



การวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยสเปกตรัมกระแส: การทบทวน

Fault Analysis of Three-phase Induction Motor Using Stator Current: a Review

เอกกมล บุญยะผลานันท์^{1*} สุรพันธ์ ดันศรีวงษ์² และ พูนศักดิ์ โกษียามภรณ์²

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอเทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ โดยในบทความได้นำเสนอเน้นไปที่การวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสสเตเตอร์เพื่อตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์หรือที่เรียกว่าการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor Current Signature Analysis: MCSA)

คำสำคัญ: วิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์

Abstract

This paper is intended as a review of Fault analysis of three-phase induction motor using stator current. The purpose is to introduce in motor faults analysis techniques. The paper is focus on Motor Current Signature Analysis (MCSA) which utilizes the results of spectral analysis of the stator current.

Keyword: Motor Current Signature Analysis

1. บทนำ

บรรดาเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่เพื่อเป็นต้นกำลังในกระบวนการผลิตต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรมนั้น มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางที่สุดในประเภทของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่ซับซ้อน มีกำลังสูงและบำรุงรักษาง่าย การเกิดความผิดปกติที่ไม่ได้คาดคิดมาก่อนของมอเตอร์ส่งผลทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงักไปและเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง จากงานวิจัย [1]-[3] ได้รายงานชนิดของความผิดปกติของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นดังนี้

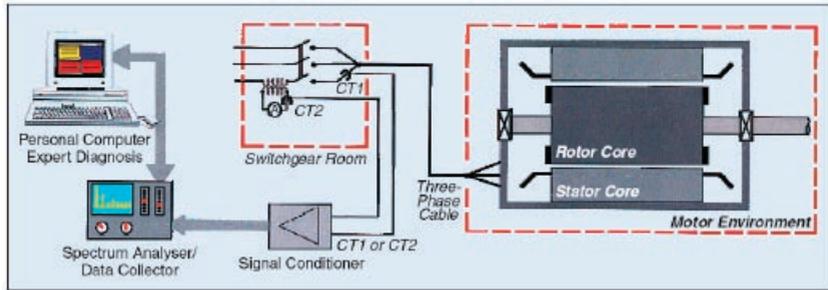
- 1) ความผิดปกติของสเตเตอร์ 38%
- 2) ความผิดปกติของโรเตอร์ 10%
- 3) ความผิดปกติของรอกเส้น 40%
- 4) อื่นๆ 12%

การตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์นั้นในปัจจุบันทำได้ 2 วิธีคือ การตรวจสอบโดยต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์แล้วทำการถอดส่วนประกอบต่างๆ ของมอเตอร์ออกมาเพื่อตรวจสอบสภาพเช่น การแตกหักของแท่งโรเตอร์ การเสื่อมสภาพของรอกเส้น และการลัดวงจรของขดลวด ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียคือจะต้อง

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2913-2500 ต่อ 3342 E-mail: ekm@kmutnb.ac.th



รูปที่ 1 การวัดสัญญาณของระบบ MCSA

หยุดกระบวนการผลิตและในระหว่างที่มอเตอร์ใช้งานอยู่ไม่สามารถทราบความผิดปกติของมอเตอร์ได้จนกว่าจะถึงกำหนดที่ต้องหยุดมอเตอร์และถอดออกทำการตรวจสอบซึ่งบางครั้งมอเตอร์เกิดความเสียหายก่อนกำหนด จากข้อเสียดังกล่าวจึงมีการตรวจสอบอีกวิธีหนึ่งโดยไม่ต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์ซึ่งช่วยให้ทราบถึงความผิดปกติของมอเตอร์ที่กำลังจะเกิดขึ้นได้ก่อนที่จะทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงได้

ได้มีการนำเสนอเทคนิคหลายๆ แบบโดยใช้ตัวตรวจจับหลายๆ ชนิดนำมาวัดและบันทึกข้อมูลต่างๆ เช่น ข้อมูลของแรงดันและกระแสเตเตอร์ ช่องว่างอากาศ ความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กภายนอก ความเร็วและตำแหน่งโรเตอร์ แรงบิดเอาต์พุต อุณหภูมิภายในและภายนอก การสั่นสะเทือน และอื่นๆ จากมอเตอร์ เหนียวนำเพื่อการเฝ้าสังเกตความผิดปกติของมอเตอร์ ระบบเฝ้าสังเกตความผิดปกติของมอเตอร์สามารถระบุถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นโดยใช้รูปแบบของความผิดปกติที่มีอยู่ในระบบ ซึ่งประกอบด้วยการลดหรือการเปิดวงจรของตัวนำ ความผิดปกติของร่องลื่นและพัลลัม [4]-[6]

โดยทั่วไปการเฝ้าสังเกตมอเตอร์เหนียวนำจะสนใจการตรวจจับความผิดปกติเพียงหนึ่งชนิดจากสามชนิดคือที่สเตเตอร์ โรเตอร์หรือร่องลื่น ถึงแม้ว่าที่ผ่านได้มีงานวิจัยที่การใช้การเฝ้าสังเกตความร้อนและการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ [7]-[13] ซึ่งวิธีการเหล่านั้นจำเป็นที่จะต้องมีการติดตั้ง

อุปกรณ์ตรวจจับเพิ่มเติมที่ตัวมอเตอร์และตัวตรวจจับที่ใช้มีราคาสูงจึงเป็นข้อจำกัดประการหนึ่ง ดังนั้นใน 30 ปีที่ผ่านมางานวิจัยส่วนใหญ่ได้ใช้การเฝ้าสังเกตพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอเตอร์มากกว่าพารามิเตอร์ทางกล โดยเฉพาะการตรวจสอบกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสเตเตอร์เพื่อตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ [14]-[21] วิธีการตรวจสอบแบบนี้จะใช้ตัวจับกระแส (Hall-effect Current Sensor) การติดตั้งจึงทำได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าตัวตรวจจับชนิดอื่นๆ ระบบ MCSA ที่ใช้วิเคราะห์สภาวะของมอเตอร์เหนียวนำจะประกอบด้วย Signal Conditioning และ Data Acquisition เพื่อส่งข้อมูลที่ได้ออกมาคอมพิวเตอร์นำไปวิเคราะห์ด้วย FFT ระบบการวัดสัญญาณแสดงดังรูปที่ 1

2. ชนิดของความผิดปกติ

ความผิดปกติทั้งสามชนิดนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากสเปกตรัมกระแสเตเตอร์โดยมีรายละเอียดแต่ละชนิดดังนี้

2.1 ความผิดปกติของโรเตอร์

ความผิดปกติของโรเตอร์คือการแตกของแ่งตัวนำโรเตอร์ออกจากวงแหวนด้านท้าย เป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งของมอเตอร์ สามารถก่อให้เกิดผลกระทบที่รุนแรงได้ มีสาเหตุมาจาก

- การสตาร์ทมอเตอร์โดยตรงซึ่งตัวนำโรเตอร์ไม่ได้

ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะส่งผลให้เกิดความร้อนสูงและความเครียดทางกล

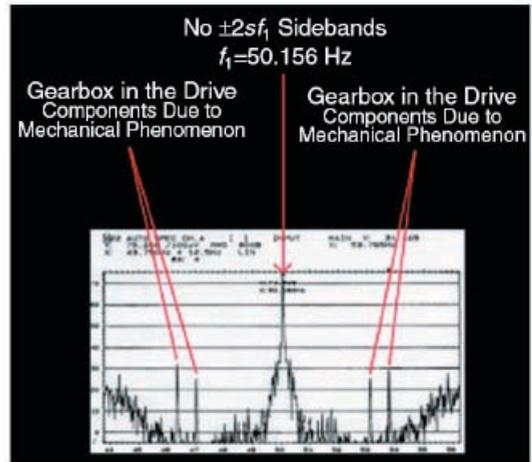
- การเชื่อมต่อโหลดที่เพลาของโรเตอร์ขณะสตาร์ทส่งผลให้เกิดแรงเครียดทางกลสูง
 - ความผิดพลาดในกระบวนการผลิตโรเตอร์
- เมื่อเกิดการแตกหักของแท่งตัวนำโรเตอร์ขึ้นจะทำให้เกิดความถี่ข้างเคียงขึ้นสองค่า โดยมีตำแหน่งใกล้เคียงกับความถี่มูลฐานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ความถี่ข้างเคียงทั้งสองนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (1) [17]

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s) \text{ Hz} \quad (1)$$

เมื่อ s คือ Per Unit Slip

f_1 คือ ความถี่แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Hz)

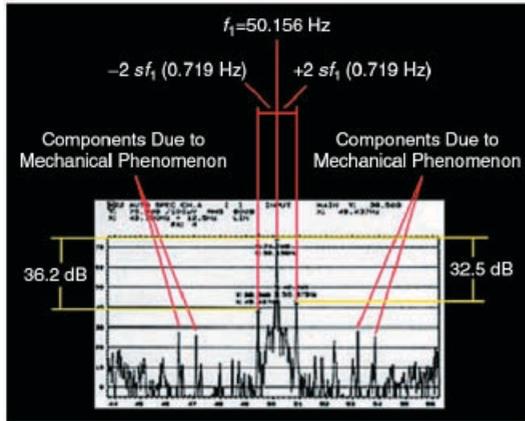
การตรวจจับความผิดพร่องของโรเตอร์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้ Fast Fourier Transform (FFT) มาวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมกระแสของมอเตอร์ แอมพลิจูดของความถี่มูลฐานจะมีค่าสูงสุดและเมื่อเกิดความผิดพร่องของโรเตอร์ขึ้น แอมพลิจูดของความถี่ข้างเคียงจะเกิดขึ้นทั้งสองข้างของความถี่มูลฐาน [16]-[18] การวิเคราะห์จากทรานเซียนของกระแสเตเตอร์และแรงบิดที่เพลามอเตอร์ เมื่อเกิดความผิดพร่องของโรเตอร์สัญญาณกระแสและแรงบิดที่วัดได้จะมีการแกว่งของสัญญาณ [22] การใช้สัญญาณกระแสเตเตอร์ไปวิเคราะห์ด้วย FFT เพื่อดูแอมพลิจูดของความถี่ข้างเคียงจะเกิดขึ้นทั้งสองข้างของความถี่มูลฐานและใช้ Space Vector เพื่อคำนวณมุมของเวกเตอร์สนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ โดยความแตกต่างของมุมที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเกิดความผิดพลาดได้วิธีนี้สามารถตรวจจับความผิดพร่องที่แท่งตัวนำโรเตอร์ 1-5 ตัวนำ [23]-[26] นอกจากนี้ยังมีการนำสัญญาณกระแสมอเตอร์ที่วัดได้มาวิเคราะห์ด้วย Extended Park's Vector Approach โดยที่แอมพลิจูดของความถี่ข้างเคียงจะเกิดขึ้นทั้งสองข้างของความถี่มูลฐานและยังนำสัญญาณกระแสที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วย Park's Vector Pattern เพื่อดูความหนาของ



รูปที่ 2 สเปกตรัมกระแสของมอเตอร์ที่โรเตอร์ปกติ

วงแหวน ซึ่งวงแหวนจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้น [27]-[30] และยังมีการนำ Artificial Neural Network และ Fuzzy Logic มาใช้ในการวิเคราะห์โดยระบบจะถูกสอนให้เรียนรู้ถึงรูปแบบสุขภาพปกติของมอเตอร์และเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นระบบสามารถตรวจจับความผิดพร่องได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำไม่น้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ [31]-[36]

ตัวอย่างการวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสเพื่อหาความผิดพร่องที่เกิดขึ้นของการตัวนำโรเตอร์แตกหักนั้นจะยกตัวอย่างกรณีศึกษาดังนี้ มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีข้อมูลดังนี้ 3 เฟส SCIM, 134kW/150HP, 440 V, 210 A, 1485 rpm, 50 Hz, 0.88 pf ต่อขดลวดแบบสตาร์ โรเตอร์เป็นอะลูมิเนียม 58 ร่องสลิตลลิต 0.01 เมื่อโรเตอร์ของมอเตอร์ที่นำมาใช้ในการทดสอบไม่มีการแตกหักของแท่งตัวนำโรเตอร์สัญญาณสเปกตรัมกระแสที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2 เห็นได้ว่าสัญญาณสเปกตรัมกระแสที่วัดได้นั้นขนาดของสัญญาณความถี่มูลฐาน (f_1) มีค่าสูงสุด โดยไม่มีความถี่ข้างเคียง f_{sb} ที่เกิดจากความผิดพร่องของการแตกหักของแท่งตัวนำ โรเตอร์เกิดขึ้น ส่วนความถี่ฮาร์โมนิกทั้ง 4 ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเฟืองทดที่ต่ออยู่กับเพลามอเตอร์

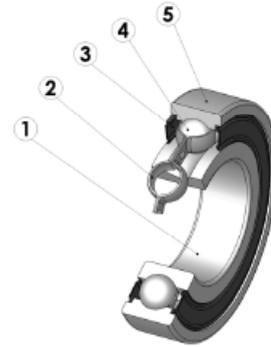


รูปที่ 3 สเปกตรัมกระแสมอเตอร์เมื่อแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก

เมื่อโรเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีการแตกหักของแท่งตัวนำโรเตอร์สัญญาณสเปกตรัมกระแสที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 3 เห็นได้ว่าสัญญาณสเปกตรัมกระแสของความถี่มูลฐาน (f_1) มีค่าสูงสุดเท่าเดิม นอกจากนั้นจะสังเกตเห็นว่ามีความถี่ข้างเคียง f_{sb} ที่มีค่า 0.719 เฮิรตซ์ เกิดขึ้นทั้งสองข้างของความถี่มูลฐาน ซึ่งขนาดของฮาร์มอนิกส์ทั้งสองนั้นมีค่าต่ำกว่าขนาดของความถี่มูลฐานอยู่ 36.2 และ 32.5 dB ส่วนความถี่ฮาร์มอนิกส์ทั้ง 4 ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเฟืองทดที่อยู่กับเพลลาของมอเตอร์ยังเกิดขึ้นอยู่เหมือนเดิม [18]

2.2 ความผิดปกติของรองลื่น

รองลื่นโดยทั่วไปจะแสดงดังรูปที่ 4 จะประกอบด้วยวงแหวนสองส่วนคือวงแหวนด้านใน (Inner Ring) (หมายเลข 1) และวงแหวนด้านนอก (Outer Ring) (หมายเลข 5) โดยที่วงแหวนด้านในจะใช้สวมกับเพลลาส่วนวงแหวนด้านนอกนั้นจะยึดอยู่กับตัวเรือน ระหว่างวงแหวนทั้งสองจะมีลูกกลิ้งเม็ดกลม (Ball) (หมายเลข 4) ที่เคลื่อนที่ได้และจะมีกรงหรือรัง (Cage) (หมายเลข 2) คั่นแยกลูกกลิ้งให้มีระยะห่างคงที่ มีจาระบีบรรจุอยู่ในรางและมีฝาปิดทั้งสองด้าน (หมายเลข 3) เมื่อวงแหวนใดวงแหวนหนึ่งหมุนจะทำให้ลูกกลิ้งเกิดการกลิ้งอยู่ในรางวงแหวนด้วย



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของรองลื่น

ในสภาวะการทำงานปกติเมื่อภาระสมดุลและการวางแนวแกนเพลลาที่ดีจะเกิดรอยสึกหรอเล็กน้อยขึ้นที่พื้นผิวของรางและลูกกลิ้ง รอยสึกหรอนี้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นที่พื้นผิวจนทำให้สามารถตรวจจับการสั่นสะเทือนและระดับเสียงดังเพิ่มขึ้น การปนเปื้อนและการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมในการทำงานไม่เหมาะสม เช่น อยู่ในสถานที่ที่สามารถโดนน้ำ กรด จาระบีเสื่อมสภาพ มีเหรียญหรือคราบสกปรกระหว่างการติดตั้งที่ขาดความระมัดระวัง จะเป็นการเร่งให้รองลื่นเกิดความผิดปกติได้เร็วขึ้น[37]

การตรวจจับความผิดปกติของรองลื่นจะใช้การวิเคราะห์ความถี่ข้างเคียงที่เกิดขึ้นความถี่ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้หลายความถี่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของความผิดปกติที่เกิดขึ้นโดยความถี่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ค่าคือ

1. ความถี่เมื่อเกิดความผิดปกติที่กรง (F_{CF})
2. ความถี่เมื่อเกิดความผิดปกติที่วงแหวนด้านนอกของรองลื่น (F_{ORF})
3. ความถี่เมื่อเกิดความผิดปกติที่วงแหวนด้านในของรองลื่น (F_{IRF})
4. ความถี่เมื่อเกิดความผิดปกติที่ลูกกลิ้งเม็ดกลม (F_{BF})

$$F_{CF} = \frac{1}{2} F_R \left(1 - \frac{D_B \cos \theta}{D_P} \right) \quad (2)$$

$$F_{ORF} = \frac{N_B}{2} F_R \left(1 - \frac{D_B \cos \theta}{D_P} \right) \quad (3)$$

$$F_{IRF} = \frac{N_B}{2} F_R \left(1 + \frac{D_B \cos \theta}{D_P} \right) \quad (4)$$

$$F_{BF} = \frac{D_P}{2D_B} F_R \left(1 - \frac{D_B^2 \cos^2 \theta}{D_P^2} \right) \quad (5)$$

- เมื่อ F_R คือความถี่ของการหมุนโรเตอร์
- N_B คือจำนวนลูกกลิ้งเม็ดกลม
- D_B คือเส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลิ้งเม็ดกลม
- D_P คือระยะห่างของเส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลิ้งเม็ดกลม
- θ คือมุมสัมผัสของลูกกลิ้งเม็ดกลม

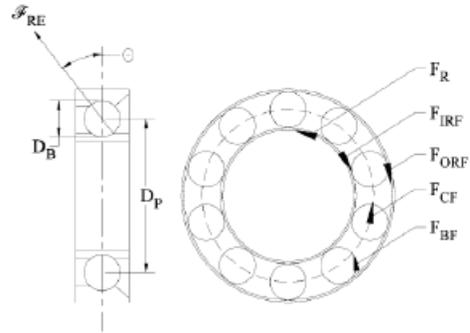
รายละเอียดของตัวแปรต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5

ดังนั้นเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในร่องสั่นจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกขึ้น ซึ่งความถี่ที่จะเกิดขึ้นนั้นเรียกว่าส่วนประกอบของความถี่รวม (F_{BNG}) โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (6)

$$F_{BNG} = |F_E \pm m F_V| \quad (6)$$

- เมื่อ F_E คือความถี่ของแหล่งจ่าย
- F_V คือความถี่ของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจาก 1 ใน 4 ชนิด $m = 1, 2, 3, \dots$

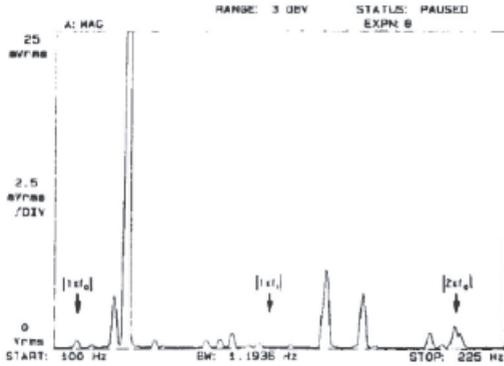
การตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยการติดตั้งตัวตรวจจับความสั่นสะเทือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำและติดตั้งไมโครโฟนเพื่อตรวจจับเสียงที่เกิดขึ้นโดยนำสัญญาณดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยเวฟเลท (Wavelet) เพื่อดูสเปกตรัมความถี่ของการสั่นสะเทือนถ้ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นจะทำให้เกิดแอมพลิจูดของความถี่ข้างเคียงจากสมการที่ (6) เกิดขึ้นใกล้กับความถี่มูลฐาน [8]-[12] จากวิธีการดังกล่าวเนื่องจากราคาของตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนและไมโครโฟนที่ใช้มีราคาสูงและต้องติดตั้งเข้ากับมอเตอร์จึงไม่สะดวกในการใช้งานจึงมีการพัฒนาการวิเคราะห์ความผิดพลาดโดยใช้การวิเคราะห์กระแสมอเตอร์ ซึ่งสามารถลดความยุ่งยากในการติดตั้งตัวตรวจจับได้เนื่องจากตัวตรวจจับกระแสติดตั้งได้ง่ายและมีราคาถูกกว่า การวิเคราะห์กระแส



รูปที่ 5 ขนาดและความถี่ที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติความถี่ของความผิดพลาด

มอเตอร์จะใช้การวิเคราะห์ด้วย FFT และเวฟเลทเพื่อดูสเปกตรัมกระแสมอเตอร์ โดยแอมพลิจูดของความถี่มูลฐานจะมีค่าสูงสุดและเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจะทำให้แอมพลิจูดของความถี่ข้างเคียงที่เกิดขึ้น วิธีนี้สามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่วงแหวนด้านใน ด้านนอก ลูกกลิ้งเม็ดกลมและกรงของร่องสั่นได้ [37]-[41] นอกจากนี้ยังมีการนำ Artificial Neural Network และ Fuzzy Logic มาใช้ในการวิเคราะห์โดยระบบจะถูกสอนให้เรียนรู้ถึงสภาวะปกติของมอเตอร์และเมื่อเกิดความผิดพลาด ทำให้ระบบสามารถตรวจจับและแยกแยะตำแหน่งที่เกิดความผิดพลาดได้รวดเร็วและแม่นยำ [12], [42]-[44]

เพื่อเชื่อมโยงให้เห็นถึงความสัมพันธ์การสั่นสะเทือนส่งผลมาถึงสเปกตรัมกระแสที่สเตเตอร์จึงได้มีการทดสอบโดยทำการเจาะรูที่วงแหวนด้านนอกของร่องสั่นด้านท้ายของเพลลา (ร่องสั่นรุ่น NSK6208) มอเตอร์เป็นแบบ 4 ขั้ว ข้อมูลจำเพาะของร่องสั่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 80 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางใน 40 มม. ระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งเม็ดกลม 60 มม. มีลูกกลิ้งเม็ดกลมจำนวน 9 ลูก เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งเม็ดกลมประมาณ 12 มม. สมมติให้มุมสัมผัสของลูกกลิ้งเม็ดกลมมีค่าเป็น 0 องศา และความเร็วรอบของแกนมอเตอร์ 1735 รอบต่อนาที ($F_R = 28.9$ เฮิร์ตซ์) ความถี่เมื่อเกิดความผิดพลาดที่วงแหวนด้านนอกร่องสั่น



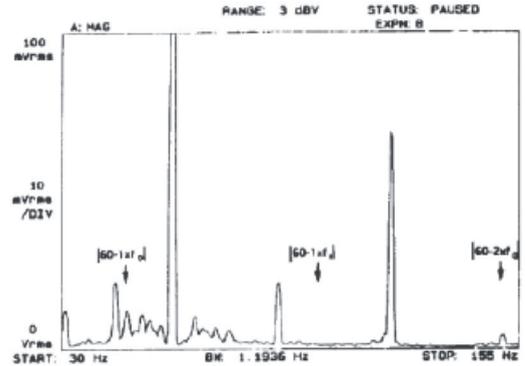
รูปที่ 6 สเปกตรัมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 ขั้วเมื่อมีรูที่วงแหวนด้านนอกของรองลื่น

F_{ORF} จะมีค่า 104 เฮิรตซ์และความถี่เมื่อเกิดความผิดปกติที่วงแหวนด้านในรองลื่น F_{IRF} จะมีค่า 156 เฮิรตซ์ จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นส่วนประกอบของความถี่เมื่อเกิดความผิดปกติที่วงแหวนด้านนอก ฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 1 ($1xf_{ORF}$) และ ($2xf_{ORF}$)

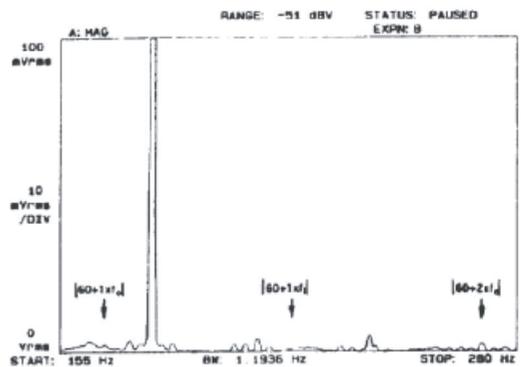
จากรูปที่ 7 และ 8 แสดงให้เห็นสเปกตรัมกระแสที่ได้จากสมการที่ 2 ซึ่งทำนายความถี่ที่จะเกิดขึ้นคือ $|f_E \pm 1xf_o|$ และ $|f_E \pm 2xf_o|$ เมื่อความถี่แหล่งจ่ายเท่ากับ 60 เฮิรตซ์ จะเห็นว่าขนาดของฮาร์มอนิกส์จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 64 เฮิรตซ์

2.3 ความผิดปกติของสเตเตอร์

ความผิดปกติของสเตเตอร์อาจจะมีสาเหตุจากความผิดปกติระหว่างกระบวนการผลิตมอเตอร์ ความไม่เหมาะสมของการทำงาน การระบายอากาศที่ไม่เพียงพอ และอื่นๆ แหล่งจ่ายของมอเตอร์ที่เป็นอินเวอร์เตอร์แบบ Pulse Width Modulation (PWM) มีความน่าจะเป็นอย่างมากที่จะทำให้เกิดความผิดปกติที่รองลื่นและฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ [30] ความผิดปกติของสเตเตอร์เริ่มเกิดขึ้นเนื่องจากความเครียดทางความร้อน ไฟฟ้า ทางกลและสภาพแวดล้อมทำให้อายุการใช้งานขดลวดสเตเตอร์นั้นลดลง [45] ความผิดปกติของสเตเตอร์สามารถแบ่งได้ดังนี้



รูปที่ 7 สเปกตรัมกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 ขั้วเมื่อมีรูที่วงแหวนด้านนอกของรองลื่น (30-155 Hz)



รูปที่ 8 สเปกตรัมกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 4 ขั้วเมื่อมีรูที่วงแหวนด้านนอกของรองลื่น (155-280 Hz) [60]

1. ขดลวดลัดรอบในชุดเดียวกัน
2. ขดลวดลัดวงจรในเฟสเดียวกัน
3. ขดลวดลัดวงจรของระหว่างเฟส
4. ขดลวดลัดวงจรลงกราวด์
5. ขดลวดเปิดวงจร 1 เฟส

มีงานวิจัยหลายชิ้นได้นำเสนอการวิเคราะห์สัญญาณของช่องว่างอากาศและแกนฟลักซ์เพื่อตรวจจับขดลวดลัดรอบ ซึ่งรายละเอียดของสมการทางคณิตศาสตร์สามารถหาได้จาก [46], [47] ส่วนประกอบ

ความถี่ฮาร์มอนิกในสัญญาณฟลักซ์ช่องว่างอากาศ
เมื่อเกิดขดลวดลัดรอบหาได้จากสมการที่ (7)

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

เมื่อ f_{st} คือส่วนประกอบความถี่ฮาร์มอนิก

f_1 คือความถี่แหล่งจ่าย

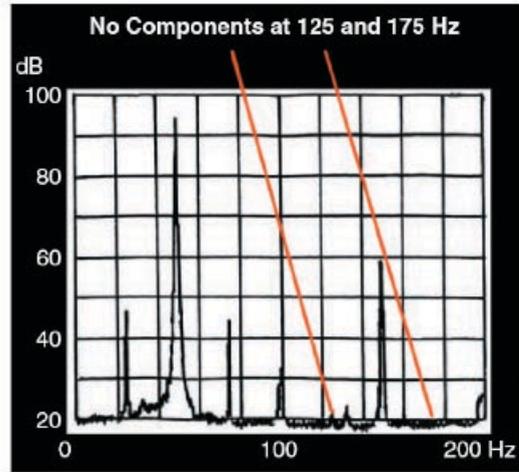
n คือ 1, 2, 3,

k คือ 1, 3, 5,

p คือคู่ขั้ว

s คือสลลิป

มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีขนาดฟลักซ์ของขดลวดสเตเตอร์ที่ 4 kV หรือสูงกว่า จะใช้วิธีการทดสอบแบบ Partial Discharge (PD) เพื่อหาตำแหน่งที่ฉนวนของขดลวดในสเตเตอร์เริ่มเสื่อมสภาพ ซึ่งผลที่ได้สามารถระบุถึงตำแหน่งของขดลวดในสเตเตอร์ที่เกิดความผิดปกติได้น่าเชื่อถืออย่างยิ่ง [48] ความผิดปกติที่สเตเตอร์มอเตอร์ แรงดันต่ำสามารถตรวจจับความผิดปกติการลัดรอบของขดลวด โดยการวิเคราะห์ส่วนประกอบฟลักซ์ของเครื่องจักรโดยใช้ขดลวดขนาดใหญ่ติดตั้งให้มีศูนย์กลางอยู่ที่แกนเพลลาของเครื่องจักร ตำแหน่งของความผิดปกติสามารถตรวจจับได้โดยการติดตั้งขดลวดที่สมมาตรกันสี่ชุดในสี่ขดลวดแตรนต์ของมอเตอร์ในแนวรัศมีในระยะห่างครึ่งหนึ่งจากแกนเพลลาถึงด้านท้ายของขดลวดสเตเตอร์ [49] ส่วนประกอบของความถี่ที่เกิดขึ้นหาได้จากสมการที่ (7) การวัดส่วนประกอบ Negative Sequence ของกระแส และนำมาวิเคราะห์ฮาร์มอนิก สามารถตรวจจับความผิดปกติการลัดวงจรเฟสถึงกราวด์และเฟสถึงเฟสได้ [50] การตรวจจับโดยใช้นิวรอลเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของส่วนประกอบกระแส Negative Sequence และ Positive Sequence ของมอเตอร์ปกติและที่มีความผิดปกติสามารถตรวจจับความผิดปกติการลัดรอบขดลวด [51] การวิเคราะห์ความผิดปกติโดยใช้การวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสสเตเตอร์ แอมพลิจูดของความถี่

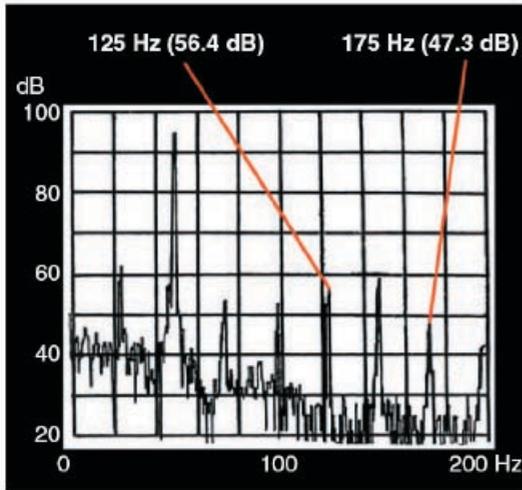


รูปที่ 9 สเปกตรัมกระแสเมื่อไม่มีความผิดปกติ

มูลฐานจะมีค่าสูงสุดและแอมพลิจูดของความถี่ข้างเคียงจะเกิดขึ้นเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น สามารถตรวจจับความผิดปกติการลัดรอบของขดลวด [52]-[55]

ตัวอย่างการวิเคราะห์หาความผิดปกติของขดลวดลัดรอบ มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 11 kW, 415/420 V, 20.5 A, 1440 rpm, 50 Hz SCIM ต่อแบบเดลต้า 36 สลิต ขดลวดหนึ่งเฟสมี 4 กรู๊ป แต่ละกรู๊ปมีสองคอลย์ หนึ่งกรู๊ปมีขดลวด 15 และ 30 รอบ ดังนั้นหนึ่งกรู๊ปจะมีขดลวดทั้งหมด 180 รอบต่อเฟส การจำลองความผิดปกติทำได้โดยการเลือกจำนวนรอบแบบสุ่มอย่างน้อย 20% และเชื่อมต่อสายจากท้ายขดลวดและป้อนแรงดันฟลักซ์ ไม่มีภาระต่อกับมอเตอร์ สเปกตรัมกระแสของมอเตอร์เมื่อไม่มีความผิดปกติที่สเตเตอร์จะแสดงดังรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าขนาดของสเปกตรัมจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่มูลฐานและที่ความถี่ 25 และ 75 เฮิร์ตซ์ ฮาร์มอนิกส์จะมีขนาดประมาณ 46 และ 44 dB ซึ่งที่ความถี่ทั้งสองเป็นค่าฮาร์มอนิกส์ปกติขณะมอเตอร์ทำงาน จากสมการที่ (7) ถ้าเกิดความผิดปกติขึ้นจะมีฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นที่ความถี่ 125 และ 175 เฮิร์ตซ์แต่จากรูปที่ 9 จะไม่มีฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้น



รูปที่ 10 สเปกตรัมกระแสเมื่อเกิดความผิดปกติที่ สเตเตอร์

จากรูปที่ 10 แสดงสเปกตรัมกระแสเมื่อเกิดความผิดปกติที่สเตเตอร์ขึ้น จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 125 และ 175 เฮิรตซ์ นั้นขนาดของสเปกตรัมจะมีค่า 56.4 และ 47.3 dB ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (7) เมื่อ $k=1$, $n=3$ และ $k=1$, $n=5$

3. สรุป

บทความนี้นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับเทคนิคการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ด้วยสเปกตรัมกระแสสเตเตอร์ เห็นได้ว่ามีวิธีการที่แตกต่างกันหลายวิธีและใช้ตัวตรวจจับหลายชนิด การตรวจสอบความผิดปกติโดยการตรวจจับกระแสสเตเตอร์และวิเคราะห์สเปกตรัมขณะมอเตอร์ใช้งานอยู่เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในปัจจุบันนี้ เนื่องจากการวัดวิธีนี้ใช้ตัวตรวจจับกระแสเพียงอย่างเดียวซึ่งมีราคาถูกกว่าอุปกรณ์ตรวจจับชนิดอื่นๆ ติดตั้งได้ง่ายและสามารถตรวจจับความผิดปกติได้เหมือนกับตัวตรวจจับชนิดอื่นๆ อีกทั้งสามารถทำการวัดได้ขณะที่มอเตอร์ใช้งานอยู่ โดยไม่มีผลกระทบต่อการผลิตและใช้เวลาในการตรวจสอบน้อย ทั้งยังทราบความผิดปกติได้ก่อนที่จะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Motor Reliability Working Group, "Report of large motor reliability survey of industrial commercial installations," *Part I, IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. IA-21, pp.853-872, July/Aug. 1985.
- [2] O.V. Thorsen and M. Dalva, "Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry," in *Proc. 8th Inst. Elec. Eng. Int. Conf., EMD'97, University of Cambridge*, no. 444, pp. 109-113.
- [3] A.H. Bonnet and G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 28, pp. 921-937, July/Aug. 1992.
- [4] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*, Oxford : Clarendon Press, 1993.
- [5] G.B. Kliman et al., "Methods of motor current signature analysis," *Electric Machines & Power System*, vol. 20, no. 5, pp. 463-474, Sep. 1992.
- [6] M.E H. Benbouzid et al., "Induction motor diagnostics via stator current monitoring," *Proceedings of the 1997 International Conference on Maintenance and Reliability, Knoxville, Tennessee (USA)*, vol. I, pp. 36.01-36.10, May 1997.
- [7] J.R Cameron et al., "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors," *IEE Proc.*, vol. 133, pt.B, no. 3, pp. 155-163, May 1986.
- [8] T.W.S. Chow and Gou Fei, "Three phase induction machines asymmetrical faults identification using bispectrum," *Energy Conversion, IEEE Transaction on*, vol.10, no.4, pp.688-693. Dec 1995.



- [9] Zhang Hui, Wang Shu-juan, Zhang Qing-sen, and Zhai Guo-fu, "The research on rolling element bearing fault based on wavelet packets transform," *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*, vol.2, pp. 1745-1749, 2-6 Nov. 2003.
- [10] Cheng Li, Zhihuan Song, and Ping Li, "Bearing fault detection via wavelet packet transform and rough set theory," *Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on*, vol.2, pp. 1663-1666, 15-19 June 2004.
- [11] Tavakkoli, Farshid and Teshnehlab, Mohammad, "A ball bearing fault diagnosis method based on wavelet and EMD energy entropy mean," *Intelligent and Advanced Systems, 2007. ICIAS 2007. International Conference on*, pp.1210-1212, 25-28 Nov. 2007.
- [12] Sun Fang and Wei Zijie, "Rolling Bearing Fault Diagnosis Based on Wavelet Packet and RBF Neural Network," *Control Conference, 2007. CCC 2007. Chinese*, pp.451-455, July 26 2007- June 31 2007.
- [13] B. Liang, S. D. Iwnicki, and A. D. Ball, "Asymmetrical stator and rotor faulty detection using vibration, phase current and transient speed analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 17, Issue 4, pp. 857-869, July 2003.
- [14] R.R. Schoen et al., "An unsupervised. on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol 3 I, no. 6, pp. 1280-1286, Nov.-Dec. 1995, pp. 1018-1025, August 1990.
- [15] R.R. Schoen et al., "Motor bearing damage detection using stator current monitoring," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 3 I, no. 6, pp. 1274-1279, Nov.-Dec. 1995.
- [16] N.M. Elkasabgy et al., "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.28, no. 1, pp 165-171, Jan.-Feb. 1992.
- [17] W.T. Thomson, "On-line current monitoring to detect electrical and mechanical faults in three-phase induction motor drives," *Life Management of Power Plants, 1994., International Conference on*, pp.66-73, 12-14 Dec. 1994.
- [18] W.T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol.7, no.4, pp.26-34, Jul./Aug. 2001.
- [19] M. Drif, N. Benouzza, B. Kraloua, A. Bendiabdellah, and J.A. Dente, "Squirrel cage rotor faults detection in induction motor utilizing stator power spectrum approach," *Power Electronics, Machines and Drives, 2002. International Conference on (Conf. Publ. No. 487)*, pp. 133-138, 4-7 June 2002.
- [20] Ye Zhongming Wu Bin and A. Sadeghian, "Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.50, no.6, pp. 1217-1228, Dec. 2003.
- [21] K. Bacha, M. Gossa, and G.-A. Capolino, "Diagnosis of induction motor rotor broken bars," *Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT '04. 2004 IEEE International Conference on*, vol.2, pp. 979-984, 8-10 Dec. 2004.
- [22] H.A. Toliyat and T.A., Lipo, "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor



- bar and end ring faults,” *Energy Conversion, IEEE Transaction on*, vol.10, no.2, pp.241-247, Jun. 1995.
- [23] D. Kostic-Perovic, M. Arkan, and P. Unsworth, “Induction motor fault detection by space vector angular fluctuation,” *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, vol.1, pp.388-394, 2000.
- [24] I. Tsoumas, E. Mitronikas, and A. Safacas, “Induction motor mixed fault diagnosis based on wavelet analysis of the current space vector,” *Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on*, vol.3, pp. 2186-2191, 27-29 Sept. 2005.
- [25] B. Mirafzal and N.A.O. Demerdash, “Induction machine broken-bar fault diagnosis using the rotor magnetic field space-vector orientation,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.40, no.2, pp. 534-542, March-April 2004.
- [26] S.H. Kia, H. Henao, and S.G.-A. Capolino, “Diagnosis of Broken Bar Fault in Induction Machines Using Discrete Wavelet Transform without Slip Estimation,” *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, pp. 1917-1922, 23-27 Sept. 2007.
- [27] H. Nejjari and M.E.H. Benbouzid, “Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park’s vector pattern learning approach,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.36, no.3, pp.730-735, May/June. 2000.
- [28] A. Aboubou, M. Sahraoui, S.E. Zouzou, H. Razik, and A. Rezzoug, “Broken bars and/or end rings detection in three-phase induction motors by the extended Park’s vector approach,” *Power Electronics Congress, 2004. CIEP 2004. 9th IEEE International*, pp. 128-133, 17-22 Oct. 2004.
- [29] C. Kral, T.G. Habetler, R.G. Harley, F. Pirker, G. Pascoli, H. Oberguggenberger, and C.J.M. Fenz, “A comparison of rotor fault detection techniques with respect to the assessment of fault severity,” *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003. 4th IEEE International Symposium on*, pp. 265-270, 24-26 Aug. 2003.
- [30] G.G. Acosta, C.J. Verucchi, and E.R. Gelso, “A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, Issue 4, pp. 953-965, May 2006,
- [31] Zhongming Ye, Bin Wu, and A.R. Sadeghian, “Electrical machine fault detection using adaptive neuro-fuzzy inference,” *IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th*, vol.1, pp. 390-394, 25-28 July 2001.
- [32] Z. Ye, A. Sadeghian, B. Wu, “Mechanical fault diagnostics for induction motor with variable speed drives using Adaptive Neuro-fuzzy Inference System,” *Electric Power Systems Research*, vol. 76, Issues 9-10, pp. 742-752, June 2006.
- [33] Enrico Zio and Giulio Gola, “A neuro-fuzzy technique for fault diagnosis and its application to rotating machinery,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 94, Issue 1, *Maintenance Modeling and Application*, pp. 78-88. Jan. 2009.
- [34] Van Tung Tran, Bo-Suk Yang, Myung-Suck



- Oh, and Andy Chit Chiow Tan, "Fault diagnosis of induction motor based on decision trees and adaptive neuro-fuzzy inference," *Expert Systems with Applications* In Press, Corrected Proof, Available online 23 December 2007.
- [35] Mo-Yuen Chow, "The advantages of machine fault detection using artificial neural network and fuzzy logic technologies," *Industrial Technology, 1994. Proceedings of the IEEE International Conference on*, pp.83-87, 5-9 Dec. 1994.
- [36] R. Di Stefano, S. Meo, and M. Scarano, "Induction motor faults diagnostic via artificial neural network (ANN)," *Industrial Electronics, 1994. Symposium Proceedings, ISIE '94. 1994 IEEE International Symposium on*, pp.220-225, 25-27 May 1994.
- [37] R.R. Schoen, T.G. Habetler, F. Kamran, and R.G. Bartfield, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.31, no.6, pp.1274-1279, Nov/Dec.1995.
- [38] L. Eren and M.J. Devaney, "Motor bearing damage detection via wavelet analysis of the starting current transient," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE*, vol.3, pp.1797-1800, 2001.
- [39] J.R. Stack, T.G. Habetler, and R.G. Harley, "Bearing fault detection via autoregressive stator current modeling," *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, vol.2, pp. 1352-139, 12-16 Oct. 2003.
- [40] K. Teotrakool, M.J. Devaney, and L. Eren, "Adjustable Speed Drive Bearing Fault Detection via Wavelet Packet Decomposition," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2006. IMTC 2006. Proceedings of the IEEE*, pp.22-25, 24-27 April 2006.
- [41] Trajin Baptiste, Regnier Jeremi, and Faucher Jean, "Indicator for bearing fault detection in asynchronous motors using stator current spectral analysis," *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, pp.570-575, June 30 2008-July 2 2008.
- [42] T. I. Liu and J. M. Mengel, "Intelligent monitoring of ball bearing conditions," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 6, Issue 5, pp. 419-431, September 1992.
- [43] B. Li, M.-Y. Chow, Y. Tipsuwan, and J.C. Hung, "Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.47, no.5, pp.1060-1069, Oct. 2000.
- [44] L. Eren, A. Karahoca, and M.J. Devaney, "Neural network based motor bearing fault detection," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE*, vol.3, pp. 1657-1660, 18-20 May 2004.
- [45] A.H. Bonnett and G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.28, no.4, pp.921-937, Jul./Aug. 1992.
- [46] S. Fruchtecht, E. Pittius, and H. Seinsch, "A diagnostic system for three-phase asynchronous machines," in *Proc. Institute of Electrical Engineering Conf., EMDA'89*, vol. 310, pp. 163-171, 1989,



- [47] P. Tavner and J. Penman, *Condition Monitoring of Electrical Machines*, England: Research Studies Ltd and Wiley, 1987.
- [48] G.C. Stone, H.G. Sedding, and M.J. Costello, "Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.32, no.2, pp.459-464, Mar./Apr. 1996.
- [49] J. Penman, H.G. Sedding, B.A. Lloyd, and W.T. Fink, "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors," *Energy Conversion, IEEE Transaction on*, vol.9, no.4, pp.652-658, Dec. 1994.
- [50] S. Williamson and K. Mirzorian, "Analysis of Cage Induction Motors with Stator Winding Faults," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no.7, pp.1838-1842, July 1985.
- [51] L. Collamati, F. Filippetti, G. Franceschini, S. Pirani, and C. Tassoni, "Induction machine stator fault on-line diagnosis based on LabVIEW environment," *Electrotechnical Conference, 1996. MELECON '96., 8th Mediterranean*, vol.1, pp.495-498, 13-16 May 1996.
- [52] W.T. Thomson, "On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure," *Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International*, pp. 891-898, 2001.
- [53] S.M.A. Cruz and A.J.M. Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach," *Industry applications, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 5, pp. 1227-1233, Sep./Oct. 2001.
- [54] D. Henry, A. Zolghadri, M. Monsion, and F. Cazaaurang, "Fault diagnosis in induction machines using the generalized structured singular value," *Control Engineering Practice*, vol. 10, Issue 6, pp. 587-598, June 2002,
- [55] Kim Kyusung and A.G. Parlos, "Induction motor fault diagnosis based on neuropredictors and wavelet signal processing," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 7, no. 2, pp.201-219, Jun. 2002.