chanwit Tangsiriworakul and Eakalak Kulchonchan

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

Chalermchat Manop

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08-1859-0206, E-mail: ckj@kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.03.008

Received 22 July 2016; Accepted 4 October 2016; Published online: 31 March 2017

© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper presents a software development for stator and rotor fault diagnoses in induction motors based on the MATLAB GUI. The concept of the detection is to detect the fault spectra caused by the failures of the stator and rotor. The important analytical technique is the Motor Current Signature Analysis (MCSA). Two intelligent methods including an Artificial Neural Network (ANN) and a Support Vector Machine (SVM) are selected to carry out fault classification and diagnosis. The software starts to analyze when users enter the important information i.e. the motor stator current in the time domain. Subsequently, the software will analyze and show the results in the window of the MATLAB GUI, which is easy to read the results and to plan the maintenance. In addition, the fault classification performances are satisfactory with more than 85% accuracy.

Keywords: MATLAB GUI, Fault Diagnosis, Motor Current Signature Analysis, Motor Failure, Artificial Intelligence

1. บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าโดยเฉพาะชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) มีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนทาน ค่าการบำรุงรักษาต่ำ ราคาถูกกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่น รวมถึงเทคนิคการควบคุมที่ยอดเยี่ยม ทำให้ในระบบอุตสาหกรรมสมัยใหม่ได้เลือกใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้เป็นจำนวนมาก ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ปั่นคอนเวเยอร์ ระบบการผลิต การบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น

สมรรถนะที่สูงขึ้นของอุปกรณ์โซลิตสเตตและตัวประมวลผล เช่น ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processor: DSP) ทำให้เทคนิคการควบคุมที่ยุ่ยากซับซ้อน สามารถถูกนำมาควบคุมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้วงานทางด้าน การบำรุงรักษาโดยการประมวลผลจากสัญญาณฟอลต์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์เองก็ได้ถูกนำมาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง เพื่อการวินิจฉัยความล้มเหลว (Failure) ของส่วนประกอบต่างๆ นำไปสู่การวางแผนซ่อมบำรุงเชิงป้องกันต่อไป (Preventive Maintenance)

อย่างไรก็ตาม ส่วนใหญ่แล้วการทำงานของมอเตอร์มักอยู่ในสถานะที่อันตรายและสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ปิโตรเคมี ภายใตฝุ่นละออง ก๊าซอันตรายที่มีคุณสมบัติการกัดกร่อน เป็นต้น เป็นผลให้มอเตอร์มีความอ่อนไหวอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ต่อประเภทของความผิดปกติที่สามารถเกิดขึ้นกับตัวมอเตอร์เอง ความล้มเหลวของมอเตอร์ที่ไม่สามารถตรวจพบได้ในระยะแรก อาจจะรุกรามกลายเป็นความเสียหายที่รุนแรงตามมา ที่สำคัญได้แก่ ค่าใช้จ่ายที่ต้องสูญเสียไปในขณะที่ต้องหยุดกระบวนการผลิต ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ตลอดจนการสูญเสียวัตถุดิบ เป็นต้น [1], [2]

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์และแท่งตัวนำโรเตอร์ของมอเตอร์ที่มักเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งนำมาสู่การพัฒนาเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวินิจฉัยฟอลต์มอเตอร์ด้วย MATLAB GUI

2. ฟอลต์มอเตอร์และการตรวจจับ

เทคนิคการตรวจจับฟอลต์ (Fault Detection)



ตัวนำสเตเตอร์



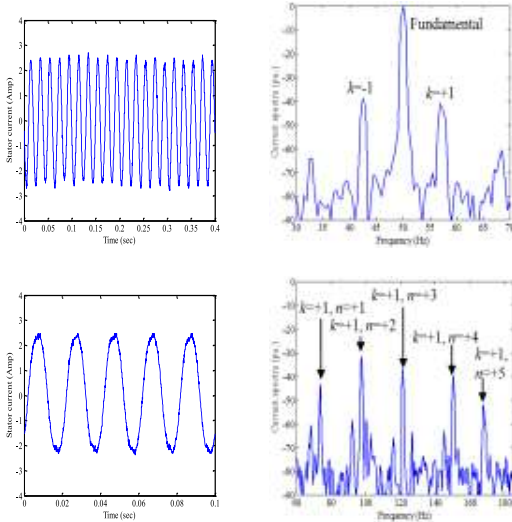
แท่งตัวนำโรเตอร์



รูปที่ 1 ตัวอย่างความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์และแท่งตัวนำโรเตอร์ของมอเตอร์ที่มักเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม

สมัยใหม่จะเป็นการพิจารณาร่วมกันระหว่างการประมวลผลข้อมูลขั้นสูงและแนวทางใหม่ๆ ทั้งการใช้เพียงเซ็นเซอร์ที่มีราคาไม่สูงมากนักไปจนถึงการใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง เช่น การใช้เครื่องมือวัดเพื่อตรวจสอบการดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) ทั้งนี้การพัฒนาทางด้านซอฟต์แวร์เพื่อการวินิจฉัยจะสามารถช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ เช่น การวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ในโดเมนเวลา (Time Domain) การวิเคราะห์จากสเปกตรัมฟอลต์ในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ซึ่งการวิเคราะห์จากสเปกตรัมฟอลต์นี้ จะเป็นการประมวลผลเพื่อตรวจจับความถี่ ขนาดและเฟส [3], [4]

ความล้มเหลวของส่วนประกอบมอเตอร์ที่จะพิจารณาในบทความนี้มี 2 ส่วนประกอบด้วยกัน คือ ความล้มเหลวของแท่งตัวนำโรเตอร์และความล้มเหลวของสเตเตอร์ ซึ่งความล้มเหลวของส่วนประกอบมอเตอร์นี้



รูปที่ 2 ผลการทดลองการวิเคราะห์เบื้องต้น (แถบบน) พอลต์โรเตอร์ และ (แถบล่าง) พอลต์สเตเตอร์ โดยใช้สัญญาณกระแสสเตเตอร์ในโดเมนเวลาและความถี่

จะถูกพิจารณาจากสเปกตรัมพอลต์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณกระแสสเตเตอร์ การตรวจจับสเปกตรัมพอลต์โรเตอร์หรือเรียกเป็นพอลต์โรเตอร์แตก (Broken Rotor Fault, f_{br}) มีความถี่ที่เกิดขึ้นดังสมการคือ [5], [6]

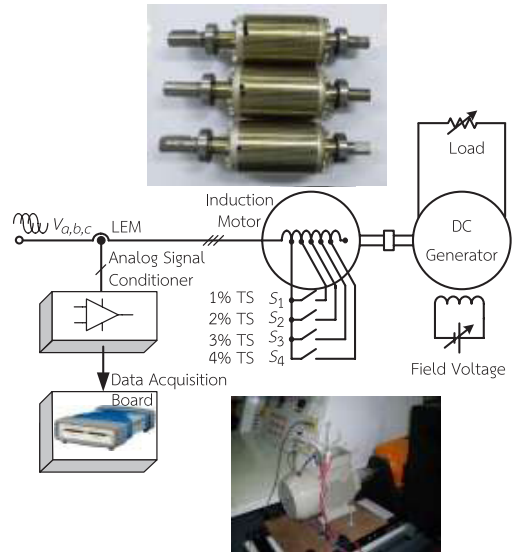
$$f_{br} = f_i(1 \pm 2s) \quad (1)$$

และสเปกตรัมพอลต์สเตเตอร์หรือเรียกเป็นพอลต์ตัวนำสเตเตอร์ลัดรอบ (Stator Shorted-turns Fault, f_{st}) ที่มีสมการของความถี่ที่เกิดขึ้น คือ

$$f_{st} = f_i \left\{ \frac{n}{p}(1-s) \pm k \right\} \quad (2)$$

เมื่อ f_i คือค่าความถี่มูลฐาน P คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก s คือค่าสลลิป n คือ 1, 2, 3, ... และ k คือ 1, 3, 5, ...

เมื่อได้ทำการวิเคราะห์สมการที่ (1) กรณีมอเตอร์ทำงานตลอดย่านสภาวะโหลด คือเมื่อมอเตอร์ทำงานที่โหลดเบาสลลิป s จะมีค่าเข้าใกล้ 0 (ศูนย์) พบว่าสเปกตรัมพอลต์โรเตอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ใกล้กับความถี่มูลฐาน



รูปที่ 3 โครงสร้างของระบบการตรวจจับพอลต์มอเตอร์

(ประมาณ f_i) และกรณีทำงานที่พิกัด (ยกตัวอย่างกรณีมอเตอร์ที่นำมาทดสอบ) มีค่าสลลิป $s \approx 0.0667$ สเปกตรัมพอลต์โรเตอร์จะออกห่างจาก f_i ซึ่งให้ผลการตรวจจับที่ดีกว่า และถ้าพิจารณาในโดเมนเวลาแล้วจะพบการแกว่งของสัญญาณกระแสสเตเตอร์สำหรับในส่วนของสเปกตรัมพอลต์สเตเตอร์จะปรากฏอยู่ห่างออกไปจากความถี่ f_i ทำให้เกิดเป็นสัญญาณรบกวนรวมอยู่ในสัญญาณมูลฐานกระแสสเตเตอร์ในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ตามที่กล่าวมา แสดงในรูปที่ 2

การพิจารณาดังกล่าวนำมาสู่การออกแบบทางโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อจำลองการเกิดขึ้นของพอลต์โรเตอร์และพอลต์สเตเตอร์แสดงในรูปที่ 3 ทำการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส พิกัด 2 แรงม้า โดยกรณีของพอลต์โรเตอร์ได้ทำการเจาะรูที่แท่งตัวนำของโรเตอร์เป็นจำนวน 1 แท่ง (1 BB) 2 แท่ง (2 BB) และ 3 แท่ง (3 BB) ที่ตำแหน่งใกล้กับวงแหวนลัดวงจร (End Ring) และสำหรับพอลต์สเตเตอร์ได้ออกแบบพอลต์สเตเตอร์ที่สภาวะการลัดวงจรประเภทรอบถึงรอบที่ 1% (1% TS), 2% (2% TS), 3% (3% TS) และ 4% (4% TS) ของจำนวนรอบทั้งหมดใน 1 เฟส มอเตอร์ที่ทำการทดสอบได้ดับปลั๊กเข้ากับโหลดซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

3. อัลกอริทึม การตรวจจذبฟอลต์มอเตอร์

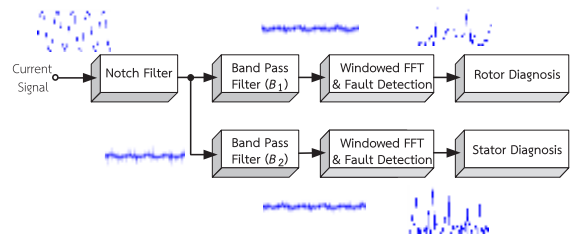
3.1 การตรวจจذبฟอลต์ในมอเตอร์

บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4 (ก) แสดงถึงกระบวนการของการประมวลผลสัญญาณฟอลต์ในแต่ละขั้นตอน เริ่มจากตั้งแต่ข้อมูลของสัญญาณกระแสเตเตอร์เพียง 1 เฟสเท่านั้น ที่ได้มาจากอุปกรณ์ที่ใช้หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall-effect) ในรูปที่ 3 แล้วนำมาผ่านตัวกรองนอตช์ (Notch Filter) ที่ความถี่ตัด 50 Hz เพื่อทำการตัดสัญญาณมูลฐานออกไป ต่อจากนั้นทำการแยกออกเป็น 2 สัญญาณ โดยนำมาผ่านตัวกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) ที่มีช่วงความถี่สัมพันธ์กับช่วงของความถี่ของฟอลต์โรเตอร์ (B_1) และฟอลต์สเตเตอร์ (B_2) ซึ่งหมายถึงการยอมให้เฉพาะสเปกตรัมฟอลต์เท่านั้นที่สามารถผ่านออกไปได้

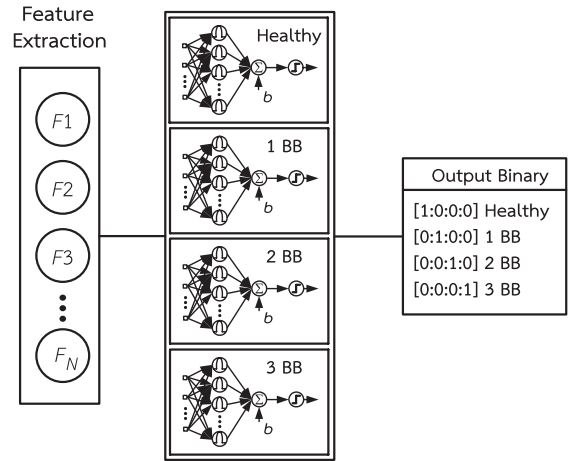
หลังจากนั้นสัญญาณกระแสเตเตอร์ในโดเมนเวลาจำนวน 2 ชุด คือสัญญาณฟอลต์โรเตอร์ B_1 และสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ B_2 จะถูกทำการแปลงไปยังโดเมนความถี่ด้วยเทคนิคของ FFT ที่ได้พัฒนาขึ้น กล่าวคือสัญญาณกระแสเตเตอร์จะถูกกรองอีกครั้งด้วยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขั้นสูงด้วยวิธีหน้าต่างต่าง (Window Filter) การอินเตอร์โพลेट FFT และความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum Density) ซึ่งการออกแบบข้อมูลทั้งหมดนี้จะมีผลต่อสเปกตรัมในโดเมนความถี่ที่มีความโดดเด่นอย่างชัดเจนมาก แล้วจึงส่งต่อไปยังบล็อกถัดไป คือการวินิจฉัยความล้มเหลวของทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์บนพื้นฐานของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียมต่อไป

3.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์

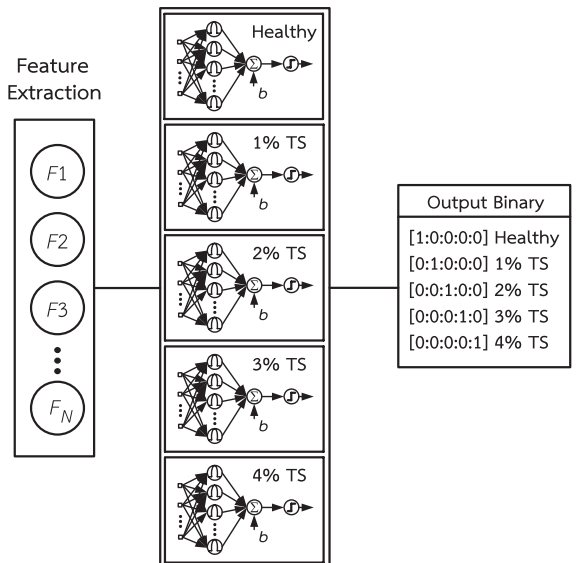
อัลกอริทึมของเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ที่น่าเสนอนี้ ได้ใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยการพัฒนาให้สามารถทำการแยกแยะในลักษณะหลายคลาสได้ ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากการแยกแยะในแต่ละไบนารีมารวมกัน เป็นการเปรียบเทียบคลาสต่อคลาสด้วยผลของเอาต์พุตที่แตกต่างกันจึงสามารถทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์มอเตอร์ด้วยความรุนแรงที่แตกต่างกันได้



(ก) อัลกอริทึมการตรวจจذبฟอลต์มอเตอร์



(ข) ระบบการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์โรเตอร์



(ค) ระบบการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์

รูปที่ 4 อัลกอริทึมและระบบการวินิจฉัยฟอลต์มอเตอร์ ที่ได้ออกแบบขึ้นบนพื้นฐานของ SVM และ NN

ทั้งนี้จุดมุ่งหมายของแต่ละโมเดลจะให้เอาต์พุตออกมาระหว่าง 0 หรือ 1 ที่สอดคล้องกับผลการแยกแยะว่าใช่หรือไม่ใช่ ของแต่ละโมเดล ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้ทั้งซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นที่สร้างมาจากโมเดลของฟอลต์ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์ในลักษณะหลายการแยกแยะได้ โดยการใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนจะเป็นวิธีการแบบ One-against-the-rest สำหรับการแยกแยะแบบไบนารีทั้งหมดของโมเดล และในส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม การฝึกสอนจะใช้อัลกอริทึมการแพร่กลับ (Back Propagation) และใช้ฟังก์ชันแอคติเวชัน (Activation Function) ชนิดซิกมอยด์ (Sigmoid) อัลกอริทึมการแยกแยะด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอนี้ได้สร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB รูปที่ 4 (ข) และรูปที่ 4 (ค) แสดงระบบการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์โรเตอร์และฟอลต์สเตเตอร์ตามลำดับ กล่าวคือฟอลต์โรเตอร์ประกอบด้วยระดับความรุนแรง 4 สภาวะ และฟอลต์สเตเตอร์ประกอบด้วย 5 สภาวะ โดยในแต่ละโมเดลจะถูกสอนด้วยชุดข้อมูลของสภาวะมอเตอร์สุขภาพดี (Healthy Motor) และชุดข้อมูลของฟอลต์ด้วยระดับความรุนแรงต่างๆ (Faulty Motor)

3.3 การดึงคุณลักษณะเฉพาะ

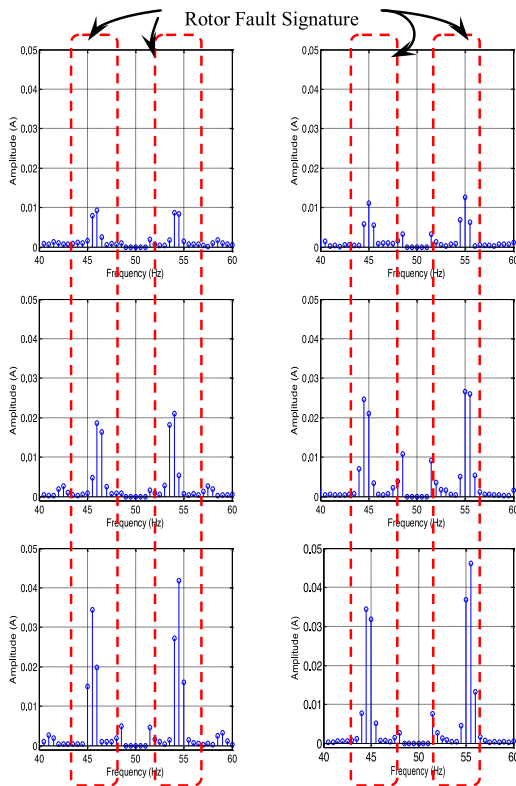
สรุประบบการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์โรเตอร์จะได้เมทริกซ์มุ่งหมายเอาต์พุตมีมิติเป็น 1 แถว มีด้วยกัน 4 ไบนารี (คอลัมน์) คือ [Healthy:1 BB:2 BB:3 BB] ฟอลต์สเตเตอร์ได้เมทริกซ์มุ่งหมายเอาต์พุตมีมิติเป็น 1 แถวเช่นกัน แต่มีด้วยกัน 5 ไบนารี (คอลัมน์) คือ [Healthy:1% TS: 2% TS: 3% TS: 4% TS] ทั้งนี้ชุดข้อมูลการสอนจะได้มาจากการจัดเก็บข้อมูลภายใต้การทดลองที่สภาวะโหลด และเวลาที่จัดเก็บข้อมูล แล้วนำมาคำนวณหาคุณลักษณะเฉพาะที่คำนวณตามหลักสถิติตั้งพารามิเตอร์คุณลักษณะเฉพาะในตารางที่ 1 เรียกเป็นการประมาณค่าสเปกตรัมในโดเมนความถี่ ได้เป็น 1 ชุดข้อมูลที่มีทั้งหมด 12 คุณลักษณะเฉพาะ ทำการ

ทดลองซ้ำเพื่อให้ได้ชุดข้อมูลทั้งหมด 30 ชุดข้อมูลต่อคลาส (ต่อโมเดล) จากข้อมูลที่ได้ทั้งหมดนี้ จะถูกนำไปสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียมต่อไป เพื่อดูเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของผลการแยกแยะข้อมูลที่ได้ ภายใต้แนวคิดของทั้งฟอลต์โรเตอร์และฟอลต์สเตเตอร์จะมีเพียงบางคุณลักษณะเฉพาะเท่านั้น ที่มีประสิทธิภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวินิจฉัยความล้มเหลวของโรเตอร์และสเตเตอร์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

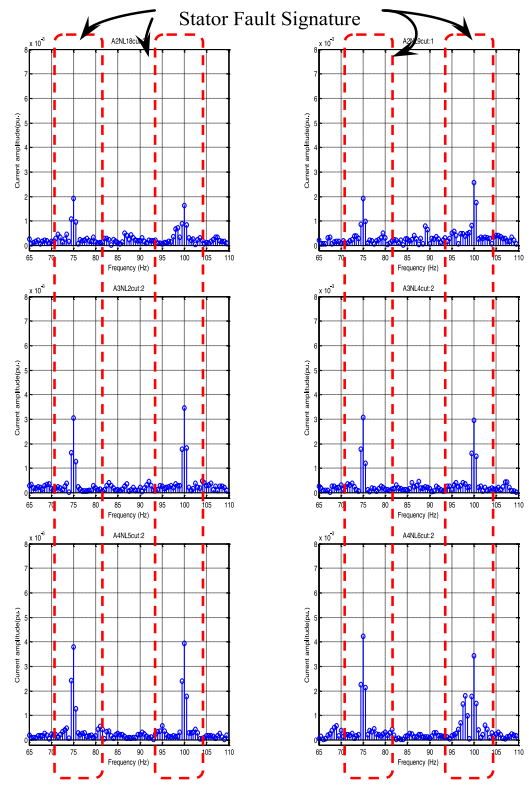
การดึงคุณลักษณะเฉพาะในตารางที่ 1 ได้ถูกคำนวณจากสถิติสเปกตรัมสัญญาณกระแสสเตเตอร์ในโดเมนความถี่ที่ได้เตรียมไว้ในรูปที่ 4 (ก) โดยแบ่งออกเป็น 12 พารามิเตอร์ที่มีคุณลักษณะเฉพาะ เมื่อพารามิเตอร์ F_1 สามารถบ่งชี้พลังงานการสั่นในโดเมนความถี่ พารามิเตอร์ $F_2 - F_4, F_6$ และ F_{10} สามารถอธิบายคอนเวอร์เจนซ์ของสเปกตรัมกำลัง พารามิเตอร์ F_5 และ $F_7 - F_9$ สามารถแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของความถี่หลัก และพารามิเตอร์ F_{11} และ F_{12} สามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของขนาดได้เป็นอย่างดี [7], [8]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์คุณลักษณะเฉพาะในโดเมนความถี่

$F_1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s(k)$	$F_2 = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (s(k) - F_1)^2$
$F_3 = \frac{1}{K(\sqrt{F_2})^3} \sum_{k=1}^K (s(k) - F_1)^3$	$F_4 = \frac{1}{KF_2^2} \sum_{k=1}^K (s(k) - F_1)^4$
$F_5 = \frac{\sum_{k=1}^K f_k s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}$	$F_6 = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (f_k - F_5)^2 s(k)}$
$F_7 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K f_k^2 s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}}$	$F_8 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K f_k^4 s(k)}{\sum_{k=1}^K f_k^2 s(k)}}$
$F_9 = \frac{\sum_{k=1}^K f_k^2 s(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K s(k) \sum_{k=1}^K f_k^4 s(k)}}$	$F_{10} = \frac{F_6}{F_5}$
$F_{11} = \max\{f_1(1-2s)\}$	$F_{12} = \max\{f_1(1+2s)\}$
$F_{11} = \max\left\{f_1 \left(\frac{n}{p}(1-s) - k\right)\right\}$	$F_{12} = \max\left\{f_1 \left(\frac{n}{p}(1-s) + k\right)\right\}$



รูปที่ 5 ตัวอย่างของสเปกตรัมฟอลต์โรเตอร์ (แถวที่ 1 ถึง 3) ตัวนำโรเตอร์แตก 1 แทง 2 แทง และ 3 แทง ตามลำดับ (คอลัมน์ที่ 1 ถึง 2) ทดสอบด้วยสภาวะโหลดมอเตอร์ 75% และ 100% ตามลำดับ



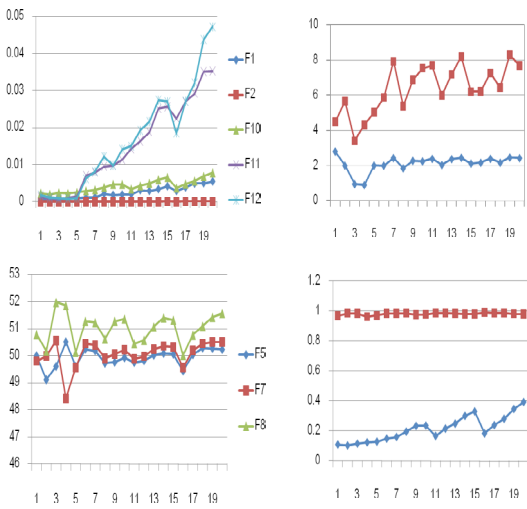
รูปที่ 6 ตัวอย่างของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ (แถวที่ 1 ถึง 3) สเตเตอร์ลัดรอบ 1%, 2% และ 3% ตามลำดับ (คอลัมน์ที่ 1 ถึง 2) ทดสอบด้วยสภาวะโหลดมอเตอร์ 75% และ 100% ตามลำดับ

4. ผลการทดลอง

การทดลองในขั้นต้นเพื่อให้ได้ข้อมูลของฟอลต์โรเตอร์และฟอลต์สเตเตอร์ จึงได้ทำการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ตามที่ได้ออกแบบไว้เพื่อจำลองการเกิดฟอลต์ แล้วประมวลผลโดยใช้อัลกอริทึมที่ได้สร้างขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้ได้ชุดของข้อมูลฟอลต์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ นอกจากมอเตอร์จะถูกจ่ายด้วยแหล่งจ่ายคลื่นไซน์แล้ว ยังได้ทำการทดลองเมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดที่ต่างกัน และเวลาที่ต่างกันด้วยผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 โดยพบว่าสเปกตรัมของฟอลต์โรเตอร์และสเปกตรัมของฟอลต์สเตเตอร์ที่เกิดขึ้นมีความโดดเด่นอย่างชัดเจนในช่วงความถี่ของมัน

จากผลการทดลองพบว่าสเปกตรัมฟอลต์ของทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์จะมีขนาดที่สูงขึ้นตามระดับความรุนแรงของความล้มเหลวที่เกิดขึ้น กล่าวคือในสเปกตรัมของฟอลต์โรเตอร์ขนาดที่สูงขึ้นจะสัมพันธ์กับการแตกของจำนวนของแท่งตัวนำโรเตอร์ และสำหรับขนาดของฟอลต์สเตเตอร์จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนของรอบของตัวนำสเตเตอร์ที่ลัดวงจร (คิดเป็น % ของจำนวนรอบทั้งหมดใน 1 เฟส) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้ว

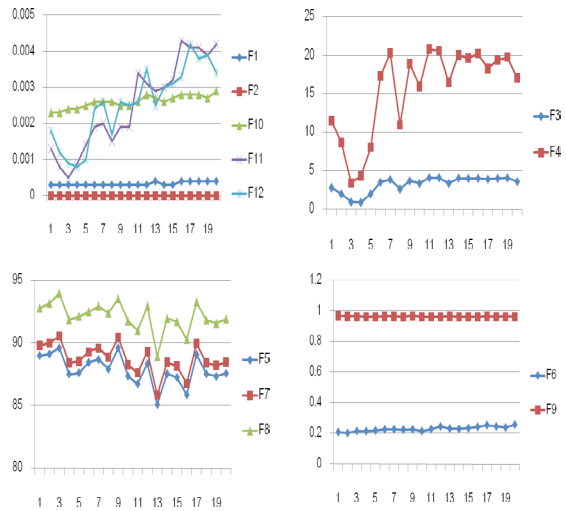
การประมาณค่าสเปกตรัมฟอลต์ของทั้งฟอลต์โรเตอร์และฟอลต์สเตเตอร์ ด้วยการดึงคุณลักษณะเฉพาะทั้ง 12 คุณลักษณะนั้น เป็นการพิจารณาจากช่วงของสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้น แล้วทำการคัดเลือกคุณลักษณะ



รูปที่ 7 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าของข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะ $F_1 - F_{12}$ ของฟอลต์โรเตอร์ เมื่อแกน X คือลำดับข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์ปกติ แท่งตัวนำโรเตอร์แตก 1 แท่ง 2 แท่ง และ 3 แท่ง ตามลำดับ (ตัวอย่างละ 5 ข้อมูลรวมเป็น 20 ข้อมูล)

เฉพาะที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยระดับความรุนแรงของฟอลต์ทั้ง 2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการวินิจฉัยที่ได้จะถูกแสดงผลออกที่หน้าต่างของ MATLABGUI ซึ่งหน้าต่าง MATLAB GUI นี้ถูกออกแบบให้สามารถแสดงสัญญาณกระแสสเตเตอร์ทั้งในโดเมนเวลาและสเปกตรามันในโดเมนความถี่ ในส่วนของขั้นตอนการวินิจฉัยผู้ใช้ซอฟต์แวร์การวินิจฉัยมอเตอร์นี้ยังสามารถเลือกเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ได้ 2 วิธี คือซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนหรือโครงข่ายประสาทเทียมได้อีกด้วย โดยผลการวินิจฉัยที่ได้จะออกมาในลักษณะของภาพส่วนประกอบของมอเตอร์ที่เกิดความล้มเหลวพร้อมทั้งตัวเลขระบุเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของผลการวินิจฉัยด้วย

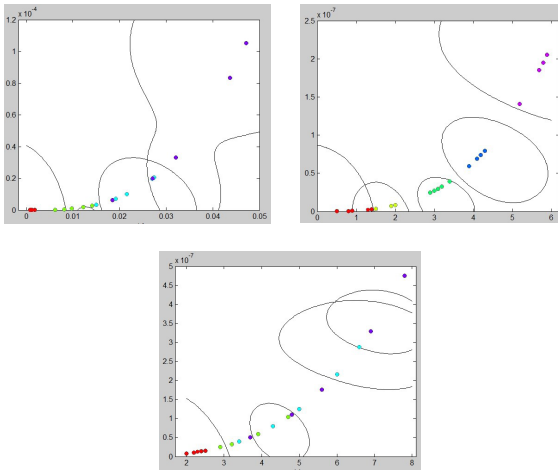
ผลการคำนวณหาคุณลักษณะเฉพาะทั้ง 12 ค่า ของชุดข้อมูลของทั้งฟอลต์โรเตอร์และฟอลต์สเตเตอร์แสดงในลักษณะของกราฟได้ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อทำการแยกแยะระดับ



รูปที่ 8 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าของข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะ $F_1 - F_{12}$ ของฟอลต์โรเตอร์ เมื่อแกน X คือลำดับข้อมูลของแท่งตัวนำโรเตอร์ปกติ สเตเตอร์ลัดรอบ 1%, 2% และ 3% ตามลำดับ (ตัวอย่างละ 5 ข้อมูล)

ความรุนแรงของฟอลต์พร้อมทั้งทำการวินิจฉัยออกมา ทั้งนี้จากค่าคุณลักษณะเฉพาะที่ได้นี้ พบว่ามีบางคุณลักษณะเฉพาะเท่านั้นที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการแยกแยะฟอลต์โรเตอร์และฟอลต์สเตเตอร์ได้ ซึ่งจากการพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องแล้ว (% Accuracy) จะใช้คุณลักษณะเฉพาะที่มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากกว่า 85% ขึ้นไปมาประยุกต์ใช้ ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องจะได้จากความสามารถในแบ่งกลุ่มของชุดข้อมูลว่าสามารถแยกได้หรือไม่ดังตัวอย่างการแบ่งกลุ่มของฟอลต์ในรูปที่ 9 สรุปคือฟอลต์โรเตอร์ใช้คุณลักษณะเฉพาะ F_{11} และ F_{12} ฟอลต์สเตเตอร์ใช้คุณลักษณะเฉพาะ F_6 และ F_{12} เท่านั้น

หลังจากได้ทำการเลือกคุณลักษณะเฉพาะที่มีความเหมาะสมต่อการแยกแยะฟอลต์มอเตอร์แล้ว จึงได้ทำการทดสอบสมรรถนะของการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้เทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและเทคนิคของโครงข่ายประสาทเทียม การทดสอบสมรรถนะของเทคนิคปัญญา

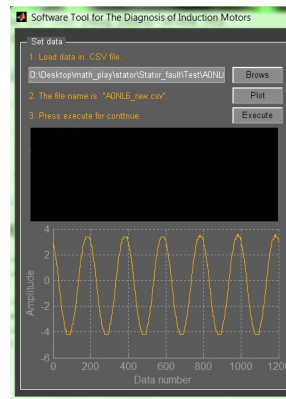
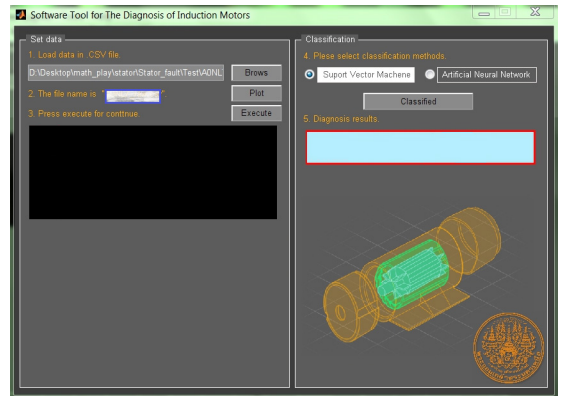


รูปที่ 9 ตัวอย่างผลการแยกแยะของชุดข้อมูลฟอลต์ด้วยเทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ประดิษฐ์ทั้ง 2 สามารถทำได้โดยการทดสอบกับข้อมูลของฟอลต์มอเตอร์ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน (Unseen Fault) โดยผลการทดลองดังกล่าวพบว่าเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ทั้ง 2 สามารถนำมาทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์โรเตอร์และฟอลต์สเตเตอร์ได้อย่างถูกต้องด้วยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่มากกว่า 85%

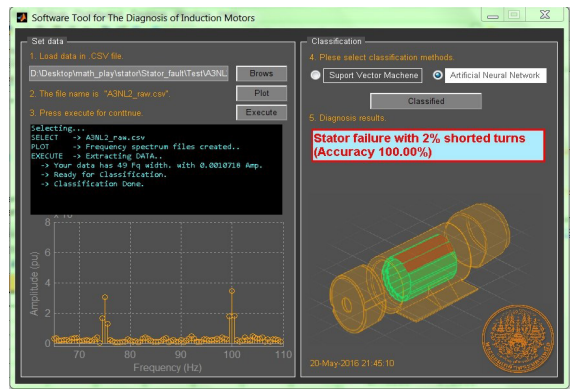
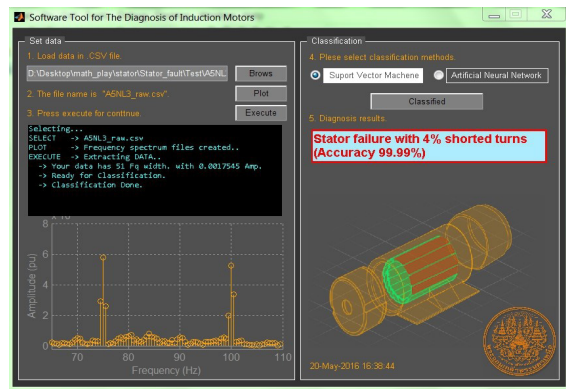
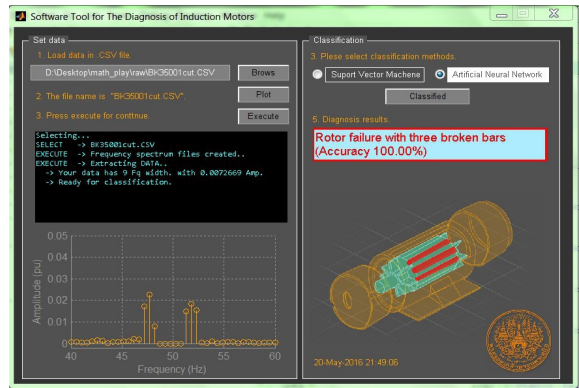
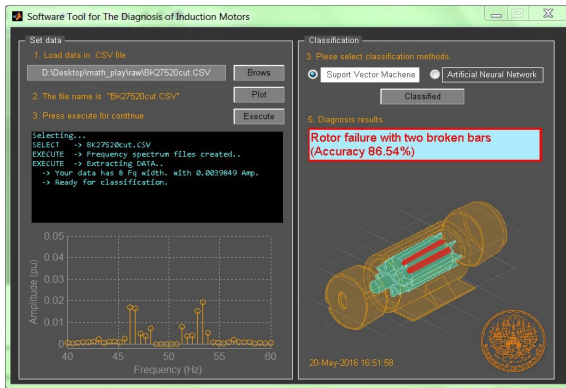
สำหรับการออกแบบภาคของซอฟต์แวร์ที่สำคัญได้แก่ ในส่วนขององค์ประกอบอินพุต (Display of Input Components) ซึ่งมี 2 ขั้นตอนที่สำคัญ แบ่งออกเป็นในส่วนของภาคอินพุต (Input Section) ได้แก่ การรับชุดข้อมูลของสัญญาณกระแสเตเตอร์ในไฟล์ .csv ด้วยอัตราการสุ่มที่ 10 kHz (Sampling Rate) ในขั้นตอนนี้สามารถทำการตรวจสอบในขั้นต้นถึงความถูกต้องของรูปคลื่นสัญญาณกระแสเตเตอร์ในโดเมนเวลาได้ด้วย โดยการกดที่ปุ่ม Plot ดังแสดงในรูปที่ 10 แล้วจะปรากฏรูปคลื่นสัญญาณกระแสเตเตอร์ออกมา

ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการประมวลผลขั้นต้นโดยเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลร่วมกับการแปลงไปยังโดเมนความถี่ด้วย FFT โดยผลการทำงานที่ได้สเปกตรัมของสัญญาณกระแสเตเตอร์จะถูกแสดงออกที่ส่วนขององค์ประกอบอินพุต ซึ่งจะเป็นการแสดงผลเฉพาะในช่วงของฟอลต์ที่เกิดขึ้นเท่านั้น เพื่อการพิจารณาในขั้นต้นของผู้ใช้ซอฟต์แวร์



รูปที่ 10 การแสดงผลการดำเนินการของหน้า GUI ที่ได้ออกแบบขึ้นพร้อมทั้งการแสดงผลสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนียวหน้าที่นำมาทำการทดสอบ

ในขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ต่อมาจะให้ผู้ทำการเลือกว่าจะใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ใดสำหรับการวินิจฉัยผลที่ได้นี้ (Select Classification) ด้วยเหตุผลเดียวกันกับการเลือกคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อสัญญาณที่นำมาวินิจฉัย หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการวินิจฉัยแบบทวนสอบเพื่อเปรียบเทียบในเรื่องของเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวินิจฉัยที่เกิดขึ้นได้อีกทางหนึ่ง ขั้นตอนสุดท้ายคือข้อสรุปของผลการวินิจฉัยเรียกเป็นในส่วนของภาคเอาต์พุต (Output Section) ซึ่งได้แสดงภาพส่วนประกอบของมอเตอร์ในลักษณะกราฟิก ที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงส่วนประกอบของมอเตอร์ที่คาดว่าจะได้เกิดความล้มเหลวขึ้น พร้อมทั้งเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวินิจฉัยด้วย ดังแสดงตัวอย่างของผลการวินิจฉัยในรูปที่ 11 และรูปที่ 12



รูปที่ 11 หน้า GUI แสดงผลการวินิจฉัยมอเตอร์โดยใช้การแยกแยะด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

รูปที่ 12 หน้า GUI แสดงผลการวินิจฉัยมอเตอร์โดยใช้การแยกแยะด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

ผลการวินิจฉัยความล้มเหลวของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 2 ส่วนประกอบนี้ บนพื้นฐานของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียม พบว่าสามารถทำการวินิจฉัยได้อย่างถูกต้องด้วยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากกว่า 85% ด้วยการแสดงผลอย่างชัดเจนออกที่หน้าต่าง MATLAB GUI พร้อมภาพกราฟิกที่แสดงถึงความล้มเหลวของส่วนประกอบนั้นของมอเตอร์ที่สัมพันธ์กับระดับความรุนแรงของมันด้วย ทำให้ผู้ใช้งานสามารถอ่านผลการวินิจฉัยได้ง่าย สะดวก แต่มีความถูกต้องแม่นยำ นอกจากนี้แล้วในส่วนของภาคอุตสาหกรรมยังสามารถนำข้อมูลผลการวินิจฉัยที่ได้มาวิเคราะห์และประมาณการซ่อมบำรุง รวมถึงแนวทางการซ่อมบำรุง (Maintenance Strategies) และนำไปสู่การวางแผนการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันต่อไปได้อีกด้วย

ปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญมาก ถึงผลที่จะสามารถ

เกิดขึ้นได้ คือ ความล้มเหลวของทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์ หรือส่วนประกอบอื่นของมอเตอร์ที่เกิดความล้มเหลวขึ้นพร้อมกัน ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมฟอลต์มีกรเปลี่ยนแปลงไปทั้งด้านขนาดและความถี่ ถึงแม้ว่าในการใช้งานจริงของมอเตอร์ ความล้มเหลวด้วยสาเหตุที่เพิ่มขึ้นนี้ มักจะมีสาเหตุมาจากความล้มเหลวจากอีกส่วนประกอบหนึ่งของมอเตอร์ เช่น ความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์ที่อาจเกิดขึ้นได้จากความล้มเหลวของแท่งตัวนำโรเตอร์ เนื่องจากเศษของแท่งตัวนำโรเตอร์ที่แตกและหลุดออกไป สามารถทำอันตรายต่อลวดตัวนำสเตเตอร์และเป็นที่มาของการลัดวงจรที่รุนแรงตามมาได้เป็นต้น

ด้วยความล้มเหลวของส่วนประกอบมอเตอร์ที่มาจกหลายสาเหตุพร้อมกันนี้ รวมถึงความล้มเหลวที่แต่ละส่วนประกอบของมอเตอร์มาจับคู่กัน ทำให้ในขั้นตอนการสอนจำเป็นต้องมีข้อมูลเป็นจำนวนมาก

อีกทั้งเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องก็จะมีค่าที่น้อยลงตามไปด้วย

สาเหตุของข้อมูลทางสถิติของแต่ละคุณลักษณะเฉพาะที่มีช่วงค่าของข้อมูลที่มีความแตกต่างกันมากขึ้นนั้นเอง ปัญหาดังกล่าวนี้ถูกนำมาพิจารณาในชั้นของการศึกษาเพื่อดูลักษณะของการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและความถี่ของมัน ผลการศึกษาใน [9] พบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมฟอลต์อย่างชัดเจนเมื่อเกิดความล้มเหลวของส่วนประกอบมอเตอร์ที่แตกต่างกัน จากที่กล่าวมาในการทดลองการวินิจฉัยการวินิจฉัยฟอลต์มอเตอร์ที่นำเสนอนี้จึงเป็นการพิจารณากรณีเกิดฟอลต์เฉพาะโรเตอร์หรือฟอลต์สเตเตอร์เท่านั้น

5. สรุป

โดยทั่วไปแล้วการวินิจฉัยฟอลต์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำบนพื้นฐานการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ (MCSA) จะเป็นการวิเคราะห์จากสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ แล้วจึงให้ผู้เชี่ยวชาญทำการวินิจฉัยสรุปผลออกมา แต่ด้วยจำนวนของมอเตอร์ที่มีอยู่มากมายในกระบวนการผลิตทำให้การวินิจฉัยโดยผู้เชี่ยวชาญไม่มีความคล่องตัวมากนัก การวินิจฉัยฟอลต์มอเตอร์ที่นำเสนอนี้จึงเสมือนเป็นเครื่องมือซอฟต์แวร์สำหรับการตรวจวินิจฉัยความล้มเหลวของมอเตอร์ได้ 2 ส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ ความล้มเหลวของโรเตอร์และความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์ การพัฒนาดังกล่าวโดยใช้ GUI ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งจากการออกแบบหน้าต่าง GUI จะสามารถทำให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ ด้วยทุนงบประมาณประจำปี 2555

เอกสารอ้างอิง

[1] A. H. Bonnett, and G. C. Soukup, “Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase

squirrel-cage induction motors,” *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 921–937, July–August 1992.

- [2] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review,” *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, December 2005.
- [3] A. Garcia-Perez, R. J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, and R. A. Osornio-Rios, “The application of high-resolution spectral analysis for identifying multiple combined faults in induction motors,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 2002–2010, May 2011.
- [4] M. E. H. Benbouzid, and G. B. Kliman, “What stator current processing based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis,” *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 238–244, June 2003.
- [5] W. T. Thomson and M. Fenger, “Current signature analysis to detect induction motor faults,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, July–August 2001.
- [6] C. Manop and C. Kusoljittakorn, “The application of digital signal processing technique to rotor fault detection in stator current of induction motors,” in *International Conference on Information Communication Technology*, Lao PDR, pp. 1–5, December 2007.
- [7] Y. Lei, Z. He, Y. Zi, and Q. Hu, “Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 5, pp. 2280–2294, July 2007.
- [8] A. Soleimani, M. J. Mahjoob, and M. Shariat-panahi, “Fault classification in gears using support vector machines (SVMs) and signal processing,” in *Soft*



Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control, 2009. ICSCCW 2009. Fifth International Conference on, pp. 1–4, 2–4 September 2009.

[9] A. G. Perez, R. J. R. Troncoso, E. C. Yopez, and

R. A. O. Rios, “The application of high-resolution spectral analysis for identifying multiple combined faults in induction motors,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 2002–2010, May 2011.