

การตรวจสอบสภาพมอเตอร์ไฟฟ้าแบบออนไลน์ Online Failure Detection of Electric Motors

จักรพงษ์ ตรีตรัง¹

Juggrapong Treetrong¹

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้นำเสนอวิธีการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์แบบออนไลน์ โดยเน้นมอเตอร์ที่ได้รับความนิยมนำไปใช้งานกันแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมคือมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ และนำเสนอความก้าวหน้าในการพัฒนาวิธีการตรวจสอบสภาพมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งสามารถพบเห็นได้ทั้งในภาคอุตสาหกรรม (การใช้งาน) และภาคการศึกษา (การวิจัยและการพัฒนา) โดยจะเน้นที่วิธีการตรวจสอบการเสียหายของมอเตอร์แบบออนไลน์ โดยจะเริ่มเสนอบทวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ การสำรวจการเสียหายของมอเตอร์ที่พบกันบ่อยที่สุดในอุตสาหกรรมเครื่องมือการตรวจวัดการเสียหายมอเตอร์ที่ใช้กันในภาคอุตสาหกรรม วิธีการตรวจสอบการเสียหายที่ได้รับความนิยมกัน โดยที่วิธีการของการตรวจสอบการเสียหายนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีการหลัก คือ การวิเคราะห์ด้วยกระแสไฟฟ้ามอเตอร์ การวิเคราะห์ด้วยคลื่นการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายทางความร้อน และการวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียง ในบทความวิชาการนี้เสนอการวิเคราะห์ด้านความแม่นยำในการตรวจสอบหรือข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันของแต่ละวิธีการสุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์ทิศทางความเป็นไปได้ของการพัฒนาวิธีการตรวจสอบการเสียหายของมอเตอร์ในอนาคต

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ การตรวจสอบสภาพมอเตอร์ การวิเคราะห์สภาพมอเตอร์ วิธีการตรวจสอบสภาพมอเตอร์

Abstract

This paper presents an online method for motor failure detection. Emphasis is put on induction motors popularly used in industry. The paper also presents the development of motor failure detection methods commonly used in industrial and educational sectors. An on-line fault detection method will be applied. Analysis and investigation of causes of induction motor damage will be made. Damage monitoring tools used in industrial sector will be discussed. Four main methods for detecting motor failure include Motor Current Signature Analysis, Vibration Signal Analysis, Acoustic Signal Analysis and Thermography Analysis. Accuracy, advantages and disadvantages of each method will be focused. Trends and feasibility of motor damage detection development will be mentioned.

Keywords: Induction Motors, Motor Condition Inspection, Analysis of Motor Condition, Fault Detection Method

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ Tel. 0-2555-2000 Ext. 3248, E-mail: juggrapong@yahoo.com

1. บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดชนิดหนึ่งในบรรดามอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งใช้งานในการขับเคลื่อนเครื่องจักรและระบบการผลิตในทางอุตสาหกรรม เป็นเพราะมอเตอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง ความปลอดภัยสูง ความน่าเชื่อถือสูง รวมทั้งราคาไม่แพงแต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้งานมอเตอร์นี้ไปนานๆ ย่อมมีการเสื่อมสภาพไปตามกาลเวลาและสภาพแวดล้อมที่มอเตอร์นี้ถูกใช้งาน การเสียของมอเตอร์นั้นค่อนข้างจะมีความสำคัญมากในเครื่องจักรหรือระบบการทำงานของการผลิตทั้งระบบ ถ้าหากไม่สามารถตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ได้ หรือไม่รู้สภาพการเสียหายที่กำลังเกิดขึ้นในมอเตอร์ได้ล่วงหน้า อาจนำไปสู่การเสียหายที่มากขึ้นจนกระทั่งอาจเกิดการเสียหายโดยสิ้นเชิงจนต้องเกิดการหยุดการทำงานของมอเตอร์อย่างคาดไม่ถึง ซึ่งก็จะส่งผลกระทบต้องหยุดการทำงานของเครื่องจักรทั้งหมด หรือทั้งระบบการผลิต ส่งผลต่อการผลิตสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ตามแผนการผลิตที่ได้วางแผนไว้ตามตารางการผลิต กล่าวคือ สร้างความเสียหาย เช่น การเสียผลผลิต เสียเวลา ค่าใช้จ่ายเพิ่ม เป็นต้น จากการเสียของมอเตอร์อย่างคาดไม่ถึง ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียหายร้ายแรงกว่าการรู้สภาพการทำงานของมอเตอร์ล่วงหน้าแล้วทำการวางแผนการซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนมอเตอร์ ในบทความวิชาการนี้จะเริ่มวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ (มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ) การสำรวจการเสียหายของมอเตอร์ที่พบกันทางอุตสาหกรรมสำหรับวิธีการของการตรวจสอบการเสียหายที่นิยมนำไปพัฒนากันสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีการหลัก คือ การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ การวิเคราะห์ด้วยคลื่นการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายทางความร้อน และการวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียง ในบทความวิชาการนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ด้านความแม่นยำในการตรวจสอบหรือข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันของแต่ละวิธีการ สุดท้ายบทความวิชาการนี้ได้เสนอบทวิเคราะห์แนวโน้มการพัฒนาวิธีการตรวจสอบในอนาคต



รูปที่ 1 ตัวอย่างมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ [1]

2. บทวิเคราะห์สาเหตุการเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้า

โดยจะเริ่มต้นกล่าวถึงสาเหตุที่ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้เกิดข้อบกพร่องหรือการเสียหาย โดยจุดเริ่มต้นของการเสียหายโดยส่วนใหญ่ มีสาเหตุจากการเลือกใช้มอเตอร์ไม่ตรงกับข้อกำหนดของมอเตอร์นั้นๆ หรือแม้กระทั่งการคำนวณข้อกำหนดของมอเตอร์ที่ผิดพลาดของวิศวกรผู้ออกแบบ ดังนั้นผู้ออกแบบต้องมีความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์ในด้านการออกแบบ เพื่อการคำนวณข้อกำหนดของมอเตอร์ที่ถูกต้อง โดยการคำนึงถึง 3 ลักษณะสภาพที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงที่มอเตอร์นั้นจะถูกนำไปใช้งาน คือ สภาพทางด้านเครื่องกล สภาพทางด้านไฟฟ้า และสภาพทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่ง 3 ลักษณะสภาพที่สำคัญนี้จะเป็นตัวบอกข้อกำหนดที่เหมาะสมที่มอเตอร์นั้นจะถูกนำไปใช้งาน ดังนั้น 3 ลักษณะสภาพที่สำคัญนี้จึงเป็นสาเหตุที่สำคัญของการเกิดข้อบกพร่องหรือการเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ [2]

2.1 สภาพทางด้านเครื่องกล

การนำมอเตอร์ชนิดนี้ไปใช้งาน ที่ต้องเผชิญสภาพทางด้านเครื่องกล เป็นสภาพที่มีสาเหตุจากโหลดของมอเตอร์ที่กำลังขับเคลื่อนอยู่ เช่น การที่มอเตอร์ต้องทำงานภายใต้โหลดสูงๆ เป็นเวลานาน การที่มอเตอร์ต้องทำงานภายใต้โหลดที่เกินพิกัดของข้อกำหนดของมอเตอร์ที่ถูกกำหนดไว้ การสตาร์ทมอเตอร์มีจำนวนบ่อยครั้งเกินไป การเปลี่ยน

ระดับของโหลดที่มากเกินไป การที่มอเตอร์รับโหลดแบบไม่สมดุลในแนวแกน และอื่นๆ ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของฉนวนของขดลวด การเสียหายของขดลวด การเสียหายของแบร้ง (การเกิด การสั้นสะพานที่ผิดปกติ) การเสียหายของตัวสับเปลี่ยน กระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ (Commutator) การเกิด การสึกหรอที่บูช (ก่อให้เกิดการหนีศูนย์ของโรเตอร์) และอื่นๆ

2.2 สภาพทางด้านไฟฟ้า

การนำมอเตอร์ชนิดนี้ไปใช้งานที่ต้องเผชิญสภาพทางด้านไฟฟ้า เป็นสภาพที่มีสาเหตุจากกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ โดยสาเหตุหลักมาจากตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า (Electrical Power Supply) ซึ่งการที่มอเตอร์ต้องรับกระแสไฟฟ้าช่วงสตาร์ทมอเตอร์หรือช่วงทรานเซียนท์ (Transient Period) บ่อยครั้งเกินไป (การสับสวิตซ์เปิดๆ ปิดๆ ของมอเตอร์ที่บ่อยครั้งเกินไป) การจ่ายแรงดันที่เปลี่ยนแปลงแบบขึ้นลงบ่อยในขณะที่มอเตอร์นั้นกำลังทำงาน การที่เกิดสภาวะไม่สมดุลในระดับที่มากเกินไปของแรงดันที่จ่ายในแต่ละเฟสของมอเตอร์ ซึ่งสาเหตุเหล่านี้จะก่อให้เกิด การความร้อน และเกิดการสะสมความร้อนที่มากเกินไป ก่อให้เกิดความเค้นที่มากเกินไปแก่ฉนวนของขดลวด ซึ่งก่อให้เกิดการเสียหายและจนกระทั่งเกิดการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์

2.3 สภาพทางด้านสิ่งแวดล้อม

การนำมอเตอร์ชนิดนี้ไปใช้งาน อาจต้องเผชิญสภาพทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ไม่พึงประสงค์ เช่น สิ่งแวดล้อมภายใต้ฝุ่น สิ่งสกปรก ความชื้นสูง และสิ่งแวดล้อมภายใต้ความร้อนสูง ถ้ามอเตอร์ทำงานที่มีฝุ่น สิ่งสกปรก ความชื้นสูง สิ่งเหล่านี้อาจเข้าไปติดขดลวด บูช หรือข้อต่อของขดลวดไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของฉนวนขดลวด ทำให้แบร้งเสื่อมสภาพ เกิดการเสียดสี และความร้อนสูงที่แบร้ง ถ้ามอเตอร์ทำงานภายใต้สิ่งแวดล้อมที่มีความร้อนสูงมากๆ ก่อให้เกิดการการเสียหายของฉนวนขดลวด

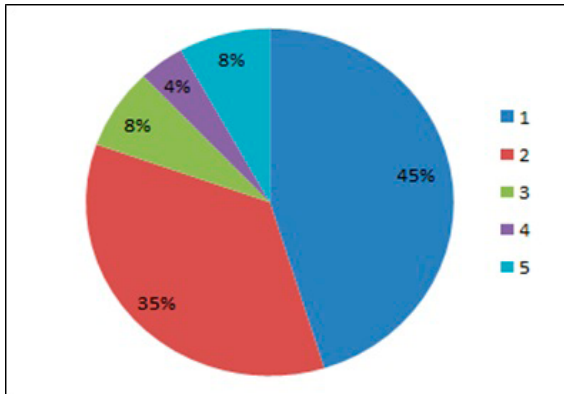
3. การสำรวจการเสียหายของมอเตอร์ที่มีการตรวจพบ

จากการศึกษาพบว่า การเสียหายของมอเตอร์ส่วนใหญ่สามารถแบ่งเป็น การเสียหายของแบร้ง การเสียหายของขดลวด สเตเตอร์ การเสียหายของโรเตอร์ การเยื้องศูนย์ของโรเตอร์ และการเสียหายเล็กน้อย อื่นๆ จากการสำรวจ [3]-[9] พบว่าการเสียหายของมอเตอร์สาเหตุหลักมาจากการเสียหายของแบร้ง โดยพบว่ามีประมาณ 40-50% ของการเสียหายทั้งหมดที่มีการบันทึกไว้ รองลงมาคือการเสียหายของขดลวดของสเตเตอร์ โดยพบว่ามีประมาณ 30-40% ของการเสียหายทั้งหมดที่ถูกบันทึกไว้ รองลงมาอีกคือการแตกหรือการเสียหายของโรเตอร์มีประมาณ 5-10% ของการเสียหายทั้งหมดที่ถูกบันทึกไว้ และสุดท้ายคือการเสียหายที่มาจาก การหนีศูนย์ของโรเตอร์ ซึ่งทำให้ช่องว่างระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ไม่เท่ากัน รวมถึงการเสียหายเล็กๆ น้อยๆ อื่นๆ รวมกัน

การเสียหายเหล่านี้ เป็นการเสียหายหลักที่พบในโรงงานอุตสาหกรรม ส่งผลกระทบต่อการหยุดการทำงาน ของตัวมอเตอร์ และกระทบต่อการหยุดการทำงาน ของระบบการผลิตทั้งหมดของเครื่องจักรหรือระบบขนถ่ายลำเลียงที่มอเตอร์นี้เข้าไปเกี่ยวข้อง สร้างความเสียหายต่อผลผลิตที่ไม่สามารถผลิตได้ตามแผนที่วางไว้และเวลาที่เสียไปในช่วงที่มอเตอร์ต้องหยุดการทำงาน และยังต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มในการซ่อมบำรุงในกรณีฉุกเฉินเนื่องจากการเสียหายของมอเตอร์ที่ไม่สามารถทราบล่วงหน้า

4. การตรวจจับการเสียหายมอเตอร์ในภาคอุตสาหกรรม

ในอดีตการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถกระทำได้ แต่ต้องหยุดการทำงาน ของมอเตอร์นั้นก่อน หรืออาจต้องหยุดการทำงาน ของระบบการผลิตทั้งหมด เพื่อทำการตรวจสอบสภาพ ซึ่งวิธีการที่ถูกเรียกว่า การตรวจสอบสภาพมอเตอร์ไฟฟ้าแบบออฟไลน์ (Off-line Electric Motor Testing) หรือบางครั้งเรียกว่า การตรวจสอบมอเตอร์ไฟฟ้าแบบง่าย (Classical Electric Motor Testing) วิธีการตรวจสอบมอเตอร์ไฟฟ้าแบบนี้ต้องใช้วิธีการตรวจสอบแบบหลายวิธีร่วมกันหลายแบบ คือการทดสอบแบบไม่มีโหลด การทดสอบโดย



รูปที่ 2 ค่าเฉลี่ยจำนวนเปอร์เซ็นต์การเสียหายของมอเตอร์
(1 = การเสียหายของแบริ่ง 2 = การเสียหายของขดลวดของสเตเตอร์ 3 = การแตกหรือการเสียหายของโรเตอร์ 4 = การหนีศูนย์ของโรเตอร์ และ 5 = การเสียหายอื่นๆ รวมกัน)

ป้อนกระแสไฟฟ้าตรง การทดสอบโดยการล๊อคโรเตอร์ [10],[11]

ในวงการอุตสาหกรรมปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาเชิงการค้าของเครื่องมือสำหรับการตรวจวัดการเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อรองรับความต้องการอย่างมากมายสำหรับการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบล่องหน้าหรือความต้องการรู้สภาพของมอเตอร์ ณ สภาพปัจจุบันก่อนที่จะเกิดความเสียหายระดับขั้นรุนแรง หรือระดับขั้นการเสียหายอย่างสิ้นเชิงจนมอเตอร์นั้นใช้งานไม่ได้ อีกต่อไป วิธีการตรวจสอบถูกพัฒนาไปในทิศทางที่สามารถตรวจสอบสภาพมอเตอร์แบบไม่ต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งถูกเรียกว่า การตรวจสอบสภาพมอเตอร์ไฟฟ้าแบบออนไลน์ (On-line Electric Motor Testing) หลักการทั่วไปของวิธีนี้คือเป็นวิธีที่สามารถกระทำได้ในขณะที่มอเตอร์นั้นกำลังทำงานอยู่ไม่ต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์ จะทำให้ไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องจักรหรือระบบการผลิตที่มอเตอร์นี้เป็นตัวขับเคลื่อน ทำให้วิธีการตรวจสอบแบบนี้นำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์แบบตลอด 24 ชั่วโมงได้ ทำให้ทราบสภาพตลอดการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งรูปแบบหรือ

โครงสร้างของการตรวจสอบมอเตอร์แบบออนไลน์นั้นจะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบ (ซึ่งจะกล่าวในข้อที่ 5)

ความต้องการรู้สภาพมอเตอร์ไฟฟ้า ณ สภาพปัจจุบันนั้นมีความสำคัญมากต่อโรงงานอุตสาหกรรม ถ้าหากเกิดข้อบกพร่องหรือเกิดการเสียหายของมอเตอร์ ทำให้ผู้รับผิดชอบสามารถทำการวางแผนการซ่อมบำรุง (ถ้าหากสามารถซ่อมบำรุงได้) หรือทำการเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ (ถ้าหากไม่สามารถซ่อมบำรุงได้) เพื่อป้องกันการหยุดการทำงานของระบบการผลิตอย่างคาดไม่ถึง ซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงเกินไป และเกิดการเสียหายแก่โรงงานมากกว่าการหยุดตามแผนที่วางไว้เพื่อการซ่อมบำรุง ตัวอย่างเครื่องมือที่ถูกพัฒนาในภาคอุตสาหกรรม เช่น Artesis Motor Condition Monitoring (MCM) [11]-[13], Motor Monitor [14] และ Electrical Signature Analysis (ESA) [15] (สำหรับโรงอุตสาหกรรมในประเทศไทยยังไม่มีบริษัทใดได้นำเครื่องเหล่านี้มาใช้งาน อาจเป็นเพราะต้องลงทุนสูงเกินไป) เครื่องมือเหล่านี้ ได้ใช้วิธีการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์โดยหลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์หรือ MCSA (Motor Current Signature Analysis) นอกจากนี้ระดับความรุนแรงของการเสียหายที่กำลังเกิดขึ้นในมอเตอร์ ก็สามารถวัดได้จากเครื่องมือเหล่านี้ โรงงานส่วนใหญ่ที่นำเครื่องมือเหล่านี้ไปใช้จะเป็นลักษณะโรงงานที่มีระบบการผลิตแบบอัตโนมัติโดยใช้คนเป็นเพียงผู้ควบคุมดูแล ในปัจจุบันยังต้องลงทุนสูงในการติดตั้งเครื่องมือเหล่านี้ ดังนั้นยังมีความพยายามในด้านการทำวิจัยเพื่อที่จะหาวิธีการใหม่ๆ และพัฒนาอุปกรณ์หรือเครื่องมือใหม่ๆ เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายที่ถูกลง

5. การตรวจสอบการเสียหายของมอเตอร์แบบออนไลน์

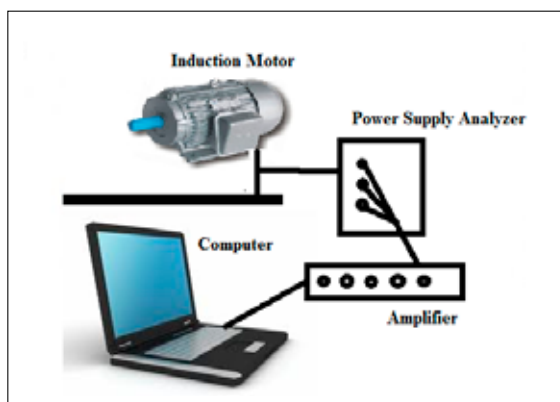
ในภาคการศึกษาด้านการทำวิจัย ก็ได้มีการพัฒนาวิธีการใหม่ๆ สำหรับการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อค้นหาวิธีการใหม่ๆ สำหรับการตรวจสอบสภาพและความเสียหายของมอเตอร์ที่มีความแม่นยำและ

เที่ยงตรงมากกว่า ความน่าเชื่อถือสูงกว่า มีค่าใช้จ่ายถูกกว่า และใช้งานง่ายกว่าวิธีที่มีใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งในปัจจุบันทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคการศึกษาได้มีการทำวิจัยร่วมกันมากขึ้น เพื่อพัฒนาหรือค้นหาวิธีการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ที่ประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทิศทางการพัฒนาเป็นไปในทิศทางการตรวจสอบสภาพแบบออนไลน์ โดยลดจำนวนอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่เข้ามาเกี่ยวข้องให้น้อยที่สุด ขจัดหรือลดจำนวนเซ็นเซอร์ที่เข้าไปรบกวนการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งการรบกวนการทำงานของมอเตอร์จะลดความแม่นยำในการตรวจสอบ ในปัจจุบันวิธีการที่นิยมพัฒนานั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีการ คือ การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ การวิเคราะห์ด้วยคลื่นการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายทางความร้อนและการวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียง ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกัน มีความแม่นยำในการตรวจสอบแต่ละการเสียหายของมอเตอร์ที่แตกต่างกัน โดยจะวิเคราะห์แต่ละวิธีในรายละเอียดดังต่อไปนี้ (โดยจะเรียงลำดับจากการได้รับความนิยมจากมากไปหาน้อย)

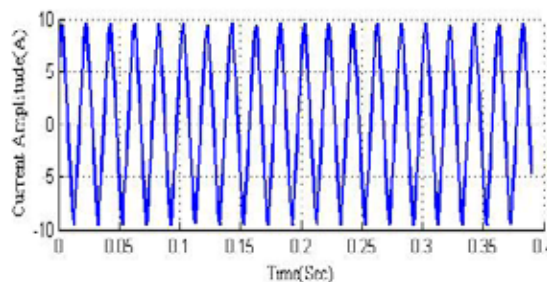
5.1 การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ (Motor Current Signature Analysis)

การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ (Motor Current Signature Analysis หรือ MCSA) เป็นวิธีที่ใช้กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ในการวิเคราะห์สภาพการตรวจสภาพแบบออนไลน์สามารถแสดงดังรูปที่ 3 หลักการของวิธีนี้คือการจับสัญญาณของกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ที่กำลังทำงาน อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับวิธีการนี้คือ ตัวเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ โดยการเก็บข้อมูลที่จุดจ่ายแรงดันโดยใช้ตัวบันทึกระแสไฟฟ้า (Power Supply Analyzer) ซึ่งมีหน้าที่แปลงกระแสให้เป็นแรงดัน (เพื่อง่ายต่อการบันทึก) และใช้เครื่องขยาย (Amplifier) ในการขยายสัญญาณนั้น (แรงดัน) แล้วส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าที่ได้จะนำไปทำการแปลงโดยใช้หลักการของการประมวลผลทางสัญญาณ (Signal Processing) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์สภาพ

จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ไม่จำเป็น



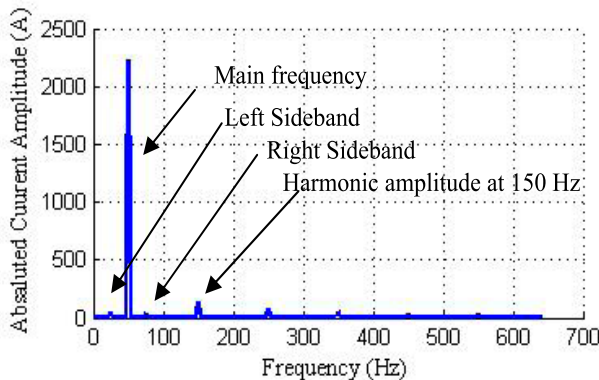
รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการเก็บกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4 ตัวอย่างกระแสไฟฟ้าที่เก็บจากมอเตอร์ไฟฟ้า

ต้องหยุดการทำงาน (มอเตอร์สามารถทำงานได้ตามปกติ) จึงจัดได้เป็นการตรวจสอบภาพแบบออนไลน์ รูปที่ 4 แสดงกระแสไฟฟ้าที่บันทึกจากมอเตอร์ (แสดงเพียง 1 เฟส จาก 3 เฟส)

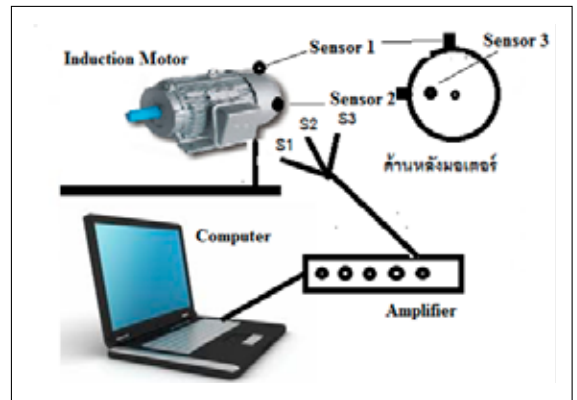
จากการศึกษาพบว่า การเสียของมอเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ จะส่งผลกระทบและก่อให้เกิดความผิดปกติของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ดังนั้นปัจจุบันได้มีผู้วิจัยมากมาย ได้นำกระแสไฟฟ้ามาทำการวิเคราะห์การเสียของมอเตอร์ จากการศึกษพบว่า ได้มีผู้วิจัยจำนวนมากได้ใช้วิธีการนี้สำหรับการการตรวจจับการเสียของมอเตอร์ [16]-[24] (แบร์ริง ขดลวดสเตเตอร์ โรเตอร์ และการหนีศูนย์ของโรเตอร์) โดยการประยุกต์ใช้วิธีการประเมินผลของสัญญาณ เพื่อที่จะค้นหาวิธีการใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า มีความแม่นยำมากกว่า มีความเที่ยงตรงสูงกว่า และเสียค่าใช้จ่ายถูกลงกว่า รวมทั้งมีความซับซ้อนของวิธีการและเครื่องมือที่ต้องติดตั้งที่น้อยกว่า หรือวิธี



รูปที่ 5 การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้ามอเตอร์โดยวิธีสเปกตรัม (มอเตอร์แบบโรเตอร์เสียหาย)

การที่ง่ายกว่า โดยใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณแบบต่างๆ โดยที่เทคนิคที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ วิธีสเปกตรัม โดยวิธีนี้จะใช้การวิเคราะห์จากการเกิดแอมพลิจูดที่ความถี่ด้านข้าง (Sideband) และความถี่อื่นๆ ของกระแสไฟฟ้า และวิธีสเปกตรัมสามารถที่จะแบ่งย่อยได้อีกหลายแบบ เช่น FFT (Fast Fourier Transform), DFT (Discrete Fourier Transform) และแบบอื่นๆ รูปที่ 5 แสดงการใช้วิธีสเปกตรัมในการตรวจจับการเสียหายของมอเตอร์ โดยใช้ FFT ในการวิเคราะห์ ซึ่งโดยปกติแล้วถ้ามอเตอร์ที่มีสภาพดี จะแสดงฮาร์มอนิกเฉพาะที่ความถี่หลัก (Main Frequency) เท่านั้น แต่อาจเกิดฮาร์มอนิกที่ความถี่อื่น เช่น 150 เฮิรตซ์ 250 เฮิรตซ์ และ 350 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นเรื่องปกติ (อาจเกิดข้อบกพร่องบ้างในขั้นตอนของการผลิตมอเตอร์ แต่สามารถยอมรับได้)

ในการตรวจสอบสภาพของโรเตอร์จะสังเกตฮาร์มอนิกที่ความถี่ด้านข้างคือ 25 เฮิรตซ์ และ 75 เฮิรตซ์ ส่วนการตรวจสอบสภาพจะสังเกตการเพิ่มความสูงของฮาร์มอนิกที่ความถี่ 150 เฮิรตซ์ ส่วนการตรวจสอบสภาพการเสียหายของแบร็ริงและการเอียงศูนย์ของโรเตอร์ จะใช้วิธีการสเปกตรัมแบบอื่นๆ โดยจะใช้หลักการสังเกตเช่นเดียวกับที่กล่าวมา (การเปลี่ยนแปลงของการเกิดฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ) เป็นต้น



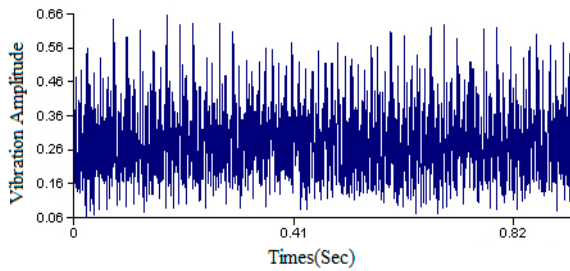
รูปที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการบันทึกคลื่นสั่นสะเทือน

บทวิเคราะห์

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมพัฒนามากที่สุดทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคการศึกษา อาจเป็นเพราะวิธีนี้ใช้เพียงข้อมูลกระแสไฟฟ้าเฟสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ โดยไม่ต้องติดตั้งเซ็นเซอร์ที่รบกวนการทำงานของมอเตอร์ อีกทั้งวิธีนี้สามารถตรวจสอบการเสียหายได้ครอบคลุมการเสียหายหลักที่มีการตรวจพบ (แบร็ริง ขดลวดสเตเตอร์ โรเตอร์ และการหนีศูนย์ของโรเตอร์) โดยวิธีนี้ให้ความแม่นยำสูงในการตรวจสอบสภาพการเสียหายขดลวดสเตเตอร์และการเสียหายของโรเตอร์ ส่วนการเสียหายของแบร็ริงและการหนีศูนย์ของโรเตอร์ ความแม่นยำจะอยู่ในระดับยอมรับได้

5.2 การวิเคราะห์ด้วยคลื่นการสั่นสะเทือน (Vibration Signal Analysis)

วิธีนี้เป็นวิธีการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์อีกวิธีหนึ่งที่นิยม เป็นวิธีที่ใช้คลื่นการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์ในการวิเคราะห์สภาพในการตรวจสอบสภาพ การตรวจสอบแบบออนไลน์สามารถแสดงดังรูปที่ 6 หลักการของวิธีนี้คือ การเก็บคลื่นสัญญาณการสั่นสะเทือนจากมอเตอร์ โดยการเก็บคลื่นสัญญาณจากทั้งสามแนวแกนคือ แนวตั้ง (Sensor 1) แนวนอน (Sensor 2) และแนวแกน (Sensor 3) ของมอเตอร์ โดยตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ทั้ง 3 แสดงดังรูปที่ 6 โดยสัญญาณการสั่นสะเทือนจะถูกขยายโดย



รูปที่ 7 ตัวอย่างคลื่นการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากมอเตอร์

เครื่องขยาย (Amplifier) แล้วส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงาน (มอเตอร์สามารถทำงานได้ตามปกติ) จึงจัดได้เป็นการตรวจสอบสภาพแบบออนไลน์

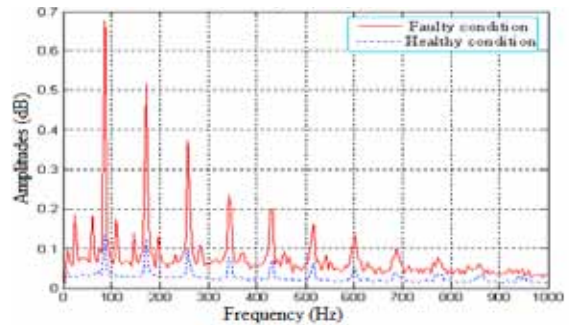
รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างคลื่นการสั่นสะเทือนที่บันทึกจากมอเตอร์คลื่นสัญญาณที่ได้จะถูกแปลงเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยใช้หลักการของการประมวลผลทางสัญญาณ วิธีการประมวลผลที่นิยมใช้คล้ายกับวิธีแรกคือวิธีสเปกตรัม รูปที่ 8 แสดงการวิเคราะห์คลื่นการสั่นสะเทือนโดยวิธีสเปกตรัม (ใช้ FFT ในการวิเคราะห์)

การตรวจสอบสภาพมอเตอร์จะใช้หลักการการเปรียบเทียบการเกิดฮาร์โมนิกที่สูงผิดปกติของมอเตอร์ที่เสียหาย (ในที่นี้แบร์ริงเสียหาย) เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่มีสภาพดี จะเห็นถึงความแตกต่างของความสูงฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่างๆ

อุปกรณ์ที่จำเป็นในสำหรับวิธีการนี้คือเซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นการสั่นสะเทือนและอุปกรณ์เก็บข้อมูลการสั่นสะเทือน สำหรับเซ็นเซอร์อาจเป็นชนิดที่ติดตั้งบนตัวมอเตอร์หรือชนิดแบบพกพา แต่ถ้าเป็นชนิดแบบพกพาข้อมูลที่ได้จะทำให้ให้ความเที่ยงตรงในการตรวจจับความเสียหายน้อยลง ถ้าต้องการตรวจสอบมอเตอร์แบบออนไลน์ที่ติดตามสภาพแบบตลอด 24 ชั่วโมง จะใช้วิธีการติดตั้งบนตัวมอเตอร์ จากการศึกษาพบว่าได้มีผู้วิจัยจำนวนหนึ่งได้ใช้วิธีการนี้สำหรับการตรวจจับการเสียหายของมอเตอร์ [25]-[30]

บทวิเคราะห์

วิธีนี้จะใช้คลื่นการสั่นสะเทือนในการวิเคราะห์ แต่



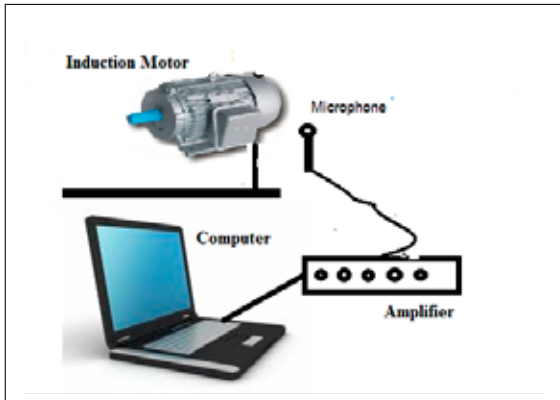
รูปที่ 8 การวิเคราะห์คลื่นการสั่นสะเทือนโดยวิธี สเปกตรัม (เปรียบเทียบมอเตอร์แบบปกติและแบบแบร์ริงเสียหาย)

วิธีนี้ต้องติดตั้งเซ็นเซอร์บนมอเตอร์และมีอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งอาจรบกวนการทำงานของมอเตอร์และยังต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม วิธีนี้สามารถให้ความแม่นยำสูงสำหรับการตรวจสอบความเสียหายของแบร์ริงและการหนีศูนย์กลางของโรเตอร์ แต่สำหรับการเสียหายอื่นๆ ให้ความแม่นยำน้อยมาก เช่น การตรวจสอบความเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ และการตรวจสอบความเสียหายของโรเตอร์ โดยปกติจะใช้ตาเปล่าในการแยกความแตกต่างระหว่างมอเตอร์ปกติและมอเตอร์เสีย แต่ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคการแยกคุณลักษณะ (Feature Classification) ในการเลือกฮาร์โมนิกที่มีศักยภาพในการทำนายการเสียหายของมอเตอร์ (เช่น ฮาร์โมนิกที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ ในรูปที่ 8 เป็นฮาร์โมนิกที่มีศักยภาพ) ให้ความแม่นยำของการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์เพิ่มสูงขึ้น

5.3 การวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียง (Acoustic Signal Analysis)

การวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียง เป็นวิธีการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ที่นิยมวิธีหนึ่ง เป็นวิธีที่ใช้คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์ในการวิเคราะห์สภาพในการตรวจสอบสภาพ ซึ่งจัดเป็นวิธีการตรวจสอบสภาพแบบออนไลน์หนึ่ง สามารถแสดงดังรูปที่ 9

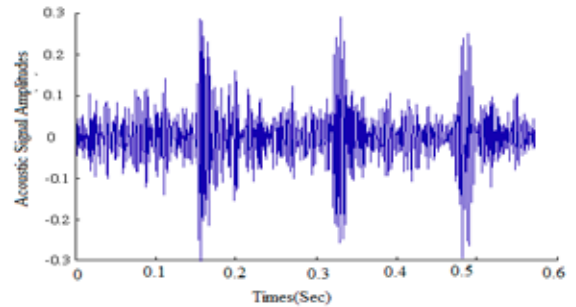
จะใช้เพียงเครื่องบันทึกเสียง (มอเตอร์สามารถทำงานได้ตามปกติ) โดยใช้ไมโครโฟนเป็นตัวรับคลื่นเสียง แล้วส่งไปยังเครื่องขยาย (Amplifier) เพื่อขยายสัญญาณ แล้ว



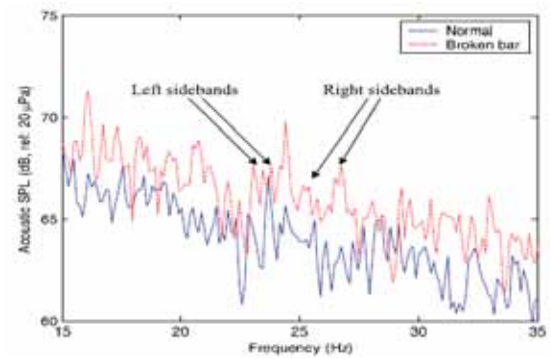
รูปที่ 9 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการบันทึกคลื่นเสียง

ส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ และคลื่นสัญญาณที่ได้จะถูกแปลงเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยใช้หลักการของการประมวลผลทางสัญญาณ จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ไม่จำเป็นต้องหยุดการทำงาน (มอเตอร์สามารถทำงานได้ตามปกติ) จึงจัดได้เป็นการตรวจสอบสภาพแบบออนไลน์ การเก็บคลื่นเสียงจากบริเวณต่างๆ ของมอเตอร์ โดยพื้นฐานแล้วคลื่นเสียงอะคูสติกจากมอเตอร์เกิดขึ้น 3 แหล่งหลัก [31], [32] แหล่งที่หนึ่งคือคลื่นเสียงที่เกิดจากระบบระบายความร้อนหรือพัดลมของมอเตอร์ แหล่งที่สองคือคลื่นเสียงที่เกิดจากแรงผลักดันแม่เหล็ก ที่บริเวณช่องว่างระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ แหล่งที่สามคือคลื่นเสียงที่เกิดจากการหมุนของแบร้ง ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้วิธีนี้สำหรับการตรวจสอบ การเสียหายของการหนีศูนย์ของโรเตอร์และการเสียหายของแบร้ง รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างคลื่นเสียงที่บันทึกจากมอเตอร์ คลื่นเสียงที่ได้ และจะถูกแปลงโดยใช้หลักการของการประมวลผลทางสัญญาณแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 11 แสดงการวิเคราะห์คลื่นเสียงโดยวิธีสเปกตรัม (ใช้ FFT ในการวิเคราะห์)

การตรวจสอบสภาพมอเตอร์โดยวิธีการวิเคราะห์คลื่นเสียง จะใช้หลักการการเปรียบเทียบการเกิดฮาร์โมนิกระหว่างมอเตอร์ปกติและมอเตอร์ที่เสียหาย (ในที่นี้โรเตอร์เสียหาย) เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ที่มีสภาพดี ซึ่งจะ



รูปที่ 10 ตัวอย่างคลื่นเสียงที่บันทึกจากมอเตอร์



รูปที่ 11 การวิเคราะห์คลื่นเสียงมอเตอร์โดยวิธีสเปกตรัม (มอเตอร์แบบสภาพดีและแบบโรเตอร์เสียหาย) [33]

เห็นถึงความแตกต่างของความสูงฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่างๆ ส่วนอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับวิธีการนี้คือตัวเก็บหรือบันทึกข้อมูลเสียงที่มีความถี่สูง จากการศึกษาพบว่าได้มีผู้วิจัยจำนวนหนึ่งได้ใช้วิธีการนี้สำหรับการตรวจจับการเสียหายของมอเตอร์ [34]-[38]

บทวิเคราะห์

จากการศึกษาพบว่าวิธีนี้จะให้ความแม่นยำสูงสำหรับการเสียหายของการหนีศูนย์ของโรเตอร์ รองลงมาคือการตรวจสอบการเสียหายของแบร้งและการเสียหายของโรเตอร์ ส่วนการเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ ให้ความแม่นยำน้อยมาก เป็นเพราะสเตเตอร์และโรเตอร์ให้ข้อมูลคลื่นเสียงที่ไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์การเสียหาย

5.4 การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายทางความร้อน (Thermography Analysis)

วิธีนี้เป็นวิธีการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ที่นักวิจัยให้ความสำคัญน้อยสุด จัดเป็นวิธีการตรวจสอบแบบออนไลน์ชนิดหนึ่ง (มอเตอร์สามารถทำงานได้ตามปกติ) สามารถแสดงดังรูปที่ 12 จะใช้เพียงกล้องถ่ายภาพแล้วนำภาพที่ได้มาทำการวิเคราะห์สภาพของมอเตอร์ กล้องถ่ายภาพที่ใช้จะต้องเป็นกล้องถ่ายภาพทางความร้อน โดยภาพที่ได้จะต้องสามารถแสดงระดับความร้อนที่แตกต่างกัน วิธีนี้ใช้หลักการการตรวจสอบการเสียหายของมอเตอร์โดยการสังเกตสีของคลื่นความร้อนจากภาพถ่าย โดยแต่ละสีจะแสดงระดับความร้อนที่เกิดขึ้นที่แตกต่างกัน

รูปที่ 13 แสดงภาพถ่ายทางความร้อนที่ถ่ายจากมอเตอร์ ซึ่งแสดงสีที่ไม่เท่ากันในแต่ละส่วนของมอเตอร์ ในการตรวจสอบสภาพมอเตอร์จะทำการเปรียบเทียบระหว่างมอเตอร์ดีและมอเตอร์ที่เสียหาย ในอดีตจะใช้ตาเปล่าสำหรับการแยกความแตกต่างของสี ทำให้ความแม่นยำในการแยกสีน้อย แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโปรแกรมในการแยกสี โดยใช้หลักการของการประมวลผลภาพ (Image Processing) ช่วยในการแยกสีของภาพถ่าย ซึ่งทำให้การตรวจสอบสภาพมอเตอร์ง่ายขึ้น ส่วนอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับวิธีการการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายทางความร้อนคือกล้องถ่ายรูปทางความร้อน จากการศึกษาพบว่าได้มีผู้วิจัยจำนวนหนึ่งได้ใช้วิธีการนี้สำหรับการตรวจจับการเสียหายของมอเตอร์ [41]

บทวิเคราะห์

จากการศึกษาพบว่าวิธีนี้จะใช้ตรวจสอบการเสียหายของมอเตอร์ในส่วนที่สร้างความร้อนขึ้นมา เช่น การเสียหายของขดลวดและการเสียหายของแบร์ริง ถ้าหากเกิดการเสียหายของขดลวดจะเกิดการลัดวงจรและทำให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นบริเวณเกิดการลัดวงจร ถ้าเกิดการเสียหายที่แบร์ริงจะเกิดการเสียดสีที่รุนแรงและสร้างความร้อนขึ้นมา ดังนั้นวิธีนี้ให้ความแม่นยำสูงสำหรับการตรวจสอบการเสียหายทั้งสอง ส่วนการเสียหายของโรเตอร์และการหนีศูนย์



รูปที่ 12 ตัวอย่างกล้องถ่ายภาพทางความร้อน [39]



รูปที่ 13 ตัวอย่างภาพถ่ายทางความร้อนจากมอเตอร์ [40]

ของโรเตอร์ วิธีนี้ให้ความแม่นยำน้อยมาก สำหรับการเปรียบเทียบระดับความแม่นยำในการตรวจสอบการเสียหายของแต่ละวิธีสามารถให้คะแนนเป็นตัวเลข ซึ่งแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การแสดงระดับความแม่นยำของแต่ละวิธี

วิธีการตรวจสอบ	แบร์ริง	สเตเตอร์	โรเตอร์	หนีศูนย์กลาง
กระแสไฟฟ้า	3	4	4	3
การสั่นสะเทือน	4	1	2	2
คลื่นเสียง	4	1	2	3
ภาพถ่ายความร้อน	3	4	1	1

1 = สามารถตรวจจับได้น้อยมาก 2 = สามารถตรวจจับได้น้อย
3 = สามารถตรวจจับได้ปานกลาง 4 = สามารถตรวจจับได้ดีมาก

6. วิเคราะห์แนวโน้มการพัฒนาวิธีการตรวจสอบในอนาคต

ในการพัฒนาวิธีการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ ได้มีความร่วมมือเพิ่มขึ้นในการพัฒนาร่วมกันระหว่างภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรม วิธีการที่นักวิจัยให้ความสนใจมากทั้งในปัจจุบันและอนาคตคือ การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ที่สามารถให้ความแม่นยำสูง และไม่ต้องมีเซ็นเซอร์หรือเครื่องมือเพิ่มเติมที่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งลงทุนต่ำทำให้เกิดต้นทุน เมื่อนำไปใช้ในโรงงานส่วนวิธีอื่นๆ เช่น การวิเคราะห์ด้วยคลื่นการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียง และการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายทางความร้อน น่าจะเป็นวิธีการเสริมที่จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบ มีความเป็นไปได้มากในอนาคต ที่การตรวจสอบการเสียหายจะเป็นในลักษณะการผสมผสานกันตั้งแต่สองวิธีขึ้นไป เป็นเพราะวิธีหนึ่งให้ข้อดี ข้อด้อยที่แตกต่างกัน การผสมผสานของวิธีการตรวจสอบจะเป็นตัวช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบการเสียหายมากขึ้น แต่อาจส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นด้วย แต่หากมีการพัฒนาอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่เกี่ยวข้องให้ควบคู่กันไปเพื่อลดความซับซ้อนของการผสมผสานของวิธีการตรวจสอบนี้ รวมทั้งในอนาคตจะมีการนำเทคนิคที่ทันสมัยต่างๆ มาเป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์และในการแยกชนิดการเสียหายของมอเตอร์ เช่น โครงข่ายนิวรอล (Neural Network) เจนเนติก อัลกอริทึม (Genetic Algorithm) การประมวลผลภาพ (Image Processing) การแยกคุณลักษณะ (Feature Classification) และเทคนิคอื่นๆ เพื่อการวิเคราะห์และการแยกชนิดการเสียหายให้ง่ายขึ้น และแม่นยำมากขึ้น

5. สรุป

มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำเป็นหนึ่งในชนิดที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในอุตสาหกรรม แต่เนื่องมาจากการใช้งานแล้ว มอเตอร์นั้นย่อมมีการเสื่อมสภาพไปตามกาลเวลา อีกทั้งการทำงานอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ไม่พึงปรารถนา และการใช้งานหนักเกินไป ย่อมทำให้มอเตอร์นั้นเสื่อมและเสียหายเร็วขึ้น ได้มีการพัฒนาเครื่องมือและวิธีการใหม่ๆ ทั้งในภาคอุตสาหกรรมเพื่อการค้า และในภาคการศึกษาในงานวิจัย สำหรับการตรวจสอบการเสียหายของมอเตอร์ที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากกว่า มีความน่าเชื่อถือสูงกว่า มีค่าใช้จ่ายถูกกว่า และการใช้งานที่ง่ายกว่า วิธีการที่นิยมพัฒนานั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีการ คือ การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ การวิเคราะห์ด้วยคลื่นการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายทางความร้อนและการวิเคราะห์ด้วยคลื่นเสียง ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกัน มีความแม่นยำในการตรวจสอบแต่ละการเสียหายของมอเตอร์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นมีความเป็นไปได้มากในอนาคต ที่การตรวจสอบการเสียหายจะเป็นในลักษณะการผสมผสานกันตั้งแต่สองวิธีขึ้นไป เป็นเพราะวิธีหนึ่งให้ข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน และในอนาคตจะมีการนำเทคนิคที่ทันสมัยสำหรับการวิเคราะห์และการแยกการเสียหายของมอเตอร์มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Feng Hua City Electric Motor Factory Website (Electric Motor Manufacturer), China. [Online] Available: <http://www.diytrade.com>
- [2] P. J Tavner and J. Penman, *Condition Monitoring of Electric Machines*, Research Studies Press and John Wiley & Sons, 1987.
- [3] S. Nandi and H. A. Toliyat. *Fault Diagnosis of Electrical Machines- A Review*, IEEE International Electrical Machine and Drives Conference, Seattle, May 1999, pp. 219-221.
- [4] IEEE., *IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power*

- Systems, 1997, IEEE STD 493-1997.
- [5] M. Haji, and H. A. Toliyat, "Pattern Recognition- A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 16-4, pp. 312-317, Dec 2001.
- [6] S. Nandi, and H. A. Toliyat, "Condition Monitoring and Fault Detection of Electrical Machines," *Industrial Application Conference, Thirty-fourth IAS Annual Meeting*, vol.1, pp. 197-204.
- [7] Motor Reliable Working Group, "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installation: Part I and II," *IEEE Transaction on Industrial Application* 1985, vol. IA-21, no 4, pp. 853-872.
- [8] G. C. Stone and V. Warren, "Comparison of New Stator Winding Testing Technologies." [Online] Available: <http://www.Irispower.com>
- [9] W. Thomson and M. Fenger, "Current Signature Analysis to detect Induction Motor Faults," *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 26-34, July/August 2001.
- [10] S. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 2nd edition, McGraw-Hill, 1991.
- [11] T. Wildi, *Electrical Machines, Drives and Power System*, New Jersey: Prentice-Hall, 2002.
- [12] Predictive Maintenance & Condition Monitoring Website, "MCM- Monitoring Condition Monitoring." [Online] Available: <http://www.tevaltd.co.uk>
- [13] Artesis MCM Scada Remote Monitoring & Control. [Online] Available: <http://www.Artesis.com>
- [14] Induction Motor Testing & Motor Current Analysis. [Online] Available: <http://www.Proviso-systems.co.uk/serv04.html>
- [15] Industrial Equipment Condition Monitoring Using Electrical Signature Analysis. [Online] Available: <http://www.ornl.gov>
- [16] I. Rodriguez and R. Alves, "Notice of Violation of IEEE Publication Principles Bearing Damage Detection of the Induction Motors using Current Analysis," *IEEE/PES Conference and Exposition on Transmission & Distribution: Latin America, 2006 (TDC '06)*, pp. 1 – 5.
- [17] L. Eren and M.J. Devaney, "Motor bearing damage detection via wavelet analysis of the starting current transient," *Proceedings of the 18th IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology 2001 (IMTC 2001)*, vol.3, pp. 1797 – 1800.
- [18] J. Treetrong, J.K. Sinha, F. Gu, and A. Ball; "Bispectrum of stator phase current for fault detection of induction motors," *Elsevier on ISA Transactions (2009)*, vol. 48, Issue 3, pp. 378-382, July 2009.
- [19] J. Treetrong, "Fault Detection and Diagnosis of Induction Motors Based on Higher-Order Spectrum," *The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010 (IMECS 2010)*, Hong Kong, 17-19 March, 2010, pp. 1092-1096.
- [20] J. Treetrong, "Failure Prediction of Industrial electric Motors using Extended DFT," *4th Global Conference on Power Control and Optimization (PCO 2010)*, Kuching, Malaysia, 2-4, December 2010.
- [21] J. Treetrong, "A New Procedure of Electric Motor Fault Analysis Based on Power Spectrum Density PDS Slopes," *4th Global Conference on Power Control and Optimization (PCO 2010)*, Kuching, Malaysia, 2-4, December 2010.

- [22] J. Treetrong, "The Use of Higher-Order Spectrum for Fault Quantification of Industrial Electric Motors," *Intelligent Control and Computer Engineering (Book)*, Springer, 2010, pp. 59-68.
- [23] H. Henao, H. Razik, and G.-A. Capolino, "Analytical approach of the stator current frequency harmonics computation for detection of induction machine rotor faults," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41-3, pp. 801 – 807, May-June 2005.
- [24] J.M. Ramirez-Cruz, V.R. Garcia-Colon, F.A. Carvajal-Martinez, and M.H. Angeles, "Induction motors broken bar and eccentric gap on-line detection using motor signature current analysis under laboratory and field conditions," *Large Engineering systems Conference on Power Engineering(LESCOPE-04)*, 2004, pp. 65 - 69.
- [25] P.J. Rodriguez, A. Belahcen, and A. Arkkio, "Signatures of electrical faults in the force distribution and vibration pattern of induction motors," *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, vol. 153, pp. 523 – 529.
- [26] A. Sadoughi, M. Ebrahimi, and E. Razaeei, "A New Approach for Induction Motor Broken Bar Diagnosis by Using Vibration Spectrum," *International Joint Conference on SICE-ICASE*, 2006, pp. 4715 – 4720.
- [27] S. Poyhonen, P. Jover, and H. Hyotyniemi, "Signal processing of vibrations for condition monitoring of an induction motor," *First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing*, 2004, pp. 499 - 502.
- [28] G.S. Maruthi and K. Panduranga Vittal, "Electrical Fault Detection in Three Phase Squirrel Cage Induction Motor by Vibration Analysis using MEMS Accelerometer," *International Conference on Power Electronics and Drives Systems (PEDS 2005)*, vol.2, pp. 838 – 843, 2005.
- [29] I. Hirotsuka, Y. Niwa, K. Tsuboi, and M. Kawakami, "Experimental study of radial distributions of electromagnetic vibration and noise in three-phase squirrel-cage induction motor at no-load," *International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS 2008)*, pp. 64 – 68, 2008.
- [30] Don-Ha Hwang, Jeong-Woo Jeon, Dong-Sik Kang, Byong-Kuk Kim, Yun-Hyun Cho, and Dong-Hee Kim, "A Method for Rotor Vibration Monitoring of Induction Motor by Air-gap Flux Detection," *37th IEEE Specialists Conference on Power Electronics(PESC '06)*, pp. 1 - 5, 2006.
- [31] S.L. Nau and H.G.G. Mello, "Acoustic noise in induction motors: causes and solutions," *Industry Applications Society 47th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, San Antonio, USA, 2000, pp. 253 – 263.
- [32] J.R. Brauer, "Magnetic noise of induction motors," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 95-1(1), pp. 66 – 75, 1976.
- [33] W. Li, C. K. Mechefske, "Detection of Induction Motor Faults: A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods," *Journal of Vibration and Control*, vol.12, no.2, pp. 165–188, 2006.
- [34] Rong-Ching Wu, Jong-Lan Tsai, Ching-Tai Chiang, and Chen-Sen Ouyang, "Detection of induction motor operation condition by acoustic signal," *2010 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2010, pp. 792 – 797.
- [35] D. Stankovic, Zhiying Zhang; I. Voloh, J. Vico, A. Tivari, A. Banerjee, S. Uppuluri, D. Swigost, "Enhanced algorithm for motor rotor broken bar detection," *2010 63rd Annual Conference for*

- Protective Relay Engineers*, 2010, pp. 1 – 13.
- [36] Z.Q. Zhu, and D. Howe, “Improved methods for prediction of electromagnetic noise radiated by electrical machines,” *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, vol. 141-2, pp. 109 – 120, 1994.
- [37] B. Kaku, I. Miyashita, and S. Sone, “A novel prediction method of acoustic magnetic noise based on induction motor’s NHCC function,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46-2, pp. 398 – 406, 1999.
- [38] H. Zhu, D. Kung, M. Cowell, and S. Cherukupalli, “Acoustic monitoring of stator winding delaminations during thermal cycling testing,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol.17-5, pp. 1405 – 1410, 2010.
- [39] Thermography MobIR M8 Picture, [Online] Available: [http:// www.nanasupplier.com](http://www.nanasupplier.com)
- [40] No author name, “Analyzing Mechanical Systems Using Infrared Thermography,” [Online] Available: <http://www.petersonpredict.com>
- [41] S. Ul Haq and T. Bashir, “Evaluation of Induction Motor Groundwall Insulation using Infrared Thermography,” *International Conference on Emerging Technologies (ICET ‘06)*, 2006, pp. 416 – 420.