

การขมขืนและวินิจฉัยสัญญาณฟอลต์สเตรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส  
โดยใช้พัทพศร์ตเวกเตอร์เมชชีน

CLASSIFICATION AND DIAGNOSIS OF STATOR FAULT SIGNATURE  
IN THREE PHASE INDUCTION MOTORS USING  
SUPPORT VECTOR MACHINES



วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2010-EN-D-018-019

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การแยกแยะและวินิจฉัยสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส  
โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

CLASSIFICATION AND DIAGNOSIS OF STATOR FAULT SIGNATURE  
IN THREE PHASE INDUCTION MOTORS USING  
SUPPORT VECTOR MACHINES



จพ.  
2418ก  
2553

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....110372  
วัน,เดือน,ปี.....- 1 พ.ย. 2553

b.....12254125  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMITL 2010-EN-D-018-019  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CLASSIFICATION AND DIAGNOSIS OF STATOR FAULT SIGNATURE  
IN THREE PHASE INDUCTION MOTORS USING  
SUPPORT VECTOR MACHINES**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องสมุดของสถาบันฯ มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแยกแยะและวินิจฉัยสัญญาณฟอลต์สแตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ซัพพอร์ท  
เวกเตอร์แมชชีน

Thesis Title Classification and Diagnosis of Stator Fault Signature in Three Phase Induction  
Motors Using Support Vector Machines

นักศึกษา นายเฉลิมชาติ มานพ

รหัสประจำตัว 48060014

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-D-018-019

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชัยวุฒิ	ฉัตรอุทัย	
รศ.ดร.สมชาติ	จิรวิภากร	
รศ.ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	
รศ.ดร.อานันทวัฒน์	คุณากร	
รศ.ดร.วิจิตร	กิณเรศ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2553 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
แม้ว่ากรณีเหล่านี้ อีกทั้งที่ห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกแยะและวินิจฉัยสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน
นักศึกษา	นายเฉลิมชาติ มานพ
รหัสนักศึกษา	48060014
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอเทคนิคใหม่สำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากตัวนำสเตเตอร์ลัดวงจรในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการระบุข้อผิดพลาดและจำแนกนำไปสู่ข้อสรุปการวินิจฉัย ทั้งนี้การดึงคุณลักษณะเฉพาะจะอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันมอเตอร์ในรูปแบบขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่ได้จากการแปลงเวกเตอร์ปาร์คโดยใช้แรงดันเฟสที่ตกคร่อมทั้ง 3 ชุดขดลวดสเตเตอร์ หลักการใหม่ที่น่าเสนอซึ่งแตกต่างจากองค์ประกอบ  $dq0$  แบบทั่วไปคือ ในส่วนขององค์ประกอบ  $dq$  เป็นการพิจารณาเฉพาะช่วงของการเกิดสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์เท่านั้น ในขณะที่องค์ประกอบแรงดันศูนย์ (0) คำนวณโดยใช้เฉพาะองค์ประกอบมูลฐานเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ในขั้นตอนของการค้นหาสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์ได้ใช้เทคนิค FFT ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อขยายสัญญาณฮาร์มอนิกให้เด่นชัดขึ้น ทำให้ง่ายต่อการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์และส่งผลให้มีขีดความสามารถในการตรวจจับและมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ข้อมูลขององค์ประกอบแรงดัน  $d, q$  และ 0 ในหน่วยค่าประสิทธิผลจะถูกนำมาใช้เป็นคุณลักษณะเฉพาะสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัย องค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  จะถูกนำมาพล็อตในรูปแบบ 3 มิติเพื่อยืนยันถึงความเป็นไปได้ของการใช้ปริมาณองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  สำหรับการจำแนกแยกแยะฟอลต์สเตเตอร์ ทั้งนี้วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่ได้จะมีความกว้างที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ ในขั้นตอนของการสอนและทดสอบด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบหลายคลาสที่ได้ออกแบบขึ้น พบว่าสามารถให้ความถูกต้องสูงของการแยกแยะและข้อวินิจฉัยภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดมอเตอร์รวมทั้งในสภาวะมอเตอร์สุขภาพดีและสภาวะฟอลต์สเตเตอร์ที่มีระดับความรุนแรงแตกต่างกัน โดยมีความถูกต้องมากกว่า 98% ซึ่งเทียบเคียงได้กับการใช้เทคนิคอื่น เช่น MCSA แต่เทคนิคขององค์ประกอบแรงดัน  $qd0$  ที่นำเสนอนี้มีข้อที่ได้เปรียบกว่า คือการใช้จำนวนของ

เอกสารข้อมูลการสอนรวมถึงจำนวนของคุณลักษณะเฉพาะที่น้อยกว่า อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Classification and Diagnosis of Stator Fault Signature in Three Phase Induction Motors Using Support Vector Machines
<b>Student</b>	Mr. Chalermchat Manop
<b>Student ID.</b>	48060014
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Vijit Kinnares

## ABSTRACT

This thesis presents a new technique for diagnosis of stator winding shorted turns in three phase induction motors using support vector machine (SVM) for classification and identification leading to diagnosis conclusion. Specific feature extraction is on the basis of a voltage signature analysis in a form of  $dq0$  voltage components. The proposed  $dq0$  voltage components related to three phase stator voltages are obtained by using Park's vector transformation. Unlike general  $dq0$  quantity, the required  $dq$  components are considered from only harmonics in a certain range resulted from the stator shorted turn fault whilst the required zero component is determined from the fundamental voltage excitation only. The procedure for finding the harmonic spectrum associated with the stator fault employs a FFT technique together with digital signal processing in order to enlarge such harmonics to be easily detected leading to increased effectiveness of the detection ability. The data of  $d$ ,  $q$  and zero components will be used as the input features for the SVM classification and diagnosis. In order to confirm that the  $dq0$  voltage components could be used as quantity for identifying the stator fault, patterns of  $dq0$  voltage components in three-dimension are plotted. The obtained trajectories are obviously different depending on the severity of the shorted turn fault. In training and testing with a multiclass-SVM classification, the good accuracy is obtained under various load conditions for both healthy and stator fault conditions. The SVM classification performance of the proposed method has high accuracy greater than 98% comparable to other feature extraction processes such as a motor current signature method (MCSA). The advantage of the proposed method over others is that the numbers of used training data and features are less than those of others.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำงานวิจัยได้อย่างมีหลักการและเหตุผล รวมทั้งให้คำชี้แนะและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ตลอดจนการดำเนินชีวิตในการประกอบอาชีพการงานอีกด้วย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร.สุพจน์ จันทรวิวัฒน์ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมของข้าพเจ้า ซึ่งได้มีส่วนช่วยเหลือในการทำงานวิจัยของข้าพเจ้าเป็นอย่างมาก รวมถึง ผศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย ที่กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมจนกระทั่งงานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

คุณงามความดีซึ่งเกิดจากวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าเล่มนี้ ขอมอบให้คุณพ่อศักดิ์ คุณแม่สละมานพ รวมถึงคุณป้าบุญมี ตั้งพานิช ซึ่งเป็นรางวัลแห่งความเหนื่อยยากที่ท่านได้ส่งเสียให้ข้าพเจ้าได้มีวันนี้ รวมถึงครูบาอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าทุกท่านอีกด้วย

สุดท้ายขอขอบคุณภรรยาและบุตรชาย ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าได้มีกำลังใจในการทำงานที่สำคัญนี้ สำเร็จลงได้ภายใต้ปัญหาต่างๆที่เข้ามาเป็นคู่ขนานอย่างมากมาย

เฉลิมชาติ มานพ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	4
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	5
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน	7
1.6 ขอบเขตการวิจัย	9
1.7 ขั้นตอนการศึกษา	10
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการที่นำเสนอ	11
2.1 สัญญาณฟอลต์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	11
2.1.1 ฮาร์โมนิกฟอลต์ที่เกิดจากความเป็นแม่เหล็ก	12
2.1.2 ฮาร์โมนิกฟอลต์ที่เกิดจากทางกล	13
2.1.3 ฮาร์โมนิกฟอลต์ที่เกิดจากอากาศพลวัต	13
2.1.4 ฮาร์โมนิกฟอลต์ที่เกิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์	14
2.2 วิเคราะห์ความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์	15
2.2.1 ลักษณะของตัวนำสเตเตอร์	16
2.2.2 โหมดความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์	17
2.2.3 ผลของแหล่งจ่ายไฟกับตัวนำสเตเตอร์	19
2.3 การวิเคราะห์ขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบ	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ระบบการวินิจฉัยฟอลต์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ	24
2.4.1 กระบวนการขั้นต้น	25
2.4.2 กระบวนการสุดท้าย	28
2.5 องค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ที่นำเสนอสำหรับการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์	31
2.6 ความล้มเหลวของมอเตอร์ต่อผลกระทบด้านพลังงาน	32
2.6.1 ความเสียหายต่ออุตสาหกรรม	33
2.6.2 ประสิทธิภาพกับการพันขดลวดใหม่	34
2.7 สรุป	39
บทที่ 3 เทคนิคการประมาณค่าสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์	40
3.1 เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับการตรวจจับสัญญาณฟอลต์	40
3.2 การวิเคราะห์ตัวกรองดิจิทัลด้วยฟังก์ชันวินโดว์	43
3.2.1 วินโดว์สามเหลี่ยม	43
3.2.2 วินโดว์ฮานนิง	44
3.2.3 วินโดว์แฮมมิง	44
3.2.4 วินโดว์แบล็คแมน	45
3.2.5 วินโดว์ไคเซอร์	45
3.3 ตำรวจสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วยสาเหตุต่างๆ	52
3.3.1 สเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ล้มเหลว	54
3.3.2 สเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากแท่งตัวนำโรเตอร์ล้มเหลว	55
3.3.3 สเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากร่องถิ่นล้มเหลว	55
3.3.4 ปัญหาการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า	57
3.4 สรุป	59
บทที่ 4 การออกแบบการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยอัลกอริทึมของ ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน	60
4.1 ทฤษฎีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ขั้นตอนการออกแบบการแยกแยะพอลต์สเตอร์	64
4.3 การเตรียมการทดลอง	68
4.4 การคึงคุณลักษณะเฉพาะของเทคนิค MCSA	71
4.5 สรุป	73
<b>บทที่ 5 ผลการแยกแยะและวินิจฉัยพอลต์สเตอร์</b>	<b>74</b>
5.1 ผลการจำลองลักษณะวงโคจรของลำดับฮาร์โมนิกต่างๆ	74
5.2 ผลการทดลองการแยกแยะและวินิจฉัยพอลต์สเตอร์	77
<b>บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ</b>	<b>92</b>
บรรณานุกรม	94
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการวินิจฉัยพอลต์สเตอร์	100
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	101
ประวัติผู้เขียน	131

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบเทคโนโลยีการตรวจจับ	24
2.2 กฎพีซซีที่ใช้สำหรับการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า	30
2.3 มูลค่าความเสียหายในแต่ละอุตสาหกรรมที่เป็นผลมาจากปัญหาของมอเตอร์.	33
2.4 ผลกระทบของค่าการสูญเสียที่เกิดจากการพันขดลวดใหม่	35
2.5 ค่าการสูญเสียในมอเตอร์ตัวใหม่กับการพันใหม่	37
4.1 การแบ่งแยกระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์	67
4.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 พิกัด	69
4.3 ความถี่ของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ที่สัมพันธ์กับตัวนำสเตเตอร์ลัดวงจร ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1.4)	70
5.1 เปรี่เซ้นต์ความถูกต้องของการแยกแยะฟอลต์สเตเตอร์ด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์ แมชชีนในมอเตอร์ IM_1 ด้วยเทคนิค $dq0$ ที่นำเสนอ	89
5.2 เปรี่เซ้นต์ความถูกต้องของการแยกแยะฟอลต์สเตเตอร์ด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์ แมชชีนในมอเตอร์ IM_2 ด้วยเทคนิค $dq0$ ที่นำเสนอ	89
5.3 ค่า RMSE ของการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ในตารางที่ 5.1 และ 5.2	89
5.4 เปรี่เซ้นต์ความถูกต้องของการแยกแยะฟอลต์สเตเตอร์ด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์ แมชชีนในมอเตอร์ IM_1 ด้วยเทคนิค MCSA	90
5.5 เปรี่เซ้นต์ความถูกต้องของการแยกแยะฟอลต์สเตเตอร์ด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์ แมชชีนในมอเตอร์ IM_2 ด้วยเทคนิค MCSA	90
5.6 ค่า RMSE ของการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ในตารางที่ 5.4 และ 5.5	90
5.7 เปรียบเทียบระหว่างวิธี $dq0$ ที่นำเสนอกับวิธี MCSA	91

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบการวินิจฉัยทางการแพทย์บนพื้นฐานคอมพิวเตอร์	5
1.2 บล็อกไดอะแกรมของอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบขึ้นสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์บนพื้นฐานขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน	6
1.3 รูปโครงสร้างขององค์ประกอบแรงดัน $dq$ ในสภาวะมอเตอร์ (บนซ้าย) สุขภาพดี (บนขวา) มีสภาวะฟอลต์สเตเตอร์ (ล่างซ้ายและขวา) เมื่อตัดองค์ประกอบมูลฐานออก	8
2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก	11
2.2 ประเภทของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	12
2.3 แหล่งกำเนิดฟอลต์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำตามแนวคิดของ Dr. Singh	13
2.4 ประเภทของฟอลต์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำตามแนวคิดของ Dr. Singh	14
2.5 ประเภทของฟอลต์เมื่อพิจารณาตามแนวคิดของ Dr. Mirafzal	15
2.6 เปรียบเทียบความล้มเหลวของส่วนประกอบต่างๆในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	15
2.7 ตัวอย่างความล้มเหลวของส่วนประกอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	16
2.8 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก (ซ้าย) ขดลวดสเตเตอร์พันแบบสุ่ม และ (ขวา) ขดลวดสเตเตอร์พันมีรูปแบบ	17
2.9 ขดลวดสเตเตอร์ (ซ้าย) พันมีรูปแบบ และ (ขวา) พันแบบสุ่ม	17
2.10 โหมมความล้มเหลวของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	18
2.11 ความถี่ที่กระทำต่อฉนวนตัวนำสเตเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์และแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่มีอัตราการสวิตซ์ที่สูงขึ้น	20
2.12 การลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์ระหว่างรอบถึงรอบที่จุด a กับ b	22
2.13 การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์กรณีเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ	22
2.14 ไดอะแกรมแผนผังระบบการวินิจฉัยฟอลต์	24
2.15 การประยุกต์ใช้ไบสเปกตรัมวินิจฉัย (ซ้าย) สภาวะปกติและ (ขวา) มีฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์	25
2.16 การแปลงด้วย MEM เพื่อตรวจจับสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดจากความไม่เป็นสล็อต	26
2.17 ผลการทดลองในแกน $dq0$ สำหรับตรวจจับสภาวะ (บน) ปกติ (ล่าง) แรงดันไม่สมดุล	27

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 (บนและกลาง) ฟังก์ชันสมาชิกฟัซซี่ในส่วนของอินพุตและ (ล่าง) ในส่วนของเอาต์พุตสำหรับแสดงสถานะสเตเตอร์	29
2.19 โคอะแกรมอินเฟอเรนซ์ฟัซซี่กรณีทำการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความเสียหายรุนแรง (ขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร 4%)	30
2.20 ลักษณะการไหลของกระแสเพลลาภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	34
2.21 ชนิดการสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	35
2.22 เปรียบเทียบการสูญเสียของมอเตอร์ 2 และ 4 ขั้วแม่เหล็ก	36
2.23 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนประกอบของมอเตอร์ระหว่างมอเตอร์ใหม่กับมอเตอร์เก่าด้วยพิกัดที่ต่างกัน	38
3.1 โหลดข้างของ $f_d$ ปิดกั้นองค์ประกอบของ $f_c$ ทำให้ไม่สามารถตรวจจับได้	41
3.2 องค์ประกอบของกระบวนการอินเตอร์โพลิตข้อมูล	42
3.3 ความแตกต่างของสัญญาณแรงดันเดิมกับสัญญาณที่ได้จากการอินเตอร์โพลิต	42
3.4 รูปร่างวินโดว์และผลการตอบสนองทางความถี่ของวินโดว์ฮานนิงและแฮมมิง	44
3.5 รูปร่างวินโดว์ไคเซอร์และผลการตอบสนองทางความถี่เมื่อ $\alpha$ มีค่าต่างๆ	46
3.6 การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลเมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์และ FFT	46
3.7 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสสเตเตอร์ที่ไม่ผ่านตัวกรองวินโดว์	47
3.8 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสสเตเตอร์เมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์ไคเซอร์ ( $\alpha=3$ )	47
3.9 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสสเตเตอร์เมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์เบสิกแมน	48
3.10 ผลการทดลองการรั่วไหลของสเปกตราซึ่งจะลดลงตามค่า $\beta$ ที่มีค่าสูงขึ้นในวินโดว์ชนิดไคเซอร์	49
3.11 ผลการทดลองการลดลงของการรั่วไหลสเปกตราเมื่อใช้วินโดว์ชนิดต่างๆ	50
3.12 ผลการทดลองการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ที่ผิดพลาดขึ้นในลำดับ $k = 1$ and $n = 4$ เมื่อมอเตอร์ทำงานที่โหลด 50% โดยเส้นปะเมื่อไม่ผ่านตัวกรองวินโดว์และเส้นเข้มเมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์ฮานนิง	50
3.13 สเปกตราแรงดันเฟสสเตเตอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่ต่างกัน (บน) วิธีของ FFT และ (ล่าง) วิธีหน้าต่าง FFT เมื่อฟอลต์ที่ต้องการตรวจจับแสดงด้วยลูกศร	51
3.14 ผลการทดลองการวิเคราะห์ (บน) ฟอลต์สเตเตอร์และ (ล่าง) ฟอลต์โรเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแสสเตเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัดโหลด	52

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 การวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน	53
3.16 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์พิกัด 3 kW แสดงสภาวะมอเตอร์สมบูรณ์ (ซ้าย) และขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบ (ขวา)	54
3.17 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์พิกัด 2.2 kW แสดงสภาวะมอเตอร์สมบูรณ์ (ซ้าย) และแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (ขวา)	54
3.18 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์พิกัด 7.5 kW แสดงความผิดปกติเนื่องจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก	55
3.19 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ที่สภาวะโหลด 0% และ 100% กรณีร่องลื่นในมอเตอร์ซำรุค	56
3.20 การเปลี่ยนแปลงของกระแสมอเตอร์ระหว่างสภาวะสมบูรณ์และร่องลื่นซำรุค	56
3.21 สเปกตรัมฟอลต์ในสัญญาณมอเตอร์แสดงสภาวะมอเตอร์สมบูรณ์ แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก สภาวะการหมุนไม่สมดุล และร่องลื่นซำรุคจากบนลงล่างตามลำดับ	57
3.22 สเปกตรัมฟอลต์กระแสเตเตอร์แสดงสภาวะมอเตอร์สมบูรณ์และสภาวะจาก 1 ถึง 4 ของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักจากบนลงล่างตามลำดับ	58
4.1 การแบ่งกลุ่มข้อมูลตัวอย่าง ( $\square$ และ $\circ$ ) ด้วยไฮเปอร์เพลนโดยใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน	61
4.2 การแมพแบบไม่เป็นเชิงเส้นจากปริภูมิของกลุ่มข้อมูลตัวอย่างไปสู่ปริภูมิคุณลักษณะเฉพาะ	63
4.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการคำนวณหาองค์ประกอบแรงดัน $dq0$ สำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์	64
4.4 ขั้นตอนการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์	66
4.5 วิธีการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน	66
4.6 โครงสร้างของชุดทดลองการตรวจจับและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยเทคนิคขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ เปรียบเทียบกับเทคนิค MCSA	67
4.7 (บน) รูปจริงของชุดการทดลอง (ล่าง) ลักษณะของการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบที่ใช้ในการทดลอง	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 สเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันมอเตอร์ (บนซ้าย) สุขภาพดี (บนขวา) ลัดรอบ 1% (ล่างซ้าย) ลัดรอบ 2% และ (ล่างขวา) ลัดรอบ 3%	70
4.9 สเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์	72
4.10 ช่วงการพิจารณาในแต่ละองค์ประกอบของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์สำหรับนำมาเป็นคุณลักษณะเฉพาะของเทคนิค MCSA	72
5.1 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน $qd0$ เมื่อมีฮาร์มอนิกลำดับบวก (อันดับที่ 4 และ 10) รวมอยู่ในสัญญาณมาตรฐาน	75
5.2 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน $qd0$ เมื่อมีฮาร์มอนิกลำดับลบ (อันดับที่ 2 และ 5) รวมอยู่ในสัญญาณมาตรฐาน	75
5.3 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน $qd0$ เมื่อมีฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ (อันดับที่ 3 และ 9) รวมอยู่ในสัญญาณมาตรฐาน	75
5.4 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ภายใต้สภาวะฮาร์มอนิกไม่สมดุล	77
5.5 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ภายใต้แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสคลื่นไซน์ที่มีสภาวะแรงดันไม่สมดุล	77
5.6 วงจรนาล็อกสำหรับการตรวจจับสัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์หรือเรียกเป็นสัญญาณ $V_{sum}$	78
5.7 สัญญาณฟอลต์สเตเตอร์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบที่รอบต่างกัน	78
5.8 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์เมื่อขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบที่เวลา $\sim 45$ ms	79
5.9 สัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ภายใต้สภาวะที่ต่างกัน	79
5.10 สัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์เมื่อตัวนำสเตเตอร์ลัดวงจร 3 รอบภายใต้มอเตอร์มีโหลดต่างกัน	80
5.11 (บน) สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละขดขดลวดของสเตเตอร์ได้แก่ $v_{ax}$ , $v_{bx}$ , และ $v_{cx}$ และ (ล่าง) เมื่อผ่านการแปลงโดยใช้เวกเตอร์ปาร์กได้เป็นสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน $v_d$ , $v_q$ , และ $v_0$	81
5.12 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ เมื่อ (ก) มอเตอร์สุขภาพดี (ข) ขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบ 2% และ (ค) 3% ของจำนวนรอบทั้งหมดใน 1 เฟส	81

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 สเปกตร้าฟอลต์ฮาร์โมนิกแรงดันสเตเตอร์ (บน) กรณีแหล่งจ่ายสมมูลและ (ล่าง) กรณีมอเตอร์สุขภาพดี	82
5.14 ผลการทดลองลักษณะของสัญญาณ $v_{d\_fst}$ , $v_{q\_fst}$ และ $v_{0\_l}$ กรณี (บน) มอเตอร์สุขภาพดี (ล่าง) มีฟอลต์สเตเตอร์ที่ระดับความรุนแรง 3%	83
5.15 รูปแบบวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ด้วยอัลกอริทึมที่นำเสนอกรณี (บน) แหล่งจ่ายสมมูลและ (ล่าง) มอเตอร์สุขภาพดี	84
5.16 รูปแบบวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ในมอเตอร์ IM_1 (ก-ง) และมอเตอร์ IM_2 (จ-ช) ซึ่งแสดงถึงสถานะตัวนำสเตเตอร์ลัดรอบที่ 1%-4% (จากรูปบนลงล่างตามลำดับ)	85
5.17 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ต่อการเพิ่มขึ้นของความรุนแรงฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์ IM_1	88
5.18 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ต่อการเพิ่มขึ้นของความรุนแรงฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์ IM_2	88

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ด้วยข้อดีของมอเตอร์เหนี่ยวนำ รวมถึงขีดความสามารถที่สูงขึ้นของอุปกรณ์โซลิดสเตต (Solid-state device) และรวมถึงเทคนิคการควบคุมที่ยืดหยุ่นทำให้ในระบบอุตสาหกรรมสมัยใหม่จึงยังนิยมเลือกใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดนี้เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้สมรรถนะที่สูงขึ้นของอุปกรณ์โซลิดสเตตและตัวประมวลผล เช่นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital signal processor, DSP) ทำให้เทคนิคการควบคุมที่ยู่ยากซับซ้อนสามารถถูกนำมาควบคุมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้วงานทางด้าน การเฝ้าตรวจสอบสถานะและการบำรุงรักษาโดยการประมวลผลสัญญาณต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์เองก็ได้ถูกนำมาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถตรวจจับฟอลต์ที่เกิดขึ้นสำหรับการทำนายหรือการวินิจฉัย เพื่อวางแผนการซ่อมบำรุงรักษา ก่อนที่ระบบการผลิตโดยรวมจะหยุดชะงักไป [1-2] ในปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมที่มีอยู่อย่างมากมาย ได้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องจักร จากการสำรวจพบว่าในทวีปยุโรป ได้มีการใช้พลังงานมากถึง 70% ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด โดยถูกนำมาใช้กับระบบที่มีเครื่องจักรกลไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ [3-4] จากที่กล่าวมานี้จึงเห็นได้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นจำนวนมาก ในการวิจัยเพื่อที่จะให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความสมบูรณ์ในตัวเองมากที่สุด ซึ่งสามารถสรุปกลุ่มงานวิจัยของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สำคัญได้แก่ การพัฒนา ด้าน โครงสร้าง เทคนิคการขับเคลื่อน การประยุกต์ใช้เป็นต้นกำลังในยานยนต์ การป้องกัน และการวินิจฉัย เป็นต้น ทั้งนี้ในปัจจุบันงานด้านการวินิจฉัย กำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดอื่น

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นด้านการวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเป็นการผสมผสานกันระหว่างสัญญาณที่ใช้เป็นข้อมูลสำหรับนำมาวิเคราะห์กับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) สำหรับการหาข้อวินิจฉัย โดยจากรายงานในเอกสารอ้างอิง [5] พบว่าฉนวนตัวนำสเตเตอร์มักเกิดปัญหาด้านการเสื่อมคุณภาพได้บ่อยครั้งคิดเป็นประมาณ 27-38% ของฟอลต์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ทั้งนี้ลักษณะของฟอลต์เริ่มต้นที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะของการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ (Turn-to-turn) ซึ่งจะเกิดขึ้นในระยะแรกเริ่มและตรวจจับได้ยาก และนำไปสู่ฟอลต์สเตเตอร์ที่รุนแรงตามมา คือสถานะการลัดวงจรระหว่างขดลวดถึงขดลวด (Coil-to-coil) เฟสถึงเฟส (Phase-to-phase) และขดลวดลงกราวด์ (Coil-to-ground) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระยะแรก (การลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ) เพื่อที่จะได้ทำการซ่อมบำรุงก่อนที่จะมีการลุกลาม และขยายความรุนแรงต่อไปซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง [6] ทั้งนี้การค้นคว้าข้อมูลของงานวิจัยที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปเป็นประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

W. T. Thomson และคณะ (ค.ศ. 1990) [7] ได้ทำการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยการค้นหาสเปคตรัมฟอลต์ซึ่งสัมพันธ์กับการเยื้องศูนย์กลางของช่องอากาศ (Airgap eccentricity) ที่เกิดขึ้นรวมอยู่ในสัญญาณกระแสเตเตอร์ เทคนิคนี้เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor current signature analysis, MCSA) อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถตรวจสอบความผิดปกติของสาเหตุนี้ได้เป็นอย่างดีแล้วก็ตาม แต่เนื่องจากขนาดที่เล็กมากของสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์ทำให้ยากต่อการได้รับผลกระทบอื่นๆ ที่สำคัญเช่น ความไม่สมบรูณ์อย่างแท้จริงของขดลวดสเตเตอร์ รวมถึงผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นทั้งจากภายในและภายนอกของมอเตอร์ เป็นต้น

M. A. Cash และคณะ (ค.ศ. 1998) [8] ได้ทำการทำนายความล้มเหลว (Failure) ของฉนวนสเตเตอร์โดยใช้ผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละขดของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งก็คือเป็นการคำนวณหองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ (Zero sequence voltage) โดยผลการทดลองเป็นในลักษณะของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ กับสัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ ซึ่งพบว่าระดับของสัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ที่ลัดวงจร

A. J. M. Cardoso และคณะ (ค.ศ. 1999) [9] ได้ทำการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ โดยใช้สัญญาณกระแสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส แล้วนำมาประมวลผลโดยใช้การแปลงเวกเตอร์ปาร์ก (Park's vector approach) การนำเสนอนี้เป็นการแสดงผลแบบ 2 มิติ สำหรับแสดงพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส บนพื้นฐานขององค์ประกอบเวกเตอร์ปาร์ก ซึ่งทำให้ได้กระแสเตเตอร์บนแกน  $D(i_d)$  และแกน  $Q(i_q)$  โดยการคำนวณจากฟังก์ชันของกระแสเฟสได้แก่  $i_a$ ,  $i_b$  และ  $i_c$  ทั้งนี้ในเวลาต่อมาได้มีนักวิจัยเป็นจำนวนมาก ได้นำวิธีเวกเตอร์ปาร์กมาตรวจจับความล้มเหลวของส่วนประกอบอื่นๆในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในแต่ละการวิจัยจะเป็นการพิจารณาในหลายองค์ประกอบสเปคตรัมตั้งแต่สเปคตรัมมูลฐานตลอดจนสเปคตรัมฟอลต์อื่นๆด้วย

S. Nandi และคณะ (ค.ศ. 2002) [10] ได้นำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้สัญญาณแรงดันที่เหนี่ยวนำขึ้นหลังจากหยุดจ่ายไฟ ซึ่งเป็นการตรวจจับสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์ในโดเมนความถี่ ที่ได้จากการแปลงโดยใช้การแปลงฟูเรียร์เร็ว (Fast Fourier transform, FFT) ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถลดผลกระทบในเรื่องของสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟลงได้ แต่อย่างไรก็ตามสเปคตรัมฟอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตรเตอร์ที่ตรวจจับได้ในแต่ละความรุนแรงของสภาวะฟอลต์สเตรเตอร์มีขนาดที่แตกต่างกันน้อยมาก ทำให้ยากแก่การระบุความรุนแรงของการลัดวงจรที่แม่นยำได้

F. Zidani และคณะ (ค.ศ. 2003) [11] ได้ทำการวินิจฉัยฟอลต์สเตรเตอร์ที่มีความรุนแรงมาก โดยใช้สัญญาณกระแสสเตรเตอร์ทั้ง 3 เฟส แล้วนำมาผ่านการแปลงด้วยคอนคอร์เดีย (Concordia) เพื่อพิจารณาในแกน  $\beta$  และแกน  $\alpha$  ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังได้นำเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ คือระบบการตัดสินใจด้วยเทคนิคของฟัชซีลอจิกสำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สเตรเตอร์มาใช้อีกด้วย

P. Garcia และคณะ (ค.ศ. 2004) [12] ได้ใช้แรงดันลำดับศูนย์สำหรับการวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับทำนายความเสียหายของตัวนำสเตรเตอร์และโรเตอร์ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการตรวจจับสัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ทั้งในมอเตอร์ที่ต่อแบบวาย (Star) และมอเตอร์ที่ต่อแบบเดลต้า (Delta) ผลการทดลองดังกล่าวเป็นในลักษณะการศึกษาของสัญญาณฟอลต์สเตรเตอร์ที่เกิดขึ้นทั้งในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟเป็นคลื่นไซน์และอินเวอร์เตอร์ ซึ่งก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังเป็นเพียงกรณีศึกษา ซึ่งยังขาดการนำเทคนิคปัญญาประดิษฐ์มาใช้สำหรับการตัดสินใจระบุความรุนแรงของฟอลต์ดังกล่าว

A. Widodo และคณะ (ค.ศ. 2007) [13] ได้สำรวจ สรุปและวิจารณ์ ถึงการพัฒนาของเทคนิคการเฝ้าตรวจสภาวะ (Condition monitoring) และการวินิจฉัยฟอลต์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าด้วยการใช้อัลกอริทึมของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน แทนการวินิจฉัยมอเตอร์ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligent) แบบเดิม พบว่าได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนให้มีความเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยและการเฝ้าตรวจสภาวะมอเตอร์อย่างจริงจังตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 เป็นต้นมา

A. Bellini และคณะ (ค.ศ. 2008) [14] ได้นำเสนอในลักษณะเป็นการรวบรวมความก้าวหน้าของเทคนิคการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเป็นการรวบรวมเทคนิคใหม่ๆ ที่ถูกนำมาใช้ในการวินิจฉัย ได้แก่ เทคนิคการตรวจจับฟอลต์ เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ เป็นต้น ทั้งนี้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ที่ถูกนำมาใช้ที่ได้มีการรวบรวมไว้เช่น ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert systems, ES), เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm, GA) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network, ANN) ฟัชซีลอจิก (Fuzzy logic, FL) และโครงข่ายประสาทเทียม-ฟัชซี (Neuro-fuzzy) เป็นต้น ซึ่งยังไม่ปรากฏเทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในรายงานฉบับนี้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการวินิจฉัยฟอลต์สเตรเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สำหรับการทำนาย (Prediction) ความล้มเหลวของตัวนำสเตรเตอร์ที่มีประสิทธิภาพของการวินิจฉัยที่ดีขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

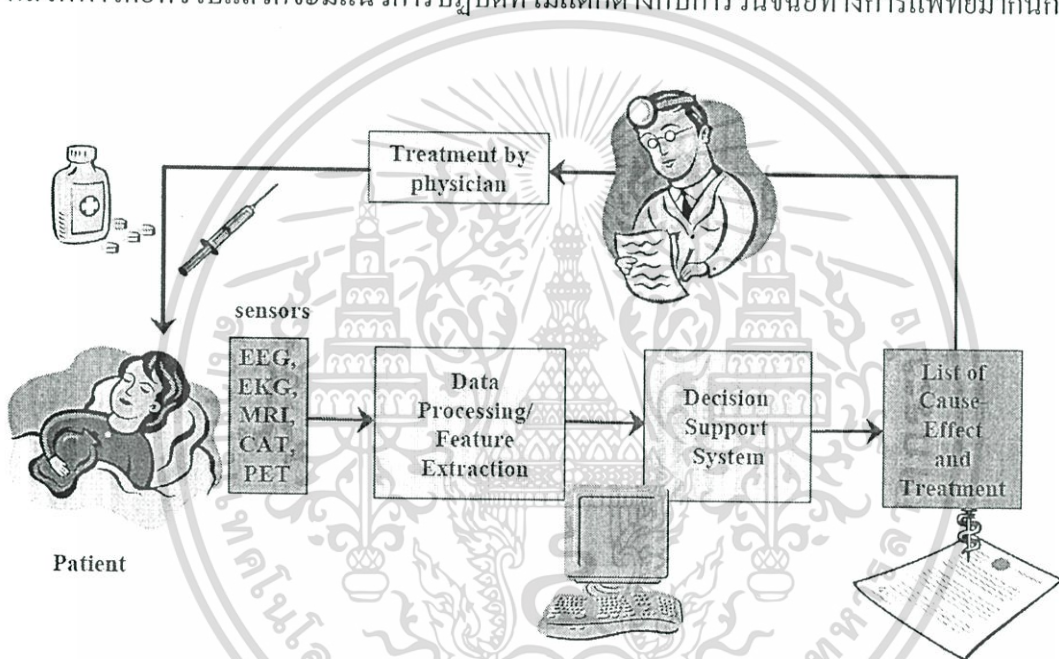
โดยการนำสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละชุดขดลวดของมอเตอร์ มาผ่านเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลก่อนแปลงไปยังโดเมนความถี่ด้วยเทคนิคของ FFT พร้อมด้วยการประยุกต์ใช้การแปลงเวกเตอร์ปาร์กเพื่อไปสู่แกนองค์ประกอบ  $D$ ,  $Q$  และองค์ประกอบศูนย์ ( $0$ ) แล้วพิจารณาลักษณะของวงโคจรใน 3 มิติขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่แตกต่างกันในแต่ละความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ และนำไปสู่การดึงคุณลักษณะเฉพาะ (Feature extraction) ซึ่งได้พิจารณาจากค่าประสิทธิผล (Root mean square, RMS) ในแต่ละสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $d$ ,  $q$  และ  $0$  สำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยอัลกอริทึมของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบหลายคลาส ที่ได้ออกแบบขึ้นจากโมเดลของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบไบนารีคลาส ทั้งนี้พิกัดความถูกต้องที่ได้จะถูกเปรียบเทียบกับเทคนิคของ MCSA ที่ได้ออกแบบขึ้นสำหรับการเปรียบเทียบเฉพาะในงานวิจัยนี้ด้วย

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สัญญาณที่จะนำมาใช้สำหรับการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ในงานวิจัยนี้ คือสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 ชุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ข้อมูลสัญญาณแรงดันที่ได้มานี้ จะถูกนำมาสำหรับการวิเคราะห์ถึงความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์ โดยอาศัยการศึกษาบนพื้นฐานของเวกเตอร์ปาร์ก (Park's vector) สัญญาณใหม่ที่ได้เรียกเป็น สัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ทั้งนี้เทคนิคที่มีมาก่อนสำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์นั้น เป็นการพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบ  $d$  และ  $q$  เท่านั้น นอกจากนี้แล้วยังได้นำสเปกตรัมมอดูลที่มียู่ในสัญญาณมูลฐาน (Fundamental) ทั้งหมดมาพิจารณาซึ่งย่อมเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขั้นสูง สำหรับการพิจารณาให้สเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ในย่านของมันเท่านั้นที่มีความโดดเด่นชัดเจน แล้วจึงประยุกต์ใช้การแปลงเวกเตอร์ปาร์กไปสู่องค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  โดยมีวิธีการออกเป็น 2 แนวทางในการแปลงด้วยเวกเตอร์ปาร์ก กล่าวคือจะใช้เฉพาะช่วงของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์เท่านั้นที่ผ่านออกไปสำหรับการแปลงหาองค์ประกอบแรงดัน  $d$  และ  $q$  แต่สำหรับองค์ประกอบแรงดัน  $0$  จะใช้เฉพาะสัญญาณมูลฐาน ทั้งนี้เพื่อต้องการพิจารณาผลของฟอลต์สเตเตอร์ที่เกิดขึ้นเท่านั้น หลังจากนั้นนำมาพล็อตในลักษณะ 3 มิติเพื่อคุณลักษณะของวงโคจร (Trajectory) ที่เกิดขึ้น ซึ่งหากไม่มีสเปกตรัมฟอลต์ที่มีสาเหตุมาจากความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์ ลักษณะวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $qd0$  จะเป็นเพียงจุดเล็กอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ แต่หากมีสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์เกิดขึ้น การโคจรนี้จะออกห่างจากจุดศูนย์กลางและมีวงโคจรที่กว้างขึ้นตามความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ที่สูงขึ้นด้วย

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

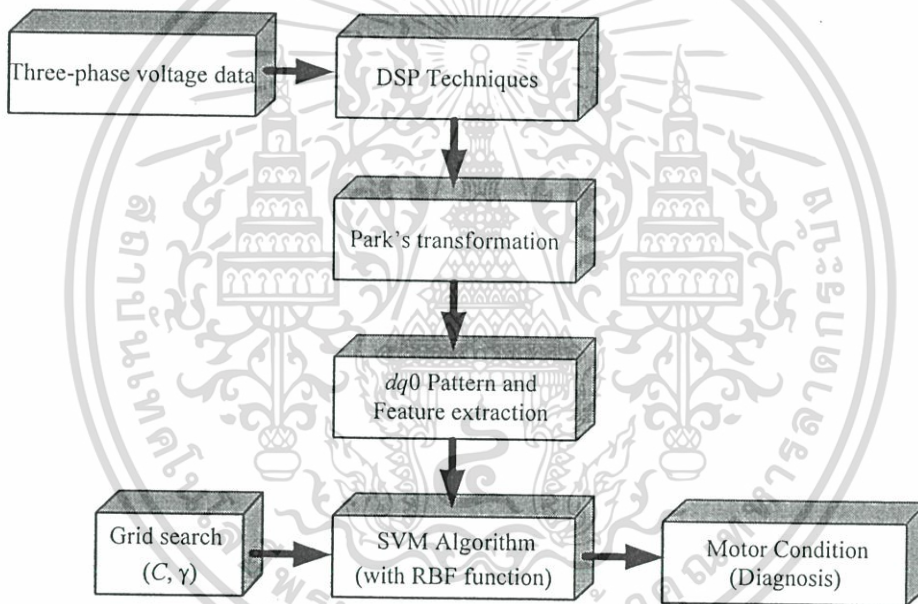
การวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นเทคนิคหนึ่งของการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า ที่มีขั้นตอนของการวินิจฉัยที่คล้ายกับการวินิจฉัยของแพทย์ที่มีต่อคนไข้บนพื้นฐานของการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งแนวการปฏิบัติของแพทย์ในทุกวันนี้ที่มีต่อคนไข้และสาเหตุของโรคที่มีจำนวนมาก จำเป็นต้องพึ่งพาข้อมูลข่าวสารซึ่งถือเป็นส่วนที่มีความสำคัญ การใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์จะเป็นส่วนช่วยต่อการวินิจฉัยทางการแพทย์ การเข้าถึงข้อมูลข่าวสารและการติดต่อกับแพทย์ผู้เชี่ยวชาญที่อยู่ห่างไกล ทำให้สามารถทำการตัดสินใจการรักษาได้อย่างรวดเร็วภายใต้ความถูกต้องสูงสุด ทั้งนี้แนวทางของการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วก็จะมีแนวการปฏิบัติที่ไม่แตกต่างกับการวินิจฉัยทางการแพทย์มากนัก



รูปที่ 1.1 ระบบการวินิจฉัยทางการแพทย์บนพื้นฐานคอมพิวเตอร์ [15]

สำหรับปัญหาการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ คือระดับความรุนแรงของฟอลต์ที่มีขนาดเล็กยากแก่การตรวจจับซึ่งถือได้ว่ามีความสำคัญมาก ทั้งนี้การระบุความรุนแรงของฟอลต์ที่ผ่านมาทำได้โดยการพิจารณาจากขนาดของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ แต่ในความเป็นจริงแล้วสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นอาจมีด้วยกันหลายสาเหตุตามความล้มเหลวของส่วนประกอบมอเตอร์ ยิ่งไปกว่านั้นที่สำคัญคือถึงแม้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะอยู่ในสภาวะที่สมบูรณ์ก็ตาม ก็สามารถเกิดสัญญาณฟอลต์ในย่านของฟอลต์สเตเตอร์ขึ้นมาได้ ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เช่น การอิ่มตัว (Saturation) ความไม่สมดุลของโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Machine structural unbalance) รวมถึงความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายไฟด้วย (Voltage unbalance) [16] ที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าการบันทึกข้อมูลต่างๆย่อมมีประโยชน์ต่อการวินิจฉัยมอเตอร์ เทคนิคเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดลอกทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัจฉริยะที่ถูกสร้างขึ้นมาจึงได้รับการสอน (Train) เพื่อการเรียนรู้ (Learn) สำหรับเป็นข้อมูลอ้างอิงต่อการพิจารณาหรือตัดสินใจบ่งบอกสถานะปัจจุบันได้ เช่นเดียวกันนี้การวินิจฉัยมอเตอร์หากไม่มีส่วนของการสอนให้รู้ไว้ในสถานะที่มอเตอร์มีความสมบูรณ์ สเปกตรัมต่างๆที่เกิดขึ้นมีลักษณะอย่างไรก็อาจนำไปสู่ข้อวินิจฉัยที่ผิดพลาดขึ้นได้ ด้วยเหตุผลนี้เทคนิคการรู้จำรูปแบบ (Pattern recognition) จึงมีความสำคัญสำหรับนำมาเรียนรู้ถึงพฤติกรรมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นหรือใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการวินิจฉัยให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ในปัจจุบันมีนักวิจัยเป็นจำนวนมากได้นำเทคนิคการรู้จำรูปแบบ นำมาประยุกต์ใช้เพื่อการตรวจจับและวินิจฉัยฟอลต์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยส่วนที่มีความสำคัญคือการดึงคุณลักษณะเฉพาะของข้อมูลนั้นๆ ออกมาสำหรับการสอนให้กับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเพื่อนำไปสู่การตัดสินใจ (Decision) และสรุปถึงข้อวินิจฉัยต่อไป



รูปที่ 1.2 บล็อกไดอะแกรมของอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบขึ้นสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์บนพื้นฐานขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ในงานวิจัยนี้การวินิจฉัยมอเตอร์จะอยู่บนพื้นฐานขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ซึ่งได้มาจากสัญญาณแรงดันเฟสของมอเตอร์จะถูกนำมาประมวลผลโดยใช้การแปลงเวกเตอร์ปาร์ค (Park's vector transformation) ซึ่งเป็นการแปลงที่รู้จักกันดีสำหรับใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้า [17] องค์ประกอบแรงดันทั้ง 3 สัญญาณในโดเมนเวลาที่ได้นี้จะถูกคำนวณเป็นค่าประสิทธิผลและกำหนดเป็นคุณลักษณะเฉพาะของสัญญาณนั้นๆเพื่อใช้สำหรับสอนให้กับอัลกอริทึมของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ต่อไป แนวคิดที่ได้กล่าวมานี้แสดงในลักษณะของบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 1.2 ซึ่งแสดงขั้นตอนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมวลผลสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์บนพื้นฐานขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

โดยข้อสมมุติฐานของการวินิจฉัยด้วยวิธีการนี้ สัญญาณแรงดันในรูปขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ในโดเมนเวลาจะมีขนาดเล็กมากถ้าหากเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีความสมบูรณ์และจะมีค่าสูงขึ้นตามระดับความรุนแรงของสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขั้นสูง สำหรับการตรวจจับสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ซึ่งถือได้ว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญของอัลกอริทึมในการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ของงานวิจัยนี้ การได้แก่สเปกตรัมฟอลต์ที่มีความโดดเด่นชัดเจนจะนำไปสู่การพิจารณาในลักษณะการนำมาพล็อตใน 3 มิติ หรือเรียกเป็นรูปแบบขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน กล่าวคือจะสามารถทำให้วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่ได้จะเข้าใกล้จุดศูนย์ที่ระดับฟอลต์สเตเตอร์ต่ำๆ แต่ถ้ามีสัญญาณฮาร์มอนิกเนื่องจากฟอลต์สเตเตอร์ วงโคจรจะกว้างและไกลออกจากตำแหน่งศูนย์ ด้วยรูปแบบของวงโคจรที่แตกต่างในลักษณะกว้างขึ้นนี้เอง จะทำให้การดึงคุณลักษณะของสัญญาณองค์ประกอบ  $dq0$  มีประสิทธิภาพที่ดีและนำไปสู่การประยุกต์ใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการเฝ้าตรวจและวินิจฉัยความล้มเหลวของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณิฟอลต์สเตเตอร์ต่อไป

### 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

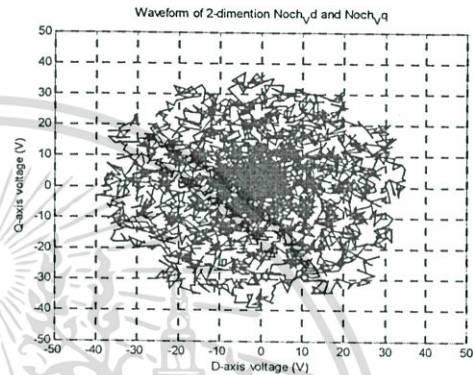
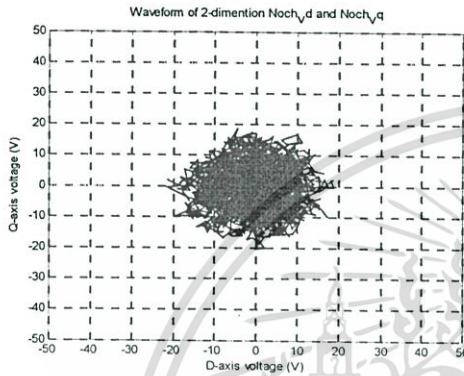
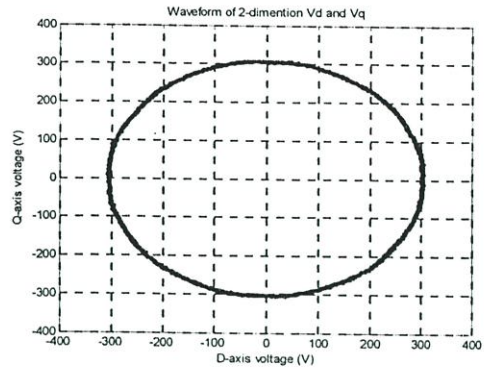
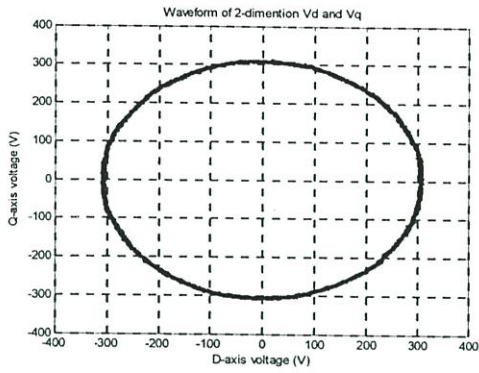
งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการแปลงเวกเตอร์ปาร์กที่มีประสิทธิภาพ ในการตรวจสอบพฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สำหรับนำมาเป็นส่วนหนึ่งของการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยเทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน โดยได้พัฒนาให้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น กล่าวคือโดยทั่วไปแล้วที่ผ่านมามีการใช้การนำเสนอแบบ 2 มิติ สำหรับการอธิบายพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (ไม่นำองค์ประกอบศูนย์มาร่วมพิจารณาด้วย) ซึ่งองค์ประกอบ  $D$  และ  $Q$  ของสัญญาณแรงดันหรือกระแสสามารถคำนวณได้จากสมการ [11]

$$v_d(n) = \sqrt{\frac{2}{3}}v_a(n) - \frac{1}{\sqrt{6}}v_b(n) - \frac{1}{\sqrt{6}}v_c(n) \quad (1.1)$$

$$v_q(n) = \frac{1}{\sqrt{2}}v_b(n) - \frac{1}{\sqrt{2}}v_c(n) \quad (1.2)$$

เมื่อ  $n$  คือลำดับของข้อมูลสัญญาณในโดเมนเวลา  $1, 2, 3, \dots, N$  และเมื่อ  $N$  คือจำนวนของข้อมูลทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 รูปโครงสร้างขององค์ประกอบแรงดัน  $dq$  ในสภาวะมอเตอร์ (บนซ้าย) สุขภาพดี (บนขวา) มีสภาวะฟอลต์สเตเตอร์ (ล่างซ้ายและขวา) เมื่อตัดองค์ประกอบมูลฐานออก

สำหรับการวิเคราะห์รูปแบบเวกเตอร์ปาร์คหรือบางครั้งเรียกเป็นเวกเตอร์คอนคอร์เดีย (Concordia vector) นั้นที่ผ่านมาได้มีการนำทั้งโครงข่ายประสาทเทียม ฟิชชี่ลอจิก ระบบผู้เชี่ยวชาญและอื่นๆ สำหรับการตัดสินใจถึงข้อวินิจฉัย ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นคือสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $v_d$  และ  $v_q$  ที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบมูลฐานและสัญญาณฮาร์มอนิกอื่นๆ ทำให้เป็นสาเหตุของข้อวินิจฉัยที่อาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ การพัฒนาในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มองค์ประกอบเวกเตอร์ศูนย์มีสมการใน (1.3) ซึ่งในงานวิจัย [8] ได้ออกแบบโดยใช้วงจรอนาล็อกสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิผลของมัน

$$v_0(n) = \frac{1}{3}v_a(n) - \frac{1}{3}v_b(n) - \frac{1}{3}v_c(n) \quad (1.3)$$

องค์ประกอบของเวกเตอร์ปาร์ค  $dq$  ที่ได้มีการวิจัยผ่านมานั้น ได้มุ่งเน้นสำหรับการพล็อตใน 2 มิติ และเป็นการพิจารณาร่วมกับองค์ประกอบมูลฐานด้วย แสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองโดยเปรียบเทียบระหว่างสภาวะมอเตอร์สุขภาพดี (Healthy) และสภาวะมีฟอลต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตเตอร์ (Faulty) พบว่าในรูปซึ่งพิจารณาพร้อมกับองค์ประกอบมูลฐาน ทำให้การแยกแยะได้ค่อนข้างลำบาก แต่ถ้าทำการตัดองค์ประกอบมูลฐานออกในรูปล่างจะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนกว่า ซึ่งการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการพิจารณาจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกของฟอลต์สเตเตอร์ ( $f_{st}$ ) ที่มีสมการ (1.4) สัญญาณฮาร์มอนิกดังกล่าวจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการลัดวงจร ( $v_{a_{f_{st}}}$ ,  $v_{b_{f_{st}}}$ ,  $v_{c_{f_{st}}}$ ) [18] สำหรับการวิเคราะห์จากองค์ประกอบเวกเตอร์ศูนย์จะเป็นการพิจารณาจากองค์ประกอบมูลฐาน ( $v_{a_{f_1}}$ ,  $v_{b_{f_1}}$ ,  $v_{c_{f_1}}$ ) เท่านั้น ทั้งนี้จากสมการที่ (1.3) ถ้าในแต่ละตัวแปรแรงดันมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วยจะมีผลต่อผลรวมแรงดันไฟฟ้า  $v_0$  สมการองค์ประกอบของเวกเตอร์  $dq0$  สำหรับงานวิจัยนี้แสดงในสมการที่ (1.5)

$$f_{st} = f_1 \left\{ \frac{m}{p}(1-s) \pm k \right\} \quad (1.4)$$

เมื่อ  $f_1$  คือความถี่มูลฐาน,  $s$  คือค่าสลิป,  $m$  คือ 1, 2, 3, ... และ  $k$  คือ 1, 3, 5, ...

$$\left. \begin{aligned} v_{d_{f_m}}(n) &= \sqrt{\frac{2}{3}} v_{a_{f_m}}(n) - \frac{1}{\sqrt{6}} v_{b_{f_m}}(n) - \frac{1}{\sqrt{6}} v_{c_{f_m}}(n) \\ v_{q_{f_m}}(n) &= \frac{1}{\sqrt{2}} v_{b_{f_m}}(n) - \frac{1}{\sqrt{2}} v_{c_{f_m}}(n) \\ v_{0_{f_1}}(n) &= \frac{1}{3} v_{a_{f_1}}(n) + \frac{1}{3} v_{b_{f_1}}(n) + \frac{1}{3} v_{c_{f_1}}(n) \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

ในขั้นตอนสุดท้ายหลังจากที่ได้คุณลักษณะเฉพาะของแต่ละสัญญาณองค์ประกอบ  $d$ ,  $q$  และ 0 แล้วได้ใช้อัลกอริทึมของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์สำหรับแสดงถึงสถานะความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ด้วย ซึ่งเทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนนี้ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างสำหรับหลายการประยุกต์ใช้ในการแยกแยะต่างๆ แต่สำหรับการประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้านั้นยังไม่เป็นที่กว้างขวางมากนัก

## 1.6 ขอบเขตการวิจัย

จากวัตถุประสงค์และจุดมุ่งหมายของการทำวิจัยเพื่อหาหลักการใหม่ สำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสกรณีเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ โดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์สามารถสรุปขอบเขตการวิจัยได้เป็น

- ประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับการค้นหา และตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์กรณีลัดวงจรแบบรอบถึงรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พัฒนาหลักการขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ให้มีความเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยมอเตอร์กรณีตัวนำสเตเตอร์ลัดวงจรแบบรอบถึงรอบได้
- ออกแบบอัลกอริทึมที่สามารถทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสภายใต้สภาวะแรงดันแหล่งจ่ายมีความสมดุล ด้วยเทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน
- ทำการทดลองด้วยการเปรียบเทียบกับเทคนิค MCSA ถึงข้อดีและข้อด้อยต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 พิกัดที่มีพารามิเตอร์ต่างกัน

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

การวิจัยซึ่งนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ศึกษาและออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยในขั้นตอนของการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ได้ประยุกต์ใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขั้นสูง สำหรับการบ่งชี้ฟอลต์สเตเตอร์ที่มีประสิทธิภาพ และสำหรับขั้นตอนของการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ได้เลือกใช้เทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวินิจฉัยมอเตอร์ในปัจจุบัน ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา เป็นต้น

บทที่ 2 กล่าวถึงสาเหตุความล้มเหลวของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นสาเหตุการเกิดขึ้นของสัญญาณฟอลต์ต่างๆ ระบบการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์สำหรับเป็นพื้นฐานในการวินิจฉัย รวมถึงผลของความล้มเหลวมอเตอร์ต่อผลกระทบต่อพลังงาน

บทที่ 3 กล่าวถึงการประมาณค่าสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ด้วยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขั้นสูง การวิเคราะห์ตัวกรองวินโดว์สำหรับการตรวจจับฟอลต์ และรวมถึงการสำรวจสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วยสาเหตุต่างๆ

บทที่ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์บนพื้นฐานขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  เพื่อการดึงคุณลักษณะเฉพาะของฟอลต์สเตเตอร์ และการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการตัดสินใจระบุความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์

บทที่ 5 เป็นการทดลองอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยเทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน พร้อมทั้งการเปรียบเทียบกับเทคนิค MCSA ซึ่งเป็นเทคนิคที่ยังได้รับความนิยมนำมาใช้อยู่ในปัจจุบัน

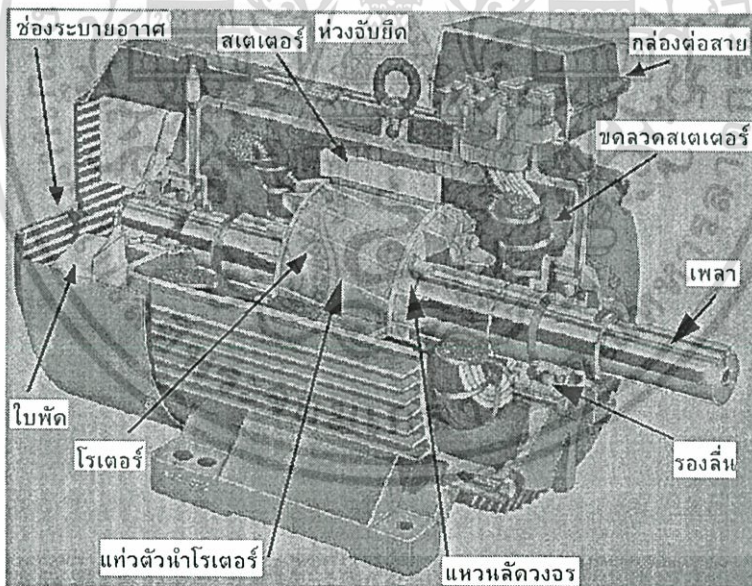
บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการที่นำเสนอ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางมากที่สุดในประเภทของเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่นเดียวกันนี้ความล้มเหลว (Failure) ที่ไม่ได้คาดการณ์มาก่อนของมอเตอร์เหนี่ยวนำทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่สูง และมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตที่ทำให้ต้องหยุดชะงักไป ในปัจจุบันเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว โรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการเฝ้าตรวจสถานะ (Condition monitoring) เครื่องจักรกลไฟฟ้า เทคนิคที่ใช้ในการเฝ้าตรวจสถานะที่ยังมีการวิจัยกันอย่างกว้างขวางคือการวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor current signature analysis, MCSA) ซึ่งเทคนิคดังกล่าวได้เริ่มทำการศึกษามาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งออกมาเป็นในลักษณะของชุดวงจรสำเร็จดังรายละเอียดใน [19] ทั้งนี้เทคนิค MCSA จะเป็นการวินิจฉัยแบบไร้การสัมผัส เครื่องจักรกลไฟฟ้าและไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาหรือในอนาคตอีกด้วย (Noninvasive) [20]



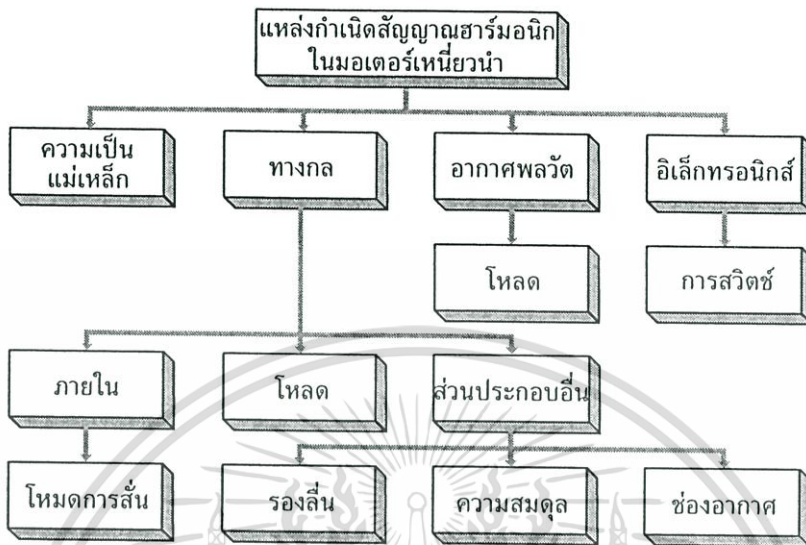
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก

[<http://peane2.pea.co.th>]

#### 2.1 สัญญาณฟอลต์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ส่วนประกอบที่สำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งในแต่ละส่วนประกอบนี้หากเกิดการล้มเหลวจะทำให้เกิดสัญญาณฟอลต์ที่มีความถี่ต่างๆกันขึ้นมา สัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอลต์หรือฮาร์โมนิกฟอลต์ (Noise sources) ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทแสดงในรูปที่ 2.2 [21]



รูปที่ 2.2 ประเภทของสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

### 2.1.1 ฮาร์โมนิกฟอลต์ที่เกิดจากความ เป็นแม่เหล็ก

คือฮาร์โมนิกที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งข้ามผ่านช่องอากาศ ที่มีทิศทางของการกระจายสนามแม่เหล็กแตกต่างกันไปและก่อให้เกิดแรงในทิศทางนั้นๆ เป็นผลทำให้เกิดฮาร์โมนิกที่มีสาเหตุมาจากความเป็นแม่เหล็ก และการสัน (Vibrations) ความถี่ที่เกิดขึ้นใหม่จะมีสมการเป็น

$$f_{sr} = f_l \left[ \frac{kN_r}{P} (1-s) \right] \quad (2.1)$$

$$f_{sh} = f_l \left[ \frac{N_r}{P} (1-s) \pm k \right] \quad (2.2)$$

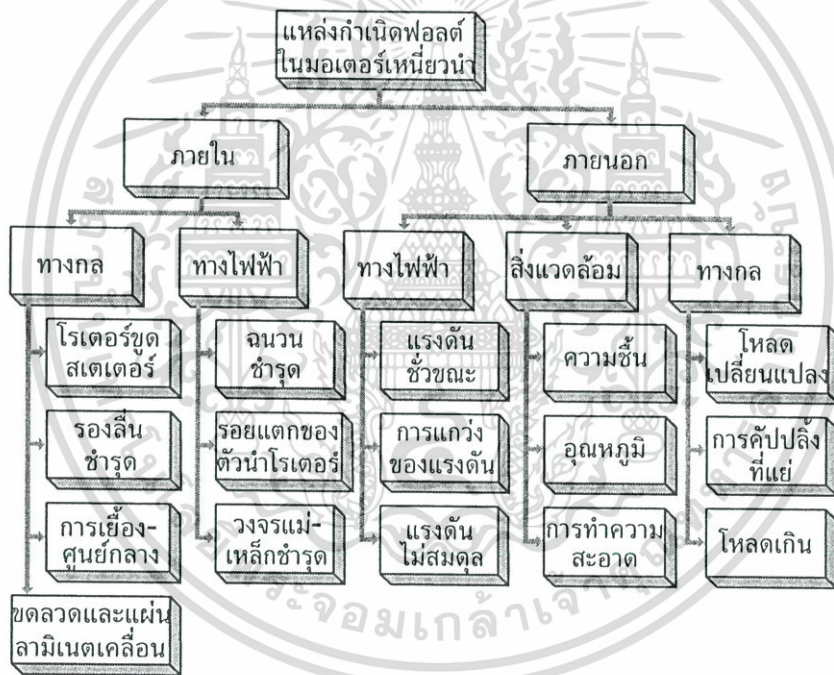
ทั้งนี้ (2.1) คือฮาร์โมนิกที่มีสาเหตุมาจากขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ ( $f_{sr}$ ) สำหรับ (2.2) คือฮาร์โมนิกที่มีสาเหตุมาจากความเป็นสล็อต ( $f_{sh}$ ) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับความถี่มูลฐาน ( $f_l$ ) จำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์ ( $N_r$ ) ความถี่สลลิป ( $s$ ) และจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก ( $P$ ) นอกจากนี้แล้วยังมีฮาร์โมนิกที่เป็นผลมาจากความเป็นแม่เหล็กไม่สมดุล (Unbalanced magnetic), Crawling และ Standstill Locking อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ฮาร์มอนิกฟลด์ที่เกิดจากทางกล

สามารถแบ่งออกได้เป็นฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากตัวของเครื่องจักรกลเอง ได้แก่ความถี่ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปในขดลวดสเตเตอร์ที่ก่อให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ และทำให้มีอีกหนึ่งความถี่ปรากฏขึ้น ส่วนฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของโหลด (Load induced) คือฮาร์มอนิกที่เกิดจากการคัปปลิงของเครื่องจักรกลเข้ากับโหลด ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากส่วนประกอบอื่น (Auxiliaries) ของเครื่องจักรกลเช่น ปัญหาของรองด้น (Bearings) ความไม่สมดุลของโรเตอร์ (Rotor unbalance) เป็นต้น ทั้งนี้ (2.3) คือฮาร์มอนิกที่มีสาเหตุมาจากความเสียหายของรองด้น เมื่อ ( $n_b$ ) คือจำนวนของลูกปืนในรองด้น และ ( $f_{i,o}$ ) คือความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นจากพารามิเตอร์ของลูกปืน

$$f_{bngbng} = f_1 \pm n_b f_{i,o} \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.3 แหล่งกำเนิดฟลด์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำตามแนวคิดของ Dr. Singh

2.1.3 ฮาร์มอนิกฟลด์ที่เกิดจากอากาศพลวัต

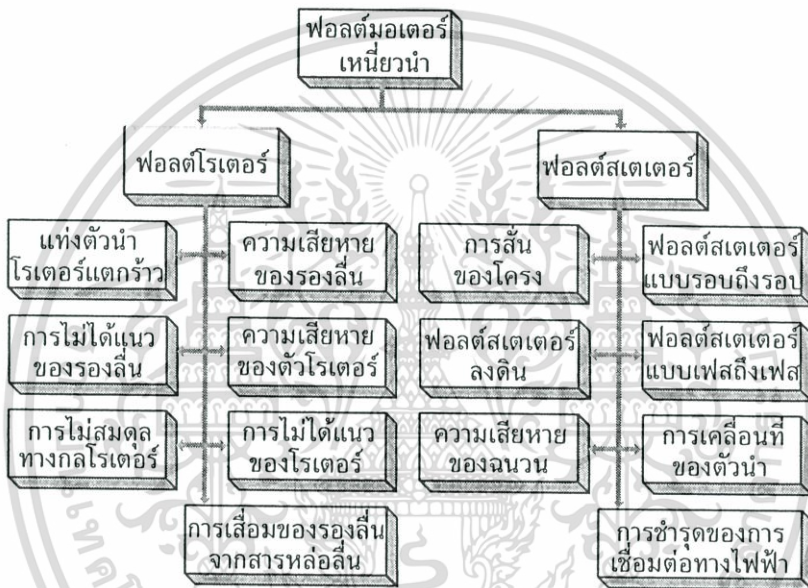
คือฮาร์มอนิกที่เกิดจาก การระบายความร้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ได้แก่ อากาศ น้ำ หรือน้ำมัน เช่นการระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้พัดลมจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกที่มีความสัมพันธ์กับความเร็ว ( $n_r$ ) จำนวนของใบพัด ( $N_p$ ) และมีความถี่ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด สมการที่ (2.4) คือฮาร์มอนิกที่เกิดจากการระบายความร้อนด้วยลมโดยใช้ใบพัดติดที่ปลายโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_f = N_b \frac{n_r}{60} \quad (2.4)$$

#### 2.1.4 ฮาร์มอนิกฟอลต์ที่เกิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์

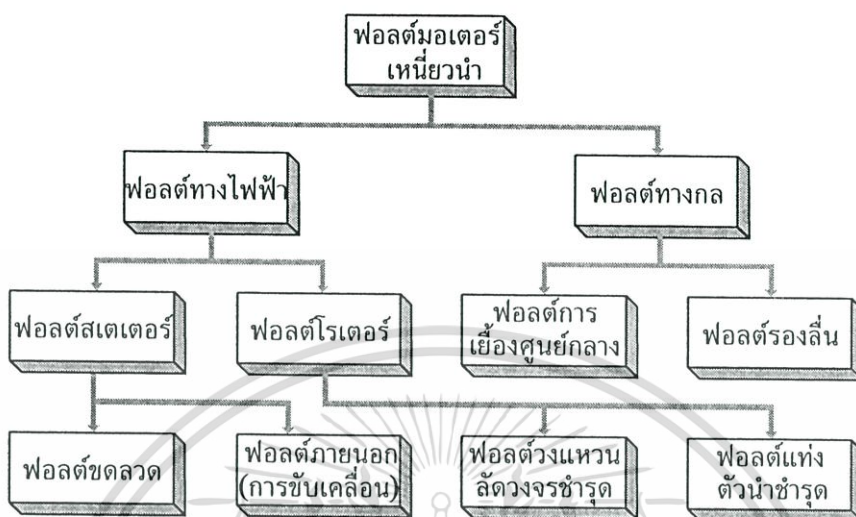
แหล่งจ่ายจ่ายพวกรูปกรณ์โซลิตสแตตที่ใช้ในการสวิต เช่นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกกลุ่มแรกที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของการสวิต (Switching) และฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับเทคนิคของการมอดูเลต สัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้เมื่อไหลเข้าสู่เครื่องจักรกลไฟฟ้าจะทำให้การวินิจฉัยมีความยุ่งยากมากขึ้นไปอีก



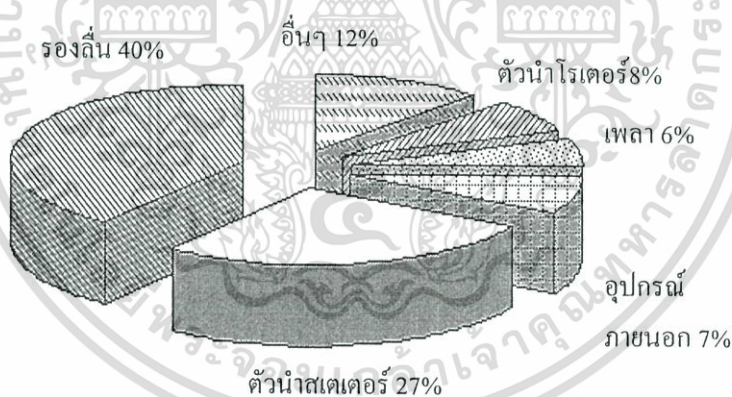
รูปที่ 2.4 ประเภทของฟอลต์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำตามแนวคิดของ Dr. Singh

จากงานวิจัยของ Dr. Singh และคณะ [22] ได้ให้ความเห็นเกี่ยวกับประเภทของฟอลต์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำว่า อาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นสาเหตุแรกที่ทำให้เกิดประเภทของฟอลต์และสัมพันธ์กับฟอลต์ที่ตามมา แหล่งกำเนิดของฟอลต์มอเตอร์อาจเกิดจากภายใน (Internal) และภายนอก (External) ของส่วนประกอบมอเตอร์ และรวมถึงสิ่งแวดล้อม (Environmental) อีกด้วยแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งสาเหตุของฟอลต์ภายในสามารถแบ่งโดยอ้างอิงจากสาเหตุเริ่มต้นได้เป็นทางกลกับทางไฟฟ้า ซึ่งจะหมายถึงตำแหน่งของส่วนประกอบของมอเตอร์นั่นเอง เช่น สเตเตอร์และโรเตอร์ ทั้งนี้ตามปกติแล้วประเภทของฟอลต์อื่นๆ เช่น ฟอลต์ร่องลื่น (Bearing faults) และฟอลต์จากการระบายความร้อน (Cooling faults) ซึ่งจะมีการเชื่อมโยงกับฟอลต์โรเตอร์ด้วย เนื่องจากว่าทั้งร่องลื่นและใบพัดเป็นส่วนหนึ่งของโรเตอร์ รูปที่ 2.4 นำเสนอฟอลต์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยได้พิจารณาตามตำแหน่งที่เกิดขึ้น คือ โรเตอร์และสเตเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในรูปที่ 2.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมประเภทของฟอลต์มอเตอร์เหนี่ยวนำตามแนวคิดของ Dr. B. Mirafzal และคณะ [23]



รูปที่ 2.5 ประเภทของฟอลต์เมื่อพิจารณาตามแนวคิดของ Dr. Mirafzal



รูปที่ 2.6 เปรอ์เซ็นต์ความล้มเหลวของส่วนประกอบต่างๆในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

## 2.2 วิเคราะห์ความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์

การลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์หรือเรียกสั้นๆว่าการลัดรอบ (Short turn) เป็นสาเหตุหนึ่งที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดขึ้นอยู่ในลำดับต้นๆจากสาเหตุสำคัญหลักๆที่ทำให้มอเตอร์เกิดการชำรุดเสียหาย ในรูปที่ 2.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ความล้มเหลวของส่วนประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ [5] จากรูปแสดงให้เห็นว่าตัวนำสเตเตอร์จะเป็นจุดอ่อนอันดับที่ 2 ที่มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 27 รองจากรอสลิน (Bearing) ที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดการชำรุดเสียหายและถึงแม้ว่าความล้มเหลว (Failure) ที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์การค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุมาจากตัวนำหรือแท่งตัวนำโรเตอร์ (Rotor bar) จะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดขึ้นเพียง 8% แต่ก็ถือได้ว่าเป็นความสำคัญอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากเศษของแท่งตัวนำที่แตกหักอาจนำไปสู่การเสียหายของส่วนประกอบอื่นของมอเตอร์ เช่น ฉนวนของตัวนำสเตเตอร์ เป็นต้น รูปที่ 2.7 แสดงรูปจริงของตัวอย่างความล้มเหลวของส่วนประกอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้หรือมีส่วนยิ่งทำให้เกิดการเสื่อมของฉนวนตัวนำนั้นก็คือแหล่งจ่ายไฟ โดยเฉพาะในยุคปัจจุบันที่แหล่งจ่ายไฟทำมาจากอุปกรณ์โซลิดสเตต (Solid-state) ที่มีจังหวะการสวิตช์ความถี่สูง ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ แต่จะมีลักษณะของรูปคลื่นแรงดันตามลักษณะของการสวิตช์



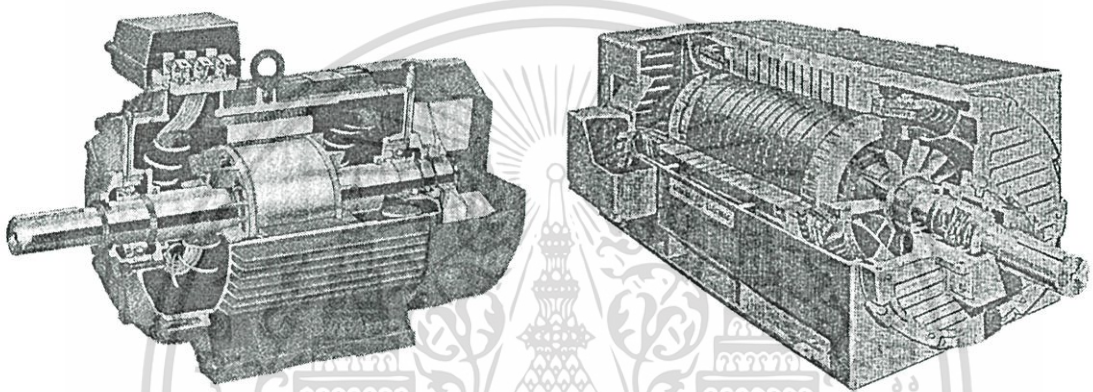
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างความล้มเหลวของส่วนประกอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ [www.easa.com, 6, 24]

### 2.2.1 ลักษณะของตัวนำสเตเตอร์

สเตเตอร์หรือปฐมภูมิ (Primary) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สำคัญจะประกอบไปด้วยโครง (Yoke) และแกนเหล็กโดยจะเป็นที่อยู่ของขดลวดสเตเตอร์มีหน้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน โครงสร้างของแกนเหล็กประกอบมาจากแผ่นเหล็กลามิเนต ซ้อนอัดกันเป็นลักษณะทรงกระบอก ผิวในเซาะร่องสำหรับใส่ขดลวดซึ่งเรียกเป็นขดสเตเตอร์ (Stator winding) ตรงกลางเป็นวงกลมสำหรับเป็นที่อยู่ของโรเตอร์ ประเภทและโครงทางกายภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้จะมีวิธีการพันขดลวดสเตเตอร์อยู่ด้วยกัน 2 แบบคือแบบพันสุ่ม (Random-winding) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

wound) สำหรับใช้ในมอเตอร์ขนาดเล็กและการพันแบบมีรูปแบบ (Form-wound) สำหรับใช้ในมอเตอร์ขนาดใหญ่แสดงในรูปที่ 2.8

ชุดขดลวดสเตเตอร์หรือตัวนำสเตเตอร์ที่มีการพันแบบสุ่ม จะเป็นชุดขดลวดที่พันขึ้นโดยในชุดก่อนๆ การพันอาจจะพันด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติซึ่งไม่มีการเรียงเส้นลวดหรือตำแหน่งที่แน่นอน ซึ่งจะต่างจากขดลวดสำหรับพันแบบมีรูปแบบที่สร้างขึ้นโดยมีลักษณะของหน้าตัดตัวนำส่วนใหญ่เป็นรูปสี่เหลี่ยม และมีลักษณะของการจัดวางลงในสลอตอย่างเป็นระเบียบแสดงในรูปที่ 2.9 ในขณะที่ชุดขดลวดแบบพันสุ่มจะมีความเหมาะสมสำหรับใช้กับสลอตที่มีลักษณะแบบกึ่งปิด (Semi-closed slots)



รูปที่ 2.8 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีโรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก (ซ้าย) ขดลวดสเตเตอร์พันแบบสุ่ม และ (ขวา) ขดลวดสเตเตอร์พันมีรูปแบบ

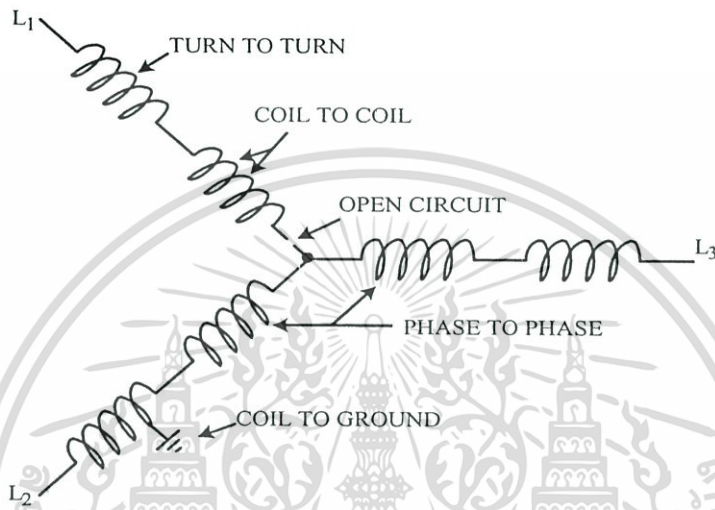


รูปที่ 2.9 ขดลวดสเตเตอร์ (ซ้าย) พันมีรูปแบบ และ (ขวา) พันแบบสุ่ม

### 2.2.2 โหมดความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์

โหมดความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์จะแบ่งออกตามชนิดของการนำไปสู่การลัดวงจร โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทแสดงในรูปที่ 2.10 ได้แก่

- ก. การลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ (Turn to turn)
- ข. การลัดวงจรระหว่างขดลวดถึงขดลวด (Coil to coil)
- ค. การลัดวงจรระหว่างเฟสถึงเฟส (Phase to phase)
- ง. การลัดวงจรระหว่างขดลวดถึงกราวด์ (Coil to ground)
- จ. และกรณีวงจรเปิด (Open circuit)



รูปที่ 2.10 โหมดความล้มเหลวของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์ที่มีการพันเป็นแบบสุ่มมักจะถูกนำมาใช้กับงานที่มีการเริ่มเดินบ่อยครั้ง ลวดตัวนำในแต่ละขดขดลวดที่มีอยู่อย่างมากมาย จะเป็นสาเหตุทำให้มีบางส่วนเกิดการเคลื่อนไหวในขณะที่มอเตอร์ทำงาน (มีการสั่น) ซึ่งสาเหตุนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบรอบถึงรอบภายใน 1 ขดขดลวด การลัดวงจรดังกล่าวจะนำไปสู่ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในขดของขดลวดที่ลัดวงจรนั้น ผลที่ตามมาคือจะทำให้ฉนวนของลวดตัวนำดังกล่าวเสื่อมสภาพลง และสุดท้ายจะทำให้เกิดสภาวะลัดวงจรโดยรวมไปถึงการลัดวงจรลงกราวด์โดยผ่านสลอตสเตเตอร์ เมื่อสภาวะดังกล่าวนี้เกิดขึ้นแล้วมอเตอร์อาจจะทำงานต่อ หรือหยุดทำงานก็จะขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ แต่ส่วนใหญ่แล้วสาเหตุของการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบจะอยู่เหนือความสามารถของเครื่องป้องกันมอเตอร์ทำให้ไม่สามารถตรวจพบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากเป็นความล้มเหลวที่มีผลน้อยมาก ความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะค่อยๆ มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น รวมถึงจะมีการขยายพื้นที่ออกไปด้วย จนกระทั่งเกิดความเสียหายที่ตามมาคือฉนวนเฟสหรือกราวด์ถูกทำลาย และจุดนี้จะเป็นสาเหตุโดยตรงที่ทำให้เกิดฟอลต์เนื่องจากเฟสถึงเฟสหรือกราวด์ฟอลต์ (Ground fault) ตามมา [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าปัญหาเริ่มแรกมาจากการลัดวงจรเพียงจุดเล็กน้อยเท่านั้นคือ รอบถึงรอบ แล้วรุกรามทำให้เกิดอีก 4 สภาวะตามมา ดังนั้นถ้าสามารถตรวจจับการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบกรณีรอบถึงรอบได้ก็จะสามารถแก้ไข ปรับปรุงหรือวางแผนการซ่อมบำรุงได้ล่วงหน้า ทำให้สามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายให้น้อยลงได้อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากอีก 4 สภาวะที่มีอันตรายสูงกว่ามีอัตราเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นลดลงไปด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้แล้วความล้มเหลวของแท่งตัวนำโรเตอร์รวมถึงวงแหวนลัดวงจร (End ring) ที่มีการแตกร้าอาจจะสร้างปัญหาให้ตัวนำสเตเตอร์ได้ ซึ่งปัญหาของโรเตอร์มีสาเหตุหลักมาจากความเค้น (Stress) ที่ไปกระทำกับโรเตอร์สาเหตุที่สำคัญได้แก่

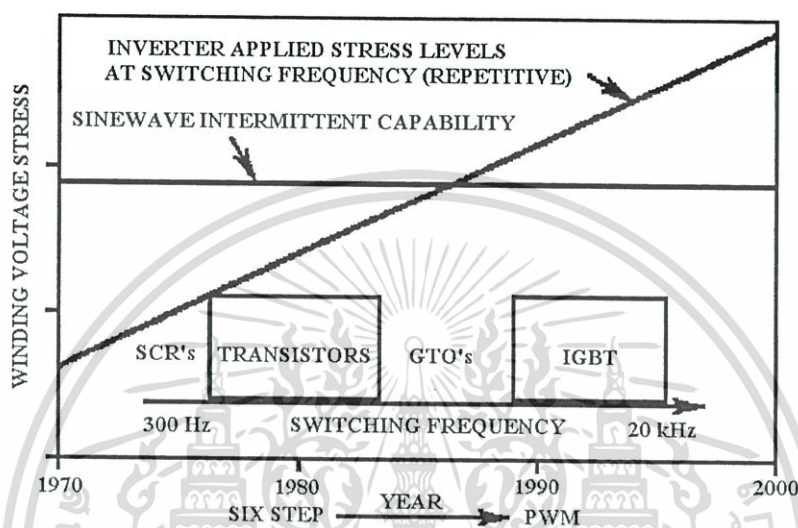
- ก. การเริ่มเดินแบบต่อกับแหล่งจ่ายไฟโดยตรง (Direct-on-line starting) ทั้งนี้ตัวนำของโรเตอร์แบบกรงไม้ได้ถูกออกแบบมาให้ทนต่อความร้อนและความเค้นทางกลที่มีค่าสูงในขณะเริ่มเดิน
- ข. โหลดทางกลกระเพื่อม เช่น คอมเพรสเซอร์ที่มีถูกสูบสำหรับชักขึ้นลง หรือเครื่องบดหิน ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้กรงของโรเตอร์มีความเค้นทางกลสูงได้
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของกรงโรเตอร์ในกระบวนการผลิต

### 2.2.3 ผลของแหล่งจ่ายไฟกับตัวนำสเตเตอร์

สาเหตุที่ทำให้ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์เสื่อมมาจากปรากฏการณ์จุดร้อน (Hotspots) ที่มีสาเหตุมาจากความผิดปกติของอุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม รวมทั้งการเปราะเปื้อนของฉนวน ตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น นอกจากนี้แล้วปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมของฉนวนซึ่งเป็นสาเหตุของการลัดรอบนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วก็ยังมีอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลคือ รูปคลื่นของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งพบว่าการใช้แหล่งจ่ายที่เป็น PWM อินเวอร์เตอร์จ่ายให้กับมอเตอร์นั้น แรงดัน PWM นี้จะทำให้เกิดแรงดันชั่วครู่ (Transient) โดยจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเค้นที่ขั้วของมอเตอร์หรือที่ขดลวดสเตเตอร์นั่นเอง

อินเวอร์เตอร์แบบ PWM เป็นเทคโนโลยีล่าสุดที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดในการนำมาควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะทำให้สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเทียบได้กับการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าดีซี (DC Drives) การสวิตช์ที่เกิดขึ้นของแรงดันแบบ PWM จะทำให้เกิดความเค้นที่ต่างไปจากแรงดันที่เป็นคลื่นไซน์ รูปที่ 2.11 แสดงถึงความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันที่ไปกระทำต่อขดลวดสเตเตอร์เมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายที่เป็นคลื่นไซน์ที่มีค่าคงที่ต่างกับแหล่งจ่ายที่ใช้อุปกรณ์โซลิดสเตตเป็นอุปกรณ์การสวิตช์ [25, 26] ทั้งนี้การพัฒนาของสารกึ่งตัวนำในระยะเวลากว่า 20 ปีที่ผ่านมา โดยเริ่มจาก SCR (Silicon controlled rectifiers) ที่มีความถี่สำหรับการสวิตช์ประมาณ 300 Hz ตามมาด้วย GTO (Gate turn-off thyristors) และล่าสุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สามารถทำให้มีความถี่ในการสวิตช์ได้ถึง 20 kHz หรือมากกว่าได้แก่ IGBT (Insulated gate bipolar transistors) จากที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าการพัฒนาของสารกึ่งตัวนำดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เพิ่มขึ้นของความเค้นที่กระทำต่อขดลวด ทั้งนี้ความเค้นจะเป็นฟังก์ชันของค่าแรงดันสูงสุด ( $V_m$ ) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลา ( $dV/dt$ ) และความถี่ของการสวิตช์ (Switching frequency)



รูปที่ 2.11 ความเค้นที่กระทำต่อขดลวดตัวนำสเตเตอร์เมื่อแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์และแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่มีอัตราการสวิตช์ที่สูงขึ้น

นอกจากนี้แล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีพิกัดระหว่าง 1 แรงม้าจนถึงที่พิกัด 500 แรงม้า นั้นมักจะนิยมใช้อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ในการควบคุม และ PWM อินเวอร์เตอร์ดังกล่าวก็จะนิยมใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์การสวิตช์ ทั้งนี้เทคโนโลยีของ IGBT สามารถทนต่อแรงดันเลิร์จ (Surges) ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยเวลาที่สั้นเพียง 20-100 nS แรงดันหน้าคลื่น (Fast front) เคลื่อนที่ไปตลอดสายเคเบิลจากอินเวอร์เตอร์ไปที่ขั้วของมอเตอร์ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดคลื่นสะท้อน (Reflection) ที่มีสาเหตุมาจากการเข้าคู่ผิด (Mismatch) ของอิมพีแดนซ์ระหว่างสายเคเบิลและมอเตอร์ คลื่นสะท้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเพิ่มสูงขึ้นจากสถานะแรงดันปกติ ซึ่งนั่นก็คือการทำให้เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) หรือสไปก์ (Spike) ที่หน้าคลื่นแรงดันนั่นเอง

พฤติกรรมของแรงดันที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ ทำให้เกิดความเสียหายของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ โดยพบว่าจากการสุ่มตรวจขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะเกิดการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ขึ้นในช่องว่างอากาศระหว่างรอบของขดลวดที่ติดกันในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเบรกดาวน์ (Breakdown) ขึ้นในขดลวด แรงดันเกินชั่วคราว

(Transient) จะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเบรกควาน์ในช่องอากาศ การดิซซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเลื่อมของฉนวนและทำให้เกิดการลัดรอบในขดลวดสเตเตอร์ตามมา

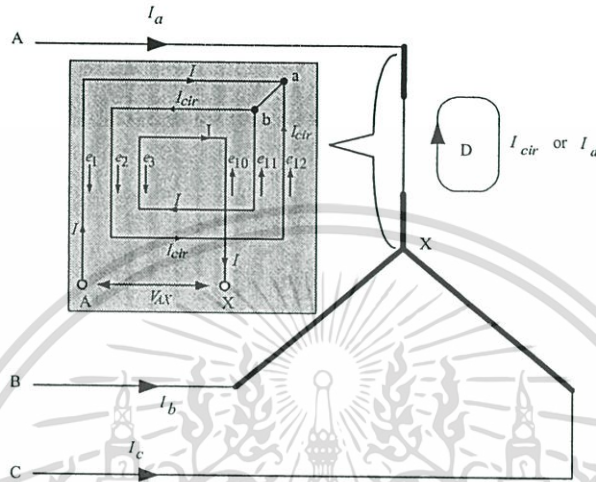
ระบบฉนวนขดลวดของมอเตอร์ปกติแล้วจะพิจารณาจากความสามารถในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับความร้อน การปฏิบัติสำหรับการทดสอบเพื่อใช้คำนวณผลของอุณหภูมิที่มีต่อระบบฉนวนของขดลวดจะสามารถทำได้ตามมาตรฐานของ AIEE 510 และ IEEE 275 ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ได้พิจารณาถึงสภาพของฉนวนที่ยังคงสภาพอยู่ได้ของการทดสอบที่ 20,000 ชั่วโมง ซึ่งถ้ามอเตอร์ทำงานที่อุณหภูมิมีค่าสูงกว่าที่กำหนดจะทำให้ฉนวนของลวดตัวนำมีอายุการทำงานที่สั้นลง เช่น ฉนวน class B จะสามารถทนอุณหภูมิได้  $130^{\circ}\text{C}$  ถ้าทำงานภายใต้อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  จะทำให้มีอายุการใช้งานสั้นลงประมาณ 90% [6]

### 2.3 การวิเคราะห์ขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบ

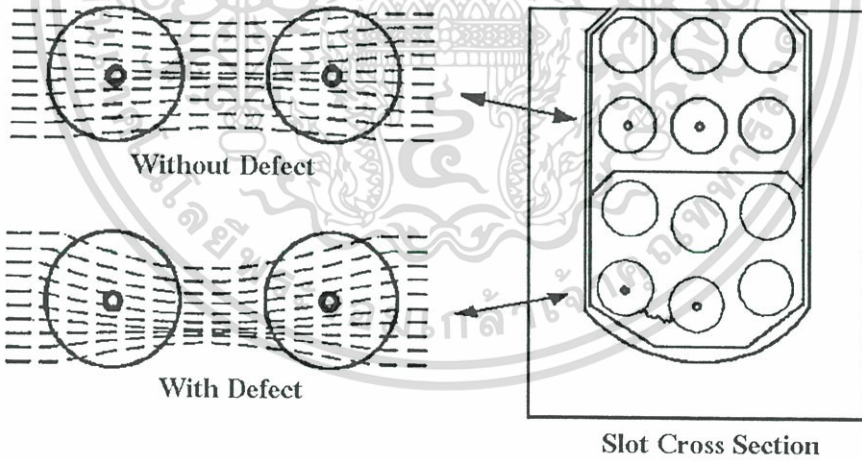
การเกิดสถานะลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบของชุดขดลวดแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงการลัดวงจรระหว่างจุด a กับ b ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Circulate current,  $I_{cir}$ ) ถ้าพิจารณาที่จุด A และ X สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 วงจรที่อิสระต่อกันนั่นคือวงจรที่เกิดจากกระแส  $I$  และวงจรที่เกิดจากกระแส  $I_{cir}$  เมื่อกระแส  $I$  คือกระแสเฟสทั้งนี้กระแส  $I_{cir}$  จะสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (MMFs) ในทิศทางตรงข้ามกันกับแรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักที่สร้างโดยขดลวดเฟส ส่งผลให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กหลักลดลง สำหรับการลัดวงจรหลายๆ รอบสามารถวิเคราะห์โดยใช้วิธีการเดียวกันนี้ได้ [27]

ผลที่เกิดขึ้นจากการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ จะส่งผลให้ MMFs มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและทำให้ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance) ระหว่างเฟสกับขดลวดสเตเตอร์วงจรอื่นในมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย แสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในและผลของความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างรอบขดลวดซึ่งจะมีค่าที่เท่ากันในแต่ละชุดขดลวดและเป็นสัดส่วนกันในแต่ละชั้นลวดตัวนำ ซึ่งก็จะเป็นผลให้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (Impedance) มีความสมดุลกัน แต่ถ้าเกิดสถานะรอบขดลวดลัดวงจรเกิดขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำร่วมและของมันเองมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างเฟสที่ไม่สมดุล และด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กที่ตำแหน่งของการลัดรอบ [28] นอกจากนี้แล้วสัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นจะมีเฟสใหม่โดยในที่นี้จะเรียกเป็นเฟส  $f_{st}$  และเมื่อขดลวดสเตเตอร์ต่อเป็นแบบวาย (Star) และไม่ได้ต่อสายนิวตรอลระหว่างแหล่งจ่ายกับจุดนิวตรอลของเครื่องจักรกลไฟฟ้า สมการแรงดันสำหรับขดลวดสเตเตอร์ใน 1 เฟสแสดงในสมการที่ (2.5)-(2.6) ทั้งนี้หากเครื่องจักรกลไฟฟ้าไม่สมมาตร (Asymmetric) เมตริกอินดักแตนซ์ (Inductance) ซึ่งแสดงในสมการที่ (2.7) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 องค์ประกอบ [12,17] เทอมแรกแสดงในสมการที่ (2.8) คือส่วนสมมูลของเมตริกอินดักแตนซ์สเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่พิจารณาจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความสมมูลและในเทอมที่ 2 แสดงในสมการที่ (2.9) ซึ่งเป็นส่วนความไม่สมมาตรของเมตริกอินดักแตนซ์สเตเตอร์ที่มีสาเหตุมาจากการลัดวงจรของขลวดสเตเตอร์



รูปที่ 2.12 การลัดวงจรในขลวดสเตเตอร์ระหว่างรอบถึงรอบที่จุด a กับ b



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์กรณีเกิดการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ

$$|v_{xx}| = |R_x| |I_x| + \frac{d|\Psi_x|}{dt} + v_{on} \tag{2.5}$$

$$|\Psi_x| = |L_{ABC}| |I_x| \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{ABC} = L_{constant} + L_{varying} \quad (2.7)$$

$$L_{constant} = \begin{vmatrix} L_{ls} + L_{ms} & M & M \\ M & L_{ls} + L_{ms} & M \\ M & M & L_{ls} + L_{ms} \end{vmatrix} \quad (2.8)$$

$$L_{varying} = \begin{vmatrix} \Delta L_1 \cos(\varphi_0) & M & M \\ M & L_{\sigma s} + L_{ms} & M \\ M & M & L_{\sigma s} + L_{ms} \end{vmatrix} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $x$  คือเฟส  $a, b$  และ  $c$ ,  $X$  คือที่จุดต่อสายของมอเตอร์,  $L_{ls}$  คืออินดักแตนซ์รั่วไหล,  $L_{ms}$  คืออินดักแตนซ์เหนี่ยวนำ, และ  $M$  คือ  $L_{ms}/2$  ทั้งนี้ฟลักซ์สืบเนื่อง  $\Psi_x$  ใน (2.6) จะสัมพันธ์กับกระแสในแต่ละเฟสรวมถึงเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นด้วย สมการแรงดันเหนี่ยวนำสเตเตอร์ลัดรอบ ( $e_{st}$ ) ที่เกิดขึ้นในขดลวดสเตเตอร์สามารถหาได้จาก

$$e_{st} = -\frac{d\Psi_{st}}{dt} \quad (2.10)$$

จาก (2.10) เป็นสมการแรงดันของฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งถ้านำมาหารด้วย  $R_{st}$  จะได้เป็น  $I_{st}$  หรือ  $I_{cir}$  และถ้าจำนวนของการลัดรอบมากขึ้นจะทำให้  $e_{st}$  มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย ทางด้านพฤติกรรมขององค์ประกอบความถี่ในรูปคลื่นฟลักซ์ช่องอากาศในฟังก์ชันของการลัดรอบจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่มูลฐาน ( $f_1$ ) จำนวนขั้วแม่เหล็ก ( $p$ ) และสลิป ( $s$ ) ดังสมการ

$$f_{st} = f_1 \left\{ \frac{m}{p}(1-s) \pm k \right\} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $f_{st}$  คือความถี่ของฟอลต์สเตเตอร์,  $m$  คือ 1, 2, 3, ... และ  $k$  คือ 1, 3, 5, ... [5] สเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์นี้จะเกิดขึ้นรวมอยู่ในหลายสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์ แต่อาจจะมีขนาดที่แตกต่างกันได้ตามพารามิเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงการรวมอยู่ในสัญญาณกระแสและแรงดันด้วย [29]

## 2.4 ระบบการวินิจฉัยฟอลต์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยหลักๆ แล้วจะมีรูปแบบในรูปที่ 2.14 ซึ่งประกอบไปด้วยการได้มาของข้อมูล (Data acquisition) กระบวนการเริ่มต้น (Pre-processing) อัลกอริทึมการตรวจจับ (Detection algorithm) และกระบวนการสุดท้าย (Post-processing) หรือกระบวนการตัดสินใจสำหรับระบุความเสียหาย [30]



รูปที่ 2.14 ไตอะแกรมแผนผังระบบการวินิจฉัยฟอลต์

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบเทคโนโลยีการตรวจจับ

วิธีการตรวจจับ	ความสามารถในการตรวจจับ				
	ฉนวน	ตัวนำ สเตเตอร์	ตัวนำ โรเตอร์	การเอียง ศูนย์กลาง	ร่องลื่น เสียหาย
การสั่น	x	x	✓	✓	✓
MCSA	x	✓	✓	✓	✓
ฟลักซ์	x	✓	✓	✓	x
การหล่อลื่น	x	x	x	x	✓
แก๊สความเย็น	✓	✓	✓	x	x
การคายประจุ บางส่วน	✓	x	x	x	x

ที่ผ่านมา นักวิจัยได้ใช้เทคนิคต่างๆ สำหรับการเฝ้าตรวจมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีฟอลต์ สเตเตอร์ จากงานวิจัยของ Dr. A. Siddique [2] ที่ได้รวบรวมไว้สามารถแบ่งออกตามความแตกต่างของพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ได้แก่ เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) การสั่นสะเทือน (Vibration) สัญญาณรบกวน (Noise/Acoustic noise) ความเร็วมุมชั่วขณะ (Instantaneous angular speed) อุณหภูมิ (Temperature) แรงบิดช่องอากาศ (Air-gap torque) กระแส (Current หรือ MCSA) แรงดันเหนี่ยวนำ (Induced voltage) กำลัง (Power) การคายประจุบางส่วน (Partial เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

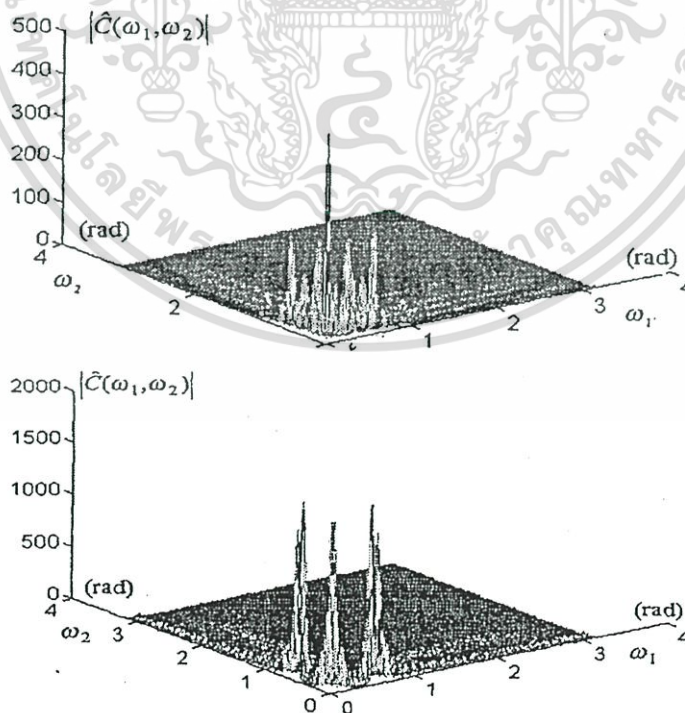
discharge) การวิเคราะห์แก๊ส (Gas analysis) การทดสอบเซอร์จ (Surge testing) การวิเคราะห์หัวจรมอเตอร์ (Motor circuit analysis) ทั้งนี้ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถของการตรวจจับพอลต์ของแต่ละเทคนิคเท่าที่ได้มีการวิจัยไว้

#### 2.4.1 กระบวนการขั้นต้น

เทคนิคการวัดสมัยใหม่จะเป็นการนำมารวมกันของการประมวลผลข้อมูลขั้นสูง และรวมถึงแนวทางใหม่ต่างๆสำหรับประยุกต์ใช้กับงานเฝ้าตรวจเครื่องจักรกลไฟฟ้า ทั้งนี้แนวทางการวิเคราะห์สามารถกระทำได้ในโดเมนเวลา โดยใช้ค่าคุณลักษณะเฉพาะในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงและในโดเมนความถี่โดยการตรวจสอบขนาดและเฟสของสเปกตรัมพอลต์ ทั้งนี้อัลกอริทึมการตรวจจับเท่าที่ได้มีการรวบรวมไว้ในงานวิจัยของ Dr. M.E.M. Benbouzid [1] โดยได้แบ่งออกเป็นดังต่อไปนี้

##### 2.4.1.1 การแปลงฟูเรียร์เร็ว (Fast fourier transform, FFT)

เทคนิค FFT ได้รับความนิยมสำหรับใช้ในการแปลงไปยังโดเมนความถี่จากนักวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากสามารถทำการแปลงไปยังโดเมนความถี่ได้อย่างรวดเร็ว และมีความถูกต้องสูงภายใต้การพัฒนาปัญหาการรบกวนของสเปกตรัมที่ได้รับการปรับปรุง

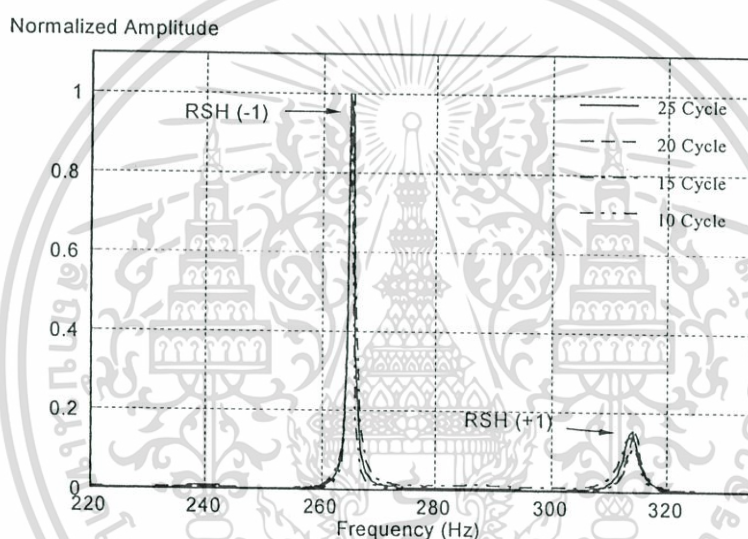


รูปที่ 2.15 การประยุกต์ใช้ไบสเปกตรัมวินิจัย (ซ้าย) สภาวะปกติและ

(ขวา) มีพอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ [30] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1.2 ไบสเปกตรัม (Bispectrum)

ไบสเปกตรัมหรือเรียกว่าสเปกตรัมอันดับสามที่พิสูจน์มาจากสถิติอันดับสูง โดยการหาในเทอมของการแปลงฟูเรียร์ 2 มิติของกระบวนการลำดับ 3 ซึ่งรายคาบของสัญญาณก็มีค่าเท่ากับ  $2\pi$  และสามารถคำนวณหาได้ทั้งขนาดและเฟสของสัญญาณได้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้จากงานวิจัย [31] การนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจจับพอลต์และการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้ผลเป็นที่น่าพอใจแสดงในรูปที่ 2.15 อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้จะมีความเหมาะสมสำหรับการตรวจจับพอลต์ทางไฟฟ้า เช่นความไม่สมดุลของแรงดันสเตเตอร์เพราะว่าพอลต์เหล่านี้ไม่จำเป็นต้องแยกแยะองค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิกที่ต้องการความละเอียดของความถี่สูง



รูปที่ 2.16 การแปลงด้วย MEM เพื่อตรวจจับสเปกตรัมพอลต์ที่เกิดจากความเป็นสล็อต

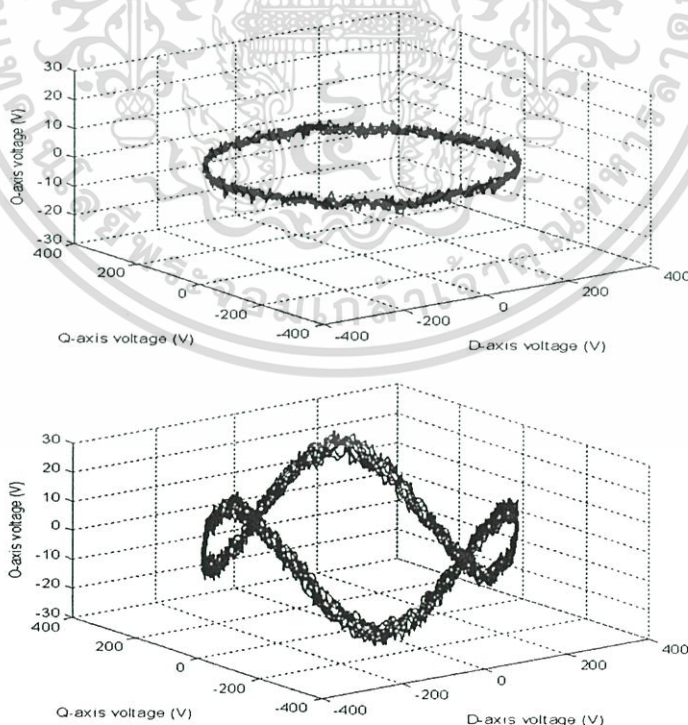
### 2.4.1.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมความละเอียดสูง (High resolution spectra analysis)

ปัญหาสำคัญของการประมาณค่าสเปกตรัม คือผลกระทบของการรั่วไหลของโพลข้างตามที่ได้อธิบายมาแล้ว ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้เทคนิคการประมาณค่าสเปกตรัมบนพื้นฐานของการวิเคราะห์เชิงเมตริกที่มีความสัมพันธ์กัน และการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ตัวอย่างการประมาณค่าสเปกตรัมที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจจับความไม่สมดุลของแรงดันสเตเตอร์ เช่น MUSIC (Multiple signal classification) ROOT-MUSIC และ MEM (Maximum entropy method) ประโยชน์หลักของ MEM จะเกี่ยวข้องกับวิธีการทำต่อข้อมูลที่ไมทราบค่า (Unknown data) ซึ่งอยู่นอกช่วงของการสุ่มทำให้ MEM สามารถทำนายข้อมูลได้ไม่เหมือนกับ FFT ซึ่งจำกัดข้อมูลให้อยู่ในช่วงของการทำนายรายคาบ (Periodic) นอกจากนี้ MEM ยังสามารถกำจัดปัญหาเรื่องการรั่วไหลของสเปกตรัมได้อีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโมเดลของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MEM จะขึ้นอยู่กับ โมเดลพารามิเตอร์ (Model parameters) รูปที่ 2.16 เป็นการทดลองการแปลงไปยังโดเมนความถี่โดยใช้ MEM สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกที่เกิดจากความเป็นสล็อต สำหรับประยุกต์ใช้คำนวณความเร็วของมอเตอร์ [32] จากรูปการทดลองจะพบว่าเมื่อจำนวนของข้อมูลลดลง MEM ก็ยังสามารถตรวจจับฮาร์มอนิกสล็อตได้อย่างแม่นยำ

#### 2.4.1.4 การวิเคราะห์เวฟเลต (Wavelet analysis)

การวิเคราะห์เวฟเลต ถูกนำเข้ามาใช้ตรวจจับสัญญาณฟอลต์ กรณีเมื่อนำมาวิเคราะห์สัญญาณฟอลต์ที่เกิดขึ้นเพียงชั่วคราว เช่น สัญญาณเลื่อนลอย (Drifts) สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ ปัญหาดังกล่าวนี้ถูกนำมาแก้ไขโดยการวิเคราะห์จากช่วงเวลาสั้นๆ ของสัญญาณ เฉพาะส่วนของเวลาที่ต้องการ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อของการแปลงฟูเรียร์เวลาสั้น (Short-time fourier transform, STFT) หรือเทคนิคหน้าต่าง (Windowing technique) แต่ข้อเสียของวิธีดังกล่าวคือค่าความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับขนาดของหน้าต่าง หรือก็คือค่าความแม่นยำจะถูกจำกัดไว้ที่ค่าๆ หนึ่งนั่นเอง ปัญหาใหม่ที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้การแปลงเวฟเลต ซึ่งจะมีความเหมาะสมอย่างมากกับสัญญาณชั่วขณะ เช่นการประยุกต์ใช้เทคนิคเวฟเลต สำหรับการเฝ้าตรวจฟอลต์และวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้สัญญาณกระแสเตเตอร์ในขณะที่เริ่มเดินมอเตอร์ (Start) [33]



รูปที่ 2.17 ผลการทดลองในแกน  $dq0$  สำหรับตรวจจับสถานะ (บน) ปกติ

(ล่าง) แรงดันไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1.5 เวกเตอร์ปาร์ค (Park's vector)

ทิมงานวิจัยของ Dr. A.J.M. Cardoso [9] ได้นำเสนอการแสดงผลแบบ 2 มิติ สำหรับแสดงพฤติกรรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส บนพื้นฐานขององค์ประกอบเวกเตอร์ปาร์ค กระแสสเตเตอร์บนแกน  $d (i_d)$  และแกน  $q (i_q)$  โดยการคำนวณจากฟังก์ชันของกระแสเฟสได้แก่  $i_a$ ,  $i_b$  และ  $i_c$  ดังสมการที่ (2.12)–(2.13) ซึ่งในเวลาต่อมาได้มีนักวิจัยเป็นจำนวนมากได้นำวิธีเวกเตอร์ของปาร์ค มาตรวจจับความผิดปกติของโครงโรเตอร์ แท่งตัวนำโรเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้แล้วในงานวิจัย [11] ได้เพิ่มอีก 1 มิติในแกนศูนย์ (0)  $i_0$  ดังสมการที่ (2.14) สำหรับประยุกต์ใช้ในงานวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า รูปที่ 2.17 แสดงผลการทดลองพล็อตใน 3 มิติสำหรับดูการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน  $dq0$  ของฟลัดต์เนื่องจากแรงดันไม่สมดุล ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของฟลัดต์ได้เป็นอย่างดี

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c \quad (2.12)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c \quad (2.13)$$

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \quad (2.14)$$

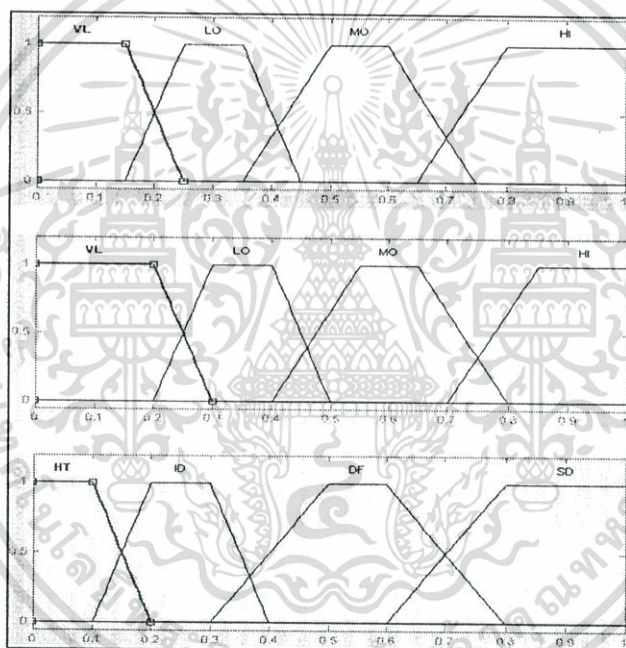
### 2.4.2 กระบวนการสุดท้าย

กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจหาข้อสรุป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ต่างๆ ทั้งนี้เทคนิคซึ่งเป็นที่ได้รับความสนใจได้แก่ ฟัซซี่ลอจิก และโครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น ทั้งนี้เทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนก็กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบันเช่นกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ยังได้นำเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนมาประยุกต์ใช้สำหรับการวินิจฉัยฟลัดต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์นี้ก่อนการประยุกต์ใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ก็ได้ประสบความสำเร็จการวินิจฉัยฟลัดต์สเตเตอร์โดยใช้เทคนิคฟัซซี่ลอจิกด้วยเช่นกัน โดยมีวิธีการดังนี้

ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ [34] ทั้งนี้การนำมาประยุกต์ใช้วินิจฉัยฟลัดต์สเตเตอร์สำหรับนำไปสู่การทำนายการซ่อมบำรุง ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์จากข้อมูลของสเปกตรัมฟลัดต์ในสัญญาณกระแสสำหรับนำมาเป็นตัวแปรอินพุตให้กับระบบฟัซซี่และสถานะสเตเตอร์ (Stator condition, SC) กำหนดให้เป็นตัวแปรเอาต์พุต โดยที่สถานะสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะ

เป็นการพิจารณาจากค่านอร์มอลไลซ์ (Normalized) ของขนาด (Magnitude) สเปกตรัมฮาร์โมนิกฟอลต์สแตเตอร์ (กำหนดให้สเปกตรัมมูลฐานเป็นค่าฐาน)

ฟังก์ชันสมาชิก จะถูกสร้างโดยพิจารณาจากการวิเคราะห์ชุดข้อมูล ซึ่งค่าขนาดของฟอลต์สแตเตอร์สามารถนำมาจัดเป็นหมวดหมู่โดยใช้ 4 ตัวแปรลิงกวิสติก ได้แก่ น้อยมาก (Very low, VL) น้อย (Low, LO) ปานกลาง (Moderate, MO) และมาก (High, HI) สำหรับตัวแปรลิงกวิสติกเอาต์พุตที่ใช้แปลความหมายของสถานะสแตเตอร์ (Stator condition, SC) ได้แก่ ดี (Healthy, HT) เริ่มเสียหาย (Incipient defect, ID) เสียหาย (Defect, DF) และเสียหายรุนแรง (Severe defect, SD) รูปที่ 2.18 แสดงฟังก์ชันสมาชิกฟัซซี่ในส่วนของอินพุตและส่วนของเอาต์พุตสำหรับแสดงสถานะความรุนแรงของฟอลต์สแตเตอร์ที่ได้ออกแบบขึ้น



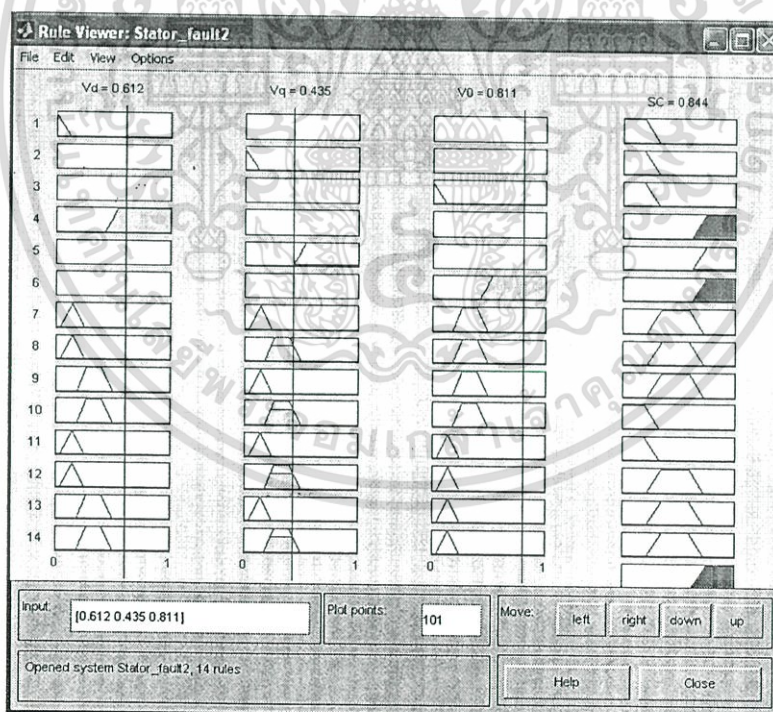
รูปที่ 2.18 (บนและกลาง) ฟังก์ชันสมาชิกฟัซซี่ในส่วนของอินพุตและ (ล่าง) ในส่วนของเอาต์พุตสำหรับแสดงสถานะสแตเตอร์

การออกแบบกฎสำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์นี้ ประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ การสร้างกฎและการรวมกันของกฎ ซึ่งกฎเหล่านี้จะมีความเหมาะสม โดยจะพิจารณาจากการครอบคลุมทั้งหมดของกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความสมบูรณ์และมีความผิดปกติ ซึ่งจากการศึกษานี้จำนวนกฎที่มีความเหมาะสมด้วยกัน 7 กฎแสดงในตารางที่ 2.2 สำหรับขั้นตอนสุดท้ายคือ การแปลงตัวแปรฟัซซี่เอาต์พุตให้เป็นค่าจริงโดยใช้วิธีหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ ซึ่งเป็นการประมาณค่าของตัวแปรเอาต์พุตของกฎทุกข้อที่มีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่าศูนย์ รูปที่ 2.19 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แสดงตัวอย่างไดอะแกรมอินเฟอเรนซ์ฟัซซี่ กรณีทำการวินิจฉัยที่ความเสียหายรุนแรงของ ฟอลต์สแตเตอร์กรณีลัดรอบ 4%

ตารางที่ 2.2 กฎฟัซซี่ที่ใช้สำหรับการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า

If input_1 is	If input_2 is	Then SC is
VL	VL	HT
LO	VL	ID
LO	LO	ID
MO	LO	DF
MO	HI	DF
HI	MO	SD
HI	HI	SD



รูปที่ 2.19 ไดอะแกรมอินเฟอเรนซ์ฟัซซี่กรณีทำการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความเสียหายรุนแรง (ขดลวดสแตเตอร์ลัดวงจร 4%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 องค์ประกอบแรงดัน $dq0$ ที่นำเสนอสำหรับการตรวจจับฟอลต์สแตเตอร์

หลักการของการตรวจจับฟอลต์สแตเตอร์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้อยู่บนพื้นฐานของความไม่สมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟส [8] ซึ่งผลที่ตามมาคือการเกิดขึ้นของสัญญาณฮาร์มอนิกทั้งในสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแส โดยที่ระดับความรุนแรงจะขึ้นอยู่กับจำนวนของรอบขดลวด สเตเตอร์ที่ลัดวงจร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  สำหรับการตรวจจับฟอลต์สแตเตอร์ องค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่นำเสนอนี้จะได้มาจากแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากับจุดต่ออวาย ( $x$ ) ของมอเตอร์ ( $v_{ax}, v_{bx}, v_{cx}$ ) ต่อมาจึงได้ใช้การแปลงเวกเตอร์ปาร์ก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีสำหรับนำมาวิเคราะห์เครื่องจักรกลไฟฟ้า ทั้งนี้หลังจากผ่านตัวแปลงเวกเตอร์ปาร์กแล้วได้สัญญาณชุดใหม่เป็น ( $v_d, v_q, v_0$ ) [14] ทั้งนี้การแปลงเวกเตอร์ปาร์กสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้ [17]

$$\begin{bmatrix} v_d(n) \\ v_q(n) \\ v_0(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ax}(n) \\ v_{bx}(n) \\ v_{cx}(n) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$  และ  $N$  คือจำนวนของข้อมูลทั้งหมด

ในเอกสารอ้างอิง [11] ได้ทำการวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์โดยใช้เวกเตอร์ปาร์กกระแสบนพื้นฐานคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์นั้นเป็นการรวมกันของสัญญาณมูลฐาน สัญญาณฟอลต์สแตเตอร์ และรวมถึงสัญญาณฟอลต์อื่นๆอีกด้วย ข้อปัญหาดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในงานวิจัยนี้กล่าวคือ ได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจจับฟอลต์สแตเตอร์ให้มีความน่าเชื่อถือสำหรับการวินิจฉัย ฟอลต์สแตเตอร์มากยิ่งขึ้น ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขั้นสูงสำหรับการช่วยให้สเปกตรัมฟอลต์มีความโดดเด่นอย่างชัดเจน และลดข้อผิดพลาดของผลการวินิจฉัยด้วยการพิจารณาสเปกตรัมฟอลต์สแตเตอร์เพียงอย่างเดียว โดยการเลือกเฉพาะย่านความถี่ที่มันเกิดขึ้นเท่านั้นมาทำการประมวลผลเรียกชื่อใหม่เป็น ( $v_{a,b,c\_fst}$ ) และหลังจากผ่านการแปลงด้วยเวกเตอร์ปาร์กแล้วได้เป็นองค์ประกอบแรงดัน  $d, q$  และ  $0$  ทั้งนี้ได้มีการแยกพิจารณาเป็นส่วนตัวที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ส่วนแรกสำหรับพิจารณาองค์ประกอบแรงดัน  $d$  และ  $q$  เรียกเป็น ( $v_{d\_fst}$  และ  $v_{q\_fst}$ ) โดยเป็นการพิจารณาเฉพาะช่วงความถี่ของสัญญาณฟอลต์สแตเตอร์เท่านั้น ซึ่งสัมพันธ์กับสมการที่ (2.11) กล่าวคือไม่นำสัญญาณฮาร์มอนิกอื่นที่ไม่ได้เกิดขึ้นจากความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์มาร่วมพิจารณาซึ่งรวมถึงองค์ประกอบมูลฐานด้วย ทำให้สมการ (2.15) ได้ถูกพัฒนาเป็นสมการนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} v_{d\_fst}(n) \\ v_{q\_fst}(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a\_fst}(n) \\ v_{b\_fst}(n) \\ v_{c\_fst}(n) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ส่วนสำคัญที่ 2 คือการคำนวณหาองค์ประกอบแรงดันศูนย์ ( $v_{0\_f1}$ ) จะได้มาจากการคำนวณโดยใช้เฉพาะองค์ประกอบสัญญาณแรงดันมูลฐานเท่านั้น ( $v_{a,b,c\_f1}$ ) ซึ่งไม่รวมฮาร์มอนิกทำให้สมการที่ (2.15) ถูกพัฒนาสำหรับการหาองค์ประกอบแรงดันศูนย์ได้ดังสมการ (2.17)

$$\begin{bmatrix} v_{0\_f1}(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a\_f1}(n) \\ v_{b\_f1}(n) \\ v_{c\_f1}(n) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

สมการที่ (2.17) นี้ ในเอกสารอ้างอิงที่ [8] ได้นำมาใช้สำหรับการตรวจจับพอลต์สเตเตอร์ที่ออกแบบขึ้นด้วยวงจรถอดล็อก ซึ่งผลการทดลองตรวจจับพอลต์สเตเตอร์ที่สภาวะการลัดรอบจำนวนน้อยๆก็ให้ผลการตรวจจับที่มีความถูกต้อง

## 2.6 ความล้มเหลวของมอเตอร์ต่อผลกระทบด้านพลังงาน

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอยู่อย่างมากมาย ได้ใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องจักรเป็นจำนวนมาก จากการสำรวจพบว่าทวีปยุโรปได้มีการใช้พลังงานถึง 70% ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด โดยถูกนำมาใช้กับระบบที่มีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ [3-4] ดังนั้นหากมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะประสิทธิภาพที่ลดลงเล็กน้อย จะนำไปสู่การสูญเสียพลังงานและเพิ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่นหากประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลดลง 3% ของทั้งหมดที่มีใช้งานอยู่ในยุโรปจะทำให้สูญเสียพลังงานคิดเป็นเงินมากกว่า 2 พันล้านดอลลาร์สหรัฐต่อปี และที่สำคัญจะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ถึง 5.5% ของทั้งหมด นอกจากนี้พบว่าทางเลือกมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่เกินไป ก็จะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและไม่เป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมเช่นกัน โดยกล่าวว่ามอเตอร์ขนาด 100 แรงม้า ประสิทธิภาพการทำงานที่โหลดบางส่วนจะน้อยกว่าประสิทธิภาพที่โหลดเต็มพิกัดอยู่ที่ 2% ซึ่งจะทำให้เสียค่าไฟฟ้ามากกว่า 2,600 ดอลลาร์สหรัฐต่อปีเมื่อทำงานทั้งปี และจะเป็นสาเหตุของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 50 ตันต่อปีถ้าใช้งานมอเตอร์อย่างต่อเนื่อง ในยุโรปมีมอเตอร์เป็นล้านตัวที่ทำให้สูญเสียพลังงานเพราะตัวใหญ่เกินไป นอกจากนี้แล้วยังรวมถึงการทำงานภายใต้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้มเหลวที่เครื่องป้องกันไม่สามารถตรวจพบได้ เนื่องจากสัญญาณฟอลต์เหล่านั้นยังมีความรุนแรงต่ำซึ่งอุปกรณ์ป้องกันทั่วไปไม่สามารถตรวจจับได้

### 2.6.1 ความเสียหายต่ออุตสาหกรรม

การทำงานของมอเตอร์ภายใต้สภาวะแวดล้อม (สิ่งแวดล้อม) ที่เลวร้ายก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดผลบางอย่างที่ไปช่วยกระตุ้นความเสียหายให้เกิดขึ้น เช่น สภาวะแวดล้อมที่เต็มไปด้วยฝุ่น สารเคมี อุณหภูมิที่สูง ความชื้น แก๊สพิษ และการสั่นสะเทือน นอกจากนี้แล้วสำหรับกรณีที่แหล่งจ่ายไฟของมอเตอร์เป็นอินเวอร์เตอร์ โดยเฉพาะเทคนิคการปรับความกว้างของพัลส์ (Pulse width modulation, PWM) จะทำให้เกิดความเค้น (Stress) เนื่องจากแรงดันที่มีสาเหตุมาจากการสวิตช์อย่างรวดเร็วได้แก่ในขณะสวิตช์ออน (Switch-on) และสวิตช์ออฟ (Switch-off) ของสารกึ่งตัวนำ สาเหตุตามที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้จะมีผลทำให้เกิดความเสียหายกับมอเตอร์ โดยเรียงลำดับความสำคัญได้แก่ รองลื่น (Bearing) ตัวนำสเตเตอร์ (Stator winding) แท่งตัวนำโรเตอร์ (Rotor bars) เพลา (Shaft) อุปกรณ์ภายนอก (External device) และอื่นๆ ความเสียหายดังกล่าวนี้ เป็นที่แน่ใจได้ว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงานที่ลดลงของมอเตอร์ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการสูญเสียพลังงานที่เพิ่มขึ้นและผลของค่าการสูญเสียอื่นที่เกิดขึ้นตามมา ค่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นนี้ ส่วนใหญ่มาจากการไม่ได้วางแผนเนื่องจากไม่ได้มีการคาดการณ์สำหรับความเสียหายของมอเตอร์ ซึ่งการสำรวจมูลค่าความเสียหายของความแตกต่างในแต่ละอุตสาหกรรม สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มูลค่าความเสียหายในแต่ละอุตสาหกรรมที่เป็นผลมาจากปัญหาของมอเตอร์ [35]

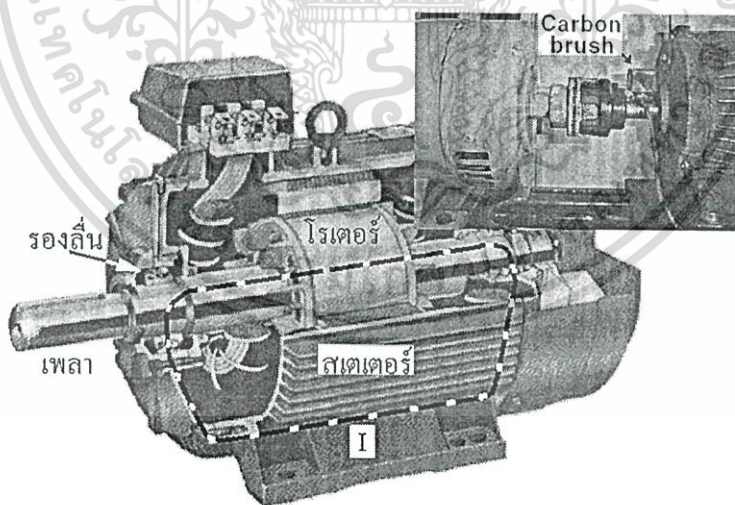
มูลค่าความเสียหายในหน่วย \$	ผลิตภัณฑ์จากไม้	กระบวนการผลิตอาหาร	ปิโตรเลียมและเคมี	โรงงานหล่อเหล็ก	ยานยนต์
	7,000	30,000	87,000	100,000	200,000

ความล้มเหลว (Failure) ที่มีสาเหตุมาจากตัวนำหรือแท่งตัวนำโรเตอร์ (Rotor bar) จะมีเปอร์เซ็นต์การเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ก็ถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างมากทั้งนี้เนื่องจากเศษของแท่งตัวนำที่แตกหักอาจจะนำไปสู่ความเสียหายของส่วนประกอบอื่นอย่างเช่นฉนวนของตัวนำสเตเตอร์ได้ (เหตุการณ์นี้รวมถึงมอเตอร์ที่ซื้อมาใหม่ด้วย) ทั้งนี้ความล้มเหลวของโรเตอร์ในสภาวะเริ่มต้นที่มีการแตกร้าจะไม่ใช่สร้างปัญหาให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่จะส่งผลกระทบต่ออย่างมากในเวลาต่อมา กล่าวคือในช่วงระยะเวลาก่อนส่งผลกระทบของโรเตอร์เอง อาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความล้มเหลวในส่วนประกอบอื่นของมอเตอร์ซึ่งเป็นที่สำคัญมาก เช่นส่วนที่แตกหักของแท่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนี้อาจไปกระทบกับขดลวดของมอเตอร์โดยเฉพาะมอเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟแรงสูงและที่อัตราความเร็วสูง ก็ยังจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อฉนวน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อขดลวดได้ และมีผลทำให้มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง รวมถึงเกิดความสูญเสียต่อกระบวนการผลิตโดยรวม นอกจากนี้แล้วการทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมที่อันตราย เช่น ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ความเสียหายของโรเตอร์ดังกล่าวยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดประกายไฟ (Sparking) ขึ้นมาได้ [6]

ความเสียหายของร่องลื่นซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ที่สูงมาก และโดยทั่วไปแล้วจะเข้าใจได้ว่ามันมีสาเหตุมาจากปัญหาทางกล ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่คณะผู้วิจัยได้ทำการทดลองใน [36] คือกระแสเพลลาที่ไหลครบวงจรโดยผ่านร่องลื่นเป็นเวลานาน ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ร่องลื่นเกิดปัญหาได้เช่นกัน ที่มาของสัญญาณแรงดันและกระแสเพลลาที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำที่สำคัญๆ จะมีสาเหตุมาจาก 3 แหล่งจ่าย ได้แก่ความเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) และความไม่สมมาตรของวงจรแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามแรงดันเพลลาที่เกิดขึ้นนี้จะมีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ความเร็ว ค่าความต้านทานของวงจรแม่เหล็กและขนาดของช่องอากาศเป็นต้น ในระยะหลังมอเตอร์ที่ได้สร้างขึ้นมาใหม่ผู้ผลิตได้มีการติดตั้งฉนวนเข้าไปที่ร่องลื่น เพื่อป้องกันการส่งผ่านของกระแสในเพลลาจากรูปที่ 2.20 แสดงการไหลของกระแสเพลลาในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

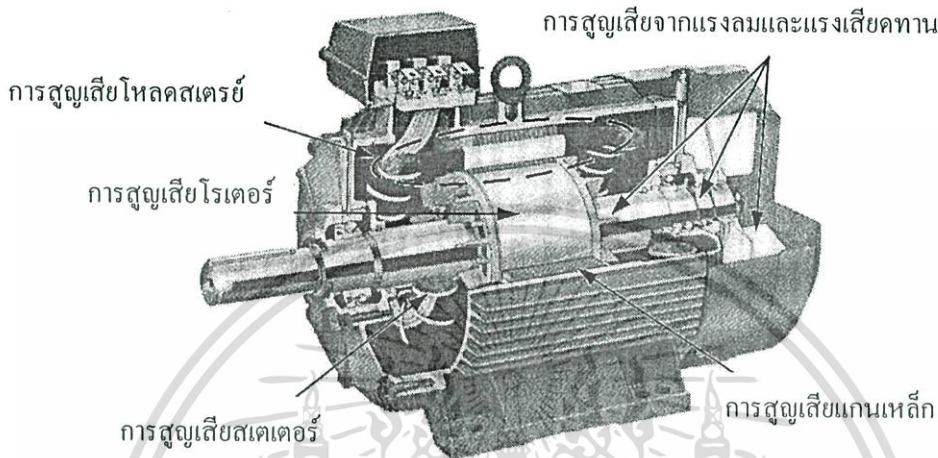


รูปที่ 2.20 ลักษณะการไหลของกระแสเพลลาภายในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

## 2.6.2 ประสิทธิภาพกับการพันขดลวดใหม่

ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้งานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยประมาณ 70% ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหล่านั้นจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยอุปกรณ์โซลิตสเตท ทั้งนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถูกนำมาใช้งานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีทั้งการจัดซื้อใหม่ และการพันขดลวดใหม่ (จัดซื้อมือสอง) นอกจากนี้แล้วมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการใช้งานอยู่หากเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากปัญหาของขดลวดสเตเตอร์ ก็จะถูกนำมาพันใหม่แทนการจัดซื้อมอเตอร์ตัวใหม่ ทั้งนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับการซื้อใหม่



รูปที่ 2.21 ชนิดการสูญเสียที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

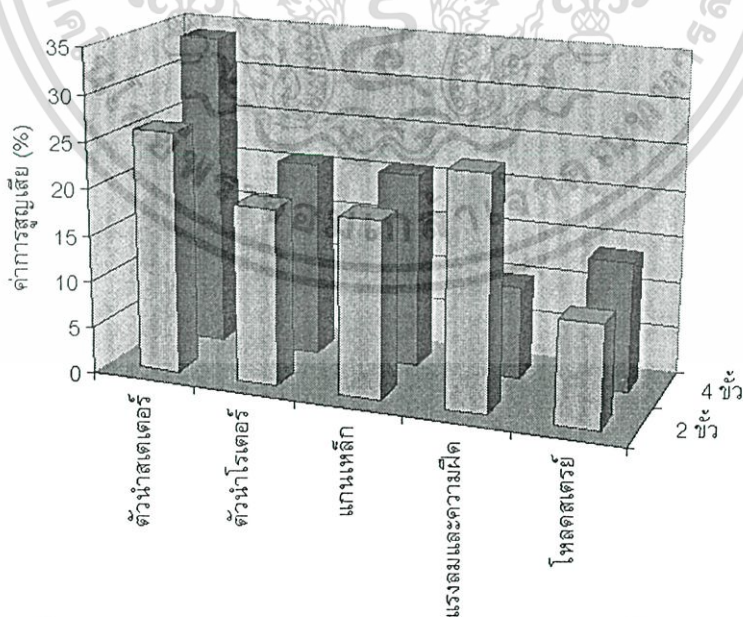
ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของค่าการสูญเสียที่เกิดจากการพันขดลวดใหม่

องค์ประกอบ การสูญเสีย	ผลที่เกิดจากการพันขดลวดใหม่
ตัวนำสเตเตอร์ สาเหตุ จากความต้านทานของ ตัวนำสเตเตอร์	เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ เปลี่ยนความยาวเฉลี่ยต่อรอบ เปลี่ยนจำนวนรอบ และรูปแบบของตัวนำ เปลี่ยนชนิดของซิล
ตัวนำโรเตอร์ สาเหตุ จากความต้านทานของ ตัวนำโรเตอร์	การกลิ้งโรเตอร์และสเตเตอร์ ความเสียหายที่ตัว โรเตอร์ การขัดแท่งตัวนำและวงแหวนลัดวงจรที่ ไม่ดี การติดตั้งแท่งตัวนำที่ไม่เหมาะสม
แกนเหล็ก สาเหตุจาก ฮีสเตอร์รีซิสและกระแส ไหลวน	แกนของสเตเตอร์ร้อนเกินไป แกนเสียหายขณะ ลัดขดลวด การเจียรหรือตะไบร่องสเตเตอร์ การ ขัดหรือถูแกน
แรงต้านของลมและ ความฝืดของรองลื่น	ชนิดและขนาดของใบพัดผิด ชนิดหรือขนาดของ รองลื่นที่ไม่ถูกต้อง การประกอบรองลื่นที่ไม่ดี พอ ใส่จาระบีที่รองลื่นน้อยและมากเกินไป
การสูญเสียโหลดสเตรย์	ฉนวนแท่งตัวนำโรเตอร์และการเรียงการเพิ่มขึ้น ของช่องอากาศ การพันขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ผลที่ตามมาของการพันขดลวดใหม่ ซึ่งรวมถึงการพันใหม่ซ้ำๆ กัน โดยจากรายงานการวิจัยในเรื่องดังกล่าวพบว่ามอเตอร์ที่มีการพันใหม่เมื่อใช้งานไปนานๆ ผลที่ตามมาหลักๆจะมีอยู่ด้วยกัน 2 กรณีได้แก่ การลดลงของประสิทธิภาพ และการเสื่อมลงของสมรรถนะ ซึ่งจากการศึกษาในเรื่องนี้พบว่าการพันขดลวดใหม่จะสามารถทำให้ประสิทธิภาพลดลงได้ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนั้นได้อธิบายในตารางที่ 2.4 และในรูปที่ 2.21 ได้แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งในแต่ละส่วนประกอบของมอเตอร์ที่เกิดค่าการสูญเสียขึ้น [37-38]

โดยปกติแล้วค่าการสูญเสียกำลังทั้งหมดในเครื่องจักรกลไฟฟ้า ได้ถูกแบ่งออกเป็น การสูญเสียตัวนำสเตเตอร์ การสูญเสียตัวนำโรเตอร์ การสูญเสียแกนเหล็ก การสูญเสียจากแรงลมและความฝืด การสูญเสียจากแรงเสียดทาน และการสูญเสียโพลอสเตรย์ ทั้งนี้สัดส่วนของค่าการสูญเสียเหล่านี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามพิกัดและจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ เช่น มอเตอร์ที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กน้อยกว่า จะมีค่าการสูญเสียจากตัวนำสเตเตอร์น้อยกว่ามอเตอร์ที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กมากกว่าแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการแบ่งเปอร์เซ็นต์ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้น ในมอเตอร์ที่มีพิกัดเดียวกัน แต่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กเป็น 2 และ 4 ขั้วแม่เหล็ก ซึ่งสาเหตุที่สำคัญได้แก่ พื้นที่หน้าตัดและความยาวของตัวนำสเตเตอร์ ความร้อน วัสดุและพื้นที่หน้าตัดของตัวนำโรเตอร์ วงแหวนลี้ดวงจร แผ่นเหล็ก ช่องอากาศ การอึดตัว ประสิทธิภาพใบพัด การหล่อลื่น และรองดิน เป็นต้น



รูปที่ 2.22 เปรียบเทียบการสูญเสียของมอเตอร์ 2 และ 4 ขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผลในตารางที่ 2.5 เป็นตัวอย่างของการเปรียบเทียบค่าการสูญเสียในมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวใหม่กับการพันใหม่ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทบทวนมาจากการวิจัยของ W. Cao *et al.* [3] การพันใหม่ที่เกิดขึ้นนี้ได้ถูกควบคุมในแต่ละกระบวนการพันเป็นอย่างดี ทั้งนี้สาเหตุของค่าการสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ดีขึ้น มาจากการควบคุมในหลายส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ โครงสเตเตอร์ การพันขดลวด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของใบพัด เป็นต้น และพบว่า การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพสำหรับการทดลองกับกลุ่มมอเตอร์ที่ไม่ได้มีการควบคุมพบว่าจะมีแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพที่ลดลงเพียงอย่างเดียวโดยค่าต่ำสุดคือ 0.6% และสามารถมีค่าสูงได้ถึง 1% ซึ่งค่าการสูญเสียที่เป็นตัวแปรสำคัญคือการเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียตัวนำสเตเตอร์เป็นสำคัญ

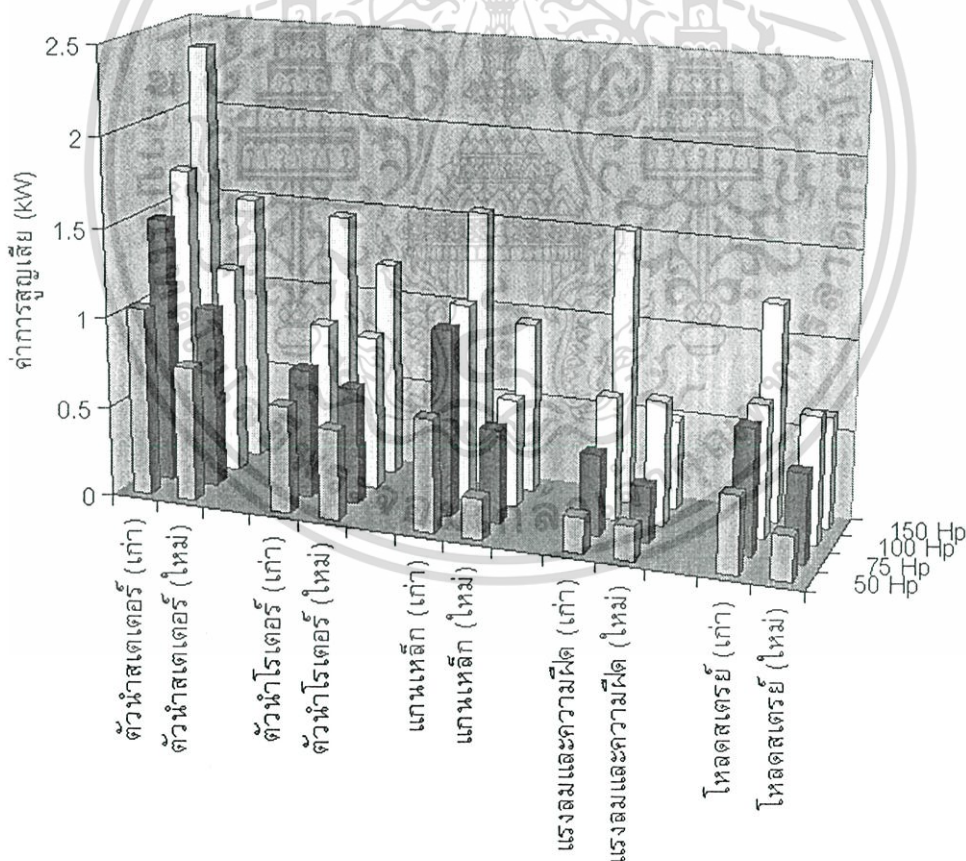
ตารางที่ 2.5 ค่าการสูญเสียในมอเตอร์ตัวใหม่กับการพันใหม่

มอเตอร์ ภายใต้ การทดสอบ	ค่าการสูญเสีย					η
	สเตเตอร์	โรเตอร์	แกน เหล็ก	แรงลม+ ความฝืด	โหลด สตรีย์	
มอเตอร์ A ใหม่ พันใหม่	411.2	212.9	131.5	22.5	72.8	86.7
	365.6	177.9	153.5	69.2	53.7	86.9
มอเตอร์ B ใหม่ พันใหม่	578.1	229.1	196.6	40.6	56.3	83.2
	557.8	194.5	214.0	42.7	40.3	83.4
มอเตอร์ C ใหม่ พันใหม่ครั้งที่ 1 พันใหม่ครั้งที่ 2 พันใหม่ครั้งที่ 3	852	752.4	705.4	1161.4	440.6	95
	930.7	774.7	752.0	1137.4	719.0	94.5
	895.1	745.0	686.2	1159.9	562.2	94.9
	894.9	744.9	693.0	1140.7	596.2	94.8
มอเตอร์ D ใหม่ พันใหม่ครั้งที่ 1 พันใหม่ครั้งที่ 2 พันใหม่ครั้งที่ 3	1805.3	1204.2	1093.7	319.7	1280.7	93
	1546.0	1102.9	1078.3	272.4	1117.3	93.6
	1523.1	1098.0	1078.7	309.3	1138.6	93.6
	1489.3	1059.7	1131.9	297.6	1094.6	93.7

ในงานวิจัยของ E.B. Agamloh *et al.* [39] ได้ทำการวิจัยโดยการทดสอบค่าประสิทธิภาพระหว่างมอเตอร์เก่า (ถูกใช้งานมาเป็นเวลานาน) กับมอเตอร์ที่ซื้อใหม่ด้วยมอเตอร์ 4 พิกัด คือ 50hp, 70hp, 100hp และ 100hp ได้พบว่าแนวโน้มของค่าการสูญเสียจะมากขึ้นตามพิกัดของมอเตอร์ การเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียไม่ได้แปรผันตรงกับพิกัดของมอเตอร์ (ซึ่งประสิทธิภาพของมอเตอร์จะสูงขึ้นตามพิกัดของมอเตอร์) แสดงผลการทดสอบในรูปที่ 2.23 และจากการวิจัยนี้ทำให้วิศวกรโรงงานอาจจะต้องทำการชั่งน้ำหนักระหว่างมูลค่าการซื้อมอเตอร์ใหม่แทนมอเตอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นรวมกับค่าการซ่อมบำรุงรักษาต่างๆที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์เก่า นอกจากนี้ถึงแม้ว่ามอเตอร์ที่ซื้อใหม่ซึ่งมีพิคตลอคจน โครงสร้างที่เหมือนกันทุกประการ ประสิทธิภาพที่ได้อาจจะมีความที่ไม่เท่ากันได้ ทั้งนี้มาจากค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากแรงลม และความฝืด (มาจากปัญหาของรองลื่น) โดยค่าการสูญเสียอื่นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

สำหรับในวงการอุตสาหกรรมแล้ว การทำงานของมอเตอร์ซึ่งมีจำนวนหลายๆ ตัวได้ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วที่คงที่ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติมอเตอร์เหล่านี้ไม่น่าที่จะสามารถทำงานที่โหลดเต็มพิคตได้ มอเตอร์ส่วนใหญ่ทำงานที่โหลดน้อยกว่าโหลดเต็มพิคต 30% และมอเตอร์ประมาณ 3 ส่วนทำงานน้อยกว่าโหลด 50% ทั้งนี้เนื่องจากว่าสามารถทำให้โหลดต่างๆ แปรผันได้อย่างเหมาะสมเนื่องจากตามความต้องการเมื่อโหลดทางด้านระบบขับเคลื่อนไม่คงที่ (ขอบเขตความปลอดภัย) และรวมถึงสามารถเพิ่มโหลดของมอเตอร์ได้ในอนาคต ด้วยเหตุนี้จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่เป็นการเพิ่มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกไปสู่บรรยากาศอีกด้วย



รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนประกอบของมอเตอร์ระหว่างมอเตอร์ใหม่กับมอเตอร์เก่าด้วยพิคตที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงความล้มเหลวของมอเตอร์เหนี่ยวนำ การวินิจฉัยและผลกระทบที่ตามมา ทั้งนี้เป็นที่แน่ชัดแล้วว่าในส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหากเกิดความล้มเหลวจะสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกขึ้นมา ซึ่งเทคนิคต่างๆ หรือกระบวนการขั้นต้นได้มีนักวิจัยเป็นจำนวนมากประสบความสำเร็จในการค้นหาสเปคตรัมฟอลต์ดังกล่าว สำหรับกระบวนการสุดท้ายคือการหาข้อสรุปหรือข้อวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยจะเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ต่างๆ เพื่อบอกถึงระดับความรุนแรงของฟอลต์ จากการสำรวจพบว่านักวิจัยหลายท่านได้เลือกใช้เทคนิคฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบฟัซซี ซึ่งทั้งฟัซซีลอจิกและโครงข่ายประสาทเทียมต่างก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ฟัซซีลอจิกมีข้อดีในเรื่องการมีเหตุผลเชิงตรรกะ โครงสร้างของระบบฟัซซีสามารถเข้าใจได้เนื่องจากสามารถตีความได้ในรูป If-Then ซึ่งสอดคล้องกับตรรกะความคิดของมนุษย์ และนอกจากนั้นฟัซซีลอจิกยังช่วยในการตัดสินใจที่คลุมเครือที่ยอมให้การตัดสินใจเป็นแบบส่วน ไม่ใช่ผิดหรือถูกเพียงสองสถานะ แต่จะเป็นดัชนีของความถูกหรือผิดซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติอยู่แล้ว สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมมีจุดเด่นด้านการเรียนรู้จากข้อมูล โครงข่ายประสาทเทียมมีการปรับแต่งความรู้ที่ซ่อนอยู่ภายในเครือข่ายที่มีการต่อเชื่อมโยงกันอย่างหนาแน่น มีการส่งผ่านข้อมูลที่จะประมวลผลจากอินพุตไปยังเอาต์พุตแบบขนาน การประมวลผลของโครงข่ายประสาทเทียมจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่ถึงอย่างไรก็ตาม โครงข่ายประสาทเทียมก็มีจุดด้อยในด้านการตีความหาเหตุผล โครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถให้เหตุผลได้ว่าเพราะเหตุใดจึงมีข้อสรุปออกมาดังที่ปรากฏที่เอาต์พุตของโครงข่าย จุดด้อยข้อนี้เป็นที่รู้จักกันดีในนาม “black box” หรือกล่องดำ [15] ทั้งนี้ในปัจจุบันเทคนิคใหม่ๆ อย่างเช่นซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machines, SVM) ซึ่งมีความสามารถในการแยกแยะได้ดีขึ้นในจำนวนครั้งของการเรียนรู้ที่น้อยกว่า นอกจากนี้แล้วซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนยังได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถทำการแยกแยะได้อย่างเหมาะสมที่สุด (Optimum) ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์ แมชชีนเป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

## เทคนิคการประมาณค่าสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์

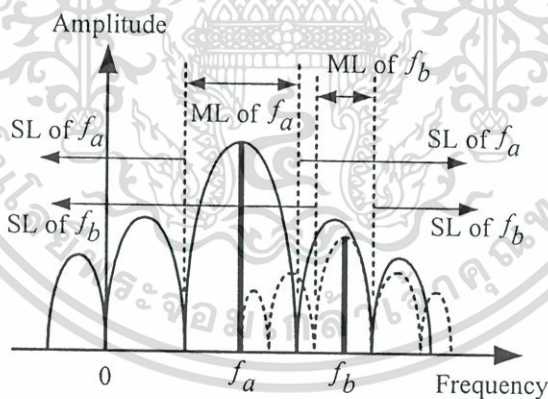
ในปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical machine diagnosis) โดยใช้สเปกตรามอนิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความล้มเหลวในส่วนประกอบนั้นๆได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับความสามารถของอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบขึ้นเพื่อการตรวจจับสัญญาณฟอลต์ ความสามารถในการตรวจจับสัญญาณฟอลต์ดังกล่าวนอกจากจะขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมแล้ว ยังขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการแปลง (Transform) ไปยังโดเมนความถี่อีกด้วย ปัจจุบันเทคนิคของ FFT ยังคงเป็นเทคนิคยอดนิยมเนื่องจากใช้เวลาในการประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ แต่เทคนิคของ FFT มีข้อเสียอย่างมากในเรื่องการรั่วไหลของสเปกตรัม โดยเฉพาะกับสเปกตรัมที่มีขนาดเล็กและอยู่ใกล้กับสเปกตรัมฮาร์มอนิกที่มีขนาดมากกว่า ทั้งนี้การวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขั้นสูงสำหรับลดปัญหาการรั่วไหลของเทคนิค FFT ดังต่อไปนี้

### 3.1 เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับการตรวจจับสัญญาณฟอลต์

เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลได้ถูกนำมาใช้สำหรับการเฝ้าตรวจสอบสถานะเครื่องจักรกลไฟฟ้าเป็นเวลานานมาแล้ว แต่ในไม่กี่ปีมานี้ได้ถูกนำมาใช้อย่างจริงจังกับหลายประเภทของสัญญาณที่นำมาใช้สำหรับการตรวจจับฟอลต์ เช่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux) การสั่น (Vibration) แรงบิดช่องอากาศ (Air-gap torque) กระแส (Current) แรงดัน (Voltage) กำลัง (Power) เป็นต้น ในเอกสารอ้างอิง [40] ได้อธิบายอย่างละเอียดเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ นักวิจัยหลายท่านได้เลือกใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่เหมาะสมกับชนิดของสัญญาณเหล่านั้น แต่สำหรับการแปลงไปยังโดเมนความถี่ เทคนิคหนึ่งซึ่งมีประสิทธิภาพและถูกนำมาใช้มากที่สุดคือ FFT อย่างไรก็ตามผลของกริด (Grid effect) และการรั่วไหลของพลังงาน (Energy leakage) ของ FFT ทำให้มีปัญหาในเรื่องความถูกต้องของสเปกตรัมที่ได้ [41-42] ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

หากทำการแปลงสัญญาณในโดเมนเวลาไปยังโดเมนความถี่ด้วยเทคนิค FFT ผลที่ได้นำไปสู่ชุดของฟังก์ชันไซน์ด้วยช่วงความห่างของความถี่ที่สม่ำเสมอเรียกว่า *สเปกตรัม* ในชุดของสเปกตรัมเหล่านี้จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบดีซี (DC component) ฮาร์มอนิกย่อย (Sub harmonics) องค์ประกอบมูลฐาน (Fundamental) และฮาร์มอนิกอินเตอร์ (Inter harmonics) ผลการรั่วไหลนี้มีผลทำให้ขนาดของฮาร์มอนิกที่ได้อาจจะไม่ถูกต้องนัก (Spurious peaks) ซึ่งมีสาเหตุมาจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการโอไลซิง (Aliasing) ของสัญญาณและการรั่วไหลของสเปกตรัม [25] วิธีแก้ไขสามารถทำได้โดยใช้อัตราการสุ่มที่สูงๆ ส่วนการรั่วไหลของสเปกตรัมสามารถทำให้ลดลงได้โดยใช้ตัวกรองดิจิทัล [43] ทั้งนี้ตัวกรองดิจิทัลด้วยฟังก์ชันวินโดว์เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิดแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันไป รายละเอียดดูได้จากการเปรียบเทียบตัวกรองวินโดว์ที่ต่างประเภทกันใน [44-45] ชุดข้อมูลที่ได้มาจากการสุ่มจะแตกต่างกับข้อมูลจริงที่มีความต่อเนื่อง โดยที่ข้อมูลที่ถูกสุ่มจะมีจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดของมัน ทำให้ประกอบไปด้วยโหลบหลัก (Mainlobe, ML) และโหลบข้าง (Sidelobe, SL) จำนวนอนันต์ ดังนั้นเมื่อแปลงไปยังโดเมนความถี่โดยไม่ผ่านกระบวนการใดๆจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการรั่วไหลของสเปกตรัม สเปกตรัมรั่วไหลหรือเรียกว่าผลของโหลบข้างจะมีผลมากเมื่อการแปลงไปยังโดเมนความถี่ด้วยพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม เช่น ในเรื่องของจำนวนข้อมูล เทคนิคที่ใช้ในการแปลง เป็นต้น วิธีลดการรั่วไหลของสเปกตรัมนอกจากสามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชันวินโดว์แล้ว การเลือกใช้ตัวกรองวินโดว์ที่ไม่เหมาะสมก็ยังเป็นสาเหตุทำให้การรั่วไหลของสเปกตรัมลดลงได้ไม่ดีเท่าที่ต้องการ เช่น การเลือกใช้วินโดว์ที่เป็นเหลี่ยม แต่การเลือกใช้วินโดว์ที่ปราศจากขอบหรือมีขอบที่ไม่ชันเกินไปจะสามารถลดการรั่วไหลของสเปกตรัมได้ดีกว่า

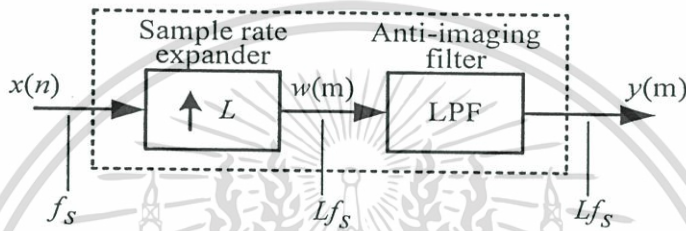


รูปที่ 3.1 โหลบข้างของ  $f_a$  ปิดกั้นองค์ประกอบของ  $f_b$  ทำให้ไม่สามารถตรวจจับได้

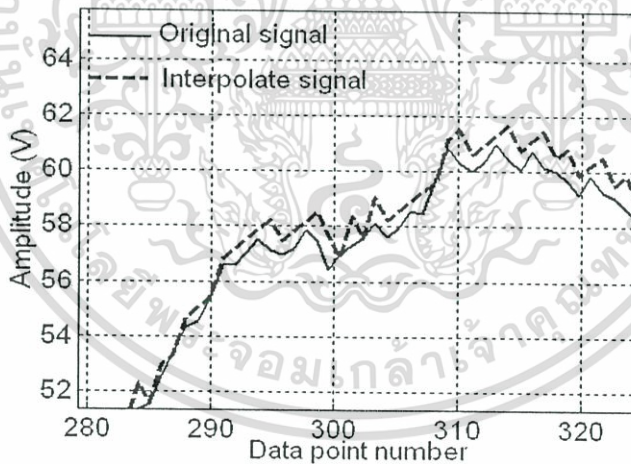
ผลของโหลบข้างสามารถอธิบายให้เห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 3.1 คือหากมี 2 สัญญาณฮาร์มอนิกที่มีความถี่ใกล้เคียงกันแต่มีขนาดที่แตกต่างกัน เช่น  $f_a$  กับ  $f_b$  โดยที่  $f_a$  มีขนาดมากกว่า  $f_b$  ผลก็คือจะทำให้พลังงานของ  $f_a$  กระจายออกไปยังฮาร์มอนิกที่มีความถี่อยู่ใกล้ๆ ผลก็คือทำให้เกิดการคลุมหรือปิดกั้นความถี่อื่นไว้ไม่สามารถทราบได้ว่ามีสเปกตรัมของสัญญาณนี้รวมอยู่ด้วย ดังเช่นสเปกตรัม  $f_b$  ที่ไม่สามารถตรวจจับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการพิจารณาเมื่อสเปกตรัมที่ต้องการค้นหาไม่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานหรืออาจกล่าวได้ว่าถ้าสัญญาณไม่ได้สุ่มครบคาบจะไม่มีคำแนะนำในการตรวจจับสเปกตรัมพอลต์นั้น ถึงแม้ว่าสัญญาณจะมีความถี่เดียวกันก็ตาม ซึ่งปรากฏการณ์นี้ปกติเรียกว่าผลกระทบของกริด (Grid effect) ซึ่งวิธีแก้ไขสามารถทำได้โดยใช้การเพิ่มข้อมูลให้กับสัญญาณที่จะนำมาวิเคราะห์หรือการใช้เทคนิคการอินเตอร์โพลิต (Interpolation) มาช่วยในการกำจัดการผิดพลาดที่มีสาเหตุมาจากผลของกริดนี้ แต่การผิดพลาดที่เกิดจากการรั่วไหลของสเปกตรัมจะสามารถถูกทำให้ลดลงได้โดยการใช้ฟังก์ชันวินโดว์



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของกระบวนการอินเตอร์โพลิตข้อมูล



รูปที่ 3.3 ความแตกต่างของสัญญาณแรงดันเดิมกับสัญญาณที่ได้จากการอินเตอร์โพลิต

วิธีการอินเตอร์โพลิตข้อมูลอย่างง่ายสามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราการสุ่มของสัญญาณ  $x(n)$  ขึ้น  $I$  เท่าโดยที่  $I$  เป็นจำนวนเต็ม สมมุติว่าใช้  $I=2$  หมายถึงว่า สัญญาณใหม่  $y(n)$  จะมีอัตราข้อมูล (จำนวน) เพิ่มขึ้นจากสัญญาณเก่าเท่ากับ 2 เท่านอกจากนี้แล้วยังจะทำให้ย่านในควิสิท์เพิ่มขึ้นจากเดิม 2 เท่า ดังนั้นการเกิดสัญญาณเอเลียซซิง (Aliasing) จะไม่เป็นปัญหาที่ต้องคำนึงถึงเหมือนในกรณีของการลดอัตราการสุ่ม แต่ปัญหาก็คือการสร้างสัญญาณใหม่  $y(n)$  ขึ้นมานั้นจะต้องนำสัญญาณเก่า  $x(n)$  มาแล้วแทรกข้อมูลใหม่เพิ่มลงไป นอกจากนี้ระหว่างทุกๆจุดของการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเก่าเพื่อให้มีอัตราข้อมูลเพิ่มขึ้นสองเท่า โดยข้อมูลใหม่ที่จะเติมลงไปจะได้มาจากค่าเฉลี่ยระหว่างข้อมูลที่เข้าไปแทรก โดยไม่ทำให้สเปกตรัมเดิมของสัญญาณผิดเพี้ยนไป รูปที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบของกระบวนการอินเตอร์โพลेटข้อมูล โดยมีตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นส่วนประกอบรวมอยู่ด้วย ทั้งนี้การออกแบบข้อมูลในส่วนของการใช้เทคนิคการอินเตอร์โพลेटนั้น โดยปกติแล้วจะไม่ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมที่ได้ในโดเมนความถี่ แต่ในโดเมนเวลาเมื่อนำสัญญาณเดิมกับสัญญาณที่ได้จากการอินเตอร์โพลेटมาเปรียบเทียบกันจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยแสดงในรูปที่ 3.3

### 3.2 การวิเคราะห์ตัวกรองดิจิทัลด้วยฟังก์ชันวินโดว์

ตัวกรองดิจิทัลด้วยฟังก์ชันวินโดว์หรือตัวกรองวินโดว์เป็นเทคนิควงจรกรองดิจิทัลประเภท FIR ที่มีผลของการตอบสนองค่าหนึ่งจะมีจำนวนที่นับได้ซึ่งจะตรงข้ามกับวงจรกรองประเภท IIR ที่มีผลการตอบสนองถึงจำนวนอนันต์ และมีข้อดีก็คือสามารถจะออกแบบให้มีการตอบสนองความถี่ของเฟรมมีความเป็นเชิงเส้นได้โดยแท้จริง ซึ่งการวินิจฉัยความสมบูรณ์ของเครื่องจักรกล การใช้ตัวกรองวินโดว์จะช่วยในการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยการลดทอนฮาร์มอนิกที่เป็นผลมาจากการรั่วไหลของสเปกตราที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแปลงไปยังโดเมนความถี่ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องทำการจัดรูปแบบของข้อมูลใหม่โดยอาศัยฟังก์ชันวินโดว์ ด้วยการคูณกันระหว่างข้อมูลที่ต้องการจัดรูปแบบใหม่กับฟังก์ชันวินโดว์ทางโดเมนเวลา ซึ่งก็คือการคอนโวลูชัน (Convolution) กันทางโดเมนความถี่ การทำเช่นนี้จะทำให้ข้อมูลของสัญญาณกระแสวนทุกมีผลการตอบสนองทางความถี่ (เฟส) ที่ดีขึ้น ทำให้ผลการตอบสนองของอนุกรมเปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยการตัดปลายหรือถ่วงน้ำหนักเพื่อลดโพลบข้างตลอดสัญญาณ ตัวอย่างของตัวกรองวินโดว์ซึ่งถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ที่สำคัญเช่น

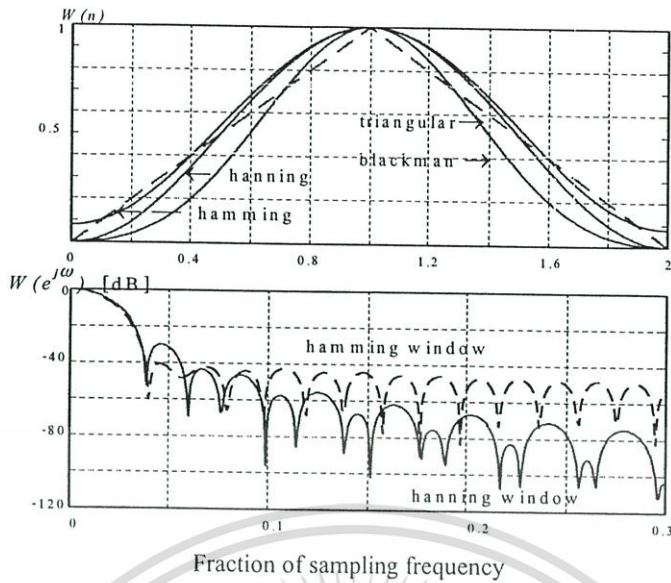
#### 3.2.1 วินโดว์สามเหลี่ยม (Triangular window)

ด้วยการทำวินโดว์สี่เหลี่ยมให้เรียวลงโดยให้ค่าสูงสุดอยู่ตรงกลาง จากนั้นให้ลดลงแบบเชิงเส้นไปสู่ค่าศูนย์ที่ขอบวินโดว์ ก็จะได้วินโดว์สามเหลี่ยมจำนวน  $N$  ค่า ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$W_T(n) = 1 - \frac{2|n|}{N-1} \quad \text{สำหรับ } -(N-1)/2 \leq n \leq (N-1)/2 \quad (3.1)$$

$$= 0 \quad \text{สำหรับค่าอื่นๆของ } N$$

รูปร่างของวินโดว์สามเหลี่ยมแสดงในรูปที่ 3.4 ทั้งนี้โพลบข้างของวินโดว์สามเหลี่ยมจะมีค่าประมาณ  $-25$  dB และความกว้างของโพลบหลักจะมีค่าเป็น  $8\pi/N$  อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 รูปร่างวินโดว์และผลการตอบสนองทางความถี่ของวินโดว์ฮานนิงและแฮมมิง

### 3.2.2 วินโดว์ฮานนิง (Hanning window)

จะสามารถลดโหลบข้างเคียงได้มากกว่าวินโดว์สามเหลี่ยม เนื่องจากบริเวณขอบมีลักษณะลาดมากขึ้น โดยใช้ฟังก์ชันที่เรียกว่าเรสต์โคไซน์ ทำให้โหลบข้างจะอยู่ที่  $-31$  dB นั่นคือต่ำกว่ากรณีวินโดว์สามเหลี่ยม  $6$  dB แต่มีความกว้างของโหลบหลักเท่ากัน ในรูปที่ 3.4 แสดงผลตอบสนองและรูปร่างของวินโดว์ประเภทนี้ซึ่งมีสมการเป็น

$$W_c(n) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad \text{สำหรับ } -(N-1)/2 \leq n \leq (N-1)/2 \quad (3.2)$$

$$= 0 \quad \text{สำหรับค่าอื่นๆของ } N$$

### 3.2.3 วินโดว์แฮมมิง (Hamming window)

สามารถลดระดับของโหลบข้างลงไปได้อีกทั้งนี้สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มค่าคงตัวรูปร่างของวินโดว์แฮมมิงและผลการตอบสนองแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งโหลบข้างจะมีระดับอยู่ที่  $-41$  dB หรือนั่นคือต่ำกว่าวินโดว์ฮานนิงอยู่  $10$  dB อย่างไรก็ตามข้อเสียคือที่ความถี่สูงระดับของผลการตอบสนองจะคงที่ แต่ในส่วนของวินโดว์ฮานนิงจะลดลงซึ่งวินโดว์แฮมมิงจะมีสมการเป็น

$$W_h(n) = 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad \text{สำหรับ } -(N-1)/2 \leq n \leq (N-1)/2 \quad (3.3)$$

$$= 0 \quad \text{สำหรับค่าอื่นๆของ } N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 วินโดว์แบล็คแมน (Blackman window)

สามารถลดระดับของโพลบข้างได้อีกโดยเพิ่มจำนวนโคไซน์มากขึ้น รูปร่างของวินโดว์แบล็คแมนแสดงในรูปที่ 3.4 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ โดยที่ระดับของโพลบข้างจะลดลงไปอยู่ที่ -57 dB แต่ความกว้างของโพลบหลักจะเพิ่มเป็น  $12\pi/N$  ซึ่งมีสมการดังนี้

$$W_b(n) = 0.42 + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.8 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (3.4)$$

สำหรับ  $-(N-1)/2 \leq n \leq (N-1)/2$

= 0

สำหรับค่าอื่นๆของ  $N$

### 3.2.5 วินโดว์ไคเซอร์ (Kaiser window)

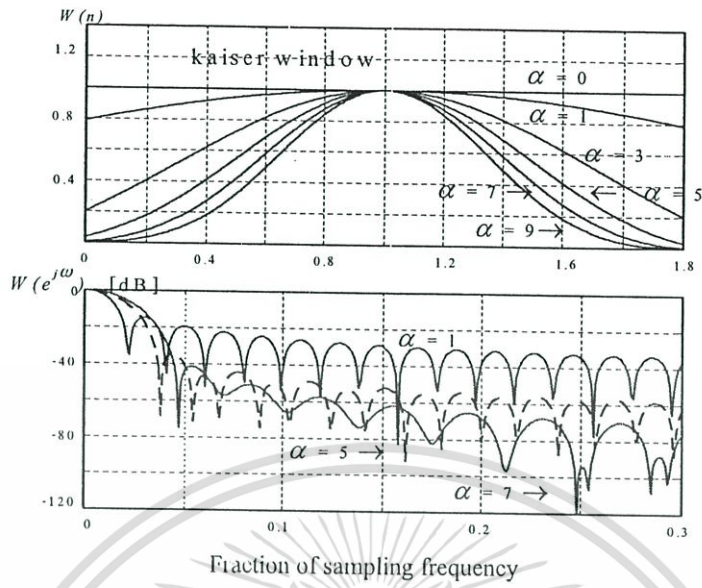
เป็นฟังก์ชันทรงกลายวงกลมแบนข้าง (Prolate spheroidal function) มาทำการประมาณค่าผลก็คือ ได้วินโดว์ที่ได้มีคุณสมบัติแลกเปลี่ยนระหว่างค่าขนาดของโพลบหลักกับค่าของขนาดโพลบข้าง โดยมีพารามิเตอร์  $\alpha$  เป็นตัวควบคุมค่าเพื่อปรับค่าขนาดโพลบข้างเมื่อเปรียบเทียบค่าขนาดของโพลบหลักได้ซึ่งความกว้างของโพลบหลักก็เหมือนกับวินโดว์อื่นๆคือปรับค่าได้โดยการเลือกค่า  $N$  ส่วนความสูงของโพลบข้างจะขึ้นอยู่กับค่า  $\alpha$  ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อ  $\alpha$  มีค่ามากขึ้น รูปร่างของวินโดว์ไคเซอร์และผลการตอบสนองทางความถี่แสดงในรูปที่ 3.5 และมีสมการเป็น

$$W_k(\alpha, n) = \frac{I_0\left\{\alpha \left[1 - \left(\frac{2n}{N-1}\right)^2\right]^{1/2}\right\}}{I_0(\alpha)} \quad \text{สำหรับ } -(N-1)/2 \leq n \leq (N-1)/2 \quad (3.5)$$

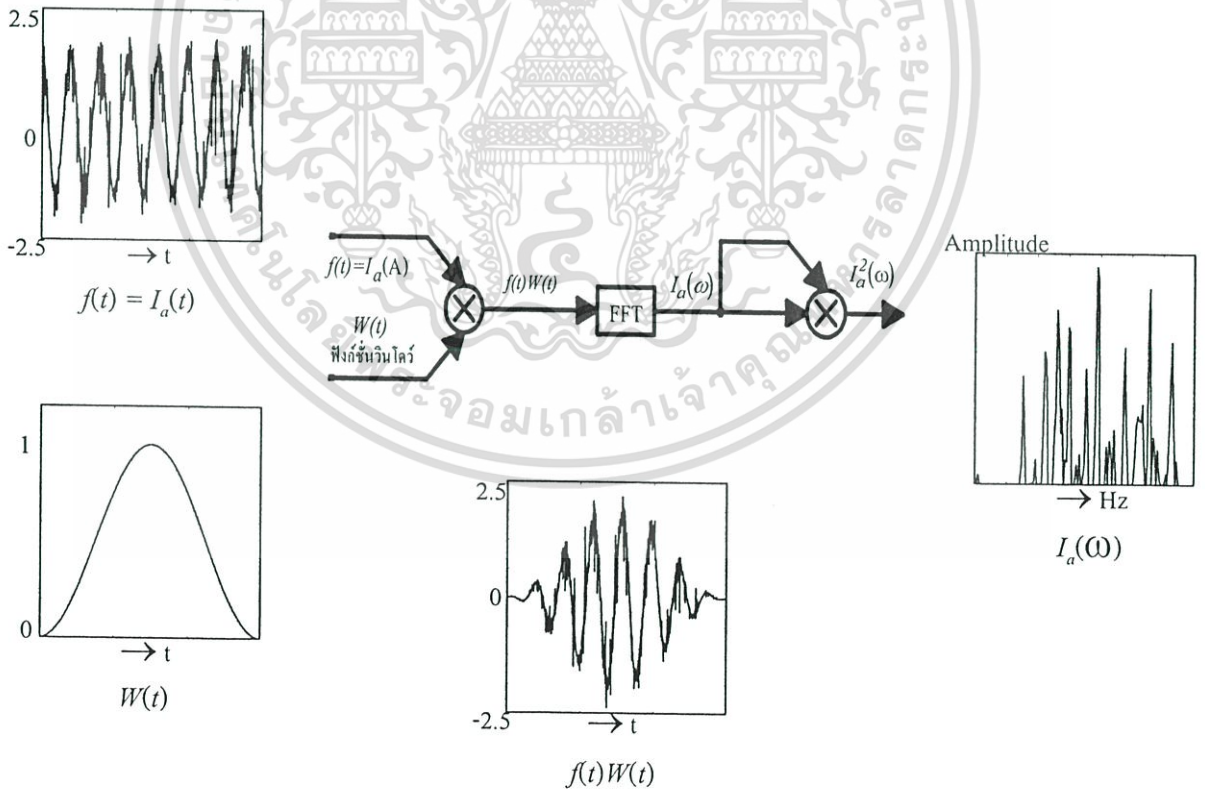
= 0

สำหรับค่าอื่นๆของ  $N$

การประยุกต์ใช้ตัวกรองดิจิทัลด้วยฟังก์ชันวินโดว์ สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกมีดังต่อไปนี้ คือขั้นตอนแรกจะเป็นการใช้ตัวกรองดิจิทัลด้วยฟังก์ชันวินโดว์คูณกับข้อมูลของกระแสดเทเตอร์ทางโดเมนเวลา ซึ่งจะมีค่าเท่ากันกับการคอนโวลูชันทางโดเมนความถี่ รูปที่ 3.6 ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลกระแสดเมื่อผ่านขั้นตอนต่างๆ ซึ่งจากรูปได้ใช้อัลกอริทึมของการแปลงด้วย FFT

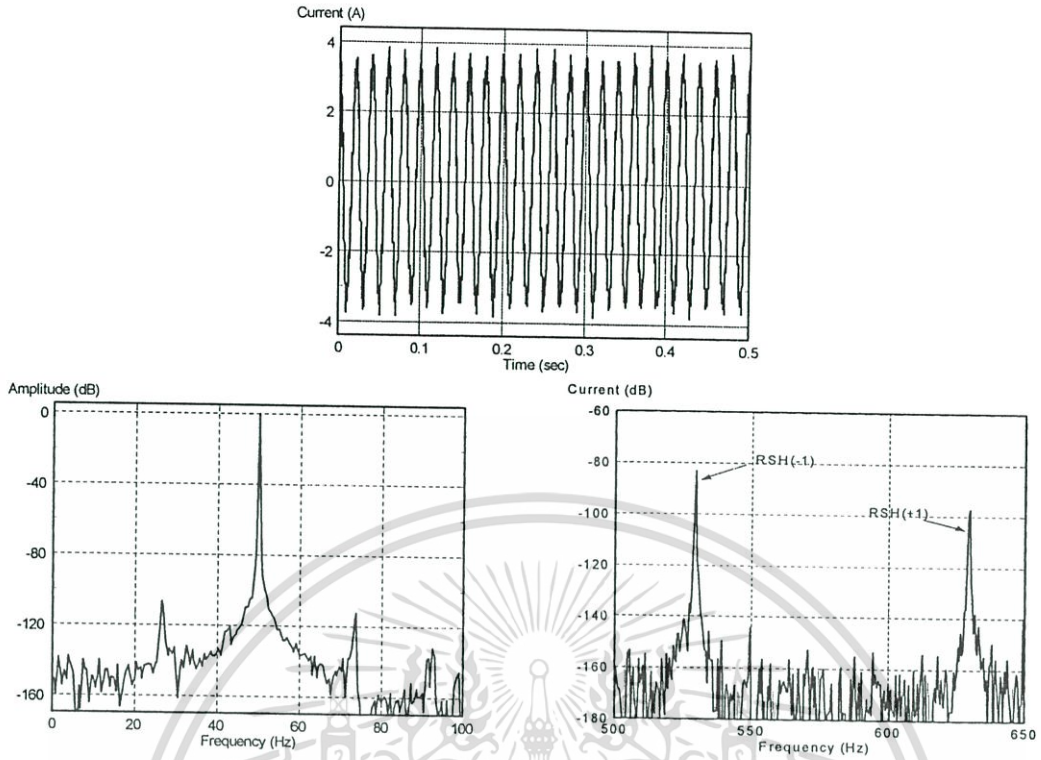


รูปที่ 3.5 รูปร่างวินโดว์โคเซอร์และผลการตอบสนองทางความถี่เมื่อ  $\alpha$  มีค่าต่างๆ

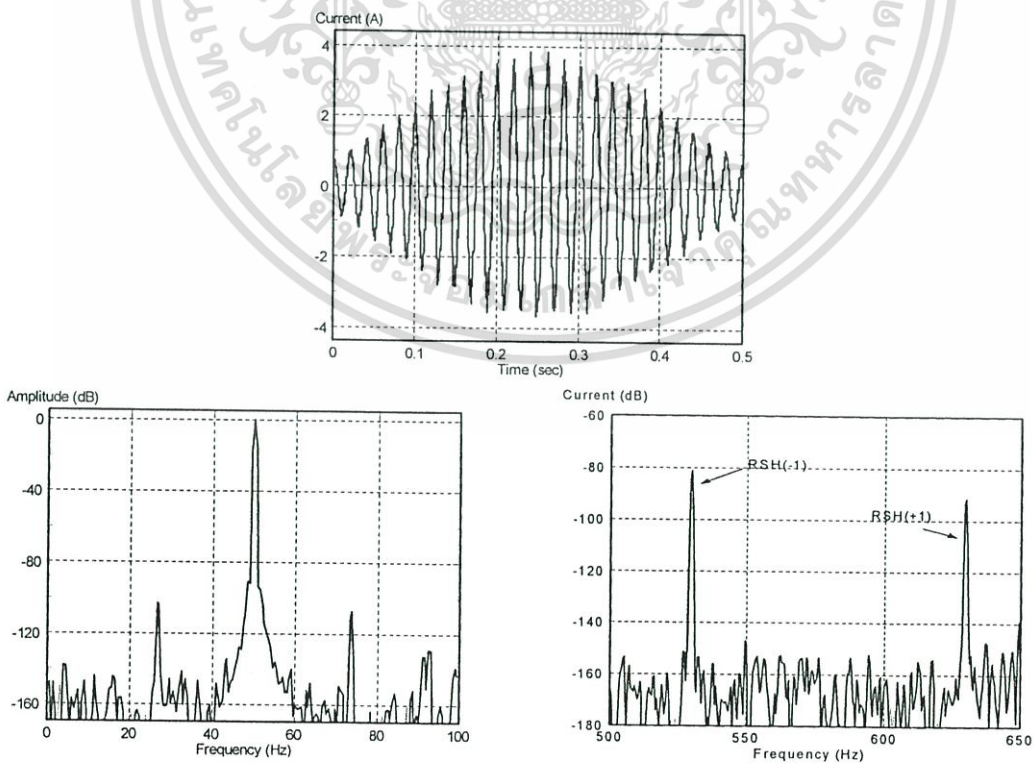


รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลเมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์และ FFT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

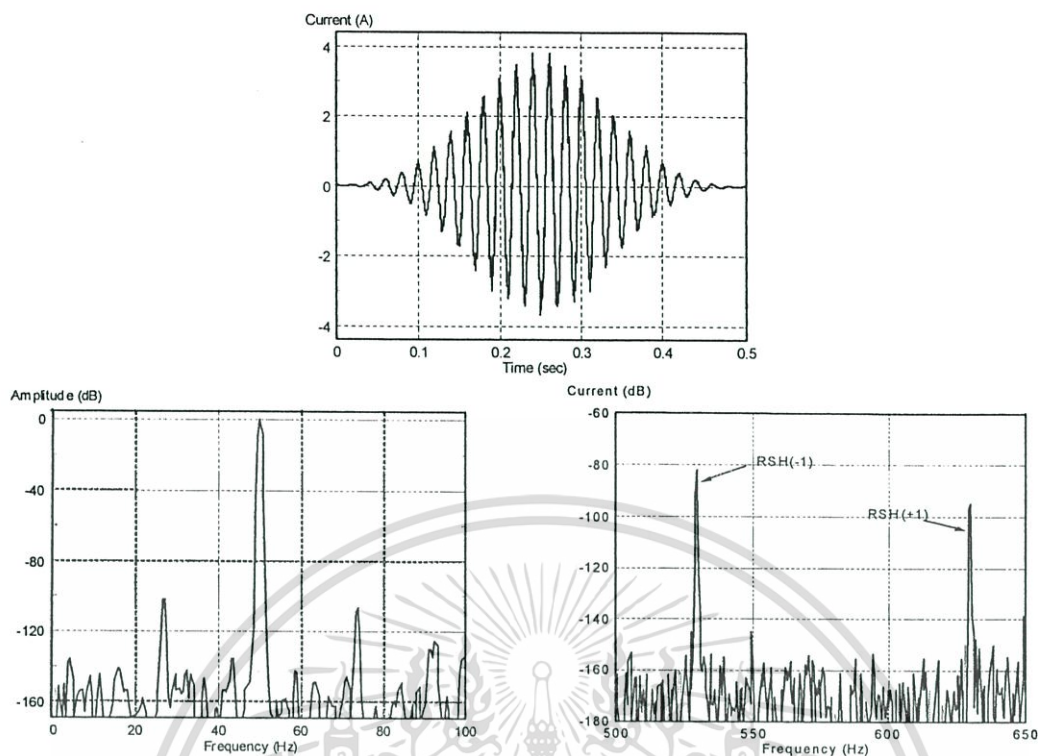


รูปที่ 3.7 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสสแตเตอร์ที่ไม่ผ่านตัวกรองวินโดว์



รูปที่ 3.8 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสสแตเตอร์เมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์โคเซอร์ ( $\alpha=3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



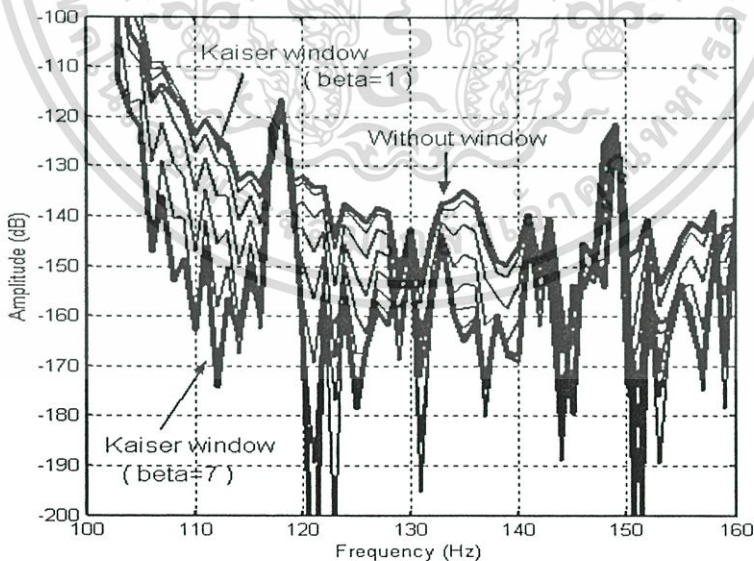
รูปที่ 3.9 สเปกตรัมของสัญญาณกระแสสแตเตอร์เมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์เบสิกแมน

ตัวอย่างลำดับขั้นตอนการประมวลผลแสดงดังรูปที่ 3.6 โดยเริ่มจากข้อมูล เช่นข้อมูลสัญญาณกระแสสแตเตอร์ ( $I_a$ ) ที่ได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จากนั้นใช้ตัวกรองดิจิทัล  $W(z)$  กระทบกับชุดข้อมูลดังกล่าวทางโดเมนเวลา (ซึ่งเป็นการคูณกันตามลำดับของข้อมูล) แล้วจึงแปลงไปยังโดเมนความถี่ด้วย FFT เปลี่ยนให้เป็นสเปกตรัมกำลังด้วยการยกกำลังสอง แล้วจึงนำช่วงของความถี่ที่ต้องการพิจารณาวิเคราะห์ รูปที่ 3.7 แสดงรูปร่างของข้อมูลเมื่อไม่ผ่านตัวกรองวินโดว์ และเมื่อใช้เทคนิคของ FFT แปลงไปยังโดเมนความถี่โดยได้แบ่งช่วงของฮาร์มอนิกออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ ช่วงความถี่ 0-100 Hz และ 500-650 Hz ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จากช่วงความถี่แรก จะเป็นสเปกตรัมของสัญญาณมูลฐาน คือที่ความถี่ 50 Hz และช่วงความถี่ที่ 2 จะเป็นฮาร์มอนิกที่มีสาเหตุมาจากโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า รูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ได้ปฏิบัติเช่นเดียวกันกับในรูปที่ 3.7 แต่ใช้ตัวกรองวินโดว์ชนิดโคเซอร์ ( $\beta=3$ ) และวินโดว์เบสิกแมนตามลำดับ จากรูปทั้ง 3 จะเห็นความแตกต่างของชุดข้อมูลก่อนแปลงไปยังโดเมนความถี่และความแตกต่างของสเปกตราได้อย่างชัดเจน โดยวินโดว์เบสิกแมนจะสามารถลดการรั่วไหลของสเปกตราได้ดีกว่าวินโดว์โคเซอร์ ( $\beta=3$ ) ทั้งนี้ก็เป็นไปตามคุณสมบัติของผลการตอบสนองทางความถี่นั่นเอง

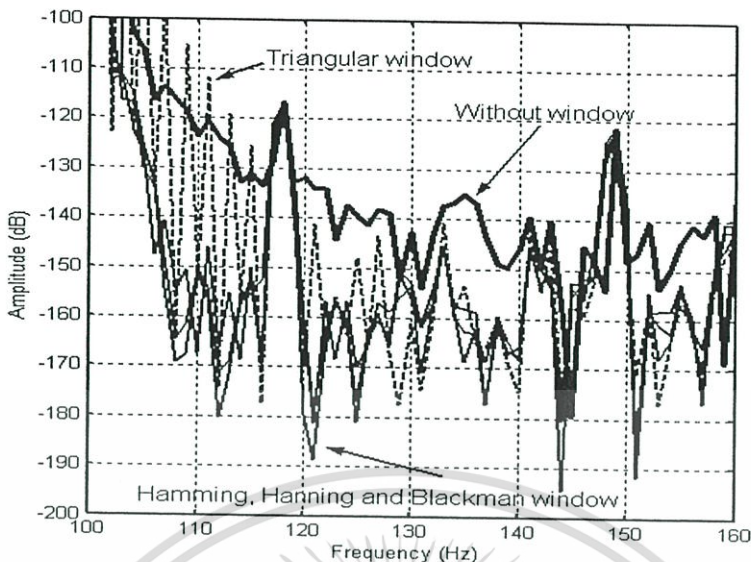
รูปที่ 3.10 ได้พิจารณาช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 160 Hz โดยได้ขยายเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการรั่วไหลสเปกตราที่ลดลงโดยที่ช่วงความถี่ดังกล่าวจะมีฮาร์มอนิกที่สำคัญเกิดขึ้นคือฮาร์มอนิกอินเตอร์ (Inter harmonic) มีความถี่เท่ากับ 100 Hz ตัวกรองที่นำมาพิจารณาได้แก่วินโดว์โค

เซอร์เมื่อ  $\beta$  มีค่าเท่ากับ 1-7 จากรูปแสดงให้เห็นว่าการรบกวนของสเปกตร้าจะลดลงตามค่าของ  $\beta$  ที่เพิ่มสูงขึ้น จากรูปยังได้แสดงให้เห็นอีกว่ายังมี 2 สัญญาณฮาร์โมนิกเกิดขึ้นรวมอยู่ด้วยทั้งนี้หากไม่ใช่ตัวกรองวินโดว์ก็ไม่อาจทราบได้ว่ามีฮาร์โมนิก 2 ความถี่ปรากฏอยู่ (คือที่ความถี่ 117 Hz และ 148 Hz) ทั้งนี้ก็เนื่องจากลูกโหลบข้างของโทมส์ฮาร์โมนิกปิดบังอยู่ สำหรับการพิจารณาว่าสเปกตรัมใดมีสาเหตุมาจากความเสียหายของเครื่องจักรกลไฟฟ้า หรือเกิดการรบกวนของสเปกตร้า สามารถดูได้จาก การไม่ถูกกรองออกไป อย่างเช่นในรูปที่ 3.10 ที่มีสเปกตรัม 2 ความถี่ดังกล่าวมาแล้ว ซึ่งถ้าเป็นสเปกตรัมที่เกิดจากการรบกวนก็จะถูกกรองออกไป ทั้งนี้ในส่วนของการนำไปประยุกต์ใช้เมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์แล้วแปลงไปยังโดเมนความถี่ สเปกตรัมที่มีความโดดเด่นจะถือได้ว่ามีสาเหตุของการเกิดขึ้นทั้งสิ้น (ไม่ได้เกิดขึ้นจากการรบกวน)

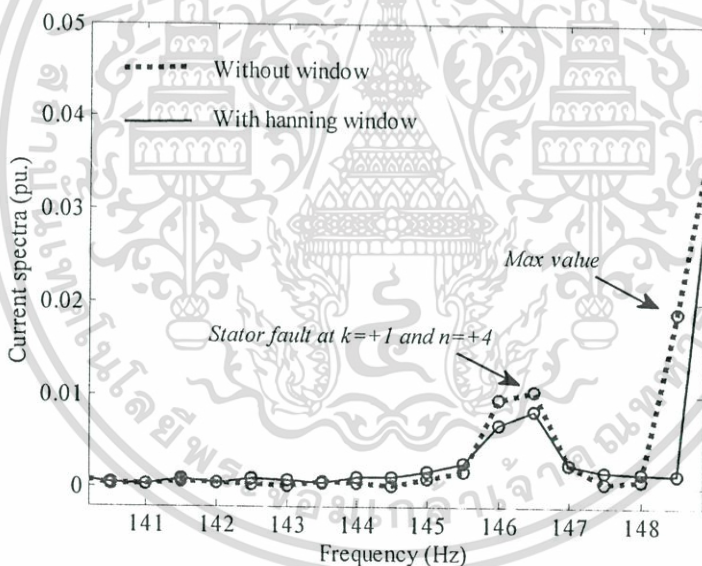
รูปที่ 3.11 ได้เปลี่ยนมาใช้ตัวกรองวินโดว์ชนิดสามเหลี่ยม แซมมิง ฮานนิง และแบดจ์แมนเปรียบเทียบกับเมื่อไม่ใช่ตัวกรองวินโดว์ซึ่งสามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกันกับรูปที่ 3.10 โดยที่ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจริงยังคงอยู่ที่ตำแหน่ง (ความถี่) เดิม และนอกนั้นจะมีขนาดที่ลดลงตามผลการตอบสนองทางความถี่ของวินโดว์แต่ละชนิด จากรูปพบว่าวินโดว์แซมมิง ฮานนิง และแบดจ์แมนจะสามารถกรองการรบกวนของสเปกตร้าให้เหลืออยู่ที่ระดับ -160 dB โดยประมาณ แต่ในวินโดว์สามเหลี่ยมจะไม่สามารถกรองการรบกวนของสเปกตร้าได้ในช่วงความถี่ 100-115 Hz ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับผลการตอบสนองทางความถี่ที่โหลบข้างมีค่าสูง



รูปที่ 3.10 ผลการทดลองการรบกวนของสเปกตร้าซึ่งจะลดลงตามค่า  $\beta$  ที่มีค่าสูงขึ้น  
ในวินโดว์ชนิดโคเซอร์



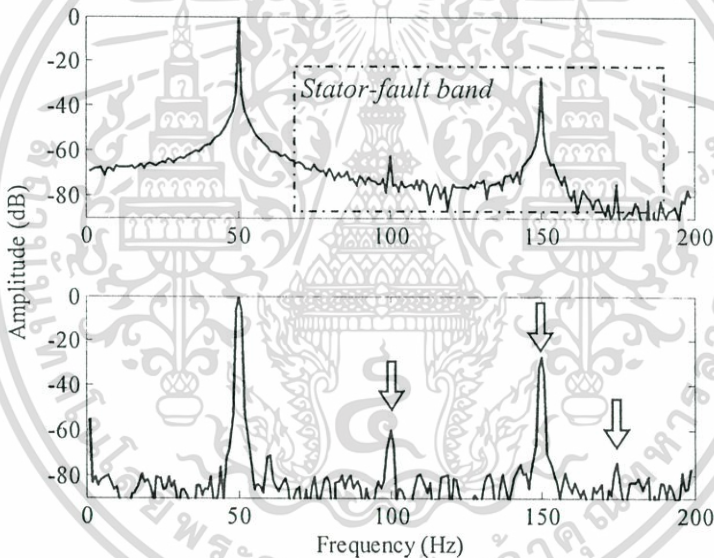
รูปที่ 3.11 ผลการทดลองการลดลงของการรั่วไหลสเปกตราเมื่อใช้วินโดว์ชนิดต่างๆ



รูปที่ 3.12 ผลการทดลองการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ที่ผิดพลาดขึ้นในลำดับ  $k = 1$  and  $n = 4$  เมื่อมอเตอร์ทำงานที่โหลด 50% โดยเส้นปะเมื่อไม่ผ่านตัวกรองวินโดว์ และเส้นเข็มเมื่อผ่านตัวกรองวินโดว์ฮานนิง

การทดลองกับสัญญาณจริงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ของตัวกรองวินโดว์นั้น ซึ่งจะทำให้ได้ตัวกรองวินโดว์นั้น ซึ่งจะทำให้ได้ตัวกรองวินโดว์ที่มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ฟังก์ชันวินโดว์ฮานนิงเพราะว่ามีสมการในการสร้างรูปคลื่นที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการลดการรั่วไหลของสเปกตราได้เป็นอย่างดี การทดลองในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

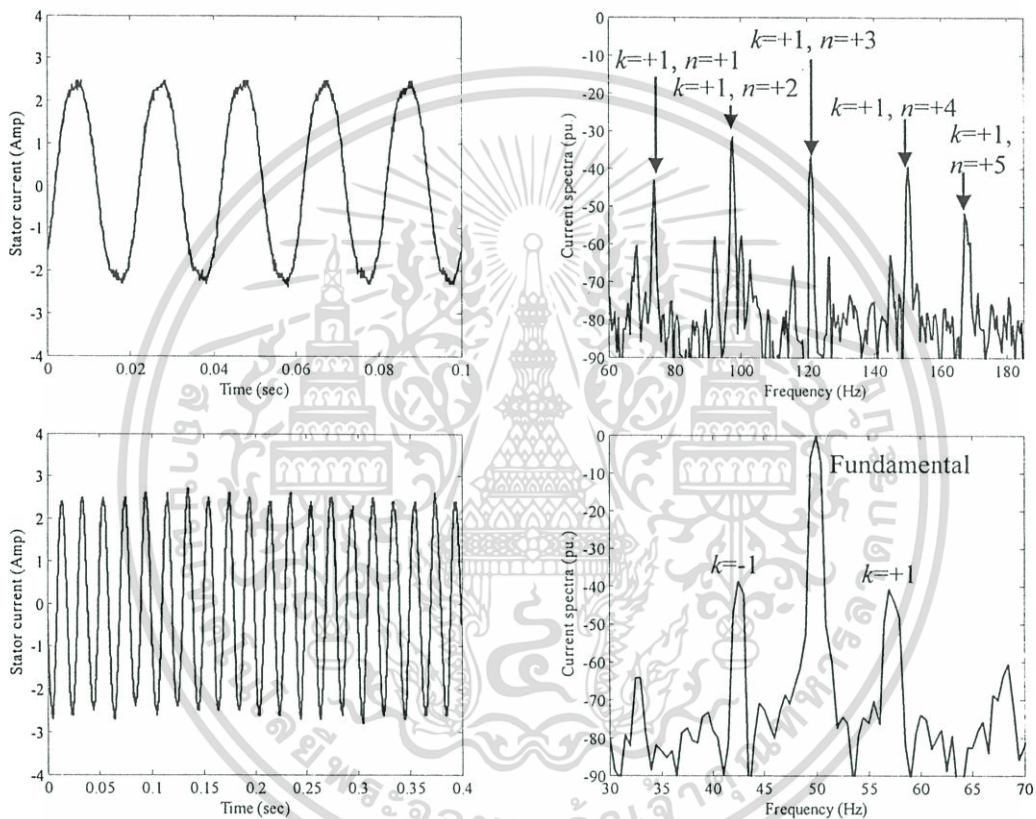
รูปที่ 3.12 แสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจริงกรณีการทดสอบการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์กรณีผ่านตัวกรองและไม่ผ่านตัวกรองวินโดว์ฮานนิง จากรูปเป็นการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งจะได้รับผลกระทบมาจากการรั่วไหลของสเปกตรัมฟอลต์ที่ความถี่ 150 Hz จากรูปยังพบว่าการใช้ตัวกรองดิจิทัลถึงแม้จะสามารถลดผลของโหลบข้างได้ แต่ก็ยังส่งผลให้ขนาดของฟอลต์ที่ต้องการตรวจจับมีขนาดลดลงไปด้วย อย่างไรก็ตามขนาดของสเปกตรัมที่ลดลงนี้จะไม่มีความหมายมากนักเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงตามความรุนแรงจากความเสียหายซึ่งเกิดขึ้นจากส่วนประกอบนั้นๆของมอเตอร์ การทดลองรูปที่ 3.13 เป็นการประยุกต์ใช้ในสัญญาณแรงดันมอเตอร์ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้แล้วยังได้นำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจจับฟอลต์โรเตอร์เปรียบเทียบกับ การตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ได้ผลการทดลองในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 สเปกตรัมแรงดันเฟสสเตเตอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่ต่างกัน (บน) วิธีของ FFT และ (ล่าง) วิธีวินโดว์ FFT เมื่อฟอลต์ที่ต้องการตรวจจับแสดงด้วยลูกศร

นอกจากการวิเคราะห์การตรวจจับสเปกตรัมฟอลต์โดยใช้ตัวกรองวินโดว์ที่แตกต่างกันนั้น ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการอินเตอร์โพลेट และสเปกตรัมกำลัง (Power spectrum) สำหรับความโดดเด่นของสเปกตรัมฟอลต์ที่มากที่สุดด้วย แสดงผลการทดลองในรูปที่ 3.15 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมที่แตกต่างกันออกไปตามการศึกษาที่แตกต่างกัน จากรูปได้พิจารณาสเปกตรัมฮาร์มอนิกในช่วงความถี่ 500 Hz ถึง 1500 Hz และขนาดอยู่ในช่วง -200 ถึง 0 dB ผลการทดลองรูปที่ 3.15(ก) ไม่ได้ตัดแปลงข้อมูลก่อนแปลงไปยังโดเมนความถี่ด้วย FFT ซึ่ง จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมฮาร์มอนิกไม่มีความโดดเด่นทำให้การตรวจจับเพื่อการนำมาวิเคราะห์อาจไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ รูปที่ 3.15(ข) เมื่อคัดแปลงข้อมูลโดยผ่านตัวกรองวินโดว์ชนิดฮานนิง และการอินเตอร์โพลेट สเปกตรัมที่ได้จะเริ่มมีความโดดเด่นกว่ารูปที่ 3.15(ก) (และดีกว่ากรณีที่ไม่ใช้เทคนิคการอินเตอร์โพลेटด้วย) รูปที่ 3.15(ค) เมื่อทำให้เป็นสเปกตรัมกำลัง จากรูปที่ 3.15(ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสเปกตรัมที่ได้มีความโดดเด่นชัดเจนมากที่สุด จากรูปแสดงให้เห็นถึงความโดดเด่นอย่างชัดเจนของสเปกตรัมที่มีความถี่ 550 Hz, 858 Hz, 960 Hz, 1,170 Hz และ 1,385 Hz ตามลำดับ ทั้งนี้ในรูปที่ 3.15(ก) จะไม่สามารถระบุฮาร์มอนิกได้อย่างชัดเจน

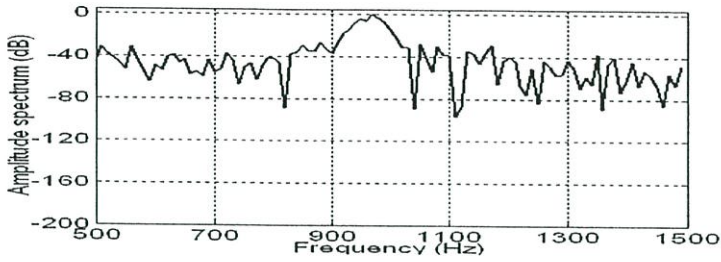


รูปที่ 3.14 ผลการทดลองการวิเคราะห์ (บน) ฟอลต์สเตเตอร์และ (ล่าง) ฟอลต์โรเตอร์โดยใช้สัญญาณกระแสสเตเตอร์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัดโหลด

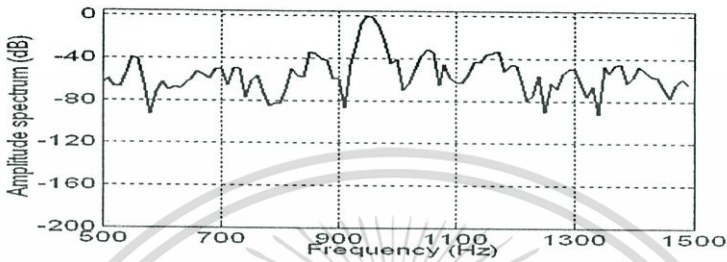
### 3.3 ตำรวจสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นด้วยสาเหตุต่างๆ

ในหัวข้อนี้เป็นการทบทวนจากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งเกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้สเปกตรัมฟอลต์สำหรับการทำนายความล้มเหลวของส่วนประกอบต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ที่สำคัญได้แก่ขดลวดสเตเตอร์ (Stator winding) แท่งตัวนำโรเตอร์ (Rotor bar) และรองลื่น (Bearing) ดังต่อไปนี้

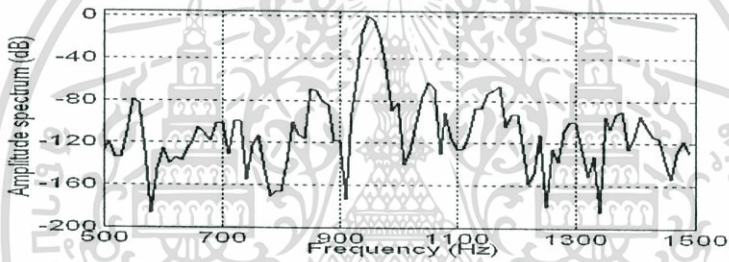
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



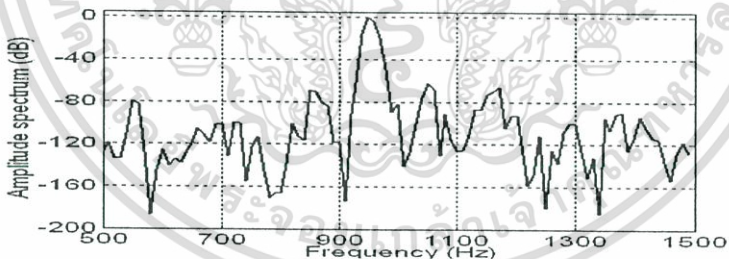
(a) เทคนิค FFT



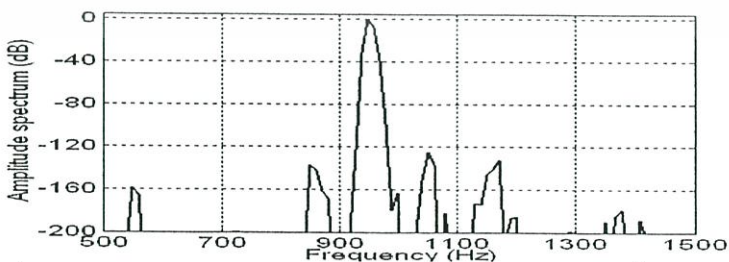
(b) เทคนิค FFT ร่วมกับตัวกรองวินโดว์ฮานนิง



(c) เทคนิค FFT ร่วมกับตัวกรองวินโดว์ฮานนิงและสเปกตรัมกำลัง



(d) อินเตอร์โพลेटข้อมูล เทคนิค FFT ร่วมกับตัวกรองวินโดว์ฮานนิง



(e) อินเตอร์โพลेटข้อมูล เทคนิค FFT ร่วมกับตัวกรองวินโดว์ฮานนิงและสเปกตรัมกำลัง

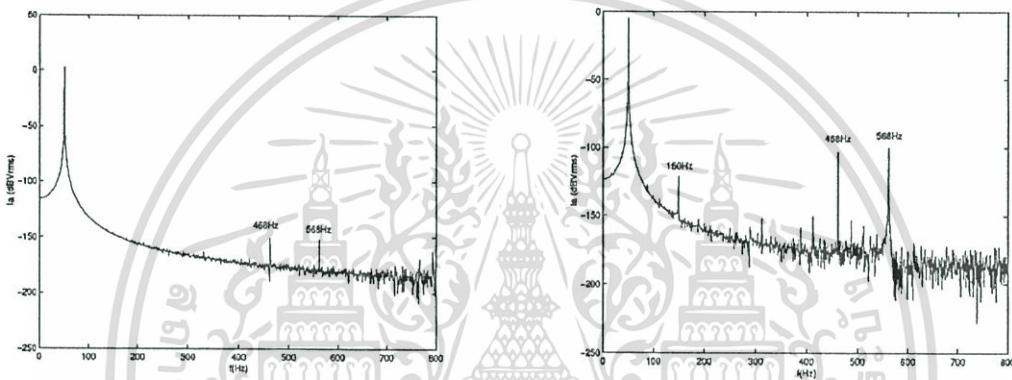
### รูปที่ 3.15 การวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

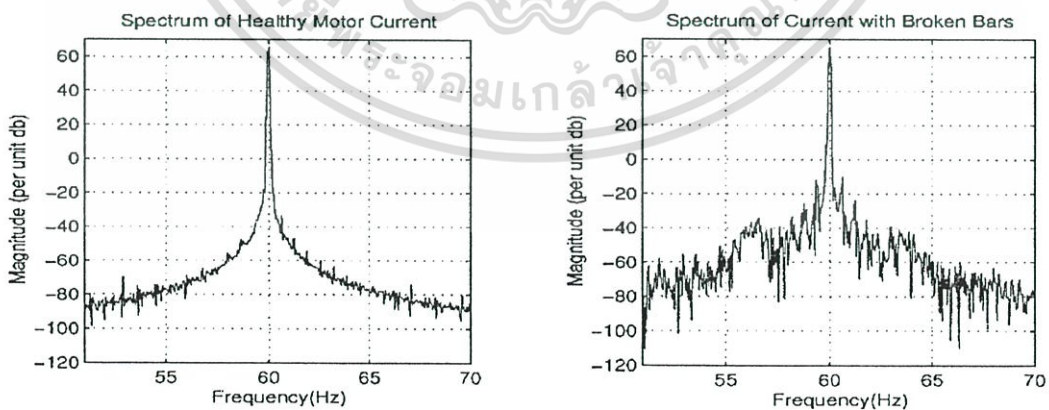
### 3.3.1 สเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ล้มเหลว

สเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากปัญหาของขดลวดสเตเตอร์ ( $f_{st}$ ) จะมีความถี่ที่สัมพันธ์กับความถี่มูลฐาน ( $f$ ) จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก ( $p$ ) สลิป ( $s$ ) และจะมีความถี่ในแต่ละอันดับตามค่าของ  $n=1,2,3,\dots$  และ  $k=1,3,5,\dots$  ดังสมการที่ (3.6) รูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 แสดงสเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากปัญหาของขดลวดสเตเตอร์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ฟัดด์ 3 kW

$$f_{st} = f_1 \left[ \frac{n}{p} (1-s) \pm k \right] \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.16 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ฟัดด์ 3 kW แสดงสภาวะมอเตอร์สมบูรณ์ (ซ้าย) และขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบ (ขวา) [21]



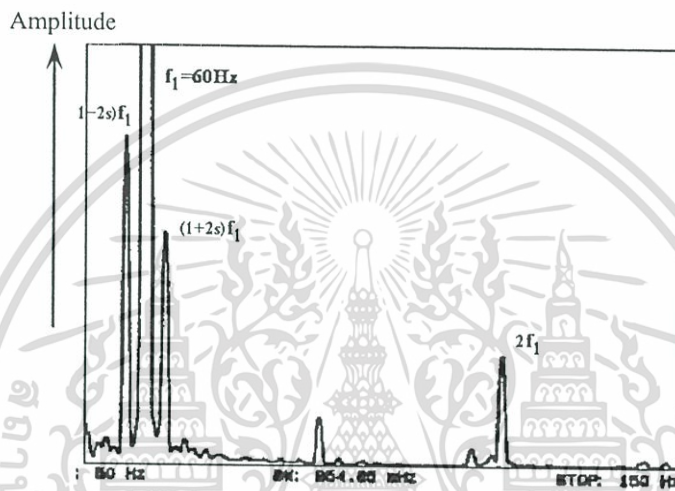
รูปที่ 3.17 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ฟัดด์ 2.2 kW แสดงสภาวะมอเตอร์สมบูรณ์ (ซ้าย) และแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (ขวา) [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 สเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากแท่งตัวนำโรเตอร์ล้มเหลว

แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (Broken rotor bars) จะทำให้เกิดมีฮาร์มอนิก ( $f_{br}$ ) ที่มีความถี่เท่ากับ  $\pm 2sf_i$  ดังสมการที่ (3.7) ปรากฏอยู่ด้านข้างความถี่มูลฐาน รูปที่ 3.18 แสดงสเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากปัญหาของตัวนำโรเตอร์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ต่างกัน 2 พิกัด

$$f_{br} = f_1(1 \pm 2s) \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.18 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์พิกัด 7.5 kW แสดงความผิดปกติเนื่องจากแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก [47]

### 3.3.3 สเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากrong ล้มเหลว

สเปกตรัมฟอลต์เนื่องจากปัญหาของrong ล้มเหลวจะมีด้วยกันหลายความถี่ โดยจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ทำให้เกิดการสั้นได้แก่ สเปกตรัมฟอลต์ความถี่  $f_o$  ที่เกิดขึ้นเนื่องจากวงแหวนส่วนนอกของrong ล้มเหลว สเปกตรัมฟอลต์ความถี่  $f_i$  ที่เกิดขึ้นจากวงแหวนส่วนในของrong ล้มเหลว และความถี่  $f_b$  เนื่องจากความเสียหายของลูกปืนที่มีสมการตามลำดับดังต่อไปนี้

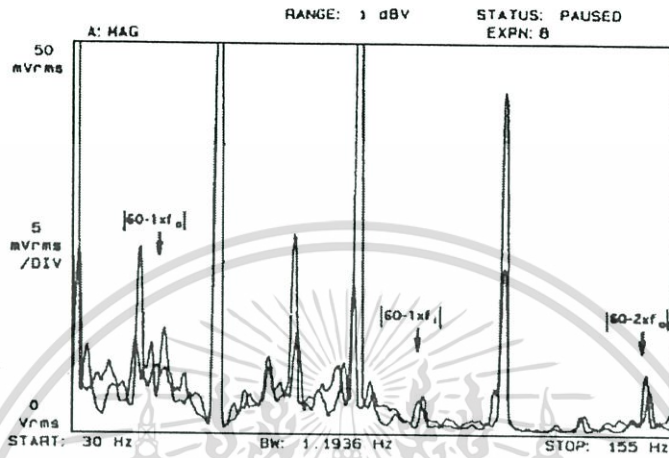
$$f_o = \frac{n}{2} f_{rm} \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (3.8)$$

$$f_i = \frac{n}{2} f_{rm} \left[ 1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (3.9)$$

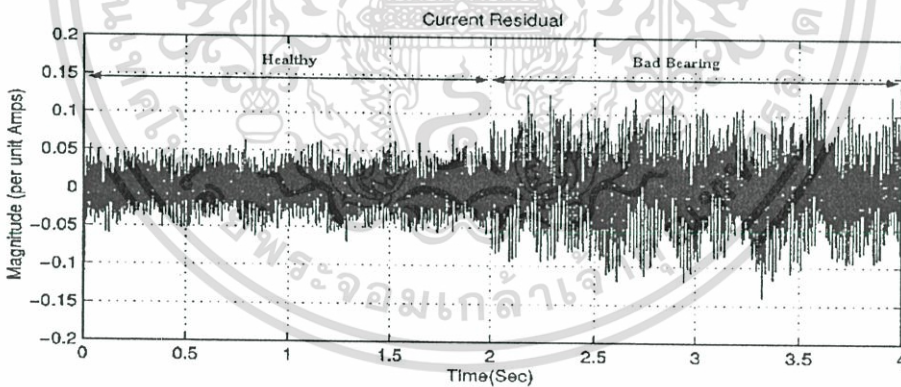
$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rm} \left[ 1 - \left( \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆและวิธีการคำนวณหาค่าความถี่ที่เกิดขึ้นในสภาวะนี้สามารถดูใน [48] รูปที่ 3.19 แสดงสเปกตรัมที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในโดเมนเวลาเมื่อร่องลื่นชำรุดในรูปที่ 3.20



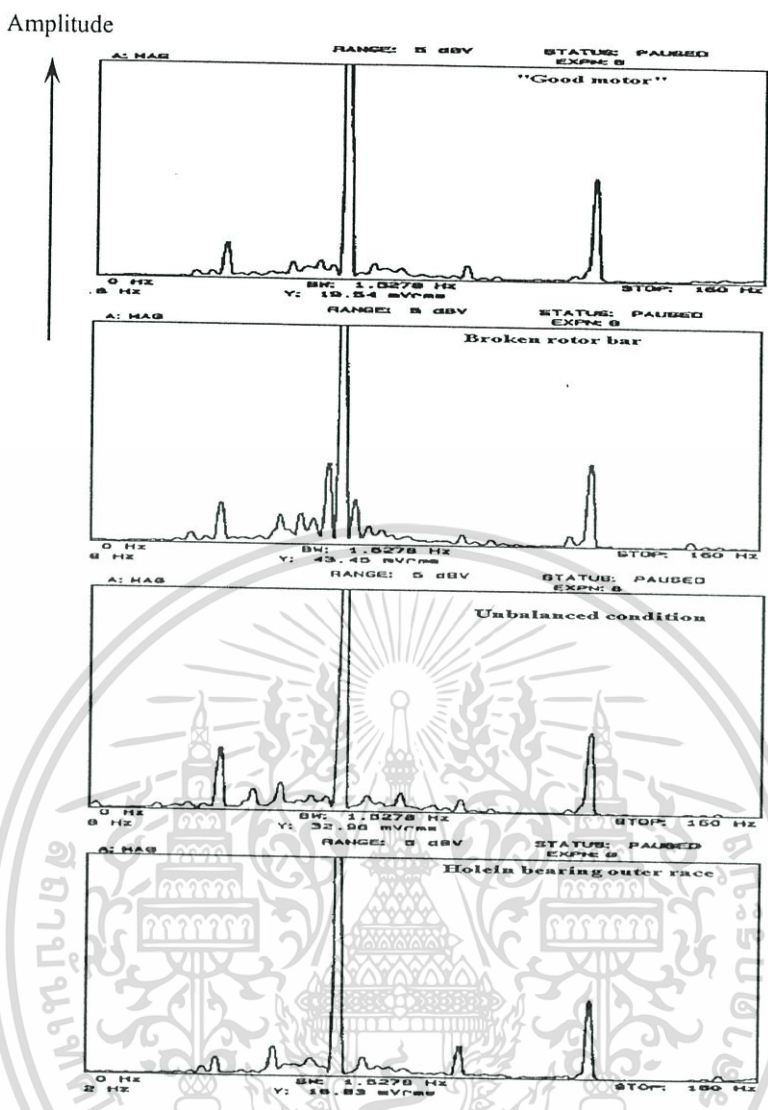
รูปที่ 3.19 สเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ที่สภาวะโหลด 0% และ 100% กรณีร่องลื่นในมอเตอร์ชำรุด [48]



รูปที่ 3.20 การเปลี่ยนแปลงของกระแสมอเตอร์ระหว่างสภาวะสมบูรณ์และร่องลื่นชำรุด [46]

จากรูปสเปกตรัมฟอลต์ตามที่ได้ทบทวนมานี้ เป็นการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดกรณีความถี่เหลวกับส่วนประกอบนั้นๆของมอเตอร์ อย่างไรก็ตามการวินิจฉัยโดยปราศจากการเปรียบเทียบกับสภาวะมอเตอร์ที่สมบูรณ์จะทำให้การวินิจฉัยมีความผิดพลาดขึ้นได้ นอกจากนี้แล้วในสภาวะที่มอเตอร์สมบูรณ์ก็อาจจะมีส่วนประกอบฟอลต์เกิดขึ้นได้เช่นกัน โดยจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



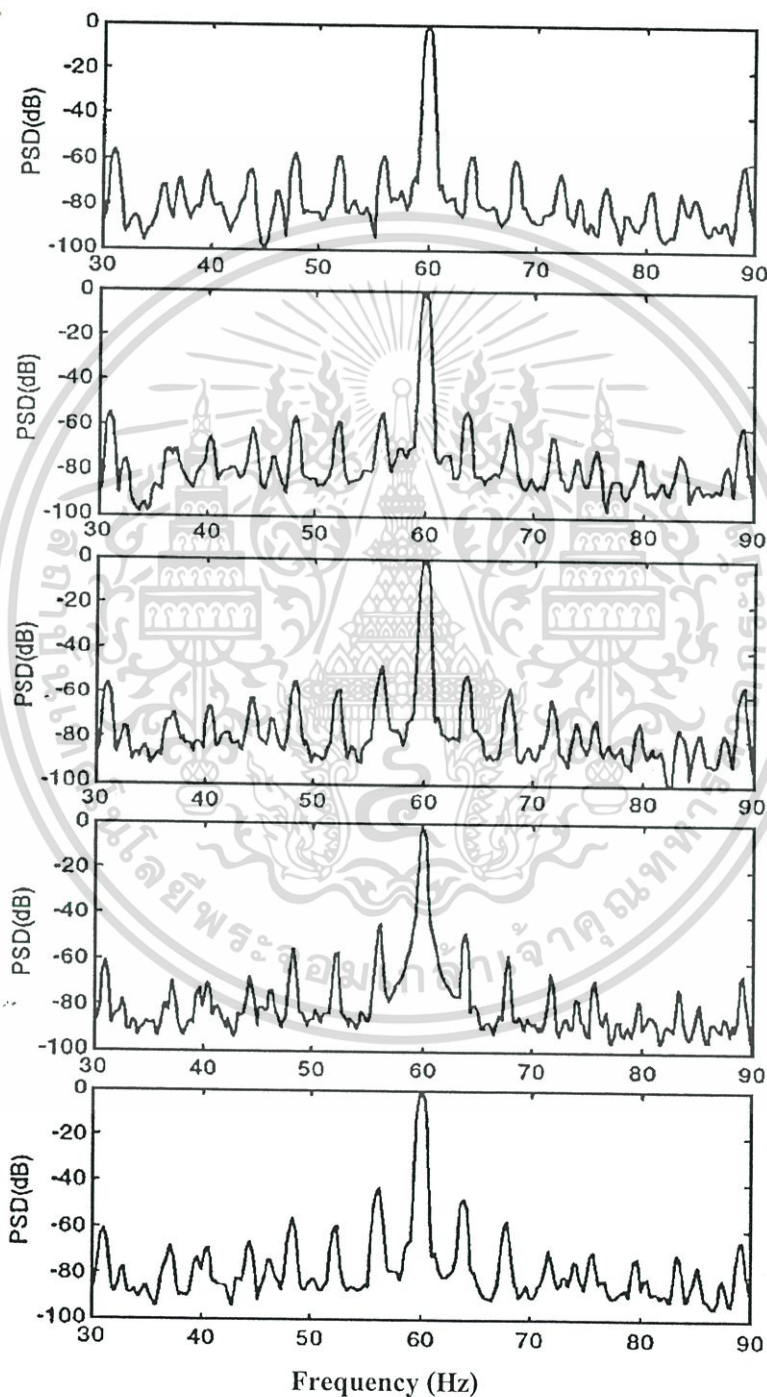
รูปที่ 3.21 สเปกตรัมฟอสต์ในสัญญาณมอเตอร์แสดงสถานะมอเตอร์สมบูรณ์ แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก สถานะการหมุนไม่สมดุล และร่องลื่นชำรุดจากบนลงล่างตามลำดับ [49]

### 3.3.4 ปัญหาการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้ได้มุ่งเน้นถึงข้อเสนอแนะในการวิเคราะห์สัญญาณมอเตอร์ เพื่อการวินิจฉัยเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ผลการสำรวจจากงานวิจัยที่ผ่านมาในรูปที่ 3.21 ซึ่งถึงแม้ว่าสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจะมีความถี่ขึ้นอยู่กับความถี่ของส่วนประกอบมอเตอร์ก็ตาม แต่จากผลของสเปกตราที่ได้แสดงในรูปนี้ ก็ทำให้การวินิจฉัยถึงสาเหตุมีความยุ่งยากพอสมควร ยิ่งไปกว่านั้นที่ความถี่เดียวกันแต่ที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ในรูปที่ 3.22 ซึ่งพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงของสเปกตราที่น้อยมาก นอกจากนี้แล้วถึงแม้ว่ามอเตอร์ที่มีพิกัดเดียวกัน (พารามิเตอร์ต่างๆเหมือนกัน) ผลิตจากบริษัทเดียวกันแล้วก็ตามก็อาจจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันได้ ทั้งนี้ก็ด้วยจากส่วนประกอบที่ต้องจัดวางอย่างพิถีพิถัน โดยเฉพาะการปรับแต่งช่องว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ (Air gap) ระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ที่จำเป็นต้องให้มีขนาดที่เท่ากันซึ่งเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเป็นไปได้น้อยมากที่จะสร้างมอเตอร์ในสายการผลิตเดียวกันให้สมบูรณ์เหมือนกันทุกตัว ด้วยเหตุผลนี้จึงแนะนำว่าเมื่อได้จัดซื้อมอเตอร์ตัวใหม่มาควรเก็บข้อมูลของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นเพื่อใช้อ้างอิง สำหรับการวินิจฉัยที่มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.22 สเปกตรัมพอลต์กระแสสเตเตอร์แสดงสถานะมอเตอร์สมบูรณ์และสถานะจาก 1 ถึง 4

ของแท่งตัวนำโรเตอร์แตกหักจากบนลงล่างตามลำดับ [50]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 สรุป

การวินิจฉัยความล้มเหลวของมอเตอร์ด้วยการวิเคราะห์จากสเปกตรัมฟอลต์เป็นวิธีที่มีความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถนำมาวินิจฉัยถึงต้นเหตุของความล้มเหลวได้ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายด้านการซ่อมบำรุงน้อยกว่าเดิมรวมถึงการวางแผนการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นในแต่ละมอเตอร์จะมีความแตกต่างกัน ซึ่งทำให้จำเป็นต้องมีการเก็บเป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการเกิดฟอลต์ ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการรบกวนของสเปกตรัมเมื่อผ่านการแปลงด้วย FFT สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ตัวกรองวินโดว์ ทั้งนี้ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสเปกตรัมที่เกิดจากการรบกวนจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกที่เกิดจากโครงสร้างของเครื่องจักรกลทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าเป็นฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงหรือเกิดจากการรบกวน รวมถึงการที่ไม่สามารถตรวจจับได้เนื่องจากถูกปิดบังด้วยโพลข้างของฮาร์มอนิกที่มีขนาดมากกว่า เป็นผลให้การวินิจฉัยเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ และจากการทดลองในเบื้องต้นของการประมาณค่าสเปกตรัมของแรงดันมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการออกแบบข้อมูล จะสามารถทำให้สเปกตรัมที่มีสาเหตุเกิดขึ้นจริงมีความโดดเด่นอย่างชัดเจน จากการทดลองพบว่าการออกแบบข้อมูลโดยใช้ตัวกรองวินโดว์ร่วมกับการอินเทอร์โพลตข้อมูล และสเปกตรัมกำลัง จะสามารถทำให้สเปกตรัมที่ต้องการตรวจจับมีความโดดเด่นได้มากที่สุด

## บทที่ 4

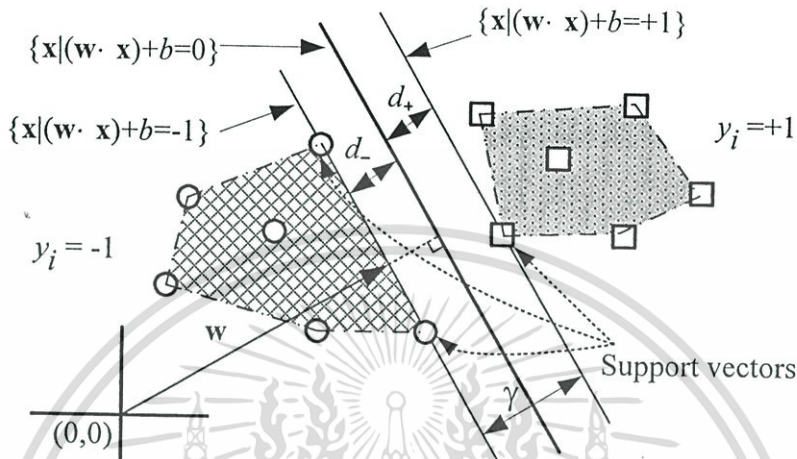
# การออกแบบการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ด้วยอัลกอริทึมของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ที่ผ่านมามีการแยกแยะความรุนแรงของฟอลต์นั้นสามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีซึ่งเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายคือการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neuron network) ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมนี้ ประกอบไปด้วยองค์ประกอบพื้นฐานจำนวนมากที่มีลักษณะการทำงานแบบคู่ขนานพร้อมกัน การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมมีลักษณะการเชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบเหมือนกับการทำงานของสมองคน โครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำงานได้ต้องอาศัยการปรับค่าของพารามิเตอร์ในการเชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบที่เรียกว่า ตัวน้ำหนักประสาท (Weight) และไบอัส (Bias) ในระหว่างการเรียนรู้ (Train) โดยที่โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบไปด้วยโนดที่วางซ้อนกันเป็นชั้น ทั้งนี้จุดเด่นของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนอยู่ตรงที่มีการออกแบบอย่างมีหลักการมากขึ้น โดยอาศัยหลักการลดความเสี่ยงเชิงโครงสร้างให้ต่ำสุด ซึ่งแตกต่างจากโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้หลักการลดความเสี่ยงเชิงทดลองให้ต่ำสุด และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนไม่ต้องมีการกำหนดจำนวนของชั้นซ่อน เนื่องจากมีชั้นซ่อนเพียงชั้นเดียวเรียกแทนว่าปริภูมิลักษณะเด่น ซึ่งใช้สำหรับสร้างระนาบเกินที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแทนกลุ่มข้อมูล ข้อแตกต่างอีกประการคือซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนจะใช้ข้อมูลอินพุต หรือซัพพอร์ตเวกเตอร์ที่เกิดจากการฝึกสอนเป็นเวกเตอร์น้ำหนักระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นซ่อนแล้วยังใช้เวลาในขั้นตอนการเรียนรู้น้อยกว่า แต่ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องมากกว่า [51-53]

### 4.1 ทฤษฎีซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ค่าประสิทธิภาพของสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ( $v_{d_{fsr}}$ ,  $v_{q_{fsr}}$  and  $v_{0_{fl}}$ ) ได้ถูกนำมาแยกพิจารณาเป็น 3 คุณลักษณะเฉพาะและถูกใช้สำหรับการเรียนรู้ด้วยอัลกอริทึมของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ทั้งนี้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนเป็นเทคนิคหนึ่งของเทคนิคการเรียนรู้ด้วยเครื่องจักร (Machine learning) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานที่เกี่ยวข้องกับการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) ตลอดจนการแก้ปัญหาการจัดกลุ่ม (Classification problem) หลักการของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน คือ การสร้างไฮเปอร์เพลนที่เหมาะสมบนระนาบของข้อมูลตัวอย่าง (Training data) เพื่อแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน (โดยสมมติว่ากลุ่มข้อมูลตัวอย่างสามารถแบ่งแยกออกจากกันได้) ในการสร้างไฮเปอร์เพลนที่เหมาะสมจะนิยามระยะห่างระหว่างจุดของข้อมูล (Training data) ที่อยู่ใกล้กับไฮเปอร์เพลนมากที่สุดทั้งสองด้าน คือ  $d_+$  และ  $d_-$  ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$d$  ระยะมารจิ้น (Margin)  $\gamma$  เกิดจากระยะ  $d_+$  +  $d_-$  ไฮเปอร์เพลนที่เหมาะสมคือไฮเปอร์เพลนที่มีค่ามารจิ้น  $\gamma$  กว้างที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยข้อมูลตัวอย่างที่อยู่บนขอบของมารจิ้น  $\gamma$  จะถูกเรียกว่า *ซัพพอร์ตเวกเตอร์* (Support vector)



รูปที่ 4.1 การแบ่งกลุ่มข้อมูลตัวอย่าง ( $\square$  และ  $\circ$ ) ด้วยไฮเปอร์เพลนโดยใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

จากรูปที่ 4.1 เป็นการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบ 2 กลุ่ม (Binary classification problem) กำหนดให้กลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน (Training dataset) ประกอบด้วย  $l$  ตัวอย่าง (Samples) ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในรูป  $\{x_k, y_k\}$  เมื่อ  $k = 1, 2, \dots, l$  และ  $x_k \in \mathcal{R}^n$ ,  $y_k \in \{-1, +1\}$  โดย  $x_k$  จะเป็นเวกเตอร์อินพุต ในขณะที่  $y_k$  จะเป็นคลาสของข้อมูล (Class label) หลักการของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน คือ การสร้างไฮเปอร์เพลนที่เหมาะสมบนระนาบของข้อมูลตัวอย่าง เพื่อแบ่งกลุ่มของข้อมูลทั้งสอง ซึ่งไฮเปอร์เพลนดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์  $(w, b)$  ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดย  $w$  เป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับไฮเปอร์เพลน และ  $b$  จะเป็นค่าคงที่ซึ่งกำหนดตำแหน่งของเวกเตอร์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งดั้งเดิมในปริภูมิอินพุต (Input space) โดยสมการของไฮเปอร์เพลนแบบเชิงเส้น (Linear hyperplane) จะถูกกำหนดโดยสมการ  $(w \cdot x) + b = 0$  และเพื่อลดปัญหาในเรื่องของสเกล  $w$  และ  $b$  จะถูกกำหนดด้วยสมการ  $|(w \cdot x) + b| = 1$  สำหรับจุดที่อยู่ใกล้ไฮเปอร์เพลนมากที่สุด ดังนั้นจึงสามารถแสดงสมการของไฮเปอร์เพลนได้ดังนี้

$$y_i [(w \cdot x_i) + b] \geq 1 \quad \forall i \quad (4.1)$$

สิ่งที่กล่าวข้างต้นการฝึกสอนด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน จะเป็นการคำนวณหาไฮเปอร์เพลนที่มีค่ามาร์จิ้นกว้างที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากการทำให้ค่า  $w$  มีค่าน้อยที่สุด โดยปัญหาดังกล่าวสามารถหาคำตอบได้โดยใช้วิธี Lagrange Multipliers ดังนี้

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i (x_i \cdot w + b) + \sum_{i=1}^l \alpha_i \quad (4.2)$$

โดยตัวแปร  $\alpha_i \geq 0$  จะถูกเรียกว่า Positive lagrange multipliers จากสมการที่ (4.2) ต้องการให้ค่าของ  $L(w, b, \alpha)$  มีค่าน้อยที่สุด โดยเทียบกับค่าเวกเตอร์น้ำหนัก (Weight vector)  $w$  และ  $b$  (Primal variables) ในขณะเดียวกันค่าของ  $L(w, b, \alpha)$  จะต้องมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับ  $\alpha_i \geq 0$  (Dual variables) [54] โดยปัญหาดังกล่าวสามารถหาคำตอบได้โดยอาศัยวิธี Wolfe Dual ดังนั้นสมการที่ใช้เพื่อหาคำตอบของสมการที่ (4.2) สามารถแสดงได้ดังนี้

- Maximize

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \quad (4.3)$$

- Subject to

$$(1) \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0 \text{ และ } (2) \alpha_i \geq 0 \text{ for } i = 1, 2, \dots, l$$

จากสมการที่ (4.3) ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนที่ทำให้ค่าของ  $\alpha_i > 0$  ซึ่งถูกเรียกว่าซัพพอร์ตเวกเตอร์ จะวางตัวอยู่บนขอบของมาร์จิ้น สำหรับข้อมูลตัวอย่างที่เหลือซึ่งให้ค่าของ  $\alpha_i = 0$  สามารถจะถูกตัดทิ้งได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อไฮเปอร์เพลนที่สร้างขึ้น ดังนั้นฟังก์ชันการตัดสินใจของสมการที่ (4.1) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$f(x) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i (x \cdot x_i) + b\right) \quad (4.4)$$

จากอัลกอริทึมที่กล่าวมาข้างต้น จะเหมาะสำหรับในกรณีที่กลุ่มข้อมูลตัวอย่างสามารถถูกแบ่งแยกได้ด้วยไฮเปอร์เพลนแบบเชิงเส้นเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้อัลกอริทึมดังกล่าวสามารถแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear dataset) จึงจำเป็นต้องแปลงกลุ่มข้อมูลตัวอย่างไปสู่ปริภูมิมิติที่สูงขึ้น (Higher dimensional space) ซึ่งถูกเรียกว่าปริภูมิคุณลักษณะเฉพาะ (Feature space) โดยการแปลงดังกล่าวจะกระทำผ่านฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Phi : \mathcal{X}^n \rightarrow F \quad (4.5)$$

กำหนดให้  $\Phi$  แสดงการแมพ (Mapping) ดังเช่นในรูปที่ 4.2 จากปริภูมิของกลุ่มข้อมูลตัวอย่าง (Input Space) ไปสู่ปริภูมิคุณลักษณะเฉพาะ โดยในที่นี้จะต้องรวมขั้นตอนดังกล่าวเข้ากับสมการที่ (4.3) ซึ่งสามารถทำได้โดยการแทนที่ทุกค่าของ  $x_i$  ด้วย  $\Phi(x_i)$  โดยในที่นี้จะหลีกเลี่ยงการคำนวณค่า  $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$  โดยตรงเนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้เวลาในคำนวณสูง แต่เราจะใช้เทคนิคของฟังก์ชันเคอร์เนล (Kernel function) ในการคำนวณแทน โดยฟังก์ชันเคอร์เนลสามารถนิยามได้ดังนี้

$$K(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j) \quad (4.6)$$

แทนที่เคอร์เนล  $K$  ลงในสมการที่ (4.3) ทำให้สามารถแสดงสมการซึ่งใช้ในการหาค่าของไฮเปอร์เพลนแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ดังนี้

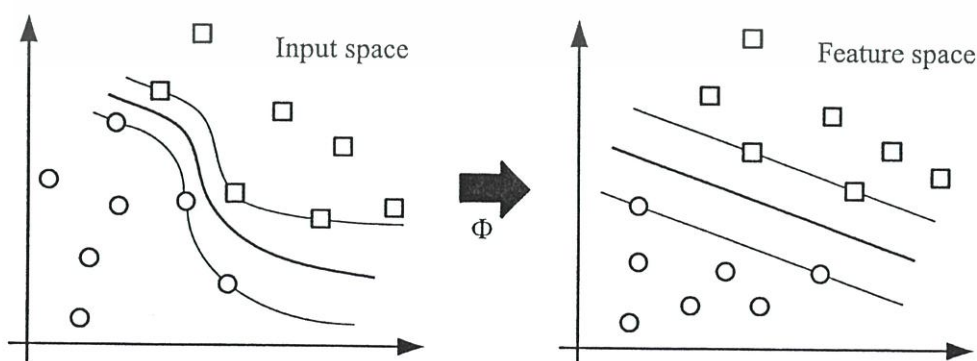
- Maximize

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (4.7)$$

- Subject to

$$(1) \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0 \text{ และ } (2) 0 \leq \alpha_i \leq C \quad \forall i$$

โดย  $C$  จะเป็นค่าคงที่เพื่อใช้ในการปรับหรือชดเชยระหว่างค่าผิดพลาดของการฝึกสอนและความซับซ้อนของแบบจำลอง (Model complexity)

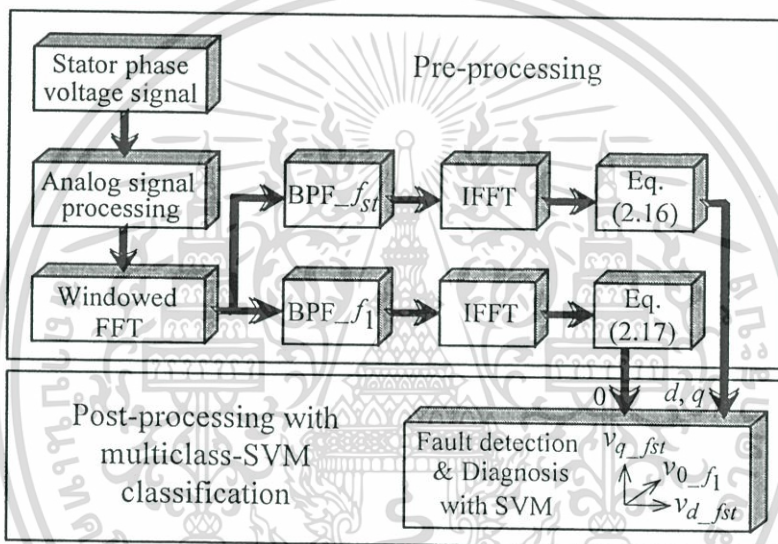


รูปที่ 4.2 การแมพแบบไม่เป็นเชิงเส้นจากปริภูมิของกลุ่มข้อมูลตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนำไปสู่ปริภูมิคุณลักษณะเฉพาะ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ขั้นตอนการออกแบบการแยกแยะฟอลต์สแตเตอร์

อัลกอริทึมสำหรับการตรวจจับและการแยกแยะฟอลต์สแตเตอร์ สำหรับการวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแสดงในลักษณะบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.3 โดยได้แยกออกเป็น 2 ขั้นตอนของการประมวลผลที่สำคัญคือ การประมวลผลขั้นต้น (Pre-processing) และการประมวลผลสุดท้าย (Post-processing) ซึ่งการประมวลผลขั้นต้นเป็นการประมวลผลสำหรับการดึงคุณลักษณะเฉพาะของฟอลต์สแตเตอร์ด้วยวิธีการขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่นำเสนอ ซึ่งได้ออกมาเป็น 3 คุณลักษณะเฉพาะได้แก่  $v_{d\_fst}$ ,  $v_{q\_fst}$  และ  $v_{0\_f1}$  แล้วจึงนำไปสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในขั้นตอนของการประมวลผลสุดท้ายต่อไป



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการคำนวณหาองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  สำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์

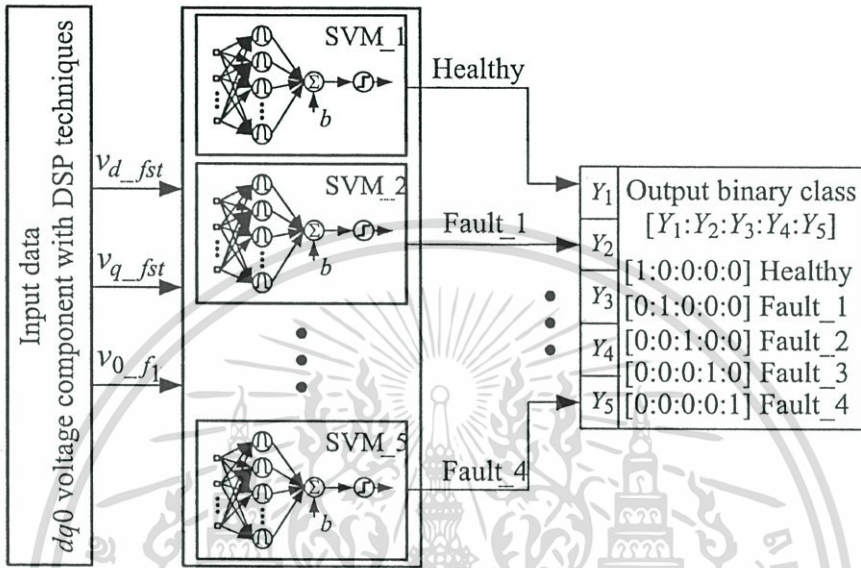
ในบล็อกไดอะแกรมได้แสดงถึงขั้นตอนทั้งหมด ตั้งแต่ข้อมูลของสัญญาณแรงดันจนถึงขั้นตอนของการวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์ ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบมอเตอร์ต้องต่อแบบวายและที่จุดต่อวายไม่ต้องต่อเข้ากับสายนิวทรัลของแหล่งจ่ายไฟ โดยเริ่มต้นจากข้อมูลของแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละเฟสของมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้ง 3 เฟสจะถูกลดระดับแรงดันโดยใช้โพรบวัดแรงดันให้อยู่ในค่าที่การ์ด DAQ สามารถรับค่าได้ หลังจากนั้นจึงได้ใช้การประมวลผลสัญญาณอนาล็อกด้วยวงจรถอดลอก สำหรับการลดสัญญาณรบกวนและการปรับแต่งสัญญาณแรงดันก่อนส่งให้การ์ด DAQ ต่อไป หลังจากได้ข้อมูลสัญญาณแรงดันในลักษณะดิจิทัลทั้ง 3 เฟสแล้วได้ใช้การกรองอีกครั้งหนึ่งด้วยตัวกรองวินโดว์ชนิดฮานนิงก่อนแปลงไปยังโดเมนความถี่ด้วย FFT และที่บล็อกย่อยนี้ได้แยกการพิจารณาออกเป็น 2 แนวทาง เริ่มจากการใช้  $BPF_{fst}$  ซึ่งหมายถึงการยอมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เฉพาะสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ผ่านออกไปได้ ทั้งนี้ความถี่ตัดจะสัมพันธ์กับสมการที่ (2.11) เมื่อแทนพารามิเตอร์  $n=1, 2, 3, 4$ , และ  $5$  และ  $BPF_{f_1}$  จะหมายถึงเฉพาะองค์ประกอบมูลฐานเท่านั้นที่ผ่านออกไปได้ บล็อกไดอะแกรมย่อต่อมาเป็นการแปลงกลับมาสู่โดเมนเวลาโดยใช้ IFFT (Inverse fast Fourier transform) ก่อนใช้การแปลงเวกเตอร์ปาร์กแปลงไปเป็นสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ต่อไป กล่าวคือการคำนวณหาองค์ประกอบแรงดัน  $D$  กับองค์ประกอบแรงดัน  $Q$  ใช้สมการ (2.16) การคำนวณหาองค์ประกอบแรงดันศูนย์ (0) ใช้สมการที่ (2.17) องค์ประกอบแรงดันทั้ง 3 สัญญาณนี้มีชื่อเรียกเป็น  $v_{d_{fst}}$ ,  $v_{q_{fst}}$  และ  $v_{0_{fl}}$  ซึ่งจะถูกนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพและทำให้เป็นค่าเปอร์ยูนิต (Per-unit, pu) ทั้งนี้ค่าประสิทธิภาพในหน่วยเปอร์ยูนิตนี้จะถูกกำหนดเป็น 3 คุณลักษณะ ซึ่งจากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นกระบวนการดึงคุณลักษณะเฉพาะของฟอลต์สเตเตอร์ออกมาเรียกเป็นกระบวนการขั้นต้น สำหรับนำไปสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในกระบวนการสุดท้ายต่อไป ทั้งนี้ในส่วนของกระบวนการสุดท้ายนี้ ได้ใช้ 3 คุณลักษณะเฉพาะมาจัดเรียงเป็น  $X=[v_{d_{fst}}, v_{q_{fst}}, v_{0_{fl}}]$  สำหรับเป็นข้อมูลอินพุตให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่ออกแบบขึ้นในลักษณะเป็นซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบหลายคลาสซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดถัดไป

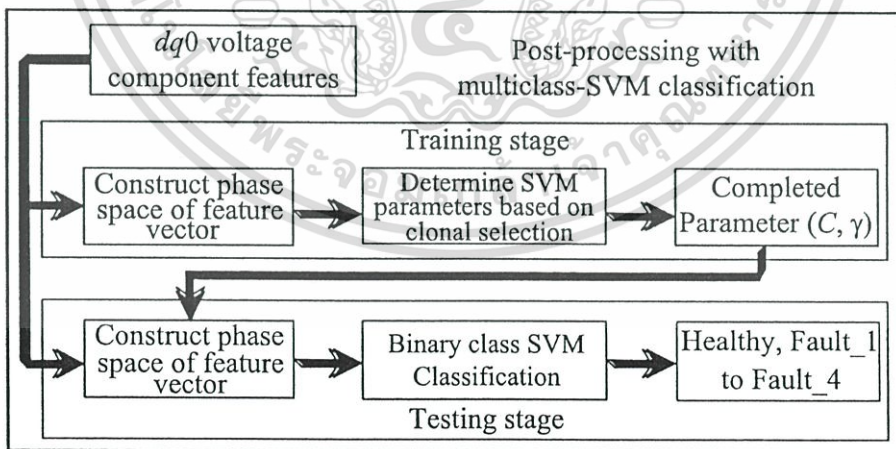
การแยกแยะด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนหลายคลาสในการประมวลผลสุดท้ายมีวิธีการแสดงในรูปที่ 4.4 โดยข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะ  $v_{d_{fst}}$ ,  $v_{q_{fst}}$  และ  $v_{0_{fl}}$  ได้ถูกนำมาใช้สำหรับทั้งการสอนและการทดสอบสำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้เทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับวิธีการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ที่ได้นำเสนอโดยใช้โปรแกรม JAVA และเพื่อลดความซับซ้อนของสมการจึงได้ใช้ไลบรารี LIBSVM ที่สร้างขึ้นโดย Chin-Jen Lin ที่สามารถลดความซับซ้อนของเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนทำให้ผู้พัฒนาโปรแกรมสามารถพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนได้ง่ายขึ้น ซึ่งมีวิธีการอย่างละเอียดแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [55] และได้ใช้เคอร์เนล RBF (Radial basis function (RBF) kernel) ในการประมวลผลหาค่า  $C$

ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ค่าคือ  $C$  และ  $\gamma$  ซึ่งหมายถึงพารามิเตอร์เคอร์เนลของฟังก์ชันเรเดียลเบสิก (Radial basis function-specific kernel parameter) ซึ่งได้จากการปรับของโมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน กระบวนการปรับค่าทั้ง 2 นี้โดยใช้กริดเซิร์ช (Grid search) ที่มีค่ามากกว่าสิบของ  $C-\gamma$  ทั้งนี้ขอบเขตของ  $C$  คือ  $2^{-5}, 2^{-3}, \dots, 2^{15}$  และขอบเขตของ  $\gamma$  คือ  $2^{-15}, 2^{-13}, \dots, 2^3$  ซึ่งค่าที่เหมาะสมของทั้ง  $C$  และ  $\gamma$  จะได้โดยการสอนโมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนด้วย 4 ใน 5 ส่วนของชุดข้อมูลสำหรับการสอน และ 1 ใน 5 ส่วนสำหรับทดสอบโมเดล โดยจะเลือกโมเดลที่ให้ค่าผิดพลาดในการแยกแยะน้อยที่สุด (Validation data) ทั้งนี้ค่า  $C$  และ  $\gamma$  ที่ได้มานี้จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับนำมาใช้ใน LIBSVM เพื่อความเป็นไปได้ของการประมาณค่าและการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของลิขสิทธิ์เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างฟังก์ชันสำหรับการประมาณค่าฟอลต์สแตเตอร์ในเทอมของความน่าจะเป็น ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้แสดงในลักษณะบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.5 ซึ่งมีรายละเอียดของเทคนิคการสร้างและอัลกอริทึมแสดงในเอกสารอ้างอิงที่ [43]



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน สำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์



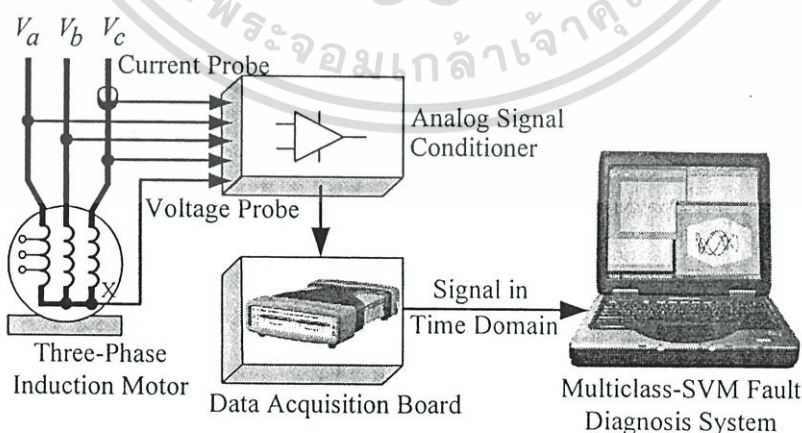
รูปที่ 4.5 วิธีการวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

จากอัลกอริทึมของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนหลายคลาสที่ได้นำเสนอไว้ เป็นการพัฒนามาจากการแยกแยะด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในแต่ละไปบนาริรวมกัน ซึ่งสามารถนำมาทำการเอกสารแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์ด้วยความรุนแรงที่แตกต่างกัน 5 ขั้น สภาวะ ซึ่งเป็น การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบคลาสต่อคลาสด้วยผลของเอาต์พุตที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 4.4 โดยการใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่มีวิธีการแบบ *one-against-the-rest* สำหรับการแยกแยะแบบไบนารีทั้ง 5 ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ในแต่ละโมเดลของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนได้ถูกสอนด้วย 1 ชุดข้อมูลของสภาวะมอเตอร์ที่มีสุขภาพดี (Healthy motor condition) และอีก 4 โมเดลถูกสอนด้วยชุดข้อมูลของฟอลต์สเตเตอร์ (Stator fault condition) ที่ความรุนแรง 4 สภาวะ สรุปแล้วได้มิติในลักษณะของเมตริกอินพุตคือ 1 ชุดข้อมูลอินพุต มี 1 แถว 3 คอลัมน์คือ  $[v_{d\_fst} \ v_{q\_fst} \ v_{0\_f1}]_{1 \times 3}$  และทำให้ได้เมตริกมุ่งหมายเอาต์พุตมีมิติเป็น 1 แถวชุดข้อมูลเอาต์พุต ซึ่งมีด้วยกัน 5 คอลัมน์คือ  $[Y_1 \ Y_2 \ Y_3 \ Y_4 \ Y_5]_{1 \times 5}$  ทั้งนี้จุดมุ่งหมายเอาต์พุตระหว่าง 0 และ 1 จะสอดคล้องกับข้อมูลการแยกแยะซึ่งนำเสนอในตารางที่ 4.1 อัลกอริทึมการแยกแยะด้วยซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่กล่าวมานี้ได้สร้างโดยใช้โปรแกรม JAVA และ LIBSVM ทั้งนี้โครงสร้างในลักษณะนี้ได้ประสบความสำเร็จในการวินิจฉัยฟอลต์ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel inverter) โดยใช้เทคนิคของโครงข่ายประสาทเทียมมาแล้ว [57]

ตารางที่ 4.1 การแบ่งแยกระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์

SVM number	Classification	Target
1 (Healthy)	Healthy	[1:0:0:0:0]
2 (Fault 1)	1% shorted turn	[0:1:0:0:0]
3 (Fault 2)	2% shorted turn	[0:0:1:0:0]
4 (Fault 3)	3% shorted turn	[0:0:0:1:0]
5 (Fault 4)	4% shorted turn	[0:0:0:0:1]



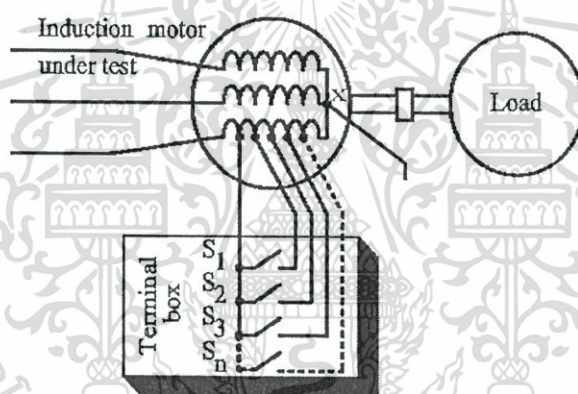
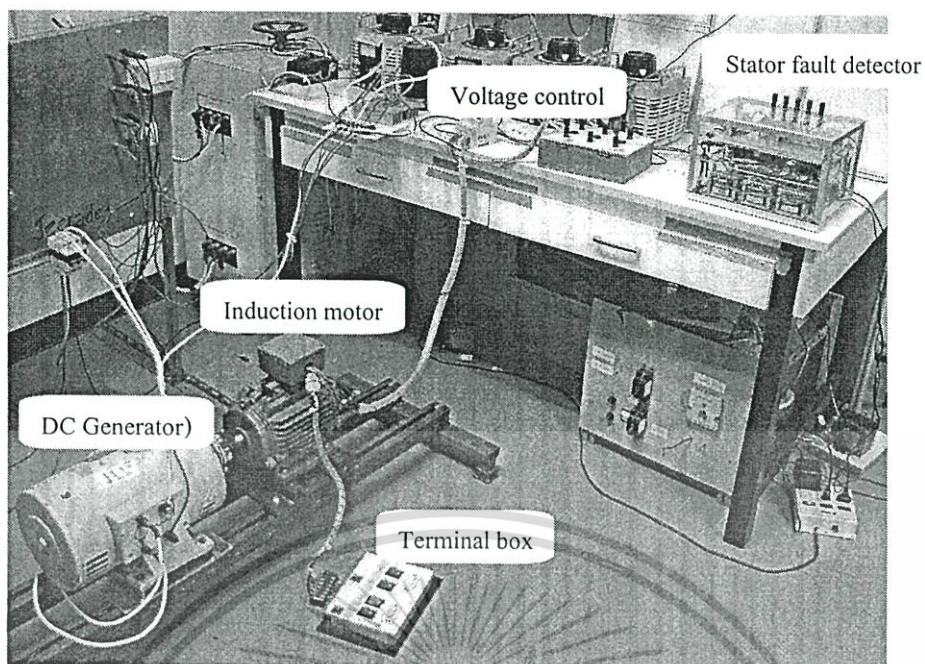
รูปที่ 4.6 โครงสร้างของชุดทดลองการตรวจจับและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ด้วยเทคนิคขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  เปรียบเทียบกับเทคนิค MCSA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การเตรียมการทดลอง

เพื่อที่จะประเมินสมรรถนะขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ถึงความสามารถของการตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์เพื่อเป็นชุดข้อมูลอินพุตให้กับซอฟต์แวร์วิเคราะห์แมชชีน สำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์นั้น ได้ทำการเปรียบเทียบกับเทคนิคของ MCSA ทั้งนี้ข้อมูลของทั้งแรงดันและกระแสมอเตอร์ถูกจัดเก็บโดยผ่านโพรบแรงดันทั้ง 3 เฟส และโพรบกระแส 1 เฟส สำหรับการทดลองของทั้งองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  และเทคนิค MCSA แสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงรูปจริงของชุดการทดลองและลักษณะของการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ ทั้งนี้สำหรับการจัดเก็บข้อมูลได้ใช้การ์ด DAQ Agilent U2356A 16 บิต โดยผ่านพ्ल็อต USB ด้วยอัตราการสุ่ม 20 kHz โดยทำการจัดเก็บด้วยช่วงเวลา 0.5 วินาที ทำให้ได้ 400 ข้อมูลใน 1 ไซเคิล ทำการวิเคราะห์ด้วย 10,000 ข้อมูล การทดสอบการวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำกรณีฟอลต์สเตเตอร์นี้ได้ออกแบบมอเตอร์สำหรับการเกิดขึ้นของฟอลต์สเตเตอร์ที่สภาวะลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบคือ 1%, 2%, 3% และ 4% ของจำนวนรอบทั้งหมดใน 1 เฟส โดยได้ทำการทดลองกับมอเตอร์ 2 พิกัดที่มีพารามิเตอร์ต่างกันแสดงในตารางที่ 4.2 โดยโหลดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และในขณะที่ทดสอบมอเตอร์ต่อแบบวอยโดยที่จุดต่อวอยของขดลวดสเตเตอร์ (x) ไม่ต่อเข้ากับสายนิวตรอลของแหล่งจ่ายไฟ

สำหรับการคำนวณหาตำแหน่งความถี่ของฟอลต์สเตเตอร์แสดงในตารางที่ 4.3 จากตารางพบว่าถ้าเป็นการทดลองภายใต้การทำงานไว้โหลดสเปคตรัมฟอลต์สเตเตอร์ที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เป็น 3 เท่าของมูลฐานหรือเรียกเป็นฮาร์โมนิกทริปเปิล (Triple harmonic) แต่ถ้าเป็นการทดลองที่สภาวะมีโหลดสเปคตราฟอลต์สเตเตอร์จะมีความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเล็กน้อย ผลการทดลองในเบื้องต้นพบว่านอกจากขนาดของฟอลต์สเตเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของขดลวดที่ลัดวงจรแล้ว ในกรณีของมอเตอร์ที่มีความสมบูรณ์ก็จะปรากฏฮาร์โมนิกทริปเปิลที่ความถี่ 75 Hz และ 150 Hz ได้เช่นกัน ซึ่งจากการวิจัยใน [16] ได้อธิบายถึงสาเหตุของการเกิดขึ้นดังนี้ แหล่งกำเนิดขององค์ประกอบความถี่ 25 Hz และ 75 Hz มาจากองค์ประกอบความเร็วการหมุนที่  $\pm f_r$  (Rotational speed components) สำหรับองค์ประกอบความถี่ 100 Hz เกิดขึ้นเนื่องจากผลความไม่สมมาตรอย่างแท้จริงของตัวนำสเตเตอร์และวงจรแม่เหล็ก และแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟที่ไม่สมดุล และองค์ประกอบความถี่ 150 Hz เนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะ B-H ของวงจรแม่เหล็ก



รูปที่ 4.7 (บน) รูปจริงของชุดการทดลอง (ล่าง) ลักษณะของการลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบที่ใช้ในการทดลอง

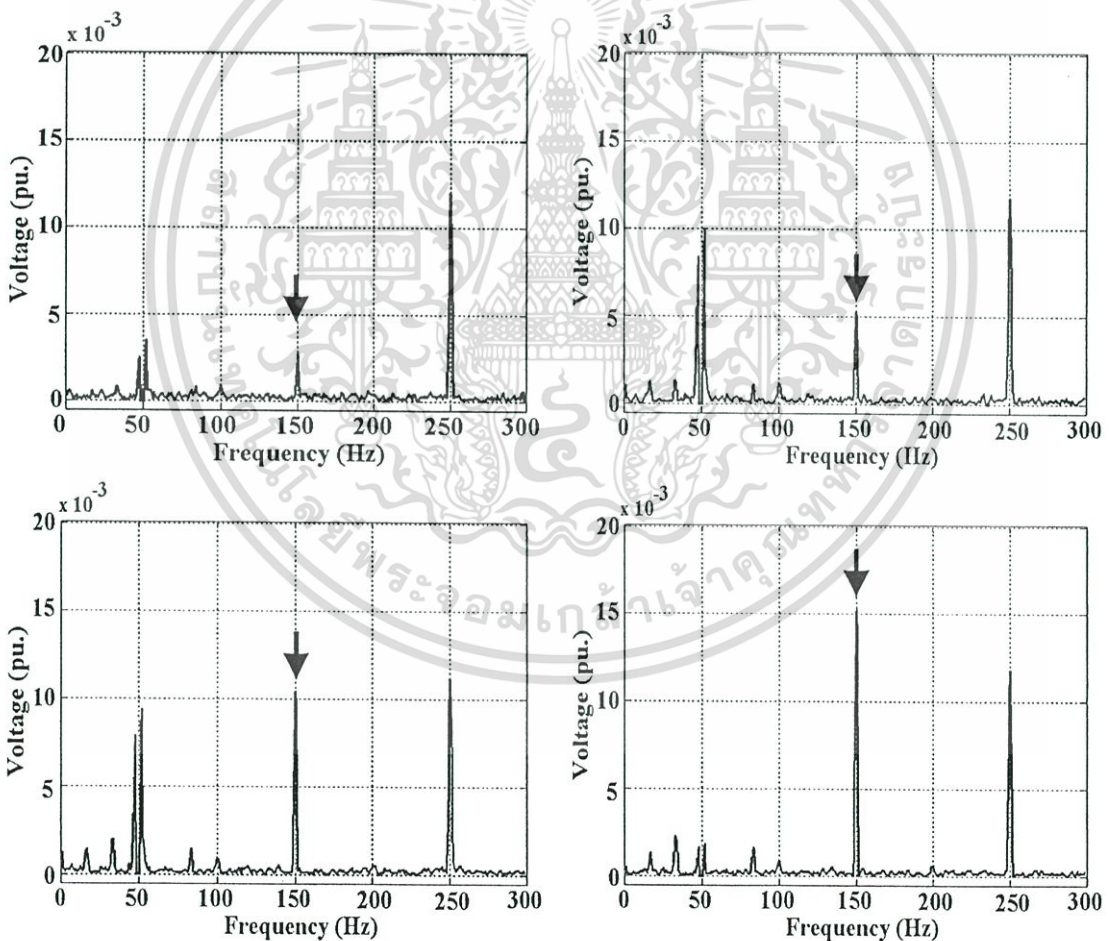
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 พิกัด

รายละเอียด	IM_1	IM_2
พิกัดกำลัง (Hp)	2	3
แรงดันใช้งาน (V)	380	380
กระแสเต็มพิกัด (A)	3.7	4.5
ความถี่ (Hz)	50	50
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4	6
จำนวนตัวนำสเตเตอร์ต่อเฟส	282	270
ความเร็วที่พิกัดโหลด (rpm)	1390	935

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ความถี่ของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ที่สัมพันธ์กับตัวนำสเตเตอร์ลัดวงจร  
ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.11)

n	$-f_{st}$ (Hz)			$+f_{st}$ (Hz)			ช่วงการเปลี่ยนแปลงความถี่(Hz)
	โหลด 0%	โหลด 50%	โหลด 100%	โหลด 0%	โหลด 50%	โหลด 100%	
1	25.00	25.92	26.83	75.00	74.08	73.17	1.83
2	0.00	1.83	3.67	100.00	98.17	96.33	3.67
3	25.00	22.25	19.50	125.00	122.25	119.50	5.50
4	50.00	46.33	42.67	150.00	146.33	142.67	7.33
5	75.00	70.42	65.83	175.00	170.42	165.83	9.17



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ (สรชี) ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันมอเตอร์ (บนซ้าย) สุขภาพดี (บนขวา) ลัดรอบ 1% (ล่างซ้าย) ลัดรอบ 2% และ (ล่างขวา) ลัดรอบ 3%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบสเปกตรัมพอลต์สเตเตอร์ ทั้งในสัญญาณแรงดันและกระแสแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ จากการทดลองในเบื้องต้นนี้พบว่าสัญญาณกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสเปกตรัมพอลต์สเตเตอร์ ตามสภาวะความรุนแรงของการลัดวงจรอย่างชัดเจนมากกว่าการพิจารณาด้วยสัญญาณแรงดัน ทั้งนี้การใช้เทคนิค MCSA สำหรับการเปรียบเทียบกับเทคนิคองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่นำเสนอ ได้มีวิธีการดึงคุณลักษณะเฉพาะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

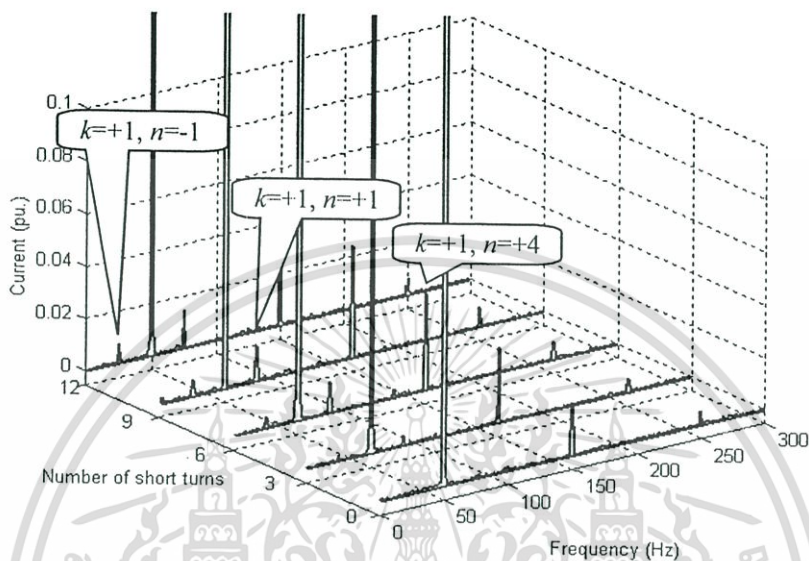
#### 4.4 การดึงคุณลักษณะเฉพาะของเทคนิค MCSA

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการวินิจฉัยฟอลต์ในมอเตอร์เห็นยวนำโดยใช้เทคนิค MCSA นั้นเป็นการพิจารณาจากสเปกตรัมพอลต์สเตเตอร์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลขั้นสูงสำหรับทำให้สเปกตรัมพอลต์สเตเตอร์มีความโดดเด่นชัดเจนสามารถตรวจจับและนำมาวิเคราะห์ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ประสบความสำเร็จของการประยุกต์ใช้เทคนิค MCSA สำหรับการวินิจฉัยมอเตอร์กรณีฟอลต์โรเตอร์ [58] สำหรับในงานวิจัยนี้อัลกอริทึมของกระบวนการขั้นต้นที่ได้ออกแบบไว้ก็สามารถตรวจจับฟอลต์สเตเตอร์ในสัญญาณกระแสมอเตอร์ได้เป็นอย่างดีเช่นกัน ทั้งนี้การทดลองเพื่อศึกษาสเปกตรัมพอลต์สเตเตอร์ตลอดสภาวะการทำงานของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 4.9 สเปกตรัมพอลต์สเตเตอร์ที่ได้นี้จะถูกนำมาใช้เป็นคุณลักษณะเฉพาะสำหรับสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ทั้งนี้การแบ่งระดับความรุนแรงและการออกแบบสำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยมีลักษณะเช่นเดียวกับการออกแบบโดยใช้เทคนิคองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ทั้งนี้การจัดเรียงลำดับของคุณลักษณะเฉพาะได้พิจารณาจากตำแหน่งความถี่ของพอลต์ดั่งนี้ คือการแทนพอลต์สเตเตอร์ที่ตำแหน่ง  $k:n$  ได้แก่ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, และ 1:5 ตามลำดับ โดยแทนลงในสมการที่ (4.8) การตรวจจับพอลต์สเตเตอร์นี้จะอยู่บนพื้นฐานความโดดเด่นในแต่ละช่วงความถี่ของมัน ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากสมการ (2.11) ทั้งนี้แฟคเตอร์ความถี่  $0.05f_1$  มีไว้สำหรับลดความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับในสภาวะการทำงานไร้โหลดและที่พิกัดโหลดของมอเตอร์ ตัวอย่างรูปร่างของสเปกตรัมพอลต์ที่ได้มาจากสมการดังกล่าวสำหรับนำมาใช้เป็นคุณลักษณะเฉพาะอินพุตแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าในแต่ละช่วงความถี่ของมันจะพบว่ามีเพียงสเปกตรัมเดียวที่มีความโดดเด่นซึ่งก็คือสเปกตรัมพอลต์สเตเตอร์ที่ต้องการตรวจจับนั่นเอง

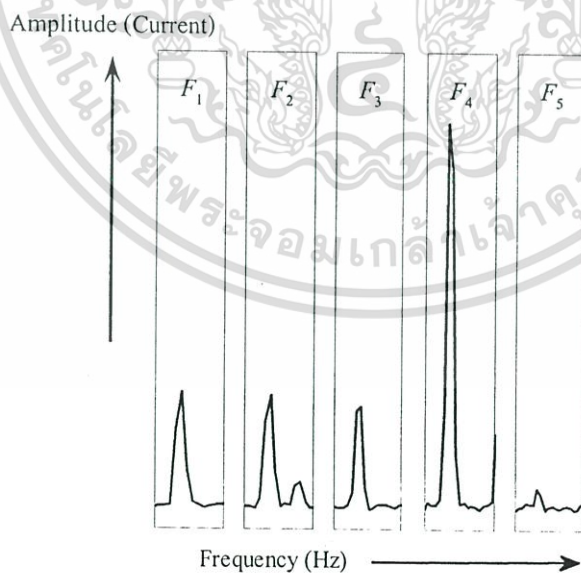
$$F_F = \text{Max} \left\{ f_1 \left( \frac{n}{p} (1 - s_{FL}) + 1 - 0.05 \right) \leftrightarrow f_1 \left( \frac{n}{p} (1 - 0.2s_{FL}) + 1 + 0.05 \right) \right\} \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $F_F$  คือลำดับของคุณลักษณะเฉพาะของฟอลต์สเตเตอร์ที่ค่า  $n$  ต่างๆ,  $f_1$  คือความถี่มูลฐาน,  $p$  คือจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก,  $s$  คือค่าสลิปมอเตอร์ และ  $n$  คือ 1, 2, 3, ...



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์



รูปที่ 4.10 ช่วงการพิจารณาในแต่ละองค์ประกอบของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์

สำหรับนำมาเป็นคุณลักษณะเฉพาะของเทคนิค MCSA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการตรวจจับพอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้แรงดันเฟสที่ตกคร่อมในแต่ละชุดขดลวดสเตเตอร์มาผ่านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล แล้วนำมาผ่านการกรองแบบความถี่ต่ำผ่านที่มีความถี่ตัดสัมพันธ์กับช่วงความถี่ของพอลต์สเตเตอร์ หลังจากนั้นนำมาผ่านการแปลงเวกเตอร์ปาร์กเพื่อให้ได้สัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $d$ ,  $q$  และ  $0$  โดยค่าประสิทธิผลของแต่ละสัญญาณองค์ประกอบแรงดันนี้จะถูกนำมาใช้เป็นคุณลักษณะเฉพาะอินพุตสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน เพื่อทำการแยกแยะระดับความรุนแรงของพอลต์สเตเตอร์และวินิจฉัยมอเตอร์ต่อไป ทั้งนี้ในขณะทำการทดสอบมอเตอร์ต้องต่อแบบวายและไม่ต่อสายนิวตรอลเข้ากับจุดต่อวายของมอเตอร์ สมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอนี้จะถูกเปรียบเทียบกับเทคนิค MCSA ซึ่งเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์



## บทที่ 5

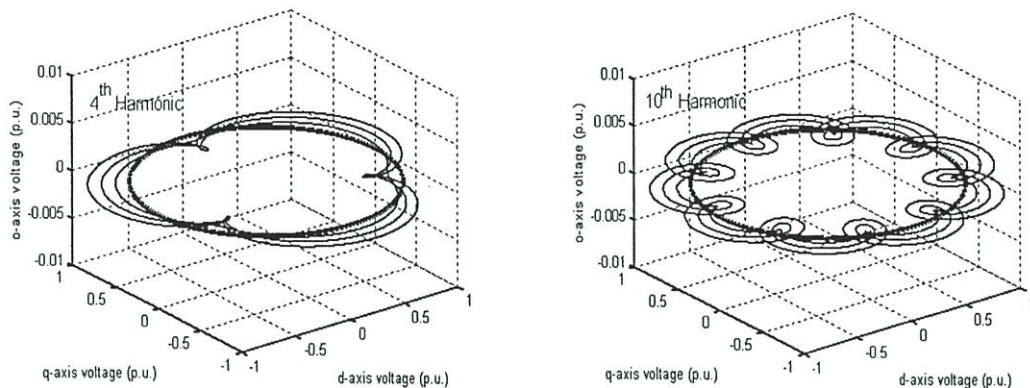
# ผลการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์

ผลการทดลองการประยุกต์ใช้เทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับนำมาใช้ในการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ซึ่งนำเสนอในงานวิจัยนี้ การจำลองได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ในลักษณะ 3 มิติเมื่อพิจารณาในลำดับฮาร์มอนิก (Harmonic sequence) ที่ต่างกัน เพื่อเป็นการสนับสนุนแนวคิดของการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ทั้งนี้การทดลองได้ครอบคลุมในทุกสภาวะพิกัดการทำงานของมอเตอร์ รวมทั้งในสภาวะความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ที่มีความรุนแรงต่างกัน โดยได้ทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 2 พิกัด สำหรับยืนยันถึงความเป็นไปได้ของหลักการใหม่ในการวินิจฉัยความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ในกรณีฟอลต์สเตเตอร์ดังกล่าว

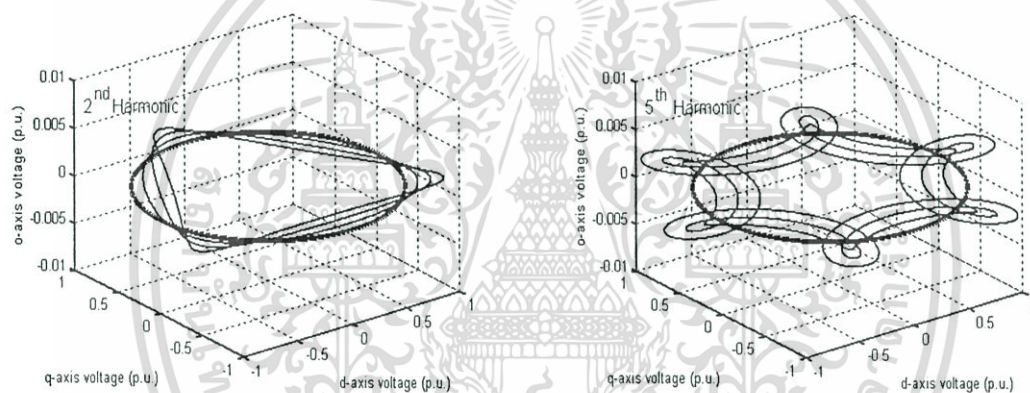
### 5.1 ผลการจำลองลักษณะวงโคจรของลำดับฮาร์มอนิกต่างๆ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในทุกส่วนประกอบของมอเตอร์ หากเกิดความล้มเหลวมันจะทำให้เกิดสัญญาณฮาร์มอนิก หรือเรียกเป็นสเปกตรัมฟอลต์ด้วยขนาดและความถี่ที่แตกต่างกัน โดยนักวิจัยส่วนใหญ่ได้นำสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นนี้ย้อนกลับไปหาสาเหตุของความล้มเหลวของมอเตอร์ ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นคือการเฝ้าตรวจสอบสถานะที่ต้องสามารถแสดงได้ว่าได้เกิดความผิดปกติซึ่งมีสาเหตุมาจากส่วนใดของมอเตอร์ กล่าวคือความสามารถของการแปลความหมายจากสัญญาณฟอลต์ที่ตรวจจับได้นั้นเอง ในงานวิจัยที่นำเสนอนี้จึงได้ใช้เฉพาะสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ซึ่งไม่รวมสัญญาณมูลฐานมาผ่านการแปลงเวกเตอร์ปาร์ก รวมกับการใช้เฉพาะสัญญาณมูลฐานในการหาองค์ประกอบแรงดันศูนย์ เพื่อศึกษาคุณแนวทางของวงโคจรของการพล็อตในลักษณะ 3 มิติแนวคิดดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่แตกต่างกันในแต่ละลำดับของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น การจำลองได้เริ่มจากเมื่อแหล่งจ่ายของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเป็นคลื่นไซน์เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีฮาร์มอนิก พบว่าวงโคจรจะมีลักษณะเป็นวงกลมในระนาบของ  $qd$  ซึ่งถ้าไม่นำสัญญาณมูลฐานมาพิจารณาก็จะเหลือเพียงจุดอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ของทั้ง 3 องค์ประกอบ และถ้าพิจารณาเฉพาะสัญญาณฮาร์มอนิกไม่พิจารณาสัญญาณมูลฐานวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่ได้จะมีลักษณะของการโคจรเป็นวงเล็กๆรอบจุดกำเนิด (Origin) การจำลองต่อไปนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะการโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ในลำดับฮาร์มอนิกที่แตกต่างกัน

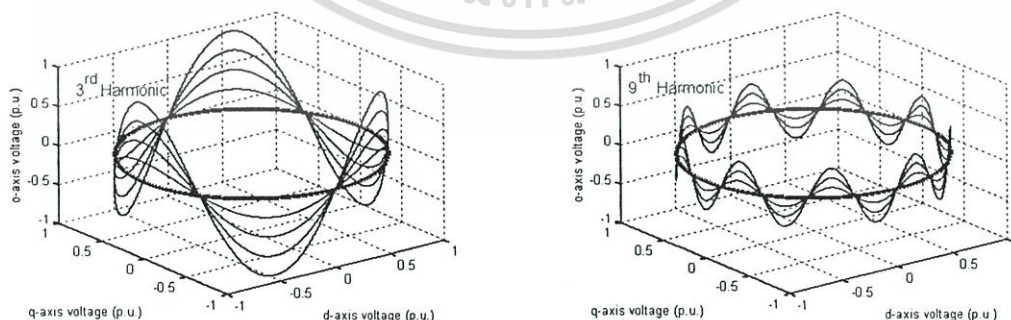
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $qd0$  เมื่อมีฮาร์มอนิกลำดับบวก (อันดับที่ 4 และ 10) รวมอยู่ในสัญญาณมาตรฐาน



รูปที่ 5.2 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $qd0$  เมื่อมีฮาร์มอนิกลำดับลบ (อันดับที่ 2 และ 5) รวมอยู่ในสัญญาณมาตรฐาน



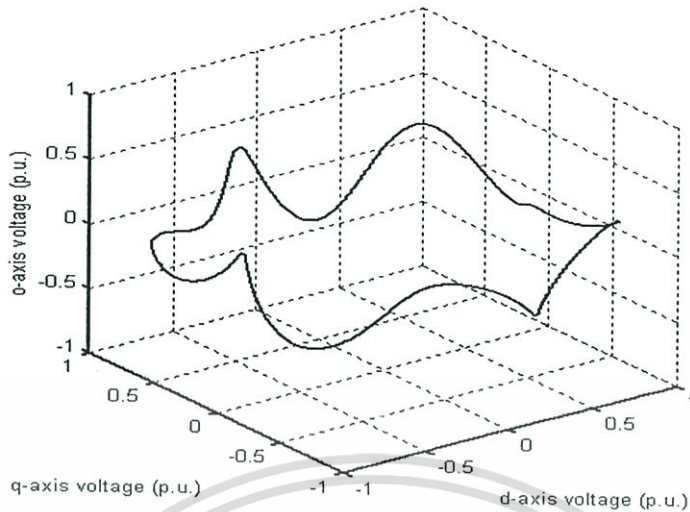
รูปที่ 5.3 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $qd0$  เมื่อมีฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ (อันดับที่ 3 และ 9) รวมอยู่ในสัญญาณมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

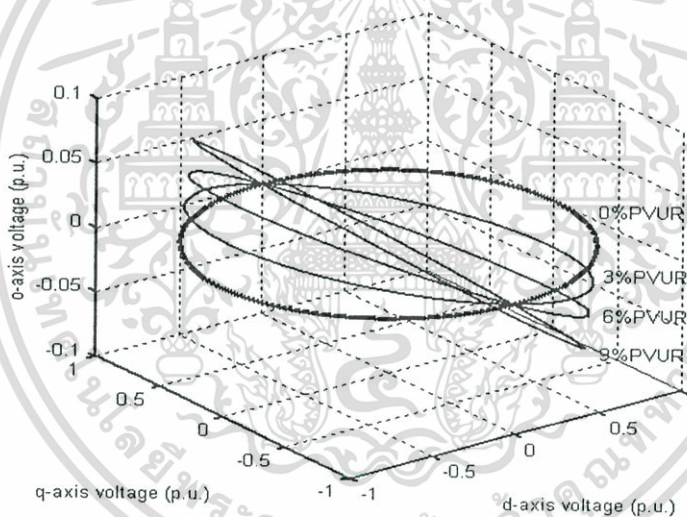
การจำลองเมื่อพิจารณาการรวมกันของสัญญาณมูลฐานกับสัญญาณฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ เพื่อศึกษาคุณลักษณะของวงโคจรที่เกิดขึ้น เริ่มจากการจำลองเมื่อในสัญญาณมูลฐานประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกลำดับบวก (Positive sequence) ลำดับลบ (Negative sequence) และลำดับศูนย์ (Zero sequence) ได้ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ โดยที่ลำดับบวกได้ยกตัวอย่างของฮาร์มอนิกอันดับที่ 4 และ 10 ที่มีขนาด (Amplitude) ต่างๆกัน จากผลการจำลองพบว่าวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  เป็นรูปที่อยู่ภายในของวงกลมโดยมีความกว้างของวงโคจรขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณในโดเมนเวลา (เมื่อวงกลมแสดงด้วยเส้นเข็มหมายถึงเฉพาะองค์ประกอบมูลฐานเท่านั้น)

สำหรับวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  เมื่อพิจารณาฮาร์มอนิกลำดับลบได้ยกตัวอย่างฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 และ 5 ซึ่งพบว่าวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  เป็นรูปเช่นกัน แต่อยู่ภายนอกวงโคจรขององค์ประกอบแรงดันมูลฐาน ทั้งนี้ประเด็นที่สำคัญของการพิจารณาคือลักษณะการโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ในผลการจำลองรูปที่ 5.1 และ 5.2 อยู่ในระนาบของ  $qd$  เท่านั้น ซึ่งต่างจากวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน 0 ของฮาร์มอนิกที่มีอันดับเป็นสามเท่าของความถี่มูลฐานดังเช่นผลการทดลองในรูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 และ 9 ซึ่งเป็นฮาร์มอนิกลำดับศูนย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงในระนาบของ  $d0$  และ  $q0$  เท่านั้น ซึ่งถ้าหากเป็นการพิจารณาโดยทั่วไปแล้วในระนาบของ  $qd$  จะไม่สามารถบอกได้เลยว่ามีฮาร์มอนิกลำดับศูนย์เกิดขึ้น [59]

ผลการจำลองที่ผ่านมาเป็นการจำลองฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสที่มีอันดับและขนาดที่เท่ากันหรือเรียกว่าฮาร์มอนิกสมดุล (Balance harmonic) พบว่าองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  มีรูปแบบของการโคจรที่มีความแน่นอน (เกิดขึ้นซ้ำๆ) ทั้งนี้ในกรณีของฮาร์มอนิกที่ไม่สมดุลกัน (Unbalance harmonic) จะมีความแตกต่างกันอย่างมากแสดงผลการจำลองในรูปที่ 5.4 โดยในการจำลองได้กำหนดขนาดและตำแหน่งของความถี่ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสอย่างอำเภอใจ (Arbitrary) พบว่าลักษณะของวงโคจรไม่มีความแน่นอน และสำหรับการจำลองในรูปที่ 5.5 นี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  เมื่อเกิดสภาวะแรงดันไม่สมดุลโดยพิจารณาจาก %PVUR (Percentage phase voltage unbalance) โดยพิจารณาที่ 0% ถึง 9%PVUR จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไม่สมดุลจะทำให้องค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  มีระนาบที่ทำมุมกับระนาบแกน  $qd$  และจะมีมุมระนาบโคจรที่เพิ่มสูงขึ้นตาม %PVUR ที่เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 5.4 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ภายใต้สภาวะฮาร์มอนิกไม่สมดุล



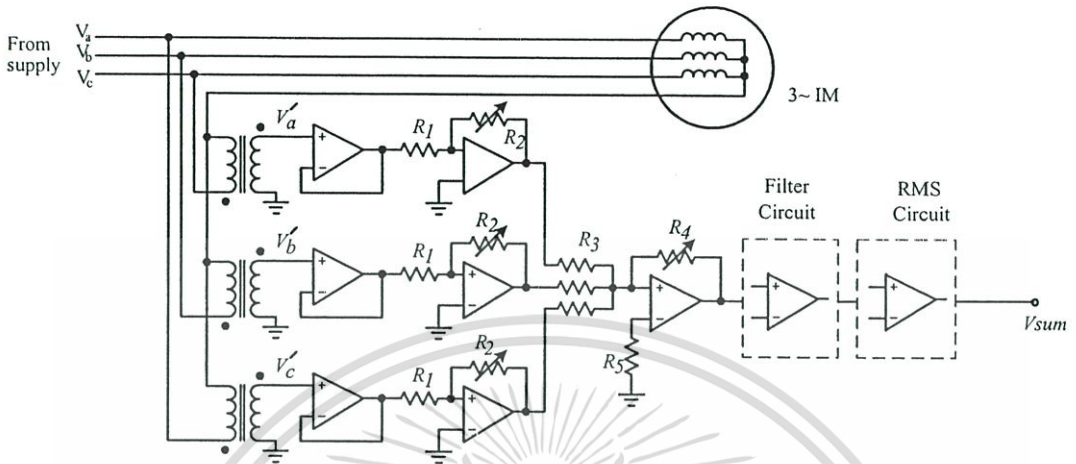
รูปที่ 5.5 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ภายใต้แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟสคลื่นไซน์ มีสภาวะแรงดันไม่สมดุล

## 5.2 ผลการทดลองการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์

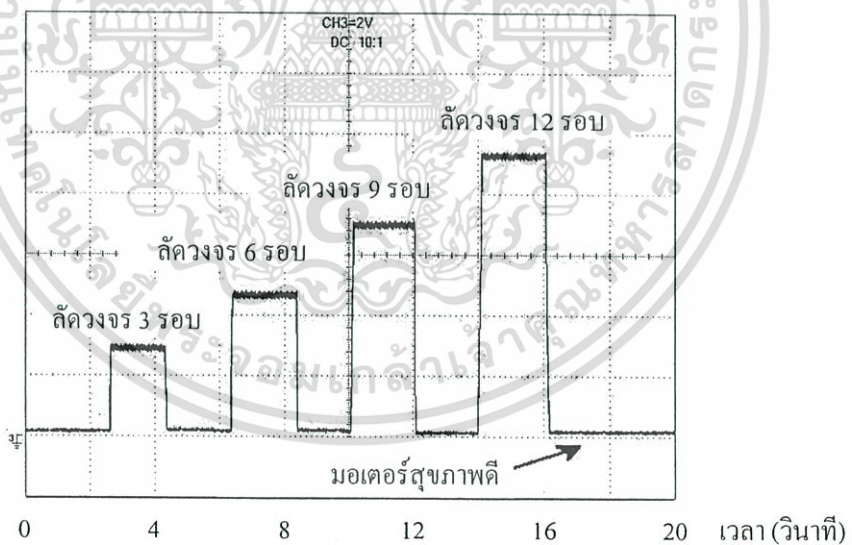
การตรวจสอบเบื้องต้นของสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ที่เกิดขึ้นนั้น สามารถตรวจสอบอย่างง่ายโดยการใช้วงจรมอดูลสำหรับการตรวจจับสัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 5.6 จากวงจรมอดูลที่สร้างขึ้นนี้สามารถทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติขององค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ ซึ่งเกิดขึ้นจากความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์ที่ความรุนแรงในสภาวะถ่วงจร 3, 6, 9, และ 12 รอบ ตามลำดับได้ผลการทดลองในรูปที่ 5.7 ซึ่งแสดงค่าประสิทธิผลโดยใช่วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนาล็อกเช่นกัน จากการทดลองพบว่าเมื่อจำนวนรอบของขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบมากขึ้นระดับของสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย



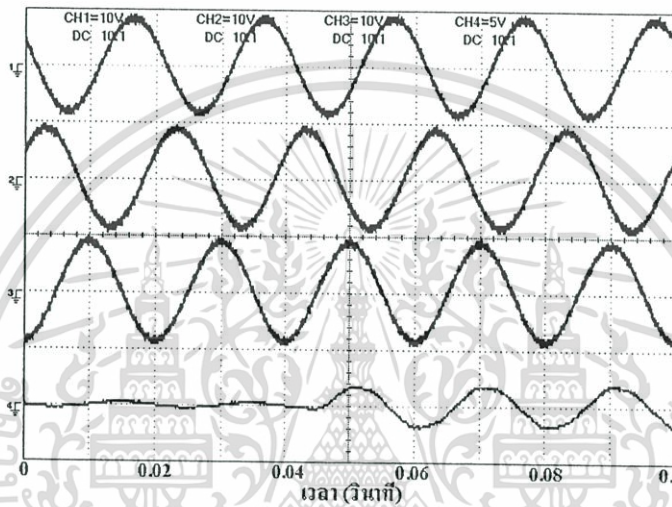
รูปที่ 5.6 วงจรอนาล็อกสำหรับการตรวจจับสัญญาณแรงดันลำดับศูนย์ หรือเรียกเป็นสัญญาณ  $V_{sum}$



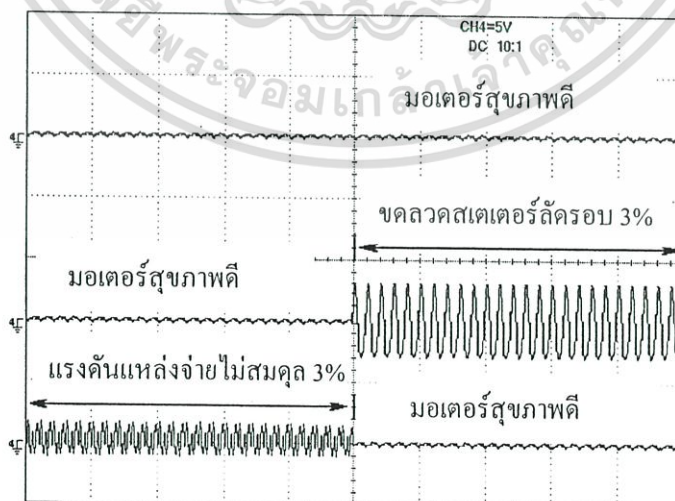
รูปที่ 5.7 สัญญาณฟอลต์สเตเตอร์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบที่รอบต่างกัน

ผลการทดลองในรูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณแรงดันทั้ง 3 เฟสของชุดขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์ และรูปสัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ (ในเอกสารอ้างอิง [8] เรียกเป็นสัญญาณ  $V_{sum}$ ) เมื่อเกิดสภาวะรอบของขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร 3 รอบในเฟส A ที่เวลาประมาณ 45 ms จากรูปแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสจะไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสัญญาณแรงดันที่เปลี่ยนแปลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปเนื่องจากสภาวะดังกล่าวนี้ได้ ผลการทดลองรูปที่ 5.9 แสดงสัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายไฟ และสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ภายใต้สภาวะที่ต่างกันได้แก่ ภายใต้สภาวะการทำงานเมื่อมอเตอร์สุขภาพดี กรณีขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร 3 รอบ และเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไม่สมดุล 3% จากรูปผลการทดลองพบว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นเนื่องจากขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจรรอบจะมีค่ามากกว่ากรณีของสภาวะแรงดันไม่สมดุล (การเปรียบเทียบนี้ไม่ได้หมายความว่าที่สภาวะลัดวงจร 3 รอบจะเทียบได้กับที่สภาวะแรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุล 3%)



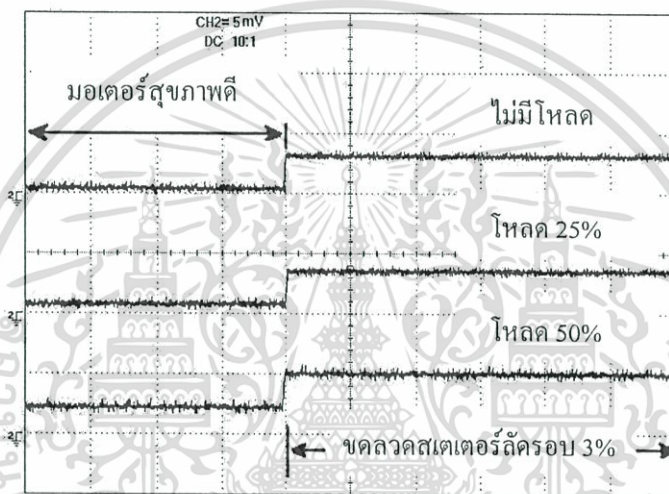
รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์เมื่อขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจรที่เวลา  $\sim 45$  ms



รูปที่ 5.9 สัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ภายใต้สภาวะที่ต่างกัน

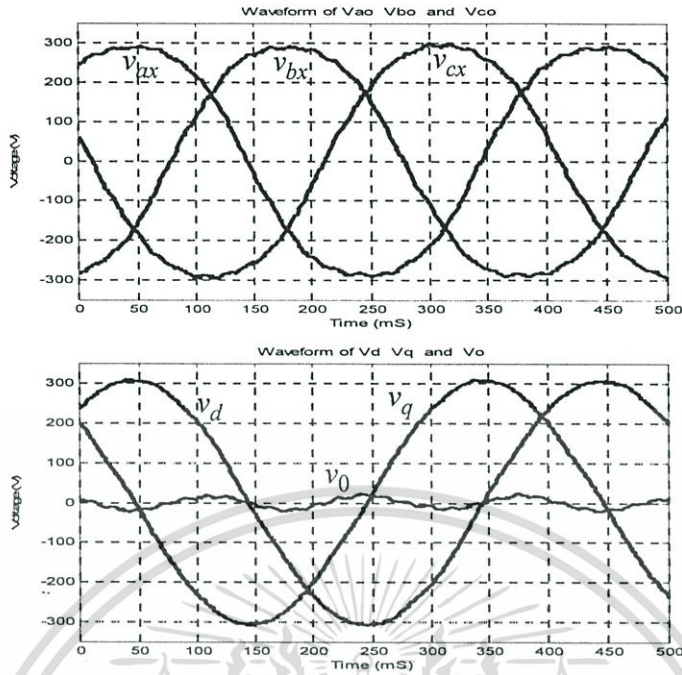
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดลองเมื่อมอเตอร์มีโหลดแสดงในรูปที่ 5.10 พบว่าระดับของสัญญาณฟลัดสเตเตอร์จะถูกยกระดับขึ้นเมื่อทดสอบภายใต้การมีโหลดที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์ ซึ่งสามารถแก้ไขให้ระดับของโหลดมอเตอร์ไม่มีผลต่อระดับของสัญญาณนี้ได้โดยการเพิ่มวงจรรองความถี่ต่ำผ่านเข้าไป ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากกระแสเฟสที่ไหลเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของโหลดมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นและมีขนาดที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ฮาร์มอนิกที่สำคัญๆ ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากแกนเหล็กอิ่มตัว (Saturation) ความเป็นสล็อตของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Slotting) ความเยื้องศูนย์กลางของช่องอากาศ (Air gap eccentricity) เป็นต้น



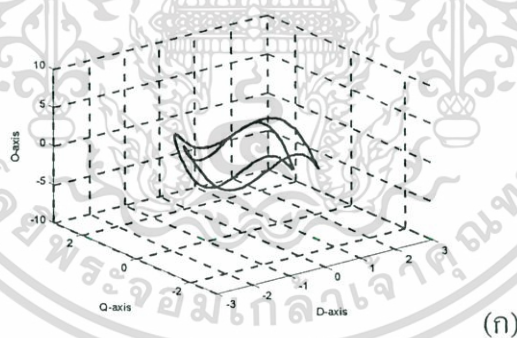
รูปที่ 5.10 สัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์เมื่อตัวนำสเตเตอร์ลัดวงจร 3 รอบ ภายใต้มอเตอร์มีโหลดต่างกัน

ผลการทดลองในรูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละเฟสของมอเตอร์และเมื่อแปลงเป็นองค์ประกอบแรงดัน  $v_d$ ,  $v_q$  และ  $v_0$  ซึ่งถ้ามอเตอร์มีความผิดปกติเนื่องมาจากฟลัดสเตเตอร์ระดับของสัญญาณทั้ง 3 จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาในลักษณะการนำมาพล็อตใน 3 มิติ หรือเรียกเป็นรูปแบบขององค์ประกอบ  $dq0$  ซึ่งจะพบว่าวงโคจรของสัญญาณที่ได้จะเข้าใกล้จุดศูนย์ที่ระดับฟลัดสเตเตอร์ต่ำๆ แต่ถ้ามีสัญญาณฮาร์มอนิกเนื่องจากฟลัดสเตเตอร์ วงโคจรจะกว้างหรือไกลออกจากตำแหน่งศูนย์ตามความรุนแรงของสัญญาณฟลัดสเตเตอร์แสดงผลการทดลองดังกล่าวในรูปที่ 5.12 ซึ่งการทดลองนี้เป็นการพิจารณาโดยรวมสัญญาณมูลฐานภายใต้การควบคุมแรงดันแหล่งจ่ายที่สมดุล และทดสอบที่สภาวะไร้โหลดเพื่อลดผลกระทบเนื่องจากสเปคตรัมฟลัดจากสาเหตุอื่น

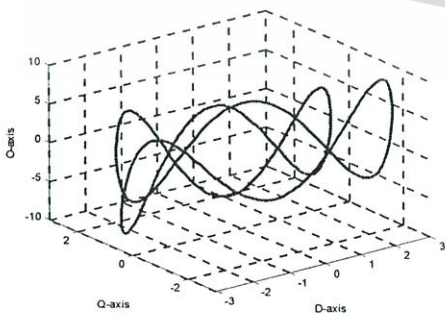


รูปที่ 5.11 (บน) สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมในแต่ละขดขดลวดของสเตเตอร์ได้แก่  $v_{ax}$ ,  $v_{bx}$ , และ  $v_{cx}$  และ (ล่าง) เมื่อผ่านการแปลงโดยใช้เวกเตอร์ปาร์ค ได้เป็น

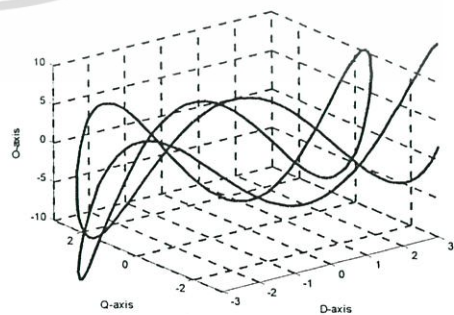
สัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $v_d$ ,  $v_q$ , และ  $v_0$



(ก)



(ข)



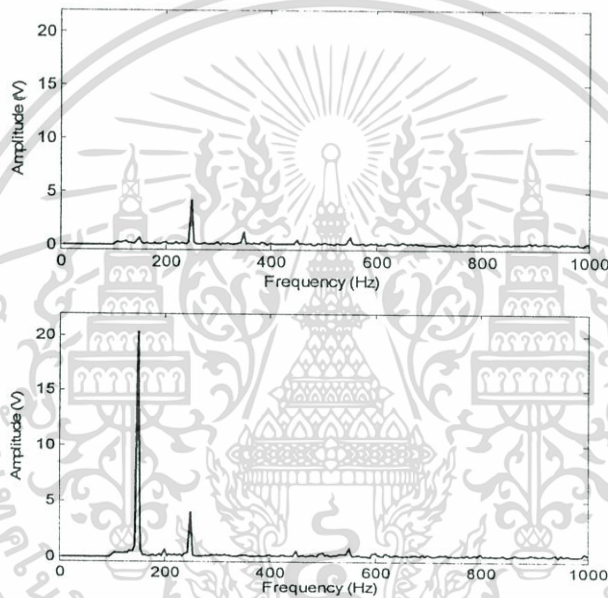
(ค)

รูปที่ 5.12 วงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  เมื่อ (ก) มอเตอร์สุขภาพดี (ข) ขดลวดสเตเตอร์

ลัดรอบ 2% และ (ค) 3% ของจำนวนรอบทั้งหมดใน 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองนี้ได้เปรียบเทียบรูปแบบวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ในกรณีของมอเตอร์สุขภาพดีและกรณีมีฟอลต์สเตเตอร์ และด้วยวงโคจรที่กว้างขึ้นตามความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์นี้เองจึงสามารถนำมาทำนายความล้มเหลวของตัวนำสเตเตอร์ได้ สำหรับวงโคจรที่เกิดขึ้นในรูปที่ 5.12(ก) เป็นกรณีของมอเตอร์สุขภาพดีนั้น สเปกตรัมฟอลต์ซึ่งทำให้เกิดปรากฏเป็นวงโคจรเล็กๆจะมีสาเหตุมาจากค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ของแต่ละเฟสในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีค่าไม่เท่ากันอย่างแท้จริง ได้แก่การไม่เท่ากันของจำนวนรอบของขดลวดในแต่ละสล็อต ความไม่สมดุลของทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ รวมถึงการคับปลิงเข้ากับโพลที่ไม่ได้แนว (Misalignment) เป็นต้น

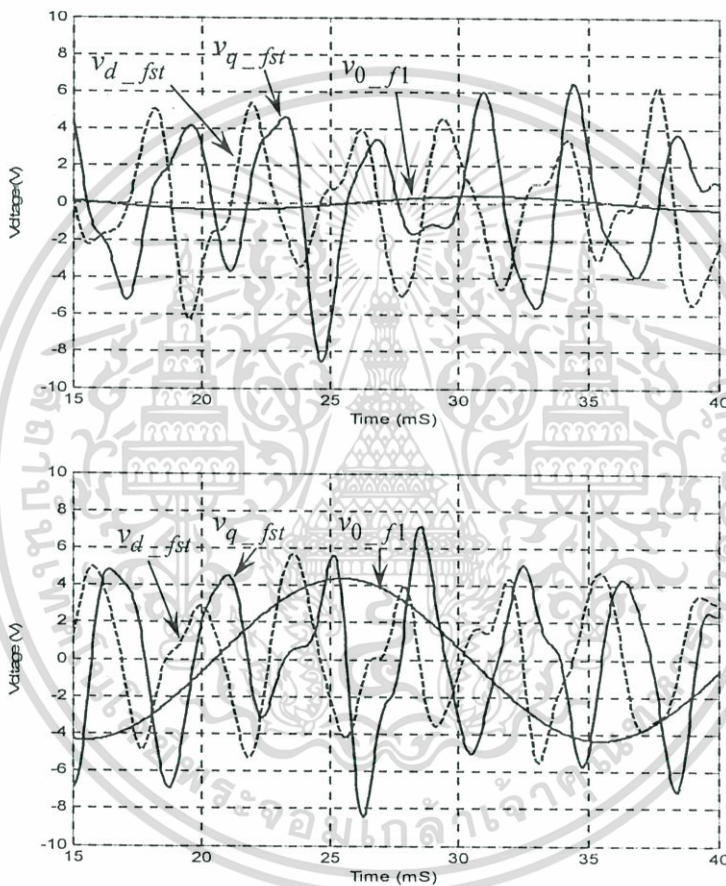


รูปที่ 5.13 สเปกตรัมฟอลต์ฮาร์มอนิกแรงดันสเตเตอร์ (บน) กรณีแหล่งจ่ายสมดุลและ (ล่าง) กรณีมอเตอร์สุขภาพดี

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.12 ถึงแม้ว่าหลักการดังกล่าวสามารถนำมาตรวจสอบและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์โดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ได้ก็ตาม แต่ก็อาจเกิดข้อวินิจฉัยที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $d, q,$  และ  $0$  เกิดจากการรวมกันของสัญญาณฮาร์มอนิกตั้งแต่องค์ประกอบมูลฐานตลอดจนสัญญาณฮาร์มอนิกอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ซึ่งถ้าหากมอเตอร์อยู่ในสถานะที่มีความล้มเหลวมากกว่า 1 ส่วนประกอบ ก็อาจนำไปสู่ข้อวินิจฉัยที่ผิดพลาดได้ การนำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับการวินิจฉัยตัวนำสเตเตอร์ลัดวงจรนี้ จึงได้ใช้เฉพาะช่วงความถี่ของสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ของมันสำหรับนำมาทำการวินิจฉัย วิธีการทดสอบที่นำเสนอนี้ยังมีข้อดีคือการลดลงของสัญญาณรบกวนอื่นที่ไม่ได้มาจากปัญหาของตัวนำสเตเตอร์ ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟ เช่น การไม่สมดุลในวงจรอย่างแท้จริง แรงดันไม่สมดุลอย่างแท้จริง เป็นต้น ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นปัญหาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ สมมุติฐานนี้ได้นำมาทดลองกับมอเตอร์สุขภาพดีพบว่า ถึงแม้ว่าแรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟสที่มีความสมดุลก็ตามจะสามารถทำให้เกิดองค์ประกอบของแรงดันฮาร์มอนิกที่เป็น 3 เท่าขึ้นได้ แสดงในรูปที่ 5.13 ที่สำคัญคือการเกิดขึ้นของฮาร์มอนิกที่เป็นสามเท่าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์สุขภาพดี ทั้งนี้มีสาเหตุหลักๆมาจากการอิมิตัวของแกนเหล็ก และสนามแม่เหล็กหมุนกลับ (Reverse rotating field) [16] แต่สำหรับการเกิดขึ้นของฮาร์มอนิกที่เป็นสามเท่าในกรณีแหล่งจ่ายสมดุลอาจมีสาเหตุมาจากความไม่สมดุลอย่างแท้จริงของแหล่งจ่ายไฟ

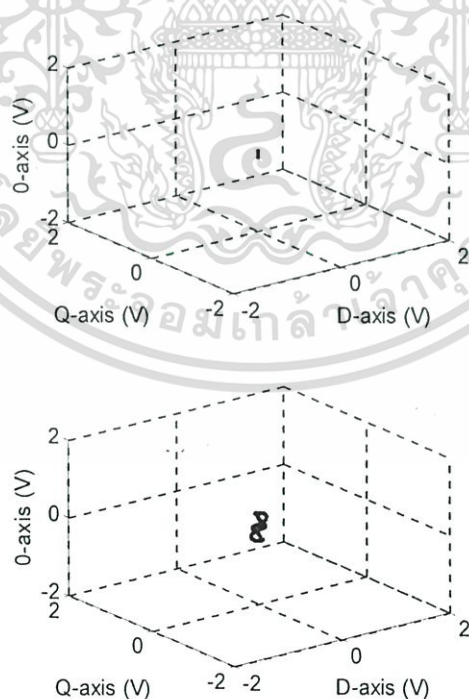


รูปที่ 5.14 ผลการทดลองลักษณะของสัญญาณ  $v_{d\_fst}$ ,  $v_{q\_fst}$  และ  $v_{0\_f1}$  กรณี (บน) มอเตอร์สุขภาพดี (ล่าง) มีฟลด์สเตรเตอร์ที่ระดับความรุนแรง 3%

ด้วยข้อปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นได้นี้ ในงานวิจัยที่น่าเสนอจึงได้ทำการพัฒนาสัญญาณแรงดันก่อนผ่านการแปลงเวกเตอร์ปาร์คดังอัลกอริทึมในรูปที่ 4.3 และเพื่อที่จะประเมินสมรรถนะของอัลกอริทึมสำหรับการตรวจจับฟลด์สเตรเตอร์นี้ ในขั้นต้นได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมของแต่ละองค์ประกอบโดยได้แยกออกเป็น 3 สัญญาณได้แก่องค์ประกอบแรงดัน  $v_d$  สัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $v_q$  และสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $v_0$  ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาแล้วพบว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์นี้ได้นำมาใช้เป็นจำนวนมาก โดยปัญหาที่พบคือผลของฮาร์มอนิกที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของความถี่มูลฐานที่เกิดขึ้นจากสาเหตุหลักๆ คือ แกนเหล็กอิ่มตัว แรงดันแหล่งจ่ายไม่สมดุล ซึ่งจะสามารถทำให้สัญญาณองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์มีค่าขึ้นมาได้ ดังนั้นในการวินิจฉัยมอเตอร์จึงได้ควบคุมให้แหล่งจ่ายไฟมีระดับของแรงดันที่สมดุล หลังจากนั้นได้ใช้อัลกอริทึมที่ได้ออกแบบขึ้น สำหรับหาองค์ประกอบแรงดัน  $v_d$ ,  $v_q$  และ  $v_0$  ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกเป็นสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $v_{d,fsr}$ ,  $v_{q,fsr}$  และ  $v_{0,1}$  ผลการทดลองเพื่อตรวจสอบลักษณะของสัญญาณองค์ประกอบแรงดันในโดเมนเวลาแสดงในรูปที่ 5.14 โดยได้ทำการทดลองด้วยระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ที่ต่างกัน

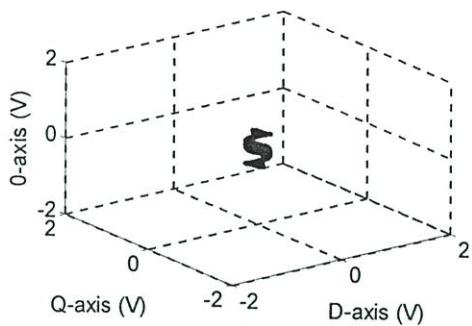
จากการทดลองนี้พบว่าสัญญาณขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ด้วยความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ต่างกันนั้นพบว่าขนาดของสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ โดยเฉพาะด้านองค์ประกอบแรงดัน 0 จะมีความแตกต่างอย่างชัดเจนมากที่สุด สำหรับสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $d$  และ  $q$  ได้มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบแรงดัน  $dq$  พิจารณาจากองค์ประกอบของแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเท่านั้น ซึ่งมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้องค์ประกอบแรงดัน 0 ที่พิจารณาจากผลรวมทางเฟสเซอร์ของแรงดันมูลฐาน (Fundamental) ที่ตกคร่อมในแต่ละเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้า



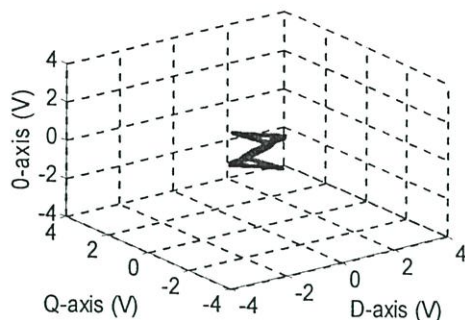
รูปที่ 5.15 รูปแบบวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ด้วยอัลกอริทึมที่นำเสนอ

กรณี (บน) แหล่งจ่ายสมดุลและ (ล่าง) มอเตอร์สุขภาพดี

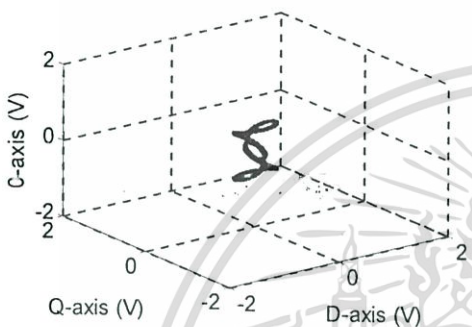
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



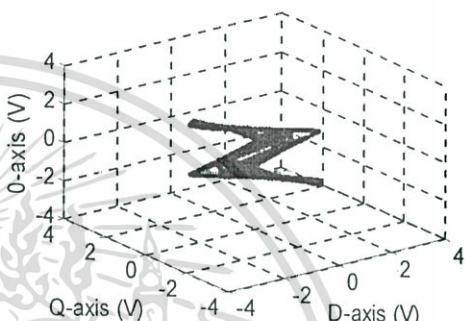
(ก)



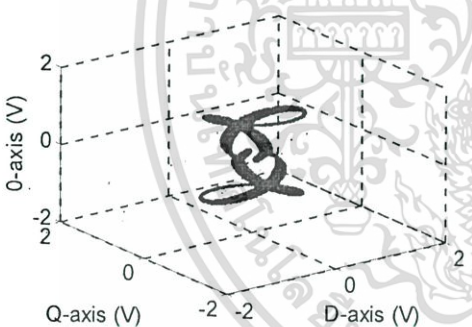
(ข)



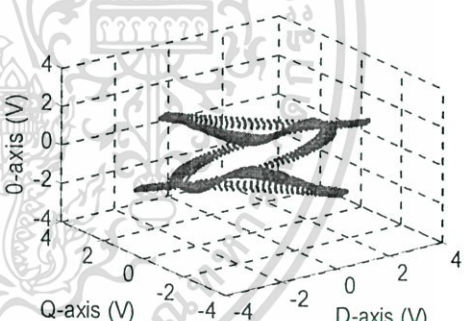
(ค)



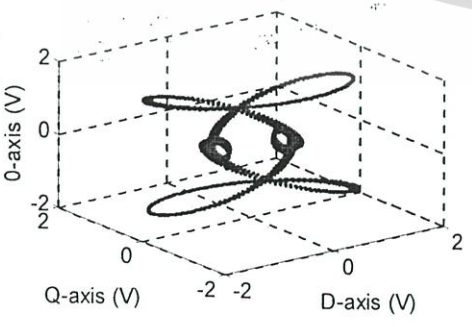
(ง)



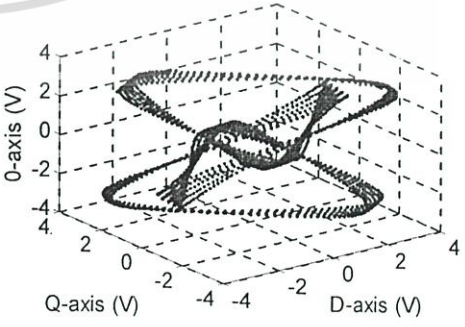
(ฉ)



(ช)



(ฉ)



(ช)

รูปที่ 5.16 รูปแบบวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ในมอเตอร์ IM\_1 (ก-ง) และมอเตอร์ IM\_2 (จ-ช) ซึ่งแสดงถึงสถานะตัวนำสเตเตอร์ลัดรอบที่ 1%-4% (จากรูปบนลงล่างตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองสำหรับการตรวจสอบรูปแบบวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ในลักษณะของการพล็อตแบบ 3 มิติโดยการกำหนดให้สถานะแรงดันแหล่งจ่ายสมดุลและมอเตอร์สุภาพดีสำหรับใช้เป็นรูปแบบอ้างอิง ได้ผลการทดลองในรูปที่ 5.15 ทั้งนี้ในรูปที่ 5.15(a) แสดงวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  กรณีแหล่งจ่ายมีสถานะสมดุลซึ่งเป็นการประมวลผลโดยการเปลี่ยนจุดนิวตรอนจากจุดวายของมอเตอร์มาเป็นจุดนิวตรอลของแหล่งจ่ายไฟ พบว่ารูปแบบวงโคจรจะอยู่ใกล้ตำแหน่งศูนย์ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ได้กล่าวไว้ และในกรณีของมอเตอร์สุภาพดีรูปแบบวงโคจรแรงดันแสดงในรูปที่ 5.15(b) ซึ่งเป็นการใช้แรงดันเฟสที่เปลี่ยนจากตำแหน่งนิวตรอลของแหล่งจ่ายไฟมาเป็นจุดวายของมอเตอร์ ซึ่งวงโคจรของแรงดันที่ได้จะกว้างกว่าในรูปที่ 5.15(a) ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดขึ้นของฮาร์มอนิกจากภายในของมอเตอร์ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

ผลการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ในแต่ละสถานะความรุนแรงของฟลัดด์สเตเตอร์ใน 3 มิติแสดงในรูปที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของวงโคจรแรงดัน  $dq0$  ซึ่งถูกนำเสนอเป็นเทคนิคใหม่สำหรับการวินิจฉัยความรุนแรงของฟลัดด์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงแนวทางที่เป็นไปได้ของการวินิจฉัยฟลัดด์สเตเตอร์ด้วยเทคนิคองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่นำเสนอ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างชัดเจนของรูปแบบวงโคจรที่กว้างขึ้นตามความรุนแรงของฟลัดด์สเตเตอร์ จากการทดลองกับมอเตอร์ทั้ง 2 พิกัดก็จะมีการเปลี่ยนแปลงของวงโคจรที่กว้างขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของการลัดวงจรที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยรูปแบบของวงโคจรที่แตกต่างกันนี้มีสาเหตุมาจากพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันของทั้ง 2 มอเตอร์ ทั้งนี้ความกว้างของวงโคจรในมอเตอร์ IM\_2 ที่กว้างกว่า IM\_1 มาจากการใช้ค่าอัตราขยายในการประมวลผลที่ต่างกัน

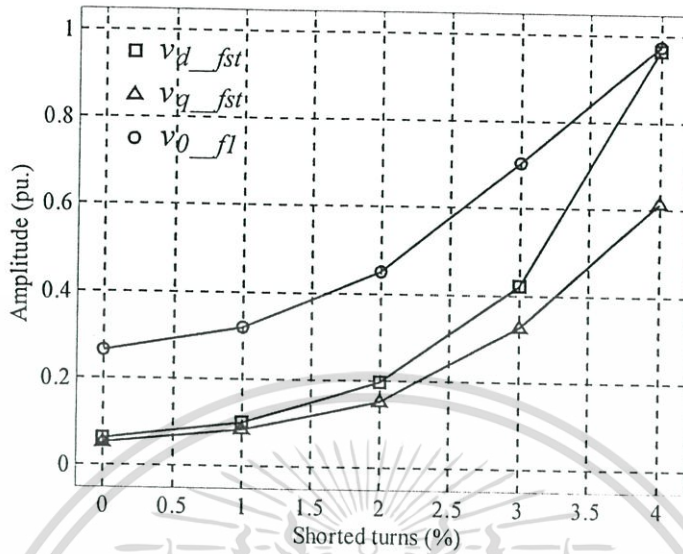
ที่กล่าวมาเป็นการประมวลผลขั้นต้น (Pre-processing) ซึ่งการประมวลผลหลัก (Post-processing) ได้เลือกใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการวินิจฉัยฟลัดด์สเตเตอร์ ทั้งนี้ข้อมูลสำหรับการสอนได้แยกพิจารณาจากแต่ละค่าของวงโคจรหรือในแต่ละสัญญาณแรงดัน  $d, q$  และ 0 ในหน่วยค่าประสิทธิภาพ (RMS) ซึ่งข้อมูลสำหรับสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนของแต่ละองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ได้ถูกทดลองหลายครั้งในหลายสถานะการทำงานของมอเตอร์ด้วยโหลดที่ต่างกันและในสถานะของการเกิดฟลัดด์สเตเตอร์ที่มีระดับความรุนแรงที่ต่างกันด้วย ทั้งนี้ขนาดของสเปคตรัมฟลัดด์สเตเตอร์เมื่อมอเตอร์มีโหลดจะต่างกันไม่เกิน  $\pm 0.015$  pu. จึงสามารถกล่าวได้ว่าขนาดของฟลัดด์สเตเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ที่พิกัดโหลดต่างๆ แต่ขนาดของฟลัดด์สเตเตอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนมากกว่าเมื่อสถานะความรุนแรงของฟลัดด์สเตเตอร์เพิ่มขึ้น ด้วยผลการทดลองนี้จึงมีความเป็นไปได้สำหรับการนำไปเป็นข้อมูลสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน สำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟลัดด์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยเทคนิคใหม่ที่น่าเสนอนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแนวทางของการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง รวมทั้งจำนวนชุดข้อมูลของการสอนที่สามารถทำให้ลดลงได้คือการทดสอบภายใต้สภาวะไร้โหลด นอกจากนี้แล้วยังสามารถทำให้ลดสเปกตรัมฟอลต์ในบางสาเหตุ รวมถึงการเคลื่อนตัวของสเปกตรัมฟอลต์ที่อาจเข้ามาสู่ในช่วงความถี่ของฟอลต์สเตเตอร์ เช่นฮาร์โมนิกที่เกิดจากความเป็นสล็อต ทั้งนี้การทดสอบภายใต้สภาวะไร้โหลดด้วยความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ระดับต่างๆ ทำให้ได้ข้อมูลสเตเตอร์ฟอลต์ของทั้ง 3 องค์ประกอบแรงดัน  $v_{d,fst}$ ,  $v_{q,fst}$  และ  $v_{0,fl}$  โดยเป็นการทดลองสำหรับการจัดเก็บข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะเหล่านี้จะถูกนำมาสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนซึ่งมีรายละเอียดคือมี 30 ชุดข้อมูลต่อคลาสจากทั้งหมด 5 คลาสรวมแล้วมี 150 ชุดข้อมูลหรือเท่ากับ 450 ข้อมูลสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการสอน ผลการทดลองในรูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงการเพิ่มขึ้นในหน่วยของค่าประสิทธิผลต่อระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าในหน่วยเปอร์เซ็นต์ในแต่ละองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ของมอเตอร์ IM\_1 และ IM\_2 ค่อนข้างเป็นสัดส่วนกัน

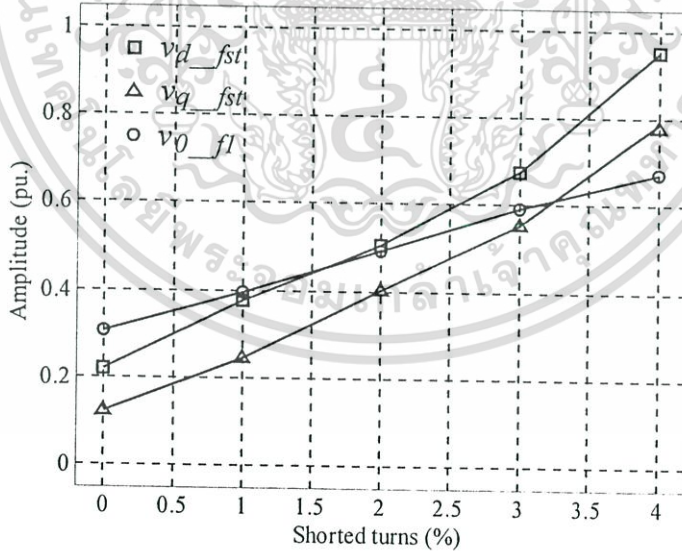
การทดสอบสมรรถนะการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งได้ออกแบบโดยใช้เทคนิคของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนที่ได้นำเสนอนี้ สามารถทำได้โดยการทดสอบกับข้อมูลของฟอลต์สเตเตอร์ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน (Unseen fault) ทั้งนี้หลังจากทำการสอนแล้วจะได้ค่าพารามิเตอร์  $C$  และ  $\gamma$  ที่เหมาะสม แล้วจึงได้ทำการวินิจฉัยมอเตอร์กับข้อมูลฟอลต์สเตเตอร์ใหม่ ผลการทดลองการประเมินสมรรถนะของระบบหลายการแยกแยะด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนของแต่ละความรุนแรงฟอลต์สเตเตอร์ได้แสดงในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ซึ่งได้แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในรูปแบบของตารางความสับสน (Confusion table) จากผลการทดลองทั้งในมอเตอร์ IM\_1 และ IM\_2 นี้ยืนยันได้ว่าเทคนิคใหม่ที่น่าเสนอสามารถทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ได้อย่างถูกต้องมากกว่า 98%

สำหรับการพิจารณาค่าความเป็นไปได้ของการประมาณค่าการแยกแยะฟอลต์สเตเตอร์ในตารางความสับสนที่ 5.1 และ 5.2 ได้พิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (The root mean squared error, RMSE) ซึ่งสามารถทำได้โดยพิจารณาจากความแตกต่างของระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์จริงกับค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งค่าตัวเลข 0 และ 1 หมายถึงกลุ่มของข้อมูลในการแยกแยะแบบไบนารีที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการเลือกความเป็นไปได้ของการแยกแยะ ผลการพิจารณาค่า RMSE ของตารางความสับสนที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 แสดงในตารางที่ 5.3 ซึ่งได้แสดงถึงค่าความผิดพลาดของการทดสอบการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ระหว่างข้อมูลเอาต์พุตจริงกับเป้าหมายของระบบการวินิจฉัย ซึ่งแสดงถึงกระบวนการสอนนี้มีความสมบูรณ์ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.2083



รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ต่อการเพิ่มขึ้นของความ

รุนแรงฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์ IM\_1



รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ต่อการเพิ่มขึ้นของความ

รุนแรงฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์ IM\_2

ตารางที่ 5.1 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแยกแยะฟอลต์สแตเตอร์โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในมอเตอร์ IM\_1 ด้วยเทคนิค  $dq0$  ที่นำเสนอ ทดสอบกับ 50 ชุดข้อมูลที่ไม่เคยเห็น

Unseen faults	Classified faults				
	Healthy	Fault_1	Fault_2	Fault_3	Fault_4
Healthy ( $C=0.125, \gamma=0.125$ )	98.224%	1.776% (Non Healthy)			
Fault_1 ( $C=0.5, \gamma=0.0313$ )		99.071%	0.929% (Non Fault_1)		
Fault_2 ( $C=32, \gamma=0.5$ )	0%		100%	(Non Fault_2)	
Fault_3 ( $C=.125, \gamma=.0020$ )	0% (Non Fault_3)			100%	
Fault_4 ( $C=0.5, \gamma=0.125$ )	1.265% (Non Fault_4)				98.735%

ตารางที่ 5.2 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแยกแยะฟอลต์สแตเตอร์โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในมอเตอร์ IM\_2 ด้วยเทคนิค  $dq0$  ที่นำเสนอ ทดสอบกับ 50 ชุดข้อมูลที่ไม่เคยเห็น

Unseen faults	Classified faults				
	Healthy	Fault_1	Fault_2	Fault_3	Fault_4
Healthy ( $C=0.5, \gamma=0.0313$ )	100%	0% (Non Healthy)			
Fault_1 ( $C=8, \gamma=0.125$ )		98.171%	1.829% (Non Fault_1)		
Fault_2 ( $C=0.125, \gamma=0.5$ )	0%		100%	(Non Fault_2)	
Fault_3 ( $C=.125, \gamma=.0078$ )	0.434% (Non Fault_3)			99.566%	
Fault_4 ( $C=8, \gamma=0.0313$ )	0% (Non Fault_4)				100%

ตารางที่ 5.3 ค่า RMSE ของการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์ในตารางที่ 5.1 และ 5.2

RMSE of SVM	Healthy	Fault_1	Fault_2	Fault_3	Fault_4
IM_1	0.0341	0.1041	0.0866	0.2014	0.1563
IM_2	0.1156	0.1342	0.0764	0.1069	0.2083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแยกแยะฟอลต์สแตเตอร์โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในมอเตอร์ IM\_1 ด้วยเทคนิค MCSA ทดสอบกับ 50 ชุดข้อมูลที่ไม่เคยเห็น

Unseen faults	Classified faults				
	Healthy	Fault_1	Fault_2	Fault_3	Fault_4
Healthy (C=32, $\gamma=0.0078$ )	100%	0% (Non Healthy)			
Fault_1 (C=0.125, $\gamma=8$ )		98.095%	1.905% (Non Fault_1)		
Fault_2 (C=0.125, $\gamma=0.5$ )	0.952%		99.048%	(Non Fault_2)	
Fault_3 (C=8, $\gamma=0.0078$ )	0% (Non Fault_3)			100%	
Fault_4 (C=0.5, $\gamma=0.5$ )	1.209% (Non Fault_4)				98.791%

ตารางที่ 5.5 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแยกแยะฟอลต์สแตเตอร์โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนในมอเตอร์ IM\_2 ด้วยเทคนิค MCSA ทดสอบกับ 50 ชุดข้อมูลที่ไม่เคยเห็น

Unseen faults	Classified faults				
	Healthy	Fault_1	Fault_2	Fault_3	Fault_4
Healthy (C=0.5, $\gamma=8$ )	98.623%	1.377% (Non Healthy)			
Fault_1 (C=0.125, $\gamma=0.5$ )		100%	0% (Non Fault_1)		
Fault_2 (C=8, $\gamma=0.03125$ )	0.532%		99.468%	(Non Fault_2)	
Fault_3 (C=32, $\gamma=0.0078$ )	0% (Non Fault_3)			100%	
Fault_4 (C=0.5, $\gamma=0.0078$ )	0.887% (Non Fault_4)				99.113%

ตารางที่ 5.6 ค่า RMSE ของการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สแตเตอร์ในตารางที่ 5.4 และ 5.5

RMSE of SVM	Healthy	Fault_1	Fault_2	Fault_3	Fault_4
IM_1	0.0557	0.1109	0.2371	0.0741	0.0271
IM_2	0.1133	0.2132	0.1664	0.2039	0.0136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบกับเทคนิค MCSA ซึ่งมีลักษณะของการออกแบบตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ทั้งนี้ผลการเปรียบเทียบกับเทคนิคขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ แสดงในลักษณะของตารางความลับสนที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 ซึ่งได้แสดงเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวินิจฉัยในมอเตอร์ IM\_1 และ IM\_2 ตามลำดับ โดยได้เลือกใช้จำนวนของคุณลักษณะเฉพาะของเทคนิค MCSA จากขนาดของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ใน 5 ตำแหน่งหรือกำหนดเป็นจำนวน 5 คุณลักษณะ ทั้งนี้เพื่อต้องการให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมีค่าใกล้เคียงกับเทคนิคขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ทำให้จำเป็นต้องใช้จำนวนของข้อมูลในขั้นตอนการสอนเป็นจำนวนมาก ประการหนึ่งที่มีความสำคัญคือการใช้ขนาดของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์เป็นคุณลักษณะเฉพาะนั้นมีข้อด้อยคือ ขนาดของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ในแต่ละตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันและยังเป็นการพิจารณาโดยใช้กระแสสเตเตอร์เพียงเฟสเดียวเท่านั้น ซึ่งต่างจากการนำเสนอในงานวิจัยนี้คือการรวมกันทั้งหมดใน 3 เฟสของขนาดสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ (ซึ่งปรากฏอยู่ในช่วงของฟอลต์สเตเตอร์เท่านั้น) ทั้งนี้การศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการเกิดขึ้นของฟอลต์สเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้เทคนิค MCSA สามารถดูรายละเอียดได้ใน [20] สำหรับผลการพิจารณาค่า RMSE ของตารางความลับสนที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 แสดงในตารางที่ 5.6 ซึ่งได้แสดงถึงค่าความผิดพลาดของการทดสอบการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ระหว่างข้อมูลเอาต์พุตจริงกับเป้าหมายของระบบการวินิจฉัย ซึ่งแสดงถึงกระบวนการสอนนี้มีความสมบูรณ์เช่นกันด้วยค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.2132

การพัฒนาเทคนิคขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเทคนิค MCSA ภายใต้การกำหนดให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแยกแยะมีค่าที่เท่ากันนั้น เทคนิค MCSA จำเป็นต้องใช้คุณลักษณะเฉพาะ (ข้อมูลอินพุต) ที่มากกว่าเทคนิคที่นำเสนอ และรวมถึงในขั้นตอนการสอนที่จำเป็นต้องใช้ตัวอย่างเพื่อการเรียนรู้ที่มากกว่าด้วย ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถสรุปได้ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบระหว่างวิธี  $dq0$  ที่นำเสนอกับวิธี MCSA

Method	Features no.	Training samples	Classified states	Correct rate (%)
Presented work	3	450	5	98-100
MCSA	5	1382	5	98-100

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอหลักการใหม่สำหรับการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนบนพื้นฐานขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  โดยในส่วนของ การค้นหาสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ได้ใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลช่วยในการตรวจจับ และลดผลกระทบจากการรบกวนของสเปกตรัมเมื่อผ่านการแปลงไปยังโดเมนความถี่ด้วย FFT การออกแบบอัลกอริทึมของการวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ที่นำเสนอนี้ได้แยกออกเป็น 2 แนวทางคือ การสร้างสัญญาณในโดเมนเวลาซึ่งพิจารณาเฉพาะช่วงความถี่ของฟอลต์สเตเตอร์ และการสร้างสัญญาณที่พิจารณาเฉพาะสัญญาณมูลฐานเท่านั้น สัญญาณที่สร้างขึ้นนี้จะถูกนำมาผ่านการแปลงเวกเตอร์อาร์คเพื่อให้ได้เป็นสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตในลักษณะ 3 มิติจะพบว่ารูปแบบวงโคจรขององค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  จะกว้างขึ้นตามความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ ซึ่งจากการทดลองกับมอเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ต่างกัน 2 พิกัด ลักษณะของวงจรที่กว้างขึ้นก็จะมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากสเปกตรัมฟอลต์ที่เกิดขึ้นต่างกันตามพารามิเตอร์ของมอเตอร์ แต่ประเด็นที่สำคัญคือวงโคจรที่กว้างขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับความรุนแรงของสัญญาณฟอลต์สเตเตอร์ นอกจากนี้แล้วแหล่งจ่ายไฟก็ยังทำให้ลักษณะของวงโคจรมีความแตกต่างกันได้ ซึ่งจากการจำลองจะพบว่าลักษณะความไม่สมดุลของแรงดันแหล่งจ่ายไฟจะทำให้ลักษณะของวงโคจรมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งรวมถึงการทดสอบในสภาวะที่มอเตอร์มีโหลดต่างกันก็จะทำให้มีสเปกตรัมฟอลต์เกิดขึ้นรวมอยู่ในช่วงความถี่ของฟอลต์สเตเตอร์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เพื่อต้องการลดผลกระทบดังกล่าวและรวมถึงในเรื่องจำนวนของข้อมูลที่ใช้ในการสอนทำให้ในขณะที่ทำการทดสอบ แหล่งจ่ายไฟต้องอยู่ในสภาวะที่สมดุลและมอเตอร์ไม่มีโหลด

ในขั้นตอนของการตัดสินใจระบุความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่าประสิทธิภาพของแต่ละสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  สำหรับนำมาใช้เป็นคุณลักษณะเฉพาะ เป็นข้อมูลอินพุตสอนให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ซึ่งจากการทดลองค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้ในแต่ละสัญญาณองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  พบว่ามีลักษณะเป็นสัดส่วนกับระดับความรุนแรงของฟอลต์สเตเตอร์ที่เกิดขึ้น ทั้งนี้จากการทดลองการวินิจฉัยมอเตอร์กรณีตัวนำสเตเตอร์ล้มเหลวในสภาวะลัดวงจรแบบรอบถึงรอบ พบว่าซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสามารถทำการแยกแยะและวินิจฉัยฟอลต์สเตเตอร์ได้เป็นอย่างดีโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องอยู่ในระดับสูงด้วยค่า 98-100% โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับเทคนิค MCSA ที่ได้ออกแบบขึ้น โดยใช้ขนาดของสเปกตรัมฟอลต์สเตเตอร์ 5 ตำแหน่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะภายใต้ขั้นตอนการทดสอบเดียวกัน เอกสพบว่าด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องที่เท่ากันแล้ว เทคนิค MCSA จำเป็นต้องใช้จำนวนของคุณไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเฉพาะและชุดข้อมูลในการสอนที่มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเทคนิค MCSA เป็นการใช้สเปกตรัมพอลต์ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อผลกระทบอื่นๆทั้งจากโครงสร้างของมอเตอร์ ผลกระทบจากแหล่งจ่ายไฟและโหลดทางกล นอกจากนี้แล้วการเปลี่ยนแปลงของโหลดยังมีผลต่อสัญญาณกระแสซึ่งต่างจากสัญญาณแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งข้อได้เปรียบอย่างชัดเจนของวิธีองค์ประกอบแรงดัน  $dq0$  ที่นำเสนอนี้คือสามารถนำไปใช้ได้กับมอเตอร์ที่พิกัดต่างๆภายใต้ระดับแรงดันเดียวกันได้ ต่างจากเทคนิค MCSA ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการปรับแต่งค่าอัตราขยายของกระแสใหม่ในการทำการวินิจฉัยมอเตอร์ที่มีพิกัดต่างกัน นอกจากนี้แล้วเทคนิคที่นำเสนอยังสามารถตรวจสอบสถานะความสมดุลของแหล่งจ่ายไฟได้อีกด้วย โดยการเปลี่ยนจุดอ้างอิงจากจุดต่อสายของมอเตอร์มาเป็นที่ตำแหน่งนิวตรอลของแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเทคนิค MCSA ก็จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายไฟก่อนทำการวินิจฉัยด้วยเช่นกัน

ข้อเสนอแนะสำหรับการวินิจฉัยพอลต์สเตเตอร์ในงานวิจัยนี้ กล่าวคือเกณฑ์ที่ได้กล่าวมาแล้วว่ามอเตอร์นั้นถึงแม้ว่าได้ผลิตขึ้นมาใหม่จากบริษัทเดียวกัน ก็ไม่ได้มีความสมบูรณ์อย่างแท้จริง รวมถึงเมื่อได้ติดตั้งเข้ากับ โหลดแล้วก็ตาม ก็ยังสามารถทำให้มีสเปกตรัมพอลต์เกิดขึ้นได้เช่นกัน สาเหตุที่สำคัญคือความไม่ได้แนวอย่างแท้จริงของการคัปปลิงเข้ากับ โหลด ดังนั้นการวินิจฉัยที่มีความถูกต้องและแม่นยำ จึงควรมีการจัดเก็บข้อมูลของสเปกตรัมพอลต์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณมอเตอร์ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับนำมาพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมพอลต์เพื่อนำมาสู่ข้อการวินิจฉัยที่มีความถูกต้องสูง นอกจากนี้แล้วในขณะที่ทดสอบก็ควรหลีกเลี่ยงผลกระทบของสัญญาณพอลต์อื่นที่สามารถเกิดขึ้นได้เช่น แหล่งจ่ายไฟ ความไม่สมดุลของระดับแรงดัน พิกัด โหลดมอเตอร์ และรวมถึงส่วนประกอบอื่นๆของมอเตอร์ เช่น ใบพัดซึ่งสามารถถอดออกได้ เป็นต้น

สำหรับแนวทางการพัฒนาต่อ นั้นคือการใช้อัลกอริทึมในการแปลงไปยังโดเมนความถี่ที่สามารถลดผลการรบกวนของสเปกตรัมได้ดีกว่าอัลกอริทึมของ FFT แต่ก็จะมีข้อด้อยในด้านอื่น ที่สำคัญคือเวลาที่ใช้ในการประมวลผล เช่น อัลกอริทึมของ MEM, MUSIC และในเอกสารอ้างอิงที่ [60] เป็นต้น ในส่วนของจำนวนข้อมูลสำหรับการสอนให้กับซอฟต์แวร์เด็คเตอร์แมชชีนสามารถทำให้ลดลงได้เช่น การใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal components analysis, PCA) เป็นต้น นอกจากนี้แล้วแนวทางการพัฒนาต่อซึ่งกำลังได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นจำนวนมาก คือ การเฝ้าตรวจสอบสถานะและส่งข้อมูลสำหรับแจ้งเตือนผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตซึ่งจะช่วยให้สามารถทราบปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปสู่แนวทางการแก้ไขได้อย่างทันท่วงทีอีกด้วย

## บรรณานุกรม

- [1] M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, pp. 984-993, Oct. 2000.
- [2] A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 20, No. 1, pp. 106-114, Mar. 2005.
- [3] W. Cao and K. J. Bradley, "Assessing the impacts of rewind and repeated rewinds on induction motors: Is an opportunity for redesigning the machine being wasted?," IEEE Trans. Industry Application, Vol. 42, No. 4, pp. 958-964, July/Aug. 2006.
- [4] W. Cao, K. J. Bradley and J. Allen, "Evaluation of additional loss in induction motors consequent on repair and rewinding," IEE Proc. Electromics, Power Application, Vol. 153, No. 1, pp. 1-6, Jan. 2006.
- [5] S. Nandi, H. A. Toliyat and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, pp.719-729, Dec. 2005.
- [6] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrelcage induction motors," IEEE Trans. Industry Application, Vol. 28, pp. 921-937, July/Aug. 1992.
- [7] W. T. Thomson, D. Rankin and D. G. Dorrell, "On-line current monitoring to diagnose airgap eccentricity in large three-phase induction motors-industrial case histories verify the predictions," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.14, No.4, pp.1372-1378, Dec. 1999.
- [8] M. A. Cash, T. G. Habetler and G. B. Kliman, "Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 34, No. 6, pp.1234-1239, Nov./Dec. 1998.
- [9] A. J. M. Cardoso, S. M. A. Cruz and D. S. B. Fonseca, "Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by park's vector approach," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp.595-598, Sep. 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] S. Nandi and A. Toliyat, "Novel frequency-domain-based technique to detect stator interturn faults in induction machines using stator-induced voltage after switch-off," IEEE Trans. Industry Application, Vol. 38, No. 1, pp. 101-109, Jan./Feb. 2002.
- [11] F. Zidani, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo and M. S. Nait-Said, "Induction motor stator faults diagnosis by a current concordia pattern-based fuzzy decision system," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 18, No. 4, pp. 469-475, Dec. 2003.
- [12] P. Garcia, F. Briz, M. W. Degner and A. B. Diez, "Diagnostics of induction machines using the zero sequence voltage," IEEE-IAS Annu. Meeting, pp.735-742, Oct. 2004.
- [13] A. Widodo and B. S. Yang, "Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, pp. 2560-2574, 2007.
- [14] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni and G. A. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 55, No. 12, pp. 4109-4126, Dec. 2008.
- [15] P. Meesad, "A hybrid intelligent system and its application to medical diagnosis," Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, USA., 2002.
- [16] S. Nandi, "Stator fault detection in induction machines using triplen harmonics at motor terminal voltage after switch-off," IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 3, pp. 2285-2290, 2005.
- [17] P. C. Krause, "Analysis of electric machinery," McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [18] C. Manop and V. Kinnares, "Stator faults detection based on the  $dq0$  voltage components," IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2008), China, 2008.
- [19] J. H. Jung, J. J. Lee, and B. H. Kwon, "Online diagnosis of induction motors using MCSA," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 53, No. 6, pp. 1842-1852, Dec. 2006.
- [20] W. T. Thomson, "On-line MCSA to diagnosis shorted turns in low voltage stator winding of 3-phase induction motors prior to failure," IEEE International Electric Machines and Drives Conference, pp. 891-898, 2001.
- [21] P. Vijayraghavan and R. Krishnan, "Noise in electric machines: a review," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 35, No. 5, pp.1007-1013, Sep./Oct. 1999.

- [22] G. K. Singh and S. A. S. A. Kazzaz, “**Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research-a survey,**” *Electric Power Systems Research*, Vol. 64, pp. 145-158, Feb. 2003.
- [23] B. Mirafzal and N. A. O. Demerdash, “**On innovative methods of induction motor interturn and broken-bar fault diagnostics,**” *IEEE Trans. Industry Application*, Vol. 42, No.2, pp. 405-414, Mar./Apr. 2006,
- [24] W. T. Thomson and M. Fenger, “**Current signature analysis to detect induction motor faults,**” *Industry Applications Magazine*, IEEE, Vol.7, Issue 4, pp.26-34, July-Aug 2001.
- [25] A. H. Bonnett, “**Analysis of the impact of pulse-width modulated inverter voltage waveforms on AC induction motors,**” *IEEE Trans. Industry Application*, Vol. 32, No. 2, pp. 386-392, Mar./Apr. 1996.
- [26] M. Fenger, S. R. Campbell and J. Pedersen, “**Motor winding problems caused by inverter drives,**” *IEEE Industry application Magazine*, pp. 22-31, July/Aug. 2003.
- [27] G. M. Joksimovic, and J. Penman, “**The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors,**” *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, pp. 1078-1084, Oct. 2000.
- [28] H. W. Penrose and J. Jette, “**Static motor circuit analysis: an introduction to theory and application,**” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 16, No. 4, pp. 6-10, July/Aug. 2000.
- [29] A. M. Knight and S. P. Bertani, “**Mechanical fault detection in a medium-sized induction motor using stator current monitoring,**” *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 20, No. 4, pp. 753-760, Dec. 2005.
- [30] M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, “**What stator current processing based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis,**” *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 18, No. 2, pp. 238-244, June 2003.
- [31] T. W. S. Chow and G. Fei, “**Three phase induction machines asymmetrical faults identification using bispectrum,**” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 4, pp. 688-693, Dec. 1995.

- [32] C. Manop, “**Induction motors speed calculation based on rotor slot harmonics using stator current digital signal processing techniques,**” Master thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, 2001.
- [33] H. Douglas, P. Pillay, and A. K. Ziarani, “**A new algorithm for transient motor current signature analysis using wavelets,**” IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 40, No. 5, pp. 1361-1368, Sep./Oct. 2004.
- [34] P. V. J. Rodriguez and A. Arkkio, “**Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic,**” ScienceDirect, Applied Soft Computing, Vol. 8, pp. 1112-1120, Mar. 2008.
- [35] S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu and T. G. Habetler, “**A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems,**” IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 55, No. 12, pp. 4127-4136, Dec. 2008.
- [36] M. J. Costello, “**Shaft voltage and rotating machinery,**” IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, pp. 419-426, Mar./Apr. 1993.
- [37] A. H. Bonnett, “**Understanding efficiency in squirrel-cage induction motors,**” IEEE Trans. Industry Application, Vol. IA-16, No. 4, pp. 476-483, July/Aug. 1980.
- [38] A. H. Bonnett and B. Gibbon, “**The Results are in: Motor Repair’s Impact on Efficiency,**” White paper, EASA. [Online], Available:[http://www.reliabilityweb.com/excerpts/ex-cerpts/motor\\_repair\\_efficiency.pdf](http://www.reliabilityweb.com/excerpts/ex-cerpts/motor_repair_efficiency.pdf)
- [39] E. B. Agamloh, “**The partial-load efficiency of induction motors,**” IEEE Trans. Industry Application, Vol. 45, No. 1, pp. 332-340, Jan./Feb. 2009.
- [40] S. A. S. A. Kazzaz and G. K. Singh, “**Experimental investigation on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques,**” Electric Power Systems Research, Vol. 65, pp. 197-221, June 2003.
- [41] F. Zhang, Z Geng and W. Yuan, “**The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system,**” IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 160-164, Apr. 2001.
- [42] R. C. Wu and T. P. Tsao, “**The optimization of spectrum analysis for digital signals,**” IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 2, pp.398-405, Apr. 2003.

- [43] T. P. Tsao, R. C. Wu and C. C. Ning, **The optimization of spectral analysis for signal harmonics**, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp.149-153, Apr. 2001.
- [44] E. C. Ifeachor and B. W. Jervis, **“Digital signal processing a practical approach,”** U.S., addison-wesley publishing, 1996.
- [45] S. M. Kay, **“Modern spectral estimation theory & application,”** Island, Prentice hall, 1988
- [46] K. Kyusung and A. G. Parlos, **“Induction motor fault diagnosis based on neuropredictors and wavelet signal processing,”** IEEE/ASME, Trans. Mechatronics, Vol. 7, No. 2, pp. 201-219, June 2002.
- [47] R. R. Schoen and T. G. Habetler, **“Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines,”** IEEE Trans. Industry Application, Vol. 31, No. 4, pp. 900-906, July/Aug. 1995.
- [48] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran and R. G. Bartfield, **“Motor bearing damage detection using stator current monitoring,”** IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 31, No. 6, pp. 1274-1279, Nov./Dec. 1995.
- [49] S. F. Farag, R. G. Bartheld and T. G. Habetler, **“An integrated, on-line, motor protection system,”** Industry Application Conf., 29<sup>th</sup> IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp. 117-122, 1994.
- [50] S. Nandi, R. Bharadwaj, H. A. Toliyat and A. G. Parlos, **“Study of three phase induction motors with incipient rotor cage faults under different supply conditions,”** Industry Application Conf., 34<sup>th</sup> IAS Annual Meeting, Vol. 3, pp. 1922-1928, Oct. 1999.
- [51] E. Zheng, P. Li and Z. Song, **“Performance analysis and comparison of neural networks and support vector machines classifier,”** Proc. of the 5<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, China, Vol. 5, pp. 4232-4235, 2004.
- [52] V. N. Vapnik, **“An overview of statistical learning theory,”** IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 10, No. 5, 988-999, Sep. 1999.
- [53] N. Cristianini and J. S. Taylor, **“An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods,”** Cambridge University Press, 2000.
- [54] C. J. C. Burges, **“A tutorial on support vector machines for pattern recognition,”** Data Mining and Knowledge Discovery, Vol. 2, No. 2, pp. 121-167, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [55] C. C. Chang and C. J. Lin, “**LIBSVM: A library for support vector machines, software available,**” <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- [56] H. T. Lin, C. J. Lin and R. C. Weng, “**A note on Platt’s probabilistic outputs for support vector machines, technical report,**” Department of Computer science, National Taiwan University, 2004, <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/plattprob.pdf>.
- [57] S. Khomfoi and L. M. Tolbert, “**Fault diagnostic system for a multilevel inverter using a neural network,**” IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 22, No. 3, pp. 1062-1069, May 2007.
- [58] R. Fang and H. Ma, “**Application of MCSA and SVM to induction machine rotor fault diagnosis,**” The 6<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, Vol. 2, pp. 5543-5547, 2006.
- [59] P. Vas, “**Parameter estimation, condition monitoring and diagnosis of electrical machines,**” Oxford, Clarendon Press, pp.145-156, 1993.
- [60] A. S. Yolmaz, A. Alkan and M. Asyali, “**Applications of parametric spectral estimation methods on detection of power system harmonics,**” Electric Power System Research, Vol. 78, pp. 683-693, Apr. 2008.

### ภาคผนวก ก.

## ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการวินิจฉัยฟอลต์สเตรเตอร์

- ขั้นตอนการจัดเรียงข้อมูลฟอลต์ (แทนด้วย 1) และข้อมูลที่ไม่ใช่ฟอลต์ (แทนด้วย 0)

```

Editor - C:\Documents and Settings\Chalermschat\Desktop\data_3s.txt
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Basic
1 0 1:0.000000 2:0.000000 3:0.000000 4:0.000000 5:0.000000 6:0.000000 7:0.000000 8:0.000000 9:0.000000 10:0.000000
2 0 1:0.000017 2:0.000106 3:0.000193 4:0.000110 5:0.000057 6:0.000183 7:0.000539 8:0.000515 9:0.000157 10:0.000000
3 0 1:0.000282 2:0.000230 3:0.000397 4:0.000370 5:0.000219 6:0.000116 7:0.001359 8:0.018555 9:0.020753 10:0.000000
4 0 1:0.000076 2:0.000091 3:0.000004 4:0.000005 5:0.000001 6:0.000003 7:0.000421 8:0.004677 9:0.003390 10:0.000000
5 0 1:0.000006 2:0.000348 3:0.000419 4:0.000349 5:0.000428 6:0.000237 7:0.000071 8:0.006700 9:0.007688 10:0.000000
6 0 1:0.000134 2:0.000005 3:0.000026 4:0.000054 5:0.000024 6:0.000133 7:0.000698 8:0.012448 9:0.011510 10:0.000000
7 0 1:0.000046 2:0.000164 3:0.000168 4:0.000189 5:0.000168 6:0.000100 7:0.000550 8:0.017925 9:0.018490 10:0.000000
8 0 1:0.000009 2:0.000310 3:0.000167 4:0.001034 5:0.000446 6:0.000509 7:0.002651 8:0.055498 9:0.053774 10:0.000000
9 0 1:0.000064 2:0.000032 3:0.000021 4:0.000023 5:0.000063 6:0.000070 7:0.000301 8:0.005370 9:0.005666 10:0.000000
10 0 1:0.000075 2:0.000091 3:0.000007 4:0.000005 5:0.000001 6:0.000003 7:0.000421 8:0.004677 9:0.003390 10:0.000000
11 0 1:0.000006 2:0.000348 3:0.000419 4:0.000349 5:0.000428 6:0.000237 7:0.000071 8:0.006700 9:0.007688 10:0.000000
12 0 1:0.000129 2:0.000005 3:0.000026 4:0.000054 5:0.000024 6:0.000133 7:0.000698 8:0.012448 9:0.011510 10:0.000000
13 0 1:0.000046 2:0.000164 3:0.000177 4:0.000189 5:0.000168 6:0.000100 7:0.000550 8:0.017925 9:0.018490 10:0.000000
14 1 1:0.000024 2:0.000018 3:0.000026 4:0.000008 5:0.000070 6:0.000033 7:0.001246 8:0.020054 9:0.020151 10:0.000000
15 1 1:0.000165 2:0.000312 3:0.000513 4:0.001179 5:0.000737 6:0.000158 7:0.005606 8:0.063638 9:0.048801 10:0.000000
16 1 1:0.000030 2:0.000222 3:0.000193 4:0.000481 5:0.000051 6:0.000406 7:0.007152 8:0.112021 9:0.088505 10:0.000000
17 1 1:0.000024 2:0.000018 3:0.000026 4:0.000008 5:0.000070 6:0.000033 7:0.001246 8:0.020054 9:0.020151 10:0.000000
18 1 1:0.000165 2:0.000312 3:0.000513 4:0.001179 5:0.000737 6:0.000158 7:0.005606 8:0.063638 9:0.048801 10:0.000000
19 1 1:0.000030 2:0.000222 3:0.000193 4:0.000481 5:0.000051 6:0.000406 7:0.007152 8:0.112021 9:0.087505 10:0.000000
20 1 1:0.000033 2:0.000222 3:0.000203 4:0.000464 5:0.000051 6:0.000396 7:0.008001 8:0.101021 9:0.088445 10:0.000000
21 1 1:0.000021 2:0.000018 3:0.000022 4:0.000008 5:0.000070 6:0.000033 7:0.001246 8:0.020054 9:0.020151 10:0.000000
22 1 1:0.000030 2:0.000222 3:0.000193 4:0.000481 5:0.000051 6:0.000406 7:0.007152 8:0.112021 9:0.088505 10:0.000000
23 1 1:0.000024 2:0.000018 3:0.000026 4:0.000008 5:0.000070 6:0.000033 7:0.001246 8:0.020054 9:0.020151 10:0.000000
24 1 1:0.000165 2:0.000312 3:0.000513 4:0.001179 5:0.000737 6:0.000158 7:0.005606 8:0.063638 9:0.048801 10:0.000000
25 1 1:0.000030 2:0.000222 3:0.000193 4:0.000481 5:0.000051 6:0.000406 7:0.007152 8:0.112021 9:0.088505 10:0.000000

```

- หลังจากผ่านการแปลงเป็นค่า pu. แล้ว

```

data_3s - Notepad
File Edit Format View Help
0 1:0.000000 2:0.000000 3:0.000000 4:0.000000 5:0.000000 6:0.000000 7:0.000000 8:0.000000 9:0.000000
87:0.894874 88:0.866605 89:0.835055 90:0.800064 91:0.762034 92:0.720924 93:0.676991 94:0.630433
163:0.476441 164:0.529917 165:0.581303 166:0.630394 167:0.676997 168:0.720929 169:0.762015
239:-0.835016 240:-0.800095 241:-0.762015 242:-0.720929 243:-0.676997 244:-0.630394 245:-0.581303
316:-0.630394 317:-0.676997 318:-0.720929 319:-0.762015 320:-0.800095 321:-0.835016 322:-0.866605
62015 392:0.720929 393:0.676997 394:0.630394 395:0.581303 396:0.529917 397:0.476441 398:0.421083
630394 467:0.676997 468:0.720929 469:0.762015 470:0.800095 471:0.835016 472:0.866642 473:0.894874
0.720929 543:-0.676997 544:-0.630394 545:-0.581303 546:-0.529917 547:-0.476441 548:-0.421083
19:-0.762015 620:-0.800095 621:-0.835016 622:-0.866642 623:-0.894848 624:-0.919522 625:-0.940595
695:0.581303 696:0.529917 697:0.476441 698:0.421083 699:0.364065 700:0.305609 701:0.245947 702:0.187468
5 770:0.800095 771:0.835016 772:0.866642 773:0.894848 774:0.919522 775:0.940568 776:0.957901
81303 846:-0.529917 847:-0.476441 848:-0.421083 849:-0.364065 850:-0.305609 851:-0.245947 852:-0.187468
:-0.866642 923:-0.894848 924:-0.919522 925:-0.940568 926:-0.957901 927:-0.971454 928:-0.981117
421083 999:0.364065 1000:0.305609 1001:0.245947 1002:0.185315 1003:0.123951 1004:0.062098 1005:0.000000
68:0.720929 1069:0.762015 1070:0.800095 1071:0.835016 1072:0.866642 1073:0.894848 1074:0.919522
3 72:0.001280 73:0.000543 74:0.000396 75:0.000091 76:0.000519 77:0.000614 78:0.000605 79:0.000600
0.249495 150:-0.203171 151:-0.159269 152:-0.117468 153:-0.077339 154:-0.038372 155:-0.000000
226:-0.1050203 227:-0.1078363 228:-0.1098902 229:-0.111398 230:-0.111398 231:-0.111398 232:-0.111398
17468 303:0.077339 304:0.038372 305:0.000000 306:-0.038372 307:-0.077339 308:-0.117468 309:-0.17468
078363 378:1.098902 379:1.111398 380:1.115592 381:1.111398 382:1.098902 383:1.078363 384:1.051398
17468 453:-0.077339 454:-0.038372 455:0.000000 456:0.038372 457:0.077339 458:0.117468 459:0.17468
1.111398 530:-0.111398 531:-0.111398 532:-0.1098902 533:-0.1078363 534:-0.1050203 535:-0.1014993
6:-0.038372 607:-0.077339 608:-0.117468 609:-0.159269 610:-0.203171 611:-0.249495 612:-0.298441
81:1.111398 682:1.098902 683:1.078363 684:1.050203 685:1.014993 686:0.973435 687:0.926337 688:0.875269
756:0.838372 757:0.077339 758:0.117468 759:0.159269 760:0.203171 761:0.249495 762:0.298441 763:0.347339
8902 833:-0.1078363 834:-0.1050203 835:-0.1014993 836:-0.973435 837:-0.926337 838:-0.874593 839:-0.823435
0.159269 910:-0.203171 911:-0.249495 912:-0.298441 913:-0.350070 914:-0.402495 915:-0.460879
0203 985:1.014993 986:0.973435 987:0.926337 988:0.874593 989:0.819146 990:0.760967 991:0.701000
0.000000 1056:0.038372 1057:0.077339 1058:0.117468 1059:0.159269 1060:0.203171 1061:0.249495
57:0.000086 58:0.000010 59:0.000105 60:0.000164 61:0.000025 62:0.000018 63:0.000067 64:0.000022
4111 137:-0.902060 138:-0.855830 139:-0.806136 140:-0.753718 141:-0.699309 142:-0.643620 143:-0.588488
366788 214:-0.420870 215:-0.476220 216:-0.532503 217:-0.589282 218:-0.646031 219:-0.702143 220:-0.758801

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. C. Manop, V. Kinnares and S. Chunwiphat, "SVM-based stator fault diagnosis for induction motors using  $dq0$  voltage components," Accepted for publication in the International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC), in vol.6, no.11, Nov. 2010.
2. C. Manop and V. Kinnares, "Stator faults detection based on the  $dq0$  voltage components," IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2008), China, pp. 1-5, Apr. 2008.
3. C. Manop, W. Senavongse, V. Kinnares and C. Tangsiriworakul, "A low cost prototype for testing stator winding shorted turns in 3-phase induction motors," IEEE International Conference on Industrial Technology (IEEE ICIT2005), Hong Kong, pp. 734-738, Dec. 2005.

**December 14, 2009**

**Reference No.: IJICIC-09-0611**

**Title: SVM-BASED STATOR FAULT DIAGNOSIS FOR INDUCTION MOTORS USING  $dq0$  VOLTAGE COMPONENTS**

**Author(s): Chalermchat Manop, Vijit Kinnares and Suphot Chunwiphat**

Dr. Chalermchat Manop  
 Department of Electrical Engineering  
 Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
 E-mail: [kmchaler@kmitl.ac.th](mailto:kmchaler@kmitl.ac.th)

Dear Dr. Chalermchat Manop,

We have completed the review of your paper (Chalermchat Manop, Vijit Kinnares and Suphot Chunwiphat), "SVM-BASED STATOR FAULT DIAGNOSIS FOR INDUCTION MOTORS USING  $dq0$  VOLTAGE COMPONENTS" (revised version), submitted to *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* (IJICIC).

I am happy to inform you that your paper mentioned above has been accepted for publication in the IJICIC. We are planning tentatively to publish your paper in Vol.6, No.11, November 2010 of the IJICIC, if the final version of your paper (LaTeX source files or Word file) is satisfactory and can reach us within 30 days from the date of this letter.

Thank you for your interest and submitting your work to the IJICIC. Hope to work for you again in the near future.

Sincerely yours,



Yan Shi

Professor, Ph.D., Executive Editor, IJICIC  
 School of Industrial Engineering, Tokai University  
 9-1-1, Toroku, Kumamoto 862-8652, Japan  
 Tel & Fx: (+81 96) 3862666  
 E-mail: [office@ijicic.org](mailto:office@ijicic.org)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SVM-Based Stator Fault Diagnosis for Induction Motors Using $dq0$ Voltage Components

Chalermchat Manop<sup>1</sup>, Vijit Kinnares<sup>1</sup> and Suphot Chunwiphat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
{ kmchaler; kkwijit }@kmitl.ac.th

<sup>2</sup>Department of Electronics Engineering Technology, College of Industrial Technology,  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand  
spcp@kmutnb.ac.th

Received June 2009; revised December 2009

**ABSTRACT.** *This paper presents a new technique for diagnosis of stator winding shorted turns in three phase induction motors using support vector machine (SVM) as a classifier in conjunction with a voltage signature analysis as feature extraction. The proposed  $dq0$  voltage components related to three phase voltages are obtained by using Park's transformation. Unlike general  $dq0$  quantity, the required  $dq$  components are considered from only harmonics in a certain range resulted from the stator shorted turn fault whilst the required zero component is determined from the fundamental voltage excitation only. The procedure for finding the harmonic spectrum associated with the stator fault employs a FFT technique together with digital signal processing in order to enlarge such harmonics to be easily detected. The data of  $d$ ,  $q$  and zero components will be used as the input features for a SVM classification and diagnosis. In order to confirm that the  $dq0$  voltage components could be used as quantity for identifying the stator fault, patterns of  $dq0$  voltage components in three-dimension are plotted. The obtained trajectories are obviously different depending on the severity of the shorted turn fault. In training and testing with a multiclass-SVM classification, the good accuracy is obtained under various load conditions for both healthy and stator fault conditions. The SVM classification performance of the proposed method has high accuracy greater than 98% comparable to other feature extraction processes such as a motor current signature method (MCSA) but the number of training data and features for the proposed technique are less.*

**Keywords:** Support vector machine, condition monitoring, stator failure,  $dq0$  voltage components, Park's transformation

**1. Introduction.** An induction motor has been developed continually and is now a first choice in many industrial applications. The induction motor has several advantages over

other electrical machines in terms of high efficiency, low maintenance, very high reliability, simple construction, reasonably small size, ruggedness, etc. Motor failure statistics reveal that the two most important factors are bearing failure about 40%-50% and stator failure about 30%-40% [1]. The main causes of stator failure problem are a combination of various stresses including thermal, electrical, mechanical, and environmental [2]. With these causes, insulation failure often occurs and leads to shorted turns. In many industrial applications, in order to avoid unexpected failure such as reduced output, product quality etc., condition monitoring of motor is necessary. The condition monitoring techniques both time and frequency domains have been investigated and presented by several researchers with satisfactory results [1]. On-line condition monitoring systems seem to be more attractive. Although, a motor current signature analysis (MCSA) is widely used in machine fault diagnosis, it may suffer from the effect of noise in machines and power source. The use of a voltage signature analysis is less attractive than that of MCSA for the stator fault diagnosis since the effect of stator faults on stator voltages is difficult to be detected. Park vector in a form of  $dq0$  quantity for machine condition monitoring and diagnosis are mostly found in MCSA rather than in the voltage signature analysis [3]. The difference between a Concordia vector and Park components was proposed in [4]. In the frequency domain based technique, the applications of advanced signal processing techniques are used successfully to identify harmonic spectrum. The diagnostic techniques have progressed from traditional methods to artificial intelligence (AI) based techniques such as fuzzy logic, artificial neural network (ANN), support vector machine (SVM), etc., all of them have been employed to create automatic motor health diagnosis.

Presently, SVM has been successfully applied in many applications to solve classification problems. SVM based classifier is claimed to have better generalization properties than ANN based classifiers because its error surface is free of local minima and has a unique global optimum [5]. The SVM, successfully implemented, can lead to high performance in practical applications such as for image coding [6], for fault diagnostic system in multilevel inverter [7], and for induction motor fault diagnosis [8]. Reference [9] summarizes and reviews the application of SVM in machine condition monitoring and diagnosis which yields excellent performance and high accuracy under various conditions.

In this paper, the new non-invasive technique for detection and diagnosis of stator winding shorted turns in induction motors is introduced. It involves the analysis of the  $dq0$  voltage components for a signature analysis and SVM for a classification. The analysis of the  $dq0$  voltage components considers a  $dq$  and zero axis frame. To obtain  $dq$  and zero voltage components from three phase stator voltages on the basis of Park's transformation, the motor must be star connected with floating neutral. The  $dq$  components are obtained from the harmonic spectrum band associated with stator faults only and the zero component is considered from only fundamental component. The difference of stator fault harmonic amplitudes between healthy and faulty motors using modern signal processing techniques, combined with interpolating windowed FFT, is used for the fault detection. Finally, multiclass-SVM classification is implemented to diagnose the stator winding shorted turns in induction motors. The advantage of the proposed method over MCSA is the ease in detection of a power supply imbalance.

**2. Stator Fault Signal in Induction Motors.** In a machine, harmonics in the current spectra are a result of voltage harmonics induced in the winding by air gap flux density harmonics [10]. In this paper, we use harmonic voltages generated by stator winding shorted turns or stator fault to predict its failure. Generally these harmonics are fairly difficult to be detected. Therefore advanced digital signal processing has made these components possibly detectable. A turn-to-turn shorting is the initial stator failure condition which is hard to detect due to its low level signals [2]. If the motor operates under a turn-to-turn short condition for a long time, the condition eventually becomes heavy severity, ie. a coil-to-ground fault, which may cause the motor to stop working. The frequency components to be detected in the stator winding shorted turns ( $f_{stator}$ ) are defined by

$$f_{stator} = f_1 \left\{ n \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm k \right\} \quad (1)$$

where  $f_1$  is the electrical supply frequency,  $s$  is the per unit slip,  $p$  is the number of pole pair,  $k = 1, 3, 5 \dots$ , and  $n = 1, 2, 3, \dots$  [1]. Due to the transient nature of the signal processed, detectability may be good only for  $k = 1$  [11].

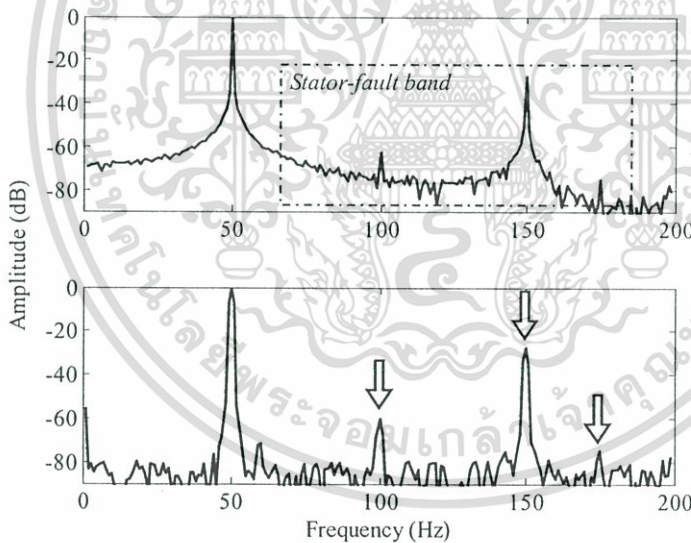


FIGURE 1. Stator phase voltage spectra of different analysis methods, (top) the FFT method, and (bottom) the windowed FFT method.

In this paper, we use the application of digital signal processing technique for harmonic detection to transform time domain to frequency domain using a fast Fourier transform (FFT) technique. The transformed frequency domain can be easily converted back to the time domain using an inverse fast Fourier transform function. The data preprocessing is an important step which can reduce noise and maintain more information for a better classification. Misapplication of FFT results in the signal showing the grid effect and the leakage effect. The leakage effect results from the sampling period not equal to the

integer-times of the signal period [12]. However, the interpolation algorithm can eliminate the errors caused by the grid effect and the windowing can reduce the harmonic leakage.

FIGURE 1 shows the analysis of harmonic spectra particularly at the interval of harmonics caused by the stator winding shorted turns (indicated by the arrow), calculated from equation (1). The stator fault harmonic bands under changing load conditions from no load to full load are used to calculate  $dq$  components. The fundamental is only used to calculate the zero component, which will be detailed in the following section.

**3. Proposed Approach of  $dq0$  Voltage Component Decomposition.** The principle of stator winding shorted turn detection is based on the phase impedance imbalance in any of the stator phase [13]. This effect causes harmonic voltages and currents and their relationship depends on the severity of the stator faults. In this paper, we employ the analysis of the  $dq0$  voltage components for the stator faults diagnosis obtained from voltages between motor terminals and a star point ( $v_{an}$ ,  $v_{bn}$ ,  $v_{cn}$ ) and using Park's transformation, well-known for a machine analysis, to obtain  $dq0$  voltage components ( $v_d$ ,  $v_q$ ,  $v_0$ ) [14]. The  $dq0$  voltage components for a digital technique using Park's transformation are defined as

$$\begin{bmatrix} v_d(n) \\ v_q(n) \\ v_0(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an}(n) \\ v_{bn}(n) \\ v_{cn}(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

where  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$  and the  $N$  is the whole number of data.

In reference [15], stator faults diagnosis has been conducted in induction motors based on the computer-aided using the current Park's vector which yields satisfactory results. However, such analysis is based on the combination of stator fault signals and fundamental signals of locus pattern in 2-dimension ( $d$  and  $q$  components) which is sensitive to misleading interpretation due to the significant difference of stator faults and fundamental signals. Besides, stator faults signals also comprise other harmonics caused by several factors from both internal and external machines. In this paper, we aim to improve the methodology to more accurately diagnose the stator failure. On the basis of Park's transformation, for  $d$  and  $q$  components ( $v_{d\_fst}$ ,  $v_{q\_fst}$  in time domain), we will consider harmonics associated with the stator fault only while neglecting harmonics, not generated by the stator fault. We consider the harmonic voltage band caused by the stator faults ( $v_{a,b,c\_fst}$ ) in equation (1) which can be determined by parameter  $s$  relating to no load to full load. The resultant matrix form of equation (2) excluding the fundamental component can be obtained as

$$\begin{bmatrix} v_{d\_fst}(n) \\ v_{q\_fst}(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a\_fst}(n) \\ v_{b\_fst}(n) \\ v_{c\_fst}(n) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

For the zero sequence voltage ( $v_{0\_f1}$  in time domain) obtained by using the sum of three phase voltages, considering only the fundamental component ( $v_{a,b,c\_f1}$ ). Thus equation (2) becomes

$$\begin{bmatrix} v_{0\_f1}(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a\_f1}(n) \\ v_{b\_f1}(n) \\ v_{c\_f1}(n) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

When considering zero voltage component using only fundamental component, reference [16] has clearly demonstrated using the analog circuit. The example result obtained from the proposed transformation of voltage component signals with the stator winding shorted turns is shown in FIGURE 2. It is noted that the zero sequence component exists. The reason is the fact that the stator fault is likely to cause a voltage imbalance. The RMS values of these signals will be as the input features for SVM. If the motor is healthy, these signal component waveforms are very small and close to straight lines having approximately zero values. According to the example waveform result, it is implied that the variety of a trajectory shape can be achieved with a three-dimension plot. For the healthy and perfect source, the shape of the trajectory will be close to a single point. In this work, these trajectory patterns will be used only for monitoring and investigating the severity of the stator failure.

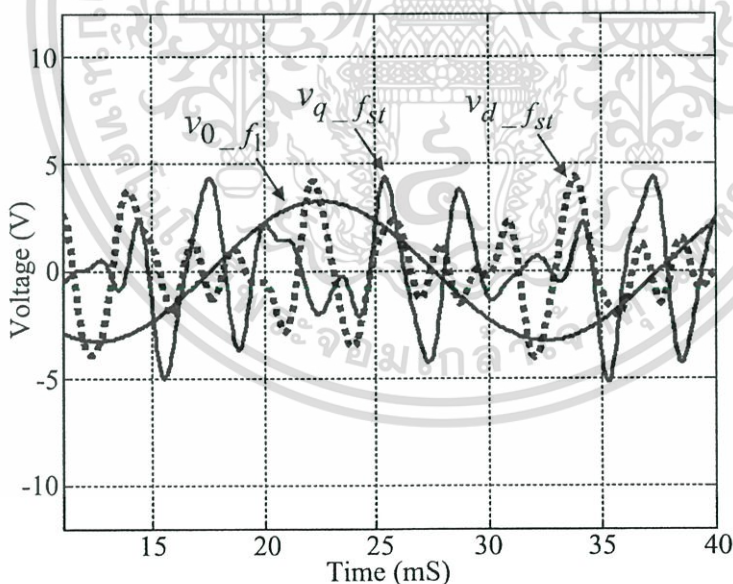


FIGURE 2. Example result of the  $v_{d\_fst}$ ,  $v_{q\_fst}$ , and  $v_{0\_f1}$  signals for the stator winding shorted turns in induction motors.

**4. SVM for Classification and Diagnosis.** The signals of  $dq0$  voltage components are considered separately in three features ( $v_{d\_fst}$ ,  $v_{q\_fst}$ , and  $v_{0\_f1}$ ) and used to learn by support vector machines (SVM) algorithm. SVM is a learning system that uses a hypothesis space

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of linear and non-linear functions in an  $n$ -dimensional feature space. For training the system, a learning algorithm based on optimization theory which implements a learning bias derived from statistical learning theory will be used to train the system [17-18].

**4.1. SVM Theory.** Let us consider the binary classification problem, a training dataset of  $l$  samples can be represented in the forms:  $\{x_k, y_k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, l$  and  $x_k \in \mathcal{R}^n$ ,  $y_k \in \{-1, +1\}$ .  $x_k$  is an input vector and  $y_k$  is a class label. The basis of support vector machine classification is to construct a hyperplane that separates this training dataset into two classes. The hyperplane is determined by the pair  $(\mathbf{w}, b)$  where  $\mathbf{w}$  is a vector normal to the hyperplane and  $b$  is the offset constant which determines its location related to the origin of the input space. The equation of the linear hyperplane is given by  $(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b = 0$ . The arbitrary choice of scale for  $\mathbf{w}$  and  $b$  can be removed by constraining  $\mathbf{w}$  and  $b$  to satisfy  $|(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b| = 1$  for the point nearest to the hyperplane, then we have

$$y_i [(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b] \geq 1 \quad \forall i. \quad (5)$$

Training a support vector machine means finding the hyperplane with the largest margin. The maximum margin of the hyperplane can be found by minimizing  $\mathbf{w}$ . This optimization problem can be solved using the Lagrange multipliers method defined by:

$$L(\mathbf{w}, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{w} + b) + \sum_{i=1}^l \alpha_i \quad (6)$$

where the variables  $\alpha_i \geq 0$  are called positive Lagrange multipliers. From equation (6), we need to minimize  $L(\mathbf{w}, b, \alpha)$  with respect to the weight vector  $\mathbf{w}$  and  $b$  (primal variables) and maximize it with respect to  $\alpha_i \geq 0$  (dual variables). This problem can be solved by using the Wolfe dual of the Lagrangian in equation (6). Thus, the problem we have to solve has become

- Maximize

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) \quad (7)$$

- Subject to

$$(1) \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0$$

$$(2) \alpha_i \geq 0$$

for  $i = 1, 2, \dots, l$ .

In the solution, those samples for which  $\alpha_i > 0$  are called *support vectors*, and are on the border of the margin. All other training samples in the dataset having  $\alpha_i = 0$  could be removed from the training dataset without any impact to the final hyperplane. Thus, the decision function of equation (5) can be shown as

$$f(x) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i (x \cdot x_i) + b\right). \quad (8)$$

The algorithm that we have discussed so far is limited to the cases that the dataset can be separated by linear separating hyperplanes. The extension of the method described above to nonlinearly separable dataset can be done by mapping the sample points into a higher dimensional space, called feature space, via a non-linear function.

$$\Phi: \mathcal{R}^n \rightarrow F \quad (9)$$

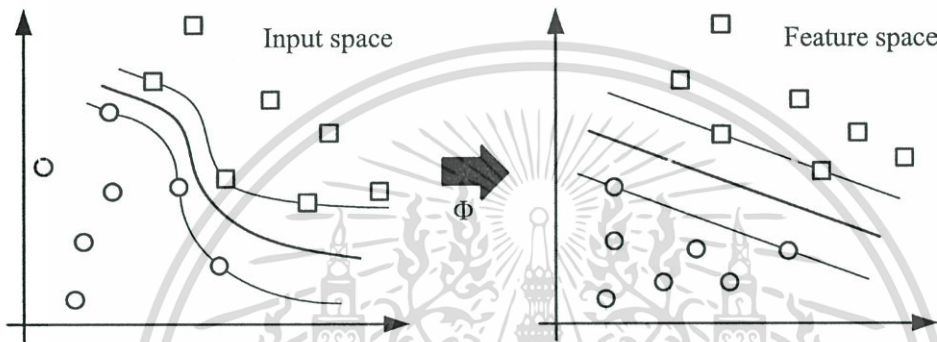


FIGURE 3. Nonlinear mapping of the sample points from an input space to a feature space.

Let  $\Phi$  denote the feature mapping (see FIGURE 3), which maps from the input space to the feature space. Now we need to incorporate such a mapping into the previous algorithm. This can be done by replacing  $x_i$  everywhere with  $\Phi(x_i)$ . The term  $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$  may be very expensive to calculate in case that the dimensionality of  $F$  is large. We will avoid to compute  $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$  directly, but we use a kernel function instead. The kernel function  $K$  can be defined as follows:

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \Phi(\mathbf{x}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}_j). \quad (10)$$

Substituting the kernel  $K$  in the optimization problem, the problem becomes

- Maximize

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (11)$$

- Subject to

$$(1) \sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0$$

$$(2) 0 \leq \alpha_i \leq C \quad \forall i.$$

$C$  is a constant controlling the tradeoff between training error and model complexity and is determined by the user.

**4.2. Design of the SVM Algorithm.** The block diagram of the whole proposed process for a feature extraction is shown in FIGURE 4. The obtained results comprising three features ( $v_{d\_fst}$ ,  $v_{q\_fst}$ , and  $v_{0\_f1}$ ) will be used to train SVM. The stator phase voltage across each winding with respect to the motor neutral of the three phase induction motor is scaled down by voltage probes in order to achieve appropriate values for data acquisition. Analog signal processing is used to filter noise out and to properly adjust the voltage signals. The block of windowed FFT employs a digital filter with a hanning window type to adapt dispersed spectra harmonic voltages to broken individuals harmonics easy to be detected. Then the two band pass filters are used in order to obtain the harmonics in the certain band associated with the stator shorted turn fault and the fundamental component for the calculation of the zero voltage component. Note that the harmonic band of the stator fault band filter (BPF<sub>*f<sub>st</sub>*</sub>) is determined by using equation (1) with  $n=1, 2, 3, 4,$  and  $5$  depending on the motor parameters and operating conditions. Then all components will be converted into time domain using inverse fast Fourier transform (IFFT).  $v_{d\_fst}$  and  $v_{q\_fst}$  are achieved by using equation (3) whilst the zero voltage component ( $v_{0\_f1}$ ) is derived by using equation (4). All is called pre-processing or the feature extraction process. After that, the multi-class-SVM has three input features  $X=[v_{d\_fst}, v_{q\_fst}, v_{0\_f1}]$  obtained from the pre-processing for the stator winding shorted turns diagnosis. This process is called post-processing.

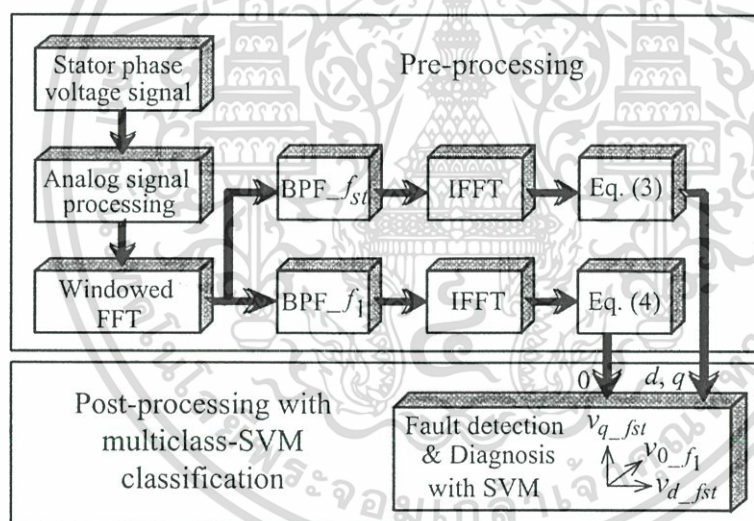


FIGURE 4. Block diagram of the proposed  $dq0$  voltage component computation for motor diagnosis in case of stator winding shorted turns.

For the post-processing, the procedure for classification with multiclass-SVM is shown in FIGURE 5. The  $v_{d\_fst}$ ,  $v_{q\_fst}$ , and  $v_{0\_f1}$  input features are used for the training stage and the testing stage for the motor diagnosis. In this paper, we apply the SVM technique for our classification tasks by using the LIBSVM from Chang and Lin [19]. In our study, we use C-classification with the radial basis function (RBF) kernel.

Two parameters must be tuned on our SVM model:  $C$ , a general penalizing parameter, and  $\gamma$ , the radial basis function-specific kernel parameter. The tuning process is carried out by a grid search over the  $C$ - $\gamma$  space ( $C$  ranges from  $2^{-5}, 2^{-3}, \dots, 2^{15}$ ,  $\gamma$  ranges from  $2^{-15}, 2^{-13}$ ,

..., 2<sup>3</sup>). The optimal value of  $C$  and  $\gamma$  is obtained by training SVM model with four-fifth of the training data set and selecting the one returning the minimum classification error on the validation data set (one-fifth of the training data set). As described above, the goal of this is to construct a function for classifying the stator faults. The LIBSVM also provides a method for estimating class probabilities, and we can use this method to build the function for approximating the stator faults in terms of probabilities. For the binary classifier, the LIBSVM employs an improved implementation of Platt's posterior probability to estimate posterior class probabilities. The details of implementation technique and algorithm can be found in [20].

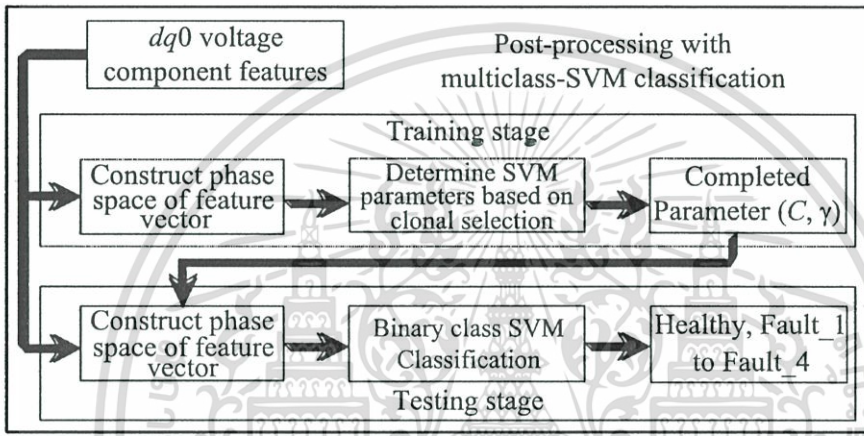


FIGURE 5. Stator fault diagnosis scheme using SVM-based classifier.

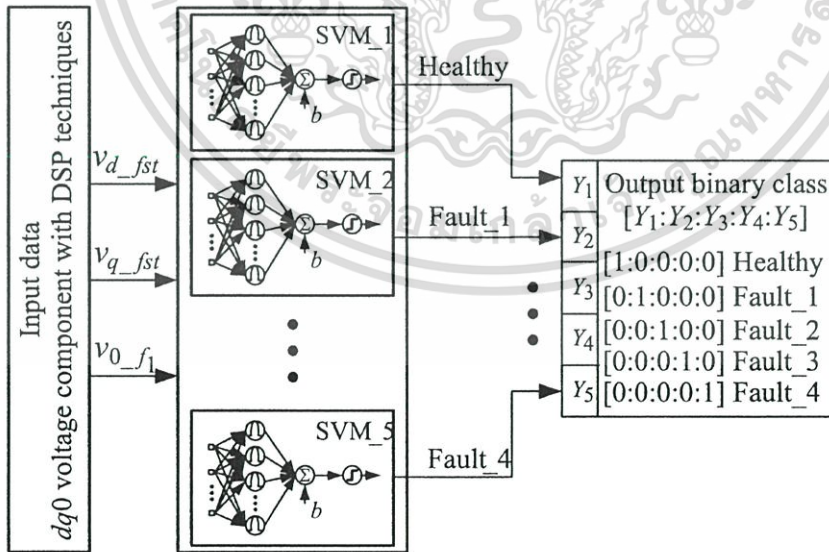


FIGURE 6. Proposed decentralization of multiclass-SVM classification for the stator winding shorted turn diagnosis.

Form our proposed multiclass-SVM algorithm, we create a SVM classifier for each binary combination of motor diagnosis. This set of tests yields five classes of the stator fault condition. A fault diagnostic scheme is presented that compares class by class with several machines and combines the output as shown in FIGURE 6. We use *one-against-the-rest* strategy constructs the binary class classifier for the proposed multiclass-SVM classification, consisting of five SVM. Each SVM model is trained with one set of normal data and four sets of abnormal data, thus in the testing, the size of the input matrix is one input data rows with three columns,  $[v_{d\_fst} v_{q\_fst} v_{0\_f1}]_{1 \times 3}$ . The size of the output target matrix is one output data rows with five columns,  $[Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 Y_5]_{1 \times 5}$ . The target output between 0 and 1 corresponding with classification data is represented in TABLE 1. In our work, we have implemented our algorithm by using JAVA and LIBSVM for SVM classification.

TABLE 1. Division of stator faults to classes.

SVM number	Classification	Target
1 (Healthy)	Healthy	[1:0:0:0:0]
2 (Fault 1)	1% shorted turn	[0:1:0:0:0]
3 (Fault 2)	2% shorted turn	[0:0:1:0:0]
4 (Fault 3)	3% shorted turn	[0:0:0:1:0]
5 (Fault 4)	4% shorted turn	[0:0:0:0:1]

**5. Experimental Results.** In order to evaluate the  $dq0$  voltage components, it is necessary to acquire the data of stator phase voltage of induction motor (floating neutral) using voltage probes. The data-acquisition board is a 16 bit DAQ board (Agilent U2356A) connected to USB port, while the sampling rate is set to be 20 kHz for duration 0.5 second (400 samples per 1 cycle and all for diagnosis is 10,000 samples). The experimental setup is illustrated in FIGURE 7. In the testing, the induction motor is coupled to the DC generator supplying a variable resistor acting as a load system. This motor was tested under healthy and stator winding shorted turns 1%, 2%, 3% and 4% of number of stator winding in one phase. The details of induction motors under test are shown in TABLE 2.

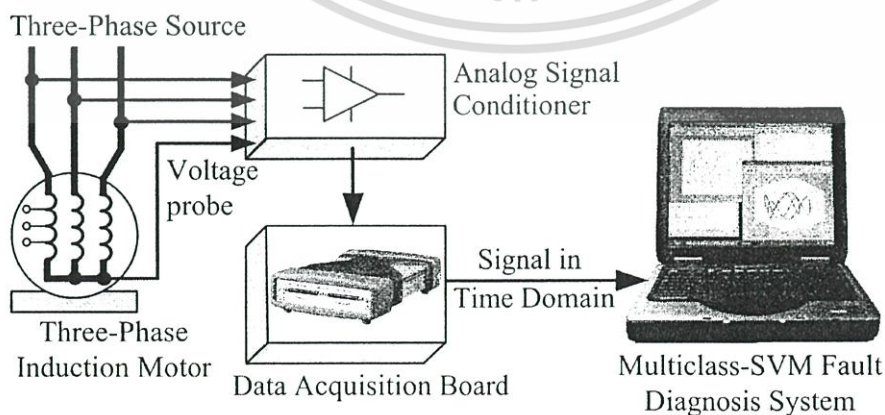


FIGURE 7. Structure of the experimental setup.

TABLE 2. Squirrel-cage induction motor data used in the experiment.

Description	IM 1	IM 2
Power (Hp)	2	3
Input voltage (V)	380	380
Full load current (A)	3.7	4.5
Supply frequency (Hz)	50	50
Number of poles	4	6
Number of stator conductor per phase	282	270
Full load speed (rpm)	1390	935

Another advantage for the proposed method is a reduction in unavoidable noise effects associated with imperfect characteristic sources and motor such as low distortion, a small voltage imbalance, saturation, etc due to the particular band pass filters. Upon testing the healthy motor, it is found that even three-phase balanced voltages can inevitably generate triple harmonic components. This testing corresponds to the testing in [21] and [22]. It is evidently shown that there are the triple harmonic components in the healthy motor. This could arise from interaction of saturation and reverse rotating field. Apart from this, the arisen harmonics may be due to little imbalance of the source. However these harmonics are very low amplitudes. In order to reduce this effect, the supply voltages should be controlled to be balanced phase as much as possible.

The next testing is to investigate the  $dq0$  voltage trajectory patterns. Firstly, the trajectory patterns for the healthy three-phase balanced voltage supply and the healthy motor acting are plotted as the references. The testing yields the  $dq0$  voltage trajectory patterns shown in FIGURE 8. With the proposed voltage analysis, the measured voltage across the stator-phase voltage and the source neutral is transformed and plotted in a three-dimension  $dq0$  pattern as shown in FIGURE 8(a). The pattern is nearly a single point shape as mentioned previously for the perfect supply source. For the healthy motor, the voltage across the stator-phase voltage and the star point of the motor was measured. Then it is transformed and plotted in a three-dimension  $dq0$  pattern as shown in FIGURE 8(b). It is found that it has wider locus than the case in FIGURE 8(a) due to harmonics generated within the motor itself as mentioned in reference [23].

FIGURE 8. Patterns of  $dq0$  voltage trajectory for, (a) balanced source, (b) healthy motor.

The experimental results in three-dimension of the  $dq0$  voltage trajectory pattern with stator faults are shown in FIGURE 9, denoting various shapes of three-dimension pattern of

the proposed technique under various stator fault conditions at no load. Quite clearly, the increase in percentage of shorted turns widens the distorted shape of the trajectory pattern, far from the healthy motor. The more percentage of short turns, the bigger size of the distorted shape. By testing with 2 size motors, it is found that the  $dq0$  voltage trajectory patterns may differ significantly due to different phase signals and motor parameters. Besides, using amplifier gain in the algorithm processing also affects the locus distance. The considered loci for the motor diagnosis are in RMS values which increase with the severity of stator faults. To make the picture clearer, RMS values are converted into per unit (pu.) as shown in FIGURES 10 and 11. The per unit value of each  $dq0$  voltage component of the IM\_1 and IM\_2 rises proportionally. The experimental results in FIGURES 10 and 11 are derived from many testing and the values are averaged and converted into per unit. In addition, we have also tested to verify  $d$ ,  $q$ , and  $0$  voltage components under no load and various load conditions. Number of stator winding shorted turns is varied for each condition. It is found that the changed RMS value ranges about  $\pm 0.015$  pu., which is insignificant compared with the stator fault amplitude in each number of the stator winding shorted turns. It can be concluded that the stator fault amplitude does not depend on the different load conditions. With the obtained results, this implies that it is possible to detect stator faults with the proposed technique.

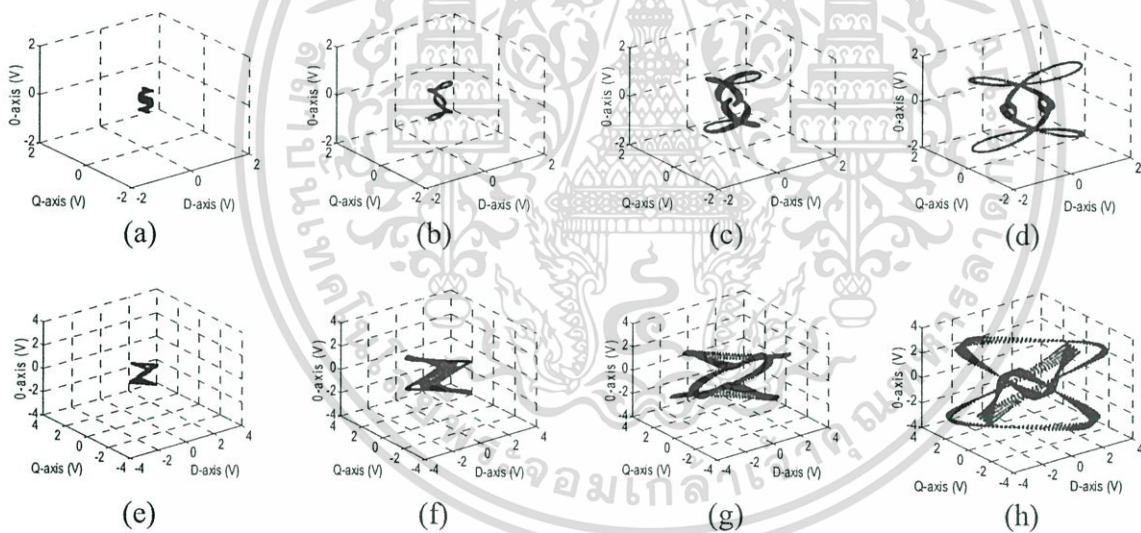


FIGURE 9. Patterns of the  $dq0$  voltage trajectory of IM\_1 (a-d) and IM\_2 (e-h) all for condition of 1%-4% stator winding shorted turns from left to right respectively.

Again, the data faults of all three features obtained from the experimentally acquired motor voltage data represent the type of induction motor stator faults. The data set for training our classification systems can be listed 30 samples per class per feature and equal to all five classes and three features, total 450 data sets. The details of training are stator fault data with different load levels and time. Our classification problem is a multiclass problem. We develop a series of binary classifiers to handle the multi-classification case. For each class, a classification system is trained with all samples in that class with positive labels and all other samples with negative labels. In order to build SVM, some parameters

of SVM need to be tuned. In our experiment, each model of SVM is trained on four-fifth of the data set, while one-fifth of the data set will be used for validating the model (*five-fold cross-validation*). Then the best parameters which minimize the system error on the validation set will be selected and further used to construct the models.

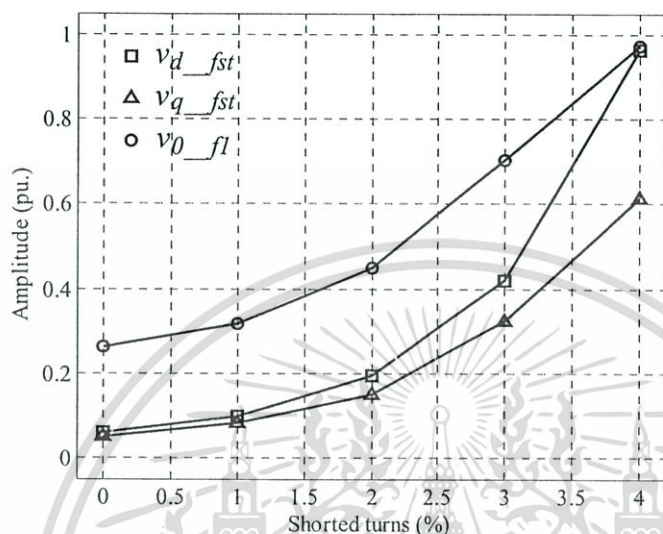


FIGURE 10. The modified amplitude of  $dq0$  voltage components versus shorted turns in IM\_1.

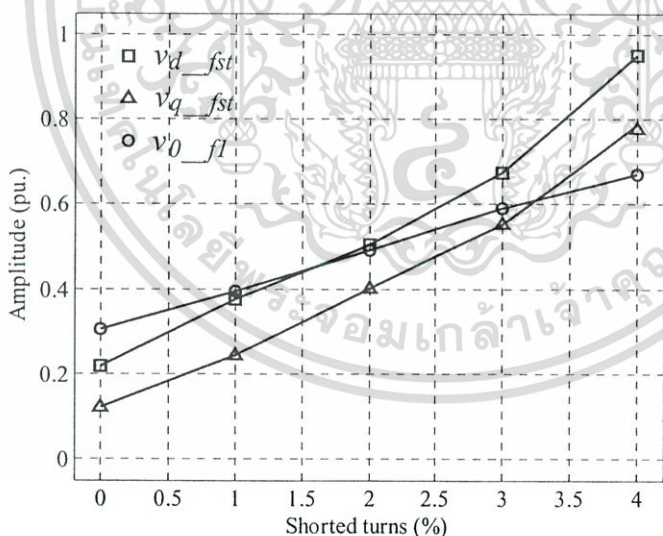


FIGURE 11. The modified amplitude of  $dq0$  voltage components versus shorted turns in IM\_2.

The performance of the proposed technique is tested in unseen data of stator faults. As described above, for each fault, the classifier is trained with all samples in that fault with positive labels and all other samples with negative labels. As our classification problem is a two-class classification problem, to avoid numerical difficulties during the calculation, the

negative labels and positive labels in each fault are assigned the numeric values of 0 and 1 respectively. To evaluate performance of SVM classification system, we apply the implemented classifiers to the whole data set of each fault and report the classification accuracy of each fault. TABLE 3-4 shows the classification accuracy rate of each classifier on the whole dataset in the forms of confusion matrices. From the results, our technique has classification performance of more than 98%. These results demonstrate the relatively high degree of accuracy of stator fault classification that is associated with the use of this method.

TABLE 3. Classification accuracy rates, confusion matrices of the unseen stator faults with the proposed multiclass-SVM of IM\_1.

Unseen faults	Classified faults				
	Healthy	Fault_1	Fault_2	Fault_3	Fault_4
Healthy	98.22%	1.78% (Non Healthy)			
Fault_1	99.07%		0.93% (Non Fault_1)		
Fault_2	0%		100%	(Non Fault_2)	
Fault_3	0% (Non Fault_3)			100%	
Fault_4	1.27% (Non Fault_4)				98.73%

TABLE 4. Classification accuracy rates, confusion matrices of the unseen stator faults with the proposed multiclass-SVM of IM\_2.

Unseen faults	Classified faults				
	Healthy	Fault_1	Fault_2	Fault_3	Fault_4
Healthy	100%	0% (Non Healthy)			
Fault_1	98.17%		1.83% (Non Fault_1)		
Fault_2	0%		100%	(Non Fault_2)	
Fault_3	0.44% (Non Fault_3)			99.56%	
Fault_4	0% (Non Fault_4)				100%

TABLE 5. RMSE of SVM classification for our stator faults diagnosis implementation.

RMSE of SVM	Healthy	Fault_1	Fault_2	Fault_3	Fault_4
IM_1	0.0341	0.1041	0.0866	0.2014	0.1563
IM_2	0.1156	0.1342	0.0764	0.1069	0.2083

TABLE 6. A comparisons between the presented work and the MCSA method.

Method	Features no.	Training samples	Classified states	Correct rate (%)
Presented work	3	450	5	98-100
MCSA	5	1382	5	98-100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

As the implemented classifiers estimate each type of faults in the form of a probability value as mentioned above, the measurement of difference between values predicted by a classifier and the real class labels (numeric values of 0 and 1 for negatives and positive labels respectively) is an important factor to select an appropriate classifier. The root mean squared error (RMSE) of each type of fault approximation has shown in TABLE 5. As can be seen, the error between the actual and target output data after testing our proposed technique is less than 0.2083, thus the training process is complete.

The improvement of the proposed method compared to the MCSA can be seen in TABLE 6. The number of features and training samples can be reduced whilst the performance is not deteriorated. Since motor currents depend on loads, the MCSA needs more training samples. The study of the spectrum fault using the MCSA for the shorted turn diagnosis can be found in [24]. As a consequence, the MCSA needs more training samples in order to keep the same accuracy rate. Note that the MCSA uses only one phase current. Probably the measured phase current is not directly affected by the shorted turn fault. Since the proposed technique uses all stator voltage phases, this encountered problem does not occur.

**6. Conclusions.** This paper has presented a new approach for detection and diagnosis of the stator winding shorted turns in three-phase induction motors. The proposed SVM approach is based on the  $dq0$  voltage components which have been improved in terms of the number of features and training samples. The digital signal processing is used in identifying the shorted turn fault in three-dimension  $dq0$  voltage trajectory pattern with clear distinction of each severity of stator fault, which yields good input features and can lead to high accuracy in induction motor stator fault diagnosis. The experimental results have shown that our proposed system can provide rather high true positive rate (see TABLES 3 and 4) on different severity of stator faults. Unlike MCSA, using the proposed voltage signal diagnosis, offers a small variation of the voltage level under different motor loads which results in classification performance being nearly uniform throughout. Our proposed technique is appropriate for fault classification task and can be further developed to be used to diagnose other electrical machines. The weakness of the proposed technique is the leakage effect of the FFT resulted in the detection error and time consuming. The development could be made with the special digital signal processing for more accuracy and principal components analysis (PCA) for less computing time due to a data number reduction and more accuracy.

#### REFERENCES

- [1] S. Nandi, H. A. Toliyat and X. Li, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.20, no.4, pp.719-729, 2005.
- [2] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.28, no.4, pp.921-937, 1992.
- [3] M. Haji and H.A. Toliyat, Pattern-recognition-a technique for induction machines rotor broken bar detection, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.16, no.4, pp.312-317, 2001.
- [4] F. Zidani, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo and M.S. Nait-Said, Induction motor stator faults diagnosis by a current concordia pattern-based fuzzy decision system, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.18, no.4, pp.469-475, 2003.

- [5] E. Zheng, P. Li and Z. Song, Performance analysis and comparison of neural networks and support vector machines classifier, *Proc. of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hangzhou, China, vol.5, pp.4232-4235, 2004.
- [6] Q. She, H. Su, L. Dong and J. Chu, Support vector machine with adaptive parameters in image coding, *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, vol.4, no.2, pp.359-368, 2008.
- [7] S. Khomfoi and L.M. Tolbert, Fault diagnostic system for a multilevel inverter using a neural network, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.22, no.3, pp.1062-1069, 2007.
- [8] R. Fang and H. Ma, Application of MCSA and SVM to induction machine rotor fault diagnosis, *The Six<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation*, vol.2, pp.5543-5547, 2006.
- [9] A. Widodo and B. S. Yang, Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol.21, pp.2560-2574, 2007.
- [10] A. M. Knight and S. P. Bertani, Mechanical fault detection in a medium-sized induction motor using stator current monitoring, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.20, no.4, pp.753-760, 2005.
- [11] S. Nandi and A. Toliyat, Novel frequency-domain-based technique to detect stator interturn faults in induction machines using stator-induced voltage after switch-off, *IEEE Trans. on Industry Application*, vol.38, no.1, pp.101-109, 2002.
- [12] T. P. Tsao, R. C. Wu and C. C. Ning, The optimization of spectral analysis for signal harmonics, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol.16, no.2, pp.149-153, 2001.
- [13] P. Garcia, F. Briz, M. W. Degner and A. B. Diez, Diagnostics of induction machines using the zero sequence voltage, *IEEE-IAS Annu. Meeting*, pp.735-742, 2004.
- [14] P. C. Krause, *Analysis of electric machinery*, McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [15] A. J. M. Cardoso, S. M. A. Cruz and D. S. B. Fonseca, Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by park's vector approach, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.14, no.3, pp.595-598, 1999.
- [16] M. A. Cash, T.G. Habetler and G.B. Kliman, Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.34, no.6, pp.1234-1239, 1998.
- [17] P. Zhong and L. Wang, Support vector regression with input data uncertainty, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.4, no.9, pp.2325-2332, 2008.
- [18] N. Cristianini and J. S. Taylor, *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*, Cambridge University Press, 2000.
- [19] C. C. Chang and C. J. Lin, *LIBSVM: A library for support vector machines*, software available, <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- [20] H. T. Lin, C. J. Lin and R. C. Weng, *A note on Platt's probabilistic outputs for support vector machines, technical report*, Department of Computer science, National Taiwan University, 2004, <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/plattprob.pdf>.
- [21] S. Nandi, Stator fault detection in induction machines using triplen harmonics at motor terminal voltage after switch-off, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol.3, pp.2285-2290, 2005.
- [22] C. Manop and V. Kinnares, Stator faults detection based on the  $dq0$  voltage components, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp.1-5, 2008.
- [23] P. Vijayraghavan and R. Krishnan, Noise in electric machines: a review, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.35, no.5, pp.1007-1013, 1999.
- [24] W. T. Thomson, On-line MCSA to diagnosis shorted turns in low voltage stator winding of 3-phase induction motors prior to failure, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, pp.891-898, 2001.

# 2008 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2008)

21-24 April 2008  
Chengdu, CHINA

Preface

Cover

Copyright

Chairman's Message

Technical Chair's Message

Keynote Speeches

Tutorial Sessions

Programme

Technical Sessions

Author Index

## Sponsors :

IEEE Industrial Electronics Society  
Sichuan University, China

## Technical Cosponsors:

Society of Instrument and Control Engineers (SICE), Japan  
IEEE Chengdu Section  
Chengdu College

University of Electronic Science and Technology of China  
Electronic Engineering Department  
City University of Hong Kong

## Hosted by:

Sichuan University, Chengdu, China

IEEE Catalog Number: CFP08CIT-GDR

ISBN: 978-1-4244-1706-3

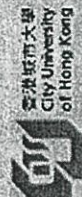
Library of Congress: 2007906650

© 2008 IEEE

Personal use of this material is permitted. However, permission to reprint/republish this material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution to servers or lists, or to reuse any copyrighted component of this work in other works must be obtained from the IEEE.



IEEE ICIT



香港城市大學  
City University  
of Hong Kong

# Stator Faults Detection based on the $dq0$ Voltage Components

Chalermchat Manop, and Vijit Kinnaree

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

**Abstract**—This paper presents the technique for detection of shorted turns in stator winding of induction motors. The strategy is based on the  $dq0$  voltage components. The proposed technique determines  $dq$  components of time domain of harmonics obtained from Park transformation instead of the stator phase voltage. Zero component (0) is calculated from the fundamental voltage excitation only. In the testing, the supply is sinusoidal waveform and the motor must be star connected with floating neutral. From experimental results, pattern of  $dq0$  voltage components in order to use for the stator faults detection is possible.

**Index Terms**—Induction motor,  $dq0$  components, stator fault, fault detection, condition monitoring.

## I. INTRODUCTION

SQUIRREL cage induction motors are popular electrical machines for a wide range of applications throughout the manufacturing, processing, energy, transportation, service, and medical industries. Nowadays there is a great concern about the reliability of the productive process in order to reduce production costs and increase productivity in the industrial area. This fact makes maintenance techniques a very important issue. The highlights of the moment are predictive maintenance techniques. The various types of faults and their detection techniques are stator faults, broken rotor bar and end-ring faults, bearing faults and eccentricity-related faults [1]. Surveys [2] have found 30%-40% of induction motor failures are stator related. The primary causes for failure problem of stator insulation are as follows, high winding temperature, slack core lamination, loose bracing for end winding, contamination due to oil, short circuit, electrical discharges, and leakage in cooling systems [3]. The stator failures could reveal all five modes included turn-to-turn, coil-to-coil, phase-to-phase, coil-to-ground and open circuit. Most of the stator faults start as a turn-to-turn fault. Therefore, detection of turn-to-turn faults can prevent machines from severe damage.

In fact, condition monitoring induction motors become very important in order to reduce maintenance costs and prevent unscheduled downtimes. Recent survey published in the offline and online stator faults detection technique, the most accepted and widely used offline diagnoses include the capacitance, surge comparison, partial discharge (PD) tests etc. The methods available include thermal monitoring, chemical monitoring, ground fault relay, and online partial discharge monitoring [3]. These techniques are based on both online and offline stator faults detection which can effectively detect. The arising problem is the diagnosis of severity level of stator faults. The information of the healthy electrical

machines is necessary to be recorded for reference such as experimental results given in [4-6]. Because, in an actual machine, the impedance of any phase balance is never achieved. The primary source of phase impedance nonlinearity can be traced to stator core magnetic saturation. Magnetic saturation of the core causes nonlinearity in the magnetizing and leakage reactances and is evidenced by characteristic harmonics present on all three line-to-neutral phase voltages [7]. However, the AI-based technique is effective for deciding severity level of faults by referring to fault signals recorded as data base.

In this paper, the proposed approach is based on the  $dq0$  voltage components for detection of induction motor stator faults. The analyzing  $dq0$  voltage pattern obtained from  $dq$  components using Park transformation instead of three phase voltages of induction motor (between terminal voltage and the star-point of machine) and zero component (0) considering only fundamental component obtained from the sum of three phase voltage. A harmonic amplitude relationship between healthy and faulty motors by using modern signal processing techniques, which combined with interpolating windowed FFT allows optimizing the fault detection.

## II. HARMONICS IN ELECTRICAL MACHINES

Harmonics in the current spectra of a machine are a result of voltage harmonics induced in the winding by air gap flux density harmonics [8]. Harmonics in electrical machines can be divided into four groups. They are inherently associated with machine structure and supply which the causes can be categorized as magnetic, mechanic, aerodynamic, and electronic [9]. Presently, the use of harmonic spectra is found in condition motoring of electrical machines as follows.

### A. Air-gap Eccentricities

The condition of machine eccentricities is unequal air gap that exists between the stator and rotor such as rotor unbalance. Air-gap eccentricities generate spectral components at frequencies of the following equation.

$$f_{ecc} = f_s \left[ 1 \pm k \left( \frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (1)$$

where  $f_s$  is electrical supply frequency,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ,  $s$  is the slip,  $p$  is the number of poles pairs.

### B. Broken rotor bars

Broken rotor bar is a breakage or cracking of the rotor bars. This type of fault creates the well-known twice slip frequency sidebands around the supply frequency. The broken rotor bar generate spectral component at frequencies defined by

$$f_{brb} = f_s \left[ k \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm s \right] \quad (2)$$

where,  $k/p = 1, 5, 7, 11, 13, \dots$ .

### C. Slotting

With the conductors in slot, almost all the flux now passes the low-reluctance path through the teeth. The slots produce magnetic circuit reluctance variations too. This variation causes an air-gap flux modulation with frequency depending on speed. The equation for the slot harmonic frequency can be given as

$$f_{slot} = f_s \left[ N_r \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm k \right] \quad (3)$$

where,  $N_r$  is the number of rotor slots.

### D. Stator winding short circuit

The most common stator winding faults are related to either the end winding portion or the slot portion. The majority of these acting on the stator can be classified into thermal, electrical, mechanical, and environmental effects. The frequency components to be detected in the stator winding shorted turns defined by

$$f_{st} = f_s \left[ n \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm k \right] \quad (4)$$

where  $k$  in this case is 1, 3, 5 ..., and  $n=1, 2, 3, \dots, (2p-1)$ . Due to the transient nature of the signal processed, detect-ability may be good only for  $k=1$  [4].

### III. $dq0$ VOLTAGE COMPONENTS APPROACH

Assuming star-connected three-phase stator windings without neutral connection between supply and the machine neutral (star point), the voltage equations for the stator windings in the matrix form can be written in (5)-(6). When the machine is asymmetric, the inductance matrix in (7) can be separated into two components [10]: the first term (8) models the balanced portion of the stator inductance matrix, which would correspond to that of a balanced machine; and the second term (9) models the asymmetric portion of the stator inductance matrix caused by the faults. In Fig. 1, the set power supply and squirrel-cage induction machine system can be replaced by a simple three-phase equivalent circuit.

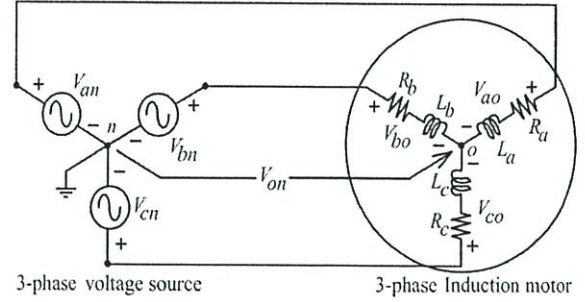


Fig. 1. A three-wire, wye-connection between power source and induction motor.

$$|v_{xn}| = |R_x| |I_x| + \frac{d|\Psi_x|}{dt} + v_{on} \quad (5)$$

$$|\Psi_x| = |L_{ABC}| |I_x| \quad (6)$$

$$L_{ABC} = L_{constant} + L_{varying} \quad (7)$$

$$L_{constant} = \begin{vmatrix} L_{ls} + L_{ms} & M & M \\ M & L_{ls} + L_{ms} & M \\ M & M & L_{ls} + L_{ms} \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$L_{varying} = \begin{vmatrix} \Delta L_1 \cos(\varphi_0) & M & M \\ M & L_{\sigma s} + L_{ms} & M \\ M & M & L_{\sigma s} + L_{ms} \end{vmatrix} \quad (9)$$

where  $x$  is phase a, b, or c,  $v_{on}$  is the voltage of the machine neutral with respect to ground,  $L_{ls}$  is a leakage inductance,  $L_{ms}$  is a magnetizing inductance, and  $M$  is  $-L_{ms}/2$ .

The  $dq0$  voltage components are obtained from ABC voltages using Park's transformation matrix. This transformation is well-known for a revolution in machine analysis. The classical  $dq0$  components of the phase voltage are presented by

$$\begin{bmatrix} v_d [n] \\ v_q [n] \\ v_0 [n] \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a [n] \\ v_b [n] \\ v_c [n] \end{bmatrix} \quad (10)$$

where  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$  and the  $N$  is all number of data.

In order to neglect the harmonics which are not affected the stator fault by remaining components present in (4) for certain frequency range, removing (set to zero) unassociated components and ignoring zero sequence components of harmonics, the resultant matrix form of equation (10) excluding the fundamental component can be obtained as equation (11).

$$\begin{bmatrix} v_{d\_fst}[n] \\ v_{q\_fst}[n] \\ v_{0\_fst}[n] \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a\_fst}[n] \\ v_{b\_fst}[n] \\ v_{c\_fst}[n] \end{bmatrix} \quad (11)$$

The zero sequence voltage obtained from the sum of three phase voltage with considering only the fundamental component of electrical excitation is given by

$$|v_{0\_f1}[n]| = \frac{1}{3} |v_{a\_f1}[n] + v_{b\_f1}[n] + v_{c\_f1}[n]| \quad (12)$$

where  $v_{a,b,c\_fst}[n]$  are the data of stator fault signal of phase a,b,c, respectively, and  $v_{a,b,c\_f1}[n]$  are the data of stator fundamental signal of phase a,b,c, respectively.

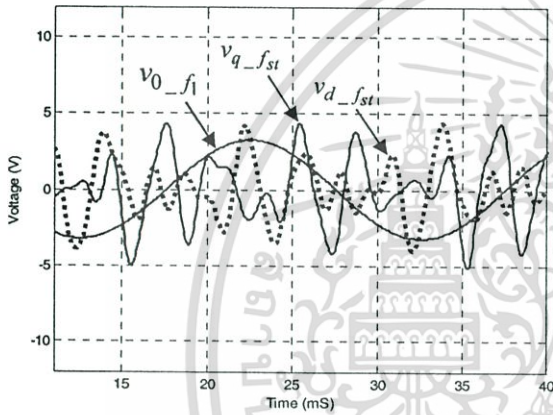


Fig. 2. Example result for the faulty motor: signals  $v_{d\_fst}$ ,  $v_{q\_fst}$ , and  $v_{0\_f1}$ .

Fig. 2 shows the three signals for the induction motor with stator winding faults. If the motor is healthy, three-signal components are very low level. For the 3D of the proposed  $dq0$  component pattern for the perfect three phase quantities (i.e voltage, current, flux, etc.), it is noted that the trajectory is single point. If it is corrupted mainly by the harmonic contents, the trajectory is far from the expected single point. Then, the variety of the trajectory shape can be possibly used for monitoring and diagnosing the stator machine fault.

#### IV. DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNIQUE FOR DATA DESIGN

The frequency domain analysis is more attractive one because it can give more detailed information about the status of the machine whereas, the time domain analysis can give qualitative information about the machine condition [11]. When a signal is transformed into frequency domain by Fast Fourier Transform (FFT), the signal will cause the grid effect and the leakage effect under unsuitable frequency scales [12]. The leakage effect results from that the sampling period is not the integer-times of the signal period. If the sampling period is

not the integer-times of the signal period, in time domain, there is no continuity in the truncated points, in frequency domain, the signal will cause side lobes and harmonic energies will leak to the nearby scales. However, the interpolation algorithm can eliminate the errors caused by grid effect, but the errors produced by harmonic leakage must be reduced by windowing the signal. Fig. 3 shows the analysis of harmonic spectra particularly at the interval of frequency from 500 Hz to 1,500 Hz and the amplitude in the interval from -200 to 0 dB (the interval of harmonics caused by shorted turns).

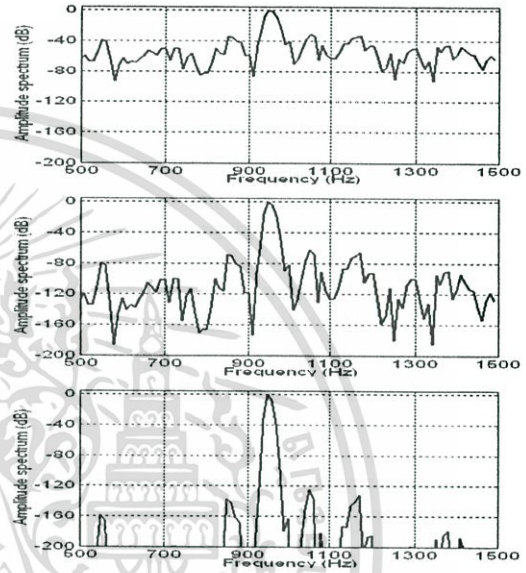


Fig. 3. Spectrum of different analysis method, (a) the window method, (b) the window method with interpolation, and (c) the window method, interpolation and power spectrum.

#### V. EXPERIMENTAL RESULTS

In order to evaluate the  $dq0$  voltage components, it is necessary acquire the data of three phase voltage of the induction motor under test. The data were acquired using acquisition board in the digital oscilloscope (12-bit, 250-MHz). Fig. 4 shows the block diagram of algorithm for turn-faults detection. This algorithm was processed using MATLAB program.

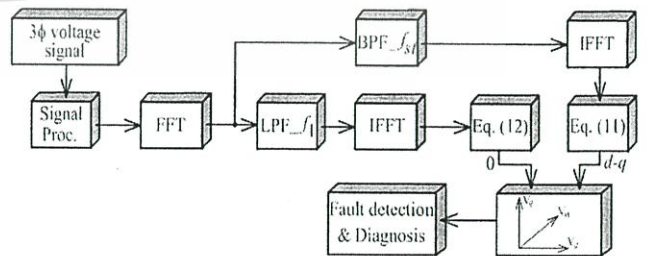


Fig. 4. Block diagram of the  $dq0$  voltage component computation for stator winding faults detection.

The induction motor under test is 3-hp, 4 Pole, 380 V<sub>L-L</sub>, 50 Hz. In the testing, the motor is supplied from the AC source (sine-wave) with balanced voltage and Y-connection. The stator winding of the motor has 270 turns per phase. It is coupled to DC generator feeding a variable resistor. The DC generator is used to load the induction motor. Test results were obtained under turn fault conditions in the stator winding with 1%, 2%, 3% and 4% of number of turns in one phase. Before testing, the supply was set to a balanced voltage condition and the neutral point of the motor was floated. Fig. 5 shows test results obtained from the source ( $v_{an}$ ) and the induction motor ( $v_{ao}$ ).

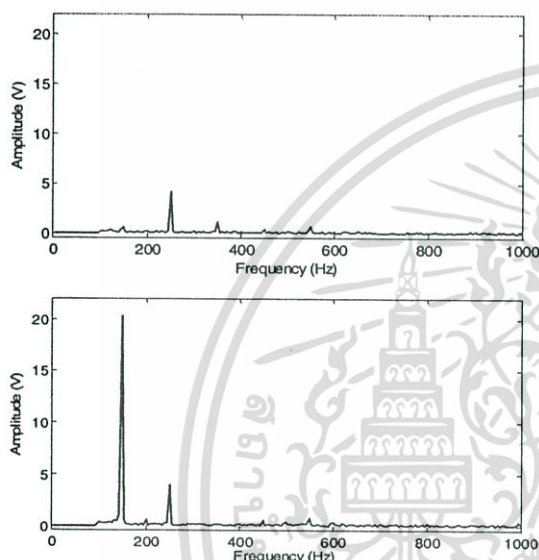


Fig. 5. Stator voltage harmonic spectra of the balanced source (top) and the healthy induction motor (bottom) at no-load with the floating neutral.

Due to the imperfect source and motor, harmonic voltages occur inevitably. Therefore, Fig. 5 reveals harmonic components at 250Hz and 350Hz from the balanced source and at 150 and 250Hz from the healthy motor. It is evidently shown that there is the third harmonic component in the healthy motor. This could arise from interaction of saturation and reverse rotating field. The harmonics spectra of source may be due to little unbalance in the source. However these harmonics are low amplitudes compared with the fundamental.

The  $dq0$  voltage component pattern in Fig. 6 has been initially operated without faults in order to be used as the reference acting as the healthy motor for Fig.6 (b). For Fig. 6(a), it confirms 3D  $dq0$  pattern which is nearly single point shape for almost balance of the three phase source system as mentioned before. For Fig. 7(a)-(d) shows various shape of 3D pattern of the proposed technique under various faulty conditions. Quite clearly, the increase in percentage of shorted turns affects the distorted shape of the 3D pattern far from for the healthy motor. The more percentage of shorted turn, the bigger size of the distorted shape can be obtained.

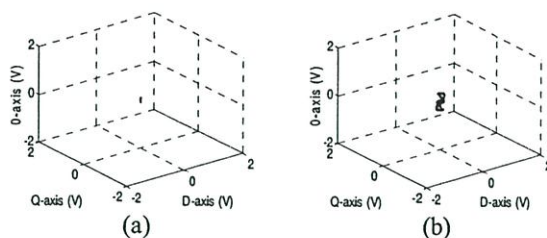


Fig. 6. Patterns of  $dq0$  voltage components for, (a) Balanced source, (b) Healthy motor.

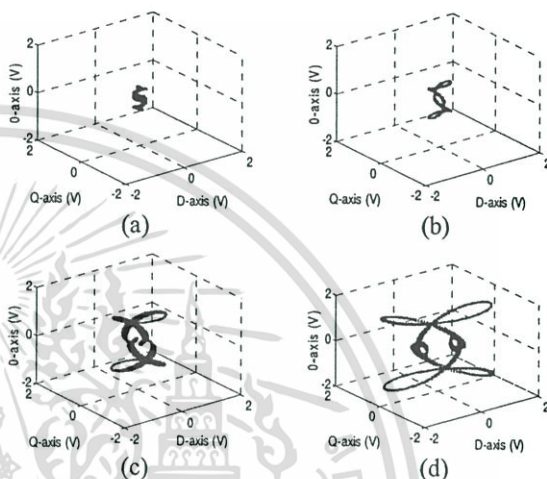


Fig. 7. Patterns of  $dq0$  voltage components for stator fault conditions (a) 1%, (b) 2%, (c) 3%, and (d) 4% shorted turns.

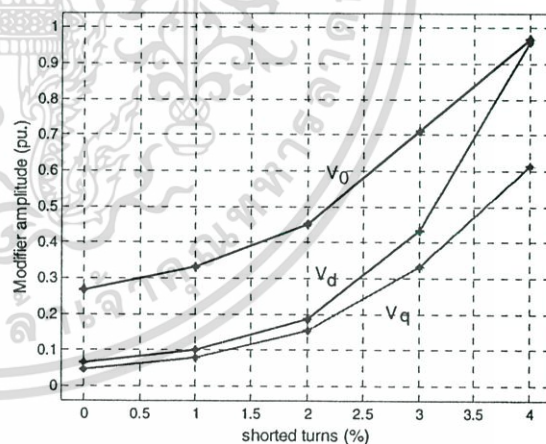


Fig. 8. The modified amplitude of  $dq0$  voltage components versus shorted turns.

In order to illustrate the effect of shorted turns on the motor voltage, the proposed  $dq0$  rms values in per unit are shown in Fig. 8. The increase in percentage shorted turns results in an increase in amplitude of the proposed  $dq0$  voltages. The variation of  $dq0$  quantities is heavy at higher percentage of shorted turns. With the obtained results, this implies that it is possible to detect stator faults with the proposed technique.

## VI. CONCLUSION

This paper has presented a new approach based on a  $dq0$  voltage component analysis for detecting the stator winding shorted turns in three-phase induction motors. The proposed technique is alternative to other techniques such as MCSA. This method is derived from the stator voltage of the induction motor with star connection and floating neutral. The detail of procedure for obtaining the proposed  $dq0$  components has been fully given. The obtained results reveal the possibility of the proposed technique for detecting and diagnosing stator winding shorted turns. The future work with the application of AI techniques for decision making will be investigated.

## REFERENCES

- [1] S. Nandi, H.A. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719-729, Dec. 2005.
- [2] A.H. Bonnett, and G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 921-937, Jul./Aug. 1992.
- [3] S.B. Lee, K. Younsi, and G.B. Kliman, "An online technique for monitoring the insulation condition of ac machine stator windings," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 737-745, Dec. 2005.
- [4] S. Nandi, and H.A. Toliyat, "Novel frequency-domain-based technique to detect stator inter-turn faults in induction machines using stator-induced voltage after switch-off," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, no. 1, pp. 101-109, Jan./Feb. 2002.
- [5] F. Zidani, M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, and M.S. Nait-Said, "Induction motor stator faults diagnosis by a current concordia pattern-based fuzzy decision system," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 18, no. 4, pp. 469-475, Dec. 2003.
- [6] M. Arkan, D.K. Perovic, and P. Unsworth, "Online stator fault diagnosis in induction motors," *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, vol. 148, no. 6, pp. 537-547, Nov. 2001.
- [7] M.A. Cash, T.G. Habetler, and G.B. Kliman, "Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1234-1239, Nov./Dec. 1998.
- [8] A.M. Knight, and S.P. Bertani, "Mechanical fault detection in a medium-sized induction motor using stator current monitoring," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 753-760, Dec. 2005.
- [9] P. Vijayraghavan, and R. Krishnan, "Noise in electric machines: a review," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 1007-1013, Sept./Oct. 1999.
- [10] P. Garcia, F. Briz, M.W. Degner, and A.B. Diez, "Diagnostics of induction machines using the zero sequence voltage," in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, pp. 735-742, Oct. 2004.
- [11] S.A.S.A. Kazzaz, and G.K. Singh, "Experimental investigation on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques," *Electric Power Systems Research*, vol. 65, pp. 197-221, 2003.
- [12] T.P. Tsao, R.C. Wu, and C.C. Ning, "The optimization of spectral analysis for signal harmonics," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 149-153, 2001.

**2005**  
**IEEE International Conference**  
**on**  
**Industrial Technology**  
**(IEEE ICIT2005, Hong Kong)**

**14-17 December 2005**  
**City University of Hong Kong**

**Conference Proceedings**

*Sponsors:*

 **IEEE Industrial Electronics Society** 

**Surface Mount Technology (Holdings) Ltd., Hong Kong**

**Fong Shu Fook Tong Foundation**

**K. C. Wong Education Foundation**

**Lee Hysan Foundation**

**Wei Lung Foundation**

*Hosted by:*



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Low Cost Prototype for Testing Stator Winding Shorted Turns in 3-Phase Induction Motors

Chalermchat Manop, Wongwit Senavongse, Vijit Kinnares and Chanwit Tangsiriworakul<sup>1</sup>

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

<sup>1</sup> Department of Electrical, College of Industrial Technology,

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800, Thailand

**Abstract**-This paper presents a prototype of stator winding shorted turns detector for three-phase induction motors. The focus condition is turn-to-turn short circuit, because this condition is the initial problem. The diagnosis technique is detectable from the voltage sum of the three instantaneous line to star-point voltage. In the testing, the supply is sinusoidal waveform and the motor must be star connected with floating neutral. Before diagnosis, this instrument will also determine the level of supply voltage imbalance, if it is over the limit, the test instrument will not diagnose shorted turns. From experimental results, 3-hp and 5-hp induction motors were used for testing this equipment which is capable of accurately identifying percentage of stator winding shorted turns.

**Keywords:** Instrument, fault diagnosis, induction motor, condition monitoring.

## I. INTRODUCTION

The majority of all motors used in industry are induction motor since the power-semiconductor devices, microelectronics and control techniques have been developed. These motors driven by a static converter undergo severe voltage stresses due to rapid switch-on and switch-off of semiconductor switches. The pulse-width modulated voltage is one of many causes which life of the stator fails prematurely. The unexpected induction motor failure could lead to lost production, expensive repair and significant process down time.

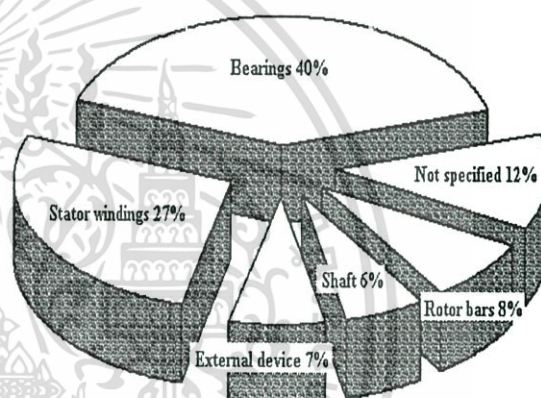


Fig. 1. The component failures account for percentage of all motor faults.

A random wound motor is frequently started, and due to excessive coil movement, it sustains a minor turn-to-turn short in a coil (the turn-to-turn condition was most the initial problem of the stator failure). For this condition, increasing heat is generated in the damaged area and progresses to catastrophic phase-to-phase or phase-to-ground short circuit faults and the motor off the live [1]. The stator winding shorted circuit constitutes approximately 30% portion of all reported motor component faults. The induction motor failures now account for a larger percentage that shows in Fig. 1 when induction motors are both fed from pulsewidth modulation (PWM) inverter and a sinusoidal voltage supply. However, more details of Induction motor component failure in Fig. 1 can be found in reference [2]. This paper implemented the

turn-faults (stator winding shorted turns) detection and diagnosis in induction motors using three instantaneous voltage sum which has also been presented extensively for detection technique [3].

## II. VARIOUS TYPES TURN-FAULTS DETECTION TECHNIQUES

The technique of turn faults detection and diagnosis in induction machines have been investigated for the last many years. Siddique *et al.* which obtained a brief review of the monitoring techniques have been classified into the following 13 categories using different parameters and machine variables [4]. The example of the monitoring techniques are magnetic flux, vibration, current, power etc.

In this section, this technique allows noninvasive on-line diagnosis of the turn-fault detection, the techniques focusing in the time domain were used by several researchers in the followings. Natarajan has investigated turn-faults by looking at a symmetrical three phase system, the vector sum of three phase current in the primary circuit is zero [5]. Stone *et al.* were able to detect turn-turn faults for rated 4 kV and above (this technique is for large motor) with online partial discharge (PD), test methods give very reliable results [6]. Cash *et al.* [3] presented a method using line-neutral voltage to detect stator insulation failure. They have shown a promise of reliable turn-fault detection, while retaining ease of practical implementation. However, in this paper, we used this method (in reference number [3]) which could lead to development of a prototype instrument for turn-fault detection. The main point of this research is one of many methods in turn-fault detection. In the future work, we will use a mixed method for incorporating turn-fault signal which is a more reliable diagnosis.

## III. BASIC THEORY FOR STATOR SHORTED TURNS DIAGNOSIS

This principle of turn-fault detection is based on the phase impedance imbalance in any of the stator phase. The system equation considers only the fundamental frequency and voltage supply balance, with application of Kirchoff's current law on the "o" point of the circuit described in Fig. 2, as follows:

$$I_a(t) + I_b(t) + I_c(t) = 0 \quad (1)$$

or

$$V_{ao}(t)Y_a + V_{bo}(t)Y_b + V_{co}(t)Y_c = 0 \quad (2)$$

The  $V_{xo}$  is the phase voltage with respect to machine line-star point (o). The  $Y_x$  is admittance of stator winding phase "x", and the  $V_{xo}$  is give by

$$V_{xo}(t) = V_{xn}(t) + V_{no}(t) \quad (3)$$

Also, equation (2) can be rewritten to the summation of the instantaneous signal (all current and voltage,  $V_{sum}$ ). That is,

$$\{V_{an}(t) + V_{no}(t)\}Y_a + \{V_{bn}(t) + V_{no}(t)\}Y_b + \{V_{cn}(t) + V_{no}(t)\}Y_c - 0 \quad (4)$$

From (4), if the voltage  $V_{xn}$  and admittance  $Y_x$  are imbalance, the equation will not be zero. The causes of imbalance are supply voltage ( $V_{xn}$ ) and stator winding short circuit ( $Y_x$ ). However, the voltage sum also contains the harmonic component due to slotting, core saturation etc., the voltage sum will not be zero as well.

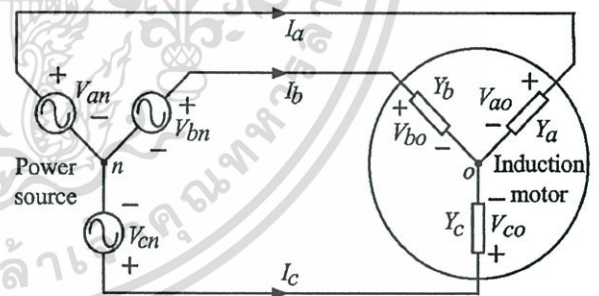


Fig. 2. A three-wire, wye-connection between power source and induction motor.

## IV. INSTRUMENT DESCRIPTION

In order to implement the voltage sum equation given above, it is necessary to simultaneously acquire the three phase voltage, neutral-point of supply (power source) and star-point of induction motor under test. The block diagram for turn-fault detection and diagnosis is shown in Fig. 3. First step, the 50-Hz instantaneous voltage ( $V_a$ ,  $V_b$  and  $V_c$ ) on all three phase voltages are adjusted to an acceptable level from

step down miniature transformer. The diagnosis is to check the imbalance of system voltage, the instrument will do the next step when supply voltage imbalance is within the limit ( $V_{sum1}$ ). Microcontroller will, then, switch the contactor for testing the turn-fault conditions ( $V_{sum2}$ ). A buffer circuit is connected for matching impedance in circuit. These three-phase signals are summed, filtered and transformed into rms value (called stator-faults or turn-faults value). The percentage of shorted turns will be displayed by LCD. The voltage control in this figure is used for supply imbalance. A picture of the prototype instrument is shown in Fig. 4.

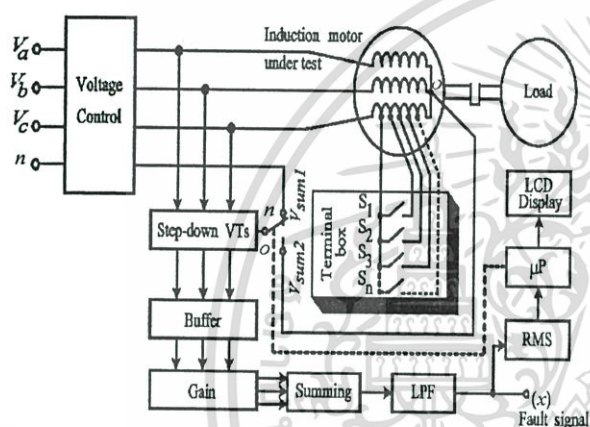


Fig. 3. Block diagram shows a test setup for a stator winding shorted turns diagnosis.

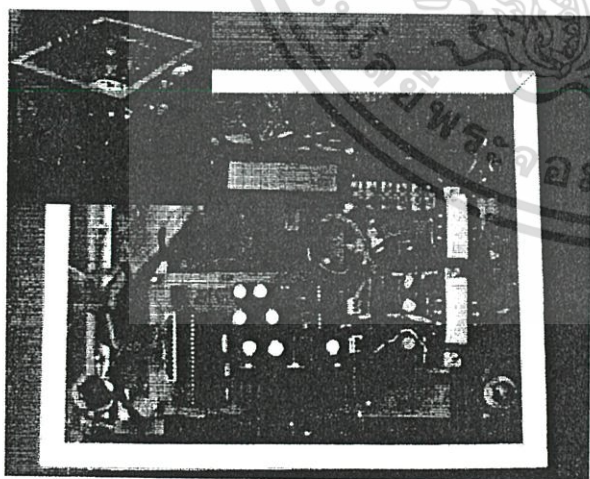


Fig. 4. The prototype of turn-faults instrument for three-phase induction motors.

## V. EXPERIMENTAL RESULTS

The induction motors under test are 3-hp and 5-hp, 4 Pole, 380 V<sub>L-L</sub>, 50 Hz. In the testing, the motor fed

from utility (sine-wave). The 3-hp and 5-hp induction motors, each stator phase is comprised of 270 series turns and 180 series turns respectively. Test results obtained under faulty condition with 1%, 2% and 3% of all shorted number of turns in one phase. At the start, we can test  $V_{sum1}$  for supply imbalance. Fig. 5 shows a test result obtained under b-phase voltage reducing (second from the top) as well as  $V_{sum1}$  signal increasing and decreasing (at  $t_2$ ) when b-phase voltage getting back to balance (bottom). The waveforms of various  $V_{sum1}$  signals are shown in Fig. 6 when supply is in different voltage imbalance conditions.

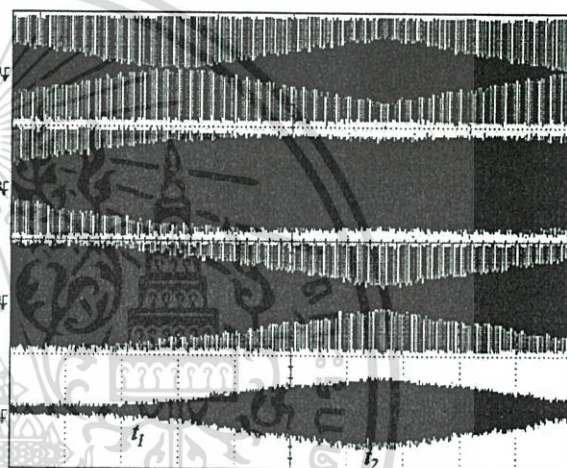


Fig. 5. The instantaneous value of a-phase, b-phase, c-phase and  $V_{sum1}$  signal (from top to bottom) when b-phase under voltage imbalance at  $t_1$  and  $t_2$  to balance condition.

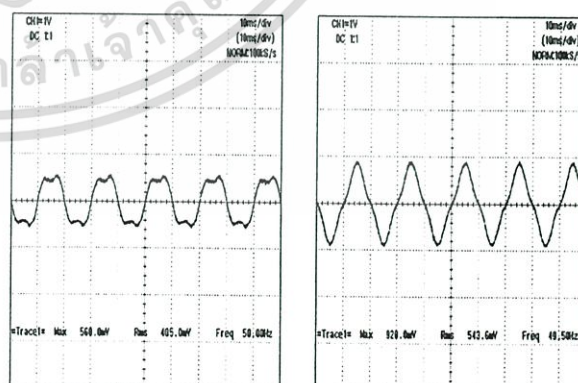


Fig. 6. The signal of  $V_{sum1}$  1-phase, 3% undervoltage supply imbalance (left) and 2-phase, 5% overvoltage supply imbalance (right).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ๗36 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

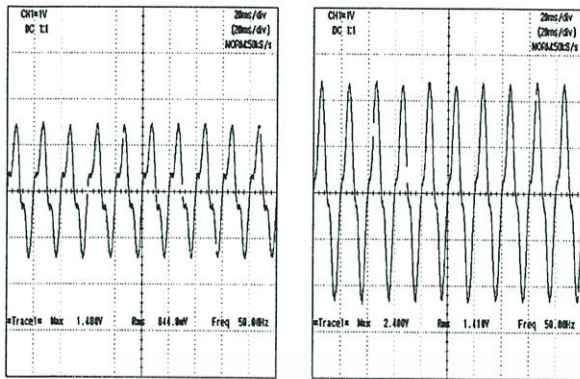


Fig. 7. The signal of  $V_{sum2}$  of 3-hp induction motor when 1% shorted turns (left) and 2% shorted turns (right) at no-load motor.

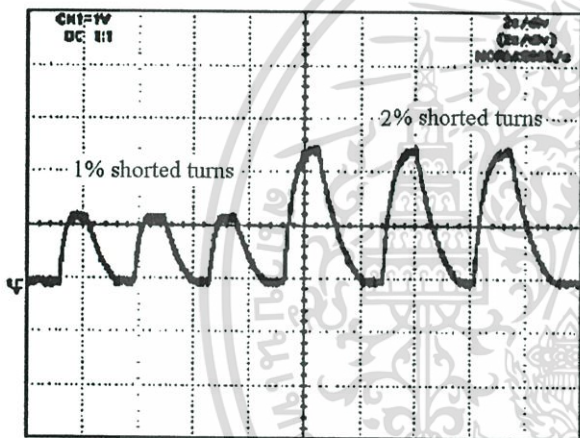


Fig. 8. Turn-faults signals (rms) of 3-hp induction motor under 1% and 2% shorted turns.

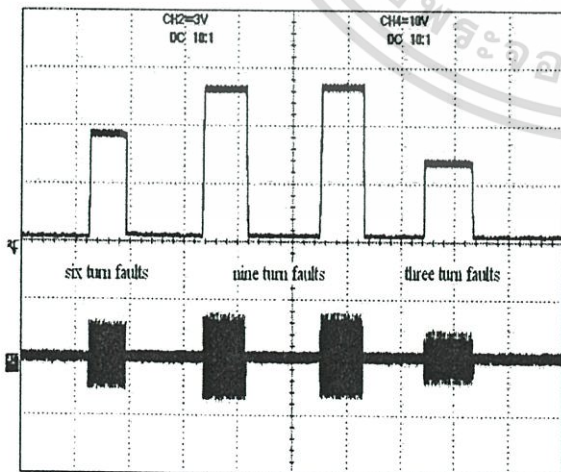


Fig. 9. The rms value of  $V_{sum2,rsms}$  signal (top) of the instantaneous value  $V_{sum2}$  of turn fault (bottom).

Fig. 7 shows various turn-fault signals ( $V_{sum2}$ ) of 3-hp and 5-hp induction motors when voltage supply is balanced. The figure shows the stator fault signal for 1% and 2% shorted turns. From the results, the turn-fault signal (level of  $V_{sum2,rms}$ ) depends on the number of stator winding shorted turns. For the Fig. 8, the fault level has responded after switched on and off for each one. The Fig. 9 shows the instantaneous level of  $V_{sum2,rms}$  and  $V_{sum2}$  for comparison. The  $V_{sum2}$  waveform of 5-hp induction motor under shorted turns condition is shown in Fig. 10. In the case of 5-hp induction motor, the value of volt per turn in one phase is higher than 3-hp. The level of  $V_{sum2,rms}$  all 3-hp and 5-hp induction motor versus shorted turns is shows in Fig. 11. However, the turn-faults level is linearly proportional to the number of shorted turns.

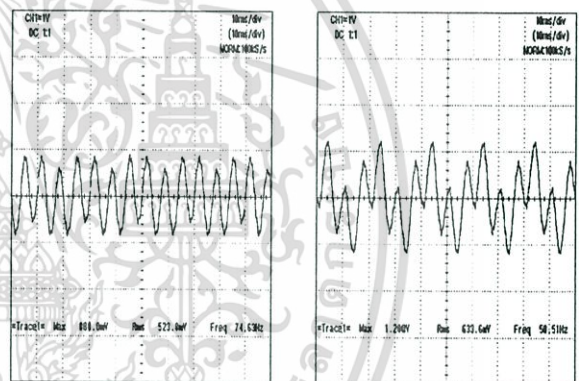


Fig. 10. The signal of  $V_{sum2}$  of 5-hp induction motor when 1% shorted turns (left) and 3% shorted turns (right) at no-load.

In addition, the error of  $V_{sum2,rms}$  level under motor load and unload conditions from Fig. 12, can be concluded that the stator fault amplitude does not depend on the load condition. The examples of supply voltage imbalance measurement display and the percentage of shorted turns are shown in Fig. 13.

## VI. CONCLUSION

In this paper, we proposed prototype instrument for shorted turns diagnosis of three phase induction motors. The turns-fault levels depend on the number of winding shorted turns in each rate induction motors. This difference in all numbers of winding turn in one

phase of turn-fault signal is not equal (e.g.  $\Delta V_{sum2,rms}$  of 3-Hp and 5-Hp Induction motors). This effect will lead to the error diagnosis of the percent of shorted turns. In the future work, this prototype will be developed to be more reliable.

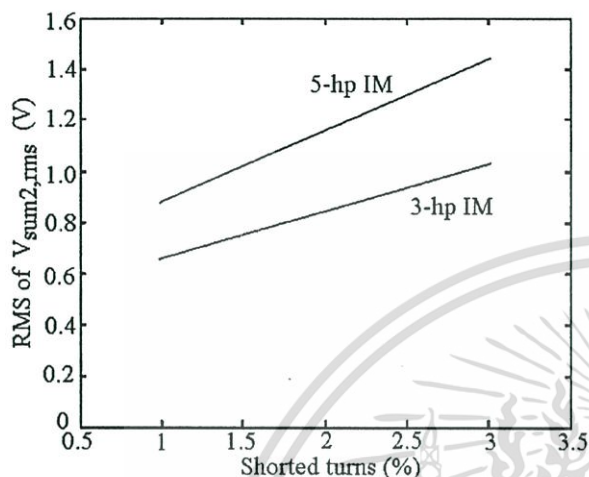


Fig. 11. Comparison of the  $V_{sum2,rms}$  add value of 3-Hp and 5-Hp induction motors (IM) under percent of shorted turns condition.

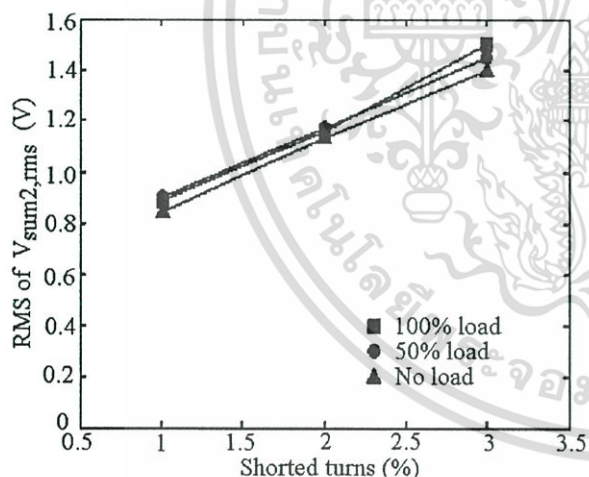


Fig. 12. Levels of turn-fault signal under load condition versus percent of shorted turns.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank the faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and the College of Industrial Technology, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand, for their collaboration in this research project and finance for laboratory equipment.

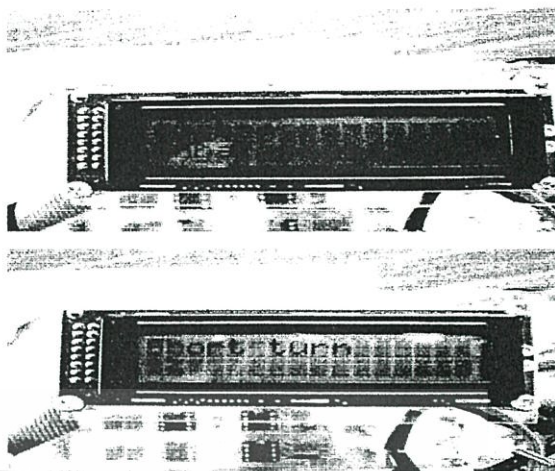


Fig. 13. Picture of mains supply balance checking and shorted turn measurement display.

#### REFERENCES

- [1] A.H. Bonnett and G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 4, pp. 921-937, Jul./Aug. 1992.
- [2] M.E.H. Benbouzid and G.B. Kliman, "What stator current processing based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis," *IEEE Trans. on Energy Convers.*, vol.18, no. 2, pp 238-244, Jun. 2003.
- [3] M.A. Cash, T.G. Habetler and G.B. Kliman, "Insulation failure prediction in AC machines using line-neutral voltages," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 6, pp. 1234-1239, Nov./Dec. 1998,.
- [4] A. Siddique, G.S. Yadava and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE Trans. on Energy Convers.*, vol.20, no. 1, pp. 106- 114, Mar. 2005.
- [5] R. Natarajan, "Failure identification of induction motors by sensing unbalanced stator currents," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 4, no. 4, pp. 585-590, Dec. 1989.
- [6] G. Stone and J. Kapler, "Stator winding monitoring," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 4, pp. 15-20, Sep./Oct. 1998.
- [7] M. Arkan, D.K. Perovic, P. Unsworth, "Online stator fault diagnosis in induction motors," *IEE Proceedings, Electric Power Appl.*, vol. 148, Issue 6, pp. 537-547, Nov. 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายเฉลิมชาติ มานพ เกิดเมื่อวันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดสิงห์บุรี
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2533	มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนสิงห์บุรี
พ.ศ. 2536	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ไฟฟ้ากำลัง) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น
พ.ศ. 2539	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ไฟฟ้ากำลัง) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น
พ.ศ. 2541	ครุศาสตรอดสูสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2544	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2544-ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
งานวิจัยที่สนใจ	การเฝ้าตรวจสถานะ การวินิจฉัย การป้องกัน และการจัดการพลังงานใน เครื่องจักรกลไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้