

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

การตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธี  
รวมแรงดัน ไลน์-นิวตรอน

Detecting Abnormal Status of Induction Machine by Using  
Line-Neutron Voltage Summation



โดย

นายจุมพล มากมี

นายชายชล ภักดีอุทธรณ์

นายณัฐพงษ์ วัฒนวงศ์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 72954  
วัน,เดือน,ปี 26 ส.ย. 2550

b. 1122 5A 15  
i.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์เฉลิมชาติ มานพ

อาจารย์วรภัลป์ ลิ้มเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

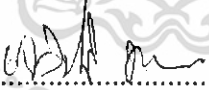
ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีรวมแรงดัน ไลน์-  
นิวตรอน

ผู้จัดทำ

1. นายจุมพล มากมี
2. นายชายชล กักดีอุทธรณ์
3. นายณัฐพงศ์ วัฒนวงศ์

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์เฉลิมชาติ มานพ )

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์วรกัลป์ ลิ้มเจริญ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การตรวจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามเฟสด้วยวิธี รวมแรงดัน โวลต์-นิวตรอน

นายจุมพล มากมี  
นายชายชล ภักดีอุทธรณ์  
นายณัฐพงศ์ วัฒนวงศ์  
อาจารย์เฉลิมชาติ มานพ อาจารย์ที่ปรึกษา  
อาจารย์วรกัลป์ ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

### บทคัดย่อ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้มีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มากขึ้นเนื่องจาก มีข้อดี ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง หลายด้านด้วยกันเช่น มีขนาดเล็กกว่า จึงทำให้น้ำหนักเบาว่าเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัดกำลังเดียวกัน , ใช้แหล่งจ่ายไฟน้อยกว่า เนื่องจากไม่มีชุดขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ทำให้สะดวกกว่าในการใช้งาน , ไม่มีแปลงถ่านที่จัดเรียงกระแส ทำให้ลดส่วนที่จะมีการสึกหรองลง ไป ซึ่งจะส่งผลต่อค่าบำรุงรักษา นอกจากนั้นยังไม่ทำให้เกิดประกายไฟ จึงสามารถใช้งานได้ในสถานที่ ที่ใกล้วัตถุไวไฟหรือเสี่ยงต่อการระเบิด แต่ปัญหาหนึ่งที่พบมากในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ก็คือปัญหาในเรื่องของการดีดวงจรของขดลวดอามาเจอร์ที่สเตเตอร์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาอื่นๆตามมา จึงเป็นที่มาของโครงการนี้

โดยโครงการนี้จะเน้นที่การศึกษาสัญญาณฟอลต์ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดีดรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำบนขดลวดสเตเตอร์ โดยอาศัยทฤษฎีการรวมแรงดันในการตรวจสอบความสมดุลของค่าอิมพีแดนซ์บนขดลวดสเตเตอร์

## II

### **Detecting Abnormal Status of Induction Machine by Using Line-Neutral Voltage Summation**

Jumpon Markmee

Chaichon Pakdeeutorn

Natapong Watanawong

Chalermchart Manoph Adviser

Worakan Limharearn Adviser

#### **ABSTRACT**

Nowadays the Induction motor is broadly used in any industry because of having more advantages of operation when comparing with other motor types such as smaller at the same power rate , optimum price , easy using and maintenance but there is one problem always found. It is a short turn on a stator winding.

This thesis is a study and analysis of a short turn stator fault by using Line-Neutral Voltages Summation theory to verify balance of the stator winding impedance. The algebraic sum of the three instantaneous line-neutral voltages is shown to readily identify the occurrence of an insulation fault. As this technique relies on deviations in phase impedance balance occurring during turn faults.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการอยากกล่าวขอบคุณอย่างสูงต่อความกรุณาที่ อาจารย์ เฉลิมชาติ มานพ และ อาจารย์ วรภัฏปี ลิ้มเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้มอบความรู้ใหม่ๆ ให้คำแนะนำต่างๆ รวมถึง เอื้อเฟื้อจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นแก่ผู้จัดทำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาทุกท่านที่ ประสึทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่าน โครงการนี้ก็คงไม่สามารถสำเร็จ ลุล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณทศพล พี่ที่ศึกษาระดับปริญญาโท ที่คอยให้ความ ช่วยเหลือแก่ผู้จัดทำ ช่วยแนะนำอุปกรณ์และเครื่องมือใหม่ๆ มาทดสอบ รวมถึง ได้ช่วยจัดหาและซื้อ มอเตอร์แบบ 6 ขั้ว ให้ผู้จัดทำได้ทดลองด้วย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อย่างยิ่งที่คอยเอาใจใส่ คอยถามไถ่ตลอดเวลา และคอยส่งเสริมให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญรูป.....	III
สารบัญตาราง .....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทำงานของโครงการ.....	3
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	3
2.2 การเกิดขึ้นและดำเนินไปของฟลัดด์.....	3
2.3 รูปแบบของการพันขดลวดที่สเตเตอร์ (Stator Winding).....	4
2.4 ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์.....	6
2.5 ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความเสียหายที่สเตเตอร์.....	9
2.5.1 ผลของความร้อน.....	9
2.5.2 ผลเนื่องมาจากไฟฟ้า.....	11
2.5.3 ผลเนื่องมาจากแรงทางกล.....	12
2.5.4 ผลเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม.....	13
2.6 ทฤษฎีการรวมแรงดัน ( Line-Neutron Voltage Summation).....	14
2.7 การเปรียบเทียบและข้อดีของวิธีรวมแรงดัน.....	16
2.8 พิจารณาในทางปฏิบัติจริง.....	16
2.9 องค์ประกอบและการวิเคราะห์ความสูญเสียเมื่อพันขดลวดใหม่.....	17
2.9.1 องค์ประกอบของความสูญเสีย.....	18
2.9.2 การวิเคราะห์ความสูญเสีย.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีเก็บค่าแรงดันไลน์-นิวตรอนของมอเตอร์และโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.2 วิธีเก็บค่าแรงดันของมอเตอร์.....	39
3.3 โปรแกรมการวิเคราะห์ข้อมูล.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	44
4.1 กรณีแหล่งจ่ายไฟทั้ง 3 เฟสสมดุล.....	45
4.2 กรณีแหล่งจ่ายไฟไม่สมดุล โดยที่มีเฟสหนึ่งแรงดันตกเหลือ.....	48
205 V(rms) (ลดลง 6.8%)	
4.3 กรณีมอเตอร์มีภาระทางไฟฟ้า.....	52
4.4 กรณีที่มอเตอร์ลัดรอบพร้อมกันทั้งสองเฟส.....	53
4.5 การวิเคราะห์ความแตกต่างในรูปของแรงดันในแกน d,q.....	54
ที่ตัดความถี่มาตรฐานออก	
4.5.1 กรณีแหล่งจ่ายไฟทั้ง 3 เฟสสมดุล.....	54
4.5.2 กรณีแหล่งจ่ายไฟไม่สมดุล โดยที่มีเฟสหนึ่งแรงดันตกเหลือ.....	56
205 V(rms),ลดลง 6.8%	
4.5.3 กรณีมอเตอร์มีภาระ.....	59
4.5.4 กรณีที่มอเตอร์ลัดรอบพร้อมกันทั้งสองเฟส.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	63
กิตติกรรมประกาศ.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### III

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	3
2.2 แสดงการพันขดลวดแบบ Form Wound Coil.....	4
2.3 แสดงการพันขดลวดแบบ Random Wound Coil.....	5
2.4 แสดงการพันขดลวดของ Two slot ,Double layer stator winding.....	5
2.5 โหมมความเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	6
เมื่อต่อแบบสตาร์	
2.6 Symmetrical Pattern.....	7
2.7 Single Phasing Pattern.....	8
2.8 Nonsymmetrical pattern without grounding.....	8
2.9 Nonsymmetrical pattern with grinding.....	9
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอายุการใช้งานของฉนวน.....	10
2.11 แสดงการเกิดรอยที่ผิวขดลวด.....	12
2.12 การเปรียบเทียบระหว่างแกนเหล็กที่สเตเตอร์หลังจาก burnout.....	20
และนำขดลวดออกไป	
2.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของมอเตอร์พันใหม่กลุ่มที่ควบคุมน้อย.....	21
2.14 ลูกปืนที่อยู่ติดกับเพลลาของมอเตอร์.....	26
2.15 แสดงใบพัดในลักษณะต่าง ๆ.....	26
2.16 แผ่นตัวนำที่สเตเตอร์เกิดการเสียหาย.....	27
2.17 Basic block diagram of turn-fault analysis method.....	30
2.18 Basic block diagram of Calculation.....	31
2.19 แรงดัน สามเฟส แบบสมดุล.....	32
2.20 แรงดันสามเฟสแบบสมดุลเมื่อทำการรวมกันแล้ว.....	32
2.21 แรงดัน สามเฟส แบบไม่สมดุล (แรงดันสูงสุดเฟส a ( $V_a$ peak).....	33
ลดลงเหลือ 310 v)	
2.22 แรงดัน สามเฟส แบบไม่สมดุลเมื่อทำการรวมกันแล้ว.....	33
2.23 ตัวอย่างการจำลองการลัดวงจรของมอเตอร์.....	34
3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิด 4 Poles.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิด 6 Poles.....	36
3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง .....	37
3.4 แผงโหลด หลอดไส้ 100 วัตต์.....	37
3.5 Auto Transformer.....	38
3.6 Digital Oscilloscope.....	38
3.7 Probe X100.....	39
4.1 แรงดัน Rms ของระบบที่สภาวะสมดุล.....	45
4.2 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สภาวะสมดุล.....	45
4.3 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบเฟส A มอเตอร์ 6 ขั้ว ที่สภาวะสมดุล.....	46
4.4 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบเฟส B มอเตอร์ 6 ขั้ว ที่สภาวะสมดุล.....	46
4.5 แรงดัน Rms ของระบบที่สภาวะไม่สมดุล (เฟส A 205 V(Rms),ลดลง 6.8%).....	48
4.6 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สภาวะไม่สมดุล.....	48
(เฟส A 205 V(Rms),ลดลง 6.8%)	
4.7 แรงดัน Rms ของระบบที่สภาวะไม่สมดุล (เฟส B 205 V(Rms),ลดลง 6.8%).....	49
4.8 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สภาวะไม่สมดุล.....	49
(เฟส B 205 V(Rms),ลดลง 6.8%)	
4.9 แรงดัน Rms ของระบบที่สภาวะไม่สมดุล (เฟส C 205 V(Rms),ลดลง 6.8%).....	50
4.10 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สภาวะไม่สมดุล.....	50
(เฟส C 205 V(Rms),ลดลง 6.8%)	
4.11 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สภาวะสมดุล.....	52
มีโหลด 40%	
4.12 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สภาวะสมดุล.....	52
มีโหลด 60%	
4.13 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบเฟส A พร้อมกับเฟส B มอเตอร์ 6 ขั้ว .....	53
ที่สภาวะสมดุล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## IV

### สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสาเหตุและผลที่เกิดจากการพันขดลวดใหม่.....	18
2.2 ผลการทดสอบที่ State 1.....	21
2.3 ผลการทดสอบที่ State 2.....	22
2.4 ผลการทดสอบที่ State 3.....	24
2.5 ผลการทดสอบมอเตอร์แรงดันสูง.....	25
2.6 แสดงผลจากการ burnout และพันใหม่ ซ้ำหลาย ๆ ครั้ง.....	28
3.1 Nameplate ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิด 4 Poles.....	35
3.2 Nameplate ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิด 6 Poles.....	36
3.3 Nameplate ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	37
3.4 รายละเอียดของอุปกรณ์ Digital Oscilloscope.....	39
4.1 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ.....	54
4.2 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 6 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ.....	55
4.3 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ.....	56
ในสถานะไม่สมดุล (เฟส A แรงดัน 205 V(Rms), ลดลง 6.8%)	
4.4 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ.....	57
ในสถานะไม่สมดุล (เฟส B แรงดัน 205 V(Rms), ลดลง 6.8%)	
4.5 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ.....	58
ในสถานะไม่สมดุล (เฟส C แรงดัน 205 V(Rms), ลดลง 6.8%)	
4.6 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ.....	59
ในสถานะสมดุล มีโหลด 40%	
4.7 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ.....	60
ในสถานะสมดุล มีโหลด 60%	
4.8 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 6 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ.....	61
สองเฟส ในสถานะสมดุล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้มีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส มากขึ้น เช่นในสายพานลำเลียงและเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงหลายด้านด้วยกันเช่น มีขนาดเล็กกว่า จึงทำให้น้ำหนักเบากว่าเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรงที่พิกัดกำลังเดียวกัน, ใช้แหล่งจ่ายไฟน้อยกว่าเนื่องจากไม่มีชุดขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ทำให้สะดวกกว่าในการใช้งาน, ไม่มีแปรงถ่านส่วนจัดเรียงกระแส ทำให้ลดส่วนที่จะมีการสึกหรอลงไป ซึ่งจะส่งผลต่อค่าบำรุงรักษา นอกจากนี้ยังไม่ทำให้เกิดประกายไฟ จึงสามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่ใกล้วัตถุไวไฟหรือเสี่ยงต่อการระเบิด แต่ปัญหาหนึ่งที่พบมากในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็คือปัญหาในเรื่องของการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ที่สเตเตอร์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาอื่นๆตามมา จึงเป็นที่มาของโครงการนี้

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ นับว่ามีความสำคัญอย่างมากเป็นอันดับสองขององค์ประกอบความเสียหายทั้งหมดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเฉพาะในกรณีลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบในขดลวดสเตเตอร์ จะมีโอกาสเกิดขึ้นเป็นอันดับแรก ๆ (จากในทั้งหมด 5 กรณี ของการลัดวงจรที่ขดลวดสเตเตอร์) ทั้งนี้เนื่องมาจากการสั้นไหวที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงานจะส่งผลกระทบต่อได้ง่ายกว่าการลัดวงจรสาเหตุอื่น ๆ

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเชิงวิจัยของสัญญาณฟอลต์ ที่เกิดเนื่องจากการลัดรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ และแนวทางการแก้ไข ของสัญญาณสเตเตอร์ฟอลต์

### 1.3 ขอบเขต และ ข้อกำหนดของโครงการ

เพื่อสร้างเครื่องมือสำหรับใช้ตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ที่เกิดจากการลัดรอบของขดลวดที่สเตเตอร์ โดยสามารถแสดงผล ที่สามารถบอกถึงระดับของสัญญาณฟอลต์ และยังบอกถึงความไม่สมดุลของแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาของโครงการคือ ทำการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำพิกัด 2 แรงม้า ในกรณี 4 Poles และ 6 Poles โดยพิจารณาถึงลักษณะของสัญญาณฟลด์ ในลักษณะต่าง ๆ กัน คือ 3, 6, 9, 12 รอบ ทำการทดสอบที่สภาวะมีโหลดและแบบไม่มีโหลด และที่สภาวะแรงดันไม่สมดุลต่าง ๆ เป็นต้น ผลการทดลองที่ได้ จะนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเครื่องมือสำหรับตรวจสอบฉนวน สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่า ฉนวนเริ่มเสื่อมคุณภาพมากน้อยเพียงใด

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์
3. ทดสอบสัญญาณแรงดันจากการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
4. จัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการทดสอบให้เหมาะสมกับการใช้งาน
5. ออกแบบลักษณะการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส สำหรับใช้ในการทดสอบ
6. ทดสอบการลัดรอบของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และเก็บผลที่ได้
7. ศึกษาการเขียนโปรแกรม MatLab เพื่อใช้ในการคำนวณข้อมูลของแรงดัน Line-Neutral ที่ตรวจจับจากมอเตอร์ นำมาวิเคราะห์ วินิจฉัย และแสดงผล
8. จัดทำโครงสร้างของชุดทดลอง
9. ประเมินการทำงานของเครื่องมือทดสอบ รวมถึงการแก้ไขข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้
10. สรุปผลและจัดทำเอกสารรายงาน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างชุดเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจจับและวินิจฉัย ฟลด์สเตเตอร์ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้หลักการรวมแรงดัน ไลน์ - นิวตรอน ซึ่งเป็นเทคนิคที่การคำนวณไม่ซับซ้อนและสามารถตรวจสอบได้ในช่วงแรก ๆ ก่อนที่จะเกิดความเสียหายของมอเตอร์มากขึ้น

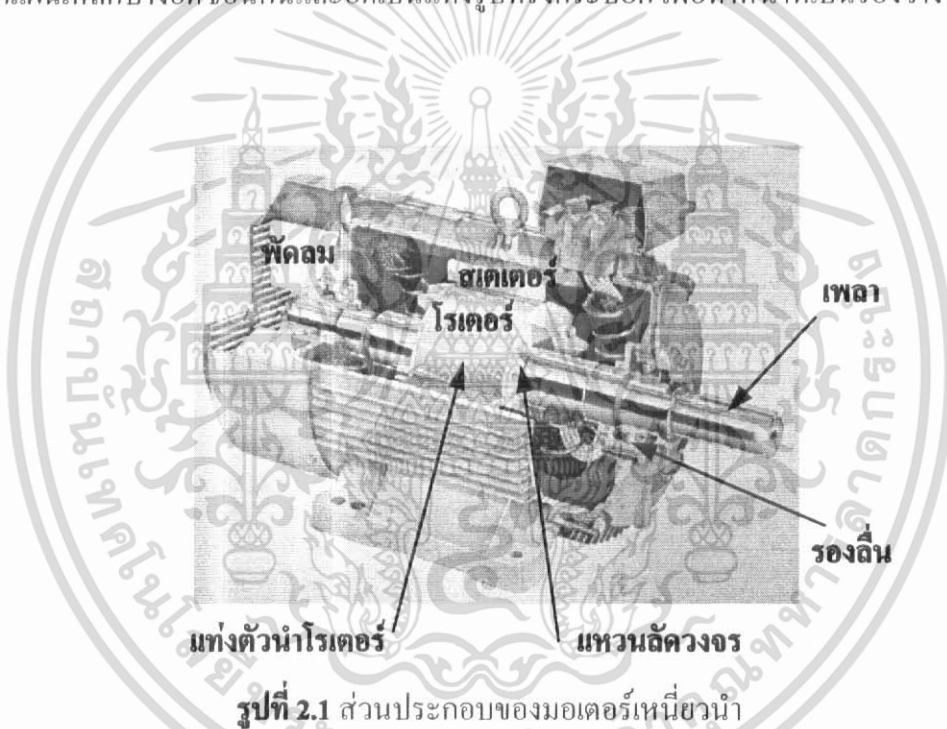
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการทำงานของโครงการ

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน ส่วนอยู่กับที่หรือสเตเตอร์ (Stator) ส่วนหมุนหรือโรเตอร์ (Rotor) และในปัจจุบันได้แยกแบริ่ง (Bearing) ออกมาเป็นส่วนประกอบหนึ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากมีทั้งส่วนที่เคลื่อนที่และอยู่กับที่ ซึ่งในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะส่วนประกอบสเตเตอร์ที่มีความสำคัญที่จะนำไปใช้ในโครงการวิจัยนี้

สเตเตอร์ เป็นส่วนที่อยู่กับที่และมีโครงสร้างเหมือนกับสเตเตอร์ของมอเตอร์ชนิดอื่น ๆ คือทำจากแผ่นเหล็กบางอัดซ้อนกันและอัดเป็นแท่งรูปทรงกระบอก เพื่อทำหน้าที่เป็นร่องวางขดลวด 3 เฟส



#### 2.2 การเกิดขึ้นและดำเนินไปของฟอลต์

การลัดวงจรแบบรอบถึงรอบที่ขดลวดสเตเตอร์ เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้บ่อย และ นับว่าเป็นฟอลต์ที่มีความสามารถในการทำความเสียหายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ ซึ่งเป็นผลสำคัญมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวน (ผ่านทาง การปนเปื้อน หรือ อุณหภูมิที่ไม่ปกติ, ความเครียดทางกล, ทางไฟฟ้าหรือสิ่งแวดล้อมภายนอก) ฟอลต์เฉพาะที่ ที่เกิดขึ้นนี้จะก่อให้เกิดจุดความร้อน (thermal hot-spot) ซึ่งจะส่งเสริมกระบวนการเสื่อมสภาพของฉนวนยิ่งขึ้น และอาจพัฒนาไปสู่ฟอลต์ที่รุนแรงกว่า (turn-ground fault) การตรวจหาความบกพร่องดังกล่าวนี้ ให้พบตั้งแต่ช่วงสภาวะแรกเริ่ม จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการเพิ่มความปลอดภัยที่ดี และ ยังเป็นการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพในงานอุตสาหกรรม

### 2.3 รูปแบบของการพันขดลวดที่สเตเตอร์ ( Stator Winding )

ลักษณะการพันขดลวดสเตเตอร์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ แบบที่มีแท่งตัวนำขนาดเดียวอยู่ในสลอต (Slot) เดียวกัน และแบบที่มีแท่งตัวนำ 2 ขนาดอยู่ในสลอต เดียวกัน

#### 1. การพันแบบที่มีแท่งตัวนำขนาดเดียวอยู่ในสลอตเดียวกัน (Individual coils)

การพันขดลวดสเตเตอร์ ในรูปแบบนี้มีลักษณะเด่น คือ ในแต่ละช่องสลอตจะมีแท่งตัวนำหลายๆ แท่งอยู่ในสลอตเดียวกันแต่ทุกแท่งตัวนำนั้นจะมีขนาดเท่าๆ กัน โดยเราสามารถแบ่งได้ออกเป็นอีก 2 แบบย่อย คือ

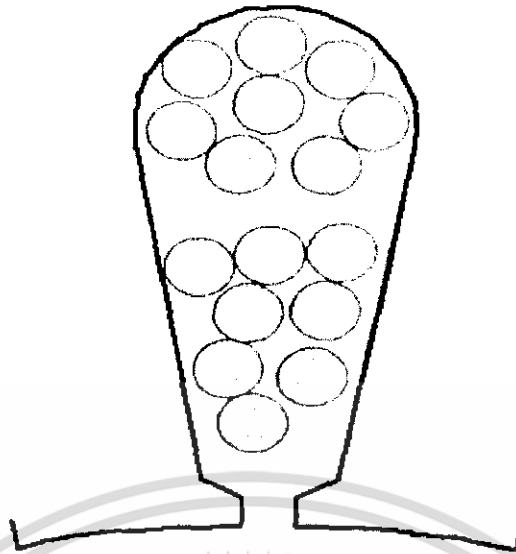
- Form Wound coil การพันในลักษณะนี้มักจะพบมากในมอเตอร์ ที่มีขนาดใหญ่โดยแท่งตัวนำที่นำมาใช้พันลงในช่องสลอตนั้นจะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวนแท่งของขดลวดในแต่ละช่องสลอตจะมีจำนวนมากแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการพันขดลวดแบบ Form Wound coil

- Random Wound coil การพันขดลวดในลักษณะนี้มักจะพบมากในมอเตอร์ ที่มีขนาดเล็กๆ โดยแท่งตัวนำที่นำมาพันลงในช่องสลอตนั้นจะมีไม่มากนัก และการพันขดลวดในลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแท่งขดลวดตัวนำเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.3

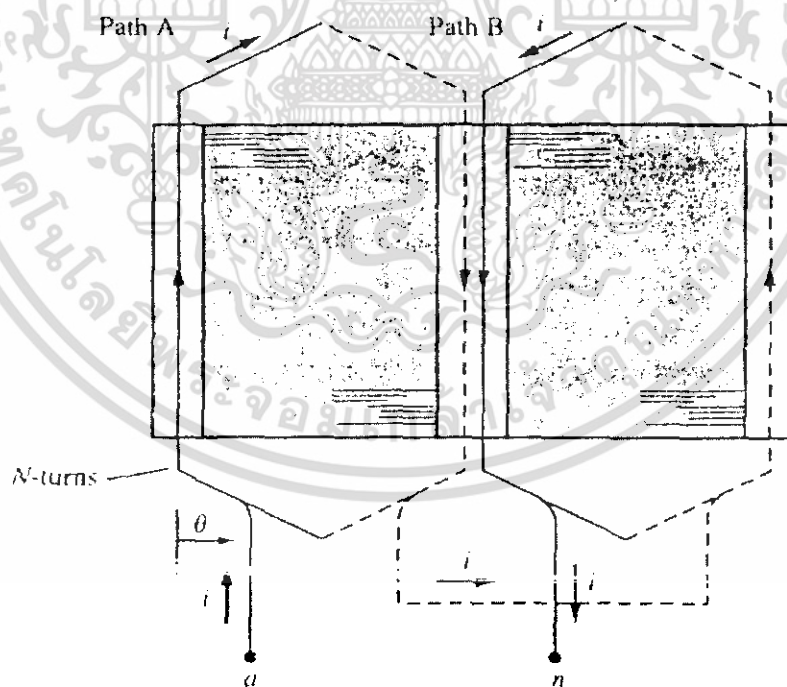
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.3** แสดงการพันขดลวดแบบ random Wound coil

2. แบบที่มีแท่งตัวนำ 2 ขนาดอยู่ในสล็อต เดียวกัน (Double layer winding)

ลักษณะการพันขดลวดในรูปแบบนี้คือการพันขดลวดที่มีขดลวด 2 ขนาดอยู่ในร่องสล็อตเดียวกันแสดงดังรูปที่ 2.4



**รูปที่ 2.4** แสดงการพันขดลวดของ Two slot ,Double layer stator winding

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้มอเตอร์ที่ใช้ทำการทดลองมีลักษณะการพันแบบที่มีแท่งตัวนำขนาดเดียวอยู่ในสล็อตเดียวกัน

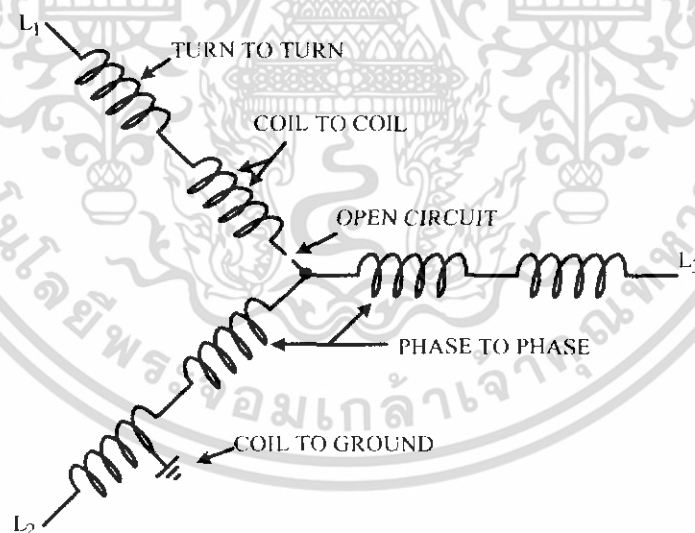
## 2.4 ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์

ในการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ จะพิจารณาร่วมกันระหว่างโหมดความเสียหายที่เกิดขึ้น (Failure modes) ที่ขดลวดสเตเตอร์ ร่วมกับลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น (Failure patterns) ที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยพิจารณาได้ดังนี้

โหมดความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์

ในการวิเคราะห์โหมดความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ พิจารณาได้ว่ามีโหมดของความเสียหายที่เกิดขึ้น อยู่ด้วยกัน 5 ประเภท แสดงดังรูป ได้แก่

- การลัดวงจรระหว่างรอบถึงรอบ (Turn to turn)
- การลัดวงจรระหว่างขดถึงขด (Coil to coil)
- การลัดวงจรระหว่างเฟสถึงเฟส (Phase to phase)
- การลัดวงจรระหว่างขดถึงกราวด์ (Coil to ground)
- และกรณีเปิดวงจร (Open circuit)



**รูปที่ 2.5** โหมดความเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อต่อแบบสตาร์

จากการตรวจสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส มอเตอร์ที่มีการพันเป็นแบบสุม มักจะถูกนำมาใช้กับงานที่มีการเริ่มเดินบ่อยครั้ง ลวดตัวนำในแต่ละชุดขดลวดที่มีอยู่อย่างมากมาย จะเป็นสาเหตุที่ทำให้มีบางส่วนเกิดการเคลื่อนที่ (สั่น) ในขณะที่มอเตอร์ทำงาน ซึ่งสาเหตุนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการลัดวงจรแบบรอบถึงรอบ ภายในชุดขดลวด การลัดวงจรดังกล่าวจะนำไปสู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

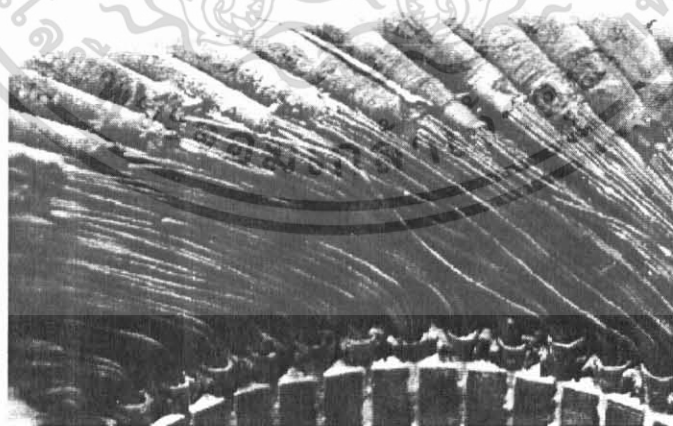
ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชุดของขดลวดที่ลัดวงจรนั้น ทำให้ฉนวนของขดลวดตัวนำเสื่อมสภาพลงเรื่อยๆ แล้วก็ทำให้เกิดการลัดรอบลงกราวน์ที่สล็อตในสุด ผลของการลัดรอบที่ขดลวดนั้นยังขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งไว้ที่ตัวมอเตอร์ด้วย เพราะเวลาที่เริ่มเกิดการลัดรอบแต่มอเตอร์ยังคงทำงานต่อไป ก็ยิ่งส่งผลให้เกิดความร้อนเพิ่มไปเรื่อย ๆ จนทำให้เกิดเฟสถึงเฟสฟอลต์หรือกราวน์ฟอลต์ (Ground fault) จนทำให้มอเตอร์หยุดทำงานในที่สุด

ในการวิเคราะห์โหมคความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ของทั้ง 5 ประเภท จะเห็นได้ว่าปัญหาเริ่มแรกจะมาจากการลัดวงจรเพียงจุดเล็ก ๆ เท่านั้น คือ รอบถึงรอบ แล้วก็จะลุกลาม ทำให้เกิดอีกสี่สถานะตามมา ดังนั้นถ้าสามารถตรวจจับการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ลัดรอบกรณีรอบถึงรอบได้ก็จะสามารถ แก้ไข ปรับปรุง หรือวางแผนการซ่อมบำรุงได้ล่วงหน้า ทำให้สามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายให้น้อยลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากอีกสี่สถานะที่มีอันตรายสูงกว่า และมีอัตราเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นลดลงไปด้วยเช่นกัน

### ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์

เป็นส่วนที่มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับ โหมคของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์มากที่สุด แต่จะถูกแยกนำมาพิจารณาต่างหาก

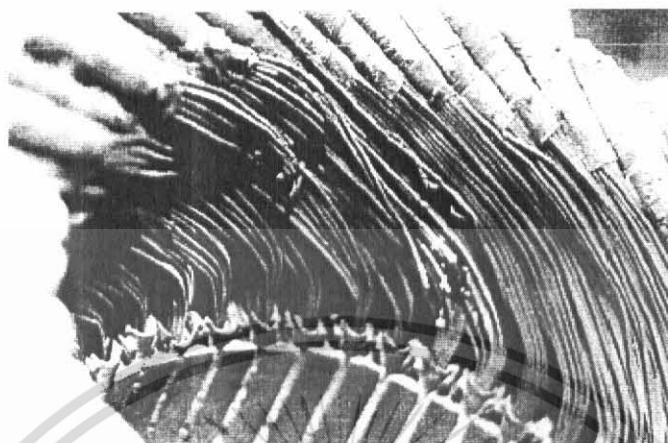
การนำความสัมพันธ์ของ โหมคของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ (Failure modes) และ ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ (Failure patterns) นำมาพิจารณาร่วมกัน ทำให้เราสามารถวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ได้อย่างถูกต้อง ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ที่นำโหมคของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ และลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ มาพิจารณาร่วมกัน แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 Symmetrical patterns

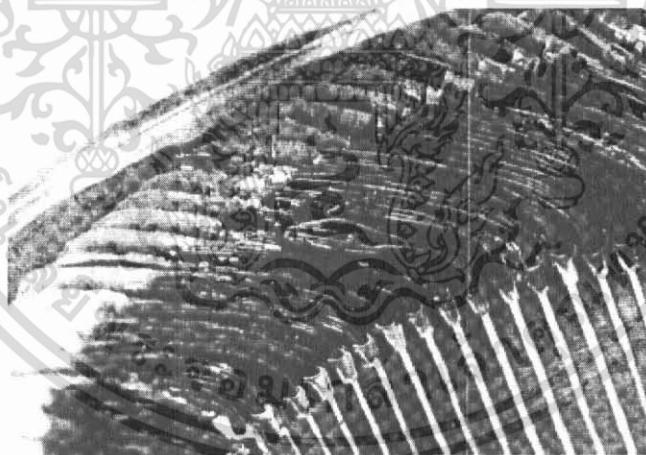
รูปที่ 2.6 ลักษณะของ Symmetrical patterns : ในแต่ละขดของขดลวดของแต่ละเฟสถูกทำให้ร้อนมากโดยมีรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ เป็นแบบ multiple turn-to-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

turn shorting ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น โดยที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากการเกิด โอเวอร์ โหลด



รูปที่ 2.7 Single phasing patterns

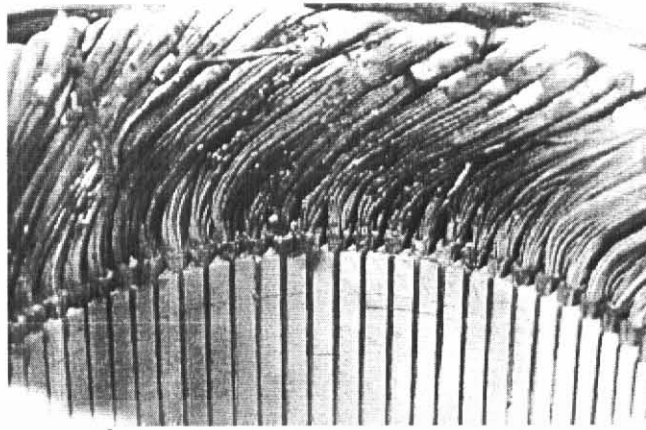
รูปที่ 2.7 ลักษณะของ Single phasing patterns : เกิดความร้อนและเกิดความเสียหายที่ขดลวดอย่างสมบูรณ์เพราะสาเหตุมาจาก turn-to-turn shorting โดยเป็นเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายที่ขดลวด 1 เฟส



รูปที่ 2.8 Nonsymmetrical pattern without grounding

รูปที่ 2.8 ลักษณะของ Nonsymmetrical pattern without grounding : กลุ่มของขดลวดถูกทำให้เกิดความร้อนโดยมีรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ เป็นแบบ multiple turn-to-turn shorting ส่งผลให้สายไฟเกิดความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 Nonsymmetrical pattern with grinding

รูปที่ 2.9 ลักษณะของ Nonsymmetrical pattern with grinding : ขดลวด 1 ขดถูกต่อลงกราวนัโดยมีรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ เป็นแบบ turn-to-turn shorting

จะเห็นได้ว่าเราต้อง ใช้โหมตความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ และลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์มาพิจารณาร่วมกันเสมอ เพื่อให้การวินิจฉัยลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์เป็นไปอย่างถูกต้องและแม่นยำ และสังเกตได้ว่าในแต่ละกรณีที่กำลังกล่าวมา รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์จะเป็นแบบ turn-to-turn shorting ทั้งหมด แต่มีเหตุที่ทำให้เกิดลักษณะความเสียหายที่ขดลวดต่างกันออกไป เพราะเนื่องมาจากการมีลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ที่ต่างกันออกไป [3]

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดความเสียหายที่สเตเตอร์

ในส่วนนี้ ได้ชี้แจงให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยหลายชนิดที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของสเตเตอร์และความเสื่อมสภาพก่อนกำหนด

### 2.5.1 ผลของความร้อน

รูปแบบของความร้อนที่เกิดขึ้นมีดังนี้ คือ

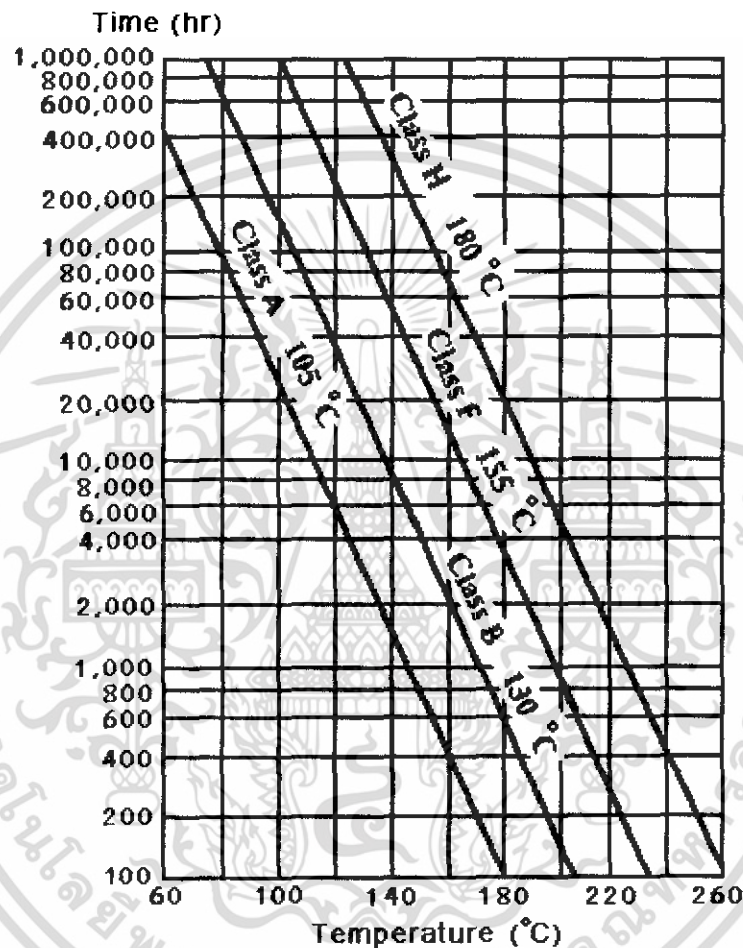
#### 1. ความร้อนที่เกิดจากการเสื่อมอายุ (Aging)

AIEE 510 และ IEEE 275 ได้ดำเนินการทดสอบโดยกำหนดผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อระบบฉนวนของขดลวด จากการทดสอบอายุการใช้งานน้อยที่สุดของฉนวนที่ 20,000 ชั่วโมง จะพบว่าอายุของฉนวนจะลดลงครึ่งหนึ่งของทุก ๆ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียส รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างฉนวนหลายประเภทเทียบกับอุณหภูมิและอายุการใช้งาน เว้นแต่เมื่ออุณหภูมิมีค่ามาก ๆ จะส่งผลให้ระบบของฉนวนเกิดความเปราะบางและเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนไป และเมื่อถึงจุดหนึ่งถ้ามีความเค้นสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายที่ขดลวด ถ้าไม่แก้ไขก็จะทำให้มีความเสียหายมากขึ้น จากการตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของอุณหภูมิ มี 2 วิธีการที่ช่วยให้อายุการใช้งานเพิ่มขึ้น คือ ลดอุณหภูมิลงหรือไม่ก็เพิ่มคุณภาพของวัสดุที่ใช้ทำฉนวน

ยกตัวอย่าง ถ้าใช้มอเตอร์มีฉนวนคลาสบี (Class B) จะใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 130 องศาเซลเซียส โดยมีอายุการใช้งาน 20,000 ชม. แต่ถ้าที่อุณหภูมิเท่าเดิมแต่ใช้ฉนวนมอเตอร์คลาสเอฟ (Class F) จะทำให้มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นถึง 100,000 ชั่วโมง (จากรูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอายุการใช้งานของฉนวน

## 2. ความร้อนที่เกิดจากการ โอเวอร์โหลด (Thermal Overloading)

(a) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงหรือการกระเพื่อมของแรงดัน จะส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพของมอเตอร์และการทนอุณหภูมิของฉนวน มาตรฐานการออกแบบมอเตอร์ได้ยึดมาตรฐานของ NEMA (MG-12.43) โดยมีการกำหนดแรงดันที่  $\pm 10\%$  ถ้าสูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้มอเตอร์มีอายุการใช้งานลดลง

(b) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องมาจากแรงดันแต่ละเฟสไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะเกิดแค่เพียงเล็กน้อย ก็ส่งผลทำให้มีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ขดลวดที่พันอยู่มากเกินกว่าปกติ จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rule of Thumb อุณหภูมิแต่ละเฟสจะเพิ่มขึ้น 25 % ทุก ๆ 3.5 % ของแรงดันที่ไม่เท่ากันในแต่ละเฟส และนี่คือเหตุผลของสาเหตุที่ว่าทำไมต้องพยายามทำให้เราต้องรักษาแหล่งจ่ายไฟให้จ่ายไฟได้เท่ากันทั้ง 3 เฟส

(c) ขณะสตาร์ทมอเตอร์ จะมีการดึงกระแสเพิ่มขึ้นประมาณ 5-8 เท่าของกระแสปกติ ดังนั้นถ้าทำการสตาร์ทมอเตอร์ซ้ำ ๆ ในช่วงเวลาสั้น ๆ ก็จะมีผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่ามอเตอร์ที่ออกแบบมานั้นออกแบบมาเพื่อใช้กับงานอะไร โหลดเป็นอย่างไร ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์เหมือนกัน 2 ตัว ตัวหนึ่งคิดมูเล่ใช้งานกับโหลดที่มีความเฉื่อยสูง อีกตัวใช้ปั้มน้ำ ตัวที่ใช้ปั้มน้ำสามารถสตาร์ทได้นานกว่าตัวที่คิดมูเล่ ทำให้มีคำถามว่าสตาร์ทอย่างไรจึงจะปลอดภัย ซึ่งคำตอบก็คือต้องตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของโหลดที่นำมาใช้งานกับมอเตอร์ตัวนั้นว่ามีลักษณะอย่างไรเช่น ความเฉื่อย น้ำหนัก กราฟแรงบิดของโหลด ระยะเวลาที่ทำการสตาร์ท เป็นต้น ผลจากการสตาร์ทบ่อย ๆ หรือการใช้ช่วงเวลาในการสตาร์ทสั้น ๆ จะทำให้ฉนวนมีการขยายตัวเกิดการเปราะและแตกหักได้ ดังนั้นในการการออกแบบจึงต้องออกแบบจากวัสดุที่สามารถยืดขยายตัวและทนต่อการงอได้

(d) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องมาจากการไหลเวียนของอากาศภายในตัวมอเตอร์ไม่ดีเพียงพอ จะมีผลทำให้ฉนวนเกิดความร้อนมากขึ้น ดังนั้นมอเตอร์ควรมีการทำความสะอาดทั้งภายในและภายนอกเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการไหลของอากาศจะไม่ถูกขัดขวางซึ่งเป็นการจำกัดอุณหภูมิทำให้ฉนวนมีประสิทธิภาพดีขึ้น

(e) ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องจากความร้อนของอุณหภูมิที่อยู่ล้อมรอบตัวมอเตอร์ จากมาตรฐานของ NEMA ได้ออกแบบให้อุณหภูมิรอบ ๆ ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส

## 2.5.2 ผลเนื่องมาจากไฟฟ้า

ส่งผลดังนี้คือ

### 1. ฉนวน (Dielectric)

ต้องดูความสัมพันธ์ระหว่างอายุของฉนวนกับแรงดันที่ใช้ ความคงทนของฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน การเกิดเบรคความผ่านฉนวนจะนำไปสู่การเกิด

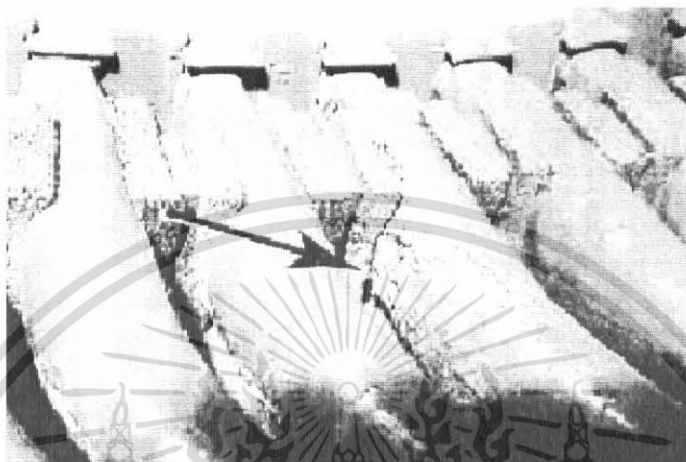
- ลัดระหว่างเฟส
- ลัดระหว่างรอบ
- ลัดลงดิน

### 2. การเสียหายที่พื้นผิว (Tracking)

การที่ผิวของขดลวดเกิดรอย ซึ่งจะส่งผลทำให้ขดลวดเกิดความเสียหายในลักษณะเฟสถึงกราวด์ นั่นเอง มักพบกับมอเตอร์ที่ใช้กับแรงดันที่เกิน 600 โวลต์ ซึ่งจะเกิดพื้นผิวฉนวนของขดลวดโดยจะมีลักษณะดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฉนวนเป็นรู
- เกิดสะสมความชื้นและสิ่งสกปรก
- เกิดกระแสดิซชาร์จลงดินเป็นเหตุให้เกิดการเผาไหม้เป็นจุดเล็กๆ ที่ฉนวนทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพลง



**รูปที่ 2.11** แสดงการเกิดรอยที่ผิวขดลวด

### 3. โครนา (Corona)

เป็นปัญหาที่สำคัญ พบที่ขดลวดที่ใช้งานเกิน 5 kV เป็นการ คายประจุ (discharge) ใน ฉนวนตรงที่มีแรงดันมากกว่าค่าวิกฤต มี 3 ชนิด

- ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุ ภายใน โดยเกิดที่โพรงของฉนวน
  - ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุ ที่หน้าสัมผัส
  - ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุเป็นจุด โดยเกิดที่ที่มีสภาพเป็นจุดแหลม,คม
- ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด โครนา คือ ความถี่, ความหนาของฉนวน, แรงดัน, ความชื้น,

อุณหภูมิ

### 4. แรงดันทรานเซียนท์ (Transient voltage)

เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การตัดต่อของหน้าสัมผัส, ไฟฟ้า เป็นต้น มีผลทำให้อายุของ ฉนวนสั้นลง เกิดการเสียหายเร็วขึ้นและจะนำไปสู่การเกิด

- line to line, line to ground, multiphase line to ground, three-phase fault
- เกิด high voltage oscillations
- เกิดกระแสเกินทำให้ฟิวส์ป้องกันกระแสเกิน (current limiting fuses) ตัดวงจรออก

### 2.5.3 ผลเนื่องมาจากแรงทางกล

แรงทางกลเกิดจากเหตุการณ์ต่อไปนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. การเคลื่อนตัวของขดลวด

จากกระแสที่ไหลในขดลวด ที่สเตเตอร์จะสร้างแรงบนขดลวดโดยเป็นส่วนร่วมกับกระแสกำลังสอง ( $F \propto I^2$ ) แรงที่เกิดขึ้นสูงสุดระหว่างการสลับจะเหตุให้ขดลวดเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น การเคลื่อนที่นี้จะเป็นผลให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงที่ฉนวนของขดลวด และเป็นเหตุให้ตัวนำทองแดงเสียหาย

### 2. โรเตอร์ไปตี กระทบ ถูก สเตเตอร์ (rotor strike) มีหลายเหตุผลคือ

- ลูกปืนเสีย
- เฟลาบิดเบี้ยวไป
- rotor to stator misalignment

การที่โรเตอร์ไปกระทบถูกสเตเตอร์แรงที่เกิดขึ้นทำให้ ฉนวนที่ขดลวดถูกเจาะเป็นรู ผลที่ตามมาคือเกิดการรั่วลงดิน บางครั้งก็ขึ้นอยู่กับ ความถี่ของการสลับ และจำนวนครั้งของการกระทบกันระหว่างโรเตอร์กับ สเตเตอร์ถ้ามีการกระทบกันระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ขณะที่มอเตอร์ทำงานอยู่ ที่ความเร็วเต็มที ผลก็คือทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่จุดสัมผัสกันนั้น และจะทำให้อายุการใช้งานของขดลวดที่สเตเตอร์เสื่อมเร็วกว่ากำหนดด้วย

### 3. สาเหตุอื่นๆ

ทำให้ขดลวดเกิดความเสียหายมีดังนี้คือ

- ความสมดุลของน้ำหนักโรเตอร์ และพัดลม เป็นผลให้หลวมและการไปตีถูกสเตเตอร์
- นอตและเกลียวหลวม ไปกระทบสเตเตอร์
- สิ่งแปลกปลอมเข้ามอเตอร์ โดยผ่านระบบระบายอากาศ และไปกระทบสเตเตอร์
- การที่โรเตอร์ไม่ปกติเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนที่สเตเตอร์และพังได้

### 2.5.4 ผดเนื่องมาจากสิ่งแฉด้อม

สิ่งสำคัญที่ผู้ใช่มอเตอร์ควรกระทำก็คือ ควรจะให้มอเตอร์แห้งและสะอาด ทั้งภายในและภายนอก และควรจะมีเวลาในการดูแลมอเตอร์ด้วย

ปัญหาหนึ่งที่มีการกล่าวถึงก็คือ การจับของไอน้ำบนขดลวดสเตเตอร์ มันจะทำให้เกิดการลัดลงดินในสล็อตของขดลวดสเตเตอร์ ขั้นตอนพื้นฐานในการป้องกันคือ ทำให้ขดลวดแห้งโดยใช้ช่องระบายความร้อน ในขณะที่ไม่ได้ใช้งาน

## 2.6 ทฤษฎีการรวมแรงดัน (Line – Neutral Voltage Summation)

ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการดังกล่าวนี้ อาศัยการเปลี่ยนแปลง หรือการไม่สมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance,  $Z$ ) ที่เกิดขึ้นจาก บนขดลวดสเตเตอร์เกิดการลัดรอบเฟสใดเฟสหนึ่งก็ตามของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่ง โดยความเป็นจริงแล้วค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลายเฟสจะมีความสมดุลกัน แต่ก็อาจจะเกิดกรณีที่ไม่สมดุลได้ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ภายนอกที่นำมาต่อเพิ่มเข้ากับเครื่องจักรกลไฟฟ้า เช่น เครื่องตรวจสอบสถานะสัญญาณ เครื่องวัดต่างๆ เป็นต้น แต่สาเหตุที่สำคัญมากจะมาจากอิมพีแดนซ์ของเฟส ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบมูลฐาน (Fundamental) แล้ว ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟส ( $\tilde{V}_{sum}$ ) ในรูปของเฟสเซอร์ (Phasor) จะมีความสัมพันธ์เป็น

$$\tilde{V}_{sum} = \tilde{V}_a + \tilde{V}_b + \tilde{V}_c \quad (2.1)$$

หรือ

$$\tilde{V}_{sum} = Z_a \tilde{I}_a + Z_b \tilde{I}_b + Z_c \tilde{I}_c \quad (2.2)$$

เครื่องจักรกลที่สมดุล ค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสจะเท่ากัน

$$Z_a = Z_b = Z_c \quad (2.3)$$

นอกจากนี้ในการต่อสามสาย (ลอยนิวตรอนไว้) ผลบวกกระแสเฟสจะเป็นศูนย์

$$\tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0 \quad (2.4)$$

และจากสมการที่ (2.1) – (2.4) แสดงว่าสำหรับเครื่องจักรที่สมดุล

$$\tilde{V}_a + \tilde{V}_b + \tilde{V}_c = 0 \quad (2.5)$$

และจากสมการที่ (2.1) ถ้าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์มีค่าเป็นเชิงเส้น ก็จะหมายความว่ารวมไปถึงแรงดันไฟฟ้า นับพจน์ด้วย

$$v_a(t) + v_b(t) + v_c(t) = v_{sum}(t) \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.6) สามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี ได้แก่  
กรณีที่ 1 ถ้าไม่มีฟอลต์เนื่องจากความไม่สมดุล (Unbalance fault) จะได้

$$v_{sum}(t) = 0 \quad (2.7)$$

กรณีที่ 2 ระบบสมดุล และ

$$v_{sum}(t) \neq 0 \quad (2.8)$$

นั่นหมายความว่าเกิดกรณีฟอลต์เนื่องจากขดลวดสเตเตอร์รัศรอบ  
แสดงให้เห็นความไม่สมดุลเฟสที่มีสาเหตุจาก turn fault เพื่อลดปัญหาการเกิด noise  
และอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ คือการตรวจสอบความแตกต่างในฟังก์ชันเวลาเฉลี่ยของค่าในช่วงเวลาสั้น  
ๆ ยกตัวอย่างการพิจารณาค่า rms

$$V_{sum,rms}(t, T) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (v_{sum}(t))^2 dt} \quad (2.9)$$

ที่ซึ่งคาบเวลาเฉลี่ย  $T$  นี้ผลกระทบต่อความไวในการตรวจจับโดยระดับความเรียบของ  
สัญญาณ ค่าของเวลา  $T$  สามารถเลือกให้เป็นคาบของค่ามูลฐานเพื่อให้ได้ค่าความไวสูงสุด และใน  
ทำนองเดียวกัน ในการคำนวณค่าเฉลี่ยต่อเนื่อง สามารถแปลงสมการ (9) โดยฟังก์ชัน  
exponential ดังใน

$$V_{sum,rms}(t, \tau) = \int e^{-\frac{(t-s)}{\tau}} (v_{sum}(s))^2 ds \quad (2.10)$$

ซึ่งค่าคงที่เวลาในลักษณะ exponential ( $\tau$ ) แสดงบทบาทคล้ายคลึงกับเวลา  $T$  ใน  
สมการ (2.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 การเปรียบเทียบและข้อดีของวิธีรวมแรงดัน

ข้อดีของเทคนิคนี้มีความซับซ้อนน้อยกว่า เมื่อเทียบกับวิธีตรวจจับ turn fault แบบอื่น เนื่องจากเทคนิคนี้ไม่ได้อาศัยการคำนวณอย่างแม่นยำของเฟสเซอร์กระแสและแรงดัน ไม่เพียงแต่ใช้พลังงานและเวลาในการคำนวณน้อย แต่ยังลดความผิดพลาดที่เกิดจากการขยายการคำนวณทางดิจิทัล เทคนิคนี้ต้องการเพียงแค่การปรับตั้งครั้งเดียวที่แรงดันในเฟส ไม่ต้องการช่วงการเรียนรู้เพิ่มเติม (Learning Stage) ซึ่งในหลาย ๆ เทคนิคอื่นช่วงการเรียนรู้ต้องถูกรวมเข้าไปด้วย โหลดในเครื่องจักรถือเป็นตัวแปรสำคัญ แต่เทคนิคนี้ก็มีข้อดีอยู่ตรงนี้เช่นกัน

ตามทฤษฎีโหลดจะมีผลต่อแต่ละเฟสอิมพีแดนซ์เท่ากัน ดังนั้น  $V_{sum}$  โดยปกติแล้วจะไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงในโหลดเฉลี่ยของมอเตอร์ ซึ่งสามารถดูจากวงจรธรรมดาในสถานะ steady-state ซึ่งในแต่ละเฟส ค่าอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงแบบสังเกตได้แต่จะเปลี่ยนไปเท่าๆกัน เมื่อมีโหลด จากเหตุผลนี้ ค่าเปลี่ยนแปลงใน  $V_{sum}$  ซึ่งควรจะสะท้อนให้เห็น turn fault จึงถือว่าขึ้นอยู่กับภาระจ่ายโหลดของมันด้วย ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า สำหรับเทคนิคนี้โหลดมีผลโดยตรงต่อความไว (หรือระดับสัญญาณ) แต่ไม่มีผลต่อความแม่นยำ

นอกจากจะป้องกันผลจากการเปลี่ยนแปลงโหลดแล้ว วิธีการตรวจจับ turn fault นี้ยังสามารถทำงานกับความไม่สมดุลของแรงดันแหล่งจ่ายได้ คราบใดที่ข้อสมมติฐานในสมการ (3) และ (4) เป็นจริงแล้วนั้น สมการที่ (5) ถึง (7) จะไม่ต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงการกระตุ้นที่เกิดขึ้นภายในและระหว่างเฟส ไม่ว่าจะเปลี่ยนเฉพาะโดยการเปลี่ยนแปลง ขนาด มุม ความถี่ หรือ สัญญาณรบกวนทั่วไป หรือไม่

## 2.8 พิจารณาในทางปฏิบัติจริง

เครื่องจักรตามความเป็นจริง ความสมบูรณ์แบบของเฟสสมดุล ซึ่งแสดงโดยสมการ (2) ไม่มีทางเป็นจริง ผลที่ตามมาคือ (residual) ของค่า  $V_{sum,rms}$  โดยแหล่งกำเนิดที่มาอาจเป็นได้ทั้งความไม่สมดุลของเฟสอิมพีแดนซ์จริงๆ หรือ เกิดจากอุปกรณ์จับสัญญาณ เครื่องมือเปลี่ยนแปลง แต่สาเหตุส่วนใหญ่มาจากเฟสอิมพีแดนซ์ไม่เป็นเชิงเส้น

แหล่งที่มาหลักของอิมพีแดนซ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เกิดจากการสั้นทางกลซึ่งไปเปลี่ยนโครงสร้างของช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์ - โรเตอร์ และส่งผลต่อค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance) โดยธรรมชาติทั่วไปการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์นี้จะเป็นฟังก์ชันของความถี่การสั้นท่ามกลางปัจจัยอื่น ๆ

ที่มาหลักของเฟสอิมพีแดนซ์ไม่เป็นเชิงเส้น อาจเชื่อมโยงไปถึงแกนแม่เหล็กที่สเตเตอร์ อิมตัว การอิมตัวของแกนเหล็กเป็นเหตุให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นของ magnetizing และ leakage reactance และเป็นการพิสูจน์โดยสารโมเนติกที่เกิดขึ้นทั้ง 3 เฟสของ แรงดันไลน์ - นิวตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากฮาร์โมนิกอันดับ 3 นั้น เกิดขึ้นในเวลาเดียวกับ องค์ประกอบมูลฐาน (Synchonus) มันคือ zero sequence และดังนั้นจะปรากฏใน  $V_{sum,rms}$  ด้วยขนาด 3 เท่าของค่าเฟส

เนื่องจากความถี่ของแกนเหล็กขึ้นอยู่กับกระแสเฟส และกระแสเฟสขึ้นกับโหลดทางกล ดังนั้นฮาร์โมนิกอันดับ 3 ที่เกิดขึ้นใน  $V_{sum,rms}$  ขึ้นอยู่กับโหลดทางกล (5-10) ดังนั้นไม่ว่าจะถือว่าเป็นการเพิ่มสัญญาณที่มีประโยชน์ (เพื่อใช้ระบุโหลด) หรือ ถือเป็นสัญญาณรบกวน  $V_{sum,rms}$  ที่ไม่มีประโยชน์ ฮาร์โมนิกอันดับ 3 นี้ ก็สามารถกำจัดออกจาก  $V_{sum,rms}$  ได้โดยใช้ ฟิลเตอร์ที่เหมาะสม ในความเป็นจริงการ bandpass-filtering ของ  $V_{sum,rms}$  รอบๆ ความถี่มูลฐานของเครื่องจักร จะส่งผลให้ อัตราส่วน signal-to-noise สูงสุดในกรณีที่ต้องการตรวจหา turn-fault

ดังได้กล่าวไปแล้วเรื่องความแตกต่างของเครื่องมือหรือสภาวะสัญญาณเปลี่ยนแปลง (Instrumentation differences or signal conditioning variances) ทำให้เกิดสัญญาณไม่สมดุลสามารถชดเชยได้โดยการปรับสัญญาณซึ่งเท่ากับขนาดแรงดันจากแหล่งจ่าย เพื่อให้ได้ค่าที่ต่ำที่สุดของ  $V_{sum,rms}$  วิธีชดเชยนี้สามารถทำได้ด้วยมือโดยใช้ potentiometer เพื่อลดระดับแต่ละสัญญาณอีกทางหนึ่งที่เรียกว่าคือเทคนิคการปรับตัวเอง (การปรับแต่งของ gain-control อัตโนมัติ) สามารถทำงานในแบบ analog หรือ digital โดยจะทำให้เกิดค่าเหล่านี้  $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$  ดังนี้

$$\alpha_a Z_a \tilde{I}_a + \alpha_b Z_b \tilde{I}_b + \alpha_c Z_c \tilde{I}_c = 0 \tag{2.12}$$

ไม่ว่า  $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$  จะเป็นจำนวนจริง, เชิงซ้อน และ/หรือเปลี่ยนแปลงตามเวลา ปัจจุบันได้มีการ พิสูจน์แล้วว่าควรเลือกตัวเลขที่เป็นจำนวนจริงสำหรับ  $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$  ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับการตั้งค่าอย่างแม่นยำที่ Potentiometers และ มันเป็นที่ชัดเจนที่ว่ากระบวนการปรับตั้งนี้จะกระทำไม่บ่อยครั้งนัก และทำกับมอเตอร์ที่สุขภาพดี หรือสภาพอ้างอิงที่ต้องการ

### 2.9 องค์ประกอบและการวิเคราะห์ความสูญเสียเมื่อพันขดลวดใหม่

ในส่วนขององค์ประกอบของความสูญเสียทั้ง 5 (ตาราง 2.1) ค่าความสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับสภาวะของโหลด ได้แก่ ความสูญเสียในแกนเหล็ก, ความสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านของลม ในขณะที่ความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลในตัวนำของสเตเตอร์และโรเตอร์ และ stay load loss จะเป็นความสูญเสียที่ขึ้นอยู่กับโหลด

ดังที่แสดงในตาราง ค่าความสูญเสียเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเครื่องจักรตัวนั้นได้ผ่านการพันขดลวดใหม่ (rewinding), เช่นการซ่อมแซมทางด้านอุตสาหกรรม ความสนใจส่วนใหญ่มุ่งไปที่ stator – core burning out และ winding stripping, มันแน่ชัดว่ากระบวนการพันที่ไม่เหมาะสมนั้นจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ lamination, หรือซี่ฟันระหว่างรอบได้ง่าย ซึ่งสิ่งนี้จะทำ

เอกสารให้ความสมบูรณ์ทางไฟฟ้าของแกนสเตเตอร์เลวดลง และทำให้ความสูญเสียในแกนเหล็กสูงขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกัน การปรับแต่งใด ๆ ที่เส้นลวดตัวนำ (winding conductor), พัดลม, ลูกปืน หรือจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงตัวนำสเตเตอร์ (stator conductor), และความสูญเสียจากแรงเสียดทานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ความสูญเสียที่ตัวนำโรเตอร์ถูกสันนิษฐานว่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อโครงสร้างของโรเตอร์สมบูรณ์และไม่เสียหาย

Stray load loss เป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนและยากอย่างยิ่งที่จะหาค่า อันเนื่องมาจากขนาดและต้นกำเนิดของมัน จากการศึกษาแสดงได้ว่า โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในฟันของโรเตอร์และโรเตอร์ที่พื้นผิวช่องอากาศ

### 2.9.1 องค์ประกอบของความสูญเสีย

การเปลี่ยนแปลงอย่างมากของความสูญเสีย อันเนื่องมาจากการพันขดลวดใหม่ ถูกพบที่ตัวนำสเตเตอร์

เครื่องจักร 6 ตัว ในกลุ่มแรก ได้ทำการพันใหม่โดยไม่ได้ควบคุมอะไรมากมายและไม่ได้กำหนดความต้องการที่เฉพาะเจาะจง ดังนั้นการพันจึงไม่แน่นอนและส่งผลให้ความสูญเสียที่ตัวนำสเตเตอร์เพิ่มขึ้น 10 %

สำหรับกลุ่มที่ 2 เครื่องจักร 17 ตัวถูกกำหนดวิธีการและรูปแบบการพันขดลวด รวมถึงความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (MLT) โดยลวดตัวนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น, และการพันขดลวดแน่นขึ้นกว่าเก่าจะส่งผลโดยตรงให้ค่าความสูญเสียที่ตัวนำสเตเตอร์เฉลี่ยลดลง 5.3 %

ค่าความสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงไปมากหลังจากการพันขดลวดใหม่ ถัดมาจากความสูญเสียที่ตัวนำสเตเตอร์คือ ความสูญเสียจากแรงเสียดทานและแรงต้านของลม แต่ความสูญเสียดังกล่าวไม่ได้เกิดจากการพันขดลวดใหม่โดยตรง แต่เป็นผลมากจากการประกอบลูกปืนและพัดลมกลับเข้าที่ไม่สมบูรณ์แบบเหมือนเดิม

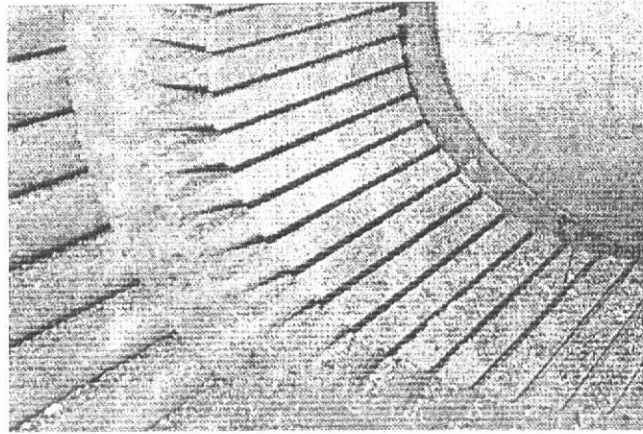
### ตารางที่ 2.1 แสดงสาเหตุและผลที่เกิดจากการพันขดลวดใหม่

องค์ประกอบของความสูญเสีย	สาเหตุ	ผลกระทบจากการพันขดลวดใหม่
1. ความสูญเสียที่ลวดตัวนำที่สเตเตอร์	ความสูญเสียจาก $I^2R$ เนื่องจากกระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำที่สเตเตอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เส้นผ่านศูนย์กลางลวดตัวนำเปลี่ยนไป</li> <li>- ความยาวเฉลี่ยต่อรอบเปลี่ยนไป</li> <li>- จำนวนรอบเปลี่ยนไป</li> <li>- รูปแบบในการพันขดลวดเปลี่ยนไป</li> <li>- ชนิดการปิดผนึกเปลี่ยนไป</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของความสูญเสีย	สาเหตุ	ผลกระทบจากการผันขดลวดใหม่
2. ความสูญเสียที่ลวดตัวนำที่โรเตอร์	ความสูญเสียจาก I <sup>2</sup> R เนื่องจากกระแสไหลผ่านแท่งตัวนำโรเตอร์ และที่วงแหวนปลายแท่งตัวนำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การทำงานที่โรเตอร์หรือสเคเตอร์</li> <li>- เกิดความเสียหายที่กรงโรเตอร์</li> <li>- การเชื่อมต่อระหว่างแท่งตัวนำและแหวนปลายแท่งตัวนำไม่ดี</li> <li>- การติดตั้งแท่งตัวนำไม่เหมาะสม</li> </ul>
3. ความสูญเสียในแกนเหล็ก	Hysteresis: พลังงานที่ใช้กระตุ้นแกนเหล็กที่สเตเตอร์ให้อยู่ในภาวะ magnetizing Eddy Current Loss: ความสูญเสียที่เกิดจากกระแสไหลวนในแกนสเตเตอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การที่แกนสเตเตอร์รับความร้อนสูงเกินไป</li> <li>- ความเสียหายที่แกนเหล็กตอนดึงขดลวดออก</li> <li>- การเป่าทรายที่แกนเหล็ก</li> </ul>
4. ความสูญเสียจากแรงต้านของลมและแรงเสียดทาน	ความสูญเสียจากแรงต้านของลม: พลังงานที่ใช้เพื่อเอาชนะความต้านทานอากาศเนื่องจากโรเตอร์และพัดลมระบายความร้อน ความสูญเสียจากแรงเสียดทาน: พลังงานที่ใช้เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่ลูกปืน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- พัดลมที่ติดตั้งผิดประเภทหรือขนาด</li> <li>- ลูกปืนที่ติดตั้งผิดประเภทหรือขนาด</li> <li>- การติดตั้งลูกปืนไม่เหมาะสม</li> <li>- การหล่อลื่นลูกปืนมากเกินไป</li> <li>- การหล่อลื่นลูกปืนน้อยเกินไป</li> </ul>
5. Stray load loss	ความสูญเสียอื่น ๆ ทั้งหมดที่ไม่รวมความสูญเสียทั้ง 4 ที่กล่าวมา	ทั้งหมดที่กล่าวมา แต่ไม่รวมปัจจัยที่มีผลกับ ความสูญเสียจากแรงต้านของลมและแรงเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แกนเหล็กที่ดี

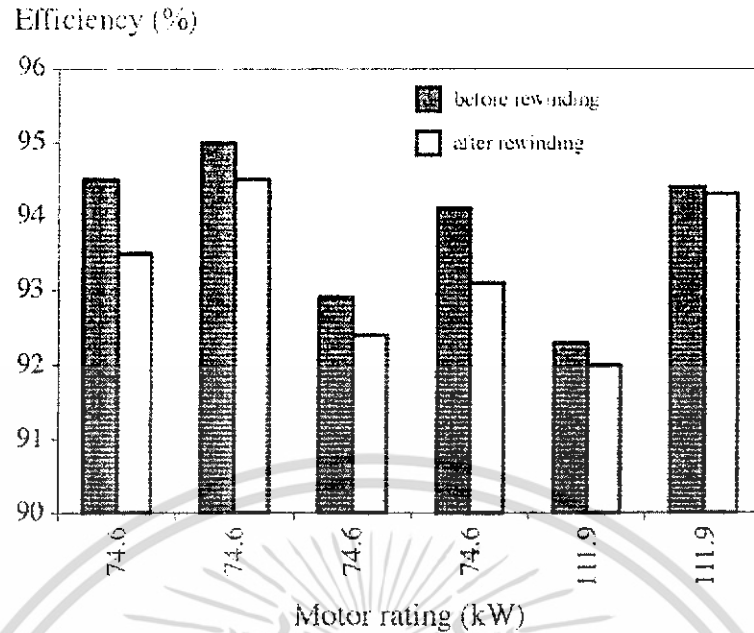


แกนเหล็กที่แผ่นเหล็กเสียหาย

**รูปที่ 2.12** การเปรียบเทียบระหว่างแกนเหล็กที่สเตเตอร์หลังจาก burnout และนำขดลวดออกไป

แม้ว่าโดยปกติแล้วในระหว่างการซ่อมจะเน้นหนักไปที่แกนสเตเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับกระบวนการ stator – core burnout คำแนะนำจาก EASA ใช้อุณหภูมิเผา burnout ที่ 343 องศาเซลเซียส และไม่ให้ความร้อนที่แกนสเตเตอร์เกิน 360 – 400 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเหล่านี้ ถูกพิสูจน์แล้วว่าสูงเพียงพอที่จะ burnout ขดลวดที่พันอยู่ stator lamination จะเป็นส่วนที่อาจได้รับความเสียหายเวลาถอดขดลวดออก ดังนั้นจึงต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายดังในภาพ โดยเฉพาะการ burnout ที่อุณหภูมิต่ำ เพราะฉะนั้นเพื่อให้การถอดขดลวดออกได้ง่าย และแกนเหล็กสะอาด ลดความเสียหายที่อาจเกิดกับแกนเหล็ก เราจึงเพิ่มอุณหภูมิ burnout ไปที่ 360 – 370 องศาเซลเซียส สำหรับค่า stray load loss และค่าความสูญเสียจากกระแสที่โรเตอร์แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง และเกือบจะมีระดับสัญญาณเดียวกับสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตามมอเตอร์ 4 ตัว จากการทดลองพันขดลวดใหม่ ได้แสดงให้เห็นค่า stray load loss ลดลงอย่างชัดเจนเป็นผลเนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนการพันขดลวดจากการพันแบบ Concentric ไปเป็นแบบ Lap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.13** แสดงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของมอเตอร์พันใหม่กลุ่มที่ควบคุมน้อย

การเปลี่ยนรูปแบบการพันขดลวดจาก Concentric ไปเป็น Lap จะพัฒนารูปคลื่น mmf ที่สเตเตอร์ ซึ่งจะทำให้ลดค่า leakage reactance ที่โรเตอร์ และค่าความต้านทานฮาร์โมนิกส์ ซึ่งนำไปสู่การลดลงของ harmonic drag torque loss

### 2.9.2 การวิเคราะห์ความสูญเสีย

State 1: มอเตอร์พันใหม่โดยไม่มีการควบคุมหรือการพันขดลวดใหม่

**ตารางที่ 2.2** ผลการทดสอบที่ State 1

รายละเอียดมอเตอร์	ประสิทธิภาพก่อนการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพหลังการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไป*	ลักษณะการพัน (ก่อน)	ลักษณะการพัน (หลัง)	หมายเหตุ
1A 100 แรงม้า, 60 Hz, 4 ขั้ว	94.1%	93.1%	-1.0%	3TC-1L	3TC-1L	ถูกป็น
			-0.8%			-
			-0.6%			ถูกป็นทั้งคู่ สะอาด
			-0.5%			ถูกป็นถูก เปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดมอเตอร์	ประสิทธิภาพก่อนการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพหลังการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไป*	ลักษณะการพัน (ก่อน)	ลักษณะการพัน (หลัง)	หมายเหตุ
2B 100 แรงม้า, 60 Hz, 4 ขั้ว	92.9%	92.4%	-0.5%	L-2L	L-2L	เครื่องจักรแรงดัน 575 โวลต์
3C 100 แรงม้า, 60 Hz, 2 ขั้ว	94.5%	93.5%	-1.0%	GC-2L	L-2L	ลูกปืน
			-0.5%			-
			-0.5%			-
4D 100 แรงม้า, 60 Hz, 2 ขั้ว	95.0%	94.5%	-0.5%	L-2L	L-2L	-
5E 150 แรงม้า, 60 Hz, 2 ขั้ว	92.3%	92.0%	-0.3%	L-2L	L-2L	-
6F 150 แรงม้า, 60 Hz, 2 ขั้ว	93.7%	93.3%	-0.4%	L-2L	L-2L	-

State 2: มอเตอร์มีการพันขดลวดใหม่โดยควบคุมกระบวนการพัน

### ตารางที่ 2.3 ผลการทดสอบที่ State 2

รายละเอียดมอเตอร์	ประสิทธิภาพก่อนการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพหลังการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไป*	ลักษณะการพัน (ก่อน)	ลักษณะการพัน (หลัง)	หมายเหตุ
6F 150 แรงม้า, 60 Hz, 2 ขั้ว	94.4%	94.3%	-0.1%	L-2L	L-2L	-
9E 150 แรงม้า, 60 Hz, 2 ขั้ว	90.1%	89.9%	-0.2%	L-2L	L-2L	ไม่ทำ ความ สะอาด แกนหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดมอเตอร์	ประสิทธิภาพก่อนการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพหลังการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไป*	ลักษณะการพัน (ก่อน)	ลักษณะการพัน (หลัง)	หมายเหตุ
10D 125 แรงม้า, 60 Hz, 4 ขั้ว	95.4%	95.2%	-0.2%	L-2L	L-2L	-
11F 200 แรงม้า, 60 Hz, 2 ขั้ว	96.4%	96.3%	-0.1%	L-2L	L-2L	-
14H 55 kW, 50 Hz, 4 ขั้ว	89.9%	89.2%	-0.7%	2TC-1L	L-2L	-
16H 150 kW, 50 Hz, 4 ขั้ว	95.4%	95.6%	+0.2%	GC-2L	L-2L	-
18G 55 kW, 50 Hz, 4 ขั้ว	94.2%	94.2%	0.0%	3TC-1L	3TC-1L	-
19H 132 kW, 50 Hz, 2 ขั้ว	93.0%	93.0%	0.0%	2TC-2L	L-2L	-
20H 45 kW, 50 Hz, 2 ขั้ว	93.9%	93.9%	0.0%	3TC-1L	3TC-1L	-
21J 75 kW, 50 Hz, 2 ขั้ว	93.7%	93.9%	+0.2%	GC-2L	L-2L	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

State 3: การผันขดลวดซ้ำหลายๆ ครั้ง โดยควบคุมสถานะต่าง ๆ

ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบที่ State 3

รายละเอียดมอเตอร์	ประสิทธิภาพก่อนการผันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพหลังการผันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไป*	ลักษณะการผัน (ก่อน)	ลักษณะการผัน (หลัง)	หมายเหตุ
8C 200 แรงม้า, 60 Hz, 4 ขั้ว	95.7%	95.1%	-0.6%	GC-2L	GC-1L	พันใหม่ครั้งที่ 1
		95.6%	-0.1%		L-2L	พันใหม่ครั้งที่ 2
12F 150 แรงม้า, 60 Hz, 2 ขั้ว	95.9%	95.9%	0.0%	L-2L	L-2L	พันใหม่ครั้งที่ 1
		95.9%	0.0%		L-2L	พันใหม่ครั้งที่ 2
		95.8%	-0.1%		L-2L	พันใหม่ครั้งที่ 3
13G 110 kW, 50 Hz, 4 ขั้ว	94.8%	94.6%	-0.2%	3TC-1L	3TC-1L	พันใหม่ครั้งที่ 1
		94.6%	-0.2%		GC-1L	พันใหม่ครั้งที่ 2
15J 75kW, 50 Hz, 4 ขั้ว	93.0%	93.6%	+0.6%	GC-2L	L-2L	พันใหม่ครั้งที่ 1
		93.6%	+0.6%		L-2L	พันใหม่ครั้งที่ 2
		93.7%	+0.7%		L-2L	พันใหม่ครั้งที่ 3
17H, 5.5 kW, 50 Hz, 4 ขั้ว	86.7%	86.9%	+0.2%	2TC-1L	L-2L	5 burnout ที่ 360° C พันใหม่ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22H, 5.5 kW, 50 Hz, 4 ขั้ว	83.2%	84.0%	+0.8%	2TC-1L	L-2L	5 burnout ที่ 360° C พันใหม่ครั้งที่ 1
----------------------------	-------	-------	-------	--------	------	--

มอเตอร์แรงดันสูง

### ตารางที่ 2.5 ผลการทดสอบมอเตอร์แรงดันสูง

รายละเอียดมอเตอร์	ประสิทธิภาพก่อนการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพหลังการพันขดลวดใหม่	ประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไป*	ลักษณะการพัน (ก่อน)	ลักษณะการพัน (หลัง)	หมายเหตุ
23K 225 kW, 50 Hz, 4 ขั้ว, 3300 โวลต์	95.7	95.5	-0.2	L-2L	L-2L	-

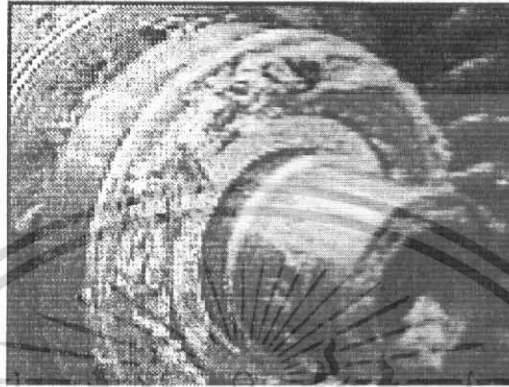
\*การเปลี่ยนแปลงแต่ละเปอร์เซ็นต์คือความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพ "ก่อนการพัน"

- 1) การแปรผันประสิทธิภาพใน state 1 อยู่ระหว่าง -0.3% - -0.5%
- 2) การแปรผันประสิทธิภาพใน state 2 อยู่ระหว่าง -0.7% - +0.2%
- 3) การแปรผันประสิทธิภาพใน state 3 อยู่ระหว่าง -0.6% - +0.8%
- 4) การสูญเสียเกิดจากสิ่งต่าง ๆ ดังนี้
  - การสูญเสียในขดลวดทองแดง เนื่องมาจากการขาดการควบคุมความยาวที่เท่ากันต่อรอบ
  - Stray loss เนื่องมาจากการถอดชิ้นส่วนอาจเกิดการเสียหายแต่ขึ้นอยู่กับผู้ที่ปฏิบัติ
  - การสูญเสียในแกนเหล็กเนื่องมาจากกระบวนการ burnout
  - การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานเนื่องมาจากการอัดน้ำมันหล่อลื่นที่ลู่ก้น
- 5) ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่ได้มาใน state 2 และ state 3 เมื่อการควบคุมกระบวนการทำได้สำเร็จ
- 6) การถอดมอเตอร์ถ้า burnout ที่อุณหภูมิค่าเกินไปบางที่จะทำให้ค่า stray loss เพิ่มขึ้น
- 7) ปริมาณทองแดงที่ใช้ในการพัน รูปร่างและลักษณะการพันขดลวดจะต้องถูกควบคุมเพื่อให้การสูญเสีย  $I_2R$  มีค่าน้อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ความยาวที่เท่ากันของขดลวดในแต่ละรอบ (MLT)

เป็นการยากที่จะควบคุมความยาวให้เท่ากันในแต่ละรอบ ลวดที่ยาวไม่เท่ากันจะทำให้เกิด stator  $I_2R$  loss ถ้าลดความผิดพลาดได้ก็จะลด stator  $I_2R$  loss ควรจะทำให้ขดลวดที่ขยายออกเกิดน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

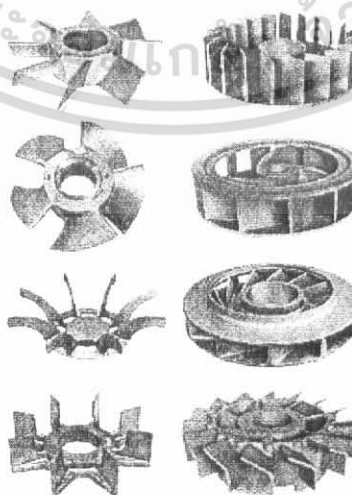


รูปที่ 2.14 ลูกปืนที่อยู่ติดกับเฟลาของมอเตอร์

### สารที่ใช้หล่อลื่นในลูกปืน

สารหล่อลื่นที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียจากแรงเสียดทานมากขึ้น และอายุการใช้งานของลูกปืนจะสั้นลง ส่วนผสมของสารหล่อลื่นที่ไม่เข้ากัน การหล่อลื่นที่ไม่ดีจะไปเพิ่มความสูญเสียที่มาจากแรงเสียดทาน ควรใช้ลูกปืนเฉพาะของมัน (ไม่เปิดออกหรือปรับเปลี่ยน) หรือถ้าการเปิดลูกปืนออกต้องใช้คู่มือที่นำมาและต้องแน่ใจว่าภายในลูกปืนมีระยะปลอดภัยเท่าลูกปืนอันเดิม การลดระยะปลอดภัยจะทำให้ความสูญเสียจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น

FIGURE 6  
COOLING FAN DESIGNS



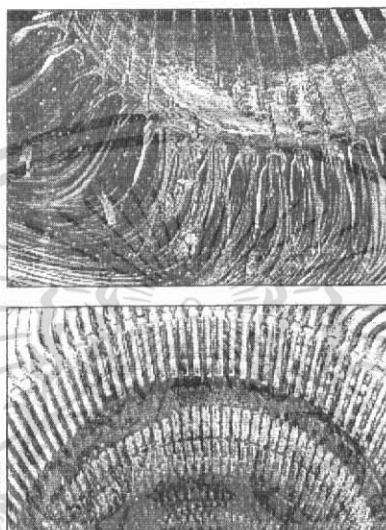
รูปที่ 2.15 แสดงใบพัดในลักษณะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบพัด

การแทนที่ใบพัดอันใหม่ด้วยรูปร่างที่แตกต่างจากอันเก่าทำให้ความสูญเสียเพิ่มขึ้น อุณหภูมิสูงขึ้น และเกิด  $I_2R$  loss (ดูรูปที่ 6) การเปลี่ยนใบพัดควรให้เหมือนอันเก่า ที่ผู้ออกแบบได้ออกแบบไว้

FIGURE 7  
TWO EXAMPLES OF CATASTROPHIC  
WINDING DAMAGE



รูปที่ 2.16 แผ่นตัวนำที่สเตเตอร์เกิดการเสียหาย

### การเสียหายอย่างรุนแรง

บางที่จะไม่สามารถซ่อมแซมมอเตอร์ได้เลยเนื่องจากการเสียหายที่หนักมาก (ดูรูปที่ 2.16) มันทำให้ประสิทธิภาพลดลง บางทีก็ไม่จำเป็นจะต้องซ่อม เนื่องมาจากราคาที่เอาไปซ่อมสูงกว่าราคามอเตอร์อันใหม่ ที่บางที่ซ่อมแล้วประสิทธิภาพก็เทียบอันใหม่ไม่ได้

### ประสิทธิภาพ

เพื่อเป็นการพิจารณาและตรวจสอบกระบวนการพันขดลวดใหม่ มอเตอร์ทั้งหมดนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม 1) กลุ่มควบคุมน้อยและ 2) กลุ่มควบคุมเข้มงวด

ผลจากมอเตอร์ 6 ตัวของกลุ่มควบคุมน้อย ได้แสดงดังรูปกราฟมอเตอร์ทั้ง 6 ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยลดลง 0.6 % และที่มากที่สุดคือลดลง 1 % ทั้งนี้เป็นผลมาจาก ความสูญเสียที่ตัวนำสเตเตอร์เพิ่มขึ้น จากการปรับเปลี่ยนรูปแบบการพันขดลวด และความยาวเฉลี่ยต่อรอบเมื่อพันใหม่ สำหรับกลุ่มที่เหลือที่ถูกควบคุมการพันตามวิธีการอย่างเข้มงวด จะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเพียงเล็กน้อย ค่าเฉลี่ยลดลงน้อยกว่า 0.1 % โดยมี 3 ตัว ค่าประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลง และอีก 8 ตัว ประสิทธิภาพลดลงอย่างมากไม่เกิน 0.7 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามมีมอเตอร์ 6 ตัว ที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากการพันใหม่ ทั้ง 6 ตัวนี้เป็นมอเตอร์ 50 Hz และถ้าตรวจสอบที่องค์ประกอบของความสูญเสียแล้วจะพบว่า ที่ประสิทธิภาพดีขึ้นนั้นเนื่องมาจาก ค่าความสูญเสียที่ตัวนำสเตเตอร์ลดลง จากการพัฒนารูปแบบการพันขดลวด และหรือ ลดอุณหภูมิปฏิบัติการ และอีกอย่างโดยการลดลงของความสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทาน โดยการปรับปรุงการหล่อลื่นลูกปืน

### การ Burnout และพันซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

มอเตอร์ 6 ตัว (A-F) ได้ถูก Burnout และพันขดลวดใหม่ซ้ำ ๆ ผลที่ได้ สรุปดังตาราง

ตารางที่ 2.6 แสดงผลจากการ burnout และพันใหม่ ซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

TABLE III  
EFFECTS OF MULTIPLE BURNOUTS AND REWINDS

		Stator I <sup>2</sup> R	Rotor I <sup>2</sup> R	Core loss	Friction and windage	Stray load	Efficiency	Winding configuration
Motor A	new	411.2	212.9	131.5	22.5	72.8	86.7	
	after rewind	365.6	177.9	153.5	69.2	53.7	86.9	
Motor B	new	578.1	229.1	196.6	40.6	56.3	83.2	
	after rewind	557.8	194.5	214	42.7	40.3	83.4	
Motor C	new	852	752.4	705.4	1161.4	440.6	95	lap
	1st rewind	930.7	774.7	752	1137.4	719	94.5	lap
	2nd rewind	895.1	745	686.2	1159.9	562.2	94.9	lap
	3rd rewind	894.9	744.9	693	1140.7	596.2	94.8	lap
Motor D	new	1805.3	1204.2	1093.7	319.7	1280.7	93	concentric
	1st rewind	1546	1102.9	1078.3	272.4	1117.3	93.6	lap
	2nd rewind	1523.1	1098	1078.7	309.3	1138.6	93.6	lap
	3rd rewind	1489.3	1059.7	1131.9	297.6	1094.6	93.7	lap
Motor E	new	1336.8	795.7	1123	1394.8	123.4	95.9	lap
	1st rewind	1280.2	852.8	1108.8	1296.7	282.1	95.9	lap
	2nd rewind	1243.1	830.9	1050	1307.2	380.1	95.9	lap
	3rd rewind	1295.6	817.2	1093.6	1427.8	216.4	95.8	lap
Motor F	new	1922.6	1129.1	1459.6	448.1	1490	95.8	concentric
	1st rewind	1817.9	1216.7	1617.2	633.3	2337.2	95.1	concentric
	2nd rewind	1772.1	1121	1618.8	671.4	1621.3	95.6	lap

มอเตอร์ A และ B ได้ถูก Burnout 5 ครั้ง ในเตา Burnout แต่นำมาพันขดลวดใหม่เพียงครั้งเดียว สำหรับมอเตอร์ A ผลที่ได้คือ ค่าความสูญเสียจากตัวนำสเตเตอร์, ตัวนำโรเตอร์ และ stray loss ลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ไปเพิ่มที่ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก และค่าความสูญเสียจากแรงเสียดทาน ซึ่งเกิดจากความไม่พอดีของสารหล่อลื่นและความหนาแน่นของลูกปืน สำหรับมอเตอร์ B มีการลดลงเล็กน้อยของ ความสูญเสียที่แกนเหล็ก และ ความสูญเสียจากแรงเสียดทาน

มอเตอร์ C,D และ E ได้ถูก Burnout และพันขดลวดใหม่ 3 รอบ โดยมอเตอร์แต่ละตัวได้ถูกประกอบกลับโดยสมบูรณ์ และทดสอบทุก ๆ รอบการพัน มอเตอร์ F ถูกพันขดลวดใหม่ 2 ครั้ง เพื่อแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการพันขดลวด

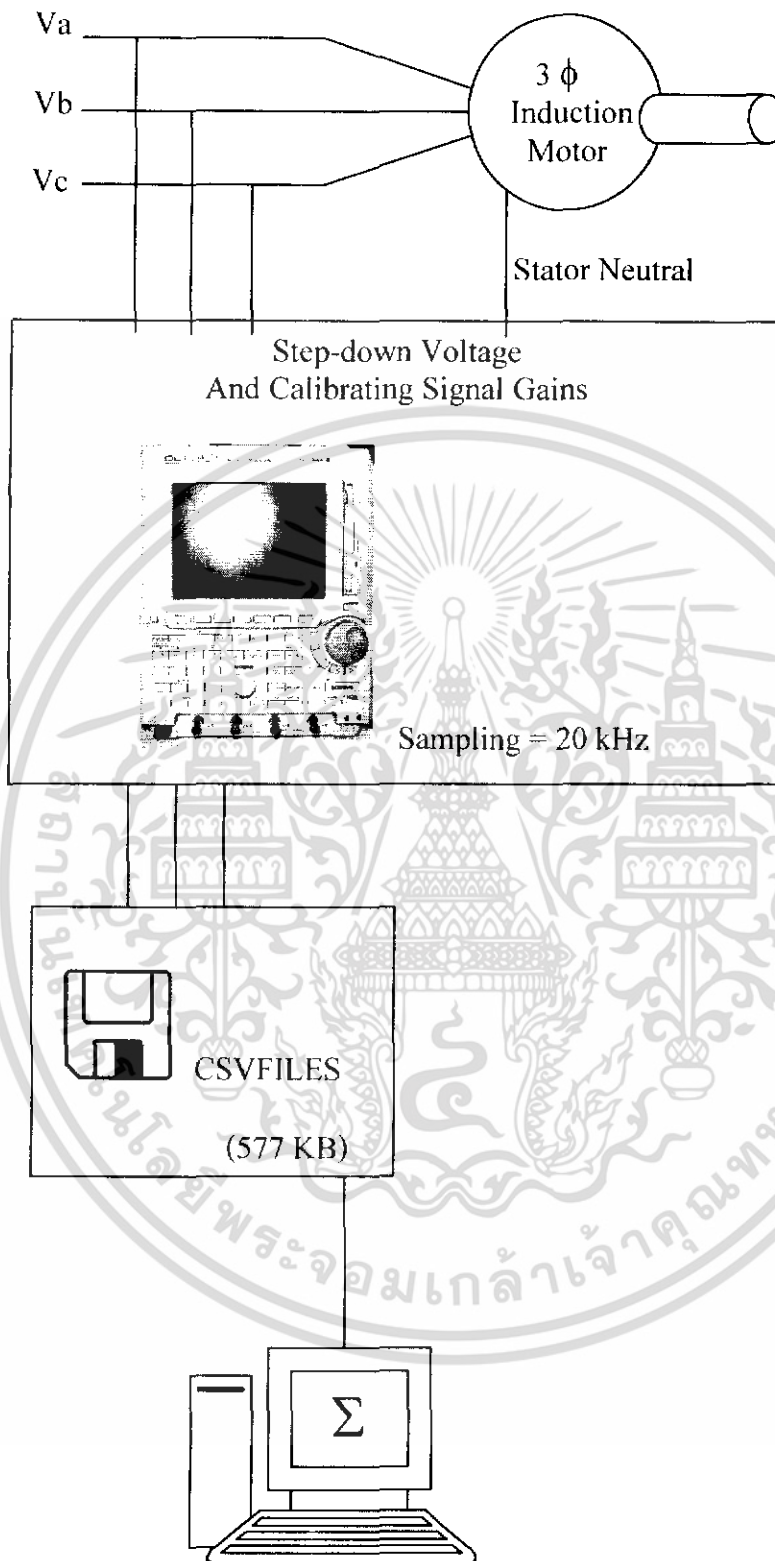
จะสังเกตได้ว่า การพันขดลวดใหม่หลาย ๆ ครั้งนั้น ประสิทธิภาพลดลงน้อยกว่า 0.2 % การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการพันขดลวด จะพบว่าประสิทธิภาพจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -0.5 % - +0.7 % ในกรณีดังกล่าวมอเตอร์ A,B และ D มีประสิทธิภาพดีขึ้น

มันเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบการพันขดลวด และเพิ่มทองแดง ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการพันขดลวดจาก Concentric ไปเป็นแบบ Lap หรือจากแบบชั้นเดียวไปเป็นแบบ 2 ชั้น

จากการศึกษาการพันขดลวดใหม่หลาย ๆ ครั้ง จึงสามารถสรุปได้ว่าการ bumout และพันขดลวดใหม่หลาย ๆ ครั้ง ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพลดลงไปอย่างเห็นได้ชัด ( น้อยกว่า 0.7 % ) . หรือในบางกรณี ประสิทธิภาพสามารถเพิ่มขึ้นได้ ( เพิ่มขึ้น 0.7 % )

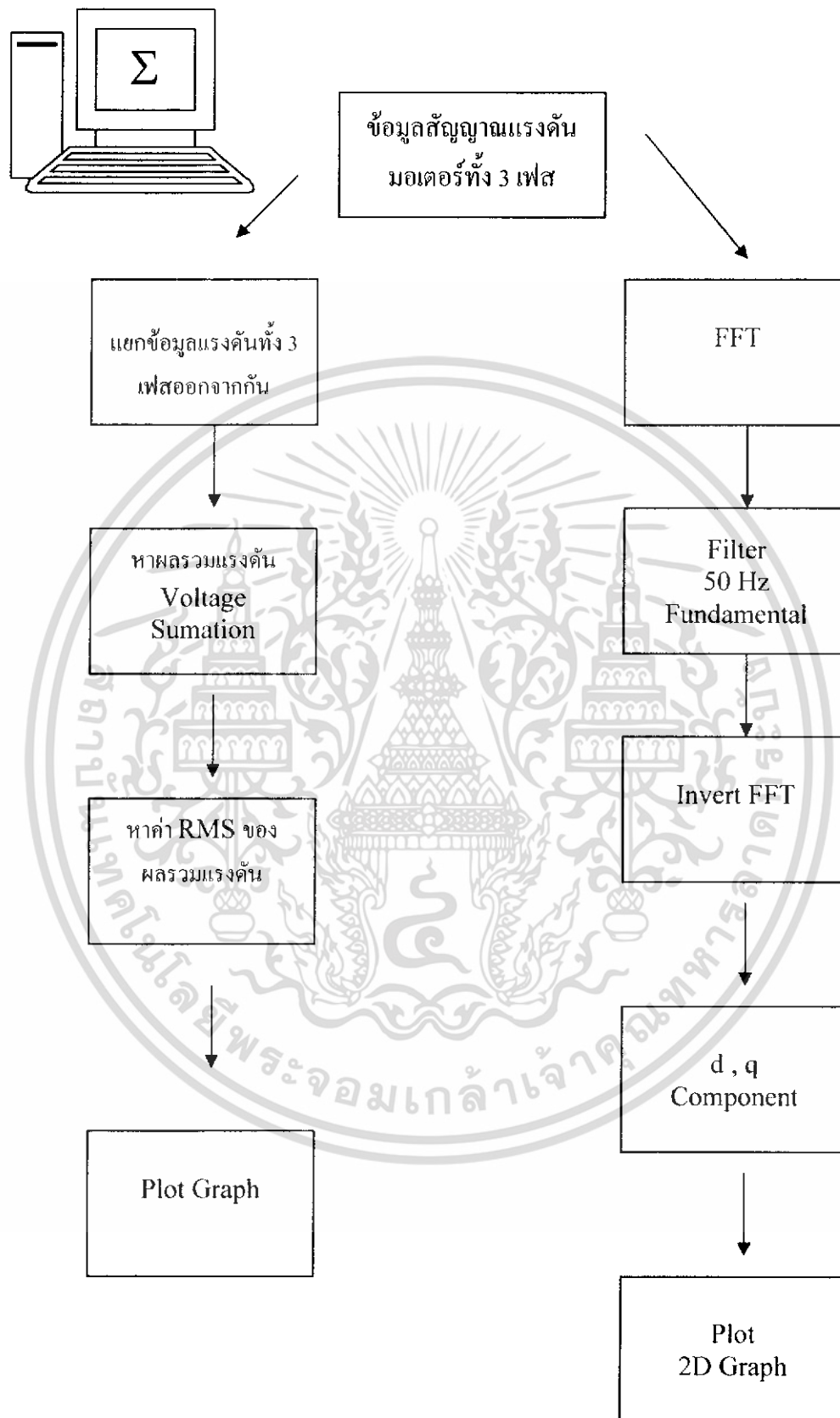
โดยทั่วไปแล้ว การพันขดลวดซ้ำ ๆ เชื่อว่าจะทำให้เกิดความเสียหายสะสมแก่เครื่องจักร แต่จากการทดลองนี้ไม่พบสิ่งดังกล่าว トラบใดที่การพันขดลวดใหม่ทุกครั้งนั้นทำตามแบบแผนปฏิบัติอย่างเคร่งครัด





**รูปที่ 2.17** Basic block diagram of turn-fault analysis method

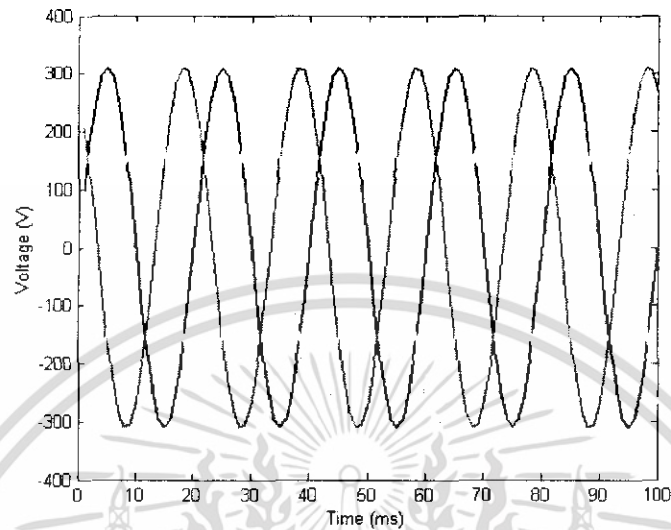
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.18** Basic block diagram of Calculation

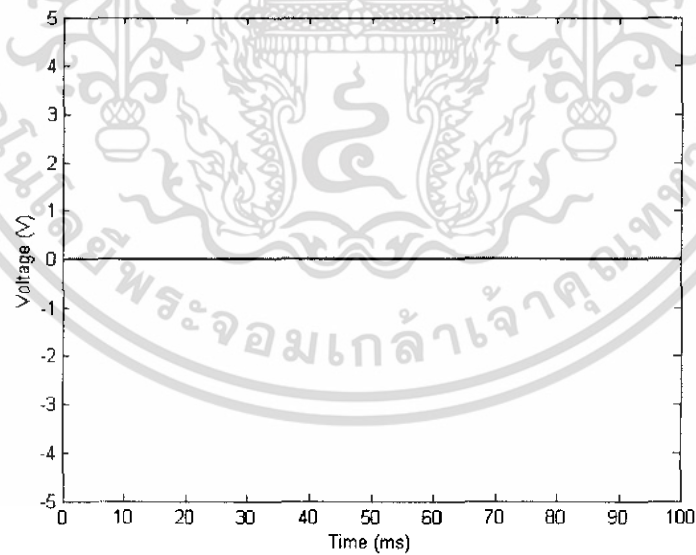
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย MathLab  
กรณีแรงดันสมมูลทั้ง 3 เฟส



รูปที่ 2.19 แรงดัน สามเฟส แบบสมมูล

$$V_{sum} = V_a + V_b + V_c$$



รูปที่ 2.20 แรงดันสามเฟสแบบสมมูลเมื่อทำการรวมกันแล้ว

```
>> vrms = vsum.^2;
vrms = sum(vrms)/200;
```

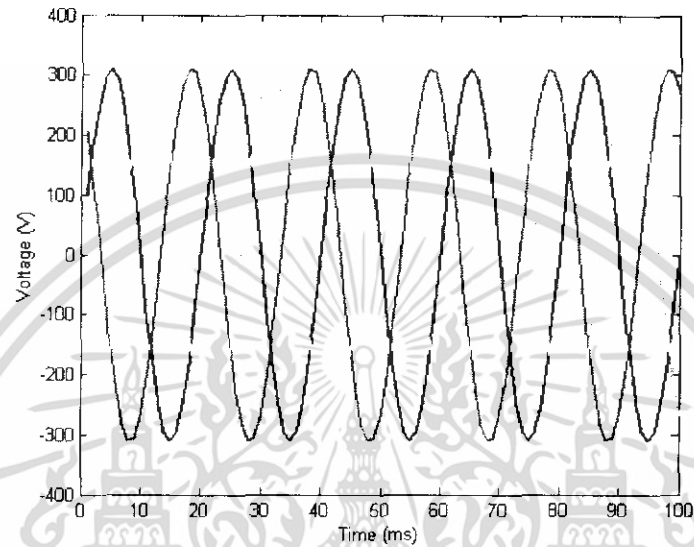
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% สุ่มข้อมูล 200 ข้อมูล ใน 1 คาบสัญญาณ

$$vrms = \text{sqrt}(vrms)$$

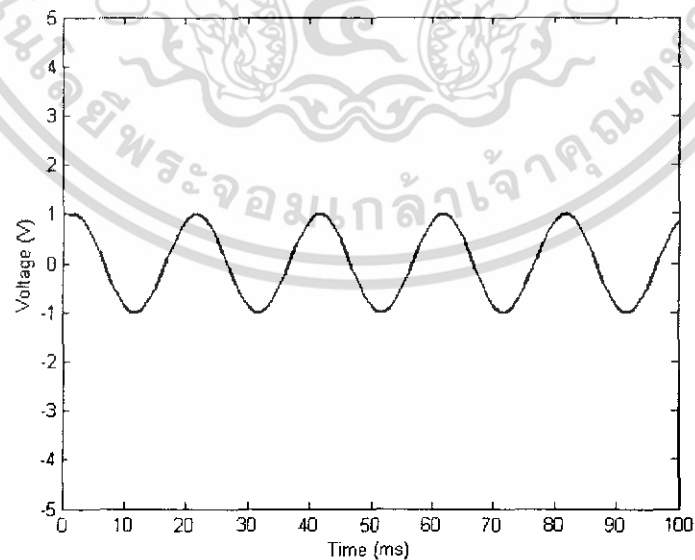
$$V_{\text{sum}}(\text{rms}) = 1.6063\text{e-}013$$

กรณีแรงดันสูงสุดเฟส a ( $V_a$  peak) ลดลงเหลือ 310 v



**รูปที่ 2.21** แรงดัน สามเฟส แบบไม่สมดุล (แรงดันสูงสุดเฟส a ( $V_a$  peak) ลดลงเหลือ 310 v)

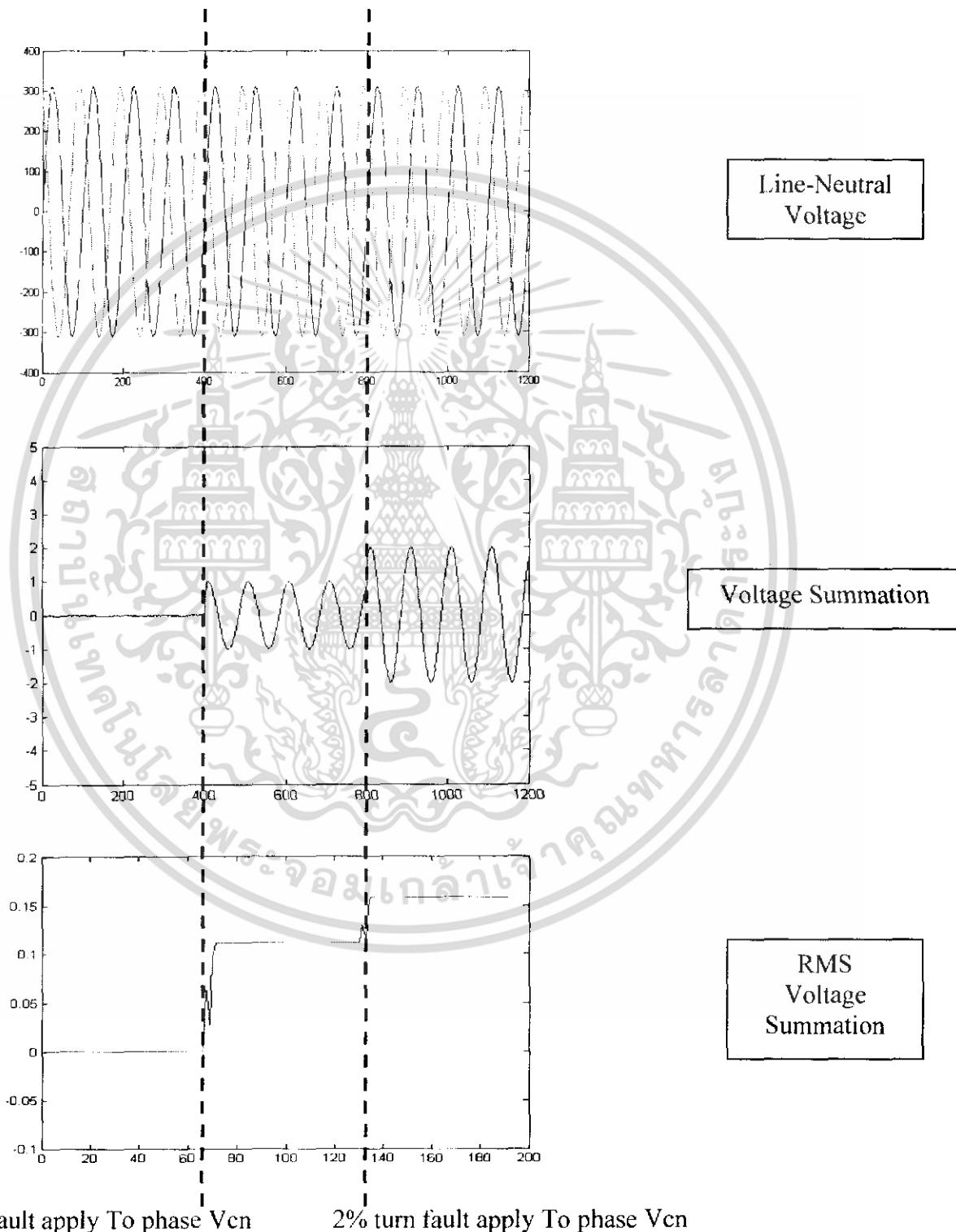
$$V_{\text{sum}} = V_a + V_b + V_c$$



**รูปที่ 2.22** แรงดัน สามเฟส แบบไม่สมดุลเมื่อทำการรวมกันแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
>> vrms=vsum.^2;
vrms=sum(vrms)/200;
vrms=sqrt(vrms)
Vsum(rms) = 0.7071 V
```



**รูปที่ 2.23** ตัวอย่างการจำลองการลัดวงจรของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

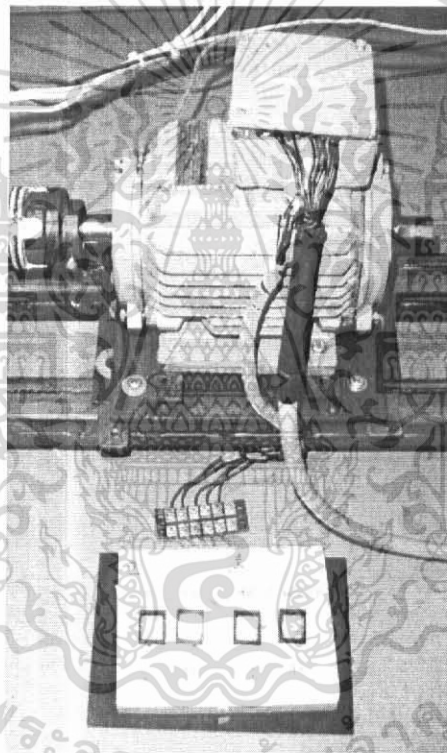
### บทที่ 3

## วิธีเก็บค่าแรงคั้น ไลน์ – นิวตรอน ของมอเตอร์ และโปรแกรมการวิเคราะห์ข้อมูล

### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้วแม่เหล็ก กำลัง 2 แรงม้า (1.5 kW)

ปรับแต่งโดยการลัดรอบขดลวดที่สเตเตอร์ 1 เฟส จำนวนที่ลัดรอบคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบทั้งหมด และต่อกับสวิตช์ควบคุม 1% , 2% , 3% , 4%



รูปที่ 3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิด 4 Poles

### ตารางที่ 3.1 Nameplate ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิด 4 Poles

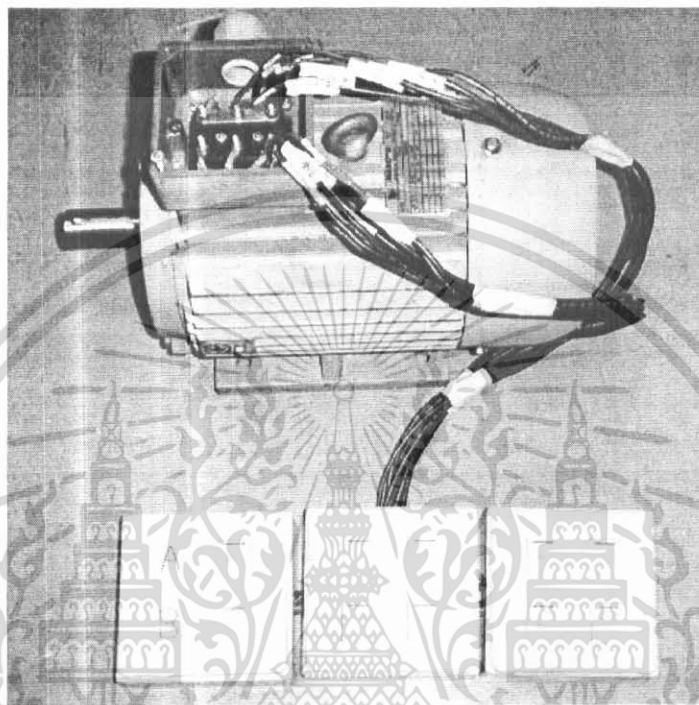
Type MQ2A - 9OL - 4		ISO9001 IEC 34 -1	
220/380 V	2 HP	1.5 kW	
6.4/3.7 A	CONN. $\Delta$ / Y	INS. F	
50 Hz	1390 r/min	IP 55	kg 25
DE 6205	NDE 6205	NO: 05011102	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 6 ขั้วแม่เหล็ก กำลัง 2 แรงม้า ( 1.5 kW )

ปรับแต่งโดยการลัดรอบขดลวดที่สเตเตอร์ 2 เฟส ( A และ B ) จำนวนที่ลัดรอบคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนรอบทั้งหมด และต่อกับสวิตช์ควบคุม 1% , 2% , 3% , 4% , 5%



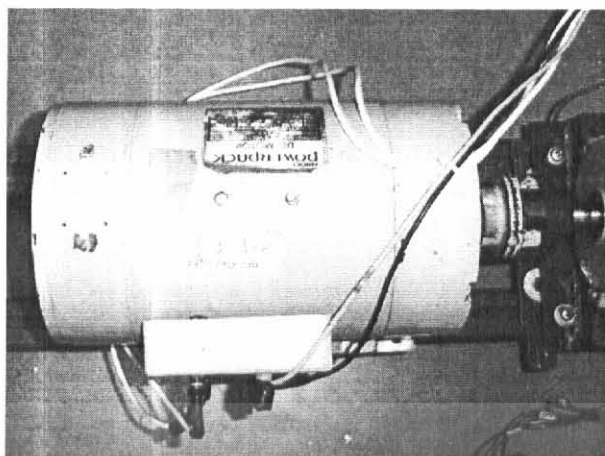
รูปที่ 3.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิด 6 Poles

ตารางที่ 3.2 Nameplate ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสชนิด 6 Poles

MODEL 100L - 6 B3		POLE 6		PHASE 3	
NO. 11818			BEARING 6206ZZC3/6206ZZC3		
INS CL F		IP 55	S1	COS $\phi$ 0.74	33 kg
V	Hz	Hp	kW	Rpm	A
220 $\Delta$	50	2	1.5	940	6.91
380 Y	50	2	1.5	940	4.0
240 $\Delta$	60	2	1.5	1125	6.33
415 Y	60	2	1.5	1125	3.66

### 3. DC Generator ขนาด 1.5 kW

เอกสารนี้เป็นทำหน้าที่เป็นโหนดให้กับมอเตอร์เพื่อทดสอบการลัดรอบขณะมีภาระใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 3.3 Nameplate ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

OUTPUT 1.5 kW	VOLTS 130 V
AMPS 15 A	R.P.M. 1800
FLD.VOLTS 180 V	
DUTY CONT	WOUND SHUNT
TYPE KC-150	NO 5680993

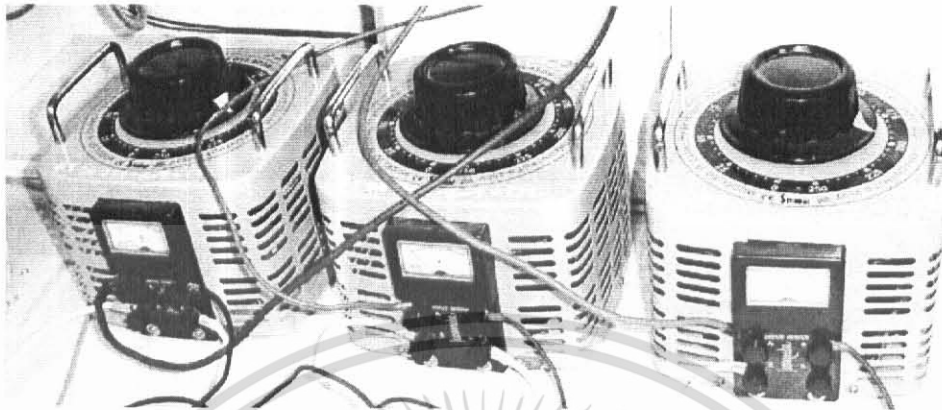
4. หลอดไส้ 100 วัตต์ ทำหน้าที่เป็นภาระทางไฟฟ้าให้กับ DC Generator โดยมีสวิตช์ ควบคุม หลอดไฟให้เปิดหลอดที่ 40% และ 60% โดยคำนวณจากพิกัดกระแสของมอเตอร์



รูปที่ 3.4 แผงหลอด หลอดไส้ 100 วัตต์

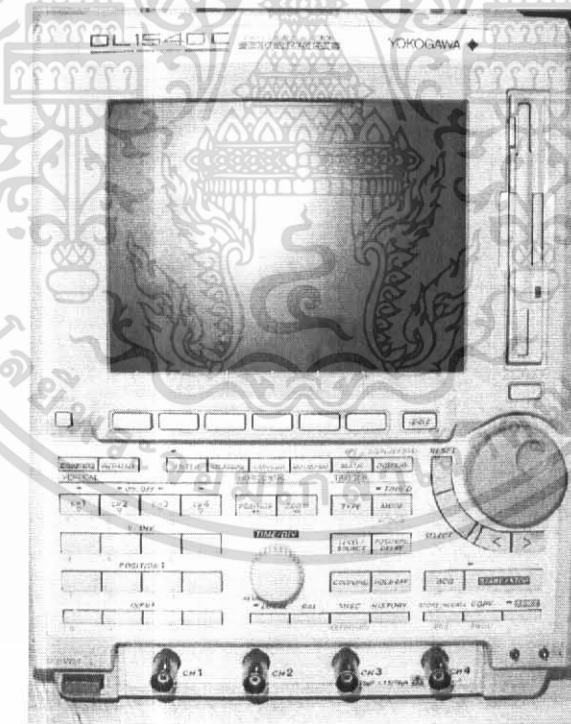
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Voltage Regulator ขนาด 4 kVA 16 Amps 0-250 V ทำหน้าที่ปรับแรงดันของระบบ ก่อนจ่ายเข้ามอเตอร์ เพื่อทดสอบการลัดรอบใน กรณีระบบสมดุล และ ไม่สมดุล



รูปที่ 3.5 Auto Transformer

6. Digital Oscilloscope เพื่อใช้เก็บค่าแรงดันของมอเตอร์ จำเป็นต้องใช้ Oscilloscope ที่มี 3 Channel ขึ้นไปเพื่อเก็บแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส



รูปที่ 3.6 Digital Oscilloscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของอุปกรณ์ Digital Oscilloscope

#### Main Specifications for DL1540C/DL1540CL

		DL1540CL	DL1540C
<b>Basic performance</b>	Number of channels	4	
	Maximum sampling rate	200 MS/s	
	Maximum record length	2 M words	120 k words
	Frequency band	150 MHz	
	Enhanced trigger feature	Optional	
<b>Interfaces</b>	Option box control connector	Standard	
	Centronics output	Uses GPIB/Centronics conversion adapter.	
	RS-232-C	Separately sold unit required.	
	GP-IB	Standard	
	VGA output	Optional	
	Built-in printer	Optional	
<b>Features</b>	Pulse counting function	Available	
	Snap shot	Available	
	History memory	Available	
	Sequential store	Available	

7. Probe MODEL 700978

50 M $\Omega$  x 100, 100 MHz



รูปที่ 3.7 Probe X100

### 3.2 วิธีเก็บค่าแรงดันของมอเตอร์

วิธีใช้ Oscilloscope 4 CH. วัดแรงดันไฟฟ้าสามเฟส

1. วิธีปรับแต่งก่อนใช้งาน (กรณีเริ่มต้นใช้งานใหม่)

1.1 ต่อ Probe CH.-1, CH.-2 และ CH.-3 วัดแรงดันไฟฟ้าเฟส A, B และ C ตามลำดับ โดย

จะใช้กราวด์ของ CH-1 ต่อกับเฟส Neutron เป็นกราวด์อ้างอิงร่วมกันเพียงเส้นเดียว

1.2 ทำการปรับค่าต่าง ๆ ของ CH.-1, CH.-2 และ CH.-3 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- V/DIV = 200 V/DIV
  - Position = 0.00 V
  - Input ให้เป็นแบบ AC และปรับค่าตัวคูณให้เป็น 100:1 ในกรณีที่เครื่องยังไม่ได้ Set
- อัตราโนมิตให้ ซึ่งโดยปกติเครื่องจะทำการปรับค่าตามตัวคูณของ Probe ให้อยู่แล้ว
- Time/DIV = 50 ms
  - Sampling = 20 kHz
  - ทำการปรับ Filter ให้ Smooth - ON เพื่อให้กราฟเรียบขึ้น

## 2. วิธีเก็บข้อมูล

2.1 เมื่อจะเก็บข้อมูลหลังจากทำการลัดวงจรขดลวดภายในมอเตอร์แล้ว ควรรอสักพักให้แรงดันเข้าสู่สภาวะ Steady State ก่อนประมาณ 10 วินาที หลังจากนั้นจึงกดปุ่ม Stop เพื่อให้กราฟหยุดนิ่งพร้อมที่จะทำการเก็บข้อมูล (หลังจากกดปุ่ม Stop แล้ว สามารถเปิดสวิตซ์ลัดวงจรและปิดมอเตอร์ได้)

2.2 เมื่อ Stop แล้ว ใส่แผ่น Floppy Disk A: ที่ Format เรียบร้อยแล้วเข้าไป จากนั้นกดปุ่ม Shift ให้มีไฟติด และกดปุ่ม File จะปรากฏตัวเลือกบนหน้าจอ เลือกการบันทึกชื่อข้อมูลอัตราโนมิต (Auto Filename) ให้เป็น OFF จากนั้นเลือก Data Type เป็นแบบ ACQ จะปรากฏตัวเลือกใหม่เพิ่มขึ้น ให้ทำการเลือก Function เป็น Save และชนิดข้อมูลที่จะทำการเก็บ Type เป็นแบบ ASCII ตั้งชื่อข้อมูลที่จะทำการเซฟที่ Filename เมื่อทำการตั้งชื่อข้อมูลเสร็จแล้วให้กด Exec เพื่อเป็นการเก็บข้อมูล จะมีรูปแผ่นดิสก์ขึ้นบนหน้าจอแสดงว่ากำลังทำการเก็บข้อมูลอยู่

2.3 การเก็บข้อมูลจะใช้เวลาลักพักประมาณ 4 – 5 นาที ให้รอก่อนกว่ารูปแผ่นดิสก์บนหน้าจอหายไปจึงเป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการเก็บข้อมูล จากนั้นให้กดปุ่ม Start เพื่อที่จะทดสอบต่อ ๆ ไป

## 3.3 โปรแกรมการวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรม : MATLAB Version 6.1.0.450 Release 12.1

ที่เก็บ : CD:\Program\analyse.m

ไฟล์ : analyse.m

for i=1:5

if i==1

file='A0.CSV';

elseif i==2

file='A1.CSV';

elseif i==3

การตั้งชื่อไฟล์ในการทดลองทั้งหมด เป็นดังนี้

A0 = มอเตอร์ทำงานในสภาวะปกติ

A1 , A2 , A3 , A4

B1 , B2 , B3 , B4

ตัวอักษรในหลักแรก หมายถึงเฟสที่ลัดรอบ

ตัวเลขในหลักที่สอง หมายถึงเบอร์เซ็นที่ลัดรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

file='A2.CSV';
elseif i==4
file='A3.CSV';
elseif i==5
file='A4.CSV';
end
scope=csvread(file);
Va=scope(:,1);
Vb=scope(:,2);
Vc=scope(:,3);

Vsum=(Va+Vb+Vc)/3;
Vsum(20001:20056)=[];
vsumt=Vsum;
vsumt=vsumt.^2;
for j=1:50
vsumt2=vsumt(1:400);
vsumt(1:400)=[];
vrms(j)=sum(vsumt2);
vrms(j)=vrms(j)/400;
vrms(j)=sqrt(vrms(j));
end

Va(20001:20056)=[];
Vb(20001:20056)=[];
Vc(20001:20056)=[];
Va=fft(Va);Vb=fft(Vb);Vc=fft(Vc);
Va(51)=0;Va(19951)=0;
Vb(51)=0;Vb(19951)=0;
Vc(51)=0;Vc(19951)=0;

Va=ifft(Va);Vb=ifft(Vb);Vc=ifft(Vc);

```

โปรแกรมจะทำงาน 5 รอบ (ในมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่ลัดรอบถึง 4 %) และ 6 รอบ (ในมอเตอร์ 6 ขั้ว ที่ลัดรอบถึง 5 %)

โดยนำไฟล์ข้อมูลในการลัดรอบมอเตอร์ ในกรณีต่างๆมาเปรียบเทียบกัน

อ่านไฟล์ข้อมูลด้วยคำสั่ง csvread แยกแรงดันออกในแต่ละเฟส โดย หลักที่หนึ่ง เป็นแรงดันเฟส A หลักที่สอง เป็นแรงดันเฟส B และหลักที่สาม เป็นแรงดันเฟส C

นำแรงดัน 3 เฟสมาบวกกัน เพื่อหาผลรวมของแรงดันทั้งสามเฟส พร้อมทั้งคำนวณหาค่าถึงสองเฉลี่ย(RMS) ของแรงดันรวม โดยการเก็บข้อมูลแต่ละครั้ง ได้ข้อมูลประมาณ 20,000 เมื่อ Sampling rate = 20 kHz ดังนั้นใน 1 คาบจะได้ข้อมูลเท่ากับ  $20k/50 = 400$  เพราะฉะนั้นจะคำนวณค่า RMS ได้จำนวน  $20000/400 = 50$  ข้อมูล

นำข้อมูลแรงดันทั้งสามเฟสมากรองความถี่มูลฐาน(50 Hz) ทิ้งไป โดยอาศัยฟังก์ชัน Fast Fourier Transform (fft) และ Invert Fast Fourier Transform (ifft) เพื่อจะพิจารณาแรงดันฮาร์โมนิกของมอเตอร์ ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลัดรอบในกรณีต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_a = \text{real}(V_a); V_b = \text{real}(V_b); V_c = \text{real}(V_c);$

$V_d = (2 * V_a / 3) - (V_b / 3) - (V_c / 3);$

$V_q = (V_b / 1.732) - (V_c / 1.732);$

if i==1

$V_{sum0} = V_{sum};$

$V_{d0} = V_d;$

$V_{q0} = V_q;$

$V_{rms0} = v_{rms};$

นำตัวแปรทั้งหมด ที่คำนวณ ได้จาก  
ด้านบนมาแยกเก็บตามกรณีเพื่อใช้  
ในการ วาดกราฟ และ วิเคราะห์ผล  
ต่อไป

elseif i==2

$V_{sum1} = V_{sum};$

$V_{d1} = V_d;$

$V_{q1} = V_q;$

$V_{rms1} = v_{rms};$

elseif i==3

$V_{sum2} = V_{sum};$

$V_{d2} = V_d;$

$V_{q2} = V_q;$

$V_{rms2} = v_{rms};$

elseif i==4

$V_{sum3} = V_{sum};$

$V_{d3} = V_d;$

$V_{q3} = V_q;$

$V_{rms3} = v_{rms};$

elseif i==5

$V_{sum4} = V_{sum};$

$V_{d4} = V_d;$

$V_{q4} = V_q;$

$V_{rms4} = v_{rms};$

end

end

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Vrms=[Vrms0 Vrms1 Vrms2 Vrms3 Vrms4];
plot(Vrms,'linewidth',2);grid;figure;
plot(Vd0,Vq0);axis([-40 40 -40 40]);
figure;plot(Vd1,Vq1);axis([-40 40 -40 40]);
figure;plot(Vd2,Vq2);axis([-40 40 -40 40]);
figure;plot(Vd3,Vq3);axis([-40 40 -40 40]);
figure;plot(Vd4,Vq4);axis([-40 40 -40 40]);
```

แสดงรูปภาพของค่ากำลังสอง  
เฉลี่ยของผลรวมแรงดันทั้งสามเฟส  
และแรงดันในแนวแกน d , q  
เปรียบเทียบของมอเตอร์ที่ปกติ  
กับลัดรอบต่างๆ

```
day=date;
save('result.mat','day','Vrms*','Vsum*','Vd*','Vq*');
```

บันทึกผลทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณ  
รวมถึงวันที่ ที่ทำการทดลองลงใน  
ไฟล์ชื่อ result.mat เพื่อเปิดอ้างอิง  
และเปรียบเทียบในภายหลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองทั้งหมดแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังต่อไปนี้

4.1 กรณีแหล่งจ่ายไฟทั้ง 3 เฟสสมดุล แรงดันเฟสเท่ากับ 220 V(rms) ความถี่ 50 Hz

- Induction Motor 4 poles
- Induction Motor 6 poles ( ลัดรอบเฟส A )
- Induction Motor 6 poles ( ลัดรอบเฟส B )

ที่เก็บ : CD:\Data\Balance

4.2 กรณีแหล่งจ่ายไฟไม่สมดุล โดยที่มีเฟสหนึ่งแรงดันตกเหลือ 205 V(rms)

- Under Voltage Phase A
- Under Voltage Phase B
- Under Voltage Phase C

ที่เก็บ : CD:\Data\Unbalance

4.3 กรณีมอเตอร์มีภาระทางไฟฟ้า

- 40 % Load
- 60 % Load

ที่เก็บ : CD:\Data\OnLoad

4.4 กรณีที่มอเตอร์ลัดรอบพร้อมกันทั้งสองเฟส

- ลัดรอบ เฟส A [3%] พร้อมกับ เฟส B [ 1% 2% 3% 4% 5%]

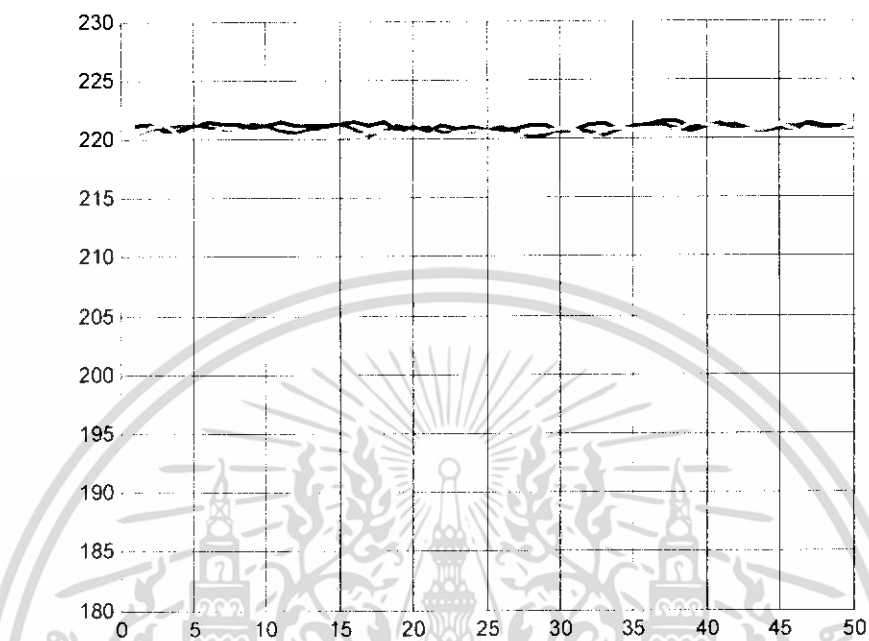
ที่เก็บ : CD:\Data\Short2Phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 กรณีแหล่งจ่ายไฟทั้ง 3 เฟสสมดุล

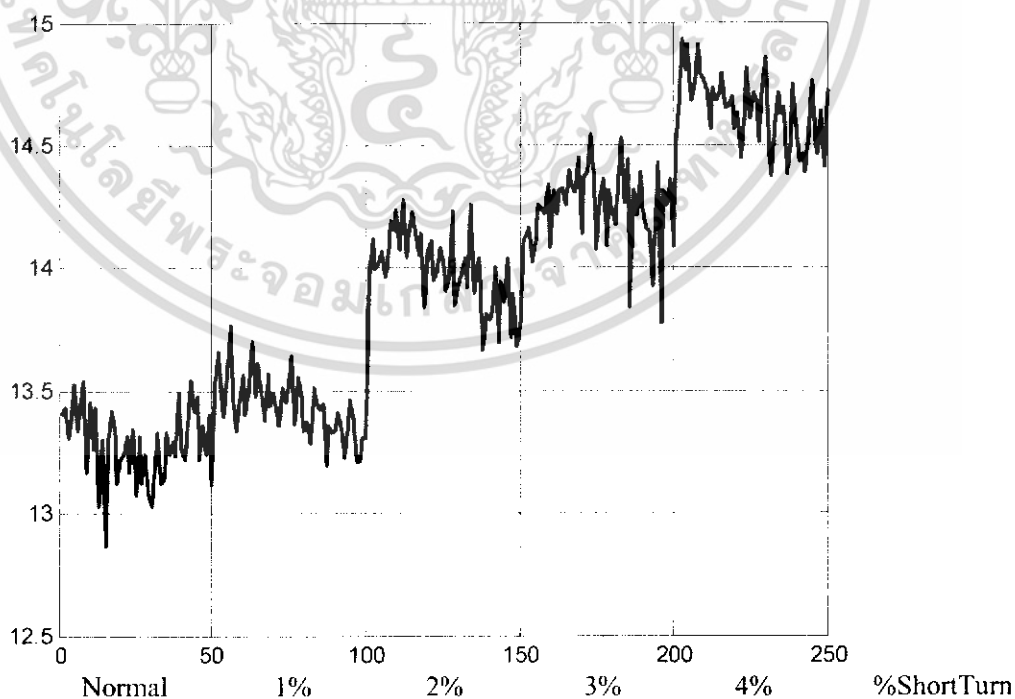
##### Induction Motor 4 poles

System



รูปที่ 4.1 แรงดัน Rms ของระบบที่สภาวะสมดุล

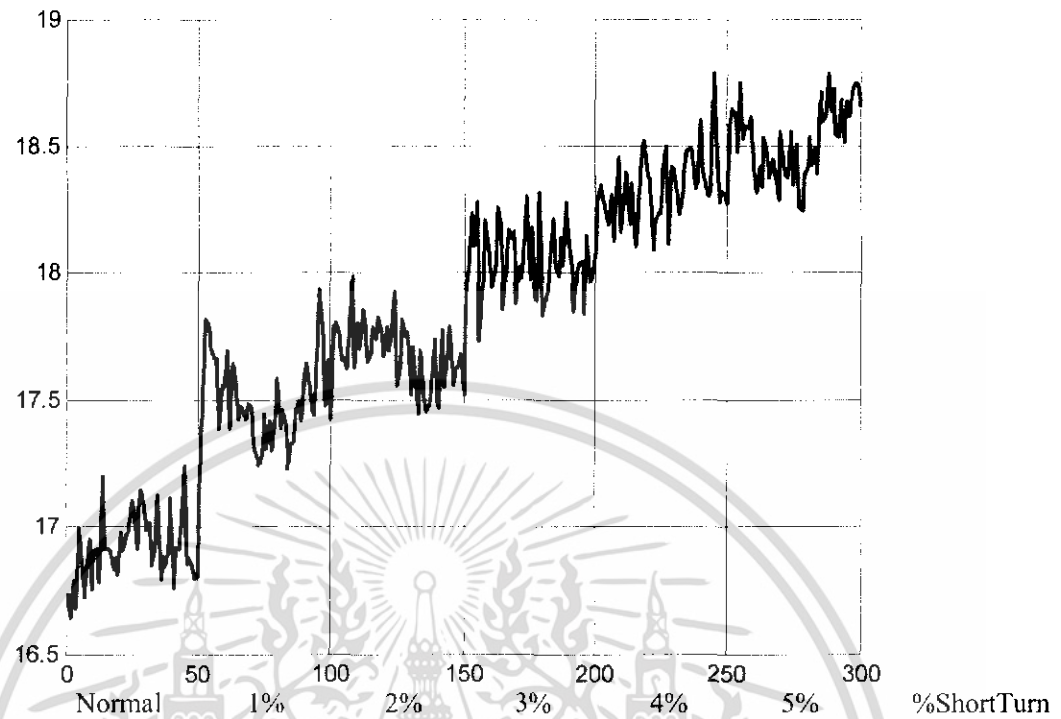
Vsum (rms)



รูปที่ 4.2 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สภาวะสมดุล

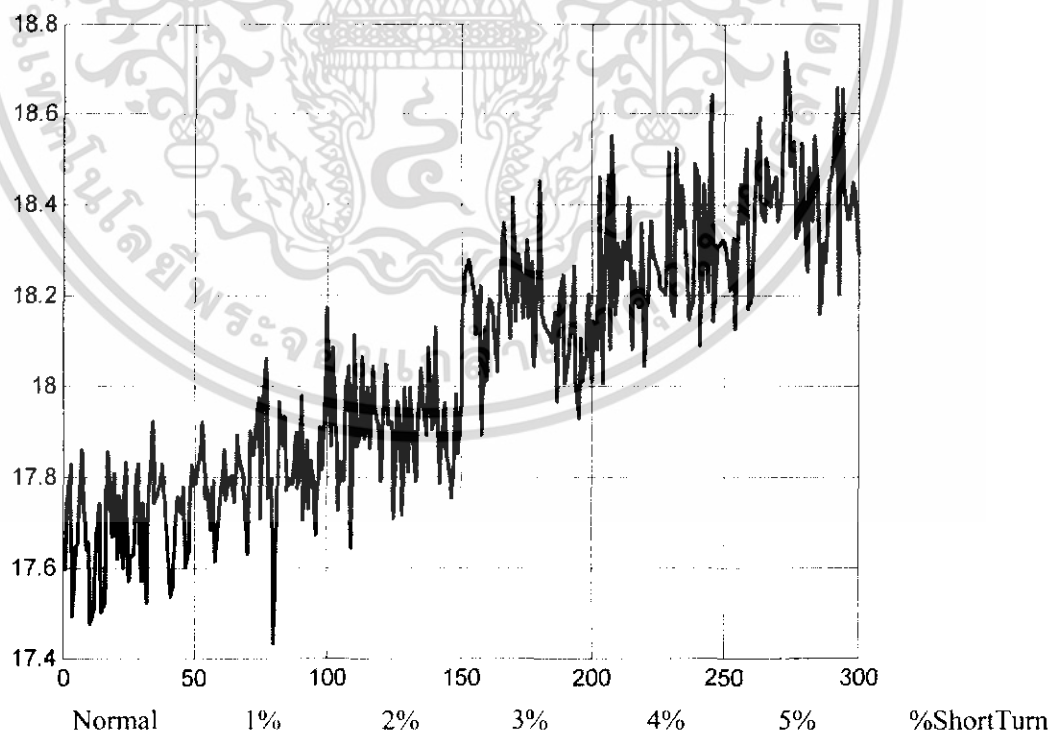
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Induction Motor 6 poles ( ฉัครอบเฟส A )



**รูปที่ 4.3** ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการฉัครอบเฟส A มอเตอร์ 6 ขั้ว ที่สภาวะสมดุล

### Induction Motor 6 poles ( ฉัครอบเฟส B )



**รูปที่ 4.4** ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการฉัครอบเฟส B มอเตอร์ 6 ขั้ว ที่สภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าสมดุล การทดสอบการลัดวงจรมอเตอร์ 2 ขนาด คือ มอเตอร์ 4 Poles และมอเตอร์ 6 Poles ที่เปอร์เซ็นต์การลัดรอบ 0, 1, 2, 3, 4 % แรงดัน Rms ของผลรวมแรงดันไฟฟ้าสามเฟส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์การลัดรอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลจากการเพิ่มขึ้นของแรงดัน Rms ดังกล่าว บ่งบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี เนื่องมาจากเมื่อทำการลัดวงจรขนาดเพิ่มขึ้นมอเตอร์จะมีเสียงดังมากขึ้น แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการลัดวงจรนั้นทำแค่เฟสใดเฟสหนึ่งเพียงเฟสเดียวในที่นี้คือเฟส A ดังนั้นจึงมีการเพิ่มการลัดวงจรอีกเฟสเพิ่มเข้ามาในมอเตอร์ 6 Poles ซึ่งก็คือเฟส B จากการทดลองดังกล่าว ผลที่ได้ออกมาคล้ายคลึงกับการลัดวงจรในเฟส A คือมีค่าแรงดัน Rms ของผลรวมแรงดันเพิ่มขึ้นเช่นกัน ผลจากการทดลองนี้จึงพอจะสรุปคร่าว ๆ ได้ว่า เมื่อมอเตอร์เกิดการลัดวงจรของขดลวดแบบรอบต่อรอบขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการลัดวงจรที่เฟสใดก็ตาม สามารถใช้วิธีรวมแรงดันตรวจสอบความผิดปกติได้

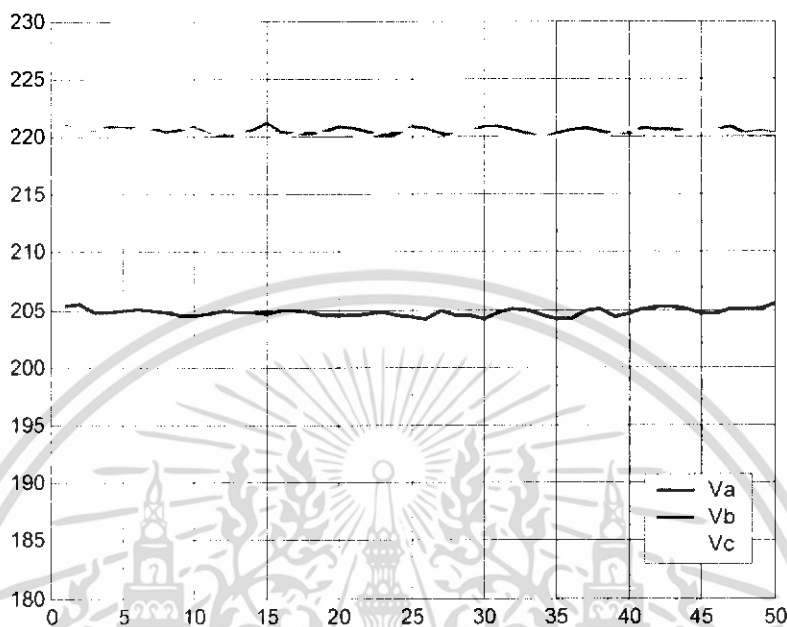


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 กรณีแหล่งจ่ายไฟไม่สมดุล โดยที่มีเฟสหนึ่งแรงดันตกเหลือ 205 V(rms) (ลดลง 6.8%)

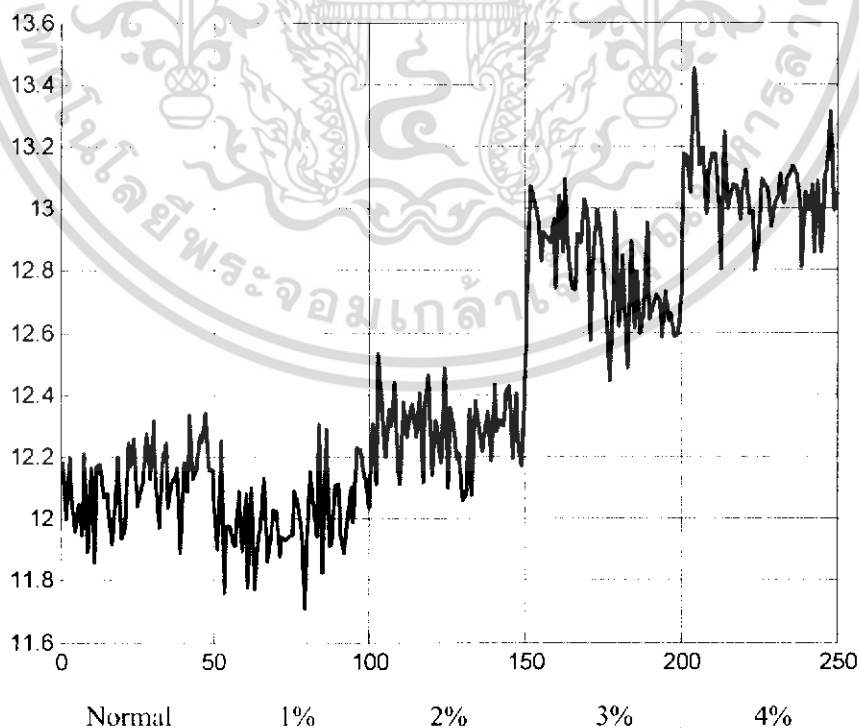
### Under Voltage Phase A

System



รูปที่ 4.5 แรงดัน Rms ของระบบที่สถานะไม่สมดุล (เฟส A 205 V(Rms), ลดลง 6.8%)

Vsum (rms)



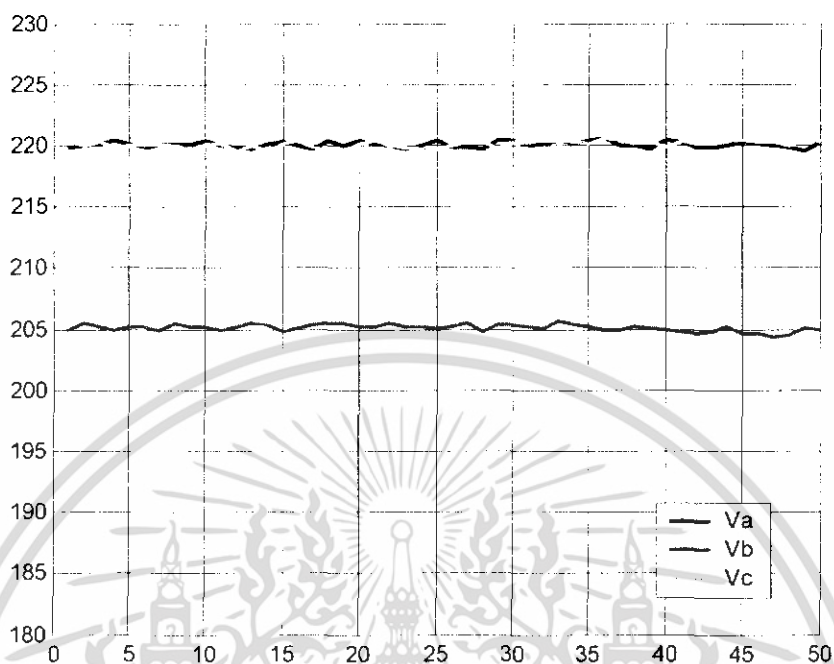
รูปที่ 4.6 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สถานะไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับก (เฟส A 205 V(Rms), ลดลง 6.8%) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

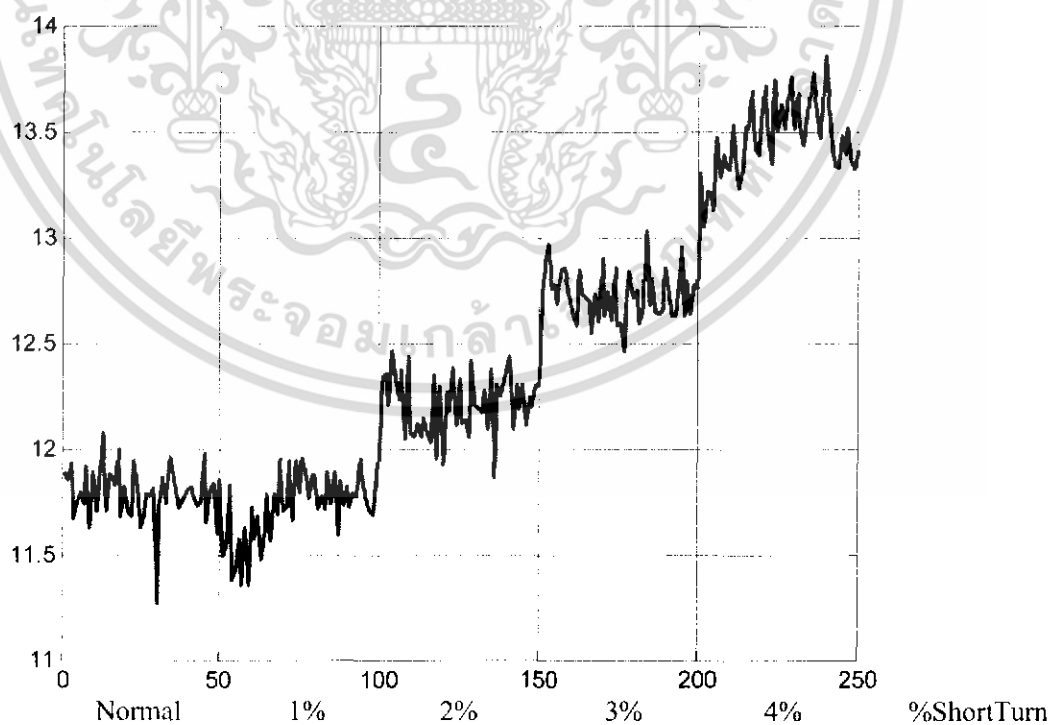
### Under Voltage Phase B

System



**รูปที่ 4.7** แรงดัน Rms ของระบบที่สภาวะไม่สมดุล (เฟส B 205 V(Rms), ลดลง 6.8%)

Vsum (rms)

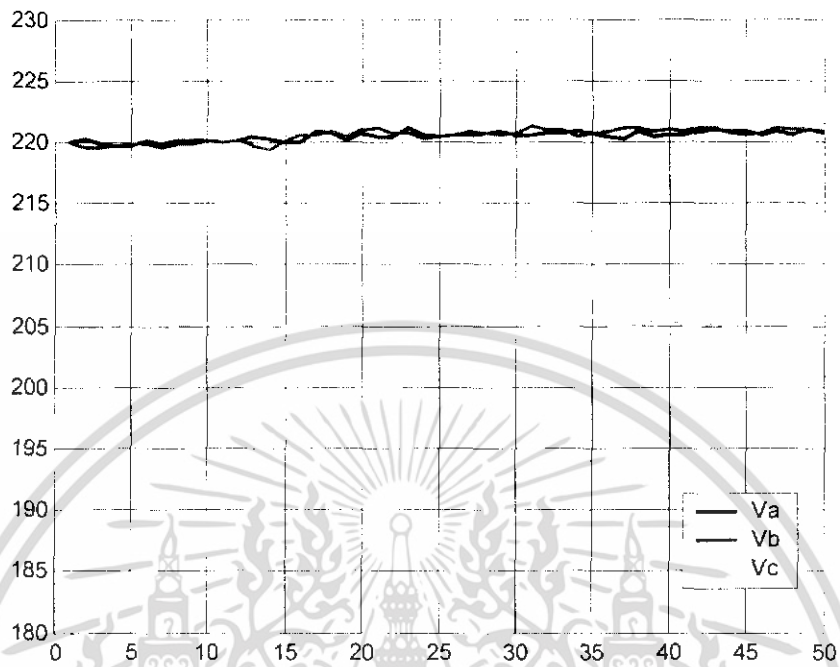


**รูปที่ 4.8** ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สภาวะไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

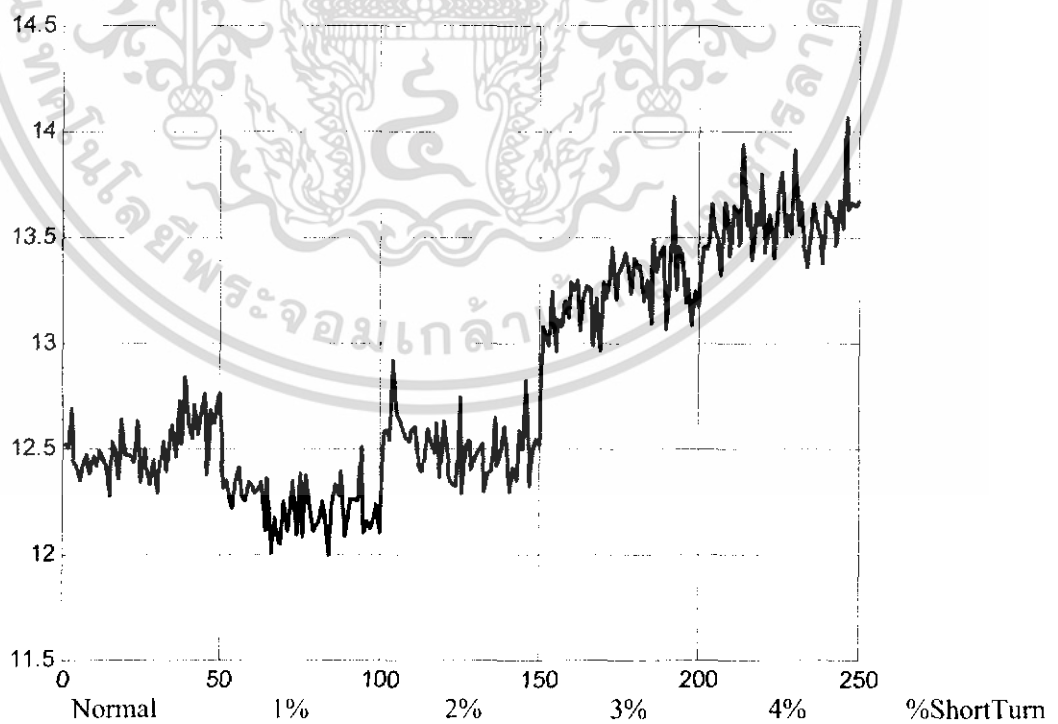
### Under Voltage Phase C

System



**รูปที่ 4.9** แรงดัน Rms ของระบบที่สภาวะไม่สมดุล (เฟส C 205 V(Rms), ลดลง 6.8%)

Vsum (rms)



**รูปที่ 4.10** ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สภาวะไม่สมดุล

(เฟส C 205 V(Rms), ลดลง 6.8%)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายใน (ลิขสิทธิ์ของ บริษัท นวัตกรรม เทคโนโลยี พรีโซลูชั่น จำกัด) กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

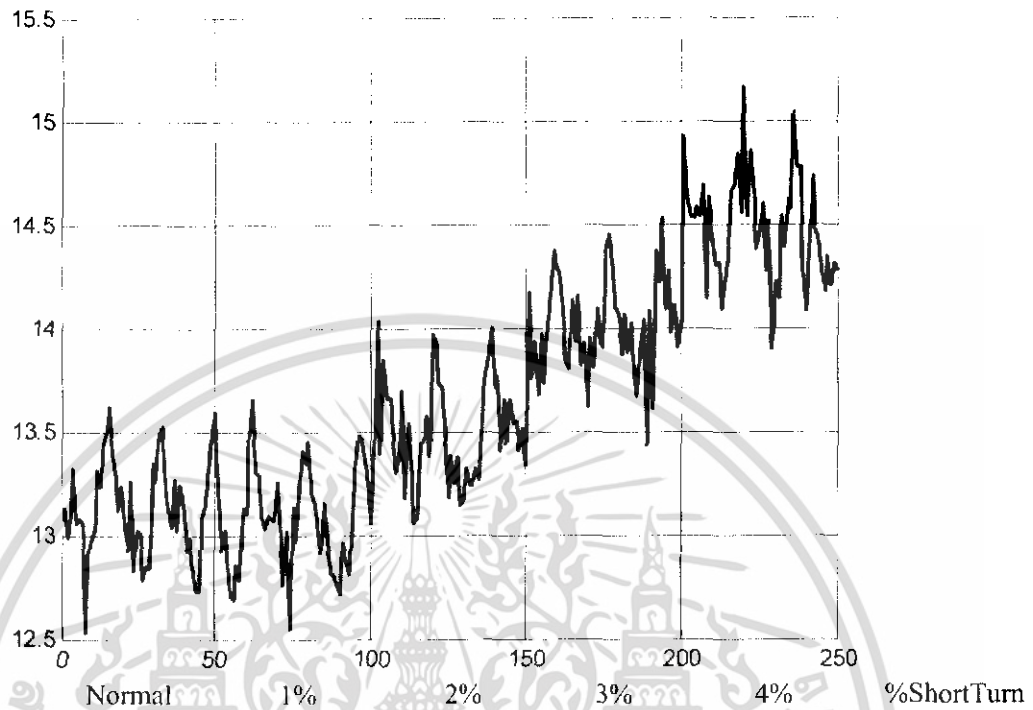
เมื่อคำนึงถึงสถานะที่ไม่พึงประสงค์ต่าง ๆ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในการใช้งานมอเตอร์ เป็นต้นว่าแรงดันจากระบบแหล่งจ่าย (แรงดันจากการไฟฟ้า) ตกไปเฟสใดเฟสหนึ่ง กลายเป็นสถานะไม่สมดุล จากสาเหตุดังกล่าวนี้ มีผลกระทบต่อการใช้วิธีรวมแรงดันหรือไม่ จากการสันนิษฐานข้างต้น จึงได้ทำการทดลองโดยใช้ Variac ปรับลดแรงดันของระบบแหล่งจ่ายแต่ละเฟสให้ค่าลงเหลือ 205 V(Rms) แล้วทำการทดลองหาแรงดัน V(Rms) ที่ได้จากการรวมแรงดันไฟฟ้าสามเฟส ผลที่ได้คือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การลัดรอบที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า วิธีการรวมแรงดันนี้สามารถใช้ตรวจสอบได้ แม้ว่าระบบแหล่งจ่ายจะมีแรงดันไม่สมดุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

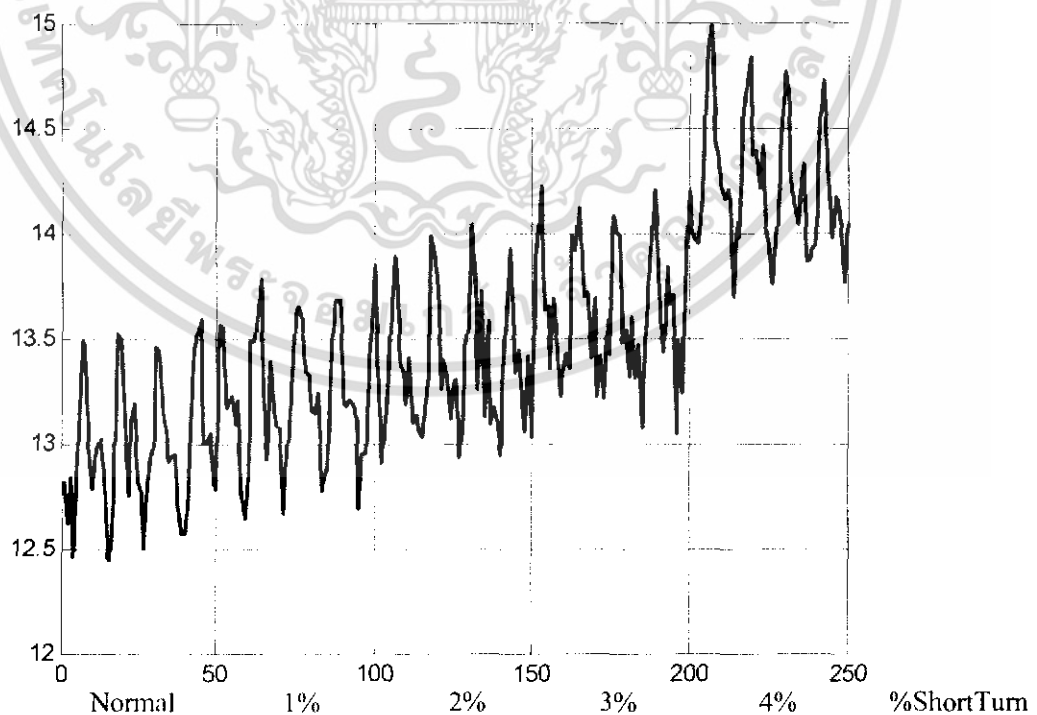
### 4.3 กรณีมอเตอร์มีภาระทางไฟฟ้า

#### 40% Load



รูปที่ 4.11 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สถานะสมดุล มีโหลด 40%

#### 60% Load



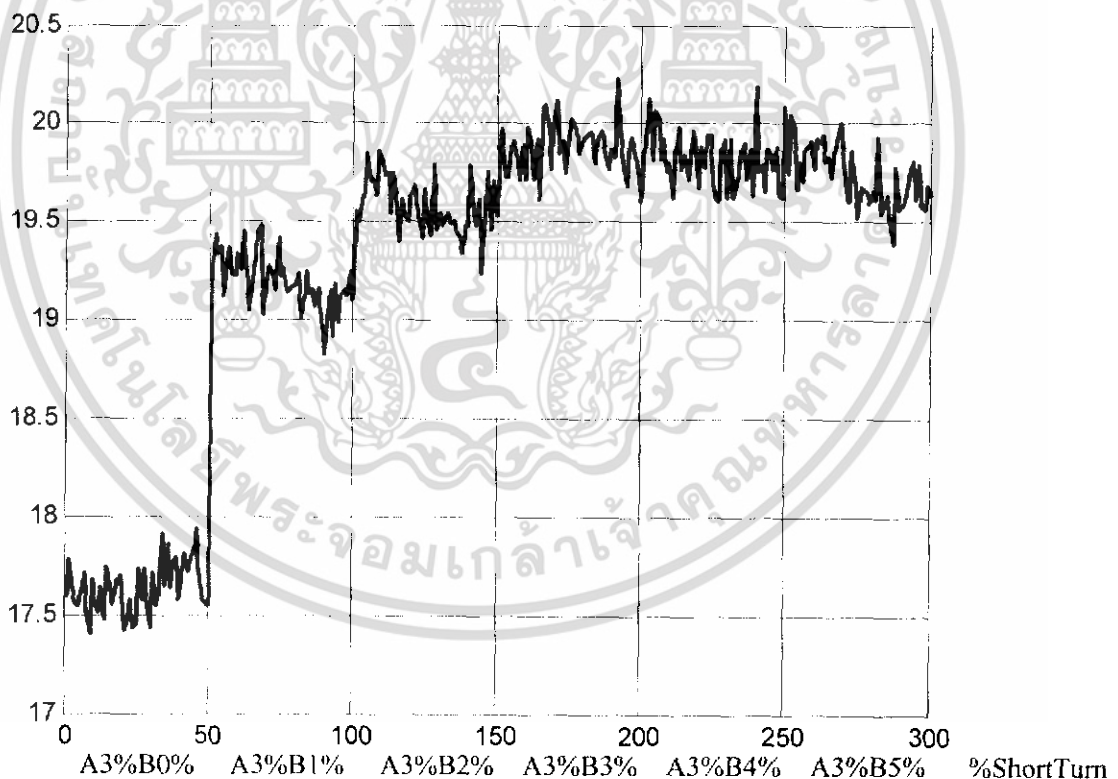
รูปที่ 4.12 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบของมอเตอร์ 4 ขั้ว ที่สถานะสมดุล มีโหลด 60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในความเป็นจริงแล้วการใช้งานมอเตอร์ย่อมต้องใช้ขั้วภาระทางกลเป็นส่วนใหญ่ เพื่อให้ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุดจึงได้ทดสอบโดยนำ Gen มาต่อเป็นภาระทางกล โดย Gen มีภาระทางไฟฟ้าต่อเพิ่มอยู่อีกส่วน การเพิ่มภาระทางไฟฟ้าจะส่งผลให้ Gen รับภาระมากขึ้น ความเร็วตกลง ซึ่งมอเตอร์ที่ขับ Gen นั้น จึงจำเป็นต้องเพิ่มแรงบิดและกำลังเพื่อขั้วภาระที่เพิ่มขึ้น และมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ในกรณีแรก Gen มีโหลดทางไฟฟ้าคือโหลดไฟ 100 วัตต์ จำนวน 20 หลอด คิดเป็นภาระทางไฟฟ้า 40% ผลจากการทดสอบ แรงดัน V(Rms) ของผลรวมแรงดันไฟฟ้าสามเฟส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ได้อำนาจที่ 2 คือเพิ่มภาระทางไฟฟ้าหลอดไฟ 100 วัตต์ จำนวน 30 หลอด คิดเป็นภาระทางไฟฟ้า 60% ผลที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีแรก จึงสามารถสรุปได้ว่า การนำมอเตอร์ไปขั้วภาระทางกลที่เปลี่ยนแปลงไปในกรณีต่าง ๆ ก็ยังสามารถใช้วิธีการรวมแรงดันหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้

#### 4.4 กรณีที่มอเตอร์ลัดรอบพร้อมกันทั้งสองเฟส

ลัดรอบ เฟส A [3%] พร้อมกับ เฟส B [1% 2% 3% 4% 5%]



รูปที่ 4.13 ค่า Rms ของผลรวมแรงดันการลัดรอบเฟส A พร้อมกับเฟส B มอเตอร์ 6 ขั้ว ที่

สถานะสมดุล

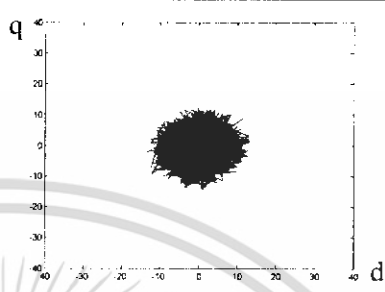
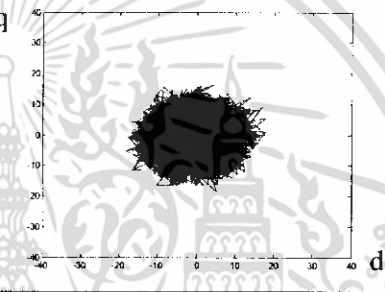
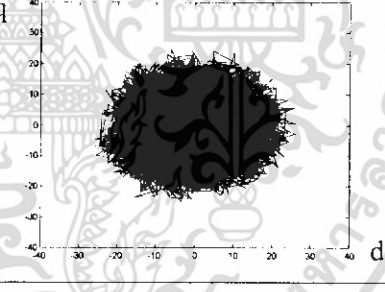
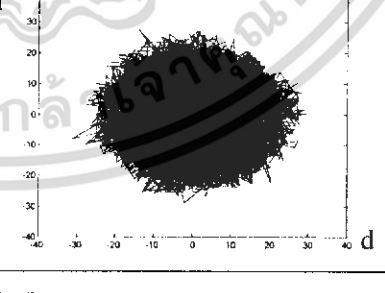
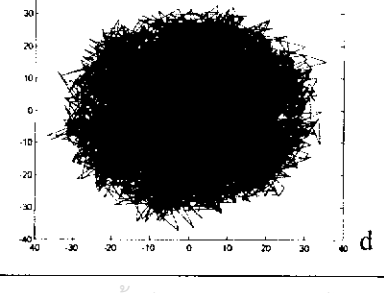
เป็นกรณีพิเศษเพื่อจะดูแนวโน้มว่าถ้ามีการลัดรอบของขดลวดพร้อม ๆ กัน ผลจะยิ่งมากขึ้นหรือไม่ ซึ่งผลที่ได้ ก็มีแนวโน้มสูงขึ้นจากกรณีปกติอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 การวิเคราะห์ความแตกต่างในรูปของแรงดันในแกน $d, q$ ที่ตัดความถี่ฐานออก

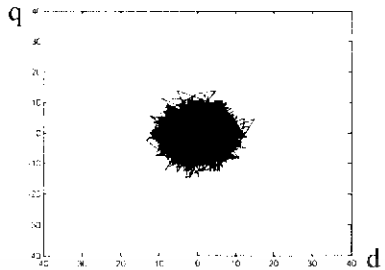
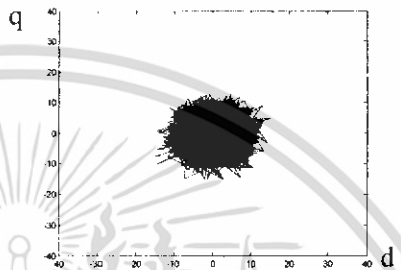


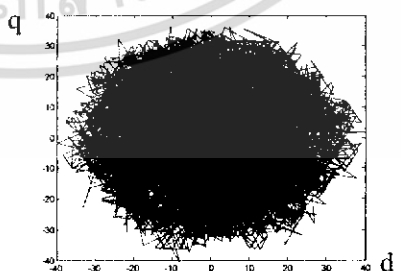
### 4.5.1 กรณีแหล่งจ่ายไฟทั้ง 3 เฟสสมดุล

ตารางที่ 4.1 แสดงการพล็อตแกน  $dq$  ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ

กรณีการ Short Turn	4 Poles
ปกติ	 A scatter plot in the dq plane for a normal 4-pole motor. The horizontal axis is labeled 'd' and the vertical axis is labeled 'q', both ranging from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at approximately (10, 10).
1 % Short Turn	 A scatter plot in the dq plane for a motor with 1% short turn. The axes are labeled 'd' and 'q' from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at approximately (10, 10), similar to the normal case but with slightly more spread.
2 % Short Turn	 A scatter plot in the dq plane for a motor with 2% short turn. The axes are labeled 'd' and 'q' from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at approximately (10, 10), showing increased spread compared to the 1% case.
3 % Short Turn	 A scatter plot in the dq plane for a motor with 3% short turn. The axes are labeled 'd' and 'q' from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at approximately (10, 10), with further increased spread.
4 % Short Turn	 A scatter plot in the dq plane for a motor with 4% short turn. The axes are labeled 'd' and 'q' from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at approximately (10, 10), showing the most significant spread among the cases shown.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

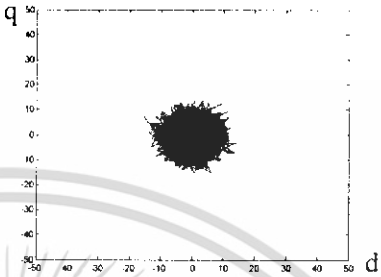
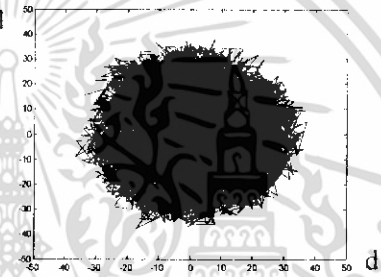
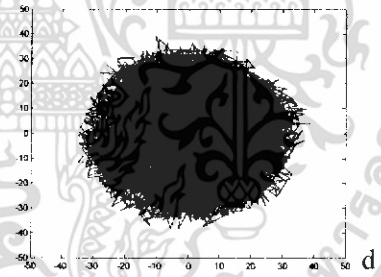
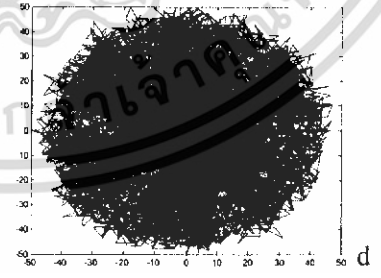
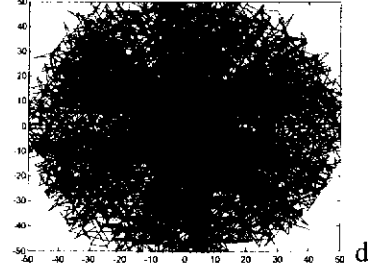
**ตารางที่ 4.2** แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 6 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ

กรณีการ Short Turn	6 Poles
ปกติ	 <p>A scatter plot in the dq plane for a normal 6-pole motor. The horizontal axis is labeled 'd' and the vertical axis is labeled 'q'. Both axes range from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at the origin (0,0).</p>
1 % Short Turn	 <p>A scatter plot in the dq plane for a 6-pole motor with 1% short turn. The axes are labeled 'd' and 'q' and range from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at the origin, similar to the normal case but with slightly more spread.</p>
2 % Short Turn	 <p>A scatter plot in the dq plane for a 6-pole motor with 2% short turn. The axes are labeled 'd' and 'q' and range from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at the origin, showing a slight increase in spread compared to the 1% case.</p>
3 % Short Turn	 <p>A scatter plot in the dq plane for a 6-pole motor with 3% short turn. The axes are labeled 'd' and 'q' and range from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at the origin, with a noticeable increase in the spread of the points.</p>
4 % Short Turn	 <p>A scatter plot in the dq plane for a 6-pole motor with 4% short turn. The axes are labeled 'd' and 'q' and range from -40 to 40. The data points form a dense, roughly circular cluster centered at the origin, showing the largest spread among the cases shown.</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

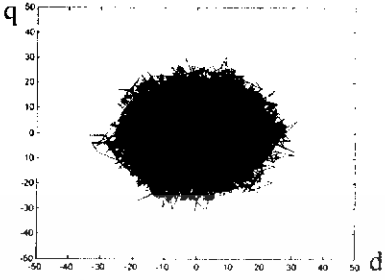
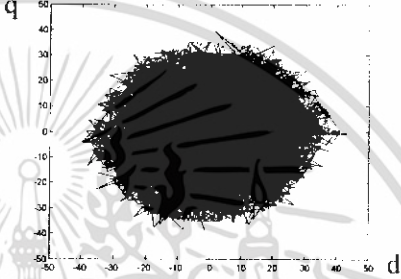
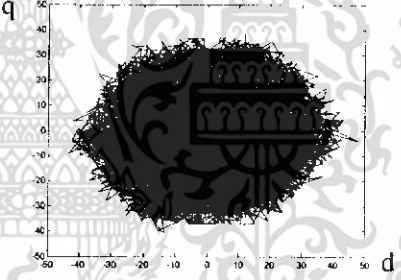
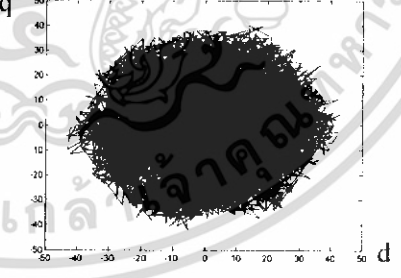
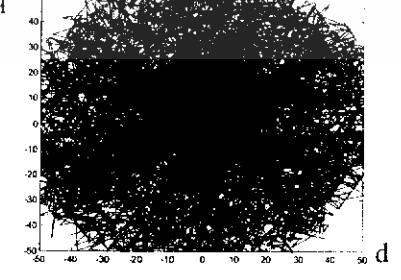
#### 4.5.2 กรณีแหล่งจ่ายไฟไม่สมดุล โดยที่มีเฟสหนึ่งแรงดันตกเหลือ 205 V(rms), ลดลง 6.8%

**ตารางที่ 4.3** แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ ในสภาวะไม่สมดุล (เฟส A แรงดัน 205 V(Rms), ลดลง 6.8%)

กรณีการ Short Turn	Unbalance A
ปกติ	
1 % Short Turn	
2 % Short Turn	
3 % Short Turn	
4 % Short Turn	

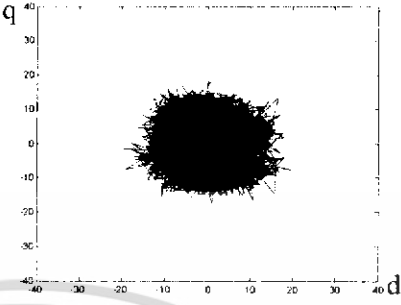
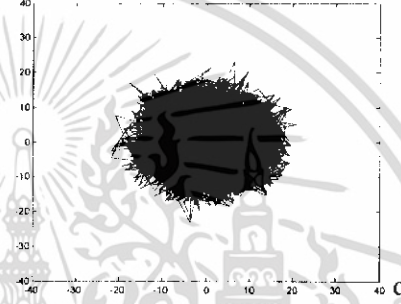
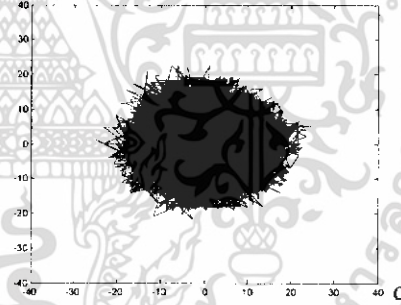
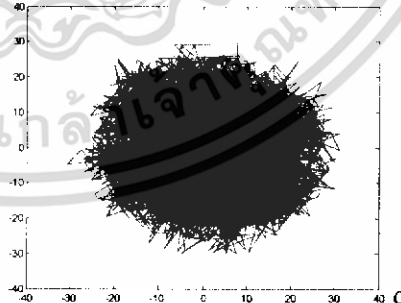
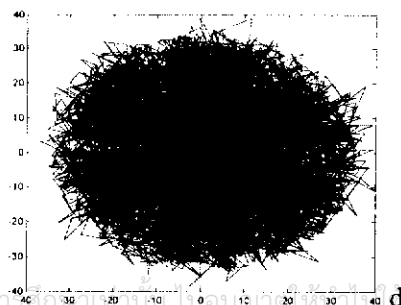
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.4** แสดงการพล็อตแกน  $dq$  ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ ในสถานะไม่สมดุล (เฟส B แรงดัน 205 V(Rms).ลดลง 6.8%)

กรณีการ Short Turn	Unbalance B
ปกติ	
1 % Short Turn	
2 % Short Turn	
3 % Short Turn	
4 % Short Turn	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

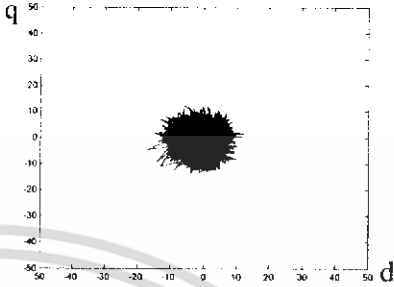
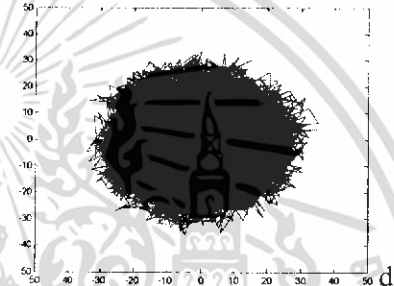
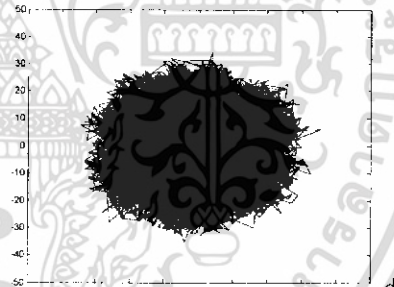
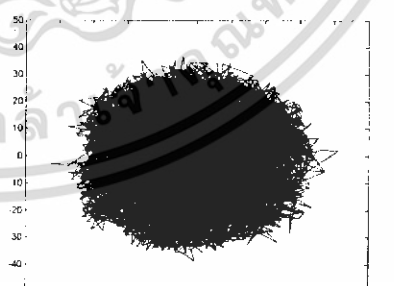
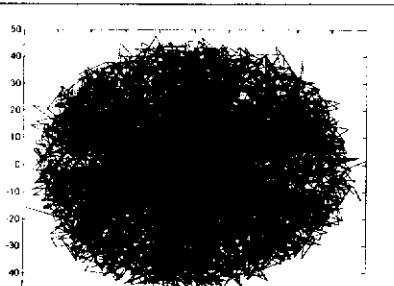
**ตารางที่ 4.5** แสดงการพล็อตแกน  $dq$  ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ ในสถานะไม่สมดุล (เฟส C แรงดัน 205 V(Rms), ลดลง 6.8%)

กรณีการ Short Turn	Unbalance C
ปกติ Short Turn	
1 % Short Turn	
2 % Short Turn	
3 % Short Turn	
4 % Short Turn	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

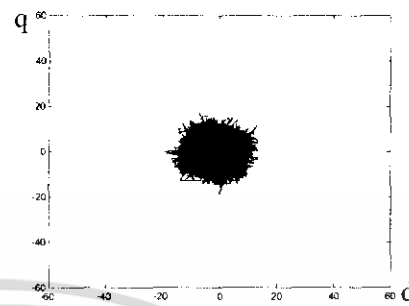

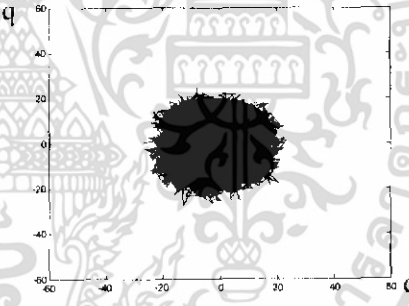
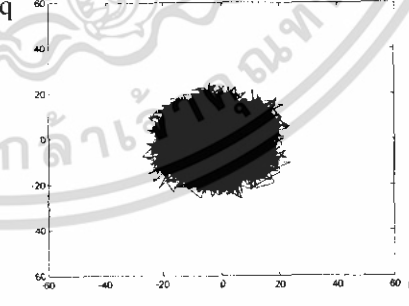
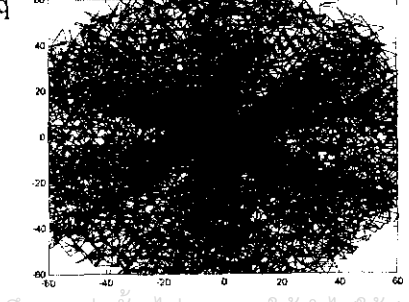
### 4.5.3 กรณีสวมเตอร์มีภาระ

ตารางที่ 4.6 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ ในสภาวะสมดุล มีโหลด 40%

กรณีการ Short Turn	Load 40 %
ปกติ	
1 % Short Turn	
2 % Short Turn	
3 % Short Turn	
4 % Short Turn	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตโดยคณะกรรมการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

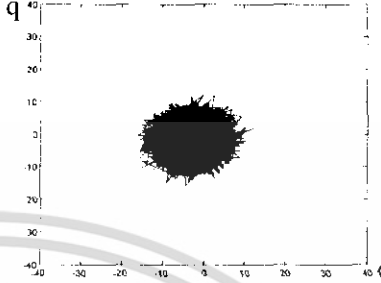
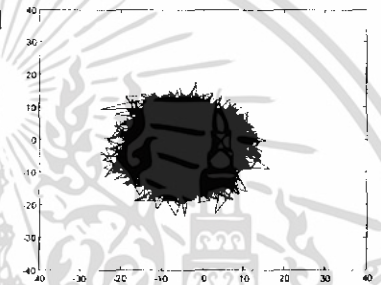
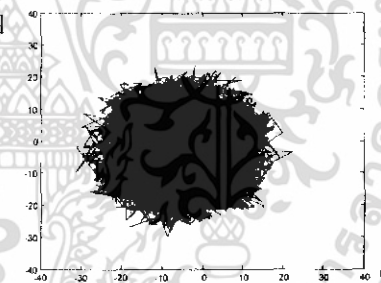
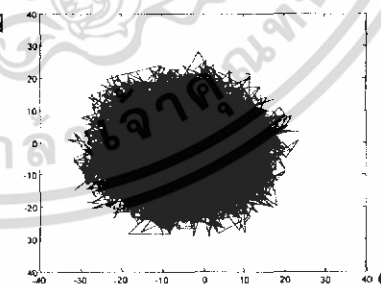
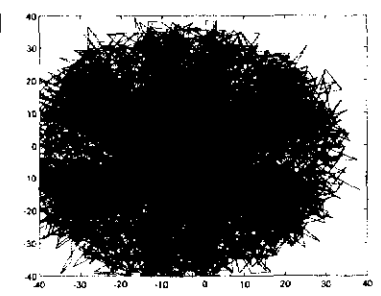
**ตารางที่ 4.7** แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 4 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ ในสถานะสมดุล มีโหลด 60%

กรณีการ Short Turn	Load 60 %
ปกติ	
1 % Short Turn	
2 % Short Turn	
3 % Short Turn	
4 % Short Turn	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนไข้คนไข้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.4 กรณีที่มอเตอร์ลัดรอบพร้อมกันทั้งสองเฟส

ตารางที่ 4.8 แสดงการพล็อตแกน dq ของมอเตอร์ 6 Poles ที่ %Short Turn ต่าง ๆ สองเฟส ในสถานะสมดุล

กรณีการ Short Turn	ลัดรอบสองเฟส
A 3% Short Turn B 0% Short Turn	
A 3% Short Turn B 2% Short Turn	
A 3% Short Turn B 3% Short Turn	
A 3% Short Turn B 4% Short Turn	
A 3% Short Turn B 5% Short Turn	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบความผิดปกติของมอเตอร์โดยใช้การพล็อตแกน dq เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่ามาใช้สำหรับการพล็อต dq อาจจะยุ่งยากและสังเกตได้ยากกว่าวิธีแรงดัน Rms ของผลรวมแรงดัน ซึ่งจากการทดสอบจากกรณีต่าง ๆ กัน ได้แก่ กรณี แรงดันสมดุลของมอเตอร์ทั้งสองแบบคือ 4 Poles และ 6 Poles, กรณี แรงดันไม่สมดุลโดยเฟสใดเฟสหนึ่งมีแรงดันลดลงเหลือ 205 V(Rms) ทดสอบทั้งเฟส A เฟส B และเฟส C, กรณีมอเตอร์มีภาระทางกลต่าง ๆ กัน คือ 40% และ 60% และกรณีสุดท้ายคือทำการลัดรอบมอเตอร์ 6 Poles ของทั้งสองเฟสพร้อมกัน คือ A และ B

ผลการทดสอบที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ วงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้นตามการลัดรอบของมอเตอร์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาขนาดวงกลมนั้น ก่อนข้างใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสังเกตลำบาก และเมื่อพิจารณาความรุนแรงของการลัดรอบแล้ว กรณีเดียวกันอาจจะเห็นความแตกต่างได้ดี แต่เมื่อเอาแต่ละกรณีมาเทียบกันจะสรุปลงไปเลยจากรูปที่เห็นไม่ได้ว่ารูปจะใหญ่เป็นสัดส่วนตาม สังเกตได้จากกรณีการลัดรอบของสองเฟสพร้อม ๆ กันผลก็ใกล้เคียงกับกรณีอื่น ๆ แทนที่จะมีความรุนแรงมากกว่าดังนั้นวิธีนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาเจาะลึกกว่านี้ เพื่อให้ได้เหตุและผลที่สมบูรณ์มากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### ผลที่ได้จากการทดลอง

ผลที่ได้จากการรวมแรงดัน โวลต์-นิวตรอน ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส นั้น ได้แสดงให้เห็นถึงสภาวะลัดรอบที่ขดลวดสเตเตอร์ต่าง ๆ โดยที่ผลรวมแรงดันจะมีค่าสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การลัดรอบที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการไม่สมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance, Z) ที่เกิดขึ้นบนขดลวดสเตเตอร์ ที่เกิดการลัดรอบเฟสใดเฟสหนึ่งก็ตามของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (ซึ่งโดยความเป็นจริงแล้วค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะมีความสมดุลกัน)

เมื่อค่าอิมพีแดนซ์บนขดลวดสเตเตอร์ที่เกิดการลัดรอบเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลต่อค่าแรงดันบนขดลวดนั้นด้วย โดยไม่ว่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ย่อมส่งผลให้ผลรวมแรงดันทั้งหมดมีค่าสูงขึ้นเสมอ จึงอาจกล่าวได้ว่าการพิจารณาที่ผลรวมแรงดันนั้น เป็นเสมือนการพิจารณาความสมดุลของแรงดันทั้ง 3 เฟส นั้นเอง

ดังจะสังเกตได้จากการทดลองในกรณีที่แรงดันระบบไม่สมดุล ผลรวมแรงดันที่ได้ในช่วงลัดรอบ 1% , 2% มีระดับใกล้เคียงกัน และบางกรณี ลัดรอบ 1% กลับมีผลรวมแรงดันต่ำกว่าแบบปกติ ทั้งนี้เป็นเพราะในภาวะปกติ ผลรวมแรงดันมีค่าสูงเนื่องจากความไม่สมดุลของระบบอยู่แล้ว เมื่อลัดรอบทำให้แรงดันเฟสหนึ่งเฟสใดเปลี่ยนแปลงไป และทำให้ระบบโดยรวมกลับสมดุลขึ้น จึงทำให้ผลรวมแรงดันมีค่าต่ำลง

แต่ถ้าเป็นในกรณีของแรงดันระบบสมดุล ไม่ว่าจะจ่ายโหลดหรือไม่ หรือจะลัดรอบพร้อมกันสองเฟส ผลรวมแรงดันที่ได้แม้จะมีขนาดแตกต่างกัน แต่รูปแบบทั้งหมดมีแนวโน้มเดียวกัน คือเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การลัดรอบ

#### ข้อเสนอแนะ และการนำไปประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากเทคนิคผลรวมแรงดันนี้ เป็นการตรวจจับการลัดรอบที่สเตเตอร์ โดยอาศัยความสมดุลของแรงดันที่ขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส เป็นหลัก ดังนั้นถ้าต้องการนำไปประยุกต์ใช้งานในงานอุตสาหกรรม จึงควรใช้เครื่องมือพวก Voltage Regulator ประเภทต่างๆ เพื่อใช้ปรับปรุงแรงดันของระบบไม่ให้ตก หรือมากเกินไป ก่อนที่จะจ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งนอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับดีขึ้นแล้ว ยังสามารถป้องกันมอเตอร์จากความเสียหายร้ายแรงได้อีกด้วย เนื่องจากแรงดัน ไฟตก หรือเกินจะส่งผลโดยตรงต่อกำลัง และแรงบิดของมอเตอร์

นอกจากควรมีการปรับปรุงระดับแรงดันแล้ว ยังควรมีการเก็บข้อมูลแรงดันของมอเตอร์ เอกสที่ควรตรวจสอบเป็นประจำสม่ำเสมอ (Routine) เพื่อติดตามดูความผิดปกติ เช่น เมื่อครั้งราคา ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือสองเดือนครั้ง เพราะเนื่องจากมอเตอร์คนละประเภท หรือที่พิกัดกำลังแตกต่างกันจะมีผลรวมแรงดันในภาวะปกติที่ต่างกันด้วย ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบอ้างอิงกันได้

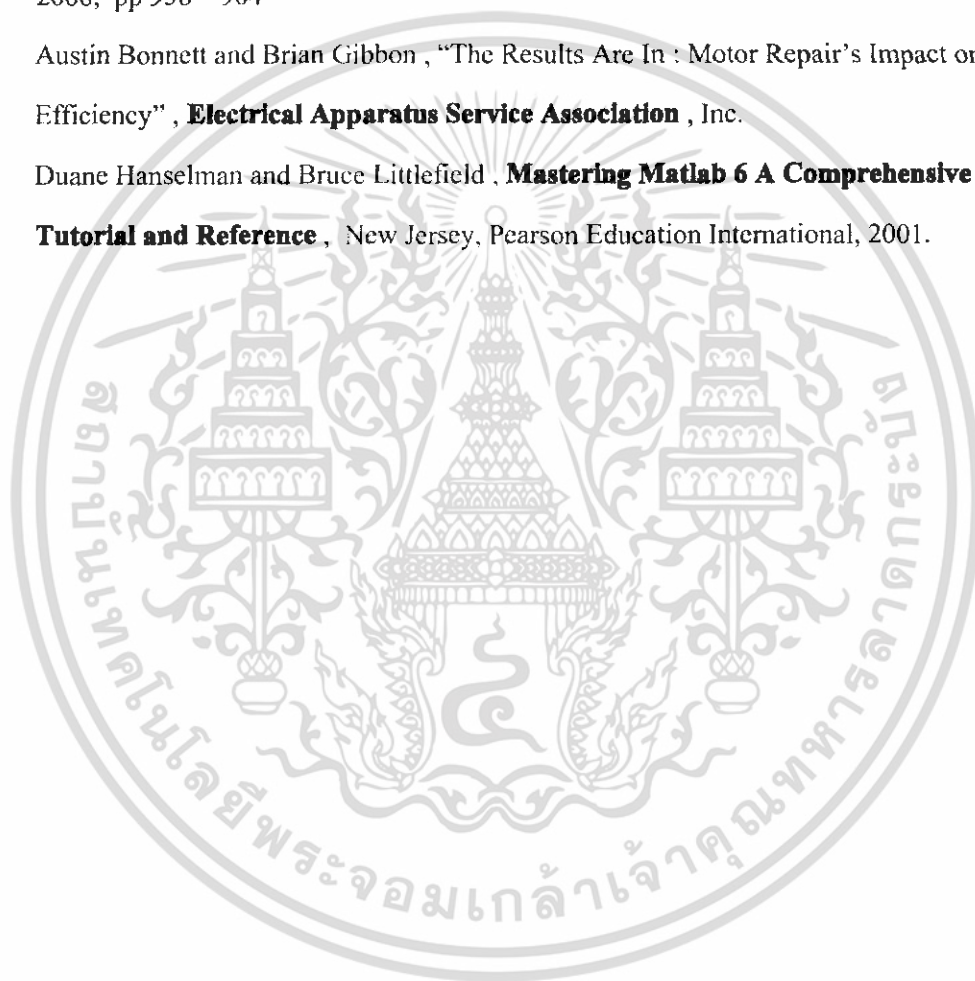
### ข้อจำกัดของโครงการ

- มอเตอร์ที่ต้องการตรวจสอบ จำเป็นต้องมีจุดร่วม(Neutral) ที่เข้าถึงได้ง่าย
- มอเตอร์ที่ต้องการตรวจสอบต้องต่อแบบสตาร์ โดยลายนิวตรอน
- การตรวจสอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูล และ โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล โดยเฉลี่ยประมาณ 4 – 5 นาที
- Digital Oscilloscope ที่ใช้ จำเป็นต้องมี Input อย่างน้อย 3 Channel เพื่อใช้เก็บข้อมูลแรงดันของมอเตอร์ทั้ง 3 เฟส ที่เวลาเดียวกัน
- ผลการทดลองทั้งหมดเป็นการทดสอบกับมอเตอร์เพียง 2 ตัว คือ แบบ 4 ขั้ว และแบบ 6 ขั้ว กำลัง 2 แรงม้าเท่านั้น สำหรับมอเตอร์ประเภทอื่น , ยี่ห้ออื่น , หรือพิกัดกำลังอื่น อาจให้รูปแบบหรือระดับของผลรวมแรงดันที่ต่างออกไป
- การทดลองทั้งหมด เป็นการขั้มอเตอร์ด้วยแรงดันและความถี่ที่ตลอดที่ 220 V (line-neutral) ความถี่ 50 Hz สำหรับการขั้มอเตอร์ที่แรงดันและความถี่อื่นเช่นขั้มผ่านอินเวอร์เตอร์ อาจให้รูปแบบหรือระดับของผลรวมแรงดันที่ต่างออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] M. Alex Cash and Thomas G. Habetler , “Insulation Failure Prediction In Induction Machine Using Line-Neutral Voltage” , Georgia Institute of Technology School of Electrical & Computer Engineering , Atlanta, GA 30332 USA
- [2] Wenping Cao and Keith J. Bradley , “Assessing the Impacts of Rewind and Repeated Rewinds on Induction Motors : Is an Opportunity for Re-Designing the Machine Being Wasted ?” , **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol.42, NO.4, July/August 2006, pp 958 – 964
- [3] Austin Bonnett and Brian Gibbon , “The Results Are In : Motor Repair’s Impact on Efficiency” , **Electrical Apparatus Service Association** , Inc.
- [4] Duane Hanselman and Bruce Littlefield . **Mastering Matlab 6 A Comprehensive Tutorial and Reference** , New Jersey, Pearson Education International, 2001.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้