

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

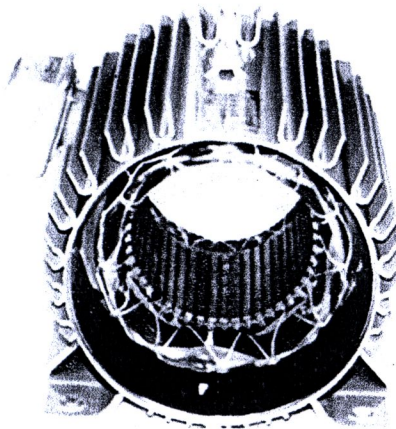
งานวิจัยทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยเฉพาะงานด้านการวินิจฉัยความผิดปกติของ อินดักชันมอเตอร์ ในปัจจุบันมีเทคนิคการวินิจฉัยความผิดปกติของอินดักชันมอเตอร์มากมาย ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการใช้งาน และความเหมาะสมในการตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับอินดักชันมอเตอร์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยความผิดปกติของอินดักชันมอเตอร์ โดยมุ่งเน้นจากการเฝ้าสังเกตกระแสเตเตอร์เพื่อบ่งบอกความผิดปกติที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์ผลความผิดปกติของกระแสเตเตอร์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Theories and Literature - Review) สำหรับงานวิจัยนี้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ทฤษฎีเกี่ยวกับอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส

1. โครงสร้างของอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และส่วนของโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการหมุน โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

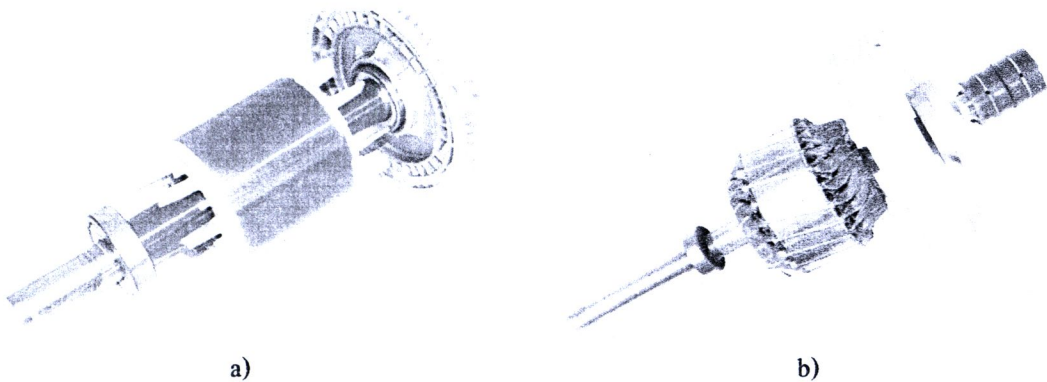
1.1 สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่หนึ่งมีแกนเป็นแผ่นลามิเนตประกบกัน ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าซิลิกอน (Silicon steel) และมีขดลวดสเตเตอร์ฝังตัวอยู่ในร่องสลิตของแกนเหล็ก โดยขดลวดสเตเตอร์จะมีการพันขดลวดแบบกระจายเพื่อทำให้เกิดการกระจายของสนามแม่เหล็กแบบไซน์ซอยด์ (Sinusoidal) ซึ่งรูปร่างของสเตเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเตเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส

1.2 โรเตอร์ เป็นโรเตอร์ชนิดไม่มีขั้วยื่น (Non-salient-pole) หรือชนิดทรงกระบอก (Cylindrical rotor) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1.2.1 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotor) โรเตอร์ประเภทนี้ที่แกนของโรเตอร์จะทำด้วยเหล็กลามิเนต (Laminated Sheet Steel) ตรงกลางแผ่นจะเจาะรูสำหรับสอดเพลาลูกเบี้ยว เมื่อนำแผ่นลามิเนตเหล่านี้มาอัดด้วยกันจะได้แกนโรเตอร์ เมื่อนำแกนโรเตอร์เข้าไปวางในแบบพิมพ์ (Mold) แล้วฉีดอลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้อลูมิเนียมอัดแน่นอยู่ในร่องสล็อต และมีครีบบนออกไปทั้งสองข้างเพื่อใช้เป็นใบพัดสำหรับระบายความร้อน และเมื่ออัดเพลาลูกเบี้ยวเข้าไปที่รูกลางแกนโรเตอร์จะได้โรเตอร์แบบกรงกระรอกดังรูปที่ 2.2a)



รูปที่ 2.2 โรเตอร์ของอินดัคชันมอเตอร์ 3 เฟส a) โรเตอร์แบบกรงกระรอก
b) โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์

1.2.2 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบโรเตอร์ (Wound rotor) โรเตอร์ประเภทนี้มีขดลวดพันอยู่ในร่องสล็อตเช่นเดียวกับสเตเตอร์รูปที่ 2.2 b) โดยส่วนปลายของขดลวดจะต่ออยู่กับแหวนลื่น (Slip Ring) และมีแปรงถ่านสัมผัสอยู่โดยแปรงถ่านจะต่ออยู่กับวงจรภายนอกเพื่อทำการต่อวงจรแบบสตาร์หรือเดลต้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้มีข้อจำกัดคือจะต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์ และไม่สามารถหมุนด้วยความเร็วที่สูงมากได้เนื่องจากความแข็งแรงทางกลต่ำ นอกจากนี้ยังมีราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระรอก แต่ข้อดีของโรเตอร์ประเภทนี้คือสามารถกำหนดแรงบิดขณะสตาร์ทได้โดยอาศัยการต่อความต้านทานภายนอก

2. หลักการทำงานของอินดัคชันมอเตอร์ 3 เฟส

หลักการทำงานของอินดัคชันมอเตอร์ 3 เฟส อาศัยการเหนี่ยวนำจากสเตเตอร์ไปสู่ โรเตอร์ โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่สเตเตอร์ สนามแม่เหล็กหมุนในช่องว่างอากาศจะถูกสร้างโดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดที่พันอยู่ในร่องสล็อตของสเตเตอร์ และความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์และความถี่ของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย ดังสมการ 2.1

$$n_s = \frac{120f_e}{P} \quad (2.1)$$

เมื่อ n_s คือ ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

f_e คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Hz)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (Pole)

การหมุนของโรเตอร์อาศัยหลักการเหนี่ยวนำคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ด้านโรเตอร์ เมื่อตัวนำโรเตอร์ถูกตัดวงจรด้วยวงแหวน (End Ring) จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลบริเวณตัวนำโรเตอร์ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่วางอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กจะเกิดแรงขึ้นที่ตัวนำ ทำให้โรเตอร์สามารถหมุนได้

เมื่อโรเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์หมุนคงที่ด้วยความเร็วรอบ n_m รอบต่อนาที มีทิศทางหมุนทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนในช่องว่างอากาศ n_s รอบต่อนาที โรเตอร์จะหมุนตามหลังความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน $n_s - n_m$ รอบต่อนาที หรือเรียกว่า ความเร็วสลิปของโรเตอร์ ดังนั้นค่าสลิปของโรเตอร์ คือ อัตราส่วนระหว่าง ความเร็วสลิปของโรเตอร์ต่อความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน ดังสมการ (2.2)

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (2.2)$$

ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์อยู่ในสภาวะอยู่กับที่ ความถี่ของโรเตอร์ (Rotor Frequency) จะมีค่าเท่ากับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว n_m ความถี่ของโรเตอร์สามารถแสดงดังสมการ (2.3)

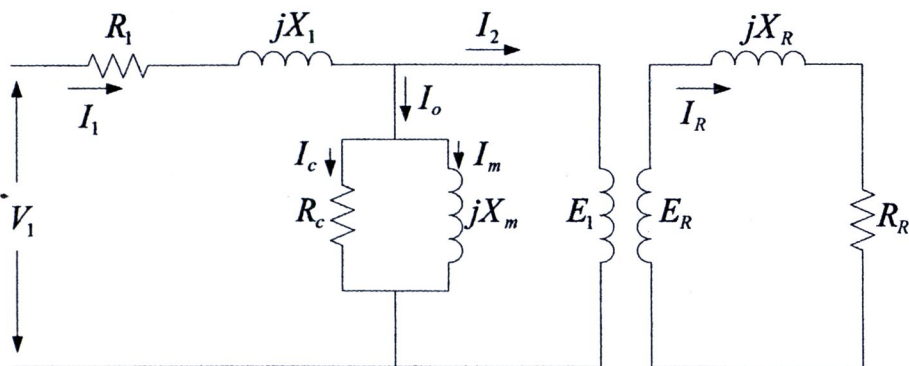
$$f_r = sf_e \quad (2.3)$$

เมื่อ f_e คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Hz)

f_r คือ ความถี่ของโรเตอร์ (Hz)

3. วงจรสมมูลของอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส

เนื่องจากอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส อาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับหม้อแปลงไฟฟ้าจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า แต่แตกต่างที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นไม่สามารถเคลื่อนที่เหมือนกับโรเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์



รูปที่2.3 วงจรสมมูลของอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟสขณะอยู่กับที่

- เมื่อ R_1 คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
 R_R คือ ค่าความต้านทานของขดลวดโรเตอร์
 R_c คือ ค่าความต้านทานความสูญเสียของแกนเหล็ก
 X_1 คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดสเตเตอร์
 X_R คือ ค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหลของขดลวดโรเตอร์
 X_m คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก
 I_c คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก
 I_m คือ กระแสไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่2.3สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ใหม่โดยการย้ายค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นทางโรเตอร์ไว้ทางด้านสเตเตอร์เพื่อความสะดวกในการคำนวณและวิเคราะห์ดังรูปที่2.4ซึ่งการย้ายไปนี้ไม่ได้ทำให้ค่าต่างๆ ผิดพลาดไปจากความเป็นจริงมากนัก โดยจะต้องทราบค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์ (Turns Ratio: a) ซึ่งจะหาค่าต่างๆ ของวงจรสมมูลได้ดังนี้ คือ

$$E_1 = E'_R = aE_R \quad (2.4)$$

เมื่อ E_1 คือ แรงดันไฟฟ้าขณะโรเตอร์อยู่กับที่ที่ย้ายมายังด้านสเตเตอร์

$$I_2 = \frac{I_R}{a} \quad (2.5)$$

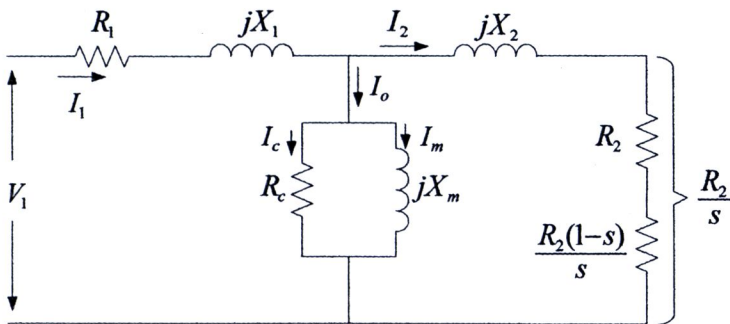
เมื่อ I_2 คือ กระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

$$R_2 = a^2 R_R \quad (2.6)$$

$$X_2 = a^2 X_R \quad (2.7)$$

เมื่อ R_2 คือ ความต้านทานของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์

เมื่อ X_2 คือ รีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ที่ย้ายค่ามายังด้านสเตเตอร์



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลที่ย้ายค่าต่างๆ จากด้านโรเตอร์ไปด้านสเตเตอร์ที่ความเร็วใดๆ

วงจรสมมูลต่อเฟสของอินดักชันมอเตอร์ที่ความเร็วใดๆ แสดงดังรูปที่ 2.4 สามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ ดังสมการ (2.8)

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{eq}} \quad (2.8)$$

$$\text{เมื่อ } Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{R_c + jX_m}{R_c(jX_m)} + \frac{1}{R_2/s + jX_2}} \quad (2.9)$$

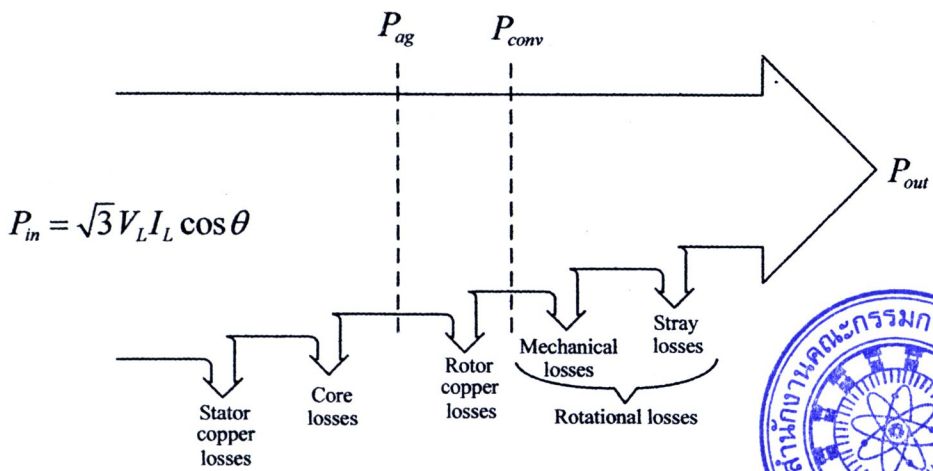
พิจารณาผังการไหลกำลังไฟฟ้า (Power-Flow) ของอินดักชันมอเตอร์ชนิด 3 เฟสแสดงดังรูปที่ 2.5 เมื่อกำหนดให้

P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าอินพุตที่จ่ายเข้าคลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ (Input Power)

P_{ag} คือ กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (Air-gap Power)

P_{conv} คือ กำลังกลที่เกิดขึ้นกับโรเตอร์

P_{out} คือ กำลังเอาต์พุตที่เพลของโรเตอร์ (Output Power)



รูปที่ 2.5 ผังการไหลของพลังงานในอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส

จากผังการไหลของพลังงานในรูปที่ 2.5 กำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (Air-gap Power) เกิดขึ้นจากผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าอินพุต (Input Power) กับกำลังความสูญเสียของขดลวด สเตเตอร์ (Stator - Copper Losses) และกำลังความสูญเสียแกนเหล็ก (Core Losses)

$$P_{ag} = P_{in} - P_{sc} - P_{core} \quad (2.10)$$

เมื่อกำหนดให้ P_{sc} และ P_{core} คือกำลังความสูญเสียของขดลวดสเตเตอร์ และกำลังความสูญเสียแกนเหล็ก ดังนั้น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ห้องสมุดงานวิจัย

วันที่ 21 พ.ย. 2555

เลขทะเบียน 191083

เลขเรียกหนังสือ

$$P_{sc} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.11)$$

$$\text{และ } P_{core} = 3I_c^2 R_c \quad (2.12)$$

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์รูปที่ 2.4 สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ (Air-gap Power) ดังสมการ (2.13)

$$P_{ag} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.13)$$

กำลังความสูญเสียของขดลวดโรเตอร์ (Rotor Copper Losses) หาได้จาก

$$P_{rc} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.13) และ (2.14) สามารถจัดรูปกำลังความสูญเสียของขดลวดโรเตอร์อยู่ใน
 ทอมของกำลังไฟฟ้าในช่องอากาศ ดังสมการ (2.15)

$$P_{rcl} = sP_{ag} \quad (2.15)$$

กำลังกลที่เกิดขึ้นกับโรเตอร์ คือผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าในช่องอากาศกับกำลังสูญเสีย
 ของขดลวดโรเตอร์ ดังนั้น

$$P_{conv} = (1 - s)P_{ag} \quad (2.16)$$

เมื่อทราบค่ากำลังกลของโรเตอร์ จากสมการ (2.16) และค่าความเร็วเชิงมุมมอเตอร์แล้ว
 สามารถคำนวณค่าแรงบิดเหนี่ยวนำที่เพลารของโรเตอร์ (Induced Torque) ดังนี้

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (2.17)$$

เนื่องจากค่ากำลังสูญเสียเนื่องจากการหมุน (Rotational Losses) สามารถคำนวณได้จากการ
 ทดสอบมอเตอร์ในสภาวะ ไม่มี โหลด (No-load Test) ดังนั้นสามารถคำนวณค่ากำลังเอาต์พุต (Output -
 Power) ได้ดังสมการ

$$P_{out} = P_{conv} - P_{mech} - P_{stray} \quad (2.18)$$

เมื่อทราบค่ากำลังเอาต์พุตของมอเตอร์และค่าความเร็วเชิงมุมมอเตอร์แล้ว สามารถ
 คำนวณค่าแรงบิดที่เพลารโรเตอร์ (Shaft Torque or Load Torque) ได้จากสมการ

$$\tau_{shaft} = \frac{P_{out}}{\omega_m} \quad (2.19)$$

หลังจากทราบค่ากำลังอินพุตที่ป้อนให้กับมอเตอร์และกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์สามารถ
 คำนวณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Efficiency: η) ได้ดังสมการ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.20)$$

การวิเคราะห์ความผิดปกติในมอเตอร์ (Motor Failure Analysis)

มอเตอร์นับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับเครื่องจักรต่างๆ เนื่องจากการทำหน้าที่เป็นตัวต้นกำลัง โดยแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อขับโหลดต่างๆ ดังนั้นการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์ จึงมีความจำเป็นเพื่อต้องการทราบสาเหตุความผิดปกติของมอเตอร์ก่อนที่จะได้รับความเสียหายที่รุนแรง ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อนี้ โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. ความเสียหายของมอเตอร์

ความเสียหายของอินดักชันมอเตอร์ประกอบด้วย ความเสียหายทางกล และความเสียหายของฉนวนซึ่งความเสียหายของฉนวน (Insulation system failure) คิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ของความเสียหายทั้งหมด มีสาเหตุจาก ความชื้น (Moisture), อุณหภูมิสูง (Over-temperature), ระบบไฟฟ้าไม่เสถียร (System surge), และการลัดวงจร (Faulty earth) ความเสียหายทางกล (Mechanical failures) เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นบ่อยกับอินดักชันมอเตอร์ เช่น ความผิดปกติของสเตเตอร์ผลเกิดจากการเปิดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ (Stator faults), ตัวนำโรเตอร์แตกหรือ วงแหวนโรเตอร์แตก (Broken rotor bars or - Cracked rotor end rings), บริเวณช่องว่างอากาศไม่สม่ำเสมอ (Air-gap irregularities), เพลาโค้งงอ (Bent - shaft), การเอียงศูนย์ (Misalignment), และความเสียหายของแบริ่ง (Bearing failures) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอินดักชันมอเตอร์จะแสดงอาการออกมาในหลายรูปแบบ อาทิเช่น ความไม่สมดุลของแรงดัน และกระแส, เพิ่มการสั่นสะเทือนของทอร์ค และผลของค่าเฉลี่ยทอร์คลดลง, มอเตอร์มีความสูญเสียเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความร้อนสูงขึ้น และประสิทธิภาพลดลง, ฮาร์โมนิกของกระแสเพิ่มขึ้น, เกิดการรั่วไหลของฟลักแม่เหล็ก [3]

2. การวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์

การวินิจฉัยความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับอินดักชันมอเตอร์นั้นมีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น การวัดดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge measurement), การวิเคราะห์สัญญาณกระแส ของมอเตอร์ (MCSA), การวิเคราะห์ทางเคมี (Chemical analysis), การเฝ้าสังเกตการสั่นสะเทือน (Vibration - monitoring), การเฝ้าสังเกตสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic field monitoring) จากตาราง 2.1 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคการตรวจสอบความเสียหายของมอเตอร์ พบว่าแต่ละเทคนิคการตรวจสอบจะมีความสามารถในการตรวจสอบความผิดปกติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับต้องการตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นประเภทใดซึ่งวิทยานิพนธ์นี้พิจารณา เทคนิคการวิเคราะห์กระแสสเตเตอร์ เพื่อตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์ที่มีสาเหตุจากตัวนำโรเตอร์แตก (Broken Bars) และความผิดปกติของแบริ่ง (Bearing - Fault) [3]

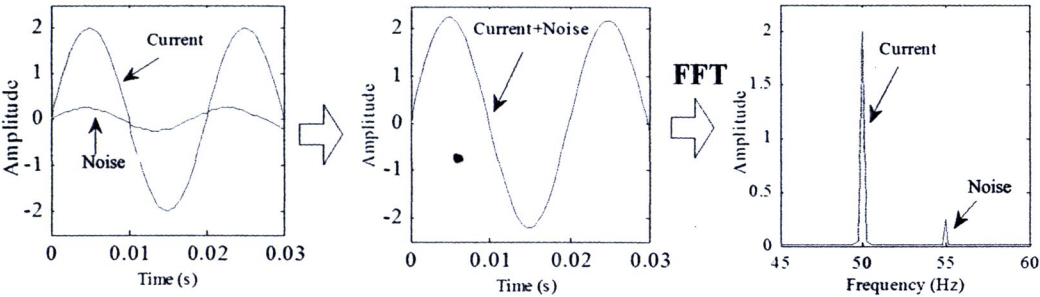
ตาราง 2.1 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคการตรวจสอบความเสียหายของมอเตอร์ [3]

- วิธีการ	ความผิดปกติ			
	ฉนวน	ขดลวดสเตเตอร์	ตัวนำโรเตอร์	แบร์ริง
ดิสซาร์จบางส่วน	✓			
กระแสเตเตอร์		✓	✓	✓
ก๊าซ	✓	✓	✓	
การสั้นสะเทือน			✓	✓
ฟลักแม่เหล็ก		✓	✓	

3.การวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor Current Signature Analysis)

ปัจจุบันการตรวจสอบความผิดปกติของอินดักชั่นมอเตอร์ ด้วยการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์เป็นที่รู้จักกันดีสำหรับนักวิจัยในภาคการศึกษา และอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถใช้บ่งบอกความผิดปกติของมอเตอร์ คล้ายกับวิธีการตรวจสอบอื่นๆ เช่น การวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น (Vibration) และมีความน่าเชื่อถือ ที่สำคัญไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เสริมเข้าไปในการทำงานของมอเตอร์สามารถนำสัญญาณกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์นำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความผิดปกติได้ทันทีวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสของมอเตอร์มีหลายวิธี [3, 4]

3.1 การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT)เป็นวิธีการแปลงสัญญาณที่มีคาบในโดเมนเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งสัญญาณกระแสของมอเตอร์เป็นสัญญาณที่มีคาบและแปรผันตามเวลาเมื่อมอเตอร์เริ่มมีความผิดปกติเกิดขึ้นมอเตอร์จะมีสัญญาณรบกวน (Noise) ปะปนอยู่ในสัญญาณกระแส ซึ่งสัญญาณกระแสในโดเมนเวลาไม่สามารถบ่งบอกความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถแสดงให้เห็นว่าสัญญาณกระแสของมอเตอร์มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในเทอมของขนาดและความถี่ ดังรูปที่2.6



รูปที่2.6 สัญญาณคลื่นชาขนกับการแสดงเทียบในแกนเวลาและแกนความถี่

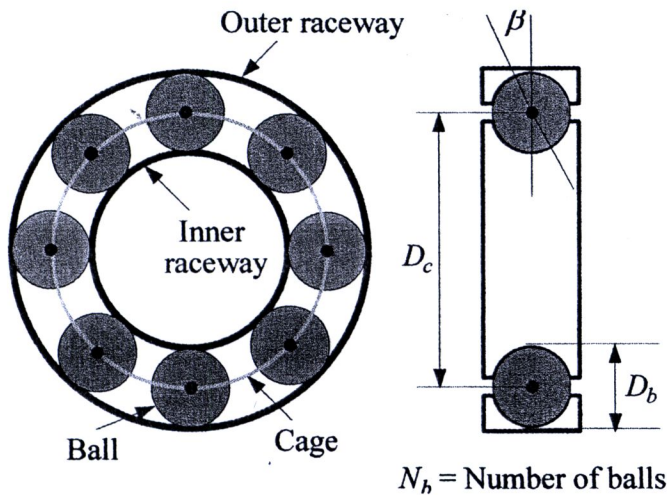
3.1.1สเปกตรัมที่เกิดขึ้นเมื่อตัวนำโรเตอร์แตก (Broken Bars) เมื่อตัวนำโรเตอร์แตก (Broken rotor bars) ส่งผลให้เกิดความถี่ฮาร์โมนิกที่กระแสเดเตอร์บริเวณรอบๆความถี่ของแหล่งจ่าย ดังสมการ (2.21) [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]

$$f_{sb} = (1 \pm 2ks)f_e \tag{2.21}$$

เมื่อ f_{sb} คือ ความถี่ที่เกิดจากแท่งตัวนำเสียหาย, f_e คือ ความถี่ของแหล่งจ่าย, s คือ ค่าสลิปของมอเตอร์ และ $k = 1, 2, 3, \dots$ จากความถี่ที่ปรากฏในกระแสเดเตอร์เมื่อแท่งตัวนำโรเตอร์แตกสามารถที่จะตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นก่อนจะเกิดความเสียหายที่รุนแรง

3.1.2สเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากความผิดปกติของแบร้ง (Bearing Faults)

ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแบร้งมีหลากหลายรูปแบบ แต่ละรูปแบบจะส่งผลให้ปรากฏความถี่ของการสั่นสะเทือน (Vibration) ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของชนิดแบร้งที่ใช้งาน รูปที่2.7 แสดงโครงสร้างของแบร้งในอินดักชันมอเตอร์ และพารามิเตอร์สำหรับใช้คำนวณหาค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนของความเสียหายที่เกิดขึ้น



รูปที่2.7 โครงสร้างของแบร้งในอินดักชันมอเตอร์ [13]

คุณลักษณะของความถี่ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น เนื่องจากความเสียหายของแบร้ง สามารถแบ่งตามชนิดความเสียหายที่เกิดขึ้นดังนี้ [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]

ความเสียหายเนื่องจากร่องลื่นด้านนอก (Outer Raceway):

$$f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \tag{2.22}$$

ความเสียหายเนื่องจากรองลื่นด้านใน (Inner Raceway):

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (2.23)$$



ความเสียหายเนื่องจากโครงขีดลูกปืน (Cage):

$$f_c = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (2.24)$$

จากความถี่การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เมื่อเกิดความเสียหายต่อแบริ่ง จะส่งผลให้เกิดความถี่ฮาร์โมนิกที่กระแสเตเตอร์ ดังสมการ (2.25)

$$f_{bf} = |f_e \pm k f_c| \quad (2.25)$$

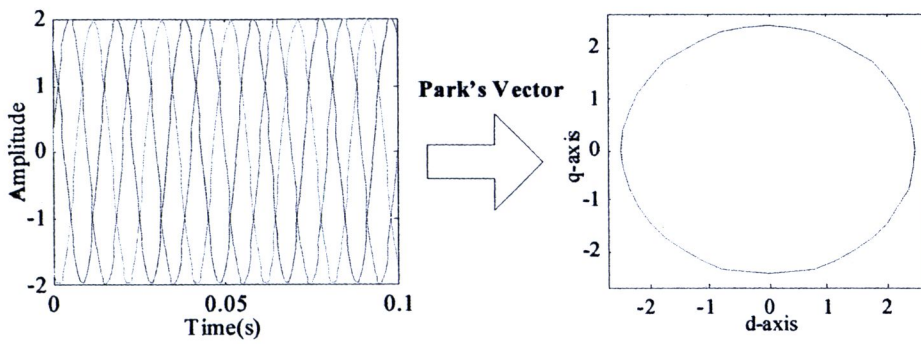
เมื่อ f_{bf} คือ ความถี่ที่เกิดจากความเสียหายของแบริ่ง, f_e คือ ความถี่ของแหล่งจ่าย, f_c คือ ความถี่ของชนิดความเสียหาย ตามสมการ (2.22)-(2.24) และ $k = 1, 2, 3, \dots$ จากความถี่ที่ปรากฏในกระแสเตเตอร์สามารถใช้ตรวจสอบความเสียหายของแบริ่ง และสามารถบ่งบอกชนิดของความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งช่วยในการตัดสินใจในการซ่อมบำรุงรักษาที่ถูกต้องวิธี

3.2 วิธีเวกเตอร์ปาร์ก (Park's Vector Approach) เป็นวิธีที่มีความสามารถในการวินิจฉัยอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส โดยการแปลงสัญญาณกระแสเตเตอร์ 3 เฟสให้เหลือเพียงองค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์ก บนแกน d และแกน q ที่สามารถใช้วินิจฉัยความผิดปกติที่เกิดขึ้นการแปลงกระแสเตเตอร์ของอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟส ให้อยู่ในองค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์กแสดงดังสมการ (2.26)-(2.27)[16, 17, 18, 19]

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c \quad (2.26)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c \quad (2.27)$$

เมื่ออินดักชันมอเตอร์ 3 เฟสเกิดความเสียหายขึ้น เช่น เกิดความผิดปกติบริเวณแบริ่ง (Bearing Faults), ตัวนำโรเตอร์แตก (Broken Bars) องค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์กที่เกิดขึ้นจากการแปลงของสัญญาณกระแสจะมีรูปร่าง และลักษณะขององค์ประกอบ บนแกน d และแกน q ที่แตกต่างไปจากอินดักชันมอเตอร์ที่ไม่ได้รับความเสียหาย ซึ่งการแปลงสัญญาณกระแส 3 เฟสอยู่ในองค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์ก บนแกน d และแกน q แสดงดังรูปที่ 2.8



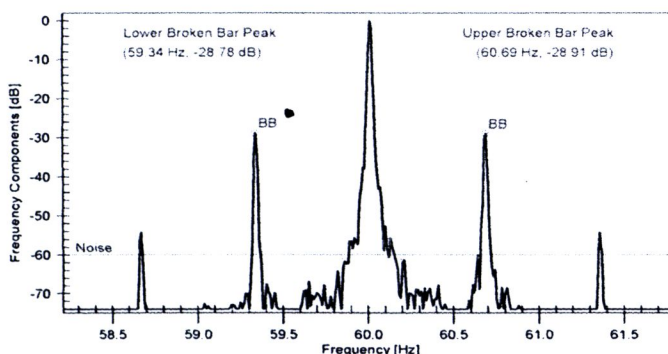
รูปที่2.8 การแปลงสัญญาณกระแส 3 เฟส อยู่ในองค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์ค

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อินดักชันมอเตอร์ได้ถูกใช้งานทั่วไปอย่างแพร่หลาย ทำให้นักวิจัยหลายท่านสนใจงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ เนื่องจากการตรวจพบความผิดปกติของมอเตอร์ก่อนการเสียหายที่รุนแรงจะส่งผลกระทบต่อด้านอุตสาหกรรม ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์มีหลายชิ้น โดยมีนักวิจัยทั้งสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมเครื่องกลพยายามวิเคราะห์และสังเคราะห์ความผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้า โดยแบ่งออกตามส่วนประกอบที่สำคัญและมักจะพบความเสียหายอยู่บ่อยๆ เช่น แบร์ริง (Bearing) ตัวนำโรเตอร์ (Rotor Bar) ขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding) และมีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์กระแสสเตเตอร์ในมอเตอร์ในการวิเคราะห์ความผิดปกติต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียหายของตัวนำโรเตอร์ในอินดักชันมอเตอร์ พร้อมแสดงความสัมพันธ์ของความถี่ที่เกิดขึ้นเนื่องจาก ความผิดปกติในมอเตอร์ ดังสมการ (2.28) แสดงความถี่ในกระแสสเตเตอร์ที่สามารถทำนาย f_b ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเร็วมอเตอร์และความถี่ของแหล่งจ่าย [3, 4, 5, 6]

$$f_b = (1 \pm 2s)f_e \quad (2.28)$$

โดยที่ f_e คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า, s คือ ค่าสลิปของมอเตอร์



รูปที่2.9สเปกตรัมกระแสของมอเตอร์ปั๊มเมื่อตัวนำโรเตอร์เสียหาย [6]

จากบทความที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า สามารถนำกระแสเตเตอร์มาวิเคราะห์เพื่อระบุความผิดปกติของมอเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่2.9แสดงสเปกตรัมกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ปั๊มเมื่อเกิดความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์พบว่าสเปกตรัมกระแสเตเตอร์ จะปรากฏฮาร์โมนิกบริเวณรอบความถี่มูลฐาน จะอยู่ในเทอมขององค์ประกอบแบนด์ข้างต่ำ (lower sideband, LSB) และแบนด์ข้างสูง (upper sideband, - USB)

งานที่สนับสนุนการวิเคราะห์ความผิดปกติของตัวนำโรเตอร์ โดยทีมงานวิจัยที่ประกอบด้วย Gennadi Y. Sizov, Ahmed Sayed-Ahmed, Chia-Chou Yeh, Nabeel A. O. Demerdash [7] งานวิจัยดังกล่าวได้ศึกษา ผลกระทบของตำแหน่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย โดยใช้เทคนิคการวินิจฉัยสเปกตรัมกระแสเตเตอร์ (MCSA) และสนามแม่เหล็กแกว่ง (Magnetic Field Pendulous Oscillation, MFPO) แสดงให้เห็นว่า เมื่อตัวนำโรเตอร์แตกลักษณะติดกัน ผลของMCSA/MFPO แสดงออกให้เห็นอย่างชัดเจน แต่เมื่อตัวนำโรเตอร์แตก 2 ตัวนำที่ตำแหน่งระยะครึ่งโพล (Half Pole-Pitch) ผลการวินิจฉัยทั้ง MCSA/MFPO จะไม่สามารถบ่งบอกความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่2.10เป็นการเปรียบเทียบผลของตำแหน่งความเสียหายที่เกิดขึ้น

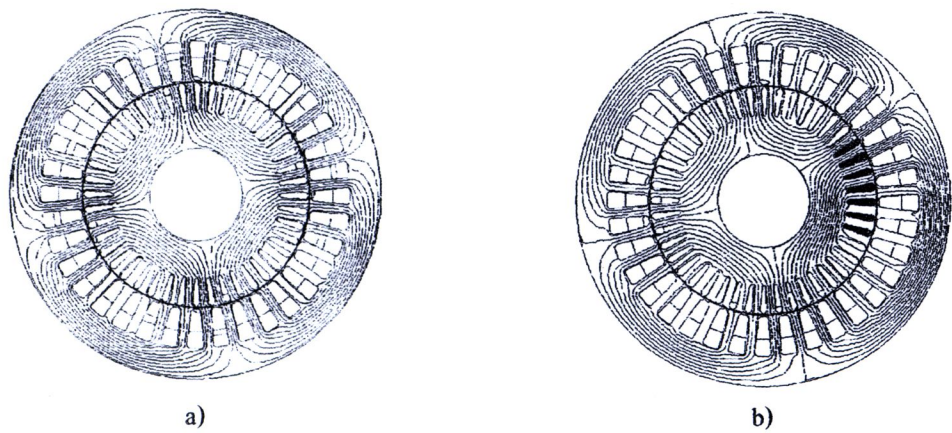
			MCSA	MFPO	LIKELIHOOD
ADJACENT			No Fault Masking LSB _{2sf} and USB _{2sf} at $(I \pm 2s)f_{syn}$	No Fault Masking $\Delta\delta_I$ at $2sf_{syn}$	Most Frequent
	NONADJACENT	Half Pole-Pitch (90° electrical) N_b – even	Fault Masked Secondary fault effects result in: LSB _{4sf} and USB _{4sf} at $(I \pm 4s)f_{syn}$	Fault Masked Secondary fault effects result in: $\Delta\delta_I$ at $4sf_{syn}$	Possible $N_b - 2$ (machines with low number of rotor bars per pole)
		N_b – odd	Fault Partially Masked LSB _{2sf} and USB _{2sf} corresponding to one broken bar	Fault Partially Masked $\Delta\delta_I$ at $2sf_{syn}$ corresponding to one broken bar	Unlikely
	One Pole-Pitch (180° electrical) N_b – even or odd		No Fault Masking LSB _{2sf} and USB _{2sf} at $(I \pm 2s)f_{syn}$	No Fault Masking $\Delta\delta_I$ at $2sf_{syn}$	Unlikely

N_b – number of broken bars

รูปที่2.10การเปรียบเทียบผลของตำแหน่งความเสียหายที่เกิดขึ้น [7]

นักวิจัยหลายท่านมีการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) เนื่องจากเป็นวิธีที่ประยุกต์ใช้ในปัญหาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมที่ซับซ้อน ข้อดีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็สามารถแสดงคำตอบบางอย่างที่ซับซ้อน ซึ่งในอดีตอาจเป็นการยากที่จะอธิบายได้ ตัวอย่างเช่น การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนที่ของไหล สนามแม่เหล็กไฟฟ้า หรือคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน เป็นต้น อีกทั้งเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุนการวิจัยโดยการจำลองรูปแบบหรือสภาพต่างๆ ของวัตถุที่ต้องการ

ทดสอบ เพราะในการศึกษาหรือทำวิจัยบางอย่างการทำต้นแบบเพื่อนำมาทดสอบอาจมีราคาแพงและมีความยุ่งยาก ทำให้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้งานทางด้านการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในระยะหลังมีความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถแสดงผลความผิดปกติที่เกิดขึ้นทางกายภาพ เช่น ความผิดปกติสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น(รูปที่2.11), กระแสที่ไหลภายในตัวนำโรเตอร์, แรงแม่เหล็กที่จ่ายบนตัวนำ (Magnetic Force Distribution of the Bars) เป็นต้น ซึ่งสามารถบ่งบอกความผิดปกติต่อ สมรรถนะของมอเตอร์ได้ชัดเจน [8, 9, 10, 11]

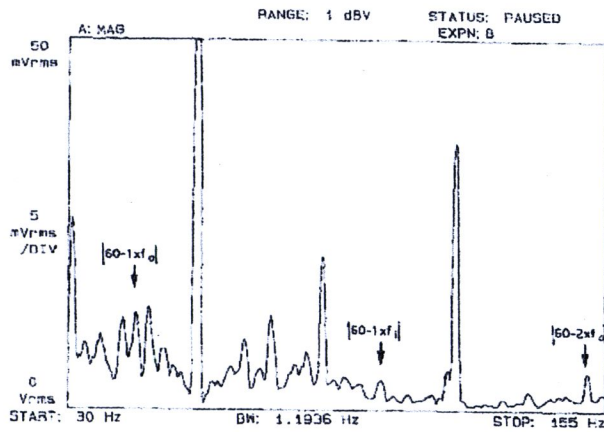


รูปที่2.11สนามแม่เหล็กที่จ่ายในมอเตอร์ a) มอเตอร์ปกติ b) 7 ตัวนำแตก[8]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความผิดปกติเนื่องจากความเสียหายของแบร้ง (Bearing - Fault) มีนักวิจัยทางด้านสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าได้มีความพยายามใช้เทคนิคการวินิจฉัยโดยใช้กระแสสเตเตอร์นำมาวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นแทนการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน เริ่มต้นด้วยทีมงานวิจัยของ Randy R. Schoen, Thomas G. Habetler, Farrukh Kamran, และ Robert G. Bartheld [12]บทความนี้กล่าวถึงการใช้กระแสของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ความเสียหายของแบร้งในอินดักชันมอเตอร์ และได้แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วที่จะปรากฏขึ้นเมื่อเกิดความเสียหายต่อแบร้ง ดังสมการ (2.29)

$$f_{bng} = |f_e \pm m.f_v| \tag{2.29}$$

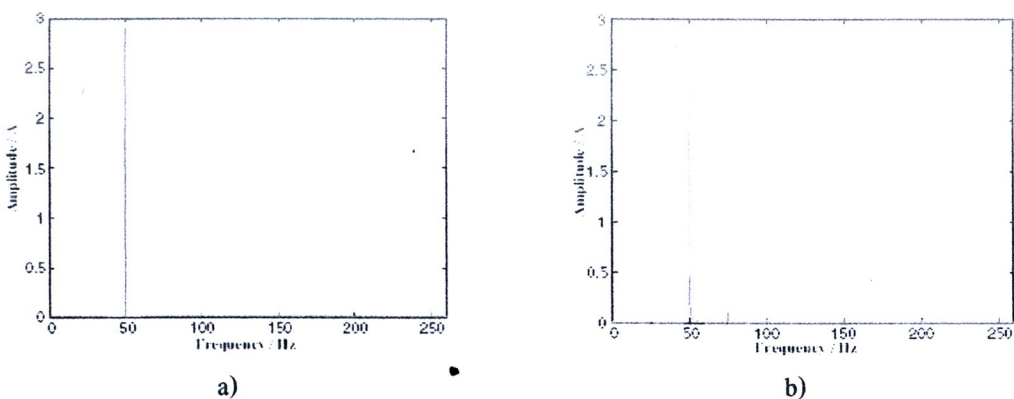
โดย f_e คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า, f_v คือ คุณลักษณะความถี่ของความเสียหาย, $m=1,2,3,...$ ภาพ 2.12 แสดงสเปกตรัมกระแสสเตเตอร์เมื่อแบร้งทั้ง 2 ข้างของอินดักชันมอเตอร์ได้รับความเสียหาย ความถี่ 30 เฮิรตซ์ ถึง 155 เฮิรตซ์ขณะมอเตอร์ทำงานโหลดเต็มพิกัดพบว่าสเปกตรัมกระแสสเตเตอร์จะปรากฏขึ้นที่บริเวณความถี่ที่ได้ทำนายตามสมการ (2.29)



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมกระแสทดสอบเมื่อเบร้งเสียหาย[12]

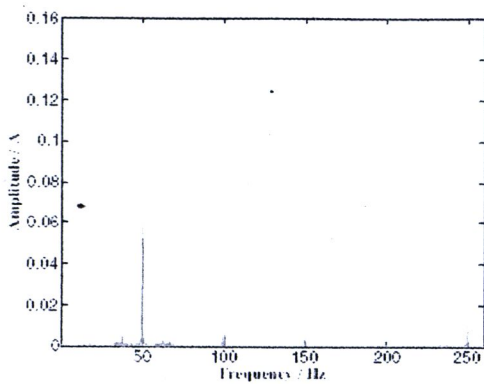
จากบทความของทีมงานวิจัย Randy R. Schoen และคณะ ได้นำเสนอเทคนิคการวินิจฉัยความเสียหายของเบร้งโดยใช้กระแสทดสอบ ทำให้นักวิจัยหลายท่านมีความสนใจและเกิดการพัฒนางานวิจัยทางด้านความเสียหายของเบร้งดังนี้

S. Liling and X. Boqiang [13] เสนอวิธีการปรับปรุงกระแสทดสอบสำหรับตรวจสอบความเสียหายเบร้งของอินดักชั่นมอเตอร์ ได้แสดงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการขณะที่ไม่มีการปรับปรุงกระแสทดสอบโดยการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) เปรียบเทียบกับกระแสทดสอบที่มีการปรับปรุงโดยใช้อัลกอริทึมตัวกรองแบบปรับตัวเอง (Self-Adaptive Filter) รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมของกระแสทดสอบขณะที่ไม่ได้ปรับปรุง พบว่ากระแสทดสอบเมื่อเกิดความเสียหายต่อเบร้ง ไม่ให้ผลที่แตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับมอเตอร์ปกติทำให้ยากต่อการวินิจฉัย

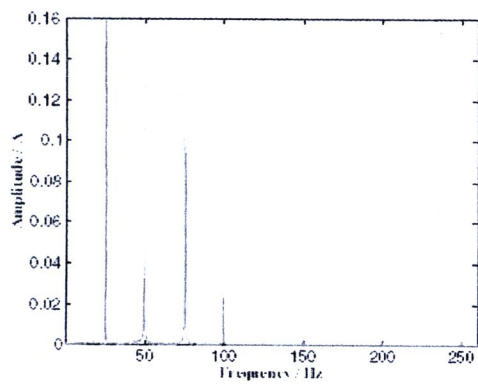


รูปที่ 2.13 สเปกตรัมกระแสทดสอบไม่ได้ปรับปรุง a) มอเตอร์ปกติ b) เบร้งเสียหาย [13]

รูปที่ 2.14 แสดงสเปกตรัมกระแสทดสอบที่มีการปรับปรุง พบว่ากระแสทดสอบของอินดักชั่นมอเตอร์เมื่อเกิดความเสียหายต่อเบร้งให้ผลที่แตกต่างอย่างชัดเจนจากมอเตอร์ปกติ ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ความผิดปกติของเบร้งด้วยการใช้กระแสทดสอบมีประสิทธิภาพมากขึ้น



a)



b)

รูปที่ 2.14 สเปกตรัมกระแสเตเตอร์ที่ปรับปรุง a) มอเตอร์ปกติ b) แบร้งเสียหาย [13]

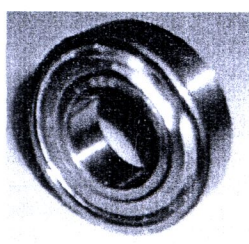
L. Frosini, et al. [14] เสนอวิธีการวิเคราะห์กระแสเตเตอร์สำหรับการตรวจสอบความเสียหายของแบร้ง โดยมีรูปแบบความเสียหายของแบร้งที่นำเสนอ 4 ชนิด ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งรูปแบบความเสียหายของแบร้งทั้ง 4 ชนิดจะนำไปใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ และเปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นแต่ละรูปแบบความเสียหายที่นำเสนอ ขณะมอเตอร์ทำงานสภาวะไร้โหลด (No Load) และมอเตอร์ทำงานโหลดเต็มพิกัด (Full Load)



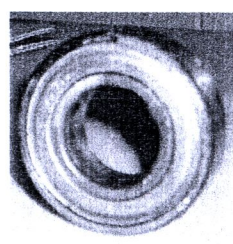
a)



b)



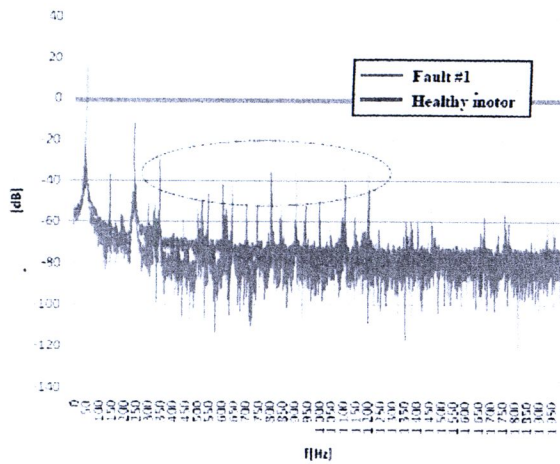
c)



d)

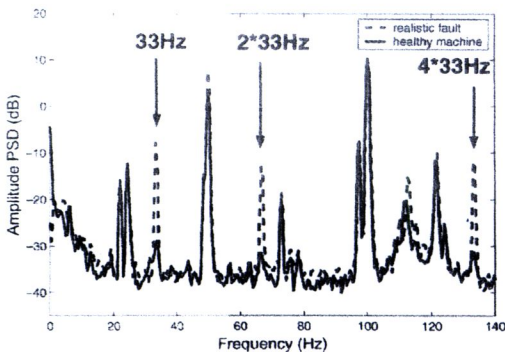
รูปที่ 2.15 ชนิดความเสียหายของแบร้งในอินดักชั่นมอเตอร์ a) รองลื่นด้านนอกแตก b) รองลื่นด้านนอกเกิดรู c) ฝาครอบป้องกันลูกปืนชำรุด d) แบร้งเกิดสนิม [14]

รูปที่ 2.16 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสเตเตอร์ของความเสียหายชนิดที่ 1 กับมอเตอร์ปกติในสภาวะมอเตอร์ทำงานโหลดเต็มพิกัด (Full Load) พบว่าสเปกตรัมกระแสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียหายของแบร้ง มีขนาดสูงกว่ามอเตอร์ปกติ (Healthy Motor)

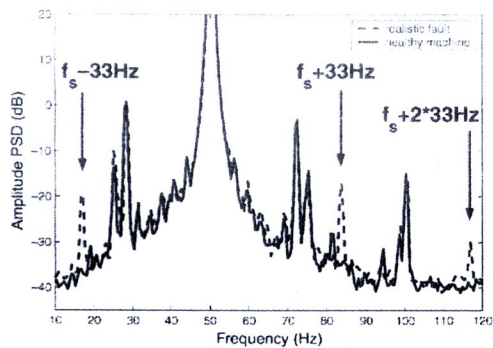


รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบสเปกตรัมกระแสสแตเตอร์ของความเสียหายชนิดที่ 1 [14]

M. Blodt, et al. [15] ได้เสนอรูปแบบใหม่ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของแบริ่งด้วยการวิเคราะห์สัญญาณกระแสสแตเตอร์ และการวิเคราะห์สัญญาณแรงบิดขณะมีโหลด พร้อมทดสอบและเปรียบเทียบมอเตอร์ที่ใช้แบริ่งปกติและเสียหาย จากการวิเคราะห์สัญญาณกระแส และแรงบิด รูปที่ 2.17 แสดงสเปกตรัมกระแส และสเปกตรัมแรงบิดที่เกิดขึ้น พบว่าสเปกตรัมกระแสของแบริ่งเสียหายจะปรากฏขึ้นที่บริเวณความถี่ของแหล่งจ่ายบวกกลับกับความถี่ของสเปกตรัมแรงบิดที่ปรากฏขึ้นเนื่องจากความเสียหายของแบริ่ง ซึ่งการวินิจฉัยความเสียหายของแบริ่งจะมีประสิทธิภาพหากใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแส ร่วมกับการวิเคราะห์สัญญาณแรงบิด



a)



b)

รูปที่ 2.17 สัญญาณของแบริ่งที่เสียหาย a) สเปกตรัมกระแส b) สเปกตรัมแรงบิด [15]

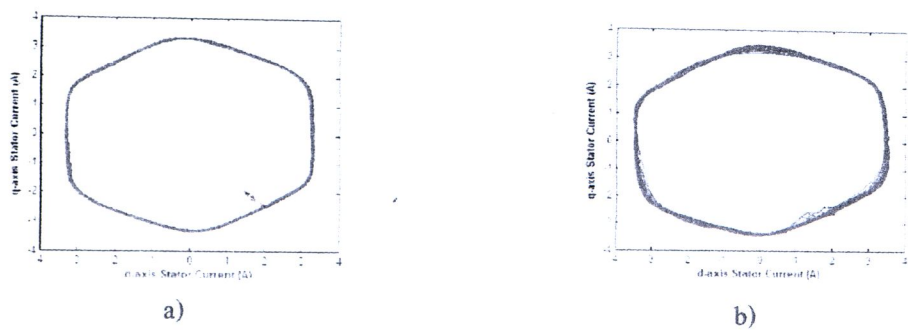
การวินิจฉัยความผิดปกติของแบริ่งจากการวิเคราะห์สัญญาณกระแสสแตเตอร์สามารถนำการแปลงเวกเตอร์ปาร์ก (Park Vector Transform) มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแบริ่งของอินดักชันมอเตอร์ 3 เฟสได้ ซึ่งวิธีการจะแตกต่างจากงานวิจัยที่กล่าวมา คือนำกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์แปลงให้อยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ปาร์ก โดยการแปลงสัญญาณกระแสสแตเตอร์ 3 เฟสให้

เหลือเพียงองค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์ก บนแกน d และแกน q ที่สามารถใช้ตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้น การแปลงกระแสเตเตอร์ของอินคักชั่นมอเตอร์ 3 เฟสให้อยู่ในองค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์ก แสดงดังนี้[16, 17, 18, 19]

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a - \frac{1}{\sqrt{6}}i_b - \frac{1}{\sqrt{6}}i_c \tag{2.30}$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}}i_b - \frac{1}{\sqrt{2}}i_c \tag{2.31}$$

รูปที่2.18 แสดงองค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์กที่ถูกแปลงมาจากกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟสพบว่า กรณีเบร้งเสียหายของค์ประกอบ บนแกน d และแกน q กราฟจะมีรูปร่างลักษณะที่กระจาย และเส้นหนากว่ามอเตอร์ปกติ

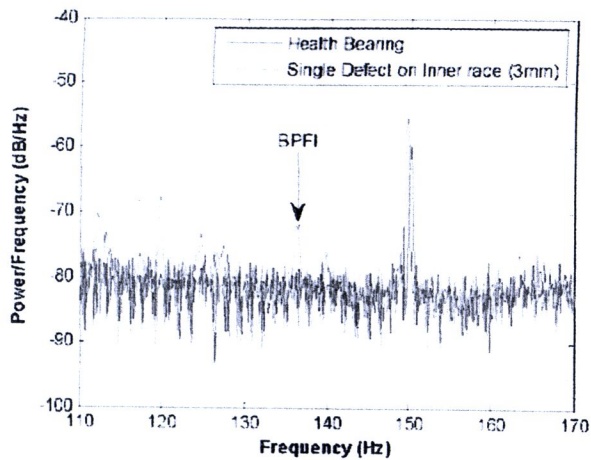


รูปที่2.18 องค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์ก a) มอเตอร์ปกติ b)เบร้งเสียหาย [16]

จากองค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์ก บนแกน d และแกน q สามารถรวมเป็นองค์ประกอบเดียวตามสมการ (2.32) แล้วนำองค์ประกอบที่ได้มาแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ เพื่อใช้ตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากเบร้ง [16, 17, 18]

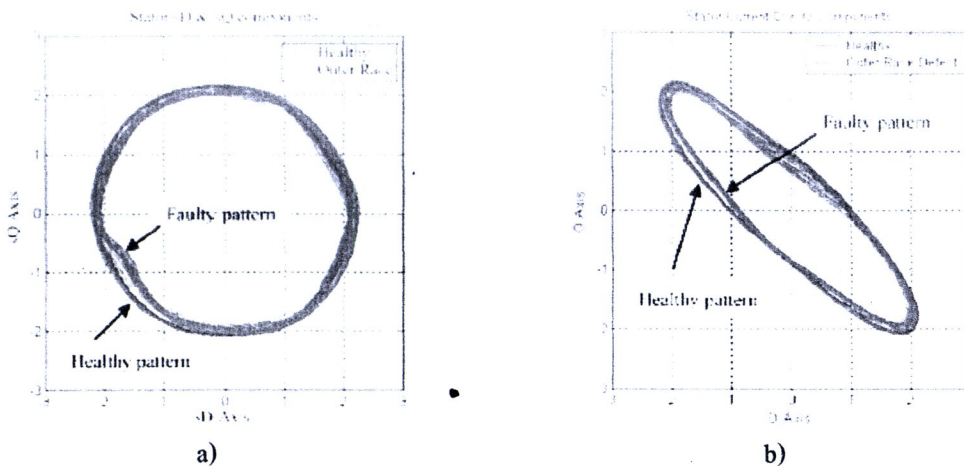
$$|i_d + ji_q|^2 \tag{2.32}$$

รูปที่2.19แสดงการเปรียบเทียบสเปคตรัมที่เกิดขึ้นจากการรวมองค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์กตามสมการ (2.32) พบว่าเมื่อเบร้งเกิดการเสียหายที่รองลื่นด้านใน (Inner Raceway) ขนาด 3 มิลลิเมตร สเปคตรัมที่เกิดจากความเสียหายจะปรากฏขึ้นบริเวณที่ได้ทำนายไว้



รูปที่ 2.19 สเปกตรัมขององค์ประกอบเวกเตอร์ปาร์ก [16]

งานที่สนับสนุนการวิเคราะห์สัญญาณกระแส โดยใช้เทคนิคการแปลงเวกเตอร์ปาร์กและนำไปพัฒนาใช้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยทีมงานวิจัยที่ประกอบด้วย Izzet Yilmaz Onel และ Mohamed El Hachemi Benbouzid [19] ได้พัฒนาองค์ประกอบของการแปลงเวกเตอร์ปาร์ก โดยการนำองค์ประกอบ บนแกน d และแกน q แปลงให้อยู่ในโคออร์ดิเนต (Coordinate) ใหม่ ที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของโรเตอร์ และผลที่ได้สามารถนำมาบ่งบอกชนิดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแบร์ริงได้ โดยนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) และฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) จากรูปที่ 2.20 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการแปลงเวกเตอร์ปาร์ก และวิธีการแปลงในโคออร์ดิเนตใหม่ ทั้งสองวิธีสามารถบ่งบอกความเสียหายของแบร์ริงได้



รูปที่ 2.20 การวิเคราะห์กระแสสแตเตอร์ a) วิธีเวกเตอร์ปาร์ก b) วิธีโคออร์ดิเนตใหม่ [17]