



การตรวจสอบการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัม
Winding Fault Monitoring of an Induction Motor Based on Spectrum Analysis

ฐาปนิก ตีระพันธ์
Thapanic Teerapan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เกลิมยานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายฐาปนิก ตีระพันธ์)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายฐาปนิก ตีระพันธ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัม
ผู้เขียน	นายฐาปนิก ตีระพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบและพัฒนาโปรแกรม LabVIEW เพื่อประยุกต์ใช้กับงานด้านการตรวจสอบการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบออนไลน์ ด้วยพื้นฐานการใช้ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า การวิเคราะห์และประเมินสถานะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการคำนวณค่าและตรวจสอบปริมาณและคุณภาพต่างๆ ทางไฟฟ้าของมอเตอร์ว่าเป็นไปตามเงื่อนไขการทำงานที่ปกติหรือไม่ และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณกระแสมอเตอร์เพื่อหาค่าประกอบของความถี่ที่ต้องสงสัยอันเนื่องมาจากการทำงานที่ผิดปกติของมอเตอร์ และเพื่อประมาณค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์ รวมถึงประเมินแนวโน้มสถานะของมอเตอร์ได้ในขณะทำงาน โดยระบุสถานะเป็นสัญญาณเตือนซึ่งจะเป็นประโยชน์ให้ผู้ใช้งานได้ทราบถึงแนวโน้มที่อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่มอเตอร์เหนี่ยวนำในระยะยาวได้และสามารถตรวจสอบและแก้ไขได้ทันทีทันที ผลที่ได้จากการทดลองนั้นสามารถนำไปพัฒนาเพื่อต่อยอดการประเมินและจำแนกสถานะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปแบบต่างๆ ต่อไป

คำสำคัญ : การตรวจสอบสถานะของมอเตอร์, ปริมาณทางไฟฟ้า, สเปกตรัมสัญญาณกระแสมอเตอร์

Thesis Title	Winding Fault Monitoring of an Induction Motor Based on Spectrum Analysis
Author	Mr.Thapanic Teerapan
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2013

ABSTRACT

This research presents the design and development of LabVIEW program for online condition winding fault monitoring of induction motors based on data of stator voltages and currents. The analysis and evaluation on motor conditions can be divided into 2 sections. The first section is the calculation and evaluation of electrical quantities. The motor current spectrum analysis (MCSA) is used in the second part to diagnose the frequency components due to the faulty motors and evaluate the slip and motor speed. It also can help the operator for long term evaluation of the motors. The results from the research can be able to further develop for various types of motor status evaluations and fault diagnostics.

Keyword : Motor condition monitoring, electrical quantities, the motor current spectrum

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(14)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 การตรวจเอกสาร	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	8
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย	8
1.7 แผนการดำเนินงาน	9
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ	10
2.2 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	19
2.3 การวิเคราะห์กระแสมอเตอร์	21
2.4 การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล	22
2.5 การคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน IEEE 1459-2010	24
2.6 การคำนวณค่าปริมาณทางกล	32
2.7 โปรแกรม LabVIEW	36
3. การออกแบบเครื่องมือการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้า	38
3.1 ส่วนการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	38
3.2 การทวนสอบโปรแกรมคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า (Verify Program)	41
4. การออกแบบเครื่องมือการคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	51
4.1 ส่วนการคำนวณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์	51
4.2 ผลการทวนสอบโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็ว	54
4.3 ผลพิสูจน์การคำนวณค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์	63
5. การออกแบบเครื่องมือการวิเคราะห์ความผิดปกติ	68
5.1 การออกแบบอัลกอริธึมของเครื่องมือตรวจวัดเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW	68
5.2 ผลพิสูจน์สมการองค์ประกอบความถี่เมื่อเกิดการลัดวงจรของขดลวด	71
6. ผลการทดลอง	78

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญ	หน้า
6.1 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ	78
6.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรตรวจวัดสัญญาณ	81
6.3 ผลการทดสอบโปรแกรมคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง	84
6.4 ผลการทดสอบการคำนวณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2kW เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความเร็วรอบอ้างอิง	87
6.5 ผลการทดสอบหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ทดสอบ 2.2kW Δ -Connection ในภาวะปกติ (Normal Condition)	89
6.6 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส A 7 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V	98
6.7 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส A 15 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V	100
6.8 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส A 31 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V	102
6.9 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส B 7 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V	104
6.10 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส B 15 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V	107
6.11 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส B 31 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V	109
6.12 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส C 7 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V	111
6.13 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส C 15 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V	113
6.14 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส C 31 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V	115
6.15 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบความผิดปกติเมื่อเกิดการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำ	118

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สารบัญ	
6.16 ผลการตั้งค่าจุดตรวจจับช่วงความถี่ที่ต้องสงสัยที่เฟส A,B,C เมื่อเกิดความผิดปกติในกรณีทดสอบการลัดวงจรของขดลวด ที่เฟส A 31 รอบที่ภาวะโหลด 100%	134
7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	139
7.1 บทสรุป	139
7.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	140
7.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป	140
บรรณานุกรม	132
ภาคผนวก	135
ภาคผนวก ก เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	136
ภาคผนวก ข วงจรตรวจจับสัญญาณ	
ภาคผนวก ค DAQ USB Device	
ภาคผนวก ง การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	
ประวัติผู้เขียน	(161)

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1-1	สัดส่วนของเปอร์เซ็นต์ลำดับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยเปรียบเทียบให้เห็นจาก 2 มาตรฐาน [12]	3
1-2	สาเหตุความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [2]	5
1-3	แสดงองค์ประกอบของความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์เกิดความผิดพลาด [2]	5
1-4	สรุปค่าการวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่รูปคลื่นไม่เป็นไซน์ [4]	6
2-1	แสดงการเปรียบเทียบของแต่ละวิธีการที่ใช้ในการตรวจหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้น [13]	22
2-2	สรุป 3 กลุ่มค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ [19]	31
2-3	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ฮาร์มอนิกส์ของสล็อตโรเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดและผลของพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการออกแบบมอเตอร์ [5]	35
3-1	ผลการทดสอบสมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่เฟส ในกรณีแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์	45
3-2	ผลการทดสอบสมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE1459-2010 ในกรณีแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์	45
3-3	ผลการทดสอบสมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่เฟส ในกรณีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์	49
3-4	ผลการทดสอบสมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE1459-2010 ในสภาวะแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์	49
5-1	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =1 และลำดับฮาร์มอนิกส์ เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.003	72
5-2	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =2 และลำดับฮาร์มอนิกส์ เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.003	73
5-3	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =3 และลำดับฮาร์มอนิกส์ เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.003	73
5-4	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =1 slip=0.003	73
5-5	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =3 slip=0.003	74

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
5-6	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =5 slip=0.003	74
5-7	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =1 และลำดับฮาร์มอนิกส์ เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.002	75
5-8	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =2 และลำดับฮาร์มอนิกส์ เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.002	75
5-9	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =3 และลำดับฮาร์มอนิกส์ เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.002	76
5-10	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =1 slip=0.002	76
5-11	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =3 slip=0.002	76
5-12	แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =5 slip=0.002	77
6-1	พิกัดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดสอบ	78
6-2	การทดลองหาค่าแรงดันเอาต์พุตที่ออกจาก ACS712 กับโหลดความต้านทาน	81
6-3	แสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตจาก ACS712 กับกระแสโหลด ความต้านทานที่เฟส A	83
6-4	ผลการทดสอบโปรแกรมเครื่องมือคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า เปรียบเทียบเครื่องมือวัดอ้างอิง ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2kW แรงดันสาย 220V-Y ในสภาวะไร้อะโหลด	85
6-5	ผลทดสอบค่าความเร็วรอบเปรียบเทียบเครื่องมือวัดอ้างอิง เมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะปกติ (Normal Condition)	89
6-6	ค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ค่าพิกัดโหลดต่างๆ	89
6-7	ผลทดสอบค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ทดสอบ กรณีลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส A7 รอบ	98
6-8	ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase A15 รอบ	100
6-9	ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase A31 รอบ	102

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
6-10 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase B7 รอบ	104
6-11 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase B15 รอบ	107
6-12 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase B31 รอบ	109
6-13 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase C7 รอบ	111
6-14 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase C15 รอบ	113
6-15 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase C31 รอบ	115
6-16 ผลการวิเคราะห์ความเร็วมอเตอร์เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรของขดลวด	132
6-17 ฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรที่เฟส A 31 รอบที่ภาวะโหลด 100%	134

รายการภาพประกอบ

		หน้า
ภาพประกอบ		
1-1	ภาพรวมของงานวิจัย	2
1-2	รูปแบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีการของ MCSA [1]	4
1-3	รูปแบบการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ [3]	6
1-4	โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก [5]	7
2-1	ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส ที่จัดเรียงในร่องสลอตสเตเตอร์ [21]	12
2-2	ประเภทของโรเตอร์ที่ใช้ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ [22]	12
2-3	ลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [21]	13
2-4	ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส [21]	14
2-5	ตำแหน่งของมุมเฟสในแต่ละช่วง [21]	15
2-6	ภาพรวมของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในกระแสสเตเตอร์ [24]	19
2-7	การแซมปลิงสัญญาณอนาล็อก	23
3-1	อัลกอริธึมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE1459-2010	40
3-2	รูปคลื่นจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์	41
3-3	รูปคลื่นจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เป็นไซน์	42
3-4	ผลทดสอบเครื่องมือการคำนวณค่าปริมาณไฟฟ้า	44
3-5	รูปคลื่นจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารวมฮาร์มอนิกส์	46
3-6	รูปคลื่นจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้ารวมฮาร์มอนิกส์	46
3-7	ผลทดสอบเครื่องมือการคำนวณค่าปริมาณไฟฟ้าในกรณีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์	49
4-1	ส่วนการทำงานของโปรแกรมย่อย SubVI ของเครื่องมือคำนวณความเร็ว	52
4-2	อัลกอริธึมการคำนวณค่าสลิปและความเร็วรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ SubVI_I	53
4-3	อัลกอริธึมการทดสอบโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็ว SubVI_II	54
4-4	ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบแรกที่ k=1, R=31 แห่งตัวนำสลอตโรเตอร์	55
4-5	ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบแรกที่ k=1, R=32 แห่งตัวนำสลอตโรเตอร์	56
4-6	ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบแรกที่ k=1, R=33 แห่งตัวนำสลอตโรเตอร์	57

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบ	
4-7 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=34$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์	57
4-8 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=35$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์	58
4-9 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=36$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์	58
4-10 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=37$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์	59
4-11 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=50$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์	60
4-12 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบสอง Dubble Check ที่ $k=2$, $R=31$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์	61
4-13 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบสอง Dubble Check ที่ $k=2$, $R=50$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์	61
4-14 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบสามที่ $k=1$, $R=31$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์	62
4-15 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบสามที่ $k=1$, $R=36$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์	63
4-16 เงื่อนไขที่เป็นจริงสอดคล้องกันตามความสัมพันธ์เมื่อโปรแกรมตรวจพบ	63
4-17 ตารางเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ได้จากการทวนสอบโปรแกรม	64
4-18 ส่วนของการ Detect Peak จากสเปกตรัมกระแสเชิงซ้อน	66
5-1 Flow chart แสดงการรับค่าข้อมูลสัญญาณ	69
5-2 Flow chart ส่วนการวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสสแตเตอร์	70
6-1 แบบจำลองการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ	79
6-2 การทดสอบงานวิจัย	79
6-3 ภาพรวมการออกแบบการทดสอบมอเตอร์ในงานวิจัย	80
6-4 การหา Slope เพื่อกำหนด Custom Scaling ของสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส	83
6-5 การกำหนดค่า Custom Scaling ของสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟสใน Labview	83

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ภาพประกอบ		
6-6	การกำหนดค่า Custom Scaling ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสใน Labview	84
6-7	ผลการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากโปรแกรมที่พัฒนา	85
6-8	ผลการคำนวณค่าความเร็วรอบที่ภาวะ NoLoad เท่ากับ 1496 rpm	87
6-9	ผลการคำนวณค่าความเร็วรอบที่ภาวะโหลด 30% เท่ากับ 1483 rpm	87
6-10	ผลการคำนวณค่าความเร็วรอบที่ภาวะโหลด 60% เท่ากับ 1466 rpm	88
6-11	ผลการคำนวณค่าความเร็วรอบที่ภาวะโหลด 100% เท่ากับ 1448rpm	88
6-12	ลำดับและขนาดฮาร์มอนิกส์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะ NoLoad	92
6-13	ลำดับและขนาดฮาร์มอนิกส์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะโหลด 30%	92
6-14	ลำดับและขนาดฮาร์มอนิกส์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะโหลด 60%	92
6-15	ลำดับและขนาดฮาร์มอนิกส์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะโหลด 100%	93
6-16	ลำดับฮาร์มอนิกส์ที่เฟส A ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ	93
6-17	ลำดับฮาร์มอนิกส์ที่เฟส B ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ	94
6-18	ลำดับฮาร์มอนิกส์ที่เฟส C ที่พิกัดโหลดต่าง ๆ	94
6-19	ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่าง ๆ	95
6-20	ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่าง ๆ	95
6-21	ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่าง ๆ	96
6-22	ค่า THDv ของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่าง ๆ	96
6-23	ค่า THDi ของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่าง ๆ	97
6-24	ค่าความเร็วของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่าง ๆ	97
6-25	การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส A ที่ภาวะ NoLoad	118
6-26	การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส A ที่ภาวะโหลด 30%	118
6-27	การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส A ที่ภาวะโหลด 60%	119
6-28	การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส A ที่ภาวะโหลด 100%	119
6-29	การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส B ที่ภาวะ NoLoad	120
6-30	การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส B ที่ภาวะโหลด 30%	120
6-31	การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส B ที่ภาวะโหลด 60%	121
6-32	การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส B ที่ภาวะโหลด 100%	121

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
6-33 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส C ที่ภาวะ Noload	122
6-34 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส C ที่ภาวะโหลด 30%	122
6-35 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส C ที่ภาวะโหลด 60%	123
6-36 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส C ที่ภาวะโหลด 100%	123
6-37 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A	124
6-38 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B	124
6-39 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C	125
6-40 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A	125
6-41 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B	126
6-42 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C	126
6-43 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A	127
6-44 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B	127
6-45 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C	128
6-46 การเปลี่ยนแปลงค่า THDv เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A	128
6-47 การเปลี่ยนแปลงค่า THDv เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B	129
6-48 การเปลี่ยนแปลงค่า THDv เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C	129
6-49 การเปลี่ยนแปลงค่า THDi เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A	130
6-50 การเปลี่ยนแปลงค่า THDi เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B	130
6-51 การเปลี่ยนแปลงค่า THDi เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C	131
6-52 การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A	133
6-53 การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B	133
6-54 การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C	134
6-55 สเปกตรัมกระแสที่เฟส A ก่อนการตั้งค่าจุดตรวจจับ Fault	135
6-56 สเปกตรัมกระแสที่เฟส B ก่อนการตั้งค่าจุดตรวจจับ Fault	136
6-57 สเปกตรัมกระแสที่เฟส C ก่อนการตั้งค่าจุดตรวจจับ Fault	136
6-58 Alarm เตือน Fault หลังการตั้งค่าจุดตรวจจับที่เฟส A	137
6-59 Alarm เตือน Fault หลังการตั้งค่าจุดตรวจจับที่เฟส B	137

6-60 Alarm เตือน Fault หลังการตั้งค่าจุดตรวจจับที่เฟส C

บทที่ 1

บทนำ

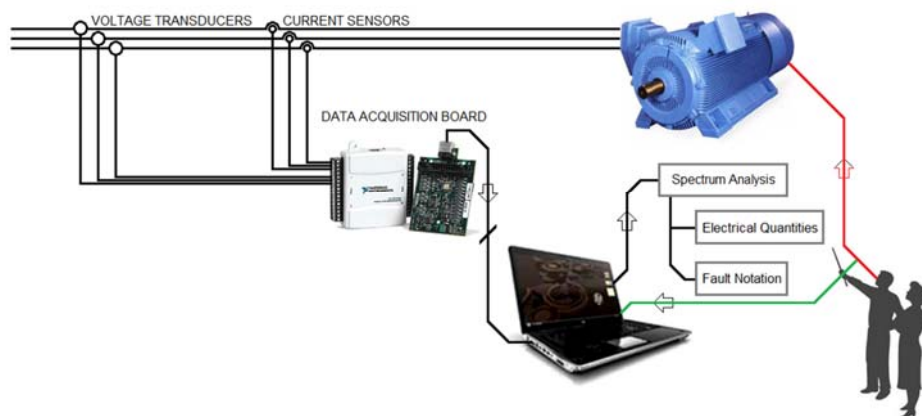
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับ นับได้ว่าเป็นส่วนสำคัญในสายงานกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก เนื่องจากว่ามีคุณสมบัติที่เป็นข้อดีในหลายด้าน เช่น ในเรื่องของความแข็งแรง มีโครงสร้างที่ทนทานไม่สลับซับซ้อน ให้ประสิทธิภาพที่สูง ตลอดจนการบำรุงรักษาทำได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมนั้นจะมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ที่ประมาณ 40% ถึง 50% ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าทั้งหมด มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้รับการยอมรับว่าเปรียบเสมือนเป็นหัวใจหลักในเรื่องของการทำหน้าที่เป็นตัวต้นกำลัง ในเรื่องของการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลเพื่อนำไปใช้ในการขับเคลื่อนชนิดต่างๆ แต่ถึงแม้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสามารถทำงานได้ดีอย่างไรก็ตาม ก็ยังสามารถเกิดความเสียหายขึ้นได้ ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1.ความเสียหายของมอเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งาน ความเสียหายในส่วนนี้จะเข้าไปในเรื่องของความเสื่อมสภาพของมอเตอร์อันเนื่องมาจากระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ลดลงไปด้วยเช่นกัน 2.ความเสียหายของมอเตอร์ที่ไม่มีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งาน ความเสียหายในส่วนนี้จะเข้าไปในเรื่องของความผิดปกติที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากหลากหลายสาเหตุที่ต่างกันไป [1] ดังตาราง 1-1 อาทิเช่น ความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ เช่น ความผิดปกติในเรื่องของแบร์ริง ความผิดปกติในเรื่องของขดลวดสเตเตอร์ ความผิดปกติในเรื่องของโรเตอร์ และจากความผิดปกติอันเนื่องมาจากสาเหตุอื่น ๆ อาทิเช่น ในเรื่องของการใช้งานที่สภาพแวดล้อมโดยทั่วไปไม่เหมาะสม การนำมอเตอร์ไปใช้ขับเคลื่อนที่เกินกำลัง การจัดสรรระบบควบคุมที่ไม่เหมาะสม การใช้งานโดยไม่ได้มีการตรวจสอบบำรุงรักษาตามระยะที่กำหนดเป็นระยะเวลานาน ๆ ซึ่งความผิดปกติที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปบางกรณีเช่น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การสั่นสะเทือนของมอเตอร์นั้น ผู้ใช้สามารถที่จะสังเกตสภาพทางกายภาพได้จากประสบการณ์ของผู้ใช้ แต่ในบางกรณีนั้นผู้ใช้ไม่อาจที่จะทราบได้แน่ชัดว่าขณะนี้มอเตอร์มีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายขึ้นได้หรือไม่ การวิเคราะห์และประเมินสถานะของมอเตอร์นั้นจึงไม่อาจที่จะบ่งบอกได้ว่าขณะนั้นมอเตอร์อยู่ในสถานะการทำงานที่เป็นไปอย่างไร ทั้งนี้เพื่อให้การประเมินสถานะการทำงานของมอเตอร์นั้นมีน้ำหนักของคำตอบที่จะระบุไว้ในขณะนี้ มอเตอร์มีสถานะการทำงานอย่างไร จึงต้องอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Line voltage) และสัญญาณกระแสไฟฟ้า (Line current) มาทำการวิเคราะห์อธิบายถึงสถานะการทำงานของมอเตอร์ในขณะนั้น โดยทั่วไปแล้วความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟฟ้านั้น จะมีสาเหตุมาจากความเสียหายที่เริ่มจากเล็กน้อยแล้วลุกลามเป็นปัญหาใหญ่ ดังนั้นการที่ผู้ใช้งาน

สามารถที่จะตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์และทราบได้ถึงแนวโน้มเริ่มต้นที่อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่าง ๆ ตามมาต่อมอเตอร์ ก็จะเป็นผลดีในการแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้นตามมาได้ทันเวลาก่อนที่จะเกิดความเสียหายรุนแรง

ในส่วนของการซ่อมบำรุงรักษามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเป็นต้นกำลังหลักส่วนใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น จัดเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความซับซ้อน การวินิจฉัยสภาพการทำงานก่อนการเบรกดาวน์ (Breakdown) เพื่อทำนายสภาพความสมบูรณ์ปัจจุบันของมอเตอร์ไฟฟ้า จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ และเครื่องมือตรวจวัดที่ซับซ้อน อีกทั้งในเรื่องของราคาที่ยังค่อนข้างสูง ทำให้ผู้ใช้ต้องลงทุนงบประมาณในส่วนนี้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการที่ผู้ใช้งานสามารถที่จะลดต้นทุนในส่วนงบประมาณที่ต้องเพิ่มขึ้นนั้นก็ส่งผลดีในด้านกลยุทธ์การบำรุงรักษาไปได้โดยปริยายด้วย

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอถึงวิธีการประเมินสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งอยู่ในรูปแบบของเครื่องมือตรวจวัดเสมือนที่ออกแบบพัฒนาสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม LABVIEW โดยการรับค่าข้อมูล 2 ส่วน ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและส่วนของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจวัดมาทำการวินิจฉัย วิเคราะห์ประเมินในเรื่องของค่าปริมาณทางไฟฟ้าตามมาตรฐานการคำนวณ IEEE1459-2010 ค่าปริมาณทางกลเช่นค่าสลิปและความเร็วรอบของมอเตอร์ ด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์จากสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำ อีกทั้งจะวิเคราะห์ในเรื่ององค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่ปะปนอยู่ในสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดว่าเป็นผลที่เกิดขึ้นมาจากสาเหตุความผิดปกติใด และเป็นไปตามเงื่อนไขการทำงานที่ปกติหรือไม่ ซึ่งสามารถที่จะแจ้งสถานะแนวโน้มการทำงานในขณะนั้นให้ผู้ใช้งานทราบได้ถึงสถานะการทำงานเบื้องต้นผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยสามารถที่จะนำเครื่องมือตรวจวัดเสมือนที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์สถานะการทำงานได้ทั้งแบบออนไลน์และแบบออฟไลน์



ภาพประกอบ 1-1 ภาพรวมของงานวิจัย

ตาราง 1-1 สัดส่วนของเปอร์เซ็นต์ลำดับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยเปรียบเทียบให้เห็นจาก 2 มาตรฐาน [12]

Failed Component	Percentage of failures (%)	
	IEEE- IAS	EPRI
Bearings Related	44	41
Windings Related	26	36
Rotor Related	8	9
Others	22	14

จากตาราง 1-1 เป็นการจัดลำดับของชนิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยแบ่งเป็น 2 มาตรฐานในการจัดลำดับดังนี้

1. มาตรฐาน IEEE-IAS สํารวจจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งหมด 1,141 ตัว
2. มาตรฐาน Electric Power Research Institute (EPRI) ซึ่งได้ทำการสํารวจจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งหมด 6,312 ตัว

จากสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ข้างต้น จะเห็นได้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากแบร์ริงจะเกิดขึ้นมากที่สุด ถัดมาจะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ ความผิดพลาดที่เกิดจากสาเหตุอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกมอเตอร์ ซึ่งก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์ใหม่ปะปนอยู่ในรูปคลื่นของสัญญาณทางไฟฟ้า และสุดท้ายก็จะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากโรเตอร์ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่ตรวจพบได้น้อยที่สุด

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives–Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories [1] งานวิจัยชิ้นนี้เขียนโดย William T. Thomson ได้นำเสนอเทคนิควิธีการวิเคราะห์กระแสมอเตอร์ (Motor current signature analysis : MCSA) เพื่อใช้ในการวินิจฉัยมอเตอร์เหนี่ยวนำ เช่น ความผิดพลาดที่เกิดจากแท่งตัวนำโรเตอร์เสียหาย การลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ และความไม่สมมาตรของช่องว่างอากาศ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบในเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยในบทความได้อธิบายไว้ซึ่งที่มาความหมายของ MCSA, ความน่าเชื่อถือในการใช้วิธีการของ MCSA ในระบบเครื่องมือวัด, การวิเคราะห์ตีความจากสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดได้จากมอเตอร์เหนี่ยวนำ อีกทั้งได้อธิบายถึงสมการการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบของความถี่เมื่อเกิดความผิดพลาดในกรณีของการเกิดความไม่สมมาตรของช่องว่างอากาศ การลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ ความเสียหายที่เกิดจากแท่งตัวนำโรเตอร์เกิดความเสียหาย, ตลอดจนตัวอย่างการใช้ MCSA ในการวิเคราะห์สาเหตุที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำจากข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ซึ่งได้แสดงรูปแบบการวิเคราะห์แบบ MCSA ไว้ดังภาพประกอบ 1-2

ตาราง 1-2 สาเหตุความผิดปกติที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [2]

Causes \ Faults	Machine Overloading	Unbalanced operation	Leakage in cooling system	Transient over voltage	Vibration	Contamination and abrasion	Manufacturing/ installation defect	Incorrect positioning of rotor and stator, bent rotor shaft	Bearing misalignment, wear, improper lubrication	Bearing current
Winding inter turn short circuit	√	√	√	√			√			
Rotor broken bar	√	√			√	√	√	√		
Air gap eccentricity							√	√	√	
Bearing fault							√	√	√	√

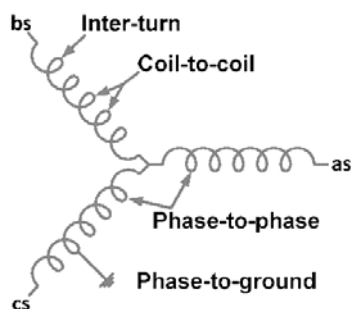
จากตาราง 1-2 จะเป็นสาเหตุต่างๆ ที่ส่งผลให้เกิดความผิดปกติขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นแต่ละแบบนั้นก็เกิดองค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่รวมอยู่ในรูปคลื่นสัญญาณไซน์แสดงลักษณะขององค์ประกอบความถี่ร่วมที่เกิดขึ้นได้ ดังตาราง 1-3

ตาราง 1-3 แสดงองค์ประกอบของความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์เกิดความผิดปกติ [2]

Faults	Stator current frequency component
Stator turn fault	$f_s = (n(1-s) / p \pm k) f$ where $n=1,2,3,\dots$; $k=1,3,5,\dots$
Rotor broken bar	$f_{stbb} = [\frac{\eta}{p}(1-s) \pm s] f$ where $\eta/p = 1,3,5,\dots$
Air gap eccentricity	$f_{ecc} = [(N_r + n_d)(\frac{1-s}{p}) \pm k] f$ N_r =number of rotor bars; $n_d = \pm 1$; $k=1,3,5,\dots$
Bearing fault	$f_{bng} = f \pm n f_v $ where $n=1,2,3,\dots$; f_v = vibration frequency

1.2.3 Review of Induction Motor Testing and Monitoring Methods for Inter-turn Stator Winding Faults [3] งานวิจัยนี้เขียนโดย M. Eftekhari ซึ่งในบทความนี้ผู้เขียนได้ทำการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาในอดีตในเรื่องของการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ หรือความผิดปกติที่เกิดจากการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยได้ทำการสำรวจการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งไม่สามารถที่จะตรวจพบความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ซึ่งถือเป็นสาเหตุหลัก แม้ว่าจะมีวิธีการตรวจสอบสถานะที่ต่างกันไป แต่ในงานการสำรวจจะมุ่งเน้นไปที่วิธีการตรวจสอบสถานะแบบออนไลน์ในขณะที่มอเตอร์ยังทำงานอยู่ในระบบ จากหลากหลายการสำรวจพบว่าสาเหตุหลักๆ ที่ทำให้เกิดความผิดปกติในมอเตอร์นั้นแบ่งได้ออกเป็น 4 ประเภทด้วยกันคือ ความผิดปกติที่เกิดจากขดลวดลัดวงจร ความผิดปกติที่เกิด

จากแบร์ริง ความผิดพร่องที่เกิดจากความเสียหายของแท่งตัวนำโรเตอร์ และความผิดพร่องที่เกิดจากความไม่สมมาตรของช่องว่างอากาศ และพบว่า 30-40% ของความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร ซึ่งในบทความนี้ได้ให้เหตุผลไว้ว่าหากมีการตรวจสอบความผิดพร่องที่เกิดจากขดลวดลัดวงจรได้ก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการป้องกันความเสียหายที่อาจจะมี ความรุนแรงเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งแสดงรูปแบบการลัดวงจรของขดลวดได้ดังภาพประกอบ 1-3



ภาพประกอบ 1-3 รูปแบบการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ [3]

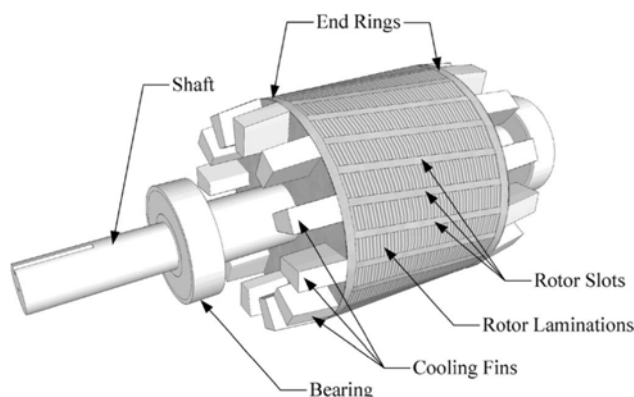
1.2.4 Measurement of Power Components in Balanced and Unbalanced Three-Phase Systems Under Nonsinusoidal Operating Conditions by Using IEEE Standard 1459-2010 and Fourier Analysis [4] งานวิจัยนี้เขียนโดย A. Mansour ซึ่งได้ยกคำจำกัดความของส่วนประกอบกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลและไม่สมดุลกับรูปคลื่นไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นสัญญาณไซน์ ตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐานเดิม IEEE 1459-2000 ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน และกำลังไฟฟ้าปรากฏ ตลอดจนค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยฮาร์มอนิกที่รวมอยู่ในสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ารวมกับวิธีการวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม ซึ่งสามารถสรุปสมการคำนวณได้ดังตาราง 1-4

ตาราง 1-4 สรุปค่าการวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่รูปคลื่นไม่เป็นไซน์ [4]

Quantity	Combined	Fundamental	Nonfundamental
Apparent (VA)	$S_e = 3 V_e I_e$	$S_{e1} = 3 V_{e1} I_{e1}$ $S_{V1} = \sqrt{S_{e1}^2 - S_{i1}^2}$	$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2}$ $S_{eN} = 3 V_{eN} I_{eN}$
Active (W)	$P = \sum_{a,b,c} \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos \theta_h$	$P_{i1} = 3 V_{i1} I_{i1} \cos \theta_{i1}$	$P_N = \sum_{a,b,c} \sum_{h=2}^n V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1$
Nonactive (VAR)	$N = \sqrt{S_e^2 - P^2}$	$Q_{i1} = 3 V_{i1} I_{i1} \sin \theta_{i1}$	$D_{e1} = 3 V_{e1} I_{eN}$ $DeN = 3 V_{eN} I_{e1}$ $D_{eN} = \sqrt{S_{eN}^2 - P_N^2}$
Line utilization	$PF = P/S_e$	$PF_{i1} = P_{i1}/S_{i1}$	-
Harmonic pollution	-	-	S_{eN}/S_{e1}
Load Unbalance	-	S_{V1}/S_{i1}	-

โดยในบทความได้สรุปตัวอย่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากรูปคลื่นสัญญาณที่ประกอบด้วยฮาร์มอนิกส์ต่างๆ ความถูกต้องของวิธีการคำนวณที่นำเสนอแสดงให้เห็นผลผ่านการจำลอง ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

1.2.5 A Frequency Demodulation Approach to Induction Motor Speed Detection [5] งานวิจัยนี้เขียนโดย Zhi Gao ได้กล่าวถึงความถี่ฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์ที่พบในรูปคลื่นกระแสเตเตอร์ว่ามีลักษณะของตำแหน่งความถี่อยู่ในบริเวณใดของสเปกตรัมกระแสไฟฟ้าและที่มาของวิธีการประมาณค่าความเร็วรอบจากสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากผลของสล็อตโรเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบโรเตอร์กรงกระรอกนั้น ดังภาพประกอบ 1-4



ภาพประกอบ 1-4 โครงสร้างของโรเตอร์แบบกรงกระรอก [5]

ซึ่งความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งในบทความได้นำเสนอวิธีการเปลี่ยนรูปกระแสเฟสที่ตรวจวัดได้ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์กระแสเชิงซ้อนดังสมการที่ 1.1

$$i_C = \frac{2}{3}(i_a + \alpha \cdot i_b + \alpha^2 \cdot i_c) \quad (1.1)$$

ขั้นตอนถัดมาจะทำการคัดกรองฮาร์มอนิกส์ที่โดดเด่นที่สุดจากฮาร์มอนิกส์อื่น ๆ และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการคำนวณความเร็วรอบจากโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิกส์ที่มีอิมพีแดนซ์สูงสุด ผลการทดลองที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ สามารถที่จะใช้ทฤษฎีผลของฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์เป็นวิธีการประมาณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลร่วมกับไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ตัวตรวจวัดความเร็วได้

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและสัญญาณกระแสไฟฟ้า ที่ชั่วเสตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมอเตอร์มีสถานะการทำงานที่ปกติและผิดปกติ
- 1.3.2 เพื่อศึกษาแนวทางการนำค่าสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้ามาคำนวณหา ค่าปริมาณทางไฟฟ้า ค่าปริมาณทางกล และวิเคราะห์ถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้
- 1.3.3 เพื่อออกแบบและพัฒนาสร้างเครื่องมือตรวจวัดเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW ในการประเมินสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เรียนรู้และเข้าใจในกระบวนการนำค่าสัญญาณสเปกตรัมกระแสไฟฟ้ามาวิเคราะห์หาค่าปริมาณทางไฟฟ้า ค่าปริมาณทางกล ตลอดจนนำค่าสัญญาณสเปกตรัมไปใช้ในการประเมินแนวโน้มบ่งบอกได้ถึงสถานะการทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
- 1.4.2 สามารถนำเครื่องมือตรวจวัดเสมือนไปใช้ในการประเมินสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขณะทำงานออนไลน์ได้

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.5.1 ออกแบบวงจรในการประเมินค่าสัญญาณสเปกตรัมที่ได้จากข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ชั่วเสตเตอร์แล้วคำนวณหาค่าปริมาณทางไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้า (V) กระแสไฟฟ้า (I) กำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) ค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ค่าความผิดเพี้ยน (THD) และค่าปริมาณทางกล เช่น ความเร็วรอบมอเตอร์ (n_r) และค่าสลิป (s) ได้
- 1.5.2 พัฒนาออกแบบโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อที่จะเป็นเครื่องมือตรวจสอบให้ผู้ใช้งาน ทราบได้เบื้องต้นว่าขณะนั้นมอเตอร์มีการทำงานอยู่ในสถานะที่ปกติดีหรือไม่

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.6.1 ศึกษาและวิเคราะห์ทฤษฎี หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.2 พัฒนารูปแบบการวิจัยให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้
- 1.6.3 วิเคราะห์วิธีการวิจัยที่พัฒนา
- 1.6.4 ออกแบบอัลกอริธึมการทำงาน
- 1.6.5 สร้างวงจรต้นแบบ
- 1.6.6 ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.6.7 แก้ไขและปรับปรุงวงจร

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งจะแบ่งแยกออกเป็นลำดับๆ ไป โดยเริ่มจาก ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสซึ่งจะอธิบายตั้งแต่ความสำคัญของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ลักษณะทางโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ พารามิเตอร์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ถัดไปจะเป็นเรื่องของที่มาของปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งก็คือฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ จากนั้นจะเป็นในส่วนของการวิเคราะห์ตรวจสอบสถานะของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อจะนำทฤษฎีต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยเริ่มจากการนำทฤษฎีการวิเคราะห์กระแสมอเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการประเมินองค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกส์ต่างๆ ที่รวมอยู่ในสัญญาณกระแสเตเตอร์ในโดเมนทางเวลา ร่วมกับการใช้ทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อที่จะวิเคราะห์ในโดเมนทางความถี่ สุดท้ายจะเป็นในส่วนของการประเมินสถานะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากค่าปริมาณทางไฟฟ้าและค่าปริมาณทางกล ด้วยการใช้โปรแกรม LabVIEW

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำจัดได้ว่าเป็นเครื่องจักรกลที่มีความทนทานมากที่สุดและเป็นเครื่องจักรกลที่มีการใช้งานมากที่สุดในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยส่วนของขดลวดสเตเตอร์ซึ่งอยู่กับที่ และส่วนของโรเตอร์ซึ่งหมุนได้โดยติดตั้งอยู่บนแบร์ริงแยกจากส่วนของสเตเตอร์ด้วยช่องว่างอากาศ กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์จะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งส่วนของสเตเตอร์จะป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปโดยตรง ในส่วนของโรเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับจะได้อาจมาจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าซึ่งเป็นที่มาของชื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถที่จะทำงานได้ทั้งแบบมอเตอร์หรือแบบเจนเนอเรเตอร์ แต่คุณลักษณะของการทำงานเป็นแบบเจนเนอเรเตอร์เพื่อจ่ายกระแสให้กับโหลดนั้นจะไม่ค่อยดีนัก จึงมีการใช้งานน้อยมาก แต่จะนิยมใช้งานเป็นแบบมอเตอร์มากที่สุด ขนาดของมอเตอร์เหนี่ยวนำในปัจจุบันนั้นมีอยู่ด้วยกันหลากหลายขนาด ตั้งแต่มอเตอร์เฟสเดียวที่มีขนาดเล็กหรือที่เรียกว่าแรงม้าเศษส่วน (fractional horsepower) เป็นมอเตอร์ที่ใช้งานภายในบ้านเช่น เครื่องตัดหญ้า เครื่องซักผ้า เครื่องปั่นน้ำผลไม้ ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ส่วนมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่มักจะเป็นมอเตอร์สามเฟส เช่น ปั๊มน้ำ พัดลม โบลเวอร์ คอมเพรสเซอร์ มอเตอร์ที่ใช้ในโรงงานผลิตกระดาษ โรงงานทอผ้า เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังมีเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำที่มีโครงสร้างพิเศษเพื่อใช้งานที่มีการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น (linear induction motor) เพื่อใช้งานในระบบขนส่ง และแบบสองเฟสที่เรียกว่าเซอร์โวมอเตอร์ (servomotor) เพื่อใช้งานในระบบควบคุม

2.1.1 ประเภทของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งออกได้หลายประเภท (Class) ตามรูปร่างของสล็อตที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะมีคุณลักษณะตามความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่างๆ โดยพิจารณาจากแรงบิดขณะเริ่มหมุน กระแสขณะเริ่มหมุน และค่าของสลลิป ส่วนประกอบทางโครงสร้างที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำในแต่ละประเภทมีคุณลักษณะแตกต่างกันก็คือ การออกแบบแผ่นลามีเนทที่ประกอบเป็นรูปร่างของโรเตอร์ โดยกำหนดขึ้นจากสมาคมผู้ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้านานาชาติ (Electrical Manufacturers Association, NEMA) แบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามลักษณะของการนำไปใช้งาน ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส Class A เป็นมอเตอร์ที่ให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนปกติ กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มหมุนปกติ และมีสลลิปปกติ เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไป วงจรโรเตอร์มีความต้านทานต่ำ และคาร์แอคแทนซ์ต่ำ ตัวนำที่ฝังในร่องสล็อตของโรเตอร์จะอยู่ใกล้ผิวหน้าเพื่อเป็นการลดคาร์แอคแทนซ์ของโรเตอร์

2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส Class B เป็นมอเตอร์ที่ให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนปกติ กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มหมุนต่ำ และมีสลลิปปกติ เป็นมอเตอร์ที่สามารถเริ่มหมุนในขณะที่มีโหลดเต็มที่ได้ ตัวนำที่ฝังอยู่ในร่องสล็อตของโรเตอร์จะมีคาร์แอคแทนซ์สูง ร่องสล็อตสำหรับฝังตัวนำจะลึกและแคบ

3. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส Class C เป็นมอเตอร์ที่ให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มหมุนต่ำ และมีค่าสลลิปปกติ มอเตอร์ชนิดนี้โรเตอร์จะเป็นแบบกรงกระรอก 2 ชั้น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง

4. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส Class D เป็นมอเตอร์ที่ให้แรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มหมุนต่ำและมีค่าสลลิปสูง มอเตอร์ชนิดนี้ความต้านทานของตัวนำโรเตอร์จะมีค่าสูง จึงทำให้เกิดแรงบิดขณะเริ่มหมุนสูง

นอกจากนี้ยังมี Class E และ F ซึ่งจะนำไปใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีการเริ่มหมุนเป็นแบบ Soft-Start ที่มีลักษณะเด่นในเรื่องของ กระแสขณะเริ่มหมุนต่ำ และแรงบิดในการเริ่มหมุนของโหลดมีค่าต่ำ มอเตอร์ชนิดนี้จะมีการรั่วไหลของรีแอคแทนซ์สูง ซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาในเรื่องของกระแสในขณะเริ่มหมุนสูงได้

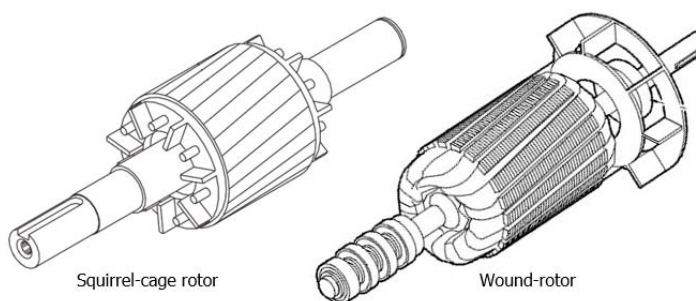
2.1.2 ลักษณะทางโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากข้อมูลข้างต้นจะทราบได้ว่ามอเตอร์มีส่วนประกอบพื้นฐานอยู่ด้วยกันสองส่วน คือ ส่วนของสเตเตอร์ และส่วนของโรเตอร์ ดังภาพประกอบ 2-3 โครงสร้างของสเตเตอร์ประกอบด้วยแผ่นอัดชนิดเหล็กกล้ามาประกบซ้อนกันเป็นตัวยูรูปทรงกระบอก เพื่อเป็นทางเดินของสนามแม่เหล็ก ขดลวดสเตเตอร์ทั้งสามเฟส จะจัดวางอยู่ในร่องบนผิวด้านในของตัวยู ดังภาพประกอบ 2-1



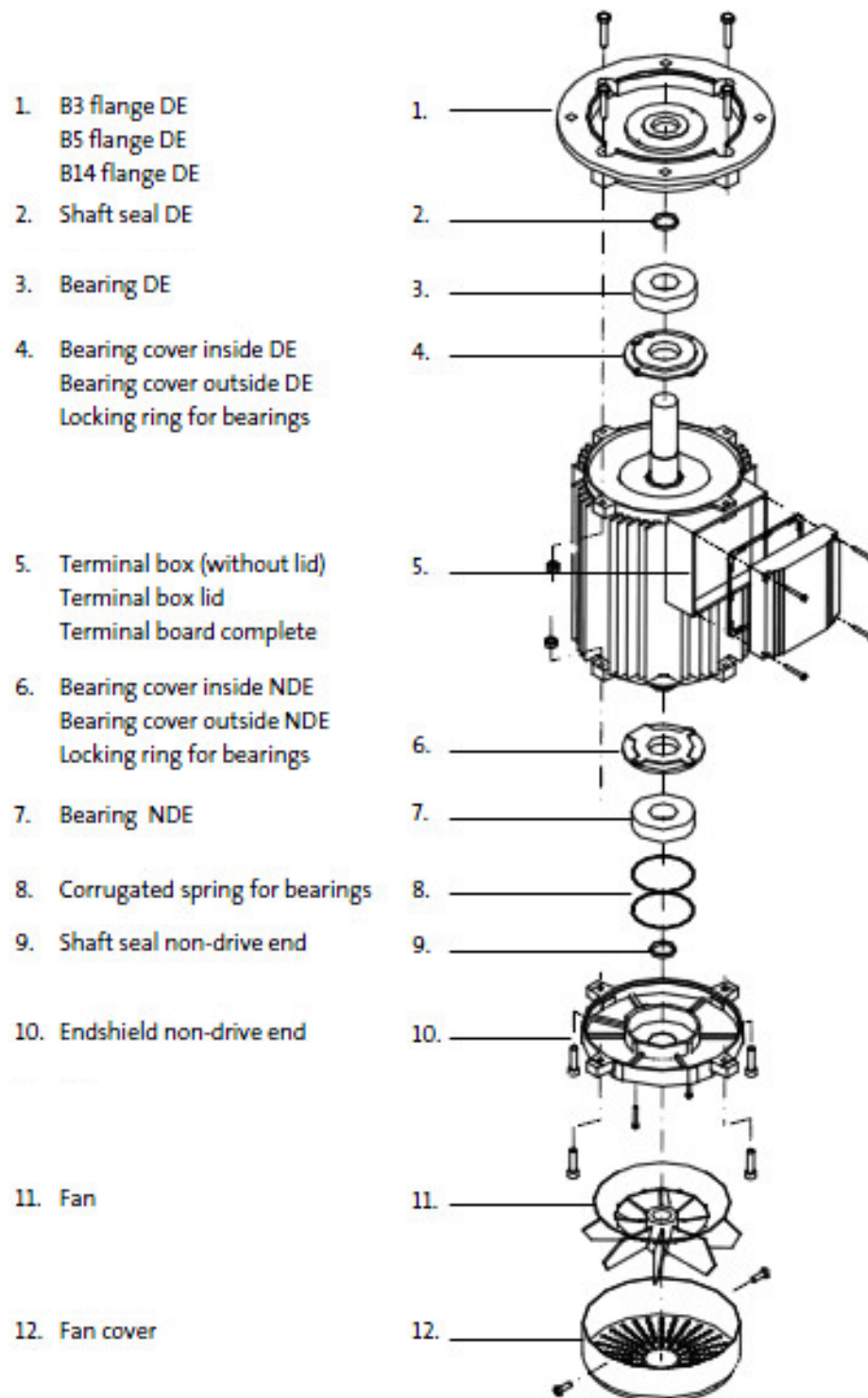
ภาพประกอบ 2-1 ขดลวดสเตเตอร์ 3 เฟส ที่จัดเรียงในร่องสล๊อตสเตเตอร์ [21]

ส่วนโครงสร้างของโรเตอร์จะประกอบด้วยแผ่นโลหะชนิดเฟอร์โรแมกเนติกประกบอัดกันเป็นรูปทรงกระบอกและทำร่องไว้บนผิวด้านนอกสำหรับฝังตัวนำหรือวางขดลวด ระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์จะเป็นช่องอากาศแบบสม่ำเสมอรอบ ๆ ทรงกระบอก ขดลวดบนโรเตอร์มีสองแบบด้วยกัน คือ แบบกรงกระรอก (squirrel-cage) และแบบพันขดลวด (wound-rotor) ดังภาพประกอบ 2-2



ภาพประกอบ 2-2 ประเภทของโรเตอร์ที่ใช้ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ [22]

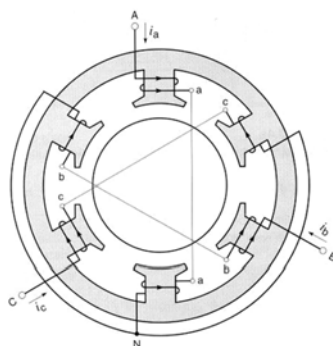
โรเตอร์แบบกรงกระรอกจะประกอบด้วยแท่งทองแดงหรือแท่งอะลูมิเนียมฝังอยู่ในร่องโรเตอร์ แล้วปิดหัวท้ายสั้ววงจรด้วยแหวนทองแดงหรืออะลูมิเนียม ส่วนแบบพันขดลวดจะมีรูปแบบเหมือนกันกับขดลวดสเตเตอร์ ปลายของขดลวดโรเตอร์จะต่ออยู่กับวงแหวนลื่น (Slip ring) สามอันเข้าด้วยกัน จะใช้แปรงถ่านซึ่งยึดอยู่กับที่กดสัมผัสอยู่บนวงแหวนลื่น ทำให้ปลายขดลวดของโรเตอร์ต่อกับวงจรภายนอกที่เป็นตัวต้านทานแบบสามเฟสได้ จุดประสงค์เพื่อใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เมื่อพิจารณาโครงสร้างทั้งสองแล้วจะเห็นว่าโครงสร้างแบบกรงกระรอกมีโครงสร้างที่ง่ายกว่า ประหยัดกว่า และทนทานกว่าโครงสร้างแบบพันขดลวด ลักษณะของโครงสร้างมอเตอร์ ดังภาพประกอบ 2-3



ภาพประกอบ 2-3 ลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [21]

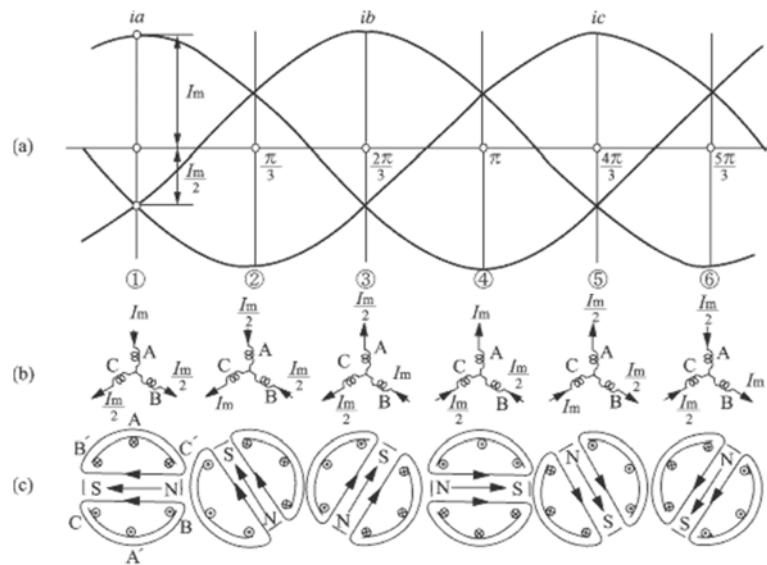
2.1.3 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการทำงานของมอเตอร์สามเฟสเหนี่ยวนำ เกิดขึ้นจากการหมุนของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวด 3 ชุด วางทำมุมกัน 120° ทางไฟฟ้า โดยขดลวดทั้ง 3 ชุดนั้นได้รับไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟส ดังภาพประกอบ 2-4



ภาพประกอบ 2-4 ลักษณะการวางขดลวดของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส [21]

จากภาพประกอบ 2-4 เมื่อกระแส I ไหลผ่านขดลวด จะสร้างสนามแม่เหล็ก H ขึ้น โดยเกิดเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้ ที่ขดลวดนั้น สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกับกระแส I และกระจายออกไปในช่องว่างอากาศ ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์และจะสลับขั้วที่มุม 180° ทางไฟฟ้า ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดชุด A ชุด B และชุด C ก็คือ H_A , H_B , และ H_C ซึ่งเกิดจากกระแส I_A , I_B , และ I_C โดยแต่ละเฟสจะทำมุมห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า ส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กจะไหลผ่านโรเตอร์และสเตเตอร์ ผลของสนามแม่เหล็กที่เวลาใดๆ คือ ผลรวมของสนามแม่เหล็กทั้ง 3 เฟส H_A , H_B , และ H_C จะเคลื่อนที่แบบคลื่นรูปไซน์ไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ดังภาพประกอบ 2-5 ที่ตำแหน่งมุม 180° ทางไฟฟ้า ของกระแสทั้ง 3 เฟส ผลของสนามแม่เหล็ก H_A มีค่าสูงสุดทางด้านลบ เนื่องด้วยกระแสในเฟส A มีค่าสูงสุด และสนาม H_B และ H_C มีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด ดังนั้นผลรวมของสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งนี้จึงมีทิศทางไปตามเฟส A ทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาการกระทำที่ตำแหน่งอื่น ๆ ซึ่งเกิดขึ้นซ้ำ ๆ แบบเดิมในทุกตำแหน่งจนครบ 1 คาบ สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนนี้เกิดขึ้นโดยกระแสที่ไหลผ่านขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 3 เฟส และจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในแท่งตัวนำของโรเตอร์ขึ้น เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์ตัดผ่านแท่งตัวนำโรเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ที่มีขั้วตรงกันข้ามกับสเตเตอร์ ทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกัน ดังนั้นทิศทางการหมุนของโรเตอร์ก็จะเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนสเตเตอร์ แต่ตัวโรเตอร์จะหมุนช้ากว่าเล็กน้อย ความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนจากขดลวดสเตเตอร์กับความเร็วโรเตอร์นี้เรียกว่า ความเร็วสลิป (Slip-speed)



ภาพประกอบ 2-5 ตำแหน่งของมุมเฟสในแต่ละช่วง [21]

2.1.4 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.1.4.1 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า [23]

ในส่วนของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสจะมีมุมที่ห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า หรือเท่ากับ $2\pi/3$ electric radians เมื่อใช้แรงเคลื่อนเฟส A เป็นตัวเปรียบเทียบ แรงเคลื่อนทั้งสามเฟสอธิบายได้จากสมการ (2.1)

$$\begin{aligned} v_a &= V_m \cos(\omega t) \\ v_b &= V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_c &= V_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อ	v_a	คือแรงเคลื่อนของเฟส A	(V)
	v_b	คือแรงเคลื่อนของเฟส B	(V)
	v_c	คือแรงเคลื่อนของเฟส C	(V)
	V_m	คือแรงเคลื่อนสูงสุดของแต่ละเฟส	(V)
	ω	คือความเร็วเชิงมุม	(rad/sec)
	φ	คือมุมล้าหลังของพาวเวอร์แฟกเตอร์	(rad)
	t	คือเวลา	(sec)

แรงเคลื่อนทั้งสามเฟสสามารถเขียนให้อยู่ในรูป Polar Form ได้ดังสมการ (2.2)

$$\begin{aligned}v_a &= V_m \angle 0^\circ \\v_b &= V_m \angle -120^\circ \\v_c &= V_m \angle 120^\circ\end{aligned}\quad (2.2)$$

อนึ่ง เนื่องจากแรงเคลื่อนแต่ละเฟสมีมุมห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า และสมมาตรกันทั้งสามเฟส ผลรวมของแรงเคลื่อนทั้งสามเฟสจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการ (2.3)

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (2.3)$$

ระบบแรงเคลื่อน 3 เฟสอธิบายให้อยู่ในรูปแรงเคลื่อนเฟส (phase voltage: v_p) หรือแรงเคลื่อนไลน์ (line voltage: v_l) ความสัมพันธ์ระหว่าง v_p และ v_l อธิบายได้ดังสมการ (2.4)

$$v_l = \sqrt{3}v_p \quad (2.4)$$

เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3 เฟสจ่ายไฟเข้ามอเตอร์ กระแสเฟสจะทำมุมล่าหลัง (lagging) กับแรงเคลื่อนเฟส มุมระหว่างแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้านี้เรียกว่าตัวประกอบกำลัง (power factor; φ) ในกรณีของ v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} หาค่าโดยใช้สมการ (2.5)

$$\begin{aligned}\bar{V}_{ab} &= \bar{V}_a - \bar{V}_b \\ \bar{V}_{bc} &= \bar{V}_b - \bar{V}_c \\ \bar{V}_{ca} &= \bar{V}_c - \bar{V}_a\end{aligned}\quad (2.5)$$

ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนเฟส V_m เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่าใช้งาน (effective voltage) หรือแรงเคลื่อนอาร์เอ็มเอส V_{rms} โดยใช้ตัวประกอบคูณกับ $\sqrt{2}$ ดังสมการ (2.6)

$$\begin{aligned}V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi [V_m \cos(\omega t)]^2 d(\omega t)} \\ V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} V_m^2 \left[\frac{1}{2} (\omega t - \sin(\omega t) \cos(\omega t)) \right]_0^\pi}\end{aligned}\quad (2.6)$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

มอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับไฟฟ้า 3 เฟส จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มีเฟสห่างกัน 120° ทางไฟฟ้า (phase-shifted) หรือ $2\pi/3$ electric radians กระแสทั้ง 3 เฟส สามารถหาค่าได้ตามสมการ (2.7)

$$\begin{aligned} i_a &= I_m \cos(\omega t - \varphi) \\ i_b &= I_m \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c &= I_m \cos\left(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

เมื่อ	i_a	คือกระแสของเฟส A	(A)
	i_b	คือกระแสของเฟส B	(A)
	i_c	คือกระแสของเฟส C	(A)
	i_m	คือกระแสสูงสุดของแต่ละเฟส	(A)
	ω	คือความเร็วเชิงมุม	(rad/sec)
	φ	คือมุมล้าหลังของพาวเวอร์แฟกเตอร์	(rad)
	t	คือเวลา	(sec)

เนื่องจากกระแสแต่ละเฟสทำมุมห่างกัน 120° ทางไฟฟ้าที่มีลักษณะสมมาตรกัน ผลรวมของกระแสทั้งสามเฟสมีค่าเป็นศูนย์ คำนี้อาจหาได้โดยใช้สมการ (2.8)

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.8)$$

2.1.4.2 อัตราเร็วซิงโครนัส อัตราเร็วซิงโครนัส อัตราเร็วสลิป

เมื่อขดลวดสเตเตอร์ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีความถี่เชิงมุม ω เข้าไปที่ขดลวดสเตเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (revolving field) ขึ้นในช่องอากาศ (air-gap) ระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส ω_s (synchronous speed) ซึ่งหาได้จากสมการ 2.9

$$\omega_s = \frac{2}{P} \omega = \frac{4\pi f_s}{P} \quad (2.9)$$

หรือ
$$n_s = \frac{120f_s}{P} \quad (2.10)$$

เมื่อ P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (pole)
 n_s คือ อัตราเร็วซิงโครนัส (rpm)
 f_s คือ ความถี่จากแหล่งจ่าย (Hz)

ถ้าอัตราเร็วของโรเตอร์เป็น n_r ดังนั้นความแตกต่างระหว่างอัตราเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนกับอัตราเร็วโรเตอร์ก็คืออัตราเร็วสลิป (slip-speed) จะมีค่าดังสมการ 2.11

$$\text{slip-speed} = n_s - n_r \quad (2.11)$$

อัตราเร็วสลิปมีหน่วยเป็น รอบ/นาที n_r คือความเร็วโรเตอร์มีหน่วยเป็น รอบ/นาที เช่นเดียวกัน (slip หมายถึงการไถล, การลื่น) และให้ s เป็นสลิปซึ่งหาค่าได้จากสมการ 2.12

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.12)$$

จากสมการ 2.12 จะได้สมการที่ใช้สำหรับการหาค่าอัตราเร็วโรเตอร์ได้ตามสมการ 2.13

$$n_r = n_s(1-s) \quad (2.13)$$

ค่าอัตราเร็วสลิปนี้จะขึ้นอยู่กับโหลด กล่าวคือ เมื่อโหลดมากขึ้นก็จะมีผลทำให้โรเตอร์หมุนช้าลงส่งผลให้อัตราเร็วสลิปมีค่ามากขึ้น ทำให้โรเตอร์ถูกสนามแม่เหล็กลัพท์หมุนตัดด้วยอัตราเร็วมากขึ้น ทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่ามากขึ้น ผลก็คือกระแสในตัวโรเตอร์มากขึ้น และด้วยหลักการเดียวกันกับหม้อแปลงเมื่อกระแสด้านทุติยภูมิมากขึ้นก็ส่งผลให้กระแสในสเตเตอร์ซึ่งเป็นกระแสด้านปฐมภูมิมีค่ามากขึ้นด้วย เราจึงสามารถกล่าวได้ว่า ภาระทางกลจะถูกส่งผ่านภาระทางไฟฟ้าในรูปของค่าสลิปนั่นเอง

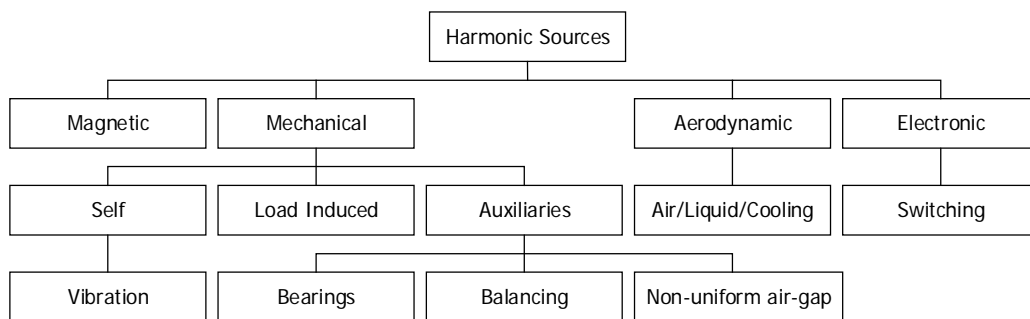
เนื่องจากความแตกต่างของอัตราเร็วระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนและโรเตอร์ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในโรเตอร์ ซึ่งความถี่ของแรงดันที่ป้อนให้กับขดลวดสเตเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ความเร็วสลิป ดังสมการ 2.14

$$f_s = \frac{\text{slip} - \text{speed}}{n_s} \cdot f_s = sf_s \quad (2.14)$$

โดยที่ f_r คือ ความถี่ของโรเตอร์ (Hz)

2.2 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Noise sources หรือ Harmonic sources) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท [17],[24] ดังภาพประกอบ 2-6



ภาพประกอบ 2-6 ภาพรวมของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในกระแสเตเตอร์ [24]

2.2.1 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจาก Magnetic

คือฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งข้ามผ่านช่องอากาศ ที่มีทิศทางของการกระจายสนามแม่เหล็กแตกต่างกันไปและก่อให้เกิดแรงในทิศทางนั้น ๆ เป็นผลทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากความเป็นแม่เหล็กและการสั่น (Vibrations) ความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นจะมีสมการดังต่อไปนี้

1. ฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์

$$f_{sr} = f_1 \left[\frac{kN_r}{P} (1-s) \right] \quad (2.15)$$

2. ฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากขดลวดสเตเตอร์และความผิดปกติของโรเตอร์

$$f_{se} = f_1 \left[\frac{kN_r}{P} (1-s) + 2 + \frac{(1-s)}{P} \right] \quad (2.16)$$

3. ฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากขดลวดสเตเตอร์และการอิมตัวของโรเตอร์

$$f_{ss} = f_1 \left[\frac{kN_r}{P} (1-s) + 2 \right] \quad (2.17)$$

4. ฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากความเป็นสล็อต

$$f_{sh} = f_1 \left[\frac{kN_r}{P} (1-s) \pm k \right] \quad (2.18)$$

2.2.2 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจาก Mechanical สามารถแบ่งออกได้เป็น

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากตัวของเครื่องจักรกลเอง (Self) ได้แก่ความถี่ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในขดลวดสเตเตอร์ที่จะมีผลทำให้เกิดอีกความถี่หนึ่ง เช่น mmf ของเฟสแต่ละเฟส และ mmf ของสล็อตฮาร์โมนิกส์จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่ตามลำดับ ซึ่งในความถี่เหล่านั้นจะทำให้มีอีกหนึ่งความถี่ปรากฏขึ้น

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของโหลด (Load induced) คือฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากการคัปปลิงของเครื่องจักรกลเพื่อนำมาทดสอบเช่น เครื่องจักรกลไฟฟ้าดีซี

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากส่วนประกอบย่อย (Auxillaries) ของเครื่องจักรกล เช่น ปัญหาของแบร์ริง ปัญหาความไม่สมดุลของโรเตอร์ ซึ่งจะส่งผลให้มีความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้

1. ฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากความเสียหายของแบร์ริง

$$f_{bng} = f_1 \pm n_b f_{i,o} \quad (2.19)$$

$$\text{เมื่อ } f_{i,o} = \frac{k}{2} f_r \left[1 \pm \frac{BD}{PD} \cos \beta \right]$$

2. ฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากความไม่สมดุลของโรเตอร์

$$f_{sso} = f_1 \left[k \left(\frac{1-s}{P} \right) \pm 1 \right] \quad (2.20)$$

2.2.3 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจาก Aerodynamic

คือ ฮาร์โมนิกส์ที่เป็นผลมาจากการระบายความร้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ได้แก่ อากาศ น้ำ หรือน้ำมัน เช่นการระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้พัดลม จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็ว จำนวนของใบพัดและมีความถี่ขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด ได้แก่

1. ฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากการระบายความร้อน

$$f_r = 0.185 \frac{v}{D_f} \quad (2.21)$$

2. ฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากใบพัด (ในการระบายความร้อนด้วยอากาศ)

$$f_f = N_b \frac{n_r}{60} \quad (2.22)$$

3. ฮาร์โมนิกส์ที่มีสาเหตุมาจากอากาศเมื่อไหลผ่านช่องอากาศ

$$f_{rl} = N_r \frac{n_r}{60} \quad (2.23)$$

2.2.3 ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากวงจร Electronic

โดยปกติแล้วในงานขับเคลื่อนมอเตอร์ แหล่งจ่ายที่นิยมนำมาใช้ คือ อินเวอร์เตอร์ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายจำพวกนี้จะใช้อุปกรณ์โซลิตสเททในการทำสวิตซิ่ง เช่นเมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์กลุ่มแรกที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของการสวิตซิ่ง และฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับเทคนิคของการมอดูเลต กระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้รูปคลื่นกระแสมูลฐานมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โดยเฉพาะเมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่เป็นผลมาจากแหล่งจ่ายอีกด้วย

2.3 การวิเคราะห์กระแสมอเตอร์

การวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ (Motor current signature analysis : MCSA) [1] ส่วนมากแล้วจะใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นหลัก ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีข้อดี คือ เป็นการวิเคราะห์จากข้อมูลซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณกระแสไฟฟ้า (Line current) ซึ่งทำการตรวจวัดได้ง่ายกว่าสัญญาณอื่นๆ เนื่องจากใช้เพียงตัวตรวจวัดกระแส (Current transformer : CT) เพียงอย่างเดียว อีกทั้งผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องหยุดกระบวนการผลิตก่อน สามารถที่จะกระทำการ

ตรวจสอบได้ทันทีในขณะที่มอเตอร์อยู่ในสถานะทำงาน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตได้อธิบายระบบวิธีการวินิจฉัยโดยใช้ MCSA ดังภาพประกอบ 1-2 ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมเพื่อดูซึ่งองค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่รวมอยู่ในความถี่มูลฐาน ทั้งนี้จะสามารถเห็นความแตกต่างได้ถ้าวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ไปยังโดเมนความถี่ (Frequency domain) สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ ด้วยเหตุผลที่ว่าวิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์จะครอบคลุมในเรื่องของความผิดปกติที่เกิดขึ้นโดยส่วนมาก อาทิเช่น วิเคราะห์ได้ในเรื่องความผิดปกติที่เกิดจากแบร็ง ความผิดปกติจากขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจร ความผิดปกติจากโรเตอร์ ความผิดปกติอันเนื่องมาจากโรเตอร์ไม่อยู่ในแนวแกนเพลลา แต่จะใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเป็นฉนวนของตัวนำสเตเตอร์ไม่ได้ ดังตาราง 2-1 ซึ่งความสำคัญในส่วนนี้เป็นส่วนสำคัญที่ภาคอุตสาหกรรมจะให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

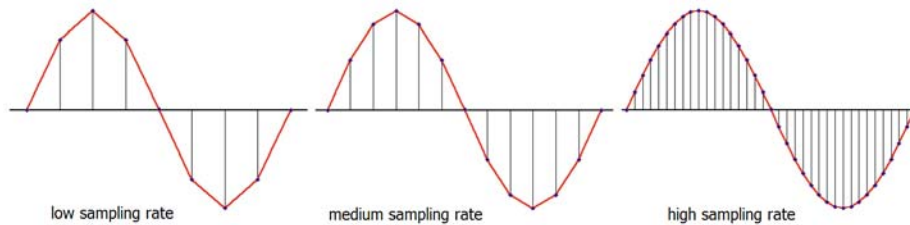
ตาราง 2-1 แสดงการเปรียบเทียบของแต่ละวิธีการที่ใช้ในการตรวจหาความผิดปกติที่เกิดขึ้น [13]

Methode	Faults it can detect				
	Insulation	Stator Winding	Rotor Winding	Rotor Eccentricity	Bear damage
Vibration	No	No	Yes	Yes	Yes
MCSA	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Axial flux	No	Yes	Yes	Yes	No
Lubricating oil debris	No	No	No	No	Yes
Cooling gas	Yes	Yes	Yes	No	No
Partial discharge	Yes	No	No	No	No

2.4 การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

การตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในงานวิจัยจะอาศัยการคำนวณและการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing : DSP) ซึ่งสามารถออกแบบอัลกอริธึมต่างๆ ให้มีความเหมาะสมได้ ซึ่งสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ตรวจสอบจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากมอเตอร์คือจะต้องสามารถทำให้ฮาร์มอนิกส์ย่อย (subharmonics) หรือฮาร์มอนิกส์ที่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน (Interharmonic) ปรากฏขึ้น ซึ่งในงานวิจัยจะใช้การทรานฟอร์มด้วย FFT ซึ่งสามารถใช้เวลาในการแปลงได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่ได้ยังมีความถูกต้องสูงด้วย

2.4.1 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณ



ภาพประกอบ 2-7 การแซมปลิงสัญญาณอนาล็อก

(ที่มา: http://cis.msjs.edu/courses/internet_authoring/CSIS115A/lessons/Tutorial07/)

ในกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณข้อมูลที่ได้จากวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้านั้น ก่อนที่จะนำสัญญาณเข้าประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ จะต้องมีการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อก $x(t)$ ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล $x_p(t)$ เพื่อทำการประมวลผล โดยในลักษณะของสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจวัดซึ่งเป็นสัญญาณที่มีความต่อเนื่องกันทางเวลาจะผ่านกระบวนการแซมปลิงหรือกระบวนการตัดแบ่งสัญญาณอนาล็อกที่ตรวจวัดมาออกเป็นส่วน ๆ เท่า ๆ กัน ซึ่งส่วนที่ได้จากการตัดแบ่งจะมีความสูงที่ต่าง ๆ กันตามตำแหน่งของสัญญาณอนาล็อกนั้น ๆ และเมื่อกระทำต่อเนื่องก็จะเป็นเส้นตั้งเรียง ๆ กันไปซึ่งก็คือสัญญาณที่เป็นดิจิทัลเรียงเป็นตัวเลขติดต่อกันหรือค่า $x[n]$ โดย n จะเปรียบเสมือนตัวบอกตำแหน่ง สิ่งที่สำคัญมากที่สุดคือความถี่ที่ใช้ในการแซมปลิงสัญญาณ ($f_s = 1/T$) ซึ่งจะทำให้การคืนสู่สัญญาณอนาล็อกด้วยกระบวนการดิจิทัลไปเป็นอนาล็อกเป็นไปอย่างถูกต้อง ดังภาพประกอบ 2-7 ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่า การใช้อัตราของแซมปลิงของสัญญาณที่ต่าง ๆ กัน จะมีผลต่อรูปคลื่นของสัญญาณที่ได้หลังการแซมปลิง ผลจากการแซมปลิงที่ต่ำจะทำให้เห็นค่าสู่สัญญาณอนาล็อกต้นฉบับผิดเพี้ยนไป และหากแซมปลิงด้วยความถี่ที่สูงก็จะทำให้เกิดผลในเรื่องการสูญเสียหน่วยความจำเพิ่มมากขึ้นเพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่างสัญญาณ จากทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างสัญญาณจะสามารถสรุปได้ว่า สัญญาณควรจะถูกแซมปลิงอย่างน้อยด้วยความถี่ที่ใช้ในการแซมปลิงประมาณ 2 เท่าของความถี่สูงสุดที่จะทำการประมวลผล ดังเช่นในงานวิจัย เมื่อสัญญาณอินพุตเป็น f_1 และความถี่ในการแซมปลิงเป็น f_s จะได้ความสัมพันธ์ในการแซมปลิงดังสมการ (2.24)

$$f_s \geq 2f_1 \quad (2.24)$$

ซึ่งจะเรียกความถี่ของสัญญาณอินพุตที่ความถี่สูงสุดว่า Nyquist frequency และเรียกค่าต่ำสุดของการแซมปลิงสัญญาณหรือค่า $2f_1$ ว่า Nyquist rate ในการแซมปลิงสัญญาณ

จะมีค่าอีกค่าหนึ่งที่จะพบได้บ่อยคือ Quantization noise ซึ่งจะเกี่ยวกับค่าความละเอียดของการแซมปลิง ที่เกี่ยวกับค่าตัวเลขไบนารีแต่ละตัวที่ได้จากการแซมปลิง เช่น หากใช้เลขไบนารี 8 บิต แสดงค่าของการแซมปลิงจะได้ความละเอียดระดับสัญญาณดิจิทัลเป็น $2^8=256$ ระดับ และหากใช้ค่าไบนารีขนาด 16 บิต ก็จะได้ค่าความละเอียด $2^{16}=65,536$ ระดับ ซึ่งจะมีความละเอียดมากขึ้น แต่ก็เปลืองเนื้อที่ในหน่วยความจำมากขึ้น แต่หากใช้จำนวนบิตน้อยก็จะเกิดผลไม่ดีคือ Quantization error ดังนั้นในระบบดิจิทัลสิ่งสำคัญมากอย่างหนึ่งก็คือค่าจำนวนบิตที่ใช้ในการแบ่งสเกล

2.4.2 การประมาณค่าสเปกตรัมด้วย Fast Fourier Transform: FFT

เนื่องจากการทรานส์ฟอร์มด้วย DFT มีประโยชน์ในการใช้งานมาก จึงได้มีการคิดค้นวิธีการใหม่เพื่อที่จะคำนวณ DFT ให้มีความเร็วและประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าปกติ จึงได้เกิดเป็นทฤษฎีของ FFT ขึ้น ซึ่ง FFT ก็คือการคำนวณ DFT อย่างรวดเร็วกว่าการคิดปกตินั่นเอง นิยามได้ดังสมการคำนวณต่อไปนี้

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nk/N} \quad (2.25)$$

2.5 การคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน IEEE 1459-2010

มาตรฐาน IEEE 1459-2010 คือมาตรฐานที่ใช้งานเพื่อกำหนดระเบียบวิธีการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในสถานะสัญญาณของแรงดันและกระแสที่เป็นรูปคลื่นไซน์ และไม่ใช่ว่าเป็นรูปคลื่นไซน์ รวมถึงในสถานะสมดุลหรือไม่สมดุลในกรณีระบบไฟฟ้า 3 เฟส [19]

2.5.1 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในสถานะรูปคลื่นไซน์สมดุล

1. ค่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสชั่วขณะนิยามได้จาก

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2}V \sin(\omega t) \\ v_b &= \sqrt{2}V \sin(\omega t - 120^\circ) \\ v_c &= \sqrt{2}V \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.26)$$

2. ค่ากระแสไฟฟ้า 3 เฟสชั่วขณะนิยามได้จาก

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \\ i_b &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta - 120^\circ) \\ i_c &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.27)$$

3. ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous power: W)
สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สายนิยามได้จาก

$$p = v_{ab}i_a + v_{cb}i_c = v_{ac}i_a + v_{bc}i_b = v_{ba}i_b + v_{ca}i_c \quad (2.28)$$

สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย นิยามได้จาก

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2.29)$$

4. ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active power: W) นิยามได้จาก

$$P = 3VI \cos \theta = \sqrt{3}V_{ll} I \cos \theta \quad (2.30)$$

5. ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power: var) นิยามได้จาก

$$Q = 3VI \sin \theta = \sqrt{3}V_{ll} I \sin \theta \quad (2.31)$$

6. ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power: VA) นิยามได้จาก

$$S = 3VI = \sqrt{3}V_{ll} I \quad (2.32)$$

7. ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ารวม (Power factor) นิยามได้จาก

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.33)$$

2.5.2 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในสภาวะรูปคลื่นไซน์ไม่สมดุล

1. ค่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสชั่วขณะนิยามได้จาก

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2}V_a \sin(\omega t + \alpha_a) \\ v_b &= \sqrt{2}V_b \sin(\omega t + \alpha_b - 120^\circ) \\ v_c &= \sqrt{2}V_c \sin(\omega t + \alpha_c + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.34)$$

2. ค่ากระแสไฟฟ้า 3 เฟสชั่วขณะนิยามได้จาก

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2}I_a \sin(\omega t + \beta_a) \\ i_b &= \sqrt{2}I_b \sin(\omega t + \beta_b - 120^\circ) \\ i_c &= \sqrt{2}I_c \sin(\omega t + \beta_c - 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.35)$$

3. ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous power: W)
สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สายนิยามได้จาก

$$p = v_{ab}i_a + v_{cb}i_c = v_{ac}i_a + v_{bc}i_b = v_{ba}i_b + v_{ca}i_c \quad (2.36)$$

สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สายนิยามได้จาก

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2.37)$$

4. ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active power: W)

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad P_a &= V_a I_a \cos \theta_a; \quad \theta_a = \alpha_a - \beta_a \\ P_b &= V_b I_b \cos \theta_b; \quad \theta_b = \alpha_b - \beta_b \\ P_c &= V_c I_c \cos \theta_c; \quad \theta_c = \alpha_c - \beta_c \end{aligned}$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงลำดับบวก

$$P^+ = 3V^+ I^+ \cos \theta^+ \quad (2.39)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงลำดับลบ

$$P^- = 3V^- I^- \cos \theta^- \quad (2.40)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงลำดับศูนย์

$$P^0 = 3V^0 I^0 \cos \theta^0 \quad (2.41)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าจริงรวมจะนิยามได้จาก

$$P = P^+ + P^- + P^0 \quad (2.42)$$

5. ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power: var)

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c \quad (2.43)$$

เมื่อ

$$Q_a = V_a I_a \sin \theta_a; \quad \theta_a = \alpha_a - \beta_a$$

$$Q_b = V_b I_b \sin \theta_b; \quad \theta_b = \alpha_b - \beta_b$$

$$Q_c = V_c I_c \sin \theta_c; \quad \theta_c = \alpha_c - \beta_c$$

ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนลำดับบวก

$$Q^+ = 3V^+ I^+ \sin \theta^+ \quad (2.44)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนลำดับลบ

$$Q^- = 3V^- I^- \sin \theta^- \quad (2.45)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนลำดับศูนย์

$$Q^0 = 3V^0 I^0 \sin \theta^0 \quad (2.46)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนรวม

$$Q = Q^+ + Q^- + Q^0 \quad (2.47)$$

6. ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏประสิทธิภาพ (Effective apparent power : S_e)
สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพนิยามได้จาก

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad (2.48)$$

สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย ค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลนิยามได้จาก

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{18}} \quad (2.49)$$

ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย ค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลนิยามได้จาก

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \quad (2.50)$$

จากค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลและกระแสไฟฟ้าประสิทธิผลจะได้

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2.51)$$

7. ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าประสิทธิผลรวมนิยามได้จาก

$$PF_e = \frac{P}{S_e} \quad (2.52)$$

8. ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าลำดับบนนิยามได้จาก

$$PF^+ = \frac{P^+}{S^+} \quad (2.53)$$

9. ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏไม่สมดุลนิยามได้จาก

$$S_U = \sqrt{S_e^2 - (S^+)^2} \quad (2.54)$$

2.5.3 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในสถานะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์และระบบไม่สมดุล

สำหรับในสถานะคงตัวค่าชั่วขณะของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสถานะที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะมีองค์ประกอบเฉพาะอยู่ด้วยกัน 2 ส่วนคือ เทอมของค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน v_1, i_1 และเทอมที่เหลือนอยู่คือส่วนของค่าฮาร์มอนิกส์แรงดันและกระแสไฟฟ้า v_H, i_H ซึ่งประกอบด้วยฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ ทั้งที่เป็นจำนวนเต็มและไม่ใช่จำนวนเต็ม

1 ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิผล (Effective current : I_e)

สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส 3 สาย ค่ากระแสไฟฟ้าประสิทธิผลนิยามได้จาก

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad (2.55)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2}{3}} \quad (2.56)$$

$$I_{eH} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (2.57)$$

2 ค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล (Effective voltage : V_e)

สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส 4 สาย ค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลนิยามได้จาก

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{18}} \quad (2.58)$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{18}} \quad (2.59)$$

$$V_{eH} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (2.60)$$

สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส 3 สาย ค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลนิยามได้จาก

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \quad (2.61)$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{9}} \quad (2.62)$$

$$V_{eH} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (2.63)$$

3. ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏประสิทธิผล (Effective apparent power : S_e)

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2.64)$$

$$S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1} \quad (2.65)$$

4. ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า

$$D_{eI} = 3V_{eI}I_{eH} \quad (2.66)$$

5. ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{eI} \quad (2.67)$$

6. ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} \quad (2.68)$$

7. ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเสมือนที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_{eH}^2} \quad (2.69)$$

8. ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้า

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{eI}} \quad (2.70)$$

9. ค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสไฟฟ้า

$$THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{eI}} \quad (2.71)$$

10. ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไม่ใช่ความถี่มูลฐาน

$$S_{eN} = \sqrt{THD_{eI}^2 + THD_{eV}^2 + (THD_{eI} \cdot THD_{eV})^2} \quad (2.72)$$

11. ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่มูลฐานในสภาวะโหลดไม่สมดุล

$$S_{U1} = \sqrt{S_{eI}^2 - (S_1^+)^2} \quad (2.73)$$

12. ค่ากำลังไฟฟ้าจริงลำดับบวกที่ความถี่มูลฐาน

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+ \quad (2.74)$$

13. ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนลำดับบวกที่ความถี่มูลฐาน

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta_1^+ \quad (2.75)$$

14. ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏลำดับบวกที่ความถี่มูลฐาน

$$S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2} \quad (2.76)$$

15. ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ลำดับบวกที่ความถี่มูลฐาน

$$PF_1^+ = P_1^+ / S_1^+ \quad (2.77)$$

16. ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ

$$PF = P / S_e \quad (2.78)$$

17. ค่าความผิดปกติของระบบไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากค่าแฟกเตอร์โหลดฮาร์มอนิกส์ และค่าแฟกเตอร์โหลดไม่สมดุล ซึ่งนิยามได้จาก

$$\text{ค่าแฟกเตอร์โหลดฮาร์มอนิกส์} = S_{eN} / S_{e1} \quad (2.79)$$

$$\text{ค่าแฟกเตอร์โหลดไม่สมดุล} = S_{1U} / S_1^+ \quad (2.80)$$

ตาราง 2-2 สรุป 3 กลุ่มค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ [19]

Quantity or indicator	Combined	Fundamental	Nonfundamental
Apparent [VA]	S_e	S_{e1}, S_1^+, S_{1U}	S_{eN}, S_{eH}
Active [W]	P	P_1^+	P_H
Nonactive [VAR]	N	Q_1^+	D_{e1}, D_{eV}, D_{eH}
Line utilization	$PF = P/S_e$	$PF_1^+ = P_1^+/S_1^+$	---
Harmonic pollution	---	---	S_{eN}/S_{e1}
Load unbalance	---	S_{1U}/S_1^+	---

2.6 การคำนวณค่าปริมาณทางกล

เนื่องจากข้อมูลที่ได้รับมาจากตัวตรวจวัดในงานวิจัยนั้น จะประกอบไปด้วยข้อมูลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งได้ผ่านกระบวนการสุ่มตัวอย่างสัญญาณมาก่อนหน้าแล้ว ด้วยวิธีการที่จะนำข้อมูลที่ตรวจวัดมาได้นั้นมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในด้านการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ให้ครอบคลุมถึงในส่วนการประเมินในภาพกว้างได้ ประกอบกับทฤษฎีของการใช้ข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในงานวิจัยจึงได้เลือกใช้การนำข้อมูลสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากวงจรตรวจวัดซึ่งถูกแปลงให้อยู่ในรูปของค่ากระแสเชิงซ้อน แล้วจึงใช้การวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าด้วยการแปลง FFT หาค่าฮาร์มอนิกสล็อตโรเตอร์ที่มีแอมพลิจูดของสัญญาณสูงสุดว่าอยู่ในบริเวณความถี่ใด จากนั้นจึงนำค่าความถี่นั้นมาคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะประกอบไปด้วยทฤษฎีต่างๆต่อไปนี้

2.6.1 โรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิก (Rotor Slot Harmonic)

การหาความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นสามารถหาได้หลายวิธี แต่วิธีหนึ่งที่จะกล่าวถึงในการหาความเร็วรอบอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของสัญญาณกระแส อันเนื่องมาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความถี่นั่นเอง โดยจะเลือกใช้กระบวนการหนึ่งในทฤษฎีที่ว่าด้วยการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ MCSA โดยมีที่มาจากความต้องการหาความผิดพลาดต่างๆ ของมอเตอร์ขณะทำงานโดยที่ไม่ต้องยุ่งเกี่ยวกับด้านกายภาพของมอเตอร์ ด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์โดยการแตกสเปกตรัมของกระแสออกมาเพื่อให้ได้ซึ่งฮาร์มอนิกต่างๆ โดยกระบวนการ DFT โดยที่แต่ละฮาร์มอนิกก็จะเป็นตัวชี้ถึงความผิดปกติของมอเตอร์ ซึ่งความถี่ที่ได้จากกระบวนการ DFT ก็จะนำไปคำนวณเพื่อหาความเร็วรอบของมอเตอร์อันเนื่องมาจากความสัมพันธ์ของความถี่กับค่าสลิป [1] ตามสมการที่ 2.81

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s) \quad (2.81)$$

โดยที่	f_{sb}	คือ	ความถี่ที่ขดลวดสเตเตอร์
	f_1	คือ	ความถี่จากแหล่งจ่ายไฟฟ้า
	s	คือ	ค่าสลิปต่อหน่วย

ซึ่งในงานวิจัยจะทำการหา Rotor Slot Harmonic : RSH ซึ่งตรวจพบในรูปคลื่นกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกเป็นส่วนใหญ่ ฮาร์มอนิกมีความสัมพันธ์กับจำนวนสล็อตโรเตอร์บนโรเตอร์ และความถี่อันเนื่องมาจากความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งค่าของ Rotor Slot Harmonic Frequency นี้สามารถใช้หาความเร็วรอบของมอเตอร์ได้

2.6.2 เวกเตอร์กระแสเชิงซ้อน (Complex Current Vector)

จากความรู้เกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถทราบได้ว่าความเร็วรอบมอเตอร์นั้นสามารถหาได้จากสัญญาณกระแสสแตเตอร์ [5] จึงสามารถหาความเร็วรอบได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสสแตเตอร์ อย่างที่ทราบอีกอย่างก็คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นมีความสัมพันธ์กับฮาร์มอนิกส์ด้วย ซึ่งมีผลมาจากจำนวนสล็อตโรเตอร์และความเยื้องศูนย์ของแกนโรเตอร์ โดยที่องค์ประกอบต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นคือ จำนวนสล็อตโรเตอร์และความเยื้องศูนย์ของแกนโรเตอร์ จะมีผลต่อกำลังที่ข้ามผ่านช่องว่างอากาศ (Airgap permeance : P_{ag}) และค่า P_{ag} ก็จะมีผลต่อแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องอากาศ (Airgap magnetomotive force : MMF_{ag}) [18] ตามสมการที่ 2.82 ซึ่ง MMF_{ag} นี้จะมีผลโดยตรงต่อกระแสสแตเตอร์ เพราะฉะนั้นเมื่อเกิดสิ่งผิดปกติต่อแกนโรเตอร์หรือจำนวนสล็อตโรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปในมอเตอร์จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ

$$B_{ag}(\varphi_s, \theta_{rm}) = MMF_{ag}(\varphi_s, \theta_{rm}) \cdot P_{ag}(\varphi_s, \theta_{rm}) \quad (2.82)$$

โดยที่ B_{ag}	คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่กระจายอยู่ในช่องอากาศ (T)
MMF_{ag}	คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่ช่องอากาศ (A-t)
P_{ag}	คือ กำลังที่ข้ามผ่านช่องอากาศ (W)
φ_s	คือ ตำแหน่งมุมของสแตเตอร์ (rad)
θ_{rm}	คือ ตำแหน่งทางกลของโรเตอร์ (rad)

ภายใต้แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับกระแสสแตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะได้สมการเวกเตอร์กระแสเชิงซ้อน [5] ตามสมการที่ 2.83

$$i_c = \frac{2}{3}(i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c) \quad (2.83)$$

เมื่อ	$\alpha = \exp^{j(2\pi/3)}$
โดยที่	j คือ ส่วนจินตภาพ
	\exp คือ เอ็กโปเนนเชียลฟังก์ชัน

โดยที่ข้อมูลกระแสจากแต่ละเฟสนั้นจะเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณด้วยกระบวนการ Discrete Fourier Transform (DFT) ทำการแตกสเปกตรัมของเวกเตอร์กระแส

เชิงซ้อนซึ่งเวกเตอร์กระแสเชิงซ้อนจะถูกสร้างขึ้นตามสมการที่ 2.84 โดยค่า $i_{C,n}$ นี้จะมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนของเวกเตอร์กระแสเชิงซ้อน ณ จำนวนเวลาใดๆ ในช่วงของกระบวนการซิกตัวอย่างหรือ Sampling มีความถี่ระหว่าง $-f_s/2$ ถึง $f_s/2$

2.6.3 ความถี่ฮาร์โมนิกสลับอันเนื่องมาจากผลของสล็อตโรเตอร์ (Rotor Slot Harmonic Frequency)

จากความเข้าใจพื้นฐานข้างต้นเกี่ยวกับความสัมพันธ์ต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้า แม่เหล็ก และโครงสร้างของมอเตอร์ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ของฟลักซ์สเตเตอร์กับกระแสสเตเตอร์และกระแสโรเตอร์ ความสัมพันธ์ของฟลักซ์โรเตอร์กับกระแสโรเตอร์และกระแสสเตเตอร์ และความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนแม่เหล็ก MMF_s กับจำนวนสล็อตโรเตอร์ กล่าวคือ จำนวนสล็อตโรเตอร์จะมีผลต่อรูปคลื่นของโรเตอร์ เมื่อถูกกระตุ้นโดยฟลักซ์ที่ความถี่มูลฐานทางด้านบวก โดยที่โรเตอร์ MMF_s จะมีผลต่อรูปคลื่นกำลังที่ข้ามผ่านช่องว่างอากาศ เนื่องด้วยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.82 และเมื่อกำลังที่ข้ามผ่านช่องอากาศมีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ทราบว่าฟลักซ์ที่ช่องอากาศก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยตามความสัมพันธ์ของกำลังที่ผ่านช่องว่างอากาศและฟลักซ์ที่ช่องว่างอากาศ เนื่องด้วยฟลักซ์ที่ช่องอากาศต่อกับขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่ฟลักซ์ช่องว่างอากาศก็จะมีผลให้กระแสสเตเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยความถี่ฮาร์โมนิกสล็อตโรเตอร์ f_{sh} จะหาได้จากสมการที่ 2.84

$$f_{sh} = \text{sgn}(h) \times f_0 \times \left[(1-s) \times \frac{kR}{P} + n_w \right] \quad (2.84)$$

เมื่อ $h = \left. \frac{f_{sh}}{f_0} \right|_{s=0}$

โดยที่ f_{sh} คือ ความถี่ฮาร์โมนิกสลับของสล็อตโรเตอร์ (Hz)

f_0 คือ ความถี่มูลฐาน (Hz)

$\text{sgn}(\cdot)$ คือ Signal Function

s คือ สลิป

k คือ ตัวบ่งชี้ลำดับฮาร์โมนิกของโรเตอร์ MMF_s $k = 1, 2, \dots$

R คือ จำนวนสล็อตโรเตอร์

P คือ คู่ขั้วแม่เหล็ก

n_w คือ ลำดับฮาร์โมนิกของขดลวดสเตเตอร์ $n_w = \pm 1, \pm 3, \dots$

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความสัมพันธ์กับการออกแบบมอเตอร์

โดยทั่วไปแล้วฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์ที่จะมีอิทธิพลสูงที่สุดต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นจะมีขนาดของกระแสที่มากที่สุด โดยอยู่ท่ามกลางฮาร์มอนิกส์อื่น ๆ ที่ได้จากกระบวนการแตกสเปคตรัมของกระแสเชิงซ้อน โดยที่ความถี่นี้จะมีความสัมพันธ์กับการออกแบบพารามิเตอร์ของมอเตอร์ดังแสดงในตาราง 2-3

ตาราง 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ฮาร์มอนิกส์ของสล็อตโรเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดและผลของพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการออกแบบมอเตอร์ [5]

กรณี	$h = f_{sh}/f_0 _{s=0}$	เงื่อนไข
1	$(kR/P - 1)$	$(kR/P - 1) = 6m + 1$
2	$-(kR/P - 1)$	$(kR/P - 1) = 6m - 1$
3	NONE	$(kR/P - 1) \neq 6m \pm 1$
4	$(kR/P + 1)$	$(kR/P + 1) = 6m + 1$
5	$-(kR/P + 1)$	$(kR/P + 1) = 6m - 1$
6	NONE	$(kR/P + 1) \neq 6m \pm 1$

จากตารางที่ กำหนดให้ $m=1,2,3,\dots$ เป็นจำนวนเต็มที่มีค่าเป็นบวกซึ่งตารางนี้เองจะเป็นแนวทางในการบอกความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ฮาร์มอนิกส์ของสล็อตโรเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุด และผลของพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการออกแบบมอเตอร์ โดยที่เราสามารถหาค่า h ได้จากตาราง 2-3 ในบางกรณีการรวมกันของจำนวนคู่ของโพล และจำนวนสล็อตโรเตอร์อาจทำให้ไม่ได้รับค่าที่ต้องการของฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์หรือรับค่าที่ไม่ถูกต้อง ถึงอย่างไรก็ตามวิธีการใช้จำนวนของสล็อตโรเตอร์เป็นตัวแปรในการหาความเร็วรอบของมอเตอร์ก็ยังคงถูกเลือกใช้ โดยผู้ผลิตออกแบบมอเตอร์เพื่อให้ได้มอเตอร์ในแบบที่ต้องการแต่ก็ขึ้นอยู่กับฐานของการกำหนดจำนวนของสล็อตโรเตอร์ให้พอเหมาะตาม ด้วยเหตุนี้ฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์จึงถูกเลือกใช้ในการวิเคราะห์สำหรับในมอเตอร์หลาย ๆ ขนาด จำนวนของสล็อตโรเตอร์สามารถกำหนดได้หลังจากการคำนวณเบื้องต้น โดยกำหนดให้ $k=1$ และเลือก n_w ที่ถูกต้องและตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์ที่สามารถทำให้เงื่อนไขตามตาราง 2-3 เป็นจริง

จากสมการที่ 2.84 ถ้า s_0 คือค่าสลิปที่สอดคล้องกับพิกัดความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยดูได้จากแผ่นป้ายชื่อที่มอเตอร์ ดังนั้น ความถี่ฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์เริ่มต้น $f_{sh,0}$ จะถูกหาได้ตามสมการที่ 2.85

$$f_{sh,0} = \text{sgn}(h) \times f_0 \times \left[(1-s) \times \frac{kR}{P} + n_w \right] \quad (2.85)$$

จากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทราบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าสลิป หรือความถี่ และจากความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีฮาร์มอนิกส์ สล็อตโรเตอร์ จะพบว่า เมื่อนำเวกเตอร์กระแสเชิงซ้อนไปผ่านกระบวนการวิเคราะห์แบบการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง DFT แล้ว จะได้สเปกตรัมของเวกเตอร์กระแสเชิงซ้อนในโดเมนของความถี่ กล่าวคือ เราสามารถที่จะนำความถี่ฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุดมาวิเคราะห์และคำนวณต่อเพื่อให้ได้มาซึ่งความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตามสมการที่ 2.86

$$s_d = (1 - P) \times \frac{\left[\text{sgn}(h) \times \left(\frac{f_{sh,d}}{f_0} \right) - n_w \right]}{kR} \quad (2.86)$$

โดยที่ s_d คือ สลิปที่เกิดจากความถี่ฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุด
 $f_{sh,d}$ คือ ความถี่ฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุด (Hz)

2.7 โปรแกรม LabVIEW

Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench หรือที่เรียกกันโดยย่อว่า LabVIEW เป็นโปรแกรมหนึ่งที่ได้รับคามนิยมใช้กันในงานด้านการวัดและสำหรับพัฒนาเป็นเครื่องมือวัดในงานด้านวิศวกรรม งานด้านการวิเคราะห์ ซึ่งจะเป็นโปรแกรมที่มีลักษณะการเขียนโปรแกรมด้วย บล็อกฟังก์ชันที่เป็นรูปภาพ หรือที่เรียกกันว่า ภาษารูปภาพ (Graphical Language) ลักษณะการเขียนของโปรแกรมจะเชื่อมโยงกันด้วยเส้นต่อที่ต่างลักษณะกัน ขึ้นอยู่กับประเภทข้อมูลซึ่งมีหลายหลายอาทิเช่น Scalar, 1-D Array, 2-D Array เป็นต้น ซึ่งแต่ละประเภทของข้อมูลก็จะถูกแทนด้วยเส้นสีที่ต่างกัน การทำงานของโค้ดในโปรแกรมจะเป็นลักษณะของการไหลของข้อมูลระหว่างโปรแกรมย่อยกับบล็อกฟังก์ชันนั้น ๆ คล้ายกับการเขียนโปรแกรม ซึ่งโดยภาพรวมของโปรแกรมจะมีความสะดวกสำหรับการพัฒนาใช้งานด้านเครื่องมือวัดและงานควบคุมอัตโนมัติ โดยภายในโปรแกรม LabVIEW นี้จะประกอบไปด้วยเครื่องมือและไลบรารีที่สนับสนุนการใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย ผลลัพธ์ที่แสดงจะคล้ายกับเครื่องมือวัดจริง จึงเรียกกันว่าเป็นโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนหรือ (Virtual Instrument) [26] จากเหตุผลในเรื่องของความยืดหยุ่นของโปรแกรมและรวมถึงการรวมฟังก์ชันต่าง ๆ ภายในไว้มากมาย ในงานวิจัยจึงได้เลือกใช้โปรแกรม LabVIEW สำหรับการพัฒนาเป็นเครื่องมือตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์

2.7.1 การออกแบบโปรแกรมโดยใช้ LabVIEW

ในงานวิจัยจะจำลองให้โปรแกรมเป็นเสมือนเครื่องมือที่ใช้งานตรวจสอบสถานะการทำงาน โดยจะแสดงผลในรูปค่าตัวเลขที่ได้จากการคำนวณ แสดงผลในรูปแบบกราฟของรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจวัด และแสดงผลในรูปของสเปกตรัมความถี่ซึ่งจะกล่าวถึง

รายละเอียดย่อยในบทถัดไป ในส่วนของการรับค่าข้อมูลจากผู้ใช้งานก็จะใช้เป็นลักษณะของปุ่มกดบนคอมพิวเตอร์ ความสะดวกในส่วนนี้จะเป็นข้อดีให้ผู้ใช้งานสามารถที่จะเลื่อนหรือเลือกดูข้อมูลในแต่ละส่วนการวิเคราะห์ตรวจสอบได้ ซึ่งถือเป็นจุดเด่นของการออกแบบโปรแกรมด้วย LabVIEW

2.7.2 การสร้างโค้ดโปรแกรมย่อย (SUB VI)

ในส่วนของการพัฒนาอัลกอริธึมภายในโปรแกรม ซึ่งในงานวิจัยจะมีบางส่วนที่ต้องสร้างอัลกอริธึมย่อยหรือที่เรียกว่า (Sub VI) เช่นในการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า และการคำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์แบบอัตโนมัติ ซึ่งประกอบไปด้วยหลายค่าและหลายส่วนการคำนวณ เพื่อให้สะดวกในการนำค่าที่ซ้ำ ๆ กันและต้องการนำค่านั้นไปใช้ในการคำนวณหาซึ่งค่าอื่น ๆ และเพื่อเป็นการลดเนื้อที่การเขียนโปรแกรมให้น้อยลง จึงต้องมีการสร้างส่วนของโปรแกรมย่อย ๆ ขึ้น

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องมือการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้า

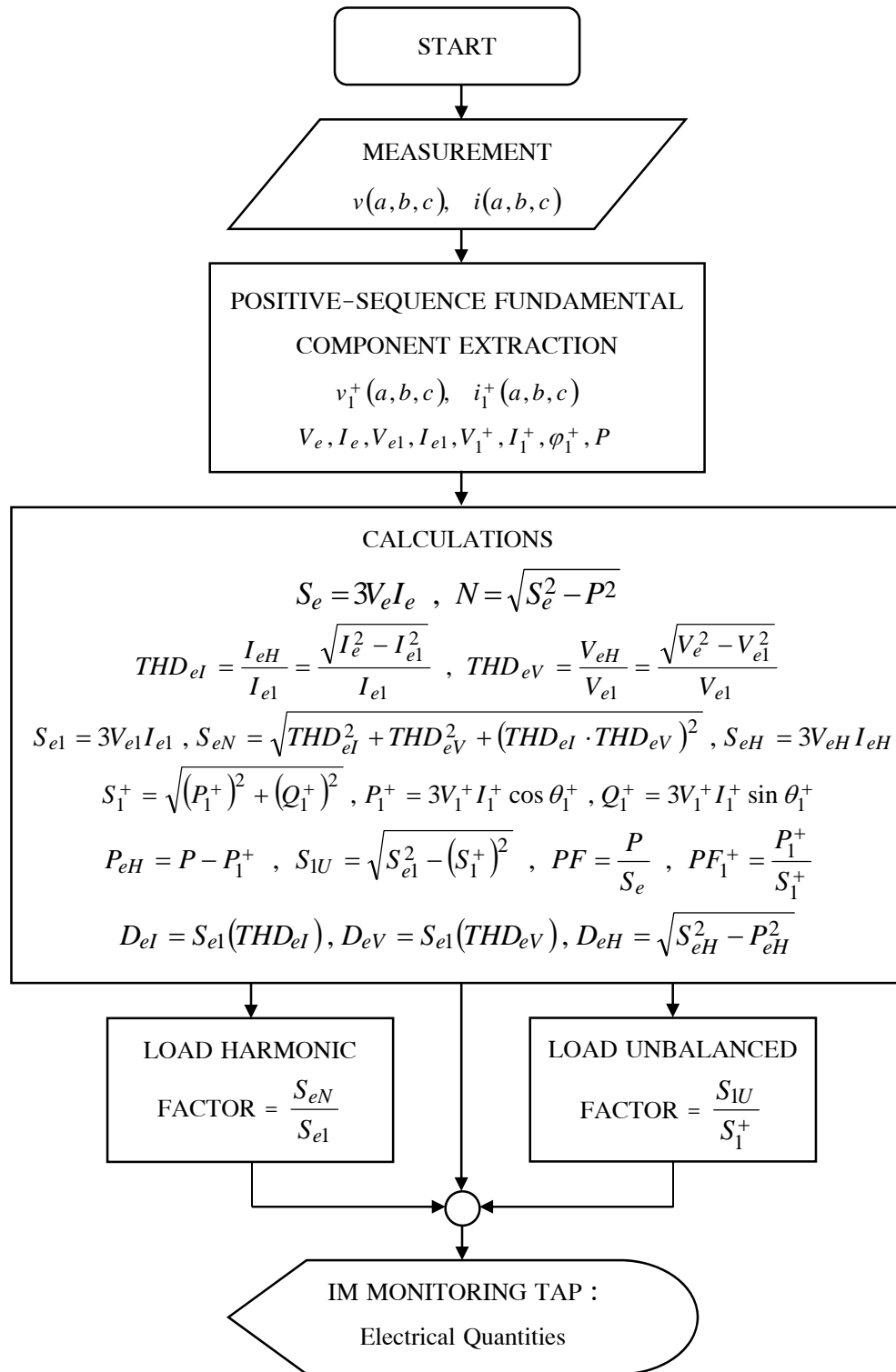
ในบทนี้จะกล่าวถึงในส่วนของการออกแบบเครื่องมือการคำนวณปริมาณไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นส่วนตรวจสอบค่าปริมาณไฟฟ้าเมื่อเกิดการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนของการคำนวณค่าปริมาณไฟฟ้าตามมาตรฐานการคำนวณ IEEE 1459-2010 โดยได้ทำการออกแบบอัลกอริทึมการคำนวณภายในโปรแกรม LabVIEW ซึ่งได้แบ่งเงื่อนไขการทดสอบอัลกอริทึมไว้ 2 กรณีด้วยกัน ในส่วนของกรณีแรกจะเป็นการจำลองสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ตามอุดมคติจากโปรแกรม LabVIEW ในส่วนกรณีที่สองจะเป็นการจำลองสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์อันเกิดจากการรวมตัวของลำดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับขึ้นเสมือนกรณีเมื่อเกิดการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากนั้นจะเป็นการเปรียบเทียบผลทดสอบอัลกอริทึมที่ออกแบบกับผลการคำนวณเพื่อพิจารณาถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนที่จะมีการนำเครื่องมือการคำนวณปริมาณไฟฟ้าไปใช้ในการตรวจสอบการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อไป

3.1 ส่วนการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในส่วนของการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้ข้อมูล 2 ส่วนที่ได้จากตัวตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะอ้างอิงการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันเพื่อกำหนดระเบียบวิธีการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในสถานะสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์และไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ รวมถึงในสถานะสมดุลและไม่สมดุลในกรณีระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส ดังเช่นในงานวิจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับการตรวจสอบค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ทั้งนี้หากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เราทำการตรวจวัดมานั้นไม่ได้เป็นรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่มีเพียงความถี่มูลฐานความถี่เดียว แต่อาจจะมียอดประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกที่ลำดับต่าง ๆ หลายความถี่ ทั้งที่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐานหรือที่เรียกว่า (Subharmonic) และไม่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐานหรือที่เรียกว่า (Interharmonic) ทั้งนี้ฮาร์มอนิกต่าง ๆ ที่ปะปนมาในรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเหล่านี้ ล้วนเป็นผลที่เกิดมาจากสาเหตุต่าง ๆ กันไป ตัวอย่างเช่นในงานวิจัยเป็นการทดสอบการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์ ซึ่งก็จะมีองค์ประกอบความถี่อื่นเนื่องมาจากการลัดวงจรของขดลวดปะปนอยู่ในรูปคลื่นความถี่มูลฐานอย่างเลี่ยงไม่ได้ หรืออาจจะเป็นฮาร์มอนิกที่เกิดมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นต้น ดังนั้นการที่จะประเมินถึงในเรื่องของค่าปริมาณทางไฟฟ้านั้น จึงต้องอาศัยการคำนวณอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 รวมด้วย จากตาราง 2-2

สามารถแสดงอัลกอริธึมการคำนวณได้ดังภาพประกอบ 3-1 ซึ่งจากภาพประกอบ อัลกอริธึมการคำนวณจะเริ่มต้นจากการรับข้อมูลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์ของมอเตอร์ จากนั้นการคำนวณจะเริ่มต้นด้วยการแยกหาค่าอาร์เอ็มเอสแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 3 เฟส, ค่าอาร์เอ็มเอสแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ที่ความถี่มูลฐาน, สุดท้ายจะเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ที่ลำดับบวก จากนั้นจะเป็นการหาค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล, ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่ความถี่มูลฐาน, ค่ามุมต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ลำดับบวก และสุดท้ายค่ากำลังไฟฟ้าจริงรวม 3 เฟส จากค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า กำลังไฟฟ้าปรากฏประสิทธิผล, กำลังไฟฟ้าเสมือน และยังสามารถใช้ในการพิจารณาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสามส่วนซึ่งประกอบด้วย ค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ และค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน ที่ความถี่มูลฐานและที่ไม่ใช่ความถี่มูลฐาน อีกทั้งยังนำไปใช้ในการพิจารณาคำนวณค่าความผิดเพี้ยนเสมือนของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏฮาร์มอนิกส์, ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่มูลฐานในสภาวะไม่สมดุล, ค่ากำลังไฟฟ้าจริงฮาร์มอนิกส์, ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า, ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าลำดับบวกที่ความถี่มูลฐาน และสุดท้ายจะนำไปใช้ในการพิจารณาคำนวณค่าความผิดปกติของระบบไฟฟ้าซึ่งพิจารณาได้จากค่าแพกเตอร์โหลดฮาร์มอนิกส์และค่าแพกเตอร์โหลดไม่สมดุล ซึ่งค่าต่าง ๆ ทั้งหมดนี้นิยามการคำนวณได้จากทฤษฎีในส่วนของบทที่ 2 ซึ่งจากทฤษฎีการคำนวณหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าในบทที่ 2 จากข้อมูลของสัญญาณซึ่งอยู่ในรูปของโดเมนทางเวลาและเป็นค่าข้อมูลที่ได้มาจากการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ ค่าข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดมาได้นี้ จะถูกจัดการข้อมูลสัญญาณให้อยู่ในรูปของอาร์เรย์ (Array of waveform) จากนั้นการคำนวณหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ จะเป็นการนำค่าในอาเรย์นี้ไปใช้ต่อไป

ซึ่งในกระบวนการออกแบบอัลกอริธึมการประเมินค่าปริมาณทางไฟฟ้าเพื่อใช้ในการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์สำหรับผู้ใช้งานซึ่งอ้างอิงมาตรฐานการคำนวณ IEEE 1459-2010 นั้น เพื่อเป็นการพิสูจน์ความถูกต้องของสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ นั้น จึงจำเป็นต้องมีการทวนสอบและเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลที่ได้จากอัลกอริธึมการคำนวณภายในโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือน โดยวิธีการจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าภายในโปรแกรม LabVIEW เปรียบเทียบกับสัญญาณที่ทราบค่าจริง ซึ่งจะทำให้การกำหนดเงื่อนไขของสัญญาณจำลองภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นไซน์ และแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์ซึ่งเกิดจากการรวมกันของฮาร์มอนิกส์ในลำดับต่าง ๆ ปะปนในรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า โดยจะจำลองสร้างสัญญาณที่ความถี่ 50Hz แรงดันไฟฟ้าที่เฟสสูงสุด 182V กระแสไฟฟ้าที่เฟสสูงสุด 1.68A สำหรับสภาวะการทดสอบแหล่งจ่ายเป็นไซน์ และในส่วนของ การทดสอบอัลกอริธึมการคำนวณกรณีแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์นั้น จะจำลองการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่ลำดับ 3, ลำดับ 5, และลำดับ 7 รวมอยู่ในสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วย

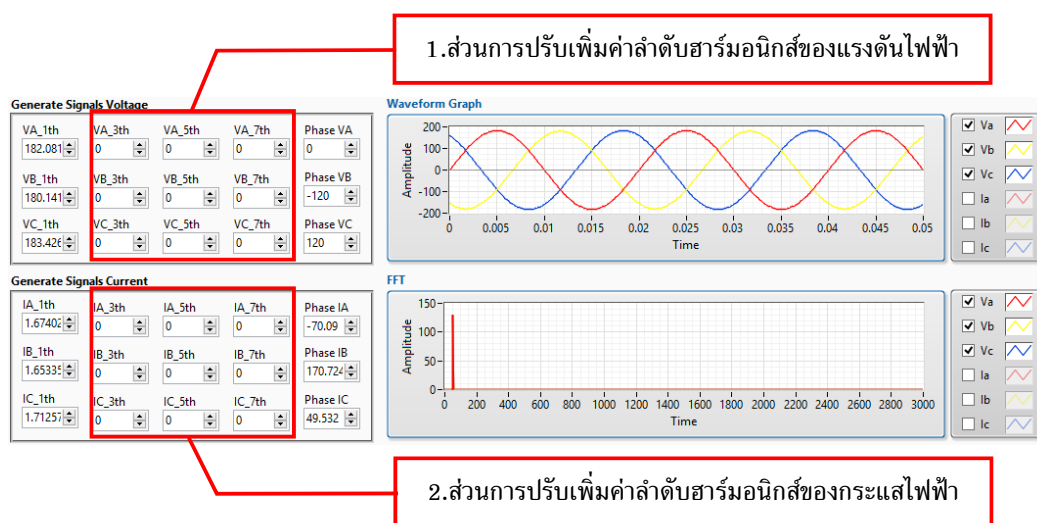


ภาพประกอบ 3-1 อัลกอริทึมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE1459-2010

3.2 การทดสอบโปรแกรมคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้า (Verify Program)

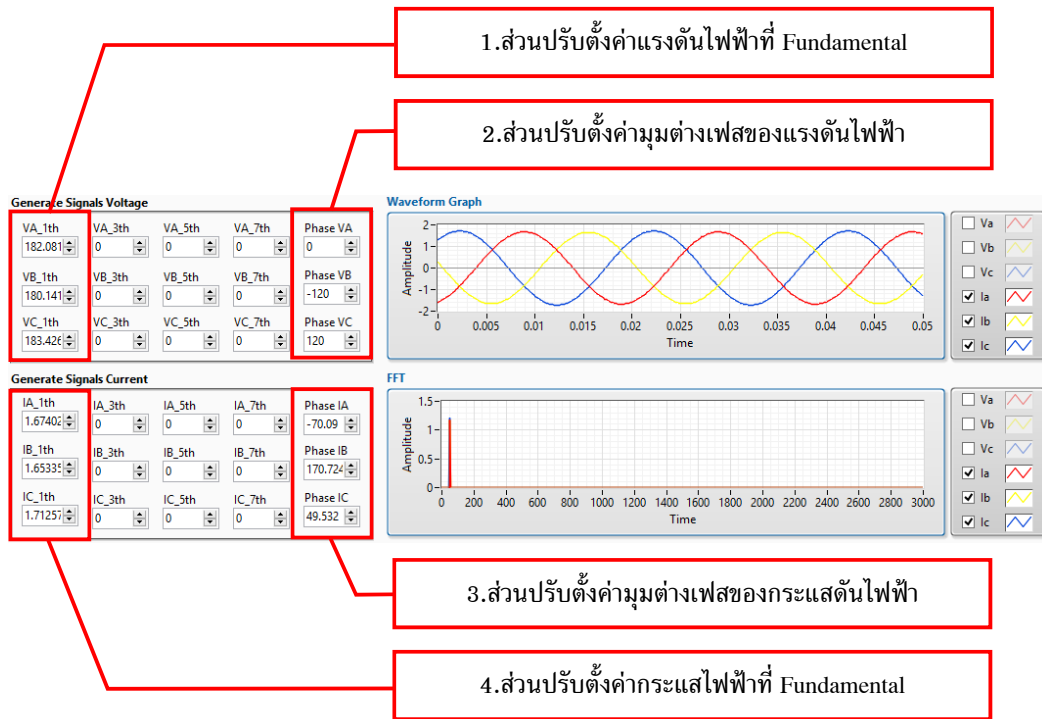
3.2.1 เงื่อนไขของสัญญาณจำลองภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์

จากการจำลองสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ดังภาพประกอบ 3-2 และ ภาพประกอบ 3-3 ในส่วนของหน้าจอแสดงผลบนโปรแกรม LabVIEW (Front Panel) นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบย่อย เช่น ส่วนการปรับเพิ่มค่าลำดับฮาร์โมนิกส์และค่าที่มูลฐาน (Fundamental) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ส่วนการปรับตั้งค่ามุมต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ส่วนแสดงรูปคลื่นสัญญาณในโดเมนทางเวลา และส่วนแสดงสเปกตรัมในโดเมนทางความถี่



ภาพประกอบ 3-2 รูปคลื่นจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์

จากภาพประกอบ 3-2 เป็นการจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ ใกล้เคียงอุดมคติที่ไม่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณอันเกิดจากผลของฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับต่าง ๆ แสดงได้ในส่วนของการปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3, ความถี่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5, และความถี่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 7 ซึ่งกำหนดค่าไว้เป็น 0 ซึ่งก็จะทำให้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จำลองสร้างขึ้นมีเพียงค่าแรงดันไฟฟ้าเฉพาะที่ส่วนของความถี่มูลฐาน (Fundamental) เท่านั้น เมื่อแสดงในรูปคลื่นสัญญาณโดเมนทางเวลาก็จะมีลักษณะที่เหมือนกับรูปคลื่นไซน์ในอุดมคติ และในส่วนของ การแสดงผลสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าก็จะมีเพียงขนาดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฉพาะที่ความถี่มูลฐานเพียงองค์ประกอบความถี่เดียว



ภาพประกอบ 3-3 รูปคลื่นจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เป็นไซน์

จากภาพประกอบ 3-3 แสดงลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จำลองสร้างขึ้นเช่นเดียวกับรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จำลองให้สัญญาณมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ใกล้เคียงอุดมคติที่ไม่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณอันเกิดจากผลของฮาร์มอนิกส์ที่ลำดับต่าง ๆ ซึ่งในตัวอย่างการทวนสอบโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนนี้ได้กำหนดให้มุมต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามุมเท่ากับสัญญาณที่ทราบจากมอเตอร์ทดสอบ 2.2kW ต่อทดสอบแบบ Y ที่แรงดันระหว่างสาย 220V กระแสเฟส 1.68A ผลการคำนวณที่ได้จากการทวนสอบสมการแสดงได้ดังตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากข้อมูลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จากมอเตอร์ 2.2kW ต่อทดสอบแบบ Y ที่กักแรงดันไฟฟ้า 220V_{ll} กระแสเฟส 1.2A ความถี่การสุ่มตัวอย่างอยู่ที่ 6kHz ที่จำนวนข้อมูลทั้งหมด 60000 ค่า จากข้อมูลจะได้ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$V_a = 128.731 \text{ V}, V_b = 127.36 \text{ V}, V_c = 129.682 \text{ V}$$

$$I_a = 1.18353 \text{ A}, I_b = 1.16892 \text{ A}, I_c = 1.21079 \text{ A}$$

$$PF_a = 0.3408, PF_b = 0.353972, PF_c = 0.334861$$

$$V_e = 128.595 \text{ V} , I_e = 1.18787 \text{ A}$$

จากข้อมูลของแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน และค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่เกิดขึ้นแต่ละเฟสได้ดังต่อไปนี้

$$P_a = V_a I_a \cos \theta_a = 128.731 \times 1.184 \times 0.341 = 51.97 \text{ W}$$

$$P_b = V_b I_b \cos \theta_b = 127.35 \times 1.169 \times 0.354 = 52.701 \text{ W}$$

$$P_c = V_c I_c \cos \theta_c = 129.68 \times 1.211 \times 0.334 = 52.4522 \text{ W}$$

$$Q_a = V_a I_a \sin \theta$$

$$= 128.731 \times 1.184 \times \sin(\cos^{-1} 0.341) = 143.282 \text{ VAR}$$

$$Q_b = V_b I_b \sin \theta$$

$$= 127.35 \times 1.169 \times \sin(\cos^{-1} 0.354) = 139.232 \text{ VAR}$$

$$Q_c = V_c I_c \sin \theta$$

$$= 129.682 \times 1.211 \times \sin(\cos^{-1} 0.334) = 148.026 \text{ VAR}$$

$$S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2} = \sqrt{(51.97^2 + 143.282^2)} = 152.4159 \text{ VA}$$

$$S_b = \sqrt{P_b^2 + Q_b^2} = \sqrt{(52.701^2 + 139.232^2)} = 148.8722 \text{ VA}$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} = \sqrt{(52.4522^2 + 148.026^2)} = 157.044 \text{ VA}$$

$$THDv_a = \frac{\sqrt{(V_3^2 + V_5^2 + V_7^2)}}{V_1} = \frac{\sqrt{(0^2 + 0^2 + 0^2)}}{182.081} = 0.000$$

$$THDv_b = \frac{\sqrt{(V_3^2 + V_5^2 + V_7^2)}}{V_1} = \frac{\sqrt{(0^2 + 0^2 + 0^2)}}{180.141} = 0.000$$

$$THDv_c = \frac{\sqrt{(V_3^2 + V_5^2 + V_7^2)}}{V_1} = \frac{\sqrt{(0^2 + 0^2 + 0^2)}}{183.426} = 0.000$$

$$THDi_a = \frac{\sqrt{(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2)}}{I_1} = \frac{\sqrt{(0^2 + 0^2 + 0^2)}}{1.67402} = 0.000$$

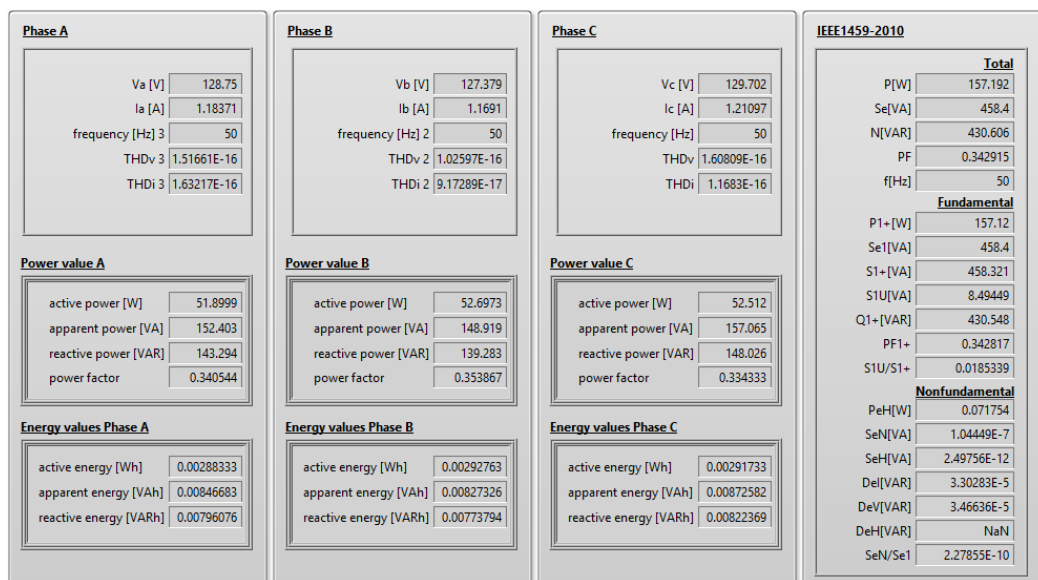
$$THDi_b = \frac{\sqrt{(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2)}}{I_1} = \frac{\sqrt{(0^2 + 0^2 + 0^2)}}{1.65335} = 0.000$$

$$THDi_c = \frac{\sqrt{(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2)}}{I_1} = \frac{\sqrt{(0^2 + 0^2 + 0^2)}}{1.71257} = 0.000$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการรวมกันของค่าในเทอมของความถี่มูลฐานและเทอมขององค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิกจะสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 P &= P_a + P_b + P_c \\
 &= 51.97 + 52.701 + 52.4522 \\
 &= 157.1232 \text{ W} \\
 S_e &= S_a + S_b + S_c = 152.4159 + 148.8722 + 157.044 = 458.3321 \text{ VA} \\
 N &= \sqrt{S_e^2 - P^2} = \sqrt{(458.3321^2 - 157.1232^2)} = 430.558 \text{ VAR} \\
 PF &= P / S_e = 157.1232 / 458.3321 = 0.3428
 \end{aligned}$$

ผลที่ได้จากการทวนสอบอัลกอริธึมการคำนวณจากโปรแกรม LabVIEW ที่ออกแบบพัฒนาแสดงได้ดังภาพประกอบ 3-4 และผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับอัลกอริธึมการคำนวณที่ได้จากเครื่องมือคำนวณค่าปริมาณไฟฟ้าที่พัฒนาแสดงได้ดังตาราง 3-1



ภาพประกอบ 3-4 ผลทดสอบเครื่องมือการคำนวณค่าปริมาณไฟฟ้า
ในกรณีแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์

จากภาพประกอบ 3-4 เป็นหน้าจอแสดงผล (Front Panel) ในส่วนของโปรแกรมคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ได้ออกแบบพัฒนาขึ้น จากหน้าจอแสดงผลจะแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนแสดงค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่เฟส และส่วนแสดงผลค่าปริมาณทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE1459-2010

ตาราง 3-1 ผลการทดสอบสมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่เฟสในกรณีแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์

Quantities	Calculation			LabVIEW			%Error		
	Ph_A	Ph_B	Ph_C	Ph_A	Ph_B	Ph_C	Ph_A	Ph_B	Ph_C
V	128.73	127.35	129.68	128.75	127.38	129.70	0.016	0.024	0.015
I	1.184	1.169	1.211	1.184	1.169	1.211	0.000	0.000	0.000
P	51.97	52.70	52.45	51.89	52.69	52.51	0.154	0.019	0.114
S	152.41	148.87	157.04	152.40	148.92	157.07	6.6E-3	0.034	0.019
Q	143.28	139.23	148.02	143.29	139.28	148.03	6.9E-3	0.036	6.8E-3
PF.	0.341	0.354	0.334	0.341	0.354	0.334	0.000	0.000	0.000
THD _v	0.000	0.000	0.000	1.5E-16	1.0E-16	1.6E-16	0.000	0.000	0.000
THD _i	0.000	0.000	0.000	1.6E-16	9.2E-17	1.2E-16	0.000	0.000	0.000

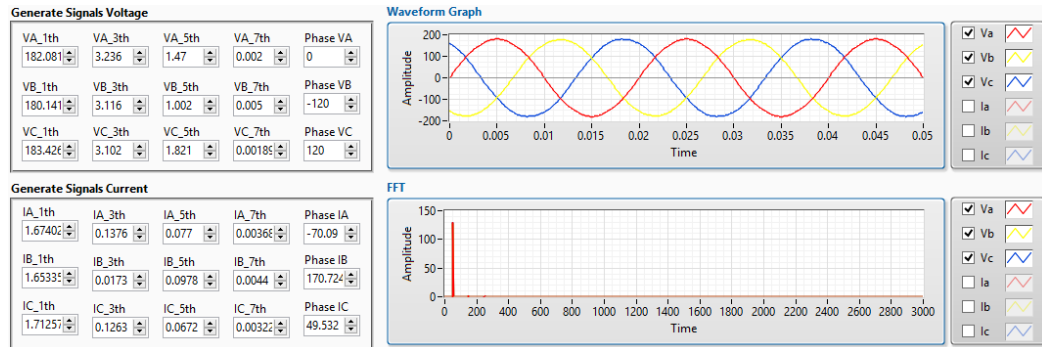
ตาราง 3-2 ผลการทดสอบสมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE1459-2010 ในกรณีแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์

Quantities	Calculation	LabVIEW	%Error
P[W]	157.123	157.192	0.044
Se[VA]	458.332	458.400	0.015
N[VAR]	430.558	430.606	0.011
PF	0.34280	0.34292	0.035

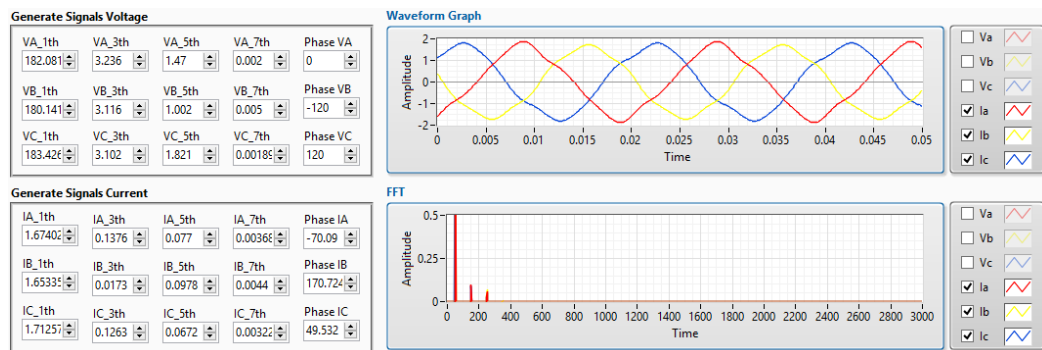
จากตาราง 3-2 ผลของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นน้อยมากไม่ถึง 1% ซึ่งก็จะทำให้ความถูกต้องของโปรแกรมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ได้ให้ผลที่ออกมาถูกต้องตรงตามทฤษฎี

3.2.2 เงื่อนไขของสัญญาณจำลองภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์

จากภาพประกอบ 3-5 และภาพประกอบ 3-6 แสดงลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จำลองสร้างขึ้นในโปรแกรม LabVIEW โดยได้จำลองให้สัญญาณมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณอันเกิดจากผลของฮาร์มอนิกส์ที่ลำดับต่าง ๆ ตั้งแต่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3, ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5, และฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ผลที่ได้จากการปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเข้าไปรวมกับรูปคลื่นสัญญาณที่มีความถี่มูลฐานจะสังเกตเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณจะมีความผิดเพี้ยนไปเสมือนกรณีเมื่อมอเตอร์เกิดการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ขึ้น



ภาพประกอบ 3-5 รูปคลื่นจำลองสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารวมฮาร์มอนิกส์



ภาพประกอบ 3-6 รูปคลื่นจำลองสัญญาณกระแสไฟฟ้ารวมฮาร์มอนิกส์

ซึ่งในตัวอย่างการทดสอบโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนนี้ได้กำหนดให้มุมต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามืดมเท่ากับสัญญาณที่ทราบจากมอเตอร์ทดสอบ 2.2kW ต่อทดสอบแบบ Y ซึ่งมีมุมมองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันประมาณ 70° ทางไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย 220V กระแสเฟสประมาณ 1.68A ซึ่งได้แสดงการคำนวณไว้ในตัวอย่างที่ 2 ผลที่ได้จากการทดสอบสมการคำนวณแสดงได้ดังตาราง 3-3

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากข้อมูลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2.2kW ต่อแบบ Y ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า $220V_{LL}$ กระแสเฟส 1.2A ความถี่การสุ่มตัวอย่างอยู่ที่ 6kHz ที่จำนวนข้อมูลทั้งหมด 60000 ค่า จากข้อมูลมุมมองของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันอยู่ที่ประมาณ 70° ทางไฟฟ้า จะทำให้ได้ค่าปริมาณต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$V_a = 128.731 \text{ V} , V_b = 127.36 \text{ V} , V_c = 129.682 \text{ V}$$

$$I_a = 1.18353 \text{ A} , I_b = 1.16892 \text{ A} , I_c = 1.21079 \text{ A}$$

$$PF_a = 0.3408, PF_b = 0.353972, PF_c = 0.334861$$

$$V_e = 128.614 \text{ V}, I_e = 1.18805 \text{ A}$$

ซึ่งในกรณีการทวนสอบการคำนวณในกรณีแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์นี้ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟสจะเกิดการรวมกันของลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆด้วย ดังนั้นผลของค่าแรงไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟสจะมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

$$V_a = \frac{\sqrt{(182.081^2 + 3.236^2 + 1.47^2 + 0.002^2)}}{\sqrt{2}} = 128.775 \text{ V}$$

$$V_b = \frac{\sqrt{(180.141^2 + 3.116^2 + 1.002^2 + 0.005^2)}}{\sqrt{2}} = 127.399 \text{ V}$$

$$V_c = \frac{\sqrt{(183.426^2 + 3.102^2 + 1.821^2 + 0.00189^2)}}{\sqrt{2}} = 129.727 \text{ V}$$

$$I_a = \frac{\sqrt{(1.67402^2 + 0.1376^2 + 0.077^2 + 0.00368^2)}}{\sqrt{2}} = 1.189 \text{ A}$$

$$I_b = \frac{\sqrt{(1.65335^2 + 0.0173^2 + 0.0978^2 + 0.0044^2)}}{\sqrt{2}} = 1.171 \text{ A}$$

$$I_c = \frac{\sqrt{(1.71257^2 + 0.1263^2 + 0.0672^2 + 0.00322^2)}}{\sqrt{2}} = 1.215 \text{ A}$$

ซึ่งในกรณีการทวนสอบการคำนวณในกรณีแหล่งจ่ายไม่เป็นไซน์นี้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$PF_a = \cos(\theta_a) \frac{1}{\sqrt{(1 + THDi_a^2)}} = 0.3408 \times \frac{1}{\sqrt{(1 + 0.0942^2)}} = 0.3393$$

$$PF_b = \cos(\theta_b) \frac{1}{\sqrt{(1 + THDi_b^2)}} = 0.353972 \times \frac{1}{\sqrt{(1 + 0.0601^2)}} = 0.3533$$

$$PF_c = \cos(\theta_c) \frac{1}{\sqrt{(1 + THDi_c^2)}} = 0.334861 \times \frac{1}{\sqrt{(1 + 0.0836^2)}} = 0.3337$$

จากข้อมูลของแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าจะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน และค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่เกิดขึ้นแต่ละเฟสได้ดังต่อไปนี้

$$P_a = V_a I_a \cos \theta_a = 128.78 \times 1.19 \times 0.339 = 51.9511 \text{ W}$$

$$P_b = V_b I_b \cos \theta_b = 127.4 \times 1.17 \times 0.353 = 52.617 \text{ W}$$

$$P_c = V_c I_c \cos \theta_c = 129.73 \times 1.22 \times 0.333 = 52.7041 \text{ W}$$

$$Q_a = V_a I_a \sin \theta$$

$$= 128.78 \times 1.19 \times \sin (\cos^{-1} 0.339) = 144.1738 \text{ VAR}$$

$$Q_b = V_b I_b \sin \theta$$

$$= 127.4 \times 1.17 \times \sin (\cos^{-1} 0.353) = 139.4621 \text{ VAR}$$

$$Q_c = V_c I_c \sin \theta$$

$$= 129.73 \times 1.22 \times \sin (\cos^{-1} 0.333) = 149.2375 \text{ VAR}$$

$$S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2} = \sqrt{(51.9511^2 + 144.1738^2)} = 153.248 \text{ VA}$$

$$S_b = \sqrt{P_b^2 + Q_b^2} = \sqrt{(52.617^2 + 139.4621^2)} = 149.0578 \text{ VA}$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} = \sqrt{(52.7041^2 + 149.2375^2)} = 158.2705 \text{ VA}$$

$$THDv_a = \frac{\sqrt{(V_3^2 + V_5^2 + V_7^2)}}{V_1} = \frac{\sqrt{(3.236^2 + 1.47^2 + 0.002^2)}}{182.081} = 0.0195$$

$$THDv_b = \frac{\sqrt{(V_3^2 + V_5^2 + V_7^2)}}{V_1} = \frac{\sqrt{(3.116^2 + 1.002^2 + 0.005^2)}}{180.141} = 0.0182$$

$$THDv_c = \frac{\sqrt{(V_3^2 + V_5^2 + V_7^2)}}{V_1} = \frac{\sqrt{(3.102^2 + 1.821^2 + 0.00189^2)}}{183.426} = 0.0196$$

$$THDi_a = \frac{\sqrt{(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2)}}{I_1} = \frac{\sqrt{(0.1376^2 + 0.077^2 + 0.00368^2)}}{1.67402} = 0.0942$$

$$THDi_b = \frac{\sqrt{(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2)}}{I_1} = \frac{\sqrt{(0.0173^2 + 0.0978^2 + 0.0044^2)}}{1.65335} = 0.0601$$

$$THDi_c = \frac{\sqrt{(I_3^2 + I_5^2 + I_7^2)}}{I_1} = \frac{\sqrt{(0.1263^2 + 0.0672^2 + 0.00322^2)}}{1.71257} = 0.0836$$

ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการรวมกันของค่าในเทอมของความถี่มูลฐานและเทอมขององค์ประกอบความถี่ฮาร์โมนิกส์จะสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$P = P_a + P_b + P_c$$

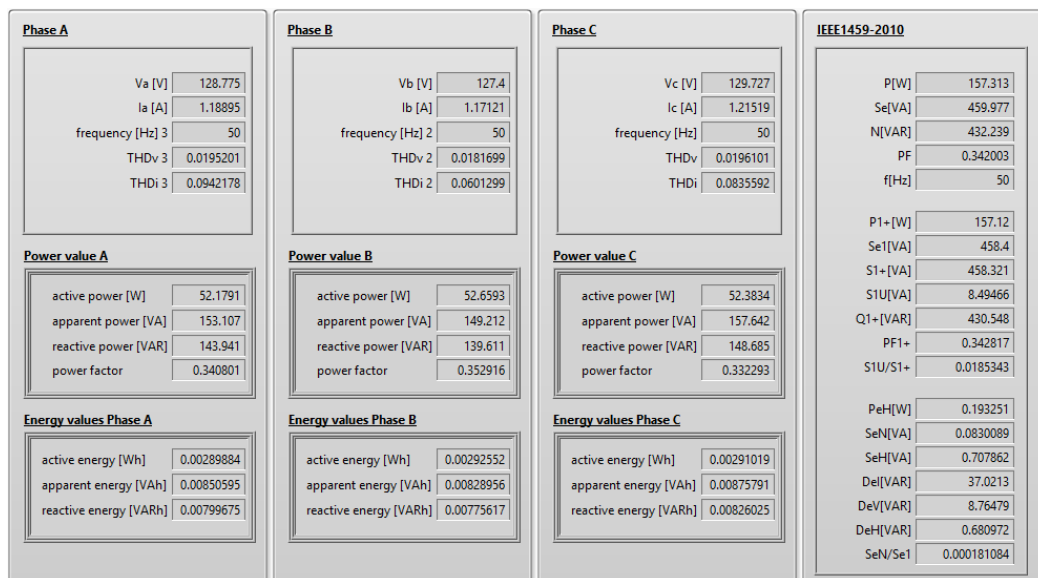
$$= 51.95 + 52.62 + 52.70$$

$$= 157.27 \text{ W}$$

$$S_e = S_a + S_b + S_c = 153.24 + 149.06 + 158.27 = 460.57 \text{ VA}$$

$$N = \sqrt{S_e^2 - P^2} = \sqrt{(460.57^2 - 157.27^2)} = 432.8867 \text{ VAR}$$

$$PF = P / S_e = 157.27 / 460.57 = 0.3415$$



ภาพประกอบ 3-7 ผลทดสอบเครื่องมือการคำนวณค่าปริมาณไฟฟ้าในกรณีแหล่งจ่าย
ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

ตาราง 3-3 ผลการทวนสอบสมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่เฟสในกรณีแหล่งจ่ายไม่เป็น
รูปคลื่นไซน์

Quantities	Calculation			LabVIEW			%Error		
	Ph_A	Ph_B	Ph_C	Ph_A	Ph_B	Ph_C	Ph_A	Ph_B	Ph_C
V	128.78	127.4	129.73	128.78	127.4	129.73	0.000	0.000	0.000
I	1.19	1.17	1.22	1.19	1.17	1.22	0.000	0.000	0.000
P	51.95	52.62	52.70	52.18	52.66	52.38	0.443	0.076	0.607
S	153.24	149.06	158.27	153.11	149.21	157.64	0.085	0.101	0.398
Q	144.17	139.46	149.24	143.94	139.61	148.69	0.160	0.108	0.369
PF.	0.339	0.353	0.333	0.341	0.353	0.332	0.590	0.000	0.300
THD _v	0.020	0.018	0.020	0.020	0.018	0.020	0.000	0.000	0.000
THD _i	0.094	0.060	0.084	0.094	0.060	0.084	0.000	0.000	0.000

ตาราง 3-4 ผลการทวนสอบสมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE1459-2010
ในสภาวะแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

Quantities	Calculation	LabVIEW	%Error
P	157.27	157.313	0.0273

Se	460.57	459.977	0.1288
N	432.87	432.239	0.1457
PF.	0.3420	0.34200	0.0000

จากผลการทวนสอบอัลกอริธึมตามสมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าภายในโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่พัฒนาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจริงที่ได้ จะเห็นได้ค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณจริงมาก โดยมีค่าความผิดพลาดของการเปรียบเทียบผลการคำนวณไม่เกิน 1% ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้นในโปรแกรม LabVIEW นั้นมีความถูกต้องของการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าแล้ว สามารถที่จะนำโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนไปใช้ในทางปฏิบัติจริงได้

บทที่ 4

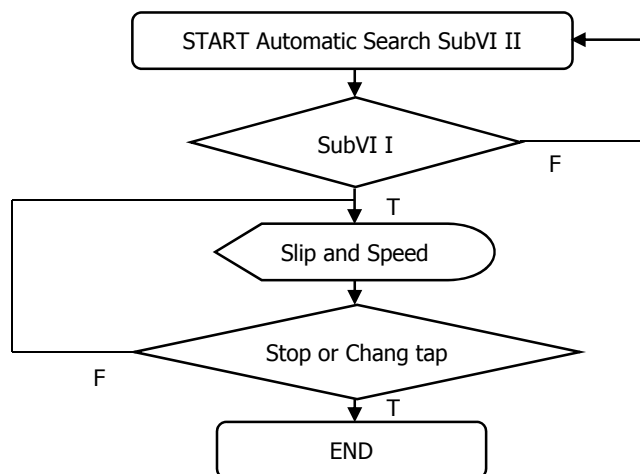
การออกแบบเครื่องมือการคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงในส่วนของการออกแบบเครื่องมือการคำนวณความเร็วเพื่อใช้เป็นส่วนแสดงค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยไร้ตัวตรวจวัดความเร็วรอบ แต่จะอาศัยหลักการนำสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส มาใช้ในการออกแบบเครื่องมือ ซึ่งจะประกอบไปด้วยเนื้อหาในส่วนการคำนวณค่าความเร็วรอบมอเตอร์ จากนั้นจะเป็นการทวนสอบอัลกอริทึมที่ออกแบบกับผลการคำนวณพิจารณาถึงความถูกต้องที่ได้จากอัลกอริทึมที่พัฒนา ก่อนที่จะมีการนำเครื่องมือการคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปใช้ในการตรวจสอบการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำ

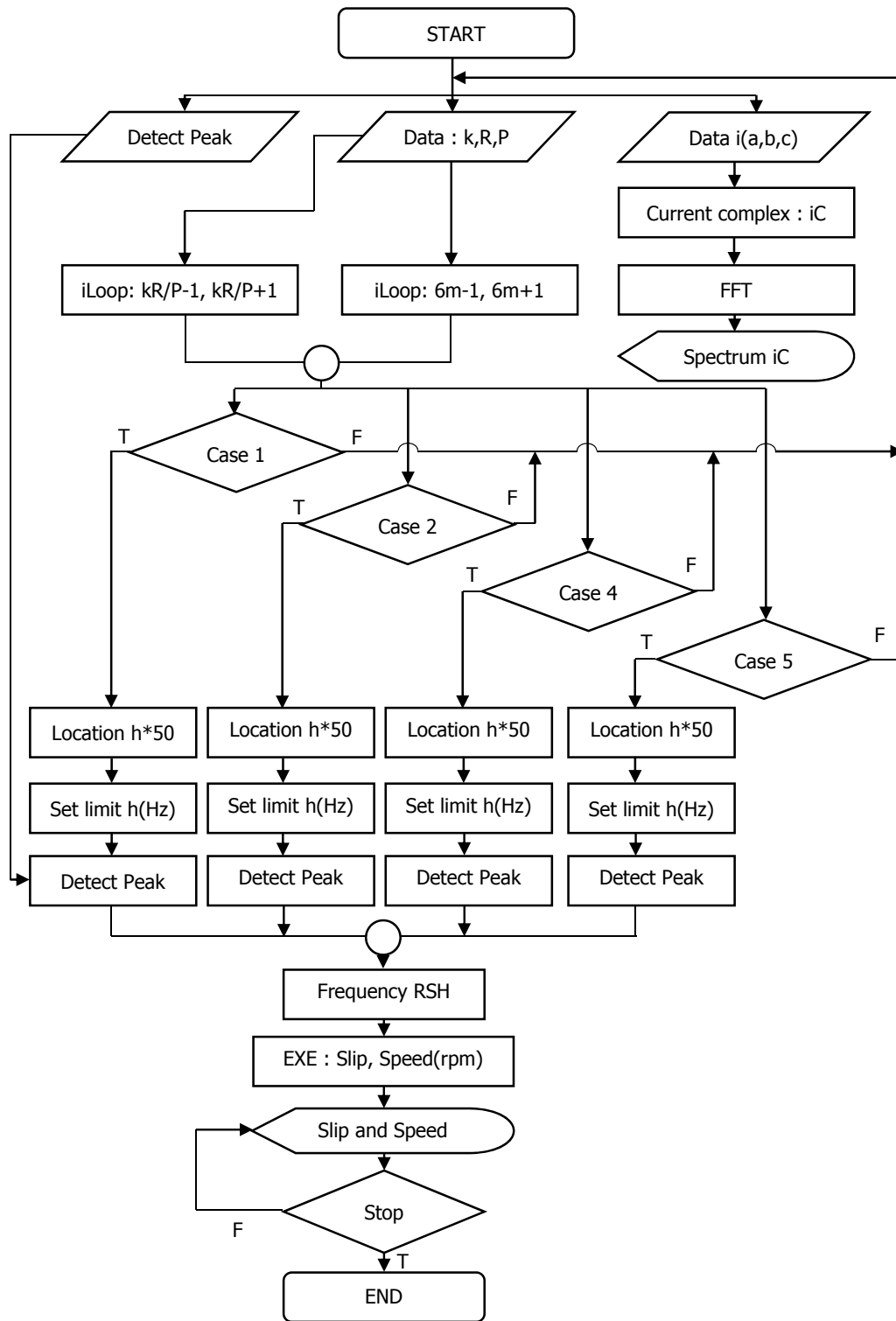
4.1 ส่วนการคำนวณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์

จากทฤษฎีในเรื่องผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากสล็อตโรเตอร์ซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 นั้น ในส่วนของการออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์นั้น ในงานวิจัยได้แบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน โดยเริ่มต้นของอัลกอริทึมจะเป็นการนำค่าข้อมูลของกระแสเฟสทั้ง 3 เฟสที่ได้จากตัวตรวจวัด เข้าสู่กระบวนการหาค่าเวกเตอร์กระแสเชิงซ้อนหรือค่า i_C ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในรูปของโดเมนทางเวลาจากนั้นจะนำค่า i_C ไปแปลงให้อยู่ในโดเมนทางความถี่โดยการแปลง FFT เพื่อวิเคราะห์หาค่าฮาร์มอนิกส์สูงสุดอันเป็นผลมาจากสล็อตโรเตอร์ซึ่งค่าฮาร์มอนิกส์ของสล็อตโรเตอร์นี้จะมีขนาดของแอมพลิจูดสัญญาณที่ค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ความถี่มูลฐาน 50Hz ในงานวิจัยจึงได้เลือกใช้ตัวกรองความถี่เพื่อตัดการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1 ออกไป แต่เนื่องจากเนื่องจากในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ยังมีฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่ตั้งแต่ลำดับที่ 3 เป็นต้นไป ปะปนอยู่ในระบบบ้างเล็กน้อย จึงได้ออกแบบตัวกรองความถี่ให้ตัดช่วงความถี่การวิเคราะห์ดังกล่าวออกไปด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการออกแบบตัวกรองความถี่ให้ตัดบางของช่วงความถี่ออกไปสามารถทำให้เห็นแอมพลิจูดของสัญญาณอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกส์สล็อตโรเตอร์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ในส่วนของขั้นตอนสุดท้ายในงานวิจัยจะออกแบบให้โปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วมีการทำงานแบบอัตโนมัติสามารถที่จะค้นหาค่าสลิปและค่าความเร็วรอบมอเตอร์ได้ด้วยวิธีการที่ง่ายและสะดวกต่อผู้ใช้งานโดยจะออกแบบอัลกอริทึมซึ่งเขียนไว้เป็นโปรแกรมย่อยหรือ SubVI ที่มีการทำงานซ่อนอยู่ภายในโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็ว 2 ส่วนด้วยกัน ดังภาพประกอบ 4-1 ซึ่งในส่วนแรกจะเป็น SubVI_I ที่ทำการรับค่าอินพุต 4 ค่าจากผู้ใช้งานซึ่งประกอบด้วยค่าคงที่สมมุติ k , จำนวนของช่องสล็อตโรเตอร์ R , จำนวนคู่อัฒแม่เหล็ก P , และค่าตรวจหาตำแหน่งฮาร์มอนิกส์ Hz ที่มีแอมพลิจูดสัญญาณสูงสุด (Detected Peak) โดยในส่วนนี้ของค่า P และค่า Detected Peak นั้นเป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถกำหนดใส่ไว้ใน SubVI ได้เลย ซึ่งค่าตัวแปรทั้ง 4 นี้จะมีผลต่อความแม่นยำใน

การคำนวณหาค่าสลิปและความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าจำนวนของแท่งตัวนำ สล็อตโรเตอร์ และค่า k ซึ่งจะเป็นค่าเฉพาะทางโครงสร้างภายในของมอเตอร์ซึ่งไม่สามารถที่จะทราบค่านี้ได้จากลักษณะทางโครงสร้างภายนอกของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังนั้นการที่จะได้มาซึ่ง อินพุตตัวแปร k และ R นั้น จึงต้องมีการออกแบบโปรแกรมให้วนลูการทำงานเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขโดยค่าตัวแปรอินพุตจะนำไปใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไขทั้ง 4 เงื่อนไข [5] เงื่อนไขใดที่ถูกต้องจะให้ค่าตำแหน่งลำดับฮาร์มอนิกสล็อตโรเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุดหรือค่า RSH ออกมา แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วค่า RSH ที่แท้จริงจะเกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงของตำแหน่งความถี่ฮาร์มอนิกที่ได้จากเงื่อนไขที่ถูกต้อง จึงต้องมีการออกแบบโปรแกรมเพื่อกำหนดช่วงตรวจหาฮาร์มอนิกสล็อตโรเตอร์ที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุดที่แท้จริง จากนั้นจะเป็นการตรวจหาค่ายอด (Peak) เพื่อหาค่าความถี่สล็อตโรเตอร์ฮาร์มอนิก Hz ที่มีขนาดของแอมพลิจูดสูงสุด เมื่อผ่านขั้นตอนนี้จะทำให้ทราบค่าฮาร์มอนิกสล็อตโรเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุดซึ่งค่าที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์ต่อไป ซึ่งในส่วน SubVI_I นี้จะเป็นอัลกอริทึมสำหรับการรับค่ามาเพื่อคำนวณตรวจสอบเงื่อนไขที่มีความสอดคล้องกันตามตาราง 2-3 และคำนวณเป็นค่าสลิปและความเร็วรอบออกมาตั้งอัลกอริทึมที่แสดงในภาพประกอบ 4-2 แต่ในส่วนของ SubVI_I จะยังไม่สามารถทำการคำนวณค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์ออกมาได้ก่อนเนื่องจากยังไม่มีค่าอินพุต k และ R จึงต้องมีการออกแบบอัลกอริทึมอีกส่วนสำหรับการค้นหาความเร็วแบบอัตโนมัติ ซึ่งก็คือส่วนของ SubVI_II ที่จะทำการค้นหาค่าตัวแปร k และ R ซึ่งส่วนของ SubVI_II นี้จะเป็นค่าอินพุตที่นำไปตรวจสอบค้นหาให้ได้ซึ่งค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์ออกมาในส่วนการคำนวณของ SubVI_I ส่วนแรก

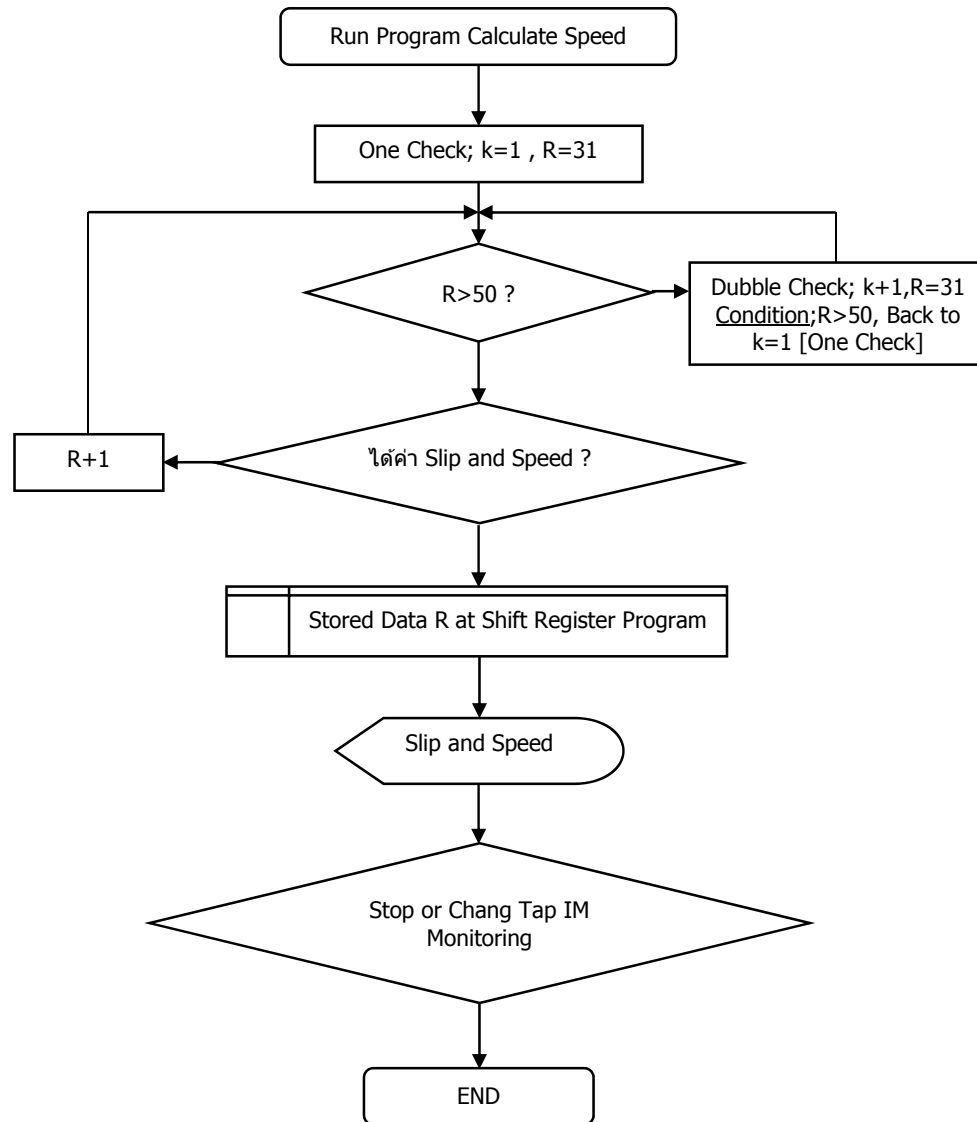


ภาพประกอบ 4-1 ส่วนการทำงานของโปรแกรมย่อย SubVI ของเครื่องมือคำนวณความเร็ว



ภาพประกอบ 4-2 อัลกอริธึมการคำนวณค่าสลลิปและความเร็วรอบในมอเตอร์เหนี่ยวนำ SubVI_I

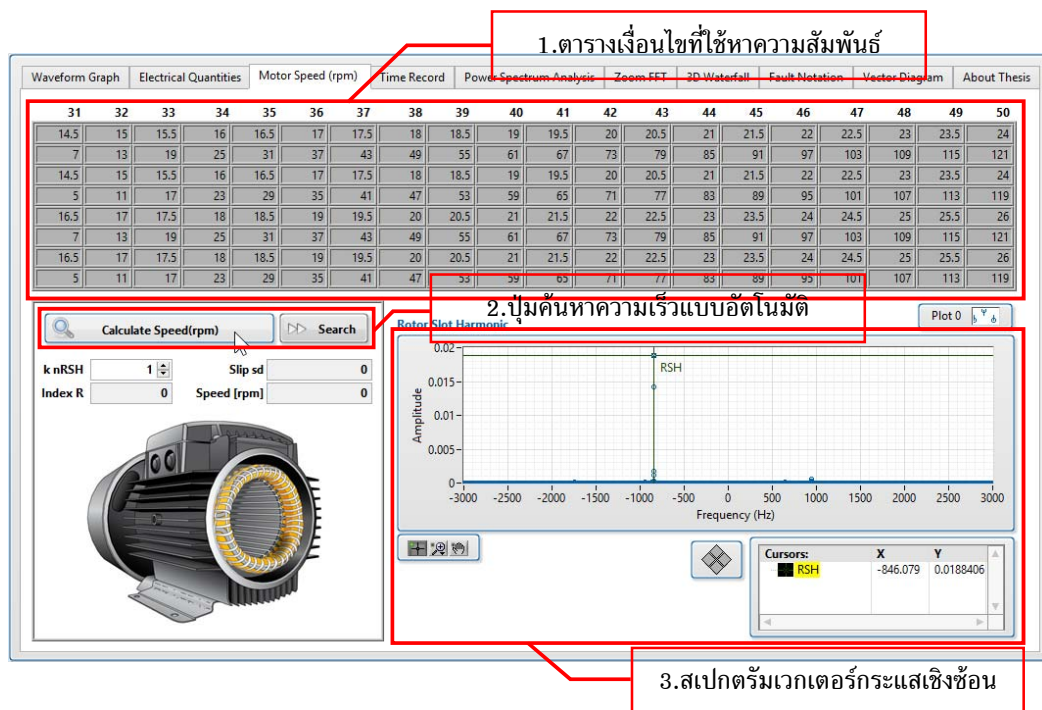
4.2 ผลการทดสอบโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็ว



ภาพประกอบ 4-3 อัลกอริธึมการทดสอบโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็ว SubVI_II

ภาพประกอบ 4-3 แสดงอัลกอริธึมการทดสอบโปรแกรมเครื่องมือคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์แบบอัตโนมัติเมื่อมีการเริ่มโปรแกรมโดยผู้ใช้งาน จากอัลกอริธึมการทดสอบนี้ หลักการทำงานของโปรแกรมคำนวณความเร็วรอบจะเริ่มต้นการตรวจหาเงื่อนไขที่เป็นจริงดังภาพประกอบ 4-2 ซึ่งในการทดสอบการทำงานของโปรแกรมแบบอัตโนมัตินี้จะทำการค้นหาเงื่อนไขที่สอดคล้องกันแบบ Dubble Check ซึ่งจะเริ่มการตรวจหาเงื่อนไขที่สอดคล้องกันในรอบ

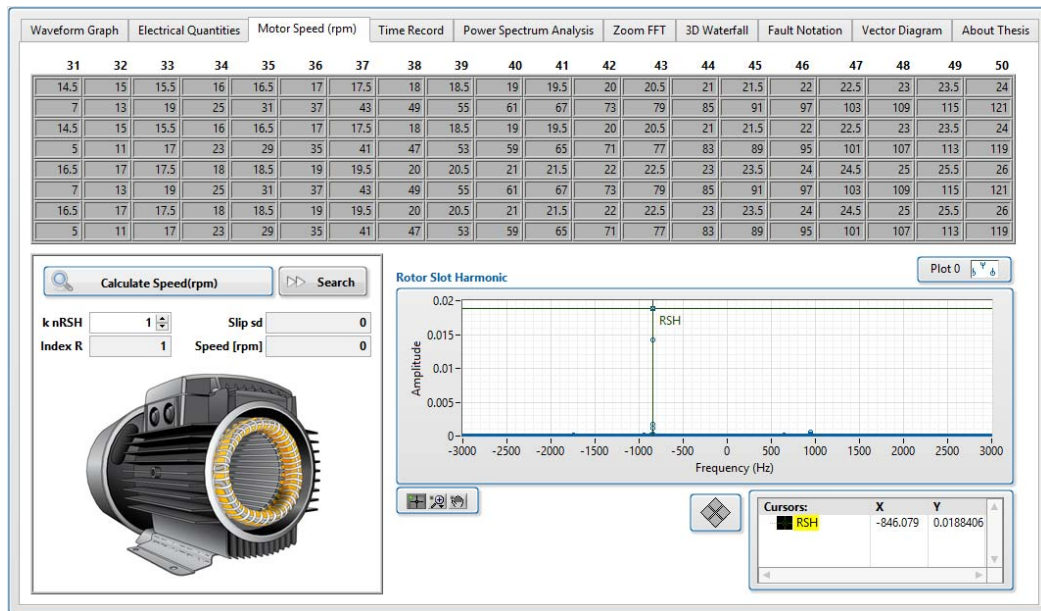
แรก โดยที่ค่า k หรือตัวป่งชี้ลำดับฮาร์มอนิกส์ของสล็อตโรเตอร์ จะกำหนดเริ่มต้นรอบแรกเป็น 1 และกำหนดการเริ่มต้นการค้นหาค่า R หรือจำนวนแ่งตัวนำสล็อตโรเตอร์ที่ทำให้เงื่อนไขเป็นจริง โดยเริ่มต้นสมมุติที่ค่า $R=31$ แ่งตัวนำ ซึ่งจะมีค่าของ Index R ในช่องเก็บค่าอาร์เรย์ที่ ตำแหน่ง 0 ในส่วนการค้นหาแบบอัตโนมัตินี้จะสมมุติให้โปรแกรมทำการค้นหาแบบวนลูปไปเป็นจำนวน 20 ครั้ง ซึ่งก็คือนจะมีค่าอาร์เรย์ที่เก็บข้อมูลไว้สูงสุดที่ Index $R = 0$ ถึง 20 ค่า ซึ่งถ้าเทียบเป็นจำนวนของแ่งตัวนำสล็อตโรเตอร์ ก็จะมีค่า $R = 31$ ถึง 50 แ่งตัวนำสล็อตโรเตอร์นั่นเอง ซึ่งในส่วนนี้ โปรแกรมสามารถที่จะตั้งค่าเริ่มต้นวนลูปการตรวจหาที่ถูกรอบก็ได้สำหรับการนำไปใช้กับมอเตอร์ตัวอื่น ๆ แต่ในงานวิจัยได้ยกตัวอย่างการทวนสอบการทำงานแบบอัตโนมัติโดยมีช่วงของ R สำหรับการวนลูปตรวจหาเงื่อนไขที่สอดคล้องกันตั้งแต่ $R = 31$ ถึง 50 ซึ่งส่วนของโปรแกรมจะเริ่มต้นด้วยการเริ่มต้นตรวจหาที่ Index $R = 0$ ก่อนแสดงการเริ่มโปรแกรมการทำงานดังภาพประกอบ 4-4



ภาพประกอบ 4-4 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=31$ แ่งตัวนำสล็อตโรเตอร์

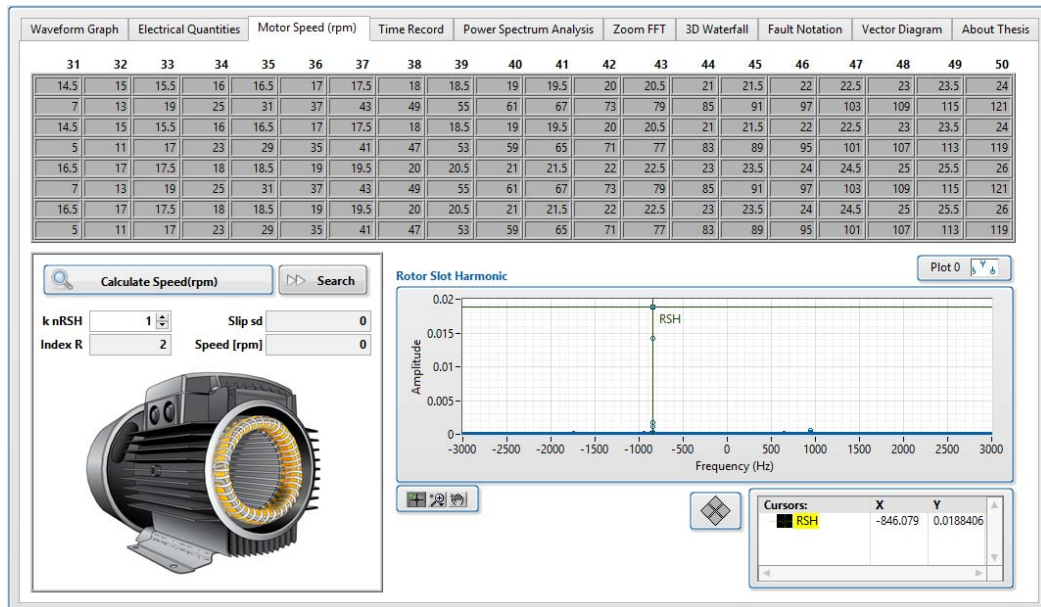
จากภาพประกอบ 4-4 จะเป็นผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบการค้นหาอัตโนมัติในรอบการวนลูปแรก ที่ $k=1$, $R=31$ จากภาพจะสังเกตเห็นได้

ว่าค่า $k=1$, Index $R=0$ ซึ่งก็คือในรอบการวนลูปแรก $R=31$ จะไม่มีเงื่อนไขที่มีความสอดคล้องกันระหว่างสมการเงื่อนไข ผลที่ได้ก็คือ ค่าจำนวนในช่อง Slip และ Speed นั้นจะไม่แสดงค่าปรากฏ ซึ่งก็หมายถึงว่าที่ค่า $k=1$, $R=31$ ไม่ได้เป็นค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงของมอเตอร์ทดสอบ จากนั้นโปรแกรมจะเริ่มการวนลูปหาค่าความเร็วต่อไป ซึ่งก็คือในรอบการวนลูปที่ $k=1$, $R=32$ หรือ (Index $R = 1$) ดังภาพประกอบ 4-5

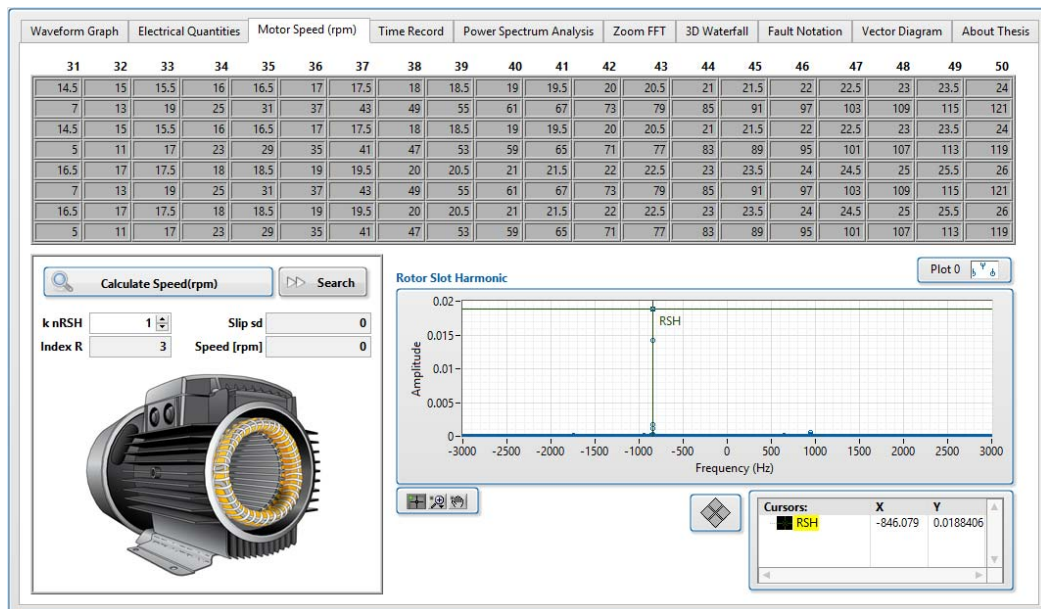


ภาพประกอบ 4-5 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=32$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์

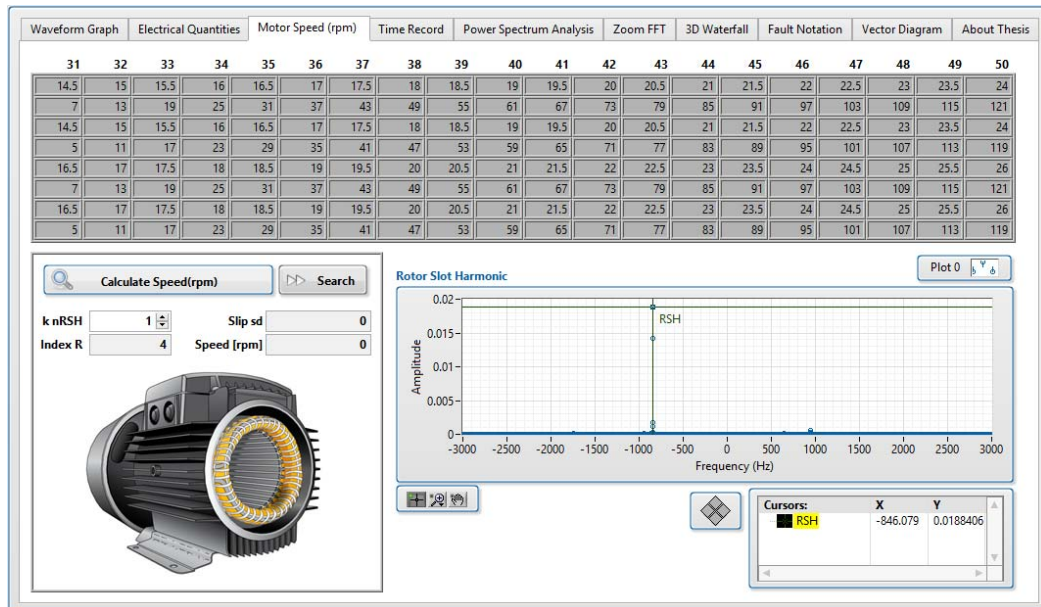
จากภาพประกอบ 4-5 นั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อโปรแกรมการคำนวณความเร็วรอบค้นหาความเร็วแบบอัตโนมัติมาถึงในรอบของ $k=1$, $R=32$ หรือ (Index $R=1$) แล้วนั้น ผลที่ได้ก็คือ ค่าจำนวนในช่อง Slip และ Speed นั้นก็ยังคงไม่แสดงค่าปรากฏ ซึ่งก็หมายถึงว่าที่ค่า $k=1$, $R=32$ ไม่ได้เป็นค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงของมอเตอร์ทดสอบ จากนั้นโปรแกรมจะเริ่มการวนลูปปรับเปลี่ยนค่า Index R ไปครั้งละ 1 ค่า หาค่าความเร็วต่อไปจนกว่าโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วจะตรวจพบเงื่อนไขที่สอดคล้องกันจากตารางที่ใช้หาความสัมพันธ์ ดังภาพประกอบ 4-6 ถึงภาพประกอบ 4-8



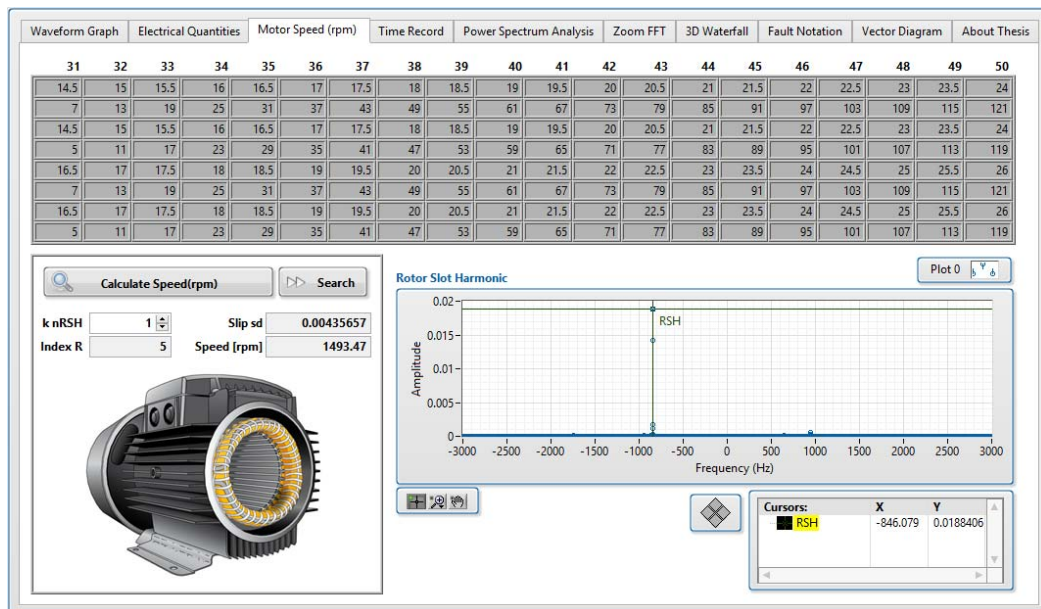
ภาพประกอบ 4-6 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=33$ แห่งตัวนำสล็อตโรเตอร์



ภาพประกอบ 4-7 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=34$ แห่งตัวนำสล็อตโรเตอร์



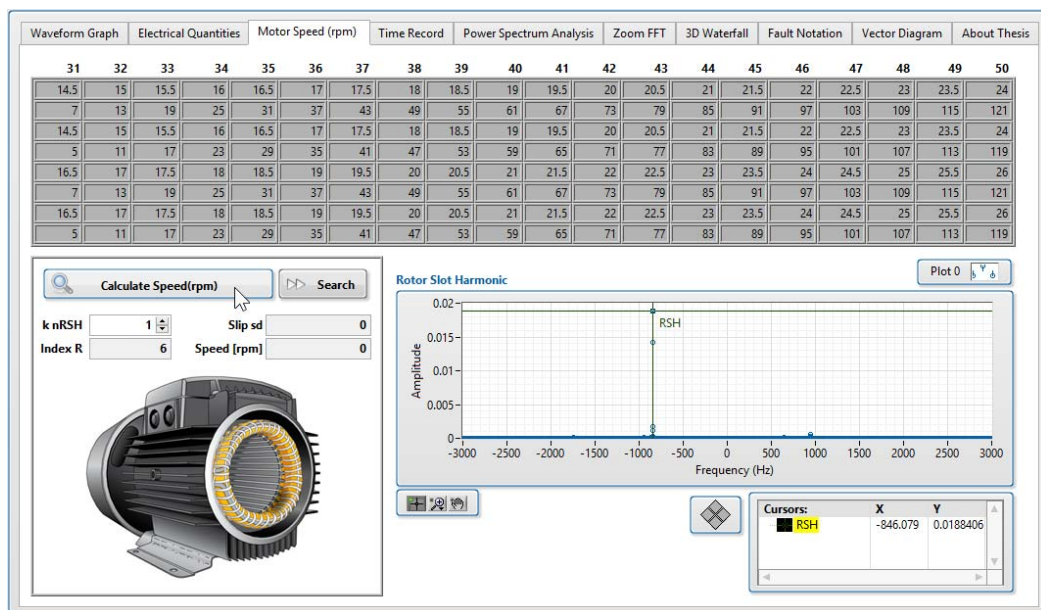
ภาพประกอบ 4-8 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในรอบแรกๆที่ $k=1$, $R=35$ แห่งตัวนำสล็อตโรเตอร์



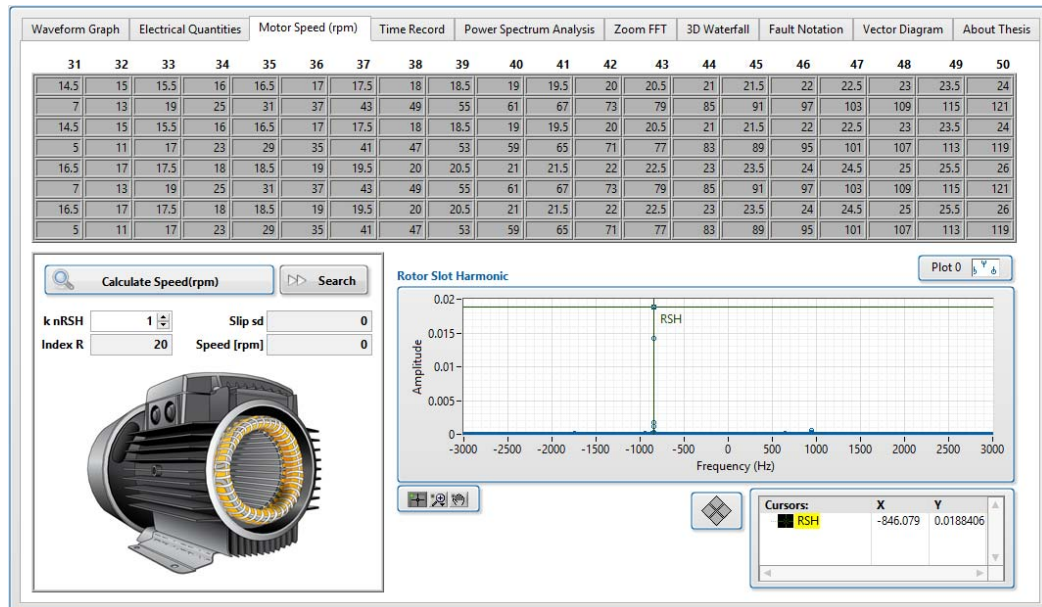
ภาพประกอบ 4-9 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในรอบแรกๆที่ $k=1$, $R=36$ แห่งตัวนำสล็อตโรเตอร์

จากภาพประกอบ 4-9 นั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อโปรแกรมการคำนวณความเร็วรอบค้นหาความเร็วแบบอัตโนมัติมาถึงในรอบของ $k=1$, $R=36$ หรือ (Index $R=5$) แล้วนั้น ผลที่ได้ก็คือ ค่าจำนวนในช่อง Slip และ Speed จะแสดงค่าปรากฏ ซึ่งก็หมายถึงว่าโปรแกรมได้ตรวจค้นหาพบเงื่อนไขที่สอดคล้องกันจากตารางที่ใช้หาความสัมพันธ์ได้ นั่นก็คือที่ค่า $k=1$, $R=36$ นี้จะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงของมอเตอร์ทดสอบ โปรแกรมก็จะแสดงผลค่า Slip และ Speed ที่ตรวจค้นหาได้ออกมา

จากนั้นในขั้นการทวนสอบต่อไป ในงานวิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่าโปรแกรมสามารถตรวจค้นหาความเร็วได้อีกหรือไม่ หรือยังมีเงื่อนไขใดในตารางความสัมพันธ์ที่จะเป็นจริงอีกหรือไม่ เมื่อเครื่องมือการคำนวณความเร็วยังคงทำการค้นหาความเร็วต่อไปตั้งสมมุติฐานที่ตั้งไว้ข้างต้นที่จะให้โปรแกรมมีการวนลูปสมมุติการค้นหาตั้งแต่ค่า $R=31$ จนถึง $R=50$ จึงได้ทำการกดปุ่มค้นหาความเร็วแบบอัตโนมัติต่อไปจนถึงค่า $R=50$ หรือ (Index $R=20$) โดยในแต่ละรอบโปรแกรมจะเริ่มการวนลูปปรับเพิ่มค่า Index R ไปครั้งละ 1 ค่าเช่นเดิม หาค่าความเร็วต่อไปจนกว่าโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วจะตรวจพบเงื่อนไขที่สอดคล้องกันจากตารางที่ใช้หาความสัมพันธ์ดังภาพประกอบ 4-10 ถึงภาพประกอบ 4-11



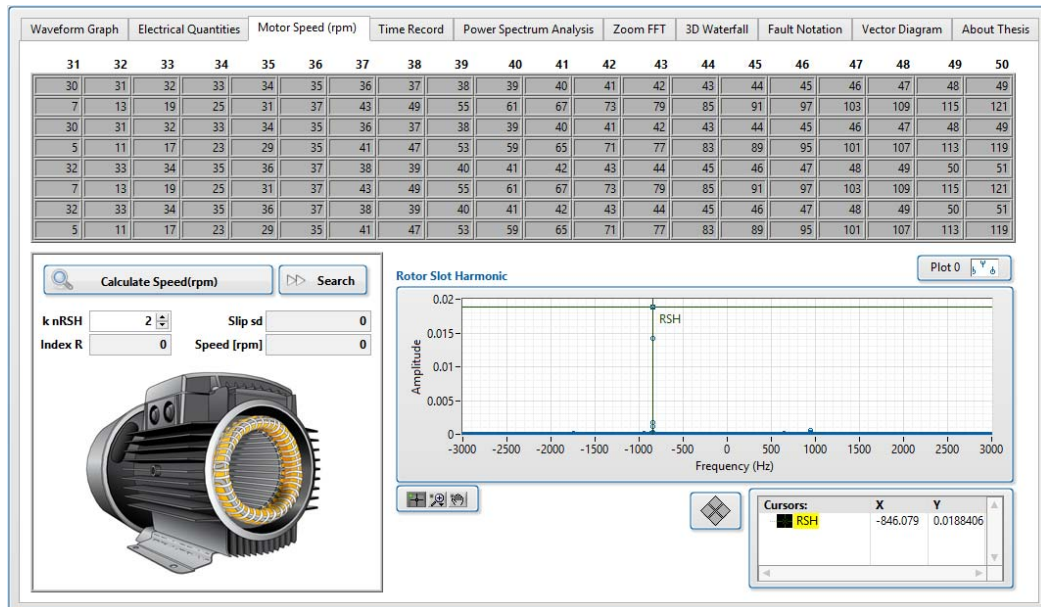
ภาพประกอบ 4-10 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติในรอบแรกที่ $k=1$, $R=37$ แท่งตัวนำสล็อตโรเตอร์



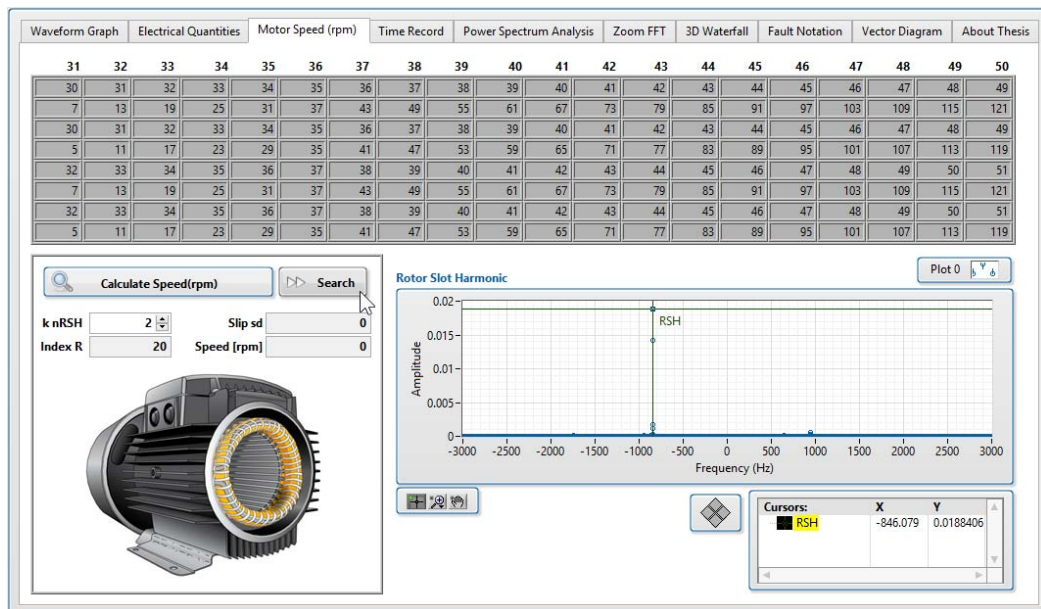
ภาพประกอบ 4-11 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในรอบแรกที่ $k=1$, $R=50$ แห่งตัวนำสล็อตโรเตอร์

จากภาพประกอบ 4-10 และภาพประกอบ 4-11 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ก็คือ โปรแกรมไม่สามารถตรวจค้นหาเงื่อนไขที่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกันได้อีกในช่วงของการค้นหาแบบอัตโนมัติที่ $k=1$, $R=37$ ถึง $R=50$ แห่งตัวนำสล็อตโรเตอร์ ซึ่งผลที่ได้ก็จะสอดคล้องกับความเป็นจริงที่ว่าในมอเตอร์ตัวหนึ่งจะมีเพียงค่าจำนวนสล็อตโรเตอร์ค่าเดียว ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ถูกออกแบบมาแล้วตอนผลิตมอเตอร์ ซึ่งก็จะเห็นได้จากผลการทวนสอบโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบการค้นหาความเร็วอัตโนมัติที่ตรวจพบเงื่อนไขที่สอดคล้องกันที่ค่า $k=1$, $R=36$ หรือ (Index $R=5$)

จากนั้นในขั้นการทวนสอบต่อไป ในงานวิจัยได้ตั้งสมมุติฐานไว้ว่าหากค่า k หรือตัวบ่งชี้ลำดับฮาร์มอนิกมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป เครื่องมือโปรแกรมที่ได้พัฒนานั้นสามารถที่จะตรวจค้นหาความเร็วได้ผลเป็นอย่างไร จึงกำหนดอัลกอริทึมการทวนสอบแบบ Double Check เพื่อตรวจเช็คการคำนวณความเร็วอีกครั้งหนึ่งเมื่อค่า k มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยจะตรวจเช็คค่าการวนลูป $k=1$, $R=50$ ในรอบแรก ซึ่งในรอบการวนลูปแรกเพื่อค้นหาความเร็วหากโปรแกรมทำการค้นหาค่าจนถึงช่วงสูงสุดที่สมมุติไว้หรือ $R=50$ ให้โปรแกรมปรับค่า $k=2$ แล้วเริ่มการตรวจค้นหาค่าความเร็วรอบใหม่อีกครั้งที่ $R=31$ เพื่อวิเคราะห์ถึงผลที่ได้ ดังภาพประกอบ 4-12 และภาพประกอบ 4-13



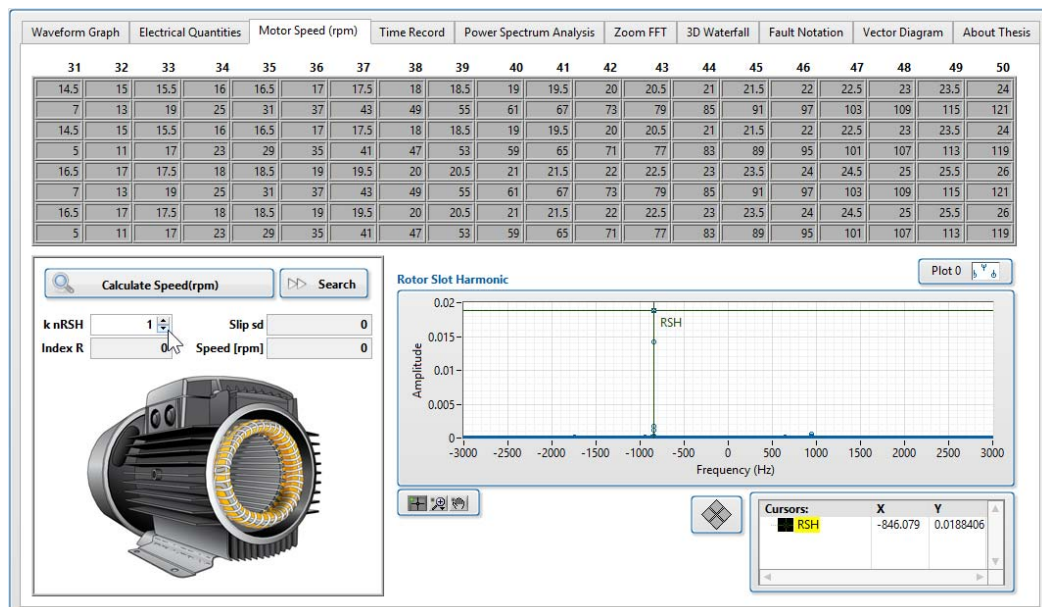
ภาพประกอบ 4-12 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในรอบสอง Double Check ที่ $k=2$, $R=31$ แท่งตัวนำสลิตโรเตอร์



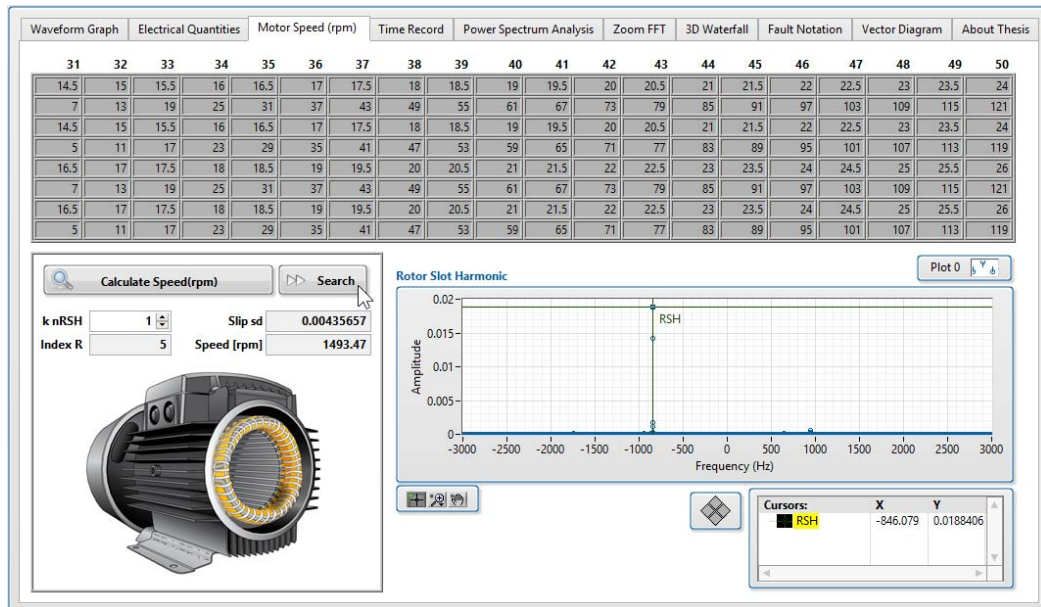
ภาพประกอบ 4-13 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในรอบสอง Double Check ที่ $k=2$, $R=50$ แท่งตัวนำสลิตโรเตอร์

จากภาพประกอบ 4-12 และภาพประกอบ 4-13 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ ตั้งแต่ในช่วงการวนลูปค้นหาความเร็วรอบในครั้งที่สอง Double Check ในช่วง $k=2$, R มีค่าตั้งแต่ 31-50 แห่งตัวนำสลอตโรเตอร์ จะเห็นได้ว่าโปรแกรมไม่สามารถที่จะตรวจพบเงื่อนไขที่สอดคล้องกันจากรางความสัมพันธ์ได้อีก ซึ่งก็จะเป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้คือหากค่า k เพิ่มขึ้นเป็น 2 จะทำให้ค่าช่วงของเงื่อนไขสมการ k ดังตาราง 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ฮาร์มอนิกของสลอตโรเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดและผลของพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการออกแบบมอเตอร์ [5] ตาราง 2-3 เปลี่ยนแปลงไปไม่อยู่ในช่วงการค้นหาโรเตอร์สลอตฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงสุด ซึ่งจากภาพประกอบในส่วนของสเปกตรัมแวกเตอร์กระแสเชิงซ้อนที่สังเกตเห็นได้นั้นตำแหน่งของโรเตอร์สลอตฮาร์มอนิกสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเกิดในช่วงบริเวณความถี่ -846 Hz กล่าวคือหากมีการเพิ่มค่าตัวแปร k ขึ้นจะส่งผลในเรื่องของช่วงการค้นหาโรเตอร์สลอตฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงสุด นั่นคือในมอเตอร์ตัวหนึ่ง ๆ ค่าพารามิเตอร์ k , R, P จะเป็นตัวกำหนดช่วงความถี่โรเตอร์สลอตฮาร์มอนิกสัวินนั่นเอง

จากผลที่ได้ในการตรวจค้นหาเมื่อเพิ่มค่า $k=2$ ในรอบการค้นหาครั้งที่สอง Double Check ไม่เจอเงื่อนไขที่สอดคล้องกันจากรางความสัมพันธ์ ผู้ใช้งานจึงสามารถเลือกกลับมาใช้ค่า $k=1$ ได้ดังภาพประกอบ 4-14 และทำการค้นหาค่าความเร็วแบบอัตโนมัติอีกครั้งซึ่งก็จะได้ค่าสลิตและความเร็วรอบมอเตอร์ดังภาพประกอบ 4-15



ภาพประกอบ 4-14 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในรอบสามที่ $k=1$, R=31 แห่งตัวนำสลอตโรเตอร์



ภาพประกอบ 4-15 ผลการเริ่มต้นโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วแบบอัตโนมัติ
ในกรอบสามที่ $k=1$, $R=36$ แห่งตัวนำสล็อตโรเตอร์

จากภาพประกอบ 4-15 เมื่อโปรแกรมตรวจหาค่าสลิปและความเร็วรอบได้แล้ว
นั้นโปรแกรมการคำนวณจะสั่งหยุดการเพิ่มค่า R และใช้ค่า R คำนวณที่ทำให้โปรแกรมตรวจค้นพบ
ค่าสลิปและค่าความเร็วเป็นจริง ทำการเก็บค่าไว้ในหน่วยความจำ Shift Register ภายในโปรแกรม
LabVIEW และใช้ค่า R คำนวณในการคำนวณค่าสลิปและความเร็วต่อไป

4.3 ผลพิสูจน์การคำนวณค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์

จากทฤษฎีของการใช้ความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ปะปนอยู่ในรูปคลื่นสัญญาณกระแส
สเตเตอร์อันเนื่องมาจากผลของสล็อตโรเตอร์ซึ่งได้อธิบายสมการคำนวณไว้ในบทที่ 2 แล้วนั้น ซึ่ง
สามารถที่จะหาค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์ได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Case 1	True RSH Case 1	True RSH Case 2	True RSH Case 4	True RSH Case 5
0	NaN	-850	950	NaN
0	fsh,d 1 NaN	fsh,d 2 846.079	fsh,d 4 NaN	fsh,d 5 NaN
0	nw 1 0	nw 2 -1	nw 4 1	nw 5 0
0	sgn(h) 1 0	sgn(h) 2 -1	sgn(h) 4 1	sgn(h) 5 0
0	k 1 0	k 2 1	k 4 1	k 5 0
	R 1 0	R 2 36	R 4 36	R 5 0
	P 1 0	P 2 2	P 4 2	P 5 0
	Slip sd 1 NaN	Slip sd 2 0.00435657	Slip sd 4 NaN	Slip sd 5 NaN
	Speed rpm 1 NaN	Speed rpm 2 1493.47	Speed rpm 4 NaN	Speed rpm 5 NaN

ภาพประกอบ 4-16 เงื่อนไขที่เป็นจริงสอดคล้องกันตามความสัมพันธ์เมื่อโปรแกรมตรวจพบ

จากภาพประกอบ 4-16 เป็นผลของโปรแกรมที่พัฒนาจากอัลกอริทึมในภาพประกอบ 4-2 สร้างขึ้นเป็น Sub VI_I ที่ทำงานซ่อนอยู่ภายในโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วจากภาพจะเห็นได้ว่ามีเงื่อนไขที่เป็นจริง 2 กรณี ซึ่งอยู่ใน Case 2 และ Case 4 มีความสัมพันธ์ตามตาราง 2-3 ซึ่งมีค่าของ $(kR/P - 1) = 6m - 1$ ใน Case 2 และมีค่าของ $(kR/P + 1) = 6m + 1$ ใน Case 4 เป็นจริงดังภาพประกอบ 4-17

No.R out		14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23	23.5	24	0
0	0	7	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67	73	79	85	91	97	103	109	115	121	0
0	0	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23	23.5	24	0
0	0	5	11	17	23	29	35	41	47	53	59	65	71	77	83	89	95	101	107	113	119	0
0	0	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23	23.5	24	24.5	25	25.5	26	0
0	0	7	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67	73	79	85	91	97	103	109	115	121	0
0	0	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23	23.5	24	24.5	25	25.5	26	0
0	0	5	11	17	23	29	35	41	47	53	59	65	71	77	83	89	95	101	107	113	119	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ภาพประกอบ 4-17 ตารางเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ได้จากการทวนสอบโปรแกรม

จากภาพประกอบ 4-17 แสดงการพิสูจน์เงื่อนไขที่สอดคล้องกันได้ดังต่อไปนี้ ในกรณี Case 2 เป็นจริงจะพิสูจน์ได้ว่า $(kR/P - 1) = 6m - 1$ เมื่อ $k=1, R=36$ ซึ่งเป็นผลที่ตรวจค้นหาได้จากโปรแกรมในส่วนก่อนหน้า มอเตอร์เหนี่ยวนำทดสอบมีจำนวนโพล = 4 ซึ่งจะได้ตัวแปรของคู่ขั้วแม่เหล็ก $P = 2$ ค่า m ที่สอดคล้อง = 3

$$\begin{aligned}(kR/P - 1) &= 6m - 1 \\ ((1 \times 36 / 2) - 1) &= (6 \times 3) - 1 \\ 17 &= 17\end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ในตาราง 2-3 ในกรณี Case 2 เป็นจริง ค่าของฮาร์มอนิกส์ฟังก์ชัน $h = f_{sh}/f_0|_{s=0}$ จะมีค่าเท่ากับ $-(kR/P - 1)$

$$\begin{aligned}h = f_{sh}/f_0|_{s=0} &= -(kR/P - 1) \\ f_{sh} = hf_0 &= -(kR/P - 1)f_0 \\ &= -17f_0 \\ &= -17 \times 50 \text{ Hz} \\ &= -850 \text{ Hz}\end{aligned}$$

ซึ่งก็จะเกิดค่าฮาร์มอนิกส์ปรากฏในบริเวณที่ลำดับฮาร์มอนิกส์ที่ 17 ซึ่งก็คือที่บริเวณความถี่ -850Hz

ในกรณี Case 4 เป็นจริงจะพิสูจน์ได้ว่า $(kR/P + 1) = 6m + 1$ เมื่อ $k=1, R=36$ ซึ่งเป็นผลที่ตรวจค้นหาได้จากโปรแกรมในส่วนก่อนหน้า มอเตอร์เหนี่ยวนำทดสอบมีจำนวนโพล = 4 ซึ่งจะได้ตัวแปรของคู่ขั้วแม่เหล็ก $P = 2$ ค่า m ที่สอดคล้อง = 3

$$\begin{aligned}(kR/P + 1) &= 6m + 1 \\ ((1 \times 36/2) + 1) &= (6 \times 3) + 1 \\ 19 &= 19\end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ในตาราง 2-3 ในกรณี Case 4 เป็นจริง ค่าของฮาร์มอนิกส์ฟังก์ชัน $h = f_{sh}/f_0|_{s=0}$ จะมีค่าเท่ากับ $(kR/P + 1)$

$$\begin{aligned}h = f_{sh}/f_0|_{s=0} &= (kR/P + 1) \\ f_{sh} = hf_0 &= (kR/P + 1)f_0 \\ &= 19f_0 \\ &= 19 \times 50\text{Hz} \\ &= 950\text{Hz}\end{aligned}$$

ซึ่งก็จะเกิดค่าฮาร์มอนิกส์ปรากฏในบริเวณที่ลำดับฮาร์มอนิกส์ที่ 19 ซึ่งก็คือที่บริเวณความถี่ 950Hz

จากเงื่อนไขฮาร์มอนิกส์ฟังก์ชันที่เป็นโปรแกรมตรวจสอบว่าสอดคล้องกัน 2 กรณี ดังภาพประกอบ 4-16 ซึ่งแสดงค่าของ True RSH Case ออกมา 2 ค่าใน 2 กรณี ดังนั้นโปรแกรมการคำนวณตั้งอัลกอริธึมในภาพประกอบ 4-2 จะเข้าสู่กระบวนการ Detect Peak ต่อไป ซึ่งแสดงไว้ดังภาพประกอบ 4-18 ซึ่งจากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่าสเปกตรัมกระแสเชิงซ้อนนั้นมีค่า max index อยู่ที่ตำแหน่งอาร์เรย์ช่องที่ 5933 ในส่วนนี้จะพบได้ว่าค่าจริงของความถี่โรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิกส์นั้นจะปรากฏที่ตำแหน่งของ RSH Case 2 เท่านั้น เปรียบเทียบได้ดังภาพประกอบ 4-16 ซึ่งก็คือค่าของโรเตอร์สล็อตฮาร์มอนิกส์ที่มีอิทธิพลสูงสุดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั่นเอง จากโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณความเร็วนี้จะตรวจจับค่านี้ได้ที่ความถี่ -846.079Hz ซึ่งความถี่ค่านี้นี้จะนำไปเข้าสู่กระบวนการหาค่าของ Slip และ Speed ของมอเตอร์ในตัวอย่างที่ 3



ภาพประกอบ 4-18 ส่วนของการ Detect Peak จากสเปกตรัมกระแสเชิงซ้อน

ตัวอย่างที่ 3 การคำนวณหาค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์ เมื่อค่าที่ได้มาจากการตรวจจับโรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิกจากสเปกตรัมกระแสสแตเตอร์ที่ผ่านการแปลง FFT ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสูงสุด $f_{sh,d} = -846.079 Hz$ นั้น จากค่าต่างๆ ในกรณีของ True RSH Case 2 นั้น จะสามารถคำนวณค่า Slip และคำนวณค่า Speed ของมอเตอร์ได้ดังต่อไปนี้

$$n_w = -1, \quad \text{sgn}(h) = -1$$

จากสมการ 2.86 ;

$$s_d = (1 - P) \times \frac{\left[\text{sgn}(h) \times \left(\frac{f_{sh,d}}{f_0} \right) - n_w \right]}{kR}$$

จะได้ ;

$$s_d = 1 - 2 \left[\frac{\left((-1) \times \left(\frac{-846.079}{50} \right) \right) - (-1)}{1 \times 36} \right]$$

$$s_d = 0.004356666$$

จากสมการ 2.10 ; $n_s = \frac{120 f_s}{P}$ จะได้ค่าอัตราเร็วซิงโครนัส ;

$$n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$

จากสมการ 2.13 ; $n_r = n_s(1 - s)$

$$\begin{aligned} n_r &= 1500 \times (1 - 0.004356666) \\ &= 1493.465001 \text{ rpm} \end{aligned}$$

จากผลการทวนสอบโปรแกรมคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าอัลกอริธึมในการตรวจหาค่าโรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิกส์ที่มีอิทธิพลสูงสุดโปรแกรมสามารถที่จะตัดแยกความถี่โรเตอร์สล็อตฮาร์โมนิกส์จากสเปกตรัมเวกเตอร์กระแสเชิงซ้อนออกมาได้ถูกต้อง และในอัลกอริธึมการคำนวณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ก็สามารถที่จะคำนวณค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์ออกมาได้ โดยผ่านอัลกอริธึมการตรวจหาค่า R หรือ จำนวนแท่งตัวนำโรเตอร์สล็อตตามเงื่อนไขในตารางความสัมพันธ์ออกมาได้ถูกต้องแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะทำให้โปรแกรมมีความถูกต้องของการคำนวณค่าความเร็วก่อนการนำไปใช้งานจริง

บทที่ 5

การออกแบบเครื่องมือการวิเคราะห์ความผิดปกติ

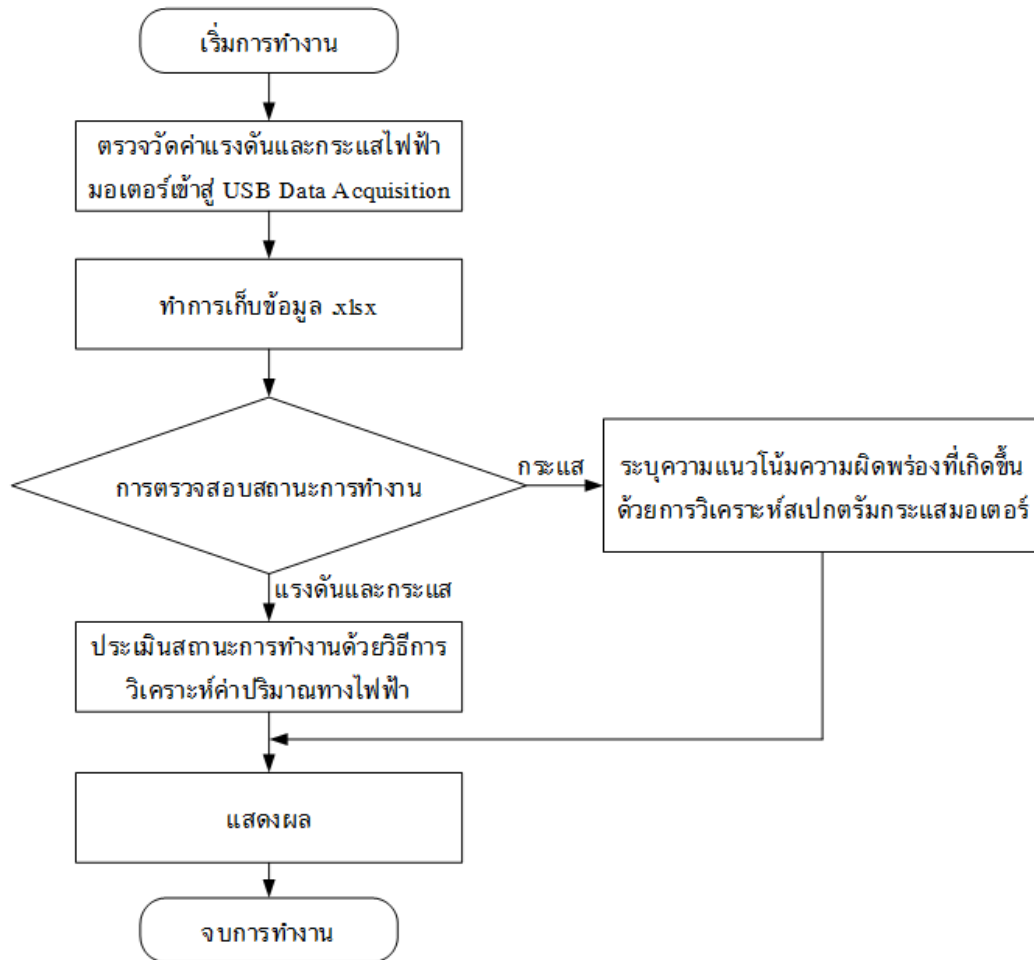
ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนของการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดเสมือนสำหรับการตรวจสอบการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำส่วนสุดท้าย ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องมือการวิเคราะห์ความผิดปกติ (Fault Notation) เป็นการพัฒนาเครื่องมือการวิเคราะห์ให้มีฟังก์ชันใช้งานสำหรับการตรวจสอบการลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์ โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสเป็นพื้นฐาน ซึ่งจะประกอบด้วยเรื่องของการออกแบบอัลกอริทึมของเครื่องมือตรวจวัดเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW ในการบ่งบอกสถานะแนวโน้มของการทำงานของมอเตอร์ในขณะนั้น ให้ผู้ใช้งานสามารถทราบได้ถึงสถานะการทำงานในเบื้องต้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และสุดท้ายจะเป็นผลพิสูจน์สมการขององค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่จะปรากฏขึ้นบนสเปกตรัมกระแสเมื่อมอเตอร์เกิดการลัดวงจรในขดลวดสเตเตอร์

5.1 การออกแบบอัลกอริทึมของเครื่องมือตรวจวัดเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW

ในการออกแบบอัลกอริทึมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนนั้น ในงานวิจัยได้แบ่งการออกแบบอัลกอริทึมไว้เป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

5.1.1 ส่วนการรับค่าข้อมูลสัญญาณ

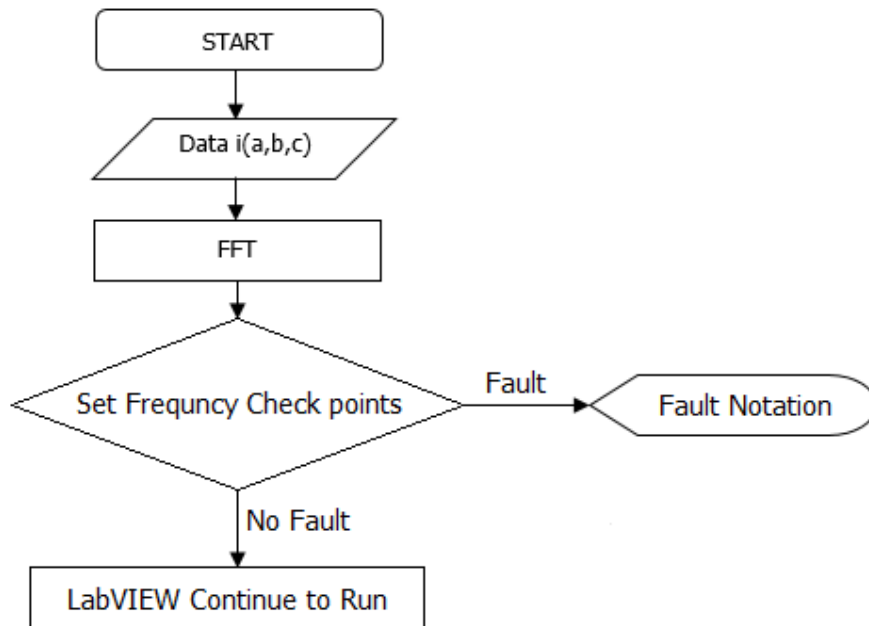
ในส่วนนี้จะเป็นส่วนแรกของการตรวจสอบการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ในส่วนต่อไปเป็นอย่างยิ่ง สิ่งสำคัญในส่วนนี้ก็คือชุดตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้า (Sensor) ทั้งในส่วนของตัวตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และสัญญาณกระแสไฟฟ้า ที่จะต้องมีคุณสมบัติของความเป็นเชิงเส้นในการตรวจวัดเพื่อที่จะนำสัญญาณทางไฟฟ้ามาแปรผลต่อไปได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะเริ่มต้นกระบวนการโดยการรับค่าข้อมูลสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วสเตเตอร์ของมอเตอร์ผ่านทางตัวแปลงข้อมูลอนาล็อกไปเป็นข้อมูลสัญญาณดิจิทัลด้วยกระบวนการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ ชุดอุปกรณ์ที่ใช้คือ Data Acquisition (DAQ USB-6009) ข้อมูลที่รับค่ามานี้จะเข้าสู่กระบวนการประมวลผลสัญญาณทางดิจิทัลด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป โดยข้อมูลที่ทำกรตรวจวัดจะมีการบันทึกค่าต่าง ๆ ตลอดช่วงเวลาการเก็บข้อมูลที่ต้องการไว้ในรูปแบบของไฟล์นามสกุล .xlsx หรือนามสกุลที่ใช้ใน Microsoft office excel ดังภาพประกอบ 5-1 ซึ่งในส่วนของการรับค่าข้อมูลสัญญาณนี้สิ่งที่ต้องคำนึง ความถี่ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ และจำนวนของข้อมูลสัญญาณที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป จากกระบวนการเริ่มต้นนี้จะเข้าสู่การออกแบบอัลกอริทึมในการตรวจสอบสถานะในส่วนอื่นๆ ถัดไป



ภาพประกอบ 5-1 Flow chart แสดงการรับค่าข้อมูลสัญญาณ

5.1.2 ส่วนการวิเคราะห์สเปกตรัมกระแส

ในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบการตรวจสอบสถานะมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยแนวคิดที่ต้องการให้ผู้ใช้งานมอเตอร์สามารถเลือกที่จะประเมินองค์ประกอบของข้อมูลที่ปะปนอยู่ในรูปคลื่นของสเปกตรัมได้ โดยการตั้งค่าช่วงตรวจจับความถี่ต้องสงสัยบนสเปกตรัมกระแสซึ่งจะมีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานเพราะในการตั้งค่าช่วงตรวจจับนี้จะไม่ได้อำหนดค่าตายตัวให้ตรวจจับอยู่ที่เฉพาะช่วงความถี่ใดช่วงความถี่หนึ่ง ผู้ใช้งานสามารถที่จะปรับเปลี่ยนค่าเริ่มต้นให้โปรแกรมตรวจจับช่วงความถี่ได้ตามต้องการได้ หลักการทำงานเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นเครื่องมือตรวจสอบสถานะการทำงานจะโชว์สถานะเป็นสัญญาณไฟเตือนให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าตรวจสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ แสดงไดอะแกรมการวิเคราะห์ที่ได้ดังภาพประกอบ 5-2



ภาพประกอบ 5-2 Flow chart ส่วนการวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสเตเตอร์

5.1.3 ส่วนแสดงผลโปรแกรม LabVIEW

ในส่วนของการแสดงผลผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยได้ออกแบบเครื่องมือตรวจวัดเสมือนโดยคำนึงถึงความสะดวกต่อการใช้งานของผู้ใช้ โดยได้แยกส่วนของการตรวจสอบสถานะออกไว้เป็นส่วน ๆ ด้วยกัน ซึ่งจะประกอบไปด้วยแท็บควบคุม 9 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. Waveform Grap ในส่วนนี้จะแสดงลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสเป็นคู่ ๆ ซึ่งในส่วนสเกลกราฟของกระแสไฟฟ้าจะมีขนาดของแอมพลิจูดสัญญาณจริงที่น้อยเมื่อเทียบกับสเกลกราฟของแรงดันไฟฟ้า จึงต้องมีการชดเชยตัวคูณเพื่อให้การเปรียบเทียบชัดเจนยิ่งขึ้น

2. Electrical Quantities ในส่วนนี้จะแสดงค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของมอเตอร์ เช่น แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เฟสแต่ละเฟส ค่าความผิดพลาดรวมของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าและค่ากิโลวัตต์ชั่วโมง ตลอดจนมาตรฐานการคำนวณ IEEE1459-2010 สำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

3. Motor Speed (rpm) ในส่วนนี้จะแสดงค่าสลิป และค่าความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำในหน่วยของ rpm ในกรณีที่ไมทราบจำนวนของสล็อตโรเตอร์โปรแกรมจะต้องมีการรับค่าอินพุตจากผู้ใช้งานเพื่อใช้ในการคำนวณหาความเร็วรอบ และค่าสลิป

4. Time Record ในส่วนนี้จะแสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 3 เฟส โดยแยกแสดงแต่ละส่วนออกจากกัน

5. Power Spectrum Analysis ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของความถี่ที่ปรากฏในสัญญาณกระแสไฟฟ้าในรูปของสเปกตรัมที่ผ่านการแปลง FFT มาแล้ว

6. Zoom FFT ในส่วนนี้จะใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสที่ประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกส์ต่างๆให้สามารถแสดงรายละเอียดของความถี่ที่ปรากฏได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

7. 3D Waterfall ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงผลสเปกตรัมกระแสในมิติที่เพิ่มขึ้นสามารถวิเคราะห์มองเห็นมิติด้านต่างๆของสเปกตรัมกระแสได้

8. Fault Notation ในส่วนนี้จะเป็นส่วนการประเมินสถานะการทำงานพื้นฐานของมอเตอร์ว่ามีแนวโน้มความผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่ ผ่านทางการโชว์สถานะไฟเตือนบนหน้าจอเครื่องมือตรวจวัดเสมือนที่พัฒนา โดยผู้ใช้สามารถที่จะเลือกการตั้งค่าช่วงตรวจจับความถี่ได้ในส่วนนี้

9. Vector Diagram ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์พิจารณาข้อมูลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากวงจรตรวจวัดสัญญาณ ซึ่งสามารถวิเคราะห์เรื่องความสมดุลหรือความไม่สมดุลของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแต่ละเฟสได้

5.2 ผลพิสูจน์สมการองค์ประกอบความถี่เมื่อเกิดการลัดวงจรของขดลวด

เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ จากทฤษฎีของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในกระแสสเตเตอร์ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 แล้วนั้น จะได้

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

โดยที่	f_{st}	คือ ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากการลัดวงจรขดลวดสเตเตอร์
	f_1	คือ ความถี่มูลฐาน
	n	คือ ตำแหน่งฮาร์มอนิกส์ที่ปรากฏ 1,2,3,...
	k	คือ ลำดับฮาร์มอนิกส์ที่ปรากฏ 1,3,5,...
	s	คือ ค่าสลิป
	p	คือ จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก Pole motors/2

ตัวอย่างการคำนวณหาองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากกรณีเมื่อมอเตอร์เกิดการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ f_{st} ในการคำนวณนั้นจะใช้พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหล่านี้แต่ละตัว แต่ในตัวอย่างการคำนวณนี้จะสมมุติการคำนวณโดยเลือกใช้พารามิเตอร์ของมอเตอร์ 2.2kW พิกัดดังตาราง 6-1 ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 4 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่ปกติ ที่พิกัดความเร็วรอบ 1495rpm จำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับ 4 จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก=2

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad n_s &= \frac{120f_1}{P} \\ &= \frac{120 \times 50}{4} \\ &= 1500 \text{ rpm} \end{aligned}$$

เมื่อ n_r คือ ความเร็วรอบโรเตอร์ที่พิกัดต่างๆ ในที่นี้ $n_r = 1495 \text{ rpm}$

$$\begin{aligned} s &= \frac{n_s - n_r}{n_s} \\ &= \frac{1500 - 1495}{1500} \\ &= 0.003 \end{aligned}$$

เมื่อกำหนด $n = 1, k = 1$;

$$\begin{aligned} f_{st} &= 50 \left[\frac{1}{2} (1 - 0.003) \pm 1 \right] \\ &= 74.925, -25.075 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ แสดงผลการคำนวณได้ดังตาราง 5-1 ถึงตาราง 5-6

ตาราง 5-1 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =1 และลำดับฮาร์มอนิกส์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.003

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	1	2	1	0.003	-25.075	74.925
50	1	2	3	0.003	-125.075	174.925
50	1	2	5	0.003	-225.075	274.925
50	1	2	7	0.003	-325.075	374.925
50	1	2	9	0.003	-425.075	474.925
50	1	2	11	0.003	-525.075	574.925
50	1	2	13	0.003	-625.075	674.925

50	1	2	15	0.003	-725.075	774.925
50	1	2	17	0.003	-825.075	874.925
50	1	2	19	0.003	-925.075	974.925

ตาราง 5-2 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =2 และลำดับฮาร์มอนิกส์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.003

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	2	2	1	0.003	-0.15	99.85
50	2	2	3	0.003	-100.15	199.85
50	2	2	5	0.003	-200.15	299.85
50	2	2	7	0.003	-300.15	399.85
50	2	2	9	0.003	-400.15	499.85
50	2	2	11	0.003	-500.15	599.85
50	2	2	13	0.003	-600.15	699.85
50	2	2	15	0.003	-700.15	799.85
50	2	2	17	0.003	-800.15	899.85
50	2	2	19	0.003	-900.15	999.85

ตาราง 5-3 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =3 และลำดับฮาร์มอนิกส์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.003

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	3	2	1	0.003	24.775	124.775
50	3	2	3	0.003	-75.225	224.775
50	3	2	5	0.003	-175.225	324.775
50	3	2	7	0.003	-275.225	424.775
50	3	2	9	0.003	-375.225	524.775
50	3	2	11	0.003	-475.225	624.775
50	3	2	13	0.003	-575.225	724.775
50	3	2	15	0.003	-675.225	824.775
50	3	2	17	0.003	-775.225	924.775
50	3	2	19	0.003	-875.225	1024.775

ตาราง 5-4 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =1 slip=0.003

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
-----------	----------	----------	----------	-------------	-----------------	------------------

50	1	2	1	0.003	-25.075	74.925
50	2	2	1	0.003	-0.15	99.85
50	3	2	1	0.003	24.775	124.775
50	4	2	1	0.003	49.7	149.7
50	5	2	1	0.003	74.625	174.625
50	6	2	1	0.003	99.55	199.55
50	7	2	1	0.003	124.475	224.475
50	8	2	1	0.003	149.4	249.4
50	9	2	1	0.003	174.325	274.325
50	10	2	1	0.003	199.25	299.25

ตาราง 5-5 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =3 slip=0.003

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	1	2	3	0.003	-125.075	174.925
50	2	2	3	0.003	-100.15	199.85
50	3	2	3	0.003	-75.225	224.775
50	4	2	3	0.003	-50.3	249.7
50	5	2	3	0.003	-25.375	274.625
50	6	2	3	0.003	-0.45	299.55
50	7	2	3	0.003	24.475	324.475
50	8	2	3	0.003	49.4	349.4
50	9	2	3	0.003	74.325	374.325
50	10	2	3	0.003	99.25	399.25

ตาราง 5-6 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =5 slip=0.003

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	1	2	5	0.003	-225.075	274.925
50	2	2	5	0.003	-200.15	299.85
50	3	2	5	0.003	-175.225	324.775
50	4	2	5	0.003	-150.3	349.7
50	5	2	5	0.003	-125.375	374.625
50	6	2	5	0.003	-100.45	399.55
50	7	2	5	0.003	-75.525	424.475
50	8	2	5	0.003	-50.6	449.4
50	9	2	5	0.003	-25.675	474.325
50	10	2	5	0.003	-0.75	499.25

ตัวอย่างที่ 5 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในสภาวะการทำงานของมอเตอร์ที่เกิดการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ 15 รอบที่เฟส A ที่พิกัดความเร็วรอบ 1496rpm จำนวนขั้วแม่เหล็กเท่ากับ 4 จำนวนคู่ ขั้วแม่เหล็ก=2 slip=0.002

ตาราง 5-7 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =1 และลำดับฮาร์มอนิกส์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.002

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	1	2	1	0.002	-25.05	74.95
50	1	2	3	0.002	-125.05	174.95
50	1	2	5	0.002	-225.05	274.95
50	1	2	7	0.002	-325.05	374.95
50	1	2	9	0.002	-425.05	474.95
50	1	2	11	0.002	-525.05	574.95
50	1	2	13	0.002	-625.05	674.95
50	1	2	15	0.002	-725.05	774.95
50	1	2	17	0.002	-825.05	874.95
50	1	2	19	0.002	-925.05	974.95

ตาราง 5-8 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =2 และลำดับฮาร์มอนิกส์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.002

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	2	2	1	0.002	-0.1	99.9
50	2	2	3	0.002	-100.1	199.9
50	2	2	5	0.002	-200.1	299.9
50	2	2	7	0.002	-300.1	399.9
50	2	2	9	0.002	-400.1	499.9
50	2	2	11	0.002	-500.1	599.9
50	2	2	13	0.002	-600.1	699.9
50	2	2	15	0.002	-700.1	799.9
50	2	2	17	0.002	-800.1	899.9
50	2	2	19	0.002	-900.1	999.9

ตาราง 5-9 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n คงที่ =3 และลำดับฮาร์มอนิกส์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึงลำดับที่ 19 slip=0.002

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	3	2	1	0.002	24.85	124.85
50	3	2	3	0.002	-75.15	224.85
50	3	2	5	0.002	-175.15	324.85
50	3	2	7	0.002	-275.15	424.85
50	3	2	9	0.002	-375.15	524.85
50	3	2	11	0.002	-475.15	624.85
50	3	2	13	0.002	-575.15	724.85
50	3	2	15	0.002	-675.15	824.85
50	3	2	17	0.002	-775.15	924.85
50	3	2	19	0.002	-875.15	1024.85

ตาราง 5-10 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =1 slip=0.002

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	1	2	1	0.002	-25.05	74.95
50	2	2	1	0.002	-0.1	99.9
50	3	2	1	0.002	24.85	124.85
50	4	2	1	0.002	49.8	149.8
50	5	2	1	0.002	74.75	174.75
50	6	2	1	0.002	99.7	199.7
50	7	2	1	0.002	124.65	224.65
50	8	2	1	0.002	149.6	249.6
50	9	2	1	0.002	174.55	274.55
50	10	2	1	0.002	199.5	299.5

ตาราง 5-11 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =3 slip=0.002

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	1	2	3	0.002	-125.05	174.95
50	2	2	3	0.002	-100.1	199.9
50	3	2	3	0.002	-75.15	224.85
50	4	2	3	0.002	-50.2	249.8
50	5	2	3	0.002	-25.25	274.75

50	6	2	3	0.002	-0.3	299.7
50	7	2	3	0.002	24.65	324.65
50	8	2	3	0.002	49.6	349.6
50	9	2	3	0.002	74.55	374.55
50	10	2	3	0.002	99.5	399.5

ตาราง 5-12 แสดงค่าองค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกส์เมื่อ n เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 10 และลำดับฮาร์มอนิกส์ k คงที่ =5 slip=0.002

f1	n	p	k	slip	fst_Left	fst_Right
50	1	2	5	0.002	-225.05	274.95
50	2	2	5	0.002	-200.1	299.9
50	3	2	5	0.002	-175.15	324.85
50	4	2	5	0.002	-150.2	349.8
50	5	2	5	0.002	-125.25	374.75
50	6	2	5	0.002	-100.3	399.7
50	7	2	5	0.002	-75.35	424.65
50	8	2	5	0.002	-50.4	449.6
50	9	2	5	0.002	-25.45	474.55
50	10	2	5	0.002	-0.5	499.5

จากตาราง 5-1 ถึง ตาราง 5-12 จะสามารถบอกได้ถึงองค์ประกอบของความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่ปรากฏขึ้นบนสเปกตรัมกระแสซึ่งเมื่อลำดับฮาร์มอนิกส์เป็นจำนวนคี่และ $n=1$ จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบความถี่จะเกิดขึ้นด้านข้างของลำดับฮาร์มอนิกส์นั้น ๆ และเมื่อเพิ่มจำนวน n ขึ้นก็จะเกิดองค์ประกอบความถี่ใหม่ที่ต่างไปจากเดิม จึงสามารถสรุปได้ว่าค่า n จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงตำแหน่งของความถี่ที่จะเกิดขึ้นตามลำดับของฮาร์มอนิกส์ k โดยค่าของ Slip จะเป็นตัวกำหนดการเลื่อนของความถี่บนสเปกตรัมด้านข้างลำดับฮาร์มอนิกส์นั้น ๆ หากค่าสลิปมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นการเลื่อนของความถี่ก็จะเข้าไปใกล้ลำดับฮาร์มอนิกส์นั้น ๆ มากขึ้น

บทที่ 6

ผลการทดลอง

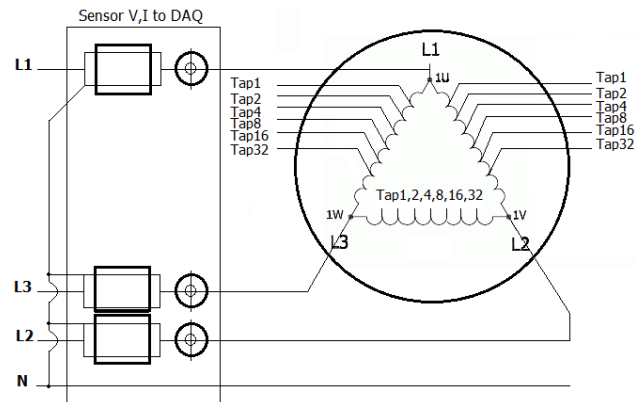
ในบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องมือการตรวจสอบการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้พัฒนาขึ้น ด้วยการทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีสถานะการทำงานปกติเพื่อเป็นค่าฐาน (Baseline) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการวิเคราะห์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ภายในต่อไป โดยในส่วนแรกนั้นจะเป็นการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ และผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าก่อนนำไปใช้ในการทดสอบจริง ถัดมาจะเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลการเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงานที่เกิดขึ้นผ่านการตรวจสอบวิเคราะห์ประเมินสถานะจากเครื่องมือตรวจสอบการลัดวงจรที่ได้ออกแบบพัฒนาขึ้นจากโปรแกรม LabVIEW ซึ่งจะวิเคราะห์ประเมินจากค่าปริมาณทางไฟฟ้ามอเตอร์ การวิเคราะห์จากสเปกตรัมกระแสสเตเตอร์ การวิเคราะห์ประเมินจากค่าความเร็วรอบมอเตอร์ และการประเมินแนวโน้มสถานะการทำงานของมอเตอร์ขณะออนไลน์ และในที่สุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ความสอดคล้องกับทฤษฎีกับผลการทดลองที่ได้

6.1 การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ

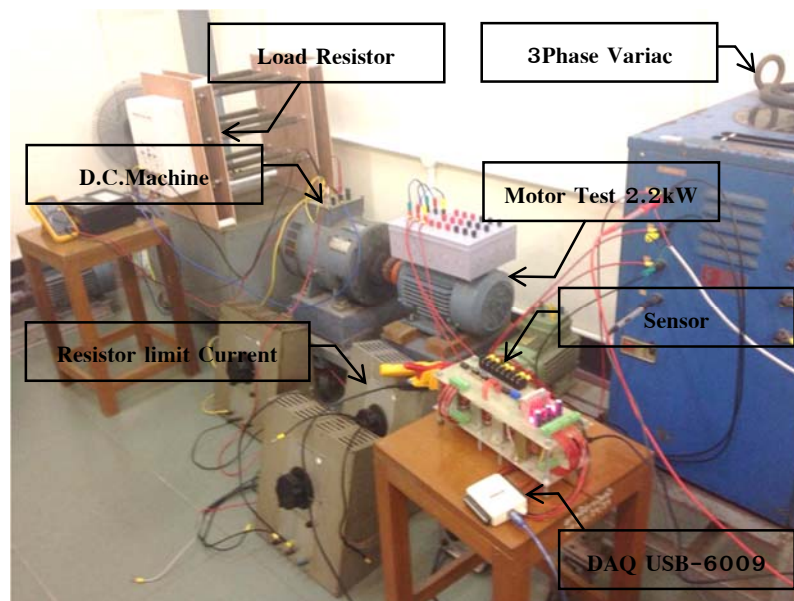
ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 2.2 kW (3 hp) ซึ่งจะทำการทดสอบในเรื่องของการลัดวงจรแบบขดลวดถึงขดลวด มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดโรเตอร์แบบกรงกระรอก (squirrel cage rotor) ที่พิกัดมอเตอร์ดังตาราง 6-1 แบบจำลองมอเตอร์ทดสอบดังภาพประกอบ 6-1 ภาพการทดสอบงานวิจัยดังภาพประกอบ 6-3

ตาราง 6-1 พิกัดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสที่ใช้ในการทดสอบ

Machine Parameters	Value
Rated Power	2.2 kW (3 hp)
Number of Poles	4
Connection	Δ/Y
Rated Voltage	230/400V
Rated Current	8.66/4.98
Hz	50
$\cos \phi$	0.79

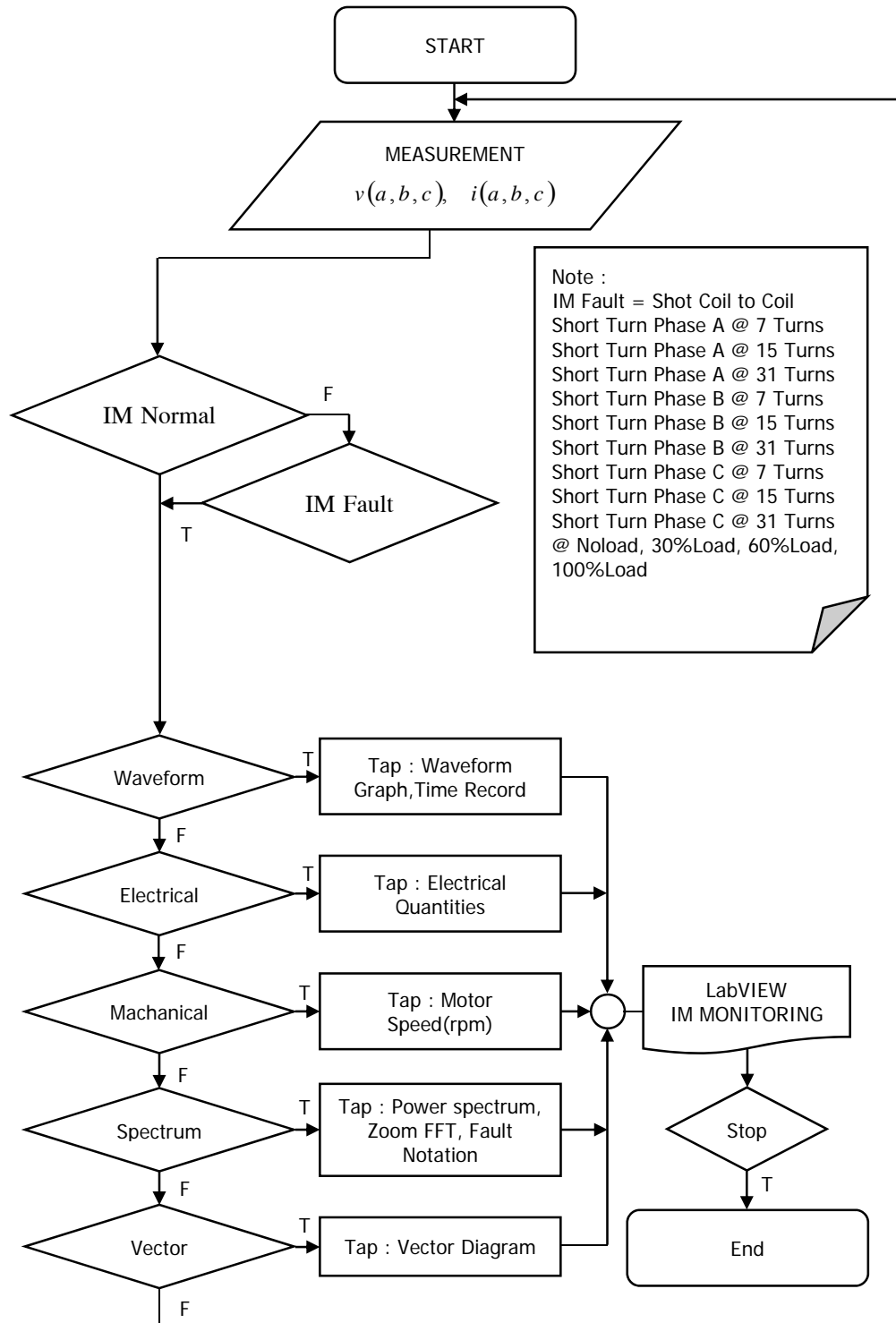


ภาพประกอบ 6-1 แบบจำลองการทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพประกอบ 6-2 การทดสอบงานวิจัย

จากภาพประกอบ 6-1 จะเป็นวงจรขดลวดภายในของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบการลัดวงจรภายในขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งจะทำให้การจำลองการลัดวงจรภายในขดลวดแบบขดลวดถึงขดลวดหรือการ Short Turn โดยมอเตอร์ทดสอบที่ใช้จะทำการต่อ Tap ใช้งานในการทดสอบออกมาที่ 1 รอบ 2 รอบ 4 รอบ 8 รอบ 16 รอบ และ 32 รอบ จากจำนวนรอบทั้งหมด 320 รอบ



ภาพประกอบ 6-3 ภาพรวมการออกแบบการทดสอบมอเตอร์ในงานวิจัย

จากภาพประกอบ 6-3 จะเป็นภาพรวมการออกแบบการทดสอบการลัดวงจรแบบขดลวดถึงขดลวดซึ่งจะทำการทดสอบลัดรอบวงจร 3 กรณี คือ ระหว่างรอบที่ 1 กับรอบที่ 8 ได้ผลต่างที่ 7 รอบ, ระหว่างรอบที่ 1 กับรอบที่ 16 ได้ผลต่างที่ 15 รอบ, และระหว่างรอบที่ 1 กับรอบที่ 32 ได้ผลต่างที่ 31 รอบ ซึ่งการลัดวงจรจะใช้ความต้านทานในการจำกัดกระแสที่สูงต่ออยู่ด้วยเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์ทดสอบ โดยมอเตอร์ที่ทำการทดสอบต่ออยู่แบบเดลต้าคัปปลิ่งกับโหลดดีซีเจนเนอเรเตอร์จ่ายพลังงานให้โหลดชนิดความต้านทานที่พิกัดโหลด 500W, 1000W, และ 1500W คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่ 30%, 60% และ 100% ของมอเตอร์ทดสอบ 2.2kW

6.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรตรวจวัดสัญญาณ

ในส่วนของวงจรตรวจวัดแรงดันจะใช้หม้อแปลงลดระดับแรงดันซึ่งจะมีความเป็นเชิงเส้นอยู่แล้วในตัว แต่ในส่วนของวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้านั้นจะต้องมีการทดสอบดูถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของไอซีที่เลือกใช้เมื่อโหลดมีการดึงกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นก่อน ในส่วนของการคำนวณหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมให้อยู่ในช่วงระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า $\pm 10V$ ที่สามารถนำเข้าสู่ DAQ USB 6009 ได้ ซึ่งแรงดันเอาท์พุทที่ออกจาก ACS712ELCTR-30A-T จะมีค่า Sensitivity 66 mV/A ดังนั้นในการทดลองได้ทดลองจ่ายกระแสผ่านโหลดความต้านทาน ที่พิกัดกระแสตั้งแต่ 1A-6A แรงดันเอาท์พุทที่ออกจาก ACS712 แสดงดังตาราง 6-2

ตาราง 6-2 การทดลองหาค่าแรงดันเอาท์พุทที่ออกจาก ACS712 กับโหลดความต้านทานที่อัตราขยาย Op Amp Gain = 7

Gain=7			
A(rms)	A(p-p)	Op (mV)	(V)
1.000	1.414	0.093	0.653
2.000	2.828	0.187	1.307
3.000	4.242	0.280	1.960
4.000	5.656	0.373	2.613
5.000	7.070	0.467	3.266
6.000	8.484	0.560	3.920
7.000	9.898	0.653	4.573
8.000	11.312	0.747	5.226
9.000	12.726	0.840	5.879
10.000	14.140	0.933	6.533
11.000	15.554	1.027	7.186
12.000	16.968	1.120	7.839
13.000	18.382	1.213	8.492

14.000	19.796	1.307	9.146
15.000	21.210	1.400	9.799
16.000	22.624	1.493	10.452
17.000	24.038	1.587	11.106
18.000	25.452	1.680	11.759
19.000	26.866	1.773	12.412
20.000	28.280	1.866	13.065
21.000	29.694	1.960	13.719
22.000	31.108	2.053	14.372
23.000	32.522	2.146	15.025
24.000	33.936	2.240	15.678
25.000	35.350	2.333	16.332
26.000	36.764	2.426	16.985
27.000	38.178	2.520	17.638
28.000	39.592	2.613	18.292
29.000	41.006	2.706	18.945
30.000	42.420	2.800	19.598

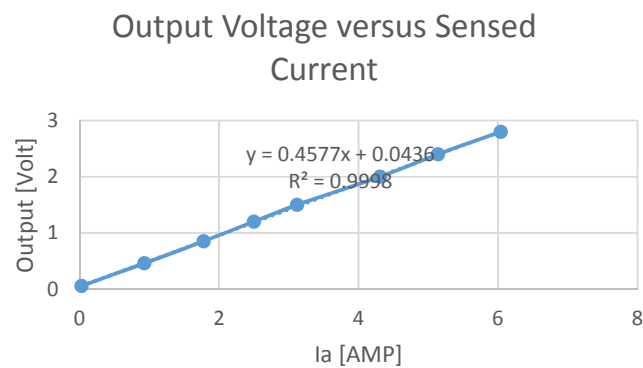
จากตาราง 6-2 จะเห็นได้ว่าขนาดของแรงดันเอาต์พุตที่ออกจาก ACS712 นี้จะอยู่ในระดับสัญญาณ mV จึงต้องนำสัญญาณเข้าสู่ภาคขยายด้วย Op Amp โดยวงจร Op Amp ที่เลือกใช้จะเป็นวงจรขยายไฟสลับแบบไม่กลับเฟสหรือ Non-Inverting Amplifier ซึ่งมีอัตราส่วนขยายสัญญาณดังสมการที่ 6.1 ซึ่งจากระดับสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจาก Op Amp และสามารถเข้าสู่ DAQ ได้จะอยู่ในช่วงของกระแส 0-15A หากกระแสเกินไปจากการทดสอบนี้จะต้องมีการปรับตั้งค่าอัตราขยายใหม่

$$V_{out} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) V_{in} \quad (6.1)$$

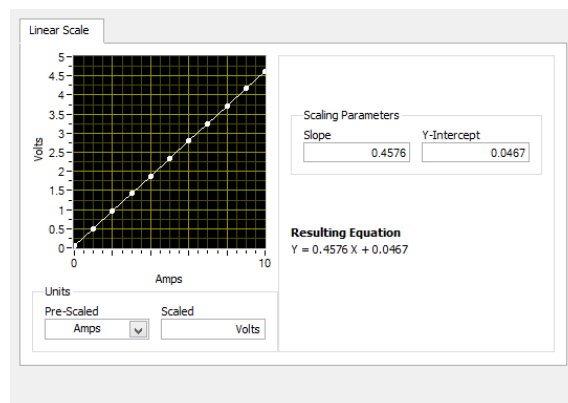
การกำหนดค่า Custom Scaling ของสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส ในส่วนนี้จะคำนวณหาค่า Slope ของเส้นตรงได้จากการใช้โปรแกรม Excel ช่วยคำนวณดูแนวโน้มของข้อมูลเอาต์พุตที่ออกจาก ACS712 (mV) กับชุดข้อมูลของกระแสโหลดความต้านทานที่เฟส A ดังตาราง 6-3 และให้โปรแกรม Excel คำนวณค่า Slope ของสมการเส้นตรงออกมาดังภาพประกอบ 6-4

ตาราง 6-3 แสดงความสัมพันธ์แรงดันเอาต์พุตจาก ACS712 กับ กระแสโหลดความต้านทานที่เฟส A

Ia (A)	Output ACS712 (V)
0.03	0.054
0.93	0.46
1.78	0.85
2.50	1.20
3.12	1.50
4.31	2.00
5.14	2.40
6.04	2.80

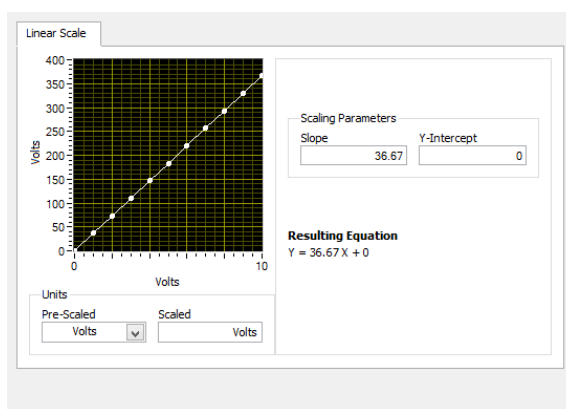


ภาพประกอบ 6-4 การหา Slope เพื่อกำหนด Custom Scaling ของสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส



ภาพประกอบ 6-5 การกำหนดค่า Custom Scaling ของสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟสใน Labview

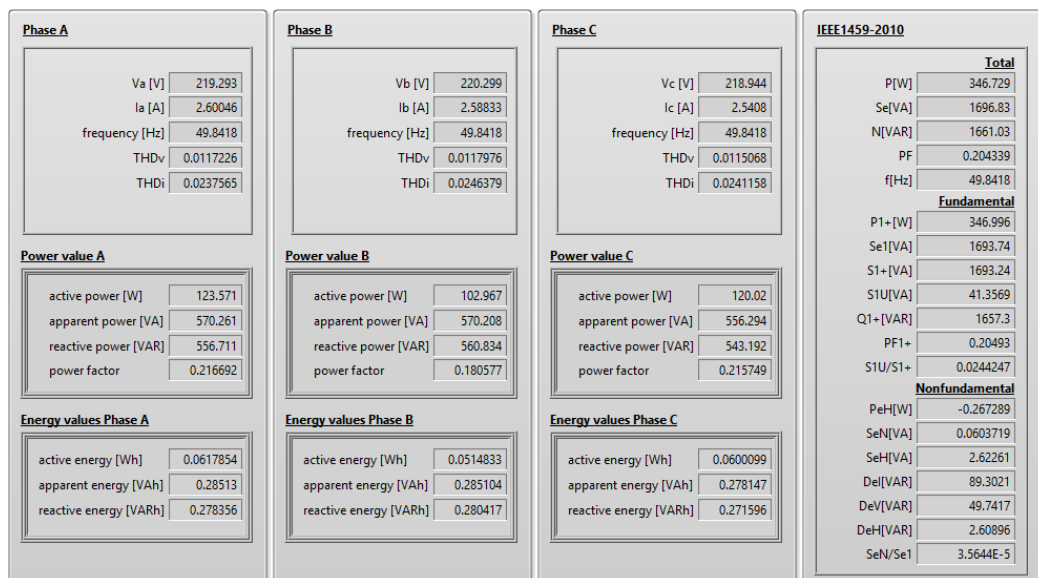
การกำหนดค่า Custom Scaling ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ในส่วนนี้จะใช้การเทียบอัตราส่วน Ratio ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อหาค่า Slope ของสมการเส้นตรง การคำนวณ เอาท์พุต 6V เมื่ออินพุต 220V ดังนั้นถ้า เอาท์พุต 1V อินพุตจะมีค่าเท่ากับ $220V/6V = 36.67V = \text{Slope}$ ของสมการเส้นตรง



ภาพประกอบ 6-6 การกำหนดค่า Custom Scaling ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสใน Labview

6.3 ผลการทดสอบโปรแกรมคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง

จากผลการทวนสอบอัลกอริธึมการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าภายในโปรแกรม เครื่องมือตรวจวัดเสมือนเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจริงที่ได้ในหัวข้อที่ผ่านมา ผลที่ได้นั้นมีค่าความผิดพลาดที่แตกต่างจากการคำนวณไม่เกิน 1% ดังนั้นเพื่อเป็นการพิสูจน์ความถูกต้องของโปรแกรมเครื่องมือคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ก่อนที่จะมีการนำไปใช้ในสถานการณ์ตรวจสอบจริง จึงต้องมีการทวนสอบกับเครื่องมือวัดที่อ้างอิงอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งในส่วนถัดมานี้จะเป็นการทวนสอบผลกับเครื่องมือวัดมาตรฐานอ้างอิง Fluke 39 Power Meter ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ค่าลำดับฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น ทั้งในระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ ระบบไฟฟ้า 3 เฟส เพื่อเปรียบเทียบดูผลความถูกต้องที่ได้ ในการทดสอบจะทดสอบอ่านค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ได้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรมเครื่องมือการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่พัฒนา จากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 2.2kW ต่อมอเตอร์ทดสอบแบบ Y ผลการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่พัฒนาแสดงได้ดังภาพประกอบ 6-7 ผลการทวนสอบกับเครื่องมือวัดอ้างอิงแสดงได้ดังตาราง 6-4



ภาพประกอบ 6-7 ผลการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากโปรแกรมที่พัฒนา

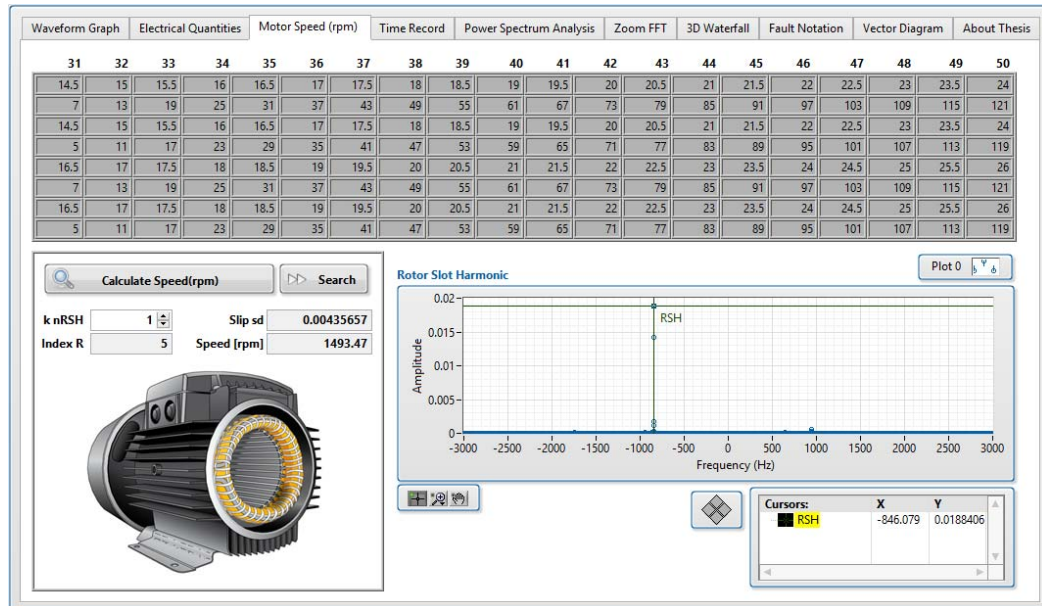
ตาราง 6-4 ผลการทดสอบโปรแกรมเครื่องมือคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2kW แรงดันสาย 220V-Y ในสภาวะไร้โหลด

Quantities	Fluke 39 Power Meter	LabVIEW	%Error
VA	220	219.293	0.3214
VB	221	220.299	0.3172
VC	220	218.944	0.48
IA	2.61	2.60046	0.3655
IB	2.60	2.58833	0.4488
IC	2.55	2.5408	0.3608
PA/1k	0.12	123.571	2.9758
PB/1k	0.10	102.967	2.967
PC/1k	0.12	120.02	0.0166
SA/1k	0.57	570.261	0.0458
SB/1k	0.57	570.208	0.0365
SC/1k	0.55	556.294	1.1444
QA/1k	0.56	556.711	0.5873
QB/1k	0.56	560.834	0.1489
QC/1k	0.54	543.192	0.5911
pfA	0.22	0.216692	1.5036
pfB	0.18	0.180577	0.3206
pfC	0.22	0.215749	1.9323

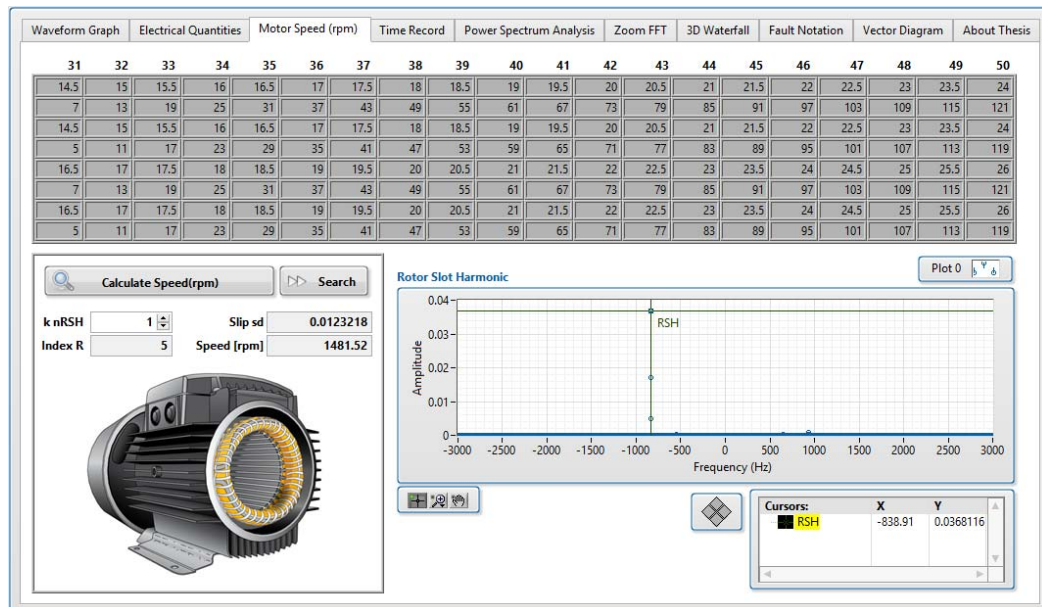
THDvA*100	1.2	0.0117226	2.3117
THDvB*100	1.2	0.0117976	1.6867
THDvC*100	1.1	0.0115068	4.6073
THDiA*100	2.3	0.0237565	3.2891
THDiB*100	2.4	0.0246379	2.6579
THDiC*100	2.4	0.0241158	0.4825
P/1k	0.34	346.729	1.9791
Se/1k	1.69	1696.83	0.4041
N/1k	1.66	1661.03	0.0620
PF.	0.20	0.204339	2.1695
P1+	-	346.996	N/A
Se1	-	1693.74	N/A
S1+	-	1693.24	N/A
S1U	-	41.3569	N/A
Q1+	-	1657.3	N/A
PF1+	-	0.20493	N/A
S1U/S1+	-	0.0244247	N/A
PeH	-	-0.267289	N/A
SeN	-	0.0603719	N/A
SeH	-	2.62261	N/A
Del	-	89.3021	N/A
DeV	-	49.7417	N/A
DeH	-	2.60896	N/A
SeN/Se1	-	3.5644E-5	N/A

จากผลการทวนสอบโปรแกรมการคำนวณค่าปริมาณไฟฟ้าที่ได้ออกแบบพัฒนาเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง Fluke 39 Power Meter นั้น ผลการทวนสอบที่ได้ตั้งตาราง 6-4 จะแสดงให้เห็นได้ว่าเครื่องมือตรวจวัดเสมือนที่พัฒนาขึ้นนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดอ้างอิงมาก แต่ในส่วนของ การคิดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นจะเห็นได้ว่ายังคงมีความผิดพลาดอยู่บ้างสูงสุดไม่เกิน 5% เนื่องจากการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของเครื่องมือตรวจวัดเสมือนที่พัฒนานั้นคิดที่ทศนิยม 3 หลักขึ้นไป ซึ่งเครื่องมือวัดอ้างอิงที่นำมาเปรียบเทียบนั้นสามารถแสดงผลได้ที่ 1-2 หลักทศนิยม จึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นบางส่วน

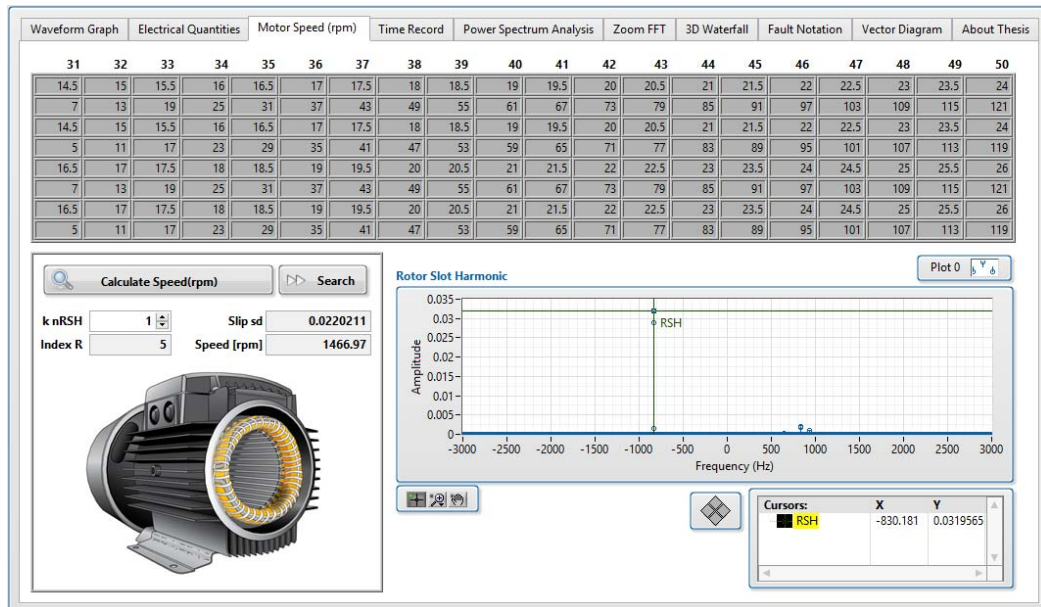
6.4 ผลการทดสอบการคำนวณค่าความเร็รรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2.2kW เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความเร็รรอบอ้างอิง



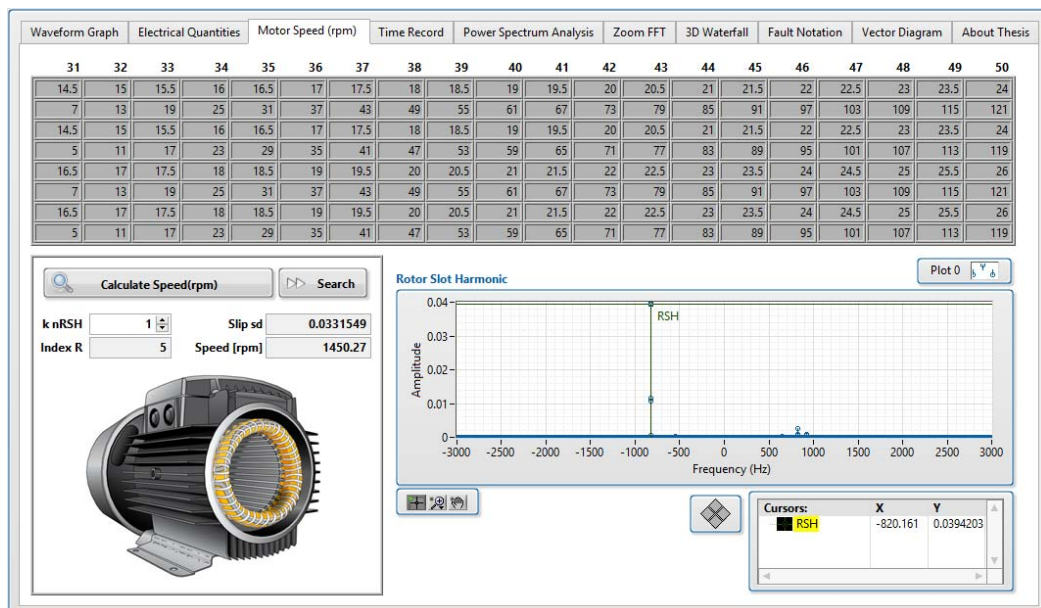
ภาพประกอบ 6-8 ผลการคำนวณค่าความเร็รรอบที่ภาวะ NoLoad เท่ากับ 1496 rpm



ภาพประกอบ 6-9 ผลการคำนวณค่าความเร็รรอบที่ภาวะโหลด 30% เท่ากับ 1483 rpm



ภาพประกอบ 6-10 ผลการคำนวณค่าความเร็รรอบที่ภาวะโหลด 60% เท่ากับ 1466 rpm



ภาพประกอบ 6-11 ผลการคำนวณค่าความเร็รรอบที่ภาวะโหลด 100% เท่ากับ 1448rpm

จากภาพประกอบ 6-8 ถึง ภาพประกอบ 6-11 แสดงผลการคำนวณหาค่าสลิปและความเร็รรอบของมอเตอร์จากการรับค่าพารามิเตอร์ k nRSH และ Index R ที่ถูกต้องจากการ

ค้นหาความเร็วแบบอัตโนมัติซึ่งจะทำให้โปรแกรมสามารถที่จะประมาณค่าสลิปและความเร็วรอบออกมาได้ ซึ่งในมอเตอร์ทดสอบตัวนี้ในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างภายในของมอเตอร์ อัลกอริธึมของโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนที่พัฒนา สามารถที่จะประมาณค่าสลิปและความเร็วรอบออกมาได้ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดอ้างอิง ผลการทดสอบประมาณค่าสลิปและความเร็วรอบมอเตอร์แสดงได้ดังตาราง 6-5 ซึ่งจากการทดสอบโปรแกรมจะทำให้ทราบได้ว่ามอเตอร์ทดสอบตัวนี้มีจำนวนของสล้อตโรเตอร์เท่ากับ 36 แห่งตัวนำสล้อตโรเตอร์

ตาราง 6-5 ผลทดสอบค่าความเร็วรอบเปรียบเทียบเครื่องมือวัดอ้างอิงเมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะปกติ (Normal Condition)

%Load	Digicon SB-16 [rpm]	LabVIEW [rpm]	%Error
Noload	1496	1493.47	0.1691
30%	1483	1481.52	0.0998
60%	1466	1466.97	0.0662
100%	1448	1450.27	0.1568

6.5 ผลการทดสอบหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ทดสอบ 2.2kW Δ -Connection ในภาวะปกติ (Normal Condition)

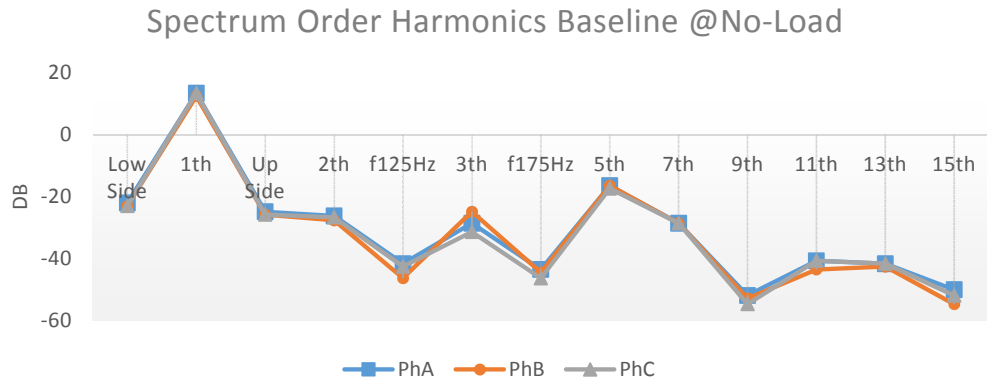
ตาราง 6-6 ค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ค่าพิกัดโหลดต่าง ๆ

Normal	Quantities	No-load	30%load	60%load	100% load	
Voltage	Va	127.63	127.46	127.472	127.08	
	Baseline	Vb	127.563	127.243	127.5	127.59
	(V)	Vc	128.042	127.701	127.687	127.364
Current	Ia	4.76076	5.169	6.16667	7.77117	
	Baseline	Ib	4.45781	4.86301	5.99055	7.65403
	(A)	Ic	4.71612	5.20424	6.29362	7.78058
Power	pfA	0.13714	0.42298	0.6681	0.76914	
	factor	pfB	0.16577	0.43413	0.67912	0.77980
	Baseline	pfC	0.21368	0.47031	0.65017	0.75549
Active	Pa	83.3262	278.676	525.176	759.57	
	Power	Pb	94.2627	268.629	518.704	761.536
	Baseline (W)	Pc	129.031	312.56	522.488	748.663
Apparent	Sa	607.616	658.842	786.074	987.562	
	Power	Sb	568.651	618.783	763.792	976.577

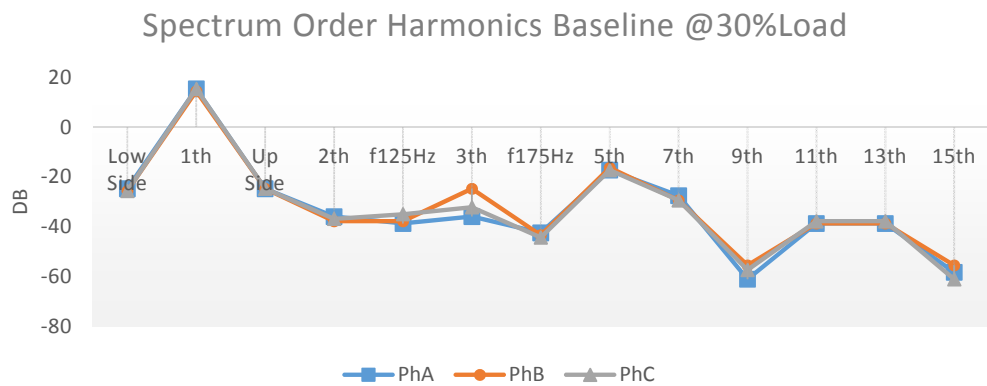
Baseline (VA)	Sc	603.863	664.584	803.613	990.963
Reactive	Qa	601.875	597.003	584.895	631.135
Power	Qb	560.784	557.432	560.647	611.364
Baseline (VAR)	Qc	589.916	586.496	610.573	649.239
THDv	THDv_a	0.00715	0.00831	0.00802	0.00877
Baseline	THDv_b	0.00667	0.00748	0.00786	0.00809
	THDv_c	0.00643	0.00768	0.00796	0.00827
THDi	THDi_a	0.03841	0.02798	0.02047	0.01271
Baseline	THDi_b	0.04213	0.03369	0.02305	0.01371
	THDi_c	0.03565	0.02621	0.01979	0.01238
Quantities	P[W]	306.645	859.729	1567.24	2270.03
Total	Se[VA]	1780.83	1943.02	2353.93	2955.22
Baseline	N[VAR]	1754.23	1742.47	1756.35	1892.16
	PF.	0.17219	0.44247	0.66580	0.76814
Fundamental	P1+[W]	306.54	860.352	1568.33	2270.19
Baseline	Se1[VA]	1776.34	1938.84	2348.94	2950.1
	S1+[VA]	1774.12	1936.97	2348.27	2949.74
	S1U[VA]	88.6373	85.1933	56.3645	46.3586
	Q1+[VAR]	1747.44	1735.41	1747.77	1883.4
	PF1+	0.17278	0.44417	0.66787	0.76962
	S1U/S1+	0.04996	0.04398	0.02400	0.01572
	Non	PeH[W]	0.10563	-0.62307	-1.08855
Fundamental	SeN[VA]	0.07113	0.06567	0.06522	0.05891
Baseline	seH[VA]	4.44073	4.1703	4.82428	4.70478
	DeI[VAR]	95.565	92.2708	93.3545	95.7654
	DeV[VAR]	82.5431	87.6286	121.386	144.933
	DeH[VAR]	4.43947	4.12349	4.69987	4.70203
	SeN/Se1	4.004E-5	3.387E-5	2.777E-5	1.997E-5
	Mechanical	Slip	0.00436	0.01232	0.02202
Part	Speed	1493.47	1481.52	1466.97	1450.27
	[rpm]				
Spectrum	Low side	-22	-24.8	-30.4	-32.266
Order	1 th _50Hz	13.4667	15.333	16.2667	17.2
Harmonic	Up side	-24.8	-24.8	-28.533	-33.2
Baseline [dB]	2 th _100Hz	-26.166	-36	-40.666	-43.466
Phase A	f125Hz	-41.6	-38.8	-50.933	-50
	3 th _150Hz	-28.533	-36	-32.266	-29.466
	f175Hz	-43.466	-42.533	-58.4	-54.666
	5 th _250Hz	-16.4	-17.333	-22	-23.866
	7 th _350Hz	-28.533	-27.6	-23.866	-26.666
	9 th _450Hz	-51.866	-61.2	-42.533	-50
	11 th _550Hz	-40.666	-38.8	-39.733	-34.133
	13 th _650Hz	-41.6	-38.8	-39.733	-36.933

	15 th _750Hz	-50	-58.4	-51.866	-49.066	
Spectrum	Low side	-22.933	-25.733	-31.333	-31.333	
Order	1 th _50Hz	12.533	14.4	16.2667	17.2	
Harmonic	Up side	-25.733	-24.8	-28.533	-32.266	
Baseline [dB]	2 th _100Hz	-27.6	-37.866	-41.6	-39.733	
Phase B	f125Hz	-46.266	-37.866	-51.866	-45.33	
	3 th _150Hz	-24.8	-24.8	-28.533	-25.733	
	f175Hz	-44.4	-43.466	-55.6	-49.066	
	5 th _250Hz	-16.4	-16.4	-22	-22.933	
	7 th _350Hz	-28.533	-29.466	-23.866	-26.666	
	9 th _450Hz	-52.8	-55.6	-47.2	-47.2	
	11 th _550Hz	-43.466	-38.8	-42.533	-34.133	
	13 th _650Hz	-42.533	-38.8	-40.666	-37.866	
	15 th _750Hz	-54.666	-55.6	-50	-52.8	
	Spectrum	Low side	-22.933	-25.733	-30.4	-33.2
	Order	1 th _50Hz	13.4667	15.333	17.2	17.2
	Harmonic	Up side	-25.733	-24.8	-29.466	-33.2
	Baseline [dB]	2 th _100Hz	-26.666	-36.933	-41.6	-40.666
	Phase C	f125Hz	-42.533	-35.066	-58.4	-49.066
		3 th _150Hz	-31.333	-32.266	-32.266	-29.466
f175Hz		-46.266	-44.4	-59.333	-50.933	
5 th _250Hz		-17.333	-17.333	-22.933	-23.866	
7 th _350Hz		-28.533	-29.466	-23.866	-27.6	
9 th _450Hz		-54.666	-57.466	-52.8	-50.933	
11 th _550Hz		-40.666	-37.866	-38.8	-33.2	
13 th _650Hz		-41.6	-37.866	-39.733	-36.933	
15 th _750Hz		-51.866	-61.2	-53.733	-58.4	

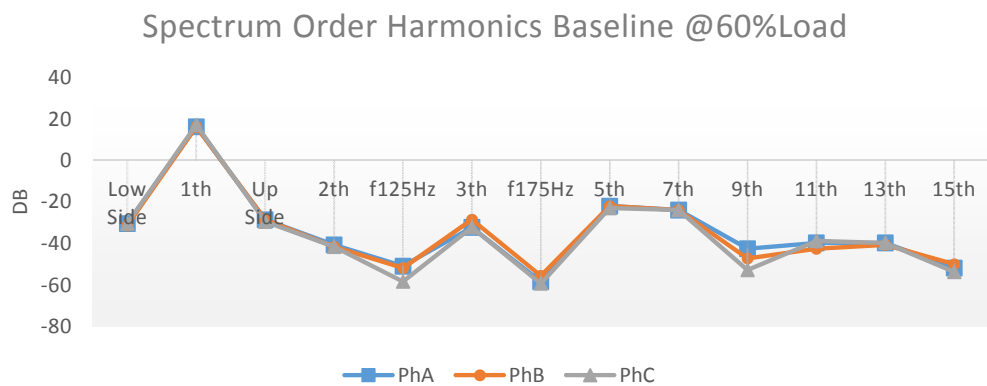
จากตาราง 6-6 ค่าต่าง ๆ ที่แสดงในตารางนั้นจะเป็นผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนที่พัฒนาขึ้นมา จากการนำข้อมูลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้ทำการบันทึกค่าในส่วนของการตรวจรับสัญญาณก่อนหน้า ค่าจากตารางนี้จะเป็นค่าฐานในสภาวะที่มอเตอร์ทดสอบทำงานในสภาวะปกติ ที่ภาวะโหลดต่าง ๆ กัน ซึ่งจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบในกรณีของขดลวดลัดวงจรในสภาวะต่าง ๆ อีกต่อไป



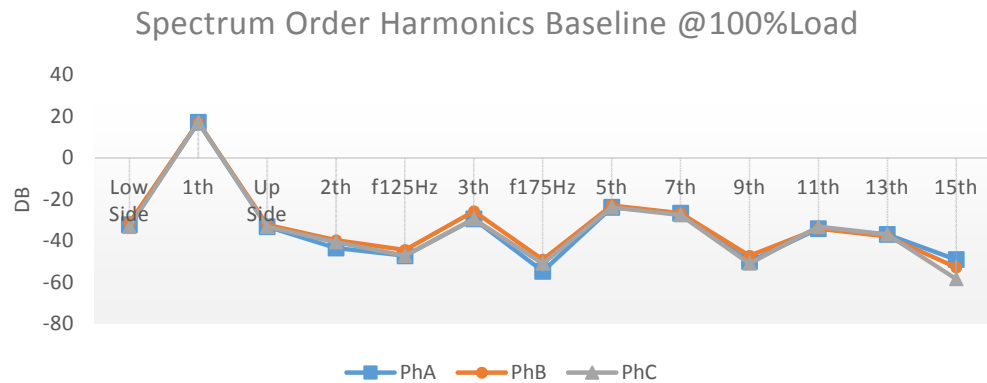
ภาพประกอบ 6-12 ลำดับและขนาดฮาร์โมนิกส์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะ No-load



ภาพประกอบ 6-13 ลำดับและขนาดฮาร์โมนิกส์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะโหลด 30%

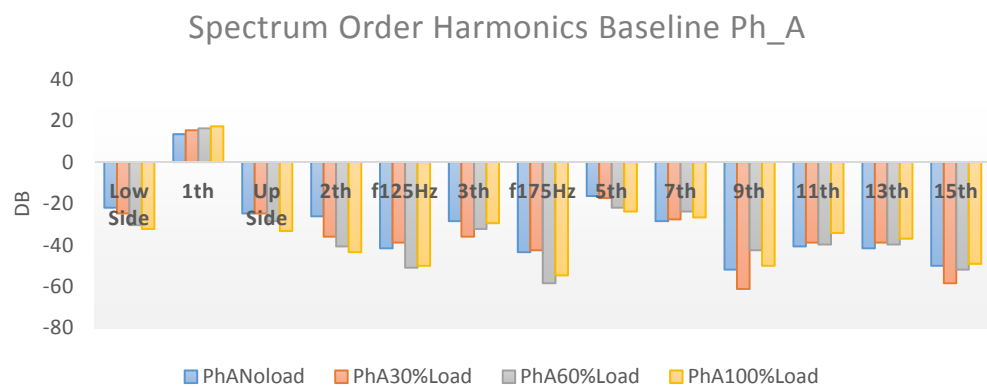


ภาพประกอบ 6-14 ลำดับและขนาดฮาร์โมนิกส์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะโหลด 60%

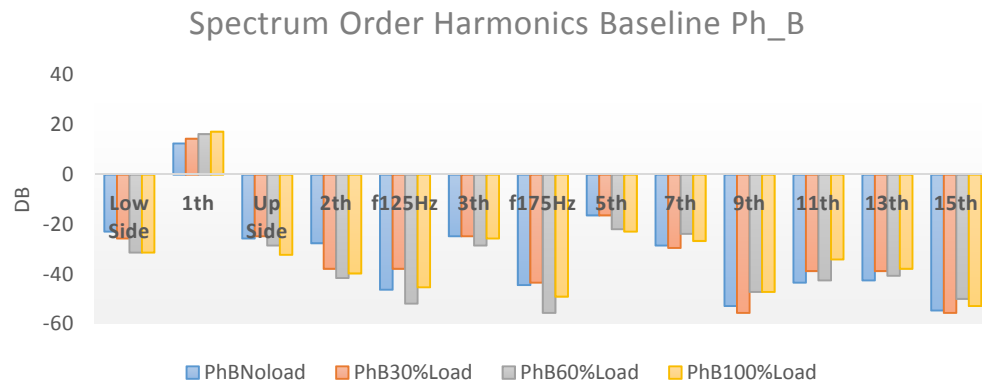


ภาพประกอบ 6-15 ลำดับและขนาดฮาร์โมนิกส์เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ภาวะโหลด 100%

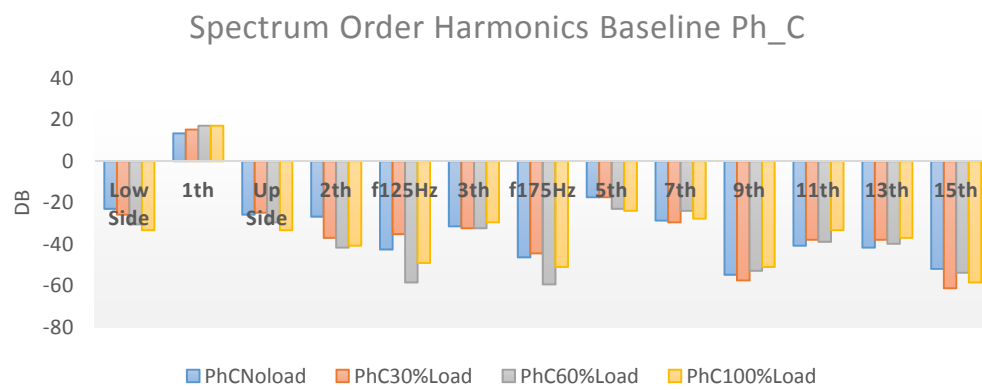
จากภาพประกอบ 6-12 ถึง ภาพประกอบ 6-15 สามารถวิเคราะห์ได้ในเรื่องของลำดับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโหลดนั้นจะส่งผลให้ขนาด dB เพิ่มสูงขึ้นตามโหลดที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนที่แปรตามกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะเด่นชัดที่บริเวณด้านข้างของ ฮาร์โมนิกส์ลำดับ 3



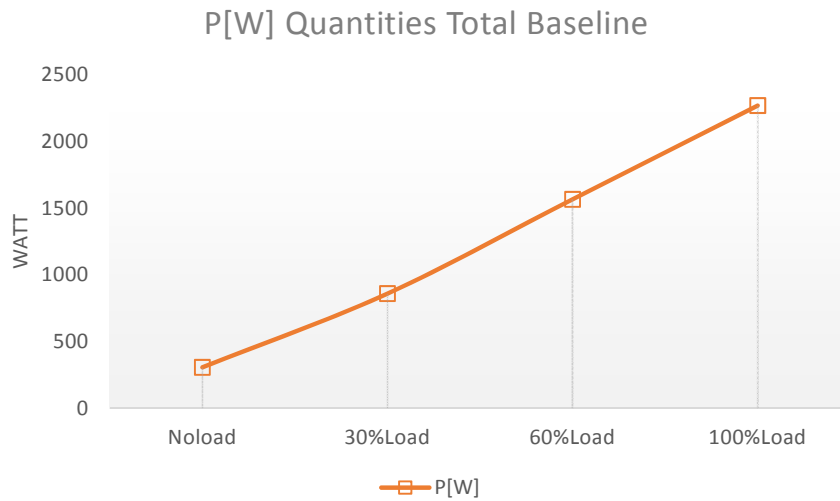
ภาพประกอบ 6-16 ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่เฟส A ที่พิกัดโหลดต่างๆ



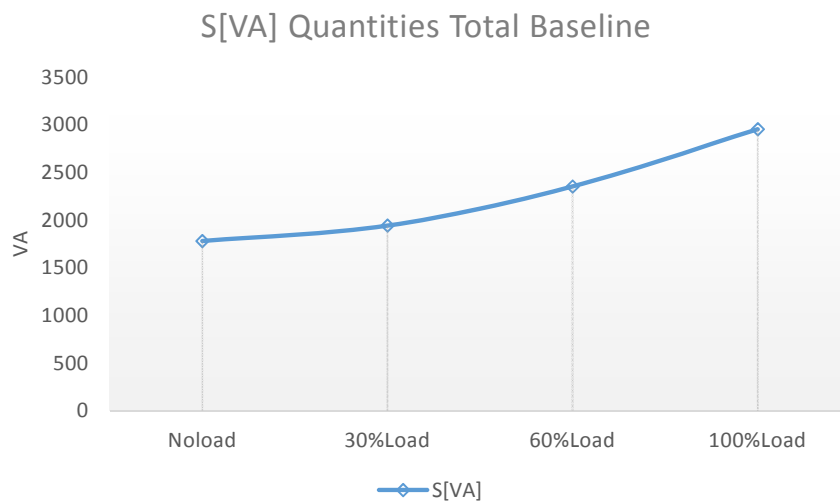
ภาพประกอบ 6-17 ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่เฟส B ที่พิกัดโหลดต่างๆ



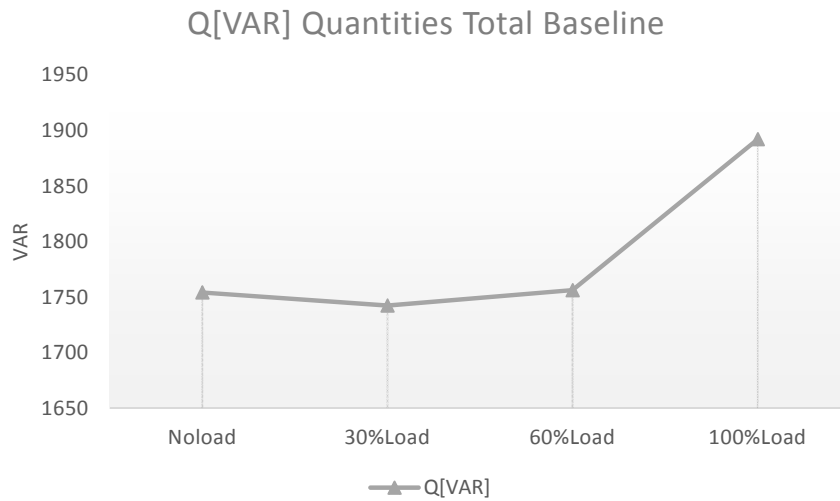
ภาพประกอบ 6-18 ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่เฟส C ที่พิกัดโหลดต่างๆ



ภาพประกอบ 6-19 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่างๆ

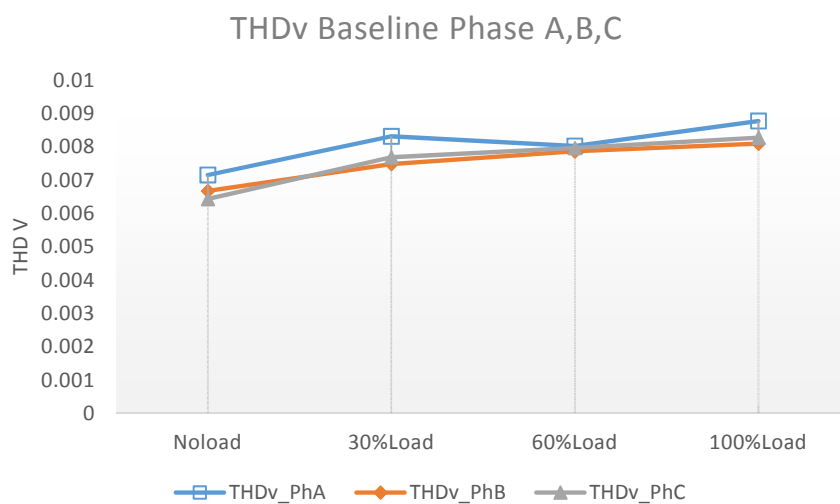


ภาพประกอบ 6-20 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่างๆ

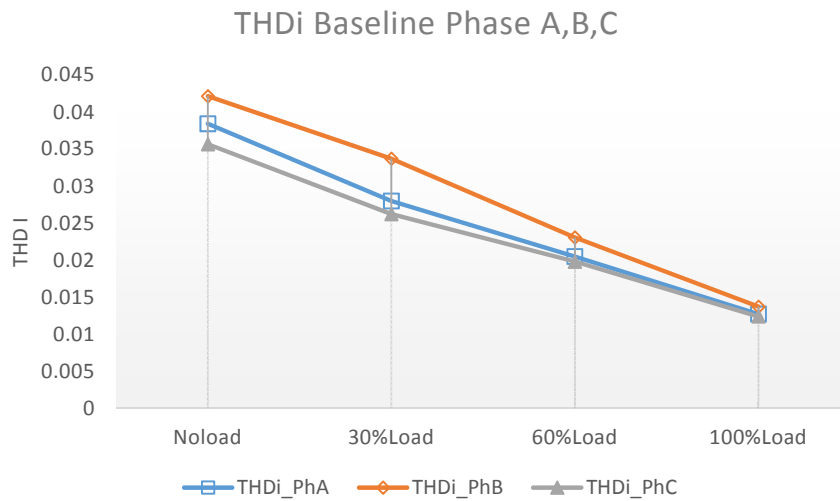


ภาพประกอบ 6-21 ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่างๆ

จากภาพประกอบ 6-19 ถึง ภาพประกอบ 6-21 จะแสดงค่ากำลังไฟฟ้า 3 ส่วน ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าแต่ละส่วนจะมีแนวโน้มของค่าที่เพิ่มสูงขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงโหลดซึ่งก็จะเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวประกอบกำลังที่เพิ่มสูงขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงโหลดเช่นกัน

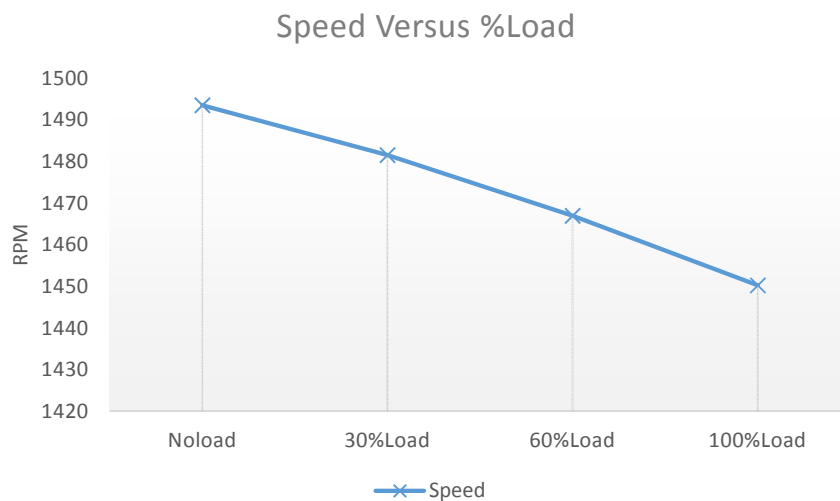


ภาพประกอบ 6-22 ค่า THDv ของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่างๆ



ภาพประกอบ 6-23 ค่า THDi ของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่าง ๆ

จากภาพประกอบ 6-22 และ ภาพประกอบ 6-23 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแนวโน้มของค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสไฟฟ้าจะมีแนวโน้มของค่าที่ลดลงตามโหลดที่เพิ่มขึ้นหรือแปรผกผันซึ่งกัน



ภาพประกอบ 6-24 ค่าความเร็วของมอเตอร์ทดสอบในภาวะปกติที่พิกัดโหลดต่าง ๆ

จากภาพประกอบ 6-24 นั้นจะแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบมอเตอร์ที่แปรผกผันกับโหลด ซึ่งจะเป็นไปตามทฤษฎีเมื่อมอเตอร์มีภาระโหลดที่เพิ่มสูงขึ้นค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ก็จะลดลงด้วยเช่นกัน

6.6 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส A 7 รอบ

Δ -Connection V_{ll} 220V

ตาราง 6-7 ผลทดสอบค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์ทดสอบกรณีลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส A7 รอบ

Normal	Quantities	No-load	30%load	60%load	100%load
Voltage (V)	Va	128.225	128.148	127.347	127.583
	Vb	128.394	128.565	127.937	128.147
	Vc	128.612	128.455	127.884	127.588
Current (A)	Ia	4.80983	5.19423	6.18219	7.76836
	Ib	4.48086	4.99387	6.10779	7.6978
	Ic	4.87597	5.31987	6.42912	7.8327
Power factor	pfA	0.12265	0.38878	0.64736	0.76702
	pfB	0.20203	0.45531	0.70084	0.78960
	pfC	0.22451	0.45788	0.64801	0.75380
Active Power (W)	Pa	75.642	258.786	509.653	760.203
	Pb	116.229	292.323	547.647	778.903
	Pc	140.794	312.9	532.784	753.312
Apparent Power (VA)	Sa	616.739	665.631	787.281	991.11
	Sb	575.317	642.036	781.415	986.447
	Sc	627.109	683.366	822.181	999.355
Reactive Power (VAR)	Qa	612.083	613.265	600.055	635.917
	Qb	563.454	571.627	557.398	605.3
	Qc	611.1	607.521	626.196	656.683
THDv	THDv_a	0.00788	0.00756	0.00698	0.00833
	THDv_b	0.00753	0.00736	0.00753	0.00866
	THDv_c	0.00813	0.00745	0.00739	0.00745
THDi	THDi_a	0.03329	0.02608	0.01715	0.01215
	THDi_b	0.03959	0.03190	0.02071	0.01409
	THDi_c	0.03306	0.02522	0.01734	0.01243
Quantities Total	P[W]	333.241	864.392	1591.27	2292.74
	Se[VA]	1820.37	1991.73	2391.44	2977.03
	N[VAR]	1789.6	1794.39	1785.17	1898.97
	PF.	0.18306	0.43399	0.66540	0.77014

Fundamental	P1+[W]	332.932	862.677	1589.61	2291.37
	Se1[VA]	1815.73	1987.81	2387.61	2971.1
	S1+[VA]	1812.03	1985.27	2385.65	2970.41
	S1U[VA]	115.748	100.371	96.7858	63.8627
	Q1+[VAR]	1781.18	1788.04	1778.89	1890.24
	PF1+	0.18373	0.43454	0.66632	0.77140
	S1U/S1+	0.06388	0.05056	0.04057	0.02150
Non	PeH[W]	0.30909	1.71449	1.66517	1.37003
Fundamental	SeN[VA]	0.07154	0.06289	0.05664	0.06322
	SeH[VA]	4.64005	3.91437	3.54237	5.53242
	DeI[VAR]	91.6402	84.7104	75.3428	106.11
	DeV[VAR]	91.9362	91.8541	112.258	154.908
	DeH[VAR]	4.62974	3.51892	3.1266	5.3601
	SeN/Se1	3.940E-5	3.164E-5	2.372E-5	2.128E-5
Mechanical Part	Slip	0.00529	0.01213	0.02272	0.03303
	Speed [rpm]	1492.07	1481.8	1465.92	1450.46
Spectrum Order	Low side	-22	-21.066	-32.266	-28.533
	1 th _50Hz	14.4	15.333	15.333	17.2
Harmonic [dB]	Up side	-20.133	-21.066	-29.466	-34.133
	2 th _100Hz	-36.933	-30.4	-36.933	-40.666
Phase A	f125Hz	-42.533	-43.466	-46.266	-50.933
	3 th _150Hz	-36	-39.733	-34.133	-31.333
	f175Hz	-49.066	-43.466	-49.066	-50
	5 th _250Hz	-15.466	-18.266	-22.933	-26.666
	7 th _350Hz	-28.533	-25.733	-22.933	-23.866
	9 th _450Hz	-42.533	-46.266	-45.333	-44.4
	11 th _550Hz	-43.466	-44.4	-38.8	-38.8
Spectrum Order	13 th _650Hz	-39.733	-37.866	-39.733	-35.066
	15 th _750Hz	-46.266	-46.266	-43.466	-46.266
Spectrum Order	Low side	-22	-21.066	-32.266	-30.4
	1 th _50Hz	13.4667	14.4	15.333	17.2
Harmonic [dB]	Up side	-20.133	-21.066	-30.4	-33.2
	2 th _100Hz	-36	-30.4	-36.933	-40.666
Phase B	f125Hz	-43.466	-43.466	-45.333	-47.2
	3 th _150Hz	-27.6	-26.666	-27.6	-29.466
	f175Hz	-50.933	-43.466	-47.2	-46.266
	5 th _250Hz	-14.533	-17.333	-21.066	-23.866
	7 th _350Hz	-27.6	-24.8	-22	-22.933
	9 th _450Hz	-46.266	-49.066	-50.933	-42.533
	11 th _550Hz	-45.333	-43.466	-39.733	-38.8
Spectrum Order	13 th _650Hz	-41.6	-39.733	-40.666	-36
	15 th _750Hz	-50	-49.066	-40.266	-47.2

Spectrum	Low side	-22	-21.066	-31.333	-30.4
Order	1 th _{50Hz}	14.4	15.333	16.2667	17.2
Harmonic	Up side	-20.133	-21.066	-29.466	-34.133
[dB]	2 th _{100Hz}	-35.066	-29.466	-36	-40.666
Phase C	f125Hz	-43.466	-43.466	-42.533	-46.266
	3 th _{150Hz}	-31.333	-31.333	-29.466	-27.6
	f175Hz	-50	-43.466	-51.866	-46.266
	5 th _{250Hz}	-15.466	-19.2	-22.933	-26.666
	7 th _{350Hz}	-26.666	-25.733	-22.933	-23.866
	9 th _{450Hz}	-46.266	-53.733	-52.8	-50
	11 th _{550Hz}	-40.666	-41.6	-36	-36.933
	13 th _{650Hz}	-41.6	-39.733	-38.8	-35.066
	15 th _{750Hz}	-50.933	-52.8	-48.133	-54.666

6.7 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส A 15 รอบ

Δ -Connection V_{ll} 220V

ตาราง 6-8 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase A15 รอบ

Normal	Quantities	No-load	30%load	60%load	100%load
Voltage (V)	Va	127.659	127.254	127.288	126.548
	Vb	127.99	127.676	128.298	127.887
	Vc	127.704	127.893	127.986	127.482
Current (A)	Ia	4.80604	5.20145	6.30526	7.76781
	Ib	4.46011	4.89601	6.17156	7.84248
	Ic	4.78019	5.41741	6.52034	8.09353
Power factor	pfA	0.14464	0.38920	0.65072	0.77018
	pfB	0.21454	0.49061	0.71061	0.81042
	pfC	0.24411	0.48655	0.65929	0.75578
Active Power (W)	Pa	88.7383	257.616	522.256	757.088
	Pb	122.47	306.68	562.656	812.813
	Pc	149.016	337.103	550.183	779.798
Apparent Power (VA)	Sa	613.535	661.906	802.586	983.005
	Sb	570.848	625.101	791.799	1002.95
	Sc	610.448	692.848	834.512	1031.78
Reactive Power (VAR)	Qa	607.084	609.716	609.42	626.99
	Qb	557.556	544.7	557.102	587.578
	Qc	591.98	605.31	627.462	675.631
THDv	THDv_a	0.00687	0.00726	0.00863	0.00896
	THDv_b	0.00764	0.00650	0.00832	0.00882

	THDv_c	0.00715	0.00623	0.00748	0.00829
THDi	THDi_a	0.03298	0.02448	0.01815	0.01125
	THDi_b	0.03845	0.03008	0.02095	0.01211
	THDi_c	0.03329	0.02308	0.01655	0.01017
Quantities	P[W]	361.149	902.485	1636.4	2350.3
Total	Se[VA]	1795.91	1981.51	2429.57	3018.13
	N[VAR]	1759.23	1764.06	1795.82	1893.21
	PF.	0.20110	0.45545	0.67354	0.77879
Fundamental	P1+[W]	359.986	900.139	1634.82	2349.57
	Se1[VA]	1790.78	1977.02	2425.92	3017.01
	S1+[VA]	1787.5	1971.89	2423.9	3014.86
	S1U[VA]	108.382	142.257	98.8729	113.73
	Q1+[VAR]	1750.87	1754.46	1789.6	1889.16
	PF1+	0.20139	0.45648	0.67446	0.77933
	S1U/S1+	0.06063	0.07214	0.04079	0.03772
Non Fundamental	PeH[W]	1.1627	2.34588	1.57741	0.92992
	SeN[VA]	0.07577	0.06745	0.05485	0.02728
	SeH[VA]	5.0645	4.44245	3.22336	0.50845
	DeI[VAR]	103.374	86.9772	68.6163	19.1692
	DeV[VAR]	87.7345	100.978	113.961	80.0245
	DeH[VAR]	4.92923	3.77256	2.81102	NaN
	SeN/Se1	4.231E-5	3.412E-5	2.261E-5	9.041E-6
Mechanical Part	Slip	0.00369	0.01173	0.02142	0.03344
	Speed [rpm]	1494.46	1482.41	1467.87	1449.85
Spectrum Order	Low side	-21.066	-22	-27.6	-34.4
	1 th _50Hz	12.533	11.6	16.2667	17.6
Harmonic [dB]	Up side	-19.2	-22.933	-30.4	-33.6
	2 th _100Hz	-39.733	-28.533	-34.133	-38.4
Phase A	f125Hz	-43.466	-42.533	-43.466	-44.8
	3 th _150Hz	-30.4	-36.933	-35.066	-27.2
	f175Hz	-46.266	-46.266	-44.4	-46.4
	5 th _250Hz	-16.4	-19.2	-20.133	-27.2
	7 th _350Hz	-30.4	-27.6	-26.666	-28.8
	9 th _450Hz	-47.2	-45.333	-53.733	-52
	11 th _550Hz	-39.733	-41.6	-36	-32.8
Phase B	13 th _650Hz	-38.8	-36	-39.733	-36
	15 th _750Hz	-51.866	-49.066	-50.933	-52.8
Spectrum Order	Low side	-21.066	-22.933	-27.6	-36
	1 th _50Hz	11.6	11.6	15.333	17.2
Harmonic [dB]	Up side	-19.2	-22.933	-30.4	-34.133
	2 th _100Hz	-39.733	-28.533	-35.066	-39.733
Phase B	f125Hz	-41.6	-44.4	-44.4	-47.2

	3 th _150Hz	-29.466	-29.466	-29.466	-28.533
	f175Hz	-49.066	-45.333	-47.2	-49.066
	5 th _250Hz	-15.466	-18.266	-19.2	-24.8
	7 th _350Hz	-31.333	-27.6	-26.666	-28.533
	9 th _450Hz	-48.133	-47.2	-46.266	-44.4
	11 th _550Hz	-42.533	-41.6	-36	-33.2
	13 th _650Hz	-38.8	-36.933	-39.733	-36
	15 th _750Hz	-56.533	-60.266	-51.866	-52.8
Spectrum	Low side	-21.066	-22	-27.6	-35.2
Order	1 th _50Hz	12.533	12.533	16.2667	17.6
Harmonic	Up side	-19.2	-22.933	-30.4	-32.8
[dB]	2 th _100Hz	-38.8	-28.533	-35.066	-39.2
Phase C	f125Hz	-42.533	-42.533	-41.6	-46.4
	3 th _150Hz	-40.666	-36	-30.4	-26.4
	f175Hz	-44.4	-47.2	-45.333	-47.2
	5 th _250Hz	-16.4	-19.2	-21.066	-28.8
	7 th _350Hz	-30.4	-27.6	-26.666	-28.8
	9 th _450Hz	-62.133	-61.2	-49.066	-47.2
	11 th _550Hz	-39.733	-38.8	-35.066	-32.8
	13 th _650Hz	-37.866	-35.066	-39.733	-36
	15 th _750Hz	-51.866	-51.866	-61.2	-63.2

6.8 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส A 31 รอบ

Δ -Connection V_{ll} 220V

ตาราง 6-9 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase A31 รอบ

Normal	Quantities	No-load	30%load	60%load	100%load
Voltage (V)	Va	127.298	127.079	126.856	126.233
	Vb	128.435	127.856	128.191	127.649
	Vc	127.71	127.371	127.503	126.883
Current (A)	Ia	4.64627	5.16483	6.30635	7.85547
	Ib	4.53825	5.0542	6.35134	7.97779
	Ic	5.12646	5.63433	6.78173	8.33793
Power factor	pfA	0.14362	0.40612	0.66246	0.77401
	pfB	0.30972	0.54003	0.74386	0.82653
	pfC	0.25379	0.49443	0.66656	0.76290
Active Power (W)	Pa	84.9464	266.553	529.965	767.516
	Pb	180.524	348.968	605.638	841.701
	Pc	166.157	354.83	576.37	807.099

Apparent Power (VA)	Sa	591.46	656.343	799.996	991.617
	Sb	582.868	646.207	814.184	1018.36
	Sc	654.703	717.652	864.692	1057.94
Reactive Power (VAR)	Qa	585.328	599.78	599.275	627.872
	Qb	554.208	543.879	544.149	573.231
	Qc	633.268	623.795	644.585	683.98
THDv	THDv_a	0.00849	0.00768	0.00889	0.00939
	THDv_b	0.00747	0.00800	0.00879	0.00930
	THDv_c	0.00718	0.00782	0.00791	0.00867
THDi	THDi_a	0.03827	0.02731	0.01815	0.01185
	THDi_b	0.04262	0.02862	0.01949	0.01262
	THDi_c	0.03113	0.02213	0.01514	0.01068
Quantities Total	P[W]	431.769	971.222	1713.74	2417.68
	Se[VA]	1831.79	2022.57	2480.23	3068.87
	N[VAR]	1780.17	1774.13	1792.94	1890.17
	PF.	0.23571	0.48019	0.69096	0.78781
Fundamental	P1+[W]	431.827	969.869	1711.35	2417.58
	Se1[VA]	1825.6	2019.47	2475.06	3064.41
	S1+[VA]	1818.24	2013.04	2470.8	3060.77
	S1U[VA]	163.787	161.071	145.233	149.319
	Q1+[VAR]	1766.22	1764	1782.17	1877.13
	PF1+	0.23750	0.48179	0.69263	0.78986
	S1U/S1+	0.09008	0.08001	0.05878	0.04878
Non Fundamental	PeH[W]	-0.05803	1.35287	2.38782	0.10112
	SeN[VA]	0.08238	0.05540	0.06461	0.05395
	SeH[VA]	6.13362	3.09603	4.74962	3.64
	DeI[VAR]	112.836	80.0856	88.163	75.9879
	DeV[VAR]	99.2374	78.0709	133.34	146.792
	DeH[VAR]	6.13335	2.78481	4.10575	3.63859
	SeN/Se1	4.512E-5	2.743E-5	2.611E-5	1.761E-5
Mechanical Part	Slip	0.00451	0.01210	0.02244	0.03428
	Speed [rpm]	1493.24	1481.85	1466.35	1448.58
Spectrum Order	Low side	-20.133	-21.066	-30.4	-32.266
	1 th _{50Hz}	13.4667	14.4	17.2	18.1333
Harmonic [dB]	Up side	-23.866	-22.933	-30.4	-32.266
	2 th _{100Hz}	-37.866	-31.333	-37.866	-43.466
Phase A	f125Hz	-47.2	-37.866	-41.6	-47.2
	3 th _{150Hz}	-41.6	-37.866	-32.266	-32.266
	f175Hz	-45.333	-47.2	-46.266	-52.8
	5 th _{250Hz}	-14.533	-16.4	-20.133	-22.933
	7 th _{350Hz}	-29.466	-28.533	-30.4	-27.6
	9 th _{450Hz}	-49.066	-57.466	-60.266	-55.6

	11 th _550Hz	-41.6	-36.933	-35.066	-33.2
	13 th _650Hz	-37.866	-39.733	-38.8	-37.866
	15 th _750Hz	-53.733	-55.6	-53.733	-51.866
Spectrum	Low side	-19.2	-20.8	-28.533	-34.133
Order	1 th _50Hz	13.4667	14.4	16.2667	19.0667
Harmonic	Up side	-22	-21.6	-29.466	-30.4
[dB]	2 th _100Hz	-36.933	-32	-37.866	-42.533
Phase B	f125Hz	-46.266	-38.4	-41.6	-47.2
	3 th _150Hz	-24.8	-32.8	-31.333	-34.133
	f175Hz	-43.466	-48	-46.266	-53.733
	5 th _250Hz	-14.533	-16.8	-19.2	-21.066
	7 th _350Hz	-29.466	-30.4	-30.4	-27.6
	9 th _450Hz	-42.533	-43.2	-48.133	-47.2
	11 th _550Hz	-41.6	-38.4	-36	-32.266
	13 th _650Hz	-36.933	-39.2	-36.933	-36
	15 th _750Hz	-49.066	-57.6	-53.733	-50
Spectrum	Low side	-19.2	-21.066	-29.466	-32.8
Order	1 th _50Hz	14.4	15.333	17.2	19.2
Harmonic	Up side	-22	-22	-30.4	-31.2
[dB]	2 th _100Hz	-37.866	-31.333	-36.933	-43.2
Phase C	f125Hz	-46.266	-37.866	-41.6	-47.2
	3 th _150Hz	-27.6	-35.066	-30.4	-30.4
	f175Hz	-42.533	-46.266	-49.066	-48.8
	5 th _250Hz	-16.4	-18.266	-21.066	-24
	7 th _350Hz	-28.533	-28.533	-30.4	-27.2
	9 th _450Hz	-45.333	-44.4	-49.066	-47.2
	11 th _550Hz	-40.666	-36.933	-35.066	-32
	13 th _650Hz	-36	-38.8	-37.866	-36.8
	15 th _750Hz	-52.8	-61.2	-64	-60

6.9 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส B 7 รอบ

Δ -Connection V_{ll} 220V

ตาราง 6-10 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase B7 รอบ

Normal	Quantities	No-load	30%load	60%load	100%load
Voltage (V)	Va	127.347	127.368	128.086	127.437
	Vb	127.692	127.534	127.801	127.943
	Vc	128.561	127.5	128.222	127.852
Current	Ia	4.7906	5.17342	6.24529	7.74361

(A)	Ib	4.43747	5.00097	5.95812	7.71896
	Ic	4.79371	5.158	6.29121	7.79737
Power factor	pfA	0.12864	0.41584	0.63777	0.77201
	pfB	0.19950	0.44907	0.63712	0.78813
	pfC	0.22746	0.46389	0.64882	0.75198
Active Power (W)	Pa	78.4786	274.011	510.168	761.843
	Pb	113.042	286.414	485.134	778.344
	Pc	140.179	305.077	523.384	749.648
Apparent Power (VA)	Sa	610.067	658.927	799.931	986.825
	Sb	566.632	637.796	761.452	987.587
	Sc	616.286	657.644	806.675	996.906
Reactive Power (VAR)	Qa	604.998	599.251	616.132	627.231
	Qb	555.241	569.869	586.902	607.873
	Qc	600.131	582.601	613.835	657.152
THDv	THDv_a	0.00724	0.00671	0.00767	0.00697
	THDv_b	0.00758	0.00697	0.00731	0.00763
	THDv_c	0.00662	0.00616	0.00678	0.00583
THDi	THDi_a	0.03486	0.02592	0.01805	0.01126
	THDi_b	0.04204	0.02958	0.02231	0.01288
	THDi_c	0.03526	0.02482	0.01819	0.01112
Quantities Total	P[W]	332.262	865.765	1518.86	2290.03
	Se[VA]	1794.08	1954.61	2368.66	2971.35
	N[VAR]	1763.05	1752.41	1817.58	1893.32
	PF.	0.18520	0.44294	0.64123	0.77071
Fundamental	P1+[W]	330.567	866.401	1518.35	2289.66
	Se1[VA]	1789.5	1950.89	2364.22	2968.3
	S1+[VA]	1785.72	1949.64	2363.1	2967.67
	S1U[VA]	116.251	69.8083	72.9974	61.2793
	Q1+[VAR]	1754.86	1746.55	1810.76	1888
	PF1+	0.18512	0.44439	0.64253	0.77153
	S1U/S1+	0.06510	0.03581	0.03089	0.02065
Non Fundamental	PeH[W]	1.69542	-0.63611	0.51286	0.37665
	SeN[VA]	0.07159	0.06178	0.06129	0.04531
	SeH[VA]	4.49817	3.67629	4.18812	2.27868
	DeI[VAR]	98.6536	91.4572	83.8067	55.1415
	DeV[VAR]	81.5935	78.4194	118.149	122.663
	DeH[VAR]	4.16643	3.62083	4.1566	2.24733
	SeN/Se1	4.000E-5	3.167E-5	2.593E-5	1.527E-5
Mechanical Part	Slip	0.00489	0.01217	0.02178	0.03307
	Speed [rpm]	1492.66	1481.74	1467.33	1450.4
Spectrum Order	Low side	-20.133	-20.133	-28.533	-34.133
	1 th _50Hz	14.4	15.333	16.2667	16.2667

Harmonic	Up side	-20.133	-21.066	-26.666	-30.4
[dB]	2 th _100Hz	-39.733	-29.466	-36.933	-36.933
Phase A	f125Hz	-43.466	-44.4	-41.6	-43.466
	3 th _150Hz	-27.6	-40.666	-36	-27.6
	f175Hz	-43.466	-40.666	-43.466	-47.2
	5 th _250Hz	-15.466	-18.266	-20.133	-24.8
	7 th _350Hz	-26.666	-25.733	-23.866	-24.8
	9 th _450Hz	-44.4	-44.4	-46.266	-44.4
	11 th _550Hz	-44.4	-42.533	-40.666	-38.8
	13 th _650Hz	-41.6	-37.866	-36.933	-37.866
	15 th _750Hz	-51.866	-49.066	-49.066	-46.266
Spectrum	Low side	-20.133	-20.133	-29.466	-34.4
Order	1 th _50Hz	13.4667	14.4	16.2667	16
Harmonic	Up side	-19.2	-21.066	-27.6	-31.2
[dB]	2 th _100Hz	-41.6	-30.4	-36.933	-37.6
Phase B	f125Hz	-40.666	-44.4	-40.666	-46.4
	3 th _150Hz	-22	-31.333	-30.4	-32
	f175Hz	-43.466	-40.666	-48.133	-47.2
	5 th _250Hz	-14.533	-17.333	-19.2	-23.2
	7 th _350Hz	-26.666	-24.8	-22.933	-24
	9 th _450Hz	-46.266	-44.4	-47.2	-44.8
	11 th _550Hz	-46.266	-43.466	-40.666	-38.4
	13 th _650Hz	-44.4	-39.733	-38.8	-39.2
	15 th _750Hz	-49.066	-47.2	-47.2	-44
Spectrum	Low side	-21.066	-20.133	-30.4	-33.2
Order	1 th _50Hz	14.4	14.4	16.2667	16.2667
Harmonic	Up side	-20.133	-21.066	-26.666	-30.4
[dB]	2 th _100Hz	-37.866	-29.466	-36	-35.066
Phase C	f125Hz	-44.4	-45.333	-38.8	-45.333
	3 th _150Hz	-24.8	-35.066	-32.266	-30.4
	f175Hz	-44.4	-40.666	-42.533	-45.333
	5 th _250Hz	-15.466	-18.266	-20.133	-25.733
	7 th _350Hz	-26.666	-25.733	-23.866	-23.866
	9 th _450Hz	-50.933	-63.066	-55.6	-51.866
	11 th _550Hz	-41.6	-40.066	-37.866	-36.933
	13 th _650Hz	-42.533	-38.8	-38.8	-39.733
	15 th _750Hz	-49.066	-56.533	-49.066	-54.666

6.10 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส B 15 รอบ

Δ -Connection V_{ll} 220V

ตาราง 6-11 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase B15 รอบ

Normal	Quantities	No-load	25%load	50%load	75%load
Voltage (V)	Va	127.449	127.588	127.433	127.939
	Vb	128.32	127.281	127.105	127.954
	Vc	128.568	127.201	127.125	127.824
Current (A)	Ia	4.77494	5.29749	6.43194	8.05444
	Ib	4.69003	5.0972	6.17452	7.82568
	Ic	4.74853	5.08723	6.26809	7.88947
Power factor	pfA	0.18106	0.44951	0.67803	0.77842
	pfB	0.20732	0.44885	0.68735	0.78570
	pfC	0.21406	0.48247	0.67127	0.76599
Active Power (W)	Pa	111.051	303.82	555.742	802.144
	Pb	124.771	291.203	539.44	786.738
	Pc	130.684	312.205	534.889	772.47
Apparent Power (VA)	Sa	613.337	675.897	819.639	1030.48
	Sb	601.823	648.779	784.813	1001.32
	Sc	610.51	647.101	796.83	1008.46
Reactive Power (VAR)	Qa	603.2	603.763	602.461	646.877
	Qb	588.747	579.754	570.031	619.429
	Qc	596.359	566.805	590.62	648.297
THDv	THDv_a	0.00635	0.00696	0.00817	0.00860
	THDv_b	0.00684	0.00744	0.00792	0.00880
	THDv_c	0.00597	0.00609	0.00760	0.00868
THDi	THDi_a	0.03651	0.02496	0.01524	0.01389
	THDi_b	0.04060	0.02761	0.01860	0.01651
	THDi_c	0.03633	0.02402	0.01545	0.01579
Quantities Total	P[W]	366.628	907.696	1630.39	2361.55
	Se[VA]	1825.71	1972.08	2401.58	3040.49
	N[VAR]	1788.52	1750.77	1763.35	1915.11
	PF.	0.20081	0.46027	0.67888	0.77670
Fundamental	P1+[W]	366.395	906.448	1629.54	2360.66
	Se1[VA]	1820.36	1968.62	2398.14	3035.23
	S1+[VA]	1819.75	1967.47	2397.65	3034.84
	S1U[VA]	47.2548	67.1896	48.5201	48.9393
	Q1+[VAR]	1782.48	1746.22	1758.78	1907.22
	PF1+	0.20134	0.46072	0.67964	0.77786
	S1U/S1+	0.02597	0.03415	0.02024	0.01613

Non	PeH[W]	0.23294	1.24786	0.85616	0.88753
Fundamental	SeN[VA]	0.07676	0.05932	0.05361	0.05888
	SeH[VA]	5.1048	3.36598	3.24347	4.6655
	DeI[VAR]	112.71	91.6624	74.0598	92.7523
	DeV[VAR]	82.4466	72.2905	105.027	152.674
	DeH[VAR]	5.09948	3.12612	3.12844	4.5803
	SeN/Se1	4.217E-5	3.014E-5	2.235E-5	1.940E-5
Mechanical	Slip	0.00434	0.01195	0.02184	0.03277
Part	Speed [rpm]	1493.5	1482.07	1467.24	1450.85
Spectrum	Low side	-19.2	-22	-27.6	-31.333
Order	1 th _50Hz	12.533	12.533	13.4667	18.1333
Harmonic [dB]	Up side	-22	-22.933	-25.733	-33.2
	2 th _100Hz	-36.933	-27.6	-34.133	-40.666
Phase A	f125Hz	-44.4	-36.933	-44.4	-44.4
	3 th _150Hz	-29.466	-31.333	-46.266	-35.066
	f175Hz	-46.266	-42.533	-46.266	-43.466
	5 th _250Hz	-16.4	-18.266	-22	-22.933
	7 th _350Hz	-29.466	-26.666	-29.466	-22.933
	9 th _450Hz	-44.4	-48.133	-53.733	-41.6
	11 th _550Hz	-44.4	-44.4	-39.733	-38.8
13 th _650Hz	-41.6	-38.8	-35.066	-36	
15 th _750Hz	-50	-50.933	-51.866	-46.266	
Spectrum	Low side	-20.133	-22.933	-28.533	-32.266
Order	1 th _50Hz	12.533	12.533	13.4667	18.1333
Harmonic [dB]	Up side	-21.066	-22	-26.666	-33.2
	2 th _100Hz	-38.8	-27.6	-34.133	-40.666
Phase B	f125Hz	-43.466	-36.933	-43.466	-47.2
	3 th _150Hz	-22.933	-28.533	-28.533	-25.733
	f175Hz	-47.2	-41.6	-50.933	-45.333
	5 th _250Hz	-16.4	-17.333	-22	-22.933
	7 th _350Hz	-29.466	-25.733	-27.6	-22.933
	9 th _450Hz	-47.2	-41.6	-44.4	-44.4
	11 th _550Hz	-48.133	-43.466	-39.733	-38.8
13 th _650Hz	-41.6	-38.8	-34.133	-36.933	
15 th _750Hz	-50	-51.866	-53.733	-45.333	
Spectrum	Low side	-20.133	-22.933	-28.533	-32.266
Order	1 th _50Hz	12.533	12.533	13.4667	18.1333
Harmonic [dB]	Up side	-22	-22.933	-26.666	-34.133
	2 th _100Hz	-37.866	-27.6	-33.2	-40.666
Phase C	f125Hz	-46.266	-36.933	-40.666	-46.266
	3 th _150Hz	-26.666	-36.933	-36	-27.6
	f175Hz	-48.133	-43.466	-43.466	-45.333

5 th _250Hz	-16.4	-18.266	-22.933	-22.933
7 th _350Hz	-29.466	-26.666	-28.533	-22.933
9 th _450Hz	-52.8	-45.333	-47.2	-58.4
11 th _550Hz	-44.4	-42.533	-38.8	-37.866
13 th _650Hz	-41.6	-39.733	-35.066	-36
15 th _750Hz	-50	-64.933	-59.333	-56.533

6.11 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส B31 รอบ Δ -Connection V_{ll} 220V

ตาราง 6-12 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase B31 รอบ

Normal	Quantities	No-load	30%load	60%load	100%load
Voltage (V)	Va	128.103	128.29	127.878	128.433
	Vb	127.87	128.334	128.071	128.165
	Vc	128.492	128.647	128.27	128.75
Current (A)	Ia	4.72616	5.28124	6.4458	8.08048
	Ib	4.86535	5.44559	6.6177	8.02672
	Ic	4.84524	5.31888	6.40178	7.97294
Power factor	pfA	0.23008	0.47777	0.70622	0.78826
	pfB	0.26028	0.48427	0.70012	0.78919
	pfC	0.22792	0.46373	0.65226	0.76018
Active Power (W)	Pa	139.299	323.705	582.122	818.051
	Pb	161.926	338.433	593.381	811.874
	Pc	141.897	317.309	535.611	780.333
Apparent Power (VA)	Sa	605.437	677.528	824.278	1037.8
	Sb	622.131	698.857	847.538	1028.75
	Sc	622.572	684.26	821.158	1026.51
Reactive Power (VAR)	Qa	589.195	595.197	583.582	638.609
	Qb	600.689	611.444	605.161	631.806
	Qc	606.186	606.24	622.432	666.943
THDv	THDv_a	0.00838	0.00778	0.00781	0.00792
	THDv_b	0.00753	0.00741	0.00725	0.00761
	THDv_c	0.00840	0.00851	0.00827	0.00726
THDi	THDi_a	0.03304	0.02254	0.01672	0.01171
	THDi_b	0.03802	0.02651	0.01895	0.01462
	THDi_c	0.03396	0.02661	0.01900	0.01390
Quantities	P[W]	443.007	979.42	1710.87	2410.19
Total	Se[VA]	1850.29	2060.83	2493.24	3093.13
	N[VAR]	1796.48	1813.22	1813.61	1938.67

	PF.	0.23943	0.47526	0.68620	0.77921
Fundamental	P1+[W]	443.571	980.927	1712.69	2410.62
	Se1[VA]	1845.97	2056.03	2489.04	3088.52
	S1+[VA]	1845.53	2055.73	2487.87	3088.08
	S1U[VA]	40.2886	35.1081	76.3942	52.355
	Q1+[VAR]	1791.44	1806.6	1804.5	1930.06
	PF1+	0.24035	0.47717	0.68842	0.78062
	S1U/S1+	0.02183	0.01708	0.03071	0.01695
Non Fundamental	PeH[W]	-0.56382	-1.50739	-1.81922	-0.43237
	SeN[VA]	0.06846	0.06839	0.05811	0.05464
	SeH[VA]	4.31124	4.79308	3.91086	3.67182
	DeI[VAR]	86.3187	96.1426	81.5326	75.0434
	DeV[VAR]	92.1983	102.501	119.392	151.119
	DeH[VAR]	4.27421	4.54988	3.46197	3.64628
	SeN/Se1	3.709E-5	3.326E-5	2.334E-5	1.769E-5
Mechanical Part	Slip	0.00545	0.01232	0.02239	0.03349
	Speed [rpm]	1491.82	1481.53	1466.41	1449.76
Spectrum Order	Low side	-21.066	-21.066	-31.333	-33.2
	1 th _{50Hz}	13.4667	15.333	17.2	18.133
Harmonic [dB]	Up side	-21.066	-22	-29.466	-35.066
	2 th _{100Hz}	-39.733	-28.533	-36	-39.733
Phase A	f125Hz	-40.666	-50	-43.466	-46.266
	3 th _{150Hz}	-30.4	-38.8	-35.066	-35.066
	f175Hz	-53.733	-45.333	-45.333	-45.333
	5 th _{250Hz}	-17.333	-19.2	-23.866	-27.6
	7 th _{350Hz}	-25.733	-24.8	-21.066	-24.8
	9 th _{450Hz}	-40.666	-38.8	-40.666	-40.666
	11 th _{550Hz}	-42.533	-41.6	-39.733	-36
Spectrum Order	13 th _{650Hz}	-40.666	-40.666	-36.933	-36.933
	15 th _{750Hz}	-41.6	-45.333	-42.533	-43.466
Spectrum Order	Low side	-22	-22	-31.333	-31.333
	1 th _{50Hz}	13.4667	15.333	17.2	18.1333
Harmonic [dB]	Up side	-19.2	-20.133	-28.533	-34.133
	2 th _{100Hz}	-39.733	-29.466	-36.933	-40.666
Phase B	f125Hz	-40.666	-48.133	-46.266	-46.266
	3 th _{150Hz}	-22	-23.866	-28.533	-25.733
	f175Hz	-47.2	-42.533	-46.266	-47.2
	5 th _{250Hz}	-16.4	-18.266	-22	-24.8
	7 th _{350Hz}	-24.8	-24.8	-21.066	-23.866
	9 th _{450Hz}	-48.133	-46.266	-47.2	-44.4
	11 th _{550Hz}	-40.666	-40.666	-40.666	-36.933
	13 th _{650Hz}	-40.666	-40.666	-36	-37.866

	15 th _750Hz	-47.2	-50	-49.066	-47.2
Spectrum	Low side	-22.933	-22	-33.2	-35.066
Order	1 th _50Hz	13.4667	15.333	16.2667	18.1333
Harmonic	Up side	-21.066	-22	-30.4	-36.933
[dB]	2 th _100Hz	-37.866	-28.533	-36.933	-38.8
Phase C	f125Hz	-40.666	-47.2	-44.4	-48.133
	3 th _150Hz	-23.866	-25.733	-30.4	-26.666
	f175Hz	-46.266	-45.333	-48.133	-47.2
	5 th _250Hz	-17.333	-18.266	-22.933	-25.733
	7 th _350Hz	-24.8	-23.866	-21.066	-23.866
	9 th _450Hz	-44.4	-43.466	-47.2	-48.133
	11 th _550Hz	-38.8	-38.8	-38.8	-36
	13 th _650Hz	-40.666	-40.666	-35.066	-36.933
	15 th _750Hz	-48.133	-50	-47.2	-50.933

6.12 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส C 7 รอบ

Δ -Connection V_{\parallel} 220V

ตาราง 6-13 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase C7 รอบ

Normal	Quantities	No-load	30%load	60%load	100%load
Voltage (V)	Va	127.312	126.229	127.53	127.068
	Vb	128.003	128.412	128.293	127.762
	Vc	127.934	128.006	128.19	127.805
Current (A)	Ia	4.76728	5.17259	6.33531	7.86809
	Ib	4.5293	5.04971	6.14556	7.6492
	Ic	4.65397	5.12323	6.38953	7.96559
Power factor	pfA	0.15082	0.41434	0.65469	0.76397
	pfB	0.17899	0.45082	0.68902	0.79282
	pfC	0.21640	0.46220	0.65760	0.76358
Active Power (W)	Pa	91.5351	270.531	528.951	763.798
	Pb	103.77	292.332	543.244	774.804
	Pc	128.843	303.114	538.618	777.36
Apparent Power (VA)	Sa	606.931	652.928	807.943	999.781
	Sb	579.764	648.445	788.433	977.281
	Sc	595.399	655.802	819.074	1018.04
Reactive Power (VAR)	Qa	599.989	594.246	610.724	645.116
	Qb	570.401	578.812	571.413	595.614
	Qc	581.291	581.548	617.067	657.363
THDv	THDv_a	0.00741	0.00829	0.00722	0.00792

	THDv_b	0.00718	0.00793	0.00752	0.00767	
	THDv_c	0.00636	0.00723	0.00708	0.00708	
THDi	THDi_a	0.03682	0.02862	0.01811	0.01132	
	THDi_b	0.04107	0.03209	0.02129	0.01363	
	THDi_c	0.03559	0.02772	0.01752	0.01213	
Quantities	P[W]	324.547	866.081	1611.6	2316.93	
Total	Se[VA]	1782.57	1957.45	2415.84	2995.57	
	N[VAR]	1752.78	1755.43	1799.72	1898.75	
	PF.	0.18207	0.44245	0.6671	0.77345	
Fundamental	P1+[W]	324.138	865.169	1610.54	2316.55	
	Se1[VA]	1776.84	1952.33	2411.98	2990.82	
	S1+[VA]	1775.41	1951.28	2411.05	2989.56	
	S1U[VA]	71.4672	64.0477	66.9125	86.9315	
	Q1+[VAR]	1745.57	1748.99	1794.24	1889.72	
	PF1+	0.18257	0.44339	0.66799	0.77488	
	S1U/S1+	0.04025	0.03282	0.02775	0.02908	
Non Fundamental	PeH[W]	0.40975	0.91229	1.05989	0.37940	
	SeN[VA]	0.08034	0.07252	0.0566	0.05636	
	SeH[VA]	5.66794	5.1239	3.62987	3.69368	
	DeI[VAR]	107.734	101.642	78.3596	72.6563	
	DeV[VAR]	93.4805	98.4189	111.731	152.046	
	DeH[VAR]	5.65311	5.04203	3.47169	3.67414	
	SeN/Se1	4.521E-5	3.714E-5	2.347E-5	1.884E-5	
Mechanical Part	Slip	0.00400	0.01186	0.02109	0.03306	
	Speed [rpm]	1494	1482.22	1468.36	1450.42	
Spectrum Order Harmonic [dB] Phase A	Low side	-20.133	-22	-28.533	-33.2	
	1 th _50Hz	10.667	13.4667	16.2667	18.1333	
	Up side	-20.133	-24.8	-30.4	-33.2	
	2 th _100Hz	-36	-31.333	-36	-39.733	
	f125Hz	-43.466	-34.133	-40.666	-42.533	
	3 th _150Hz	-35.066	-30.4	-29.466	-32.266	
	f175Hz	-48.133	-44.4	-46.266	-46.266	
	5 th _250Hz	-17.333	-17.333	-22.933	-28.533	
	7 th _350Hz	-31.333	-30.4	-22	-22	
	9 th _450Hz	-53.733	-55.6	-47.2	-46.266	
	11 th _550Hz	-39.733	-36.933	-41.6	-36.933	
	13 th _650Hz	-40.666	-39.733	-38.8	-39.733	
	15 th _750Hz	-52.8	-50	-49.066	-49.066	
	Spectrum Order Harmonic [dB]	Low side	-20.533	-22	-28.533	-36
		1 th _50Hz	10.4	13.4667	15.333	17.2
Up side		-19.466	-24.8	-31.333	-34.133	
2 th _100Hz		-37.6	-31.333	-36	-40.666	

Phase B	f125Hz	-45.066	-33.2	-40.666	-43.466
	3 th _150Hz	-28	-24.8	-28.533	-28.533
	f175Hz	-50.4	-46.266	-47.2	-45.333
	5 th _250Hz	-16.266	-17.333	-21.066	-26.666
	7 th _350Hz	-31.2	-30.4	-22	-21.066
	9 th _450Hz	-47.2	-44.4	-46.266	-49.066
	11 th _550Hz	-39.733	-36	-39.733	-37.866
	13 th _650Hz	-40.8	-39.733	-40.666	-40.666
	15 th _750Hz	-54.666	-53.733	-44.4	-45.333
Spectrum	Low side	-20.133	-22	-28.533	-34.133
Order	1 th _50Hz	10.667	13.4667	16.2667	18.1333
Harmonic [dB]	Up side	-21.066	-25.733	-32.266	-35.066
	2 th _100Hz	-36.933	-31.333	-35.066	-37.866
Phase C	f125Hz	-44.4	-33.2	-39.733	-44.4
	3 th _150Hz	-29.466	-26.666	-30.4	-29.466
	f175Hz	-49.066	-45.333	-44.4	-48.133
	5 th _250Hz	-18.266	-18.266	-22.933	-27.6
	7 th _350Hz	-31.333	-30.4	-22	-22
	9 th _450Hz	-50	-44.4	-54.666	-51.866
	11 th _550Hz	-38.8	-36	-37.866	-34.133
	13 th _650Hz	-41.6	-39.733	-40.666	-41.6
	15 th _750Hz	-65.866	-60.266	-52.8	-55.6

6.13 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส C 15 รอบ

Δ -Connection V_{ll} 220V

ตาราง 6-14 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase C15 รอบ

Normal	Quantities	No-load	30%load	60%load	100%load
Voltage (V)	Va	127.565	126.961	127.023	127.244
	Vb	128.132	128.17	128.411	128.006
	Vc	128.516	128.491	128.302	128.021
Current (A)	Ia	4.96143	5.45216	6.56801	7.96393
	Ib	4.47928	4.92656	6.07712	7.59683
	Ic	4.71748	5.20638	6.33791	7.91443
Power factor	pfA	0.16279	0.45947	0.65831	0.76325
	pfB	0.18243	0.44106	0.67900	0.78702
	pfC	0.2656	0.51046	0.68299	0.77005
Active Power	Pa	103.033	318.053	549.222	773.442
	Pb	104.706	278.503	529.872	765.333

(W)	Pc	161.025	341.484	555.384	780.223
Apparent Power (VA)	Sa	632.906	692.211	834.288	1013.36
	Sb	573.94	631.437	780.366	972.442
	Sc	606.269	668.973	813.17	1013.21
Reactive Power (VAR)	Qa	624.463	614.816	628.006	654.739
	Qb	564.308	566.7	572.894	599.924
	Qc	584.494	575.251	593.964	646.41
THDv	THDv_a	0.00817	0.00815	0.00814	0.00840
	THDv_b	0.00842	0.00780	0.00690	0.00843
	THDv_c	0.00714	0.00768	0.00769	0.00852
THDi	THDi_a	0.03296	0.02520	0.01758	0.01273
	THDi_b	0.04075	0.03244	0.02208	0.01503
	THDi_c	0.03549	0.02704	0.01885	0.01443
Quantities Total	P[W]	369.518	938.151	1636.05	2320.14
	Se[VA]	1814.84	1994.66	2429.41	2999.77
	N[VAR]	1776.82	1760.26	1795.93	1901.47
	PF.	0.20361	0.47033	0.67344	0.77344
Fundamental	P1+[W]	367.469	939.079	1633.13	2318.05
	Se1[VA]	1810.4	1988.56	2424.67	2995.77
	S1+[VA]	1806.33	1984.81	2422.68	2994.6
	S1U[VA]	121.357	121.97	98.3975	83.7295
	Q1+[VAR]	1768.56	1748.6	1789.49	1895.87
	PF1+	0.20343	0.47313	0.6741	0.77407
	S1U/S1+	0.06718	0.06145	0.04062	0.02796
Non Fundamental	PeH[W]	2.04918	-0.92729	2.92	2.0976
	SeN[VA]	0.07002	0.07840	0.06251	0.05169
	SeH[VA]	4.40673	6.10106	4.4115	3.55972
	DeI[VAR]	94.3134	110.637	85.5353	80.7178
	DeV[VAR]	84.5899	109.659	125.053	132.116
	DeH[VAR]	3.90129	6.03018	3.3068	2.87605
	SeN/Se1	3.868E-5	3.942E-5	2.578E-5	1.726E-5
Mechanical Part	Slip	0.00498	0.01242	0.02286	0.03211
	Speed [rpm]	1492.53	1481.37	1465.71	1451.84
Spectrum Order	Low side	-22	-22	-30.4	-35.2
	1 th _50Hz	14.4	15.333	15.333	17.6
Harmonic [dB]	Up side	-20.133	-22	-32.266	-37.6
	2 th _100Hz	-36	-29.466	-35.066	-42.4
Phase A	f125Hz	-48.133	-33.2	-38.8	-44
	3 th _150Hz	-29.466	-36.933	-34.133	-34.4
	f175Hz	-44.4	-42.533	-45.333	-51.2
	5 th _250Hz	-15.466	-17.333	-21.066	-27.2
	7 th _350Hz	-24.8	-22.933	-23.866	-21.6

	9 th _450Hz	-42.533	-41.6	-46.266	-45.6
	11 th _550Hz	-43.466	-44.4	-40.666	-36
	13 th _650Hz	-38.8	-36.933	-40.666	-36
	15 th _750Hz	-50	-45.333	-49.066	-50.4
Spectrum	Low side	-21.066	-22	-29.466	-33.2
Order	1 th _50Hz	14.4	14.4	14.4	17.2
Harmonic	Up side	-19.2	-21.066	-32.266	-36
[dB]	2 th _100Hz	-36.933	-29.466	-35.066	-39.733
Phase B	f125Hz	-49.066	-32.266	-38.8	-42.533
	3 th _150Hz	-24.8	-25.733	-25.733	-25.733
	f175Hz	-42.533	-43.466	-49.066	-50
	5 th _250Hz	-14.533	-16.4	-19.2	-25.733
	7 th _350Hz	-25.733	-22.933	-23.866	-21.066
	9 th _450Hz	-44.4	-47.2	-50.933	-50.933
	11 th _550Hz	-47.2	-43.466	-44.4	-38.8
	13 th _650Hz	-41.6	-39.733	-40.666	-36.933
	15 th _750Hz	-49.066	-47.2	-51.866	-48.133
Spectrum	Low side	-22	-22	-31.33	-34.133
Order	1 th _50Hz	14.4	15.333	14.4	17.2
Harmonic	Up side	-21.066	-22.933	-33.2	-36
[dB]	2 th _100Hz	-36.933	-29.466	-35.066	-40.666
Phase C	f125Hz	-50	-32.266	-36.933	-42.533
	3 th _150Hz	-25.733	-30.4	-30.4	-26.666
	f175Hz	-47.2	-41.6	-44.4	-49.066
	5 th _250Hz	-15.466	-17.333	-21.066	-26.666
	7 th _350Hz	-24.8	-22.933	-23.866	-21.066
	9 th _450Hz	-54.666	-53.733	-50	-55.6
	11 th _550Hz	-41.6	-39.733	-39.733	-35.066
	13 th _650Hz	-40.666	-38.8	-40.666	-36
	15 th _750Hz	-56.533	-53.733	-55.6	-53.733

6.14 ผลการทดสอบมอเตอร์ในภาวะลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์เฟส C 31 รอบ

Δ -Connection V_{ll} 220V

ตาราง 6-15 ผลทดสอบกรณีลัดวงจร Short Turn Phase C31 รอบ

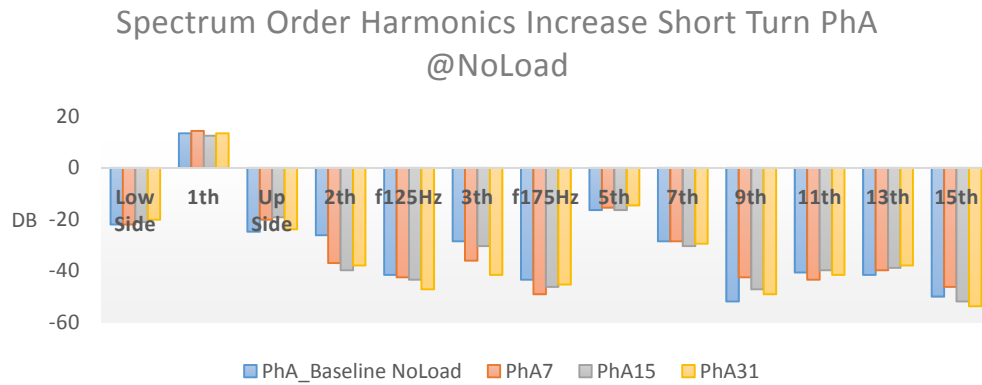
Normal	Quantities	No-load	30%load	60%load	100%load
Voltage (V)	Va	127.9	127.58	126.963	126.852
	Vb	128.688	128.728	128.73	128.274
	Vc	129.012	128.696	128.599	127.721

Current (A)	Ia	5.23175	5.68909	6.74333	8.34125
	Ib	4.55284	5.07601	6.19792	7.81043
	Ic	4.74508	5.31246	6.51534	8.05831
Power factor	pfA	0.20693	0.48918	0.66799	0.77746
	pfB	0.18865	0.44687	0.68943	0.78831
	pfC	0.32559	0.54089	0.69956	0.79015
Active Power (W)	Pa	138.464	355.056	571.898	822.631
	Pb	110.531	291.997	550.068	789.784
	Pc	199.317	369.801	586.133	813.234
Apparent Power (VA)	Sa	669.141	725.815	856.151	1058.1
	Sb	585.895	653.424	797.858	1001.87
	Sc	612.174	683.691	837.867	1029.21
Reactive Power (VAR)	Qa	654.658	633.043	637.124	665.48
	Qb	575.374	584.551	577.929	616.433
	Qc	578.818	575.048	598.722	630.817
THDv	THDv_a	0.00805	0.00823	0.00777	0.00746
	THDv_b	0.00769	0.00844	0.00814	0.00806
	THDv_c	0.00764	0.00761	0.00795	0.00778
THDi	THDi_a	0.03319	0.02540	0.01784	0.01222
	THDi_b	0.04337	0.03498	0.02302	0.01448
	THDi_c	0.03906	0.02645	0.01998	0.01402
Quantities Total	P[W]	449.723	1016.93	1709.94	2427.16
	Se[VA]	1870.81	2065.61	2493.87	3090.72
	N[VAR]	1815.95	1797.94	1815.34	1913.49
	PF.	0.24039	0.49231	0.68566	0.78531
Fundamental	P1+[W]	446.614	1014.57	1707.63	2424.64
	Se1[VA]	1865.8	2060.63	2489.42	3085.71
	S1+[VA]	1858.09	2055.94	2487.11	3084.21
	S1U[VA]	169.457	138.961	107.186	96.0471
	Q1+[VAR]	1803.61	1788.17	1808.23	1906.16
	PF1+	0.24036	0.49348	0.68659	0.78615
	S1U/S1+	0.09120	0.06759	0.04310	0.03114
Non Fundamental	PeH[W]	3.10878	2.36346	2.30907	2.51568
	SeN[VA]	0.07332	0.06955	0.05982	0.05702
	SeH[VA]	4.82664	4.96986	4.1434	4.40652
	DeI[VAR]	108.837	98.4632	83.8706	89.9655
	DeV[VAR]	82.7434	104.009	122.983	151.138
	DeH[VAR]	3.69214	4.3719	3.44034	3.61784
	SeN/Se1	3.930E-5	3.375E-5	2.403E-5	1.848E-5
Mechanical Part	Slip	0.00534	0.01355	0.02306	0.03474
	Speed [rpm]	1491.99	1479.67	1465.41	1447.89
Spectrum	Low side	-22.666	-25.733	-31.33	-31.333

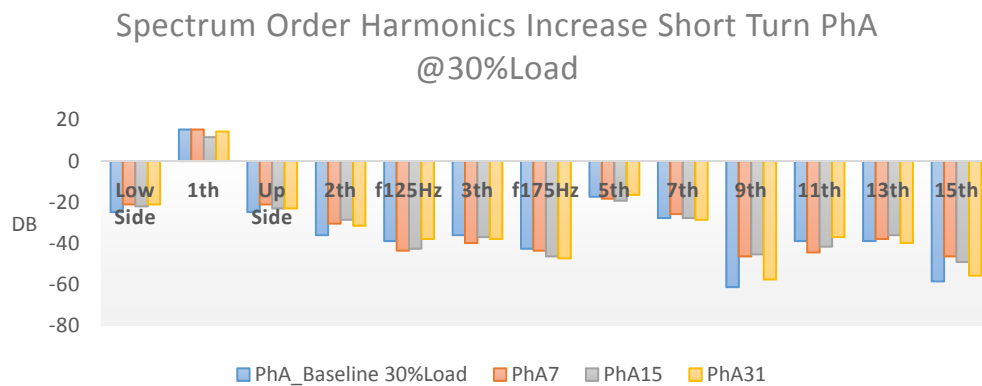
Order	1 th _50Hz	14.667	13.4667	15.333	18.1333
Harmonic	Up side	-19.466	-22	-31.333	-34.133
[dB]	2 th _100Hz	-36.533	-29.466	-36.933	-39.733
Phase A	f125Hz	-44	-30.4	-37.866	-47.2
	3 th _150Hz	-32.266	-31.333	-29.466	-30.4
	f175Hz	-44	-39.733	-42.533	-46.266
	5 th _250Hz	-15.2	-17.333	-21.066	-28.533
	7 th _350Hz	-24.8	-23.866	-21.066	-21.066
	9 th _450Hz	-46.133	-43.466	-47.2	-46.266
	11 th _550Hz	-42.933	-44.4	-46.266	-36.933
	13 th _650Hz	-37.6	-36.933	-37.866	-39.733
	15 th _750Hz	-42.933	-46.266	-47.2	-46.266
Spectrum	Low side	-22	-24.8	-30.4	-32.266
Order	1 th _50Hz	13.4667	12.533	14.4	17.2
Harmonic	Up side	-19.2	-22	-32.266	-34.133
[dB]	2 th _100Hz	-38.8	-29.466	-36.933	-38.8
Phase B	f125Hz	-46.266	-30.4	-38.8	-45.333
	3 th _150Hz	-26.666	-24.8	-27.6	-31.333
	f175Hz	-45.333	-39.733	-47.2	-47.2
	5 th _250Hz	-14.533	-15.466	-18.266	-25.733
	7 th _350Hz	-25.733	-22	-21.066	-20.133
	9 th _450Hz	-51.866	-44.4	-53.733	-48.133
	11 th _550Hz	-49.066	-44.4	-46.266	-38.8
	13 th _650Hz	-39.733	-38.8	-38.8	-40.666
	15 th _750Hz	-50.933	-45.333	-47.2	-47.2
Spectrum	Low side	-22	-24.8	-29.466	-29.466
Order	1 th _50Hz	14.4	12.533	14.4	18.1333
Harmonic	Up side	-22	-23.866	-33.2	-38.8
[dB]	2 th _100Hz	-37.866	-29.466	-38.8	-37.866
Phase C	f125Hz	-49.066	-30.4	-39.733	-47.2
	3 th _150Hz	-29.466	-26.666	-27.6	-26.666
	f175Hz	-45.333	-38.8	-44.4	-48.133
	5 th _250Hz	-14.533	-18.266	-20.133	-27.6
	7 th _350Hz	-25.733	-22.933	-21.066	-20.133
	9 th _450Hz	-55.6	-53.733	-53.733	-54.666
	11 th _550Hz	-41.6	-43.466	-42.533	-35.066
	13 th _650Hz	-38.8	-37.866	-37.866	-39.733
	15 th _750Hz	-50	-51.866	-50.933	-52.8

6.15 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบความผิดปกติเมื่อเกิดการลัดวงจรในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำ

6.15.1. กราฟความสัมพันธ์ของลำดับฮาร์โมนิกส์

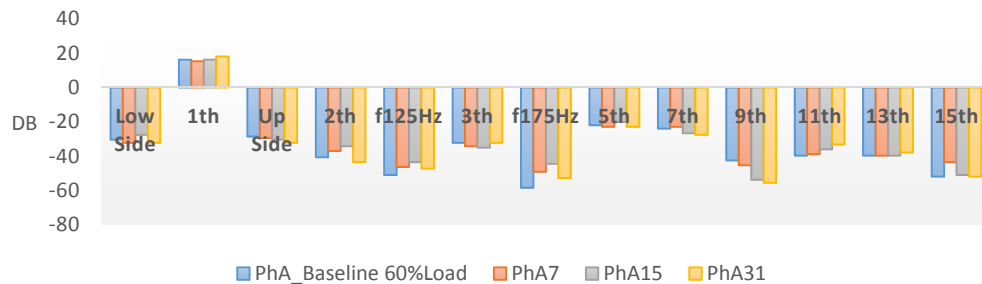


ภาพประกอบ 6-25 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดวงจรเฟส A ที่ภาวะ NoLoad



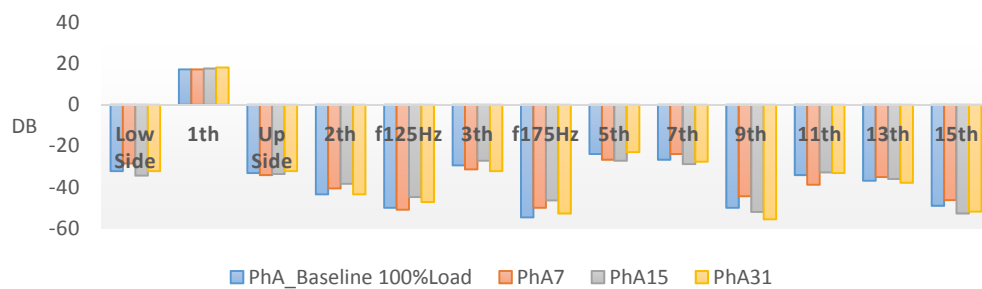
ภาพประกอบ 6-26 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดวงจรเฟส A ที่ภาวะโหลด 30%

Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhA @60%Load



ภาพประกอบ 6-27 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส A ที่ภาวะโหลด 60%

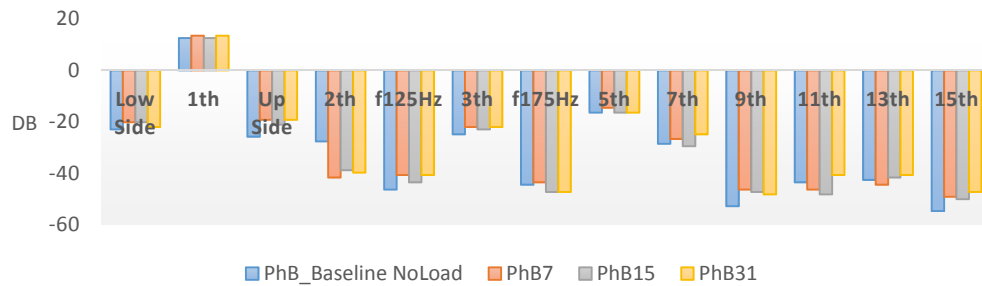
Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhA @100%Load



ภาพประกอบ 6-28 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส A ที่ภาวะโหลด 100%

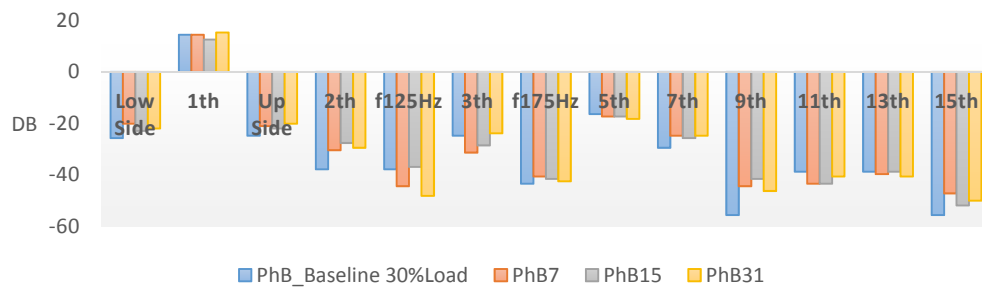
จากภาพประกอบ 6-26 ถึง ภาพประกอบ 6-28 ในกรณีเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรที่เฟสสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรที่จำนวนรอบของการลัดวงจรเพิ่มสูงขึ้นนั้น จะเห็นได้ชัดเจนดังภาพประกอบ 6-28 ที่สภาวะโหลด 100% นั้นในช่วงบริเวณขององค์ประกอบของความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ $k=3$ จะสังเกตเห็นองค์ประกอบของความถี่ด้านข้างที่ $f_{125\text{Hz}}$ และ $f_{175\text{Hz}}$ นั้นจะมีขนาดของ dB ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับค่า Baseline ทั้งในกรณีของการลัดรอบวงจรที่ 7 รอบ, 15 รอบ และ 31 รอบ

Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhB
@NoLoad



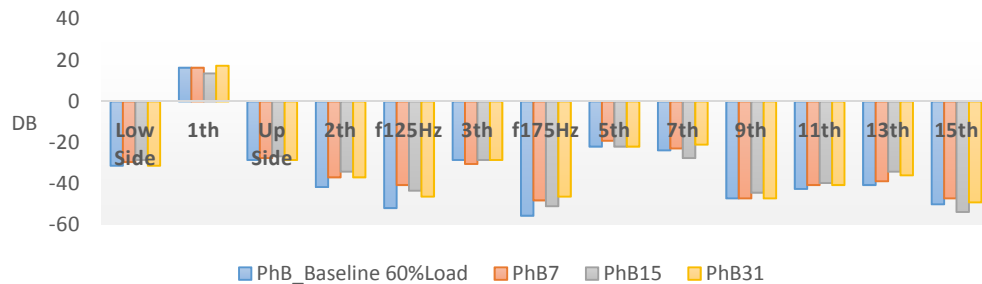
ภาพประกอบ 6-29 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส B
ที่ภาวะ NoLoad

Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhB
@30%Load



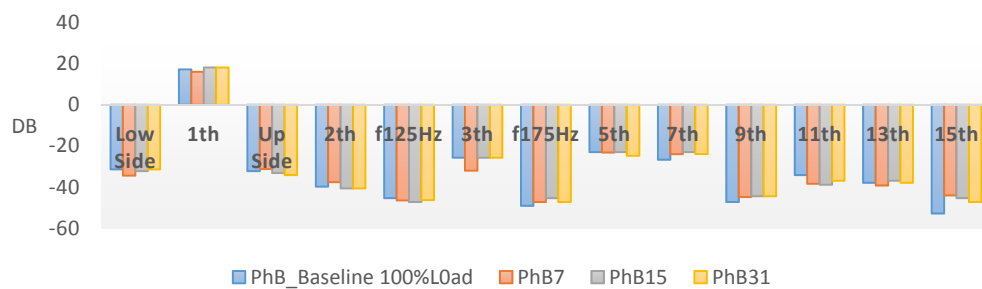
ภาพประกอบ 6-30 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส B
ที่ภาวะโหลด 30%

Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhB @60%Load



ภาพประกอบ 6-31 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส B ที่ภาวะโหลด 60%

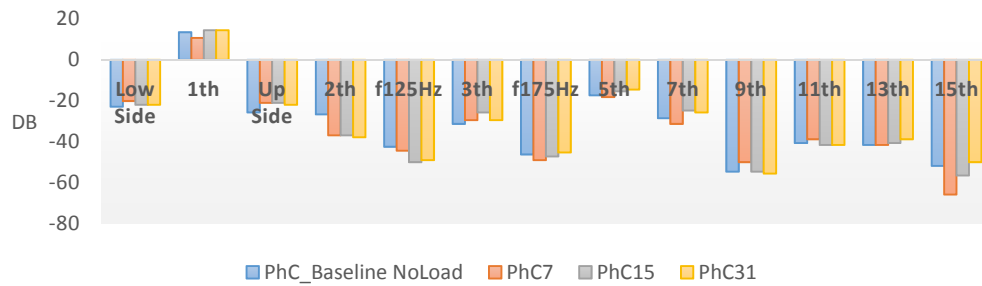
Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhB @100%Load



ภาพประกอบ 6-32 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส B ที่ภาวะโหลด 100%

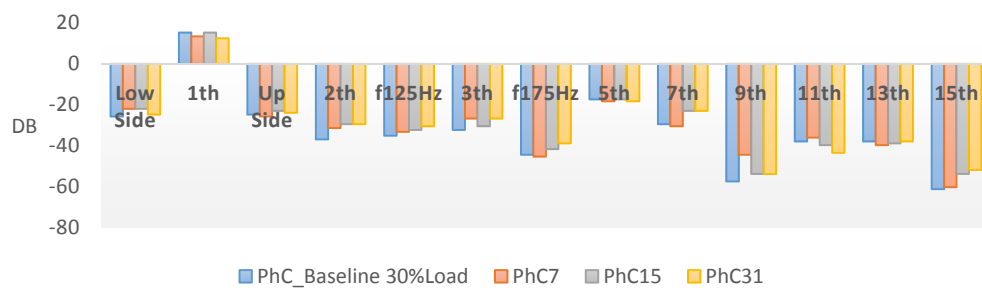
จากภาพประกอบ 6-29 ถึง ภาพประกอบ 6-32 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในทุกลำดับมีแนวโน้มของค่า dB ที่เพิ่มสูงขึ้นจากค่าฐาน แต่ในกรณีที่ภาวะโหลด 100% ค่าองค์ประกอบความถี่ที่ 175Hz จะมีค่า dB ที่เพิ่มสูงขึ้นเด่นชัดกว่าที่ความถี่ 125Hz

Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhC
@NoLoad



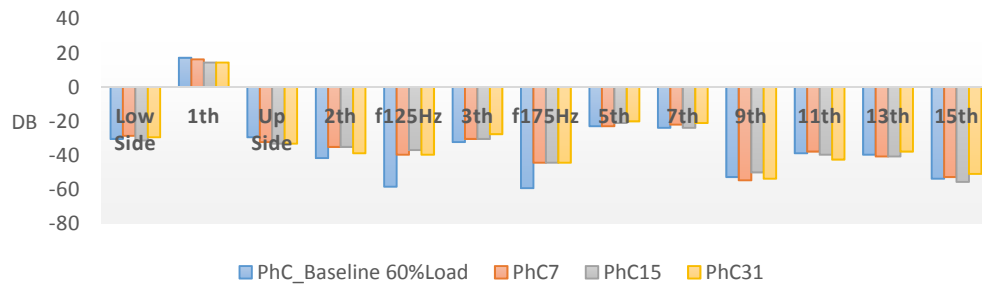
ภาพประกอบ 6-33 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส C
ที่ภาวะ NoLoad

Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhC
@30%Load



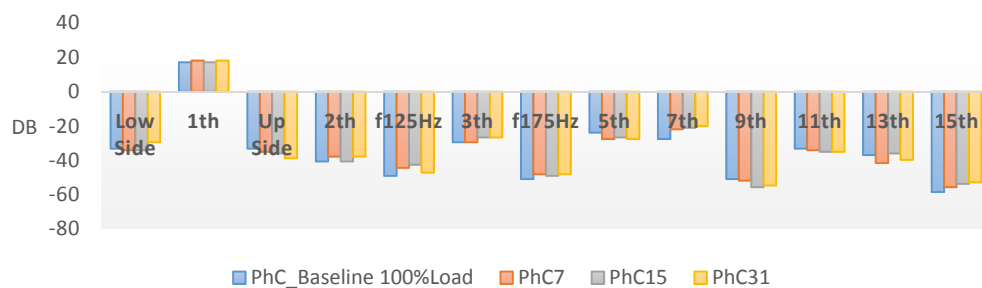
ภาพประกอบ 6-34 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส C
ที่ภาวะโหลด 30%

Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhC @60%Load



ภาพประกอบ 6-35 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส C ที่ภาวะโหลด 60%

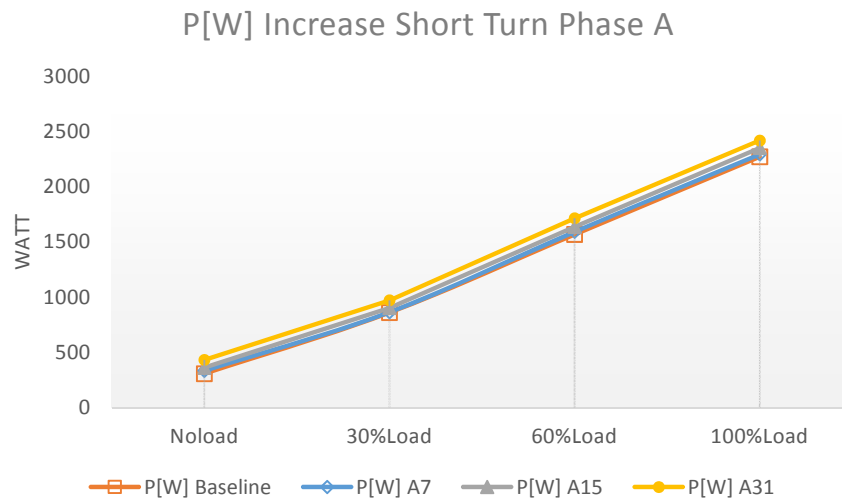
Spectrum Order Harmonics Increase Short Turn PhC @100%Load



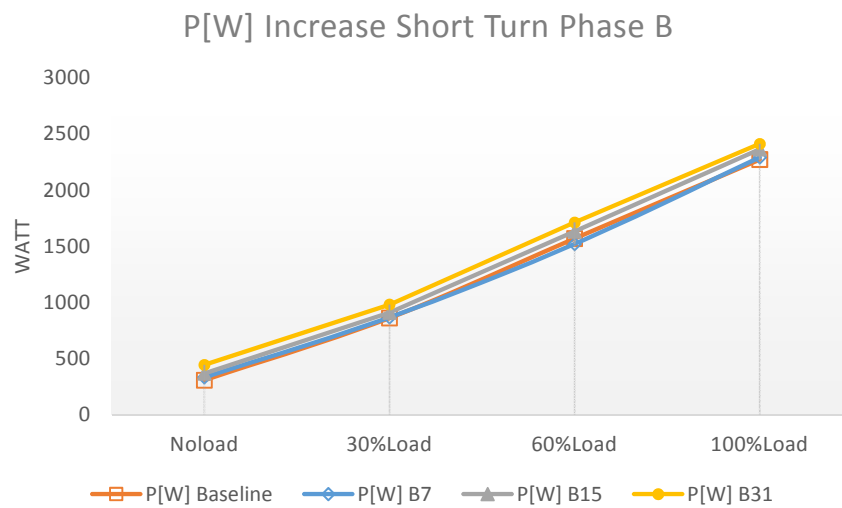
ภาพประกอบ 6-36 การเปลี่ยนแปลงลำดับฮาร์โมนิกส์เมื่อเกิดลัดรอบวงจรเฟส C ที่ภาวะโหลด 100%

จากภาพประกอบ 6-33 ถึง ภาพประกอบ 6-36 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าขนาดของ dB มีการเพิ่มขึ้นไปจากค่าฐาน อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ความถี่ 125Hz และ 175Hz ซึ่งเป็นองค์ประกอบความถี่เฉพาะเมื่อเกิดการลัดรอบวงจร ซึ่งค่าขนาด dB ที่ตำแหน่งนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมีการลัดรอบวงจรที่เพิ่มสูงขึ้น

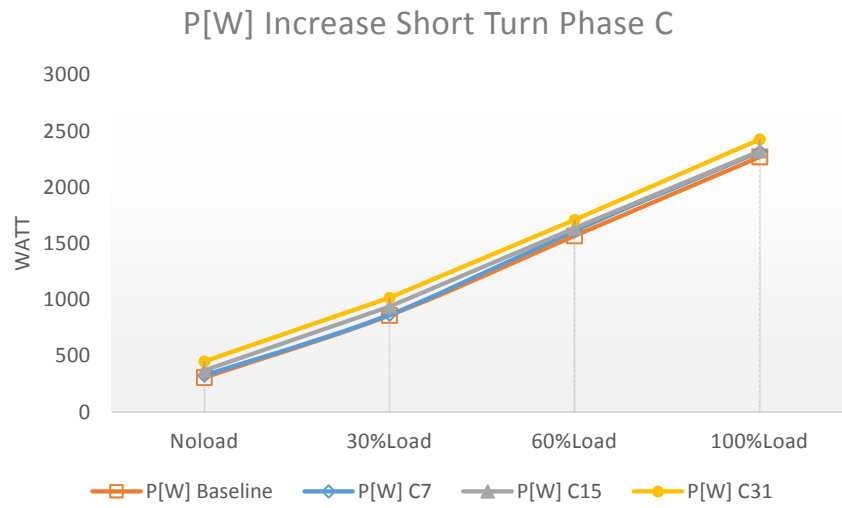
6.15.2. กราฟความสัมพันธ์ของค่าปริมาณทางไฟฟ้า



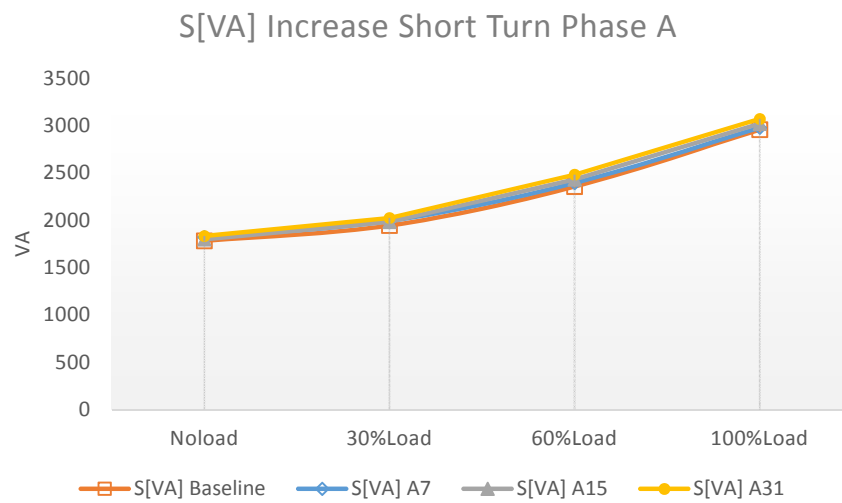
ภาพประกอบ 6-37 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A



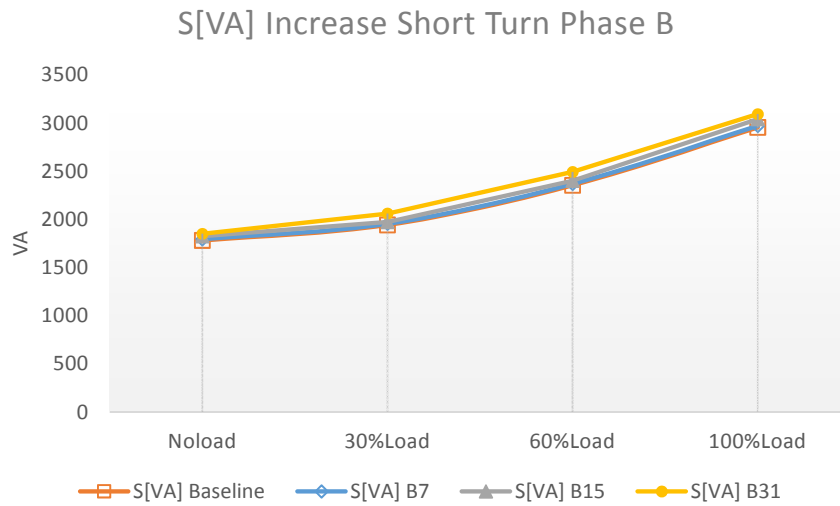
ภาพประกอบ 6-38 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B



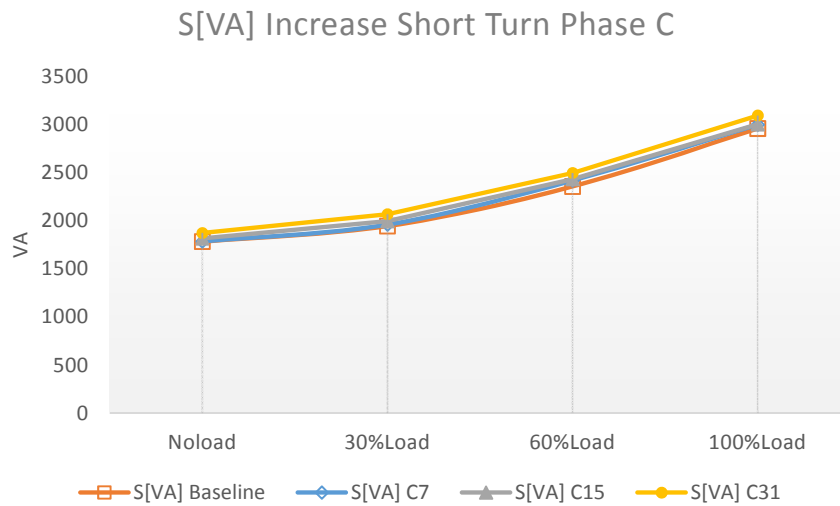
ภาพประกอบ 6-39 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C



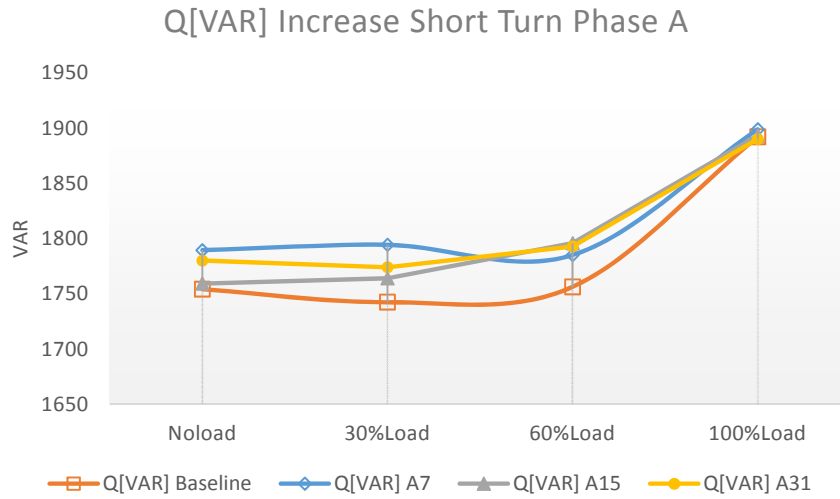
ภาพประกอบ 6-40 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A



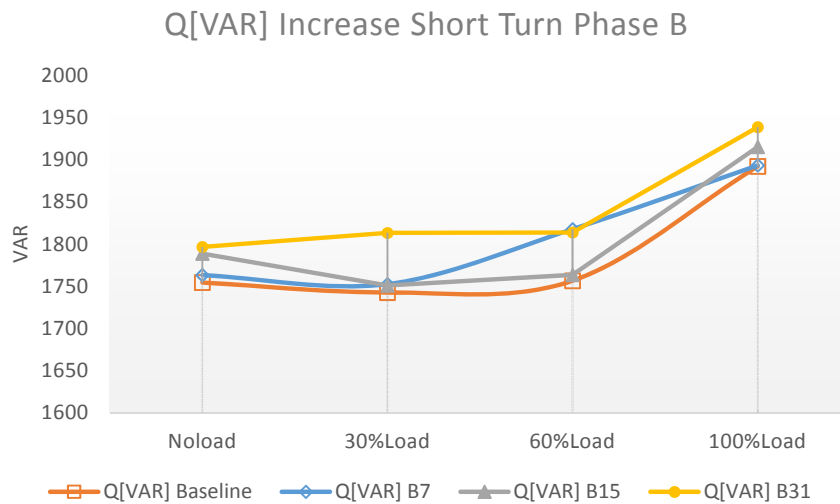
ภาพประกอบ 6-41 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B



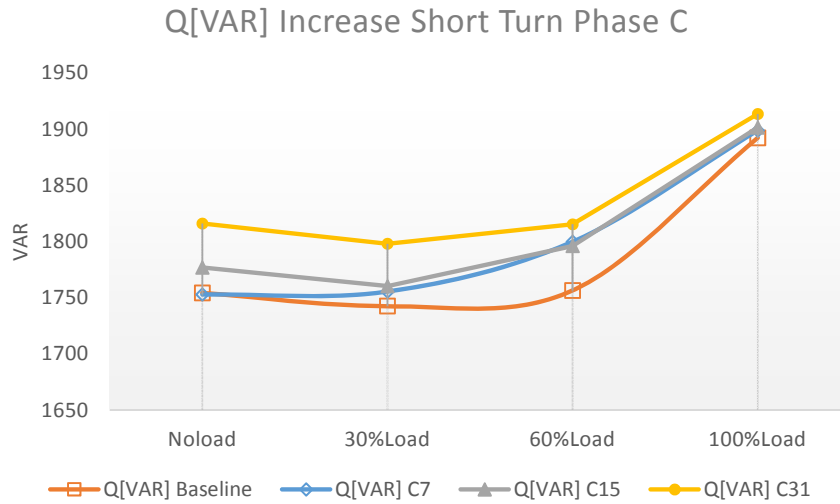
ภาพประกอบ 6-42 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C



ภาพประกอบ 6-43 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A



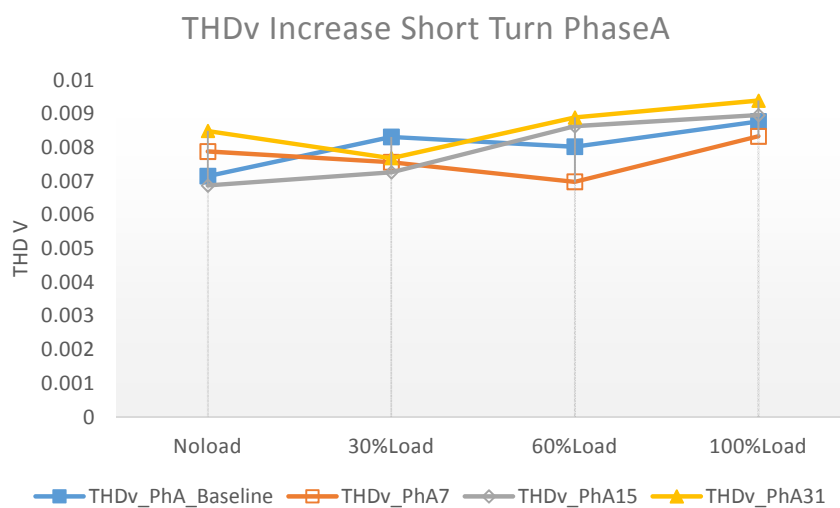
ภาพประกอบ 6-44 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B



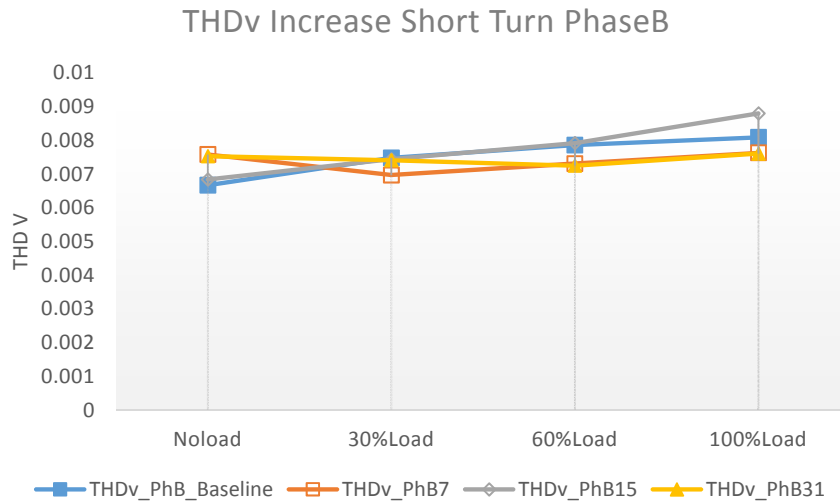
ภาพประกอบ 6-45 การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C

จากภาพประกอบ 6-37 ถึง ภาพประกอบ 6-45 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าผลของการลัดรอบวงจรที่จำนวนรอบเพิ่มสูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ส่วนมีแนวโน้มของค่าข้อมูลที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการทำงานในสภาวะมอเตอร์ปกติ

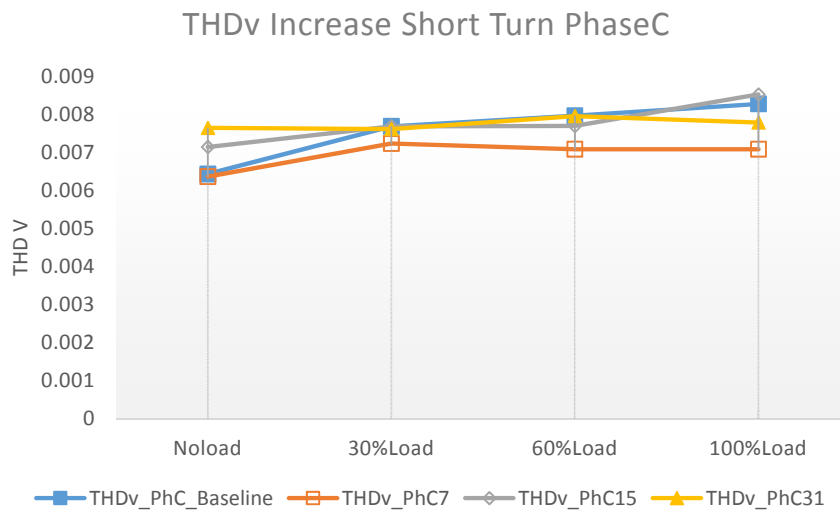
6.15.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า



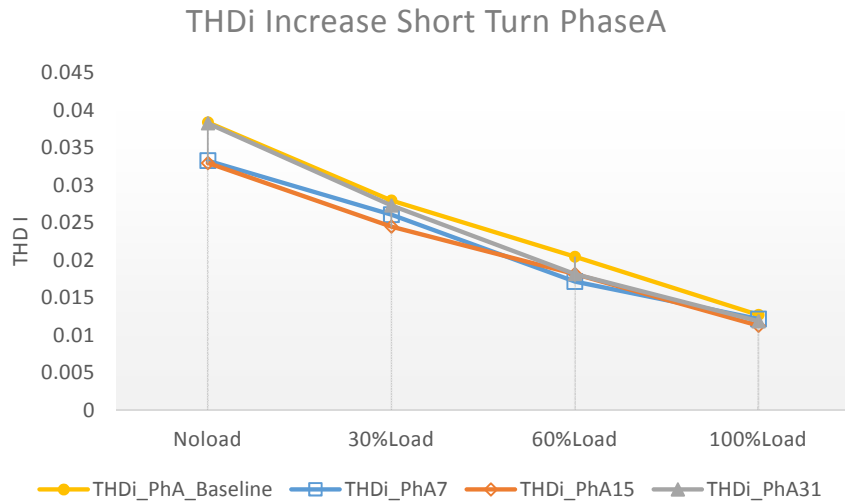
ภาพประกอบ 6-46 การเปลี่ยนแปลงค่า THDv เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A



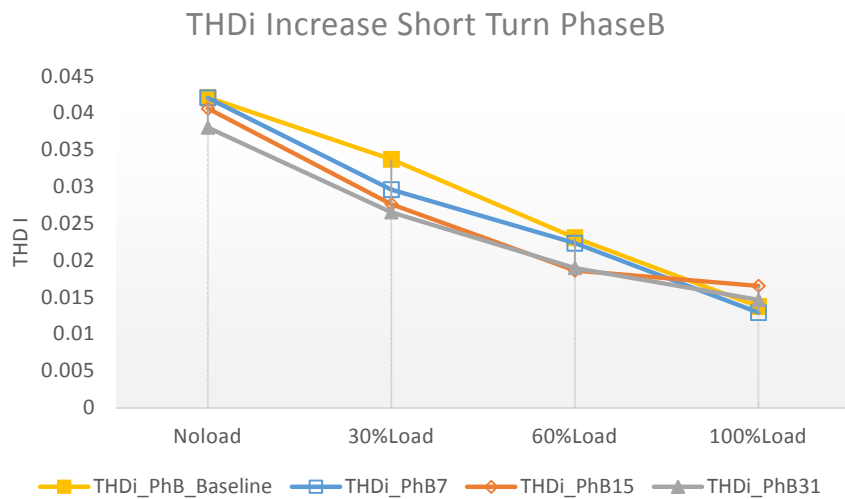
ภาพประกอบ 6-47 การเปลี่ยนแปลงค่า THDv เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B



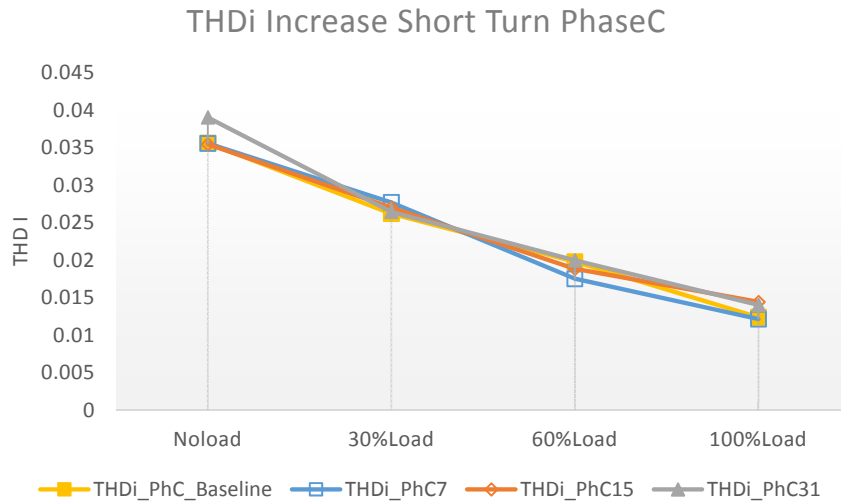
ภาพประกอบ 6-48 การเปลี่ยนแปลงค่า THDv เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C



ภาพประกอบ 6-49 การเปลี่ยนแปลงค่า THDi เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A



ภาพประกอบ 6-50 การเปลี่ยนแปลงค่า THDi เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B



ภาพประกอบ 6-51 การเปลี่ยนแปลงค่า THDi เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C

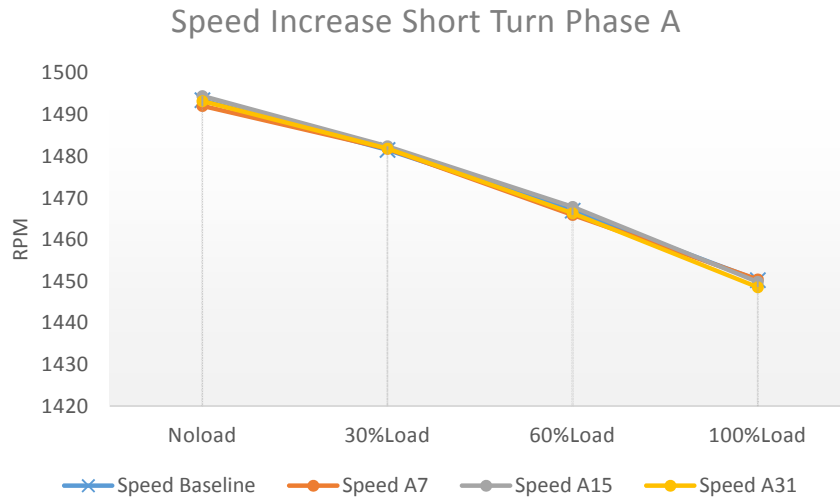
จากภาพประกอบ 6-46 ถึง ภาพประกอบ 6-51 ในส่วนการวิเคราะห์ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้านั้นผลก็คือค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้าจะมีแนวโน้มของค่าข้อมูลที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะไร้โหลดไปจนถึงโหลดเต็มพิกัดของมอเตอร์ในสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อมอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลดนั้นแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ยังคงจ่ายพลังงานตามพิกัดของมอเตอร์ปกติ แต่เมื่อมีการเพิ่มภาระโหลดสูงขึ้นผลที่ตามมาจะเป็นในเรื่องของแรงดันไฟฟ้าที่จะส่งผลในเรื่องของความไม่สมดุลโหลดอันเนื่องมาจากผลของมอเตอร์ที่มีการลัดวงจรที่จำนวนการลัดรอบที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งผลในเรื่องของการสั้นสะเทือนที่จะส่งผลให้เกิดลำดับฮาร์โมนิกส์เพิ่มขึ้นมาในแรงดันไฟฟ้าที่มูลฐาน ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่าความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มของข้อมูลที่เพิ่มขึ้นก็จะมีผลมาจากสัดส่วนของฮาร์โมนิกส์ที่รวมตัวอยู่ในแรงดันไฟฟ้ามูลฐานนั่นเอง แต่ในส่วนของค่าความผิดเพี้ยนของกระแสที่มีแนวโน้มของค่าข้อมูลที่ลดลงในสัดส่วนที่ค่อนข้างมากเมื่อมีภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น จะเป็นผลมาจากเมื่อในสภาวะที่มอเตอร์ทำงานไร้โหลดนั้นค่ากระแสไฟฟ้าที่มูลฐานจะยังมีค่าไม่ถึงพิกัดกระแสมอเตอร์ ดังนั้นเมื่อมีผลจากฮาร์โมนิกส์อันเกิดจากการลัดรอบของวงจรเข้ามารวมกับผลฮาร์โมนิกส์อันเกิดมาจากการสั้นสะเทือนเกี่ยวข้องด้วยจะส่งผลให้สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของค่าความผิดเพี้ยนในช่วงภาวะไร้โหลดจะมีค่าสูงสุด เมื่อเทียบกับค่ากระแสมอเตอร์ที่ยังไม่ถึงพิกัดทำงานเต็มที่ แต่เมื่อมอเตอร์มีการทำงานที่กระแสพิกัดแล้วนั้น ผลของการรวมกันของฮาร์โมนิกส์อันเกิดจากการลัดรอบวงจรขดลวดของมอเตอร์ก็จะมีค่าที่น้อยกว่ากระแสไฟฟ้ามูลฐาน ดังนั้นเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นค่าข้อมูลที่ได้อาจมีแนวโน้มที่ลดลง ตามภาระของโหลดที่เพิ่มมากขึ้นตามทฤษฎี

6.15.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเร็วรอบ

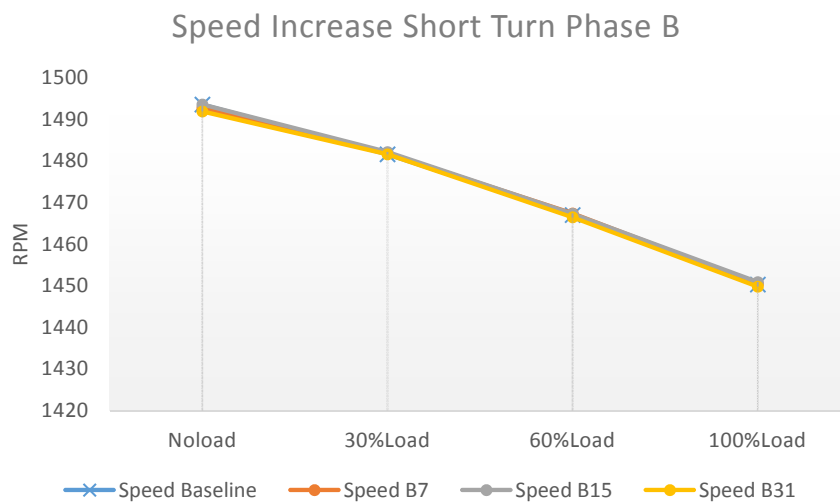
ตาราง 6-16 ผลการวิเคราะห์ความเร็วมอเตอร์เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรของขดลวด

Mechanical Part	Quantities	No-load	30%load	60%load	100%load
Test Motor	Slip	0.00436	0.01232	0.02202	0.03315
	Speed [rpm]	1493.47	1481.52	1466.97	1450.27
Short A7	Slip	0.00529	0.01213	0.02272	0.03303
	Speed [rpm]	1492.07	1481.8	1465.92	1450.46
Short A15	Slip	0.00369	0.01173	0.02142	0.03344
	Speed [rpm]	1494.46	1482.41	1467.87	1449.85
Short A31	Slip	0.00451	0.01210	0.02244	0.03428
	Speed [rpm]	1493.24	1481.85	1466.35	1448.58
Short B7	Slip	0.00489	0.01217	0.02178	0.03307
	Speed [rpm]	1492.66	1481.74	1467.33	1450.4
Short B15	Slip	0.00434	0.01195	0.02184	0.03277
	Speed [rpm]	1493.5	1482.07	1467.24	1450.85
Short B31	Slip	0.00545	0.01232	0.02239	0.03349
	Speed [rpm]	1491.82	1481.53	1466.41	1449.76
Short C7	Slip	0.00400	0.01186	0.02109	0.03306
	Speed [rpm]	1494	1482.22	1468.36	1450.42
Short C15	Slip	0.00498	0.01242	0.02286	0.03211
	Speed [rpm]	1492.53	1481.37	1465.71	1451.84
Short C31	Slip	0.00534	0.01355	0.02306	0.03474
	Speed [rpm]	1491.99	1479.67	1465.41	1447.89

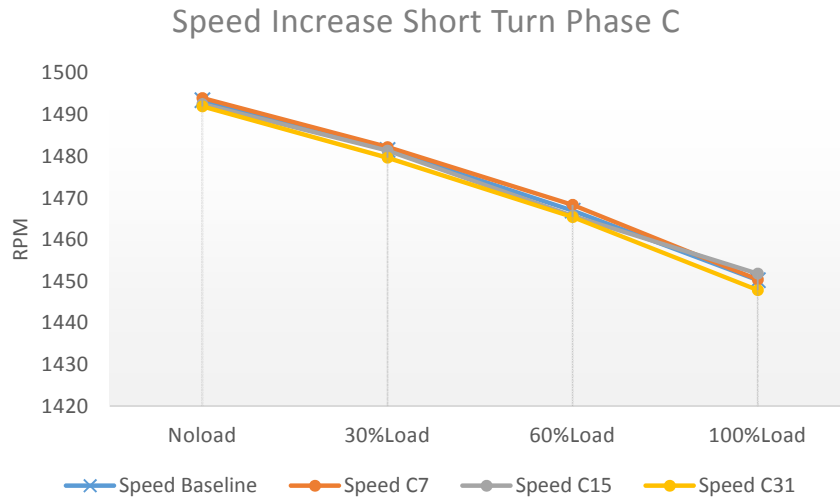
จากตาราง 6-16 เมื่อนำค่ามาวิเคราะห์ในเรื่องของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมอเตอร์มีการลัดรอบวงจรขดลวดที่จำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วได้ดังภาพประกอบ 6-52 ถึง ภาพประกอบ 6-54



ภาพประกอบ 6-52 การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส A



ภาพประกอบ 6-53 การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส B



ภาพประกอบ 6-54 การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรเพิ่มขึ้นที่เฟส C

จากตาราง 6-16 และภาพประกอบ 6-52 ถึง ภาพประกอบ 6-54 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมอเตอร์เกิดการลัดรอบวงจรของขดลวดที่เฟสที่จำนวนการลัดรอบวงจรที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น ในส่วนการวิเคราะห์ในเรื่องของความเร็รรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากตารางจะสังเกตเห็นได้ว่าจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบมอเตอร์ซึ่งมาจากผลของค่าสลิปในสภาวะการลัดรอบวงจรที่จำนวนรอบขดลวดเพิ่มขึ้นซึ่งยังคงค่าเดิมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มากนัก ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องจากการลัดรอบวงจรของขดลวดจะไม่เกี่ยวข้องกับค่าสลิปของมอเตอร์เหมือนเช่นการทดสอบที่พิกัดโหลดต่าง ๆ ที่มีผลให้ค่าสลิปเปลี่ยนแปลงไปซึ่งก็จะส่งผลให้ความเร็รรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน

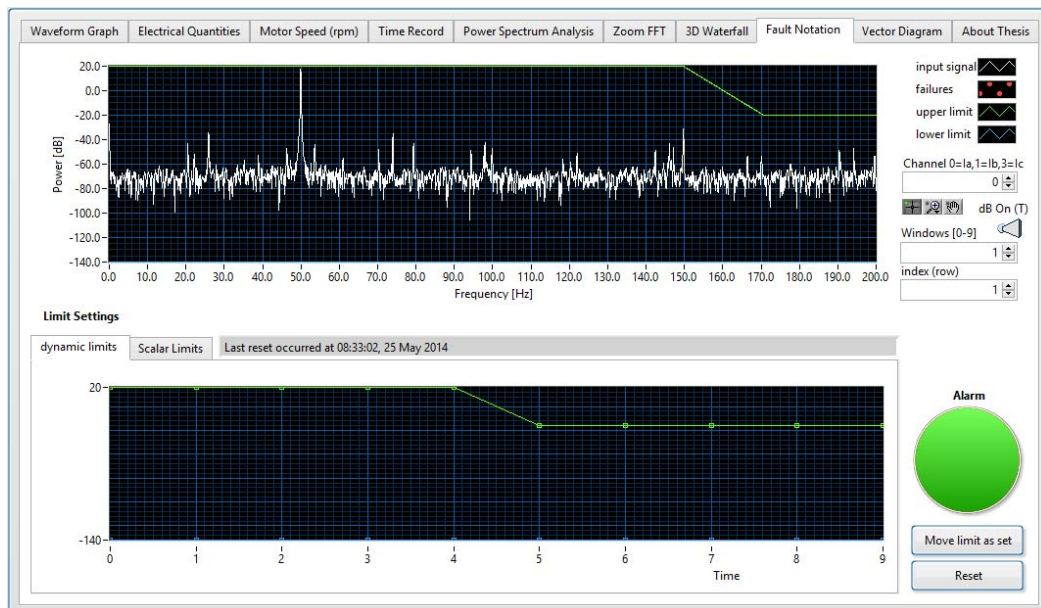
6.16 ผลการตั้งค่าจุดตรวจจับช่วงความถี่ที่ต้องสงสัยที่เฟส A,B,C เมื่อเกิดความผิดปกติในกรณีทดสอบการลัดรอบวงจรของขดลวดที่เฟส A 31 รอบที่ภาวะโหลด 100%

ตาราง 6-17 ฮาร์มอนิกส์เมื่อเกิดการลัดรอบวงจรที่เฟส A 31 รอบที่ภาวะโหลด 100%

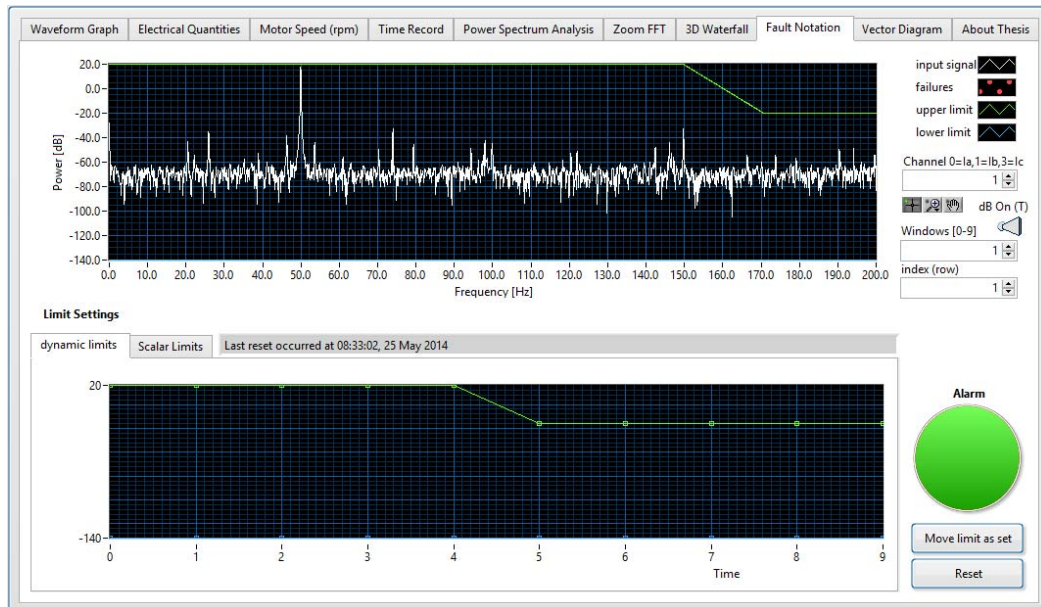
Spectrum [dB]	Order Harmonic	Phase A	Phase B	Phase C
Short A31 100%Load	Low side	-32.266	-34.133	-32.8
	1 th _{50Hz}	18.1333	19.0667	19.2
	Up side	-32.266	-30.4	-31.2
	2 th _{100Hz}	-43.466	-42.533	-43.2
	f125Hz	-47.2	-47.2	-47.2

3 th _150Hz	-32.266	-34.133	-30.4
f175Hz	-52.8	-53.733	-48.8
5 th _250Hz	-22.933	-21.066	-24
7 th _350Hz	-27.6	-27.6	-27.2
9 th _450Hz	-55.6	-47.2	-47.2
11 th _550Hz	-33.2	-32.266	-32
13 th _650Hz	-37.866	-36	-36.8
15 th _750Hz	-51.866	-50	-60

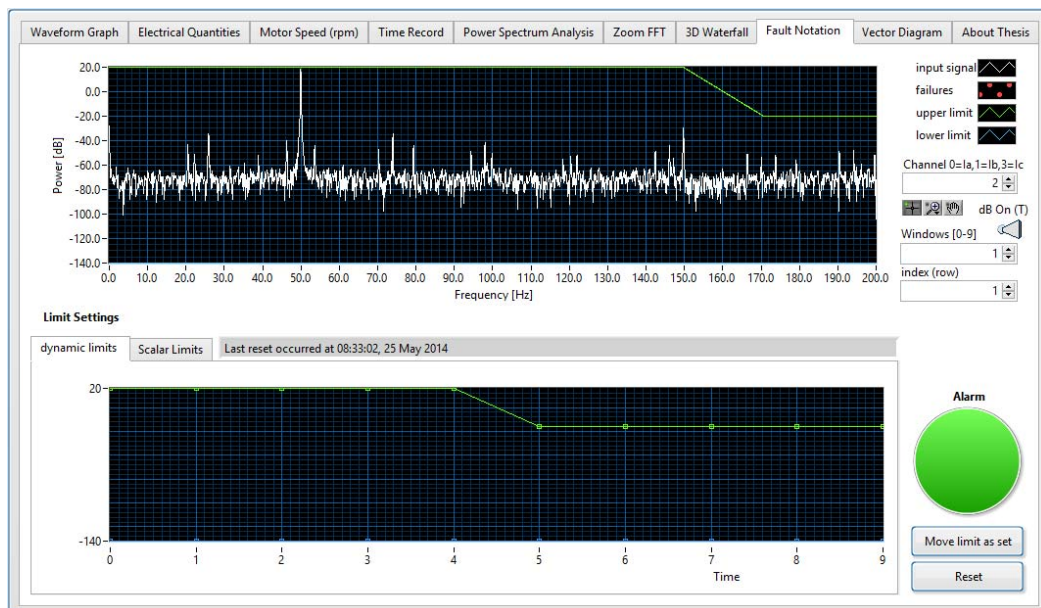
จากค่าข้อมูลที่ผ่านมาในเรื่องของการวิเคราะห์ขนาดของสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการลัดรอบวงจรขดลวดที่จำนวนรอบที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น สิ่งที่สามารถสังเกตได้คือการเปลี่ยนแปลงของช่วงบริเวณด้านข้างความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ $k=3$ จะเป็นตำแหน่งของความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงได้เด่นชัดสุดในกรณีของการเกิดการลัดวงจรในขดลวด ซึ่งในตัวอย่างการตั้งค่าจุดตรวจจับความถี่ที่ต้องสงสัยในกรณีเมื่อเกิดค่าความผิดปกติขึ้นจะใช้ค่าที่ความถี่บริเวณ 125Hz และ 175Hz นี้มาเลือกตั้งค่าจุดตรวจจับความถี่ที่ผิดปกติ ในการเฝ้าตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดจากการลัดรอบวงจรของขดลวด



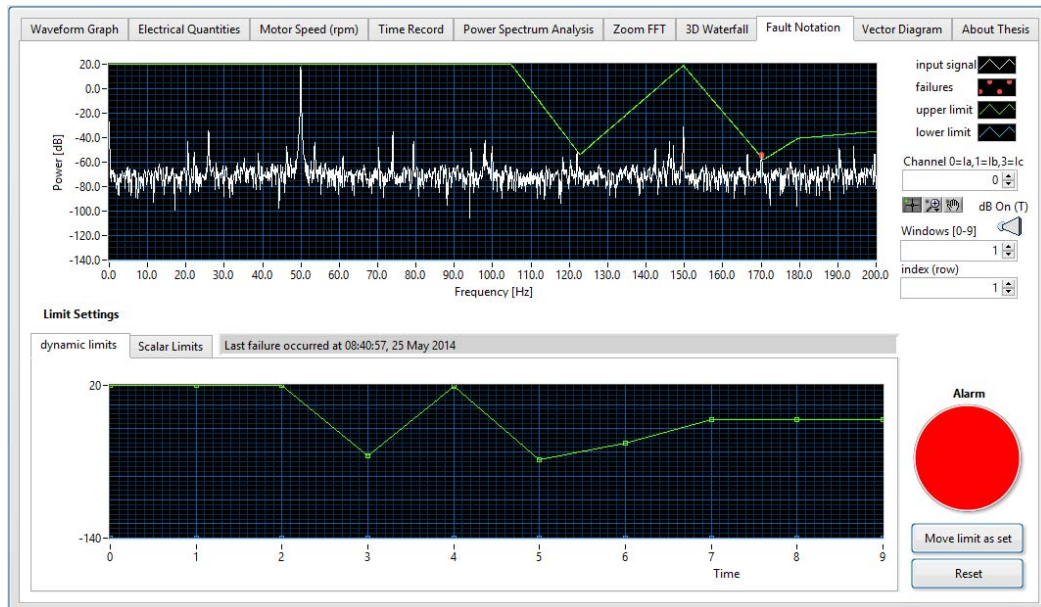
ภาพประกอบ 6-55 สเปกตรัมกระแสที่เฟส A ก่อนการตั้งค่าจุดตรวจจับ Fault



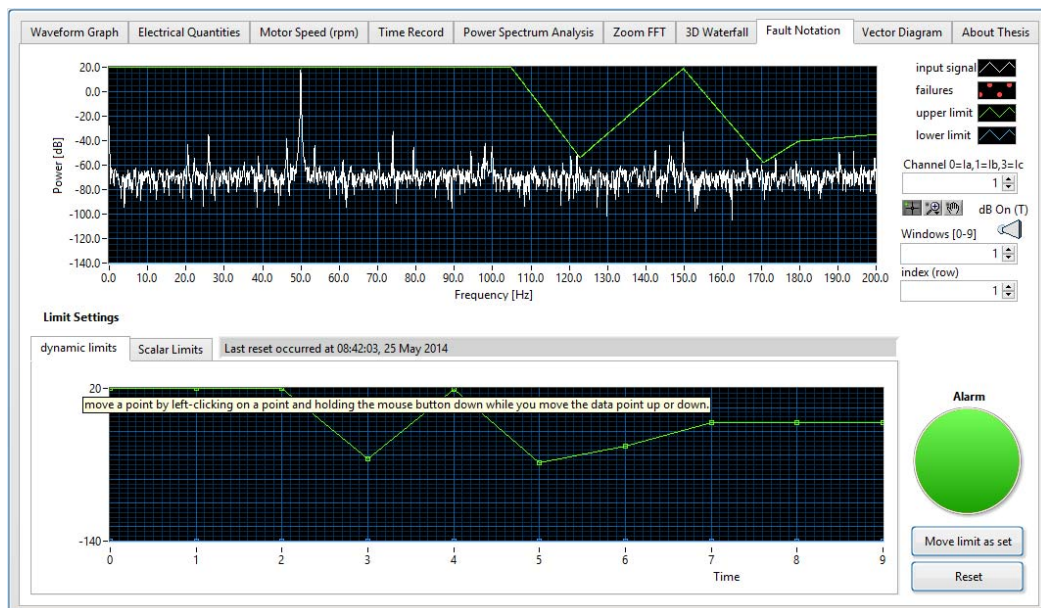
ภาพประกอบ 6-56 สเปกตรัมกระแสที่เฟส B ก่อนการตั้งค่าจุดตรวจจับ Fault



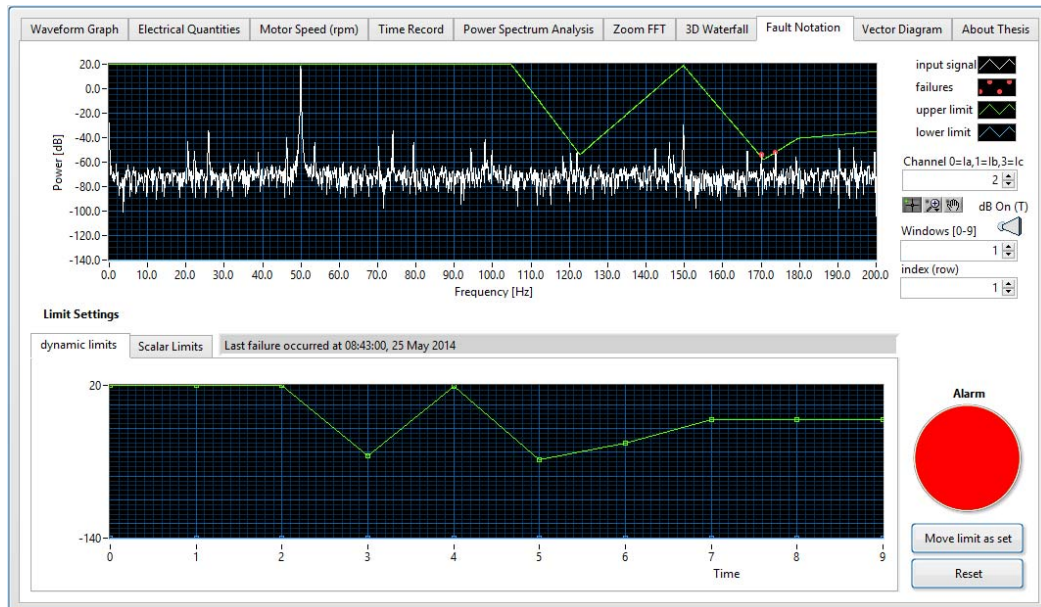
ภาพประกอบ 6-57 สเปกตรัมกระแสที่เฟส C ก่อนการตั้งค่าจุดตรวจจับ Fault



ภาพประกอบ 6-58 Alarm เตือน Fault หลังการตั้งค่าจุดตรวจจับที่เฟส A



ภาพประกอบ 6-59 Alarm เตือน Fault หลังการตั้งค่าจุดตรวจจับที่เฟส B



ภาพประกอบ 6-60 Alarm เตือน Fault หลังการตั้งค่าจุดตรวจจับที่เฟส C

จากภาพประกอบ 6-55 ถึง ภาพประกอบ 6-60 เป็นผลการประเมินสถานะการทำงานเพื่อให้ผู้ใช้งานทราบถึงสถานะการทำงานของมอเตอร์ในขณะนั้น ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกการตั้งค่าจุดตรวจจับเองได้ จากข้อมูลในตาราง 6-17 ในการทดสอบเมื่อเกิดความผิดปกติจากกรณีขดลวดลัดวงจรได้เลือกช่วงความถี่ที่ต้องสงสัยที่บริเวณช่วงความถี่ 125Hz กำหนดขนาด dB ตรวจจับที่ประมาณ -50dB และที่ความถี่ 175Hz กำหนดขนาด dB ตรวจจับที่ประมาณ -55dB ซึ่งเป็นตำแหน่งของความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่มีผลต่อขนาดของแอมพลิจูดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่ตำแหน่งความถี่ฮาร์โมนิกส์ในลำดับอื่น ๆ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ความผิดปกติที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะแสดงสถานะสัญญาณเตือนในกรณีเมื่อมอเตอร์มีสถานะการทำงานที่ผิดปกติได้ ซึ่งจากผลของสัญญาณไฟเตือนจะเตือนสีแดงที่เฟส A และเฟส C นั้นหมายถึงว่าในกรณีการลัดรอบวงจรของขดลวดนั้นเมื่อเกิดการลัดรอบวงจรที่เฟสใดเฟสหนึ่งจะส่งผลให้ลำดับเฟสถัดไปมีขนาดของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นมีค่า dB เพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นจะเห็นได้ว่าเครื่องมือมีความสามารถที่จะวิเคราะห์ประเมินความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานในการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์เบื้องต้นได้

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอ การพัฒนาโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้ในงานด้านการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งรองรับการนำไปใช้งานทั้งแบบออนไลน์หรือออฟไลน์ ซึ่งเครื่องมือตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ในปัจจุบันมีความสำคัญมากในงานด้านการตรวจสอบบำรุง แต่ยังมีข้อด้อยในเรื่องความไม่คุ้มค่ากับราคาที่สูง ตัวอย่างเช่นในเรื่องประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดที่แสดงค่าการประเมินตรวจสอบสถานะได้ไม่ครอบคลุม หรือมีฟังก์ชันของการทำงานที่น้อยเมื่อเทียบกับความต้องการด้านการตรวจสอบซึ่งไม่คุ้มค่าเงินลงทุนที่เสียไป

การพัฒนาโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนเพื่อใช้ในการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์จึงเกิดขึ้น เพื่อตอบสนองต่อข้อด้อยของเครื่องมือตรวจสอบสถานะที่มีใช้ในปัจจุบัน ซึ่งโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนจะมีคุณลักษณะสำคัญอยู่ดังนี้

1. ในส่วนของวงจรตรวจวัดสัญญาณจากมอเตอร์ จะใช้เพียงแค่ข้อมูลสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเท่านั้น แต่สามารถจะวิเคราะห์ประมาณค่าสลิปและค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ ซึ่งในกรณีที่ผู้ใช้ไม่ทราบถึงข้อมูลพารามิเตอร์ภายในของมอเตอร์เลย โปรแกรมเครื่องมือวัดเสมือนที่พัฒนาก็สามารถที่จะประมาณสลิป และค่าความเร็วรอบออกมาได้ ซึ่งจะลดต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดลงไป

2. โปรแกรมที่พัฒนามีความยืดหยุ่นสามารถแก้ไขอัลกอริทึมภายในเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการตรวจสอบสถานะได้อีกมากมาย ตัวอย่างเช่นในการตั้งค่าจุดตรวจจับความถี่ที่ต้องสงสัยในกรณีเกิดความผิดปกติขึ้นในมอเตอร์

3. โปรแกรมมีความสามารถในการประเมินค่าปริมาณทางไฟฟ้าได้มากกว่าการประเมินค่าเพียงแต่พิจารณาเฉพาะค่าที่เกิดจากการรวมกันที่ความถี่มูลฐานและที่ฮาร์โมนิกส์เข้าด้วยกันเท่านั้น แต่โปรแกรมสามารถที่จะแยกรายละเอียดการประเมินค่าปริมาณทางไฟฟ้าออกเป็นในส่วน of ค่าที่ความถี่มูลฐาน และส่วน of ค่าที่ไม่ใช่ความถี่มูลฐาน ต่าง ๆ ออกมาได้ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพของการวิเคราะห์เพิ่มขึ้น

จากบทสรุปทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นข้อพิสูจน์ถึงความสำคัญในการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดเสมือน เพื่อรองรับการนำเครื่องมือที่พัฒนาไปใช้ในการประเมินสถานะการทำงานของมอเตอร์ได้

7.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

7.2.1 การประมวลผลของโปรแกรมเพื่อให้เกิดความต่อเนื่อง คอมพิวเตอร์ที่ใช้ควรมีความสามารถที่สูงด้วย เพื่อให้การติดตามผลแบบเรียลไทม์ในขณะมอเตอร์ทำงานไม่เกิดการหน่วงของการประมวลผล ทั้งนี้อาจแก้ไขด้วยการลดอัตราแซมปลิ่งให้น้อยลง แต่ผลที่ได้ อาจจะมีความแม่นยำของการตรวจสอบประเมินสถานะที่ลดลง

7.2.2 ข้อจำกัดทางลิขสิทธิ์ของโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการพัฒนายังเป็นเวอร์ชันทดลอง ไม่สามารถที่จะใช้ฟังก์ชันบางอย่างได้สมบูรณ์ ซึ่งอาจจะต้องมีการจัดซื้อซอฟต์แวร์ในเวอร์ชันที่สมบูรณ์

7.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

7.3.1 พัฒนาเพิ่มเติมในส่วนการใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญอัจฉริยะร่วมด้วย

7.3.2 การเชื่อมต่อข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ตรวจสอบหากลดต้นทุนในส่วนของ DAQ ลงได้จะทำให้ได้ชุดเครื่องมือตรวจวัดเสมือนที่มีราคาต้นทุนต่ำลงได้มาก

7.3.3 ในอนาคตอาจจะพัฒนาจัดสร้างให้เป็นเครื่องมือวัดต้นแบบที่สามารถละทิ้งในส่วนการแสดงผลแบบเดิมซึ่งยังมีการเชื่อมต่อผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ให้เหลือเพียงแต่จอแสดงผลบนหน้าจอ LCD เสมือนเป็นเครื่องมือวัดจริง ซึ่งจะทำให้มีความสะดวกมาก ๆ หากนำไปใช้จริง

บรรณานุกรม

- [1] William T.Thomson and Ronald J. Gilmore “Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives–fundamental, data interpretation, and industrial case histories” Proceeding of the thirty–second tubbomachinery symposium 2003.
- [2] Debasmita Basak.; Arvind Tiwari.; S.P. Das.; “Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines–A Review”, Industrial Technology, IEEE International Conference on, pp. 3061–3066, 2006.
- [3] M.Eftekhari; M. Moallem; S. Sadri; A. Shojaei. “Review of Induction Motor Testing and Monitoring Methods for Inter–turn Stator Winding Faults”, Electrical Engineering (ICEE); 21st Iranian Conference on, pp.1–6, 2013.
- [4] Antonio Cataliotti.; Valentina Cosentino.; “An enhanced approach based on IEEE 1459 for the detection of disturbing loads in distorted and unbalanced three–phase power systems” Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC’09, IEEE, pp.426–431, 2009.
- [5] Zhi Gao.; Larry Turner.; Roy S. Colby.; Benoit Leprettre.; “A Frequency Demodulation Approach to Induction Motor Speed Detection” Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, pp.1–9, 2010.
- [6] A.Mansour.; Zhang Chengning.; Hany Nasry.; “Measurement of Power Components in Balanced and Unbalanced Three–Phase Systems Under Nonsinusoidal Operating Condition by Using IEEE Standard 1459–2010 and Fourier Analysis”, Technological Advanced in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE), International Conference on, pp.166–171, 2013.
- [7] Arfat Sidque; G.S.Yadava, and Bhim Singh. “A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motor”, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Vol.20, pp.106–114, 2005.
- [8] Pinjia Zhang.; Yi Du.; Thomas G. Habetler.; and Bin Lu.; “A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium–Voltage Induction Motors”, Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, IEEE, pp. 3165–3174, 2009.
- [9] M.Cisneros–Gonzalez.; and M.A. Arjona.; “An Education Tool for Monitoring Electrical Power Components in Induction Machines”, Electrical Machines (ICEM), Internation Confrence on, IEEE. pp.3038–3043, 2012.

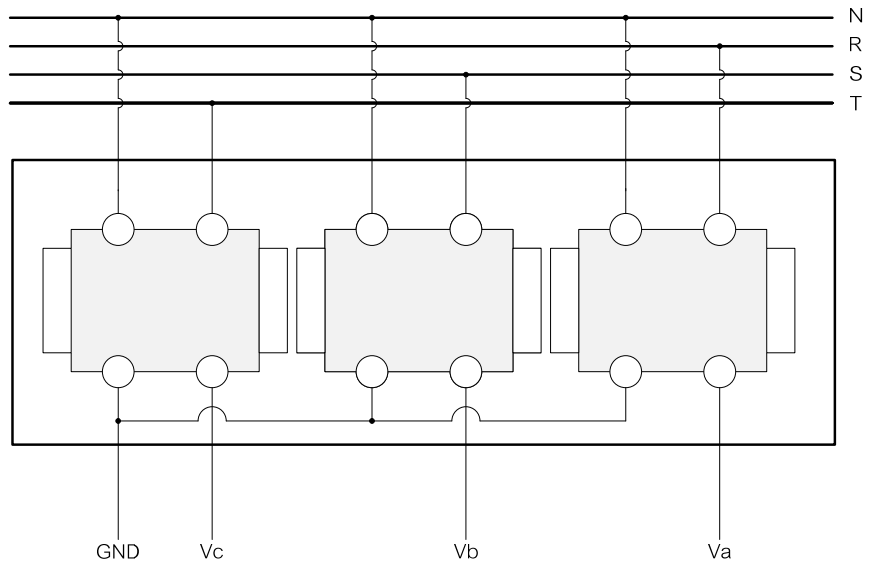
- [10] ChiaChou Yeh.; Richard J. Povinelli.; Behrooz Mirafzal.; and Nabeel A.; “Diagnosis of Stator Winding Inter-Turn Short in Induction Motor Fed by PWM-Inverter Drive Systems Using a Time-Series Data Mining Technique”, Power System Technology, International Conference on, IEEE. Vol.1, pp.891-896, 2004.
- [11] Petr Kadanik.; Ondrej Cervinka.; Jiri Ryba.; “Causal Model of Induction Motor for Stator Diagnostics” Research Report, Rockwell Automation AT Prague Labs Americka22 120 00 Prague Czech Republic 2000.
- [12] Pinjia Zhang.; Yi Du.; Thomas G. Habetler.; and Bin Lu.; “A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors”, Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol.47, pp.34-46, 2011.
- [13] Ye Zhongming; Wu Bin.“A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis”,Power Electronics and Motion Control Conference, Proceedings. IPEMC 2000.The Third International.vol. 3, pp. 1353-1358, Aug 2000.
- [14] William T.Thom.; “On-line MCSA to Diagnose Shorted Turns in Low Voltage Stator Windings of 3-Phase Induction Motors Prior to Failure” Electric Machines and Drives Conference, IEEE International, pp.891-898, IEMDC 2001.
- [15] Singh, G.K.; Al Kazzaz, S.A.S. “Development of an Intelligent Diagnostic System for Induction Machine Health Monitoring ”, Systems Journal, IEEE.Vol.2, pp. 273-288, 2008.
- [16] Siddique, A.; Yadava, G.S.; Singh, B.; “A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors ”,Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol.20, pp.106-114 ,2005.
- [17] Marcel Janda, Ondrej Vitek and Vitezslav Hajek, “Noise of Induction Machines” Induction Motor-Modelling and Control, INTECH2012.
- [18] Kevin D. Hurst.; and Thomas G. Habetler.; “Sensorless Speed Measurement Using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives”, Power Electronic, IEEE Transaction on, Vol.11, pp.66-73, 1996.
- [19] IEEE std 1459-2010,“IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal,Nonsinusoidal,Balanced, or Unbalanced conditions”, 2010.
- [20] User Guide And Specifications NI USB-6008/6009 Bus-Power Multifunction DAQ USB Device.

- [21] Poul Due Jensens Vej7, DK-8850 Bjerringbro, Grundfos Motor Book, www.grundfos.com
- [22] General Purpose 3-phase Induction Motor, www.cantonimotor.com
- [23] Aderiano M. da Silva, B.S.; “Induction Motor Fault Diagnostic and Monitoring Methods”; 2006.
- [24] Vijayraghavan.P.; Krishnan.R.; “Noise in electric machines : a review”; Industry Application, IEEE Transaction on, Vol.35, pp.1007-1013, 1999.
- [25] กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศรี.; “การออกแบบแอฟพลีเคชันในระบบกราฟิกด้วย LabVIEW”, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2550.
- [26] ปรีพนธ์ พัฒนสัตยวงศ์.; “เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2544.

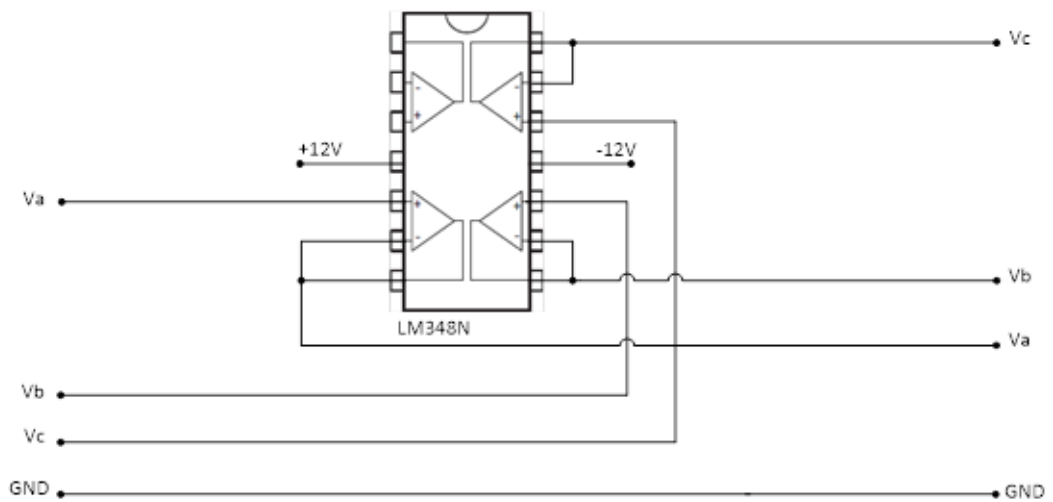
ภาคผนวก ก
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. Multimeter True RMS FLUKE 111
2. Fluke 39 Power meter
3. Clamp Meter FLUKE 322
4. Stroboscope Digicon SB-16
5. 3Phase KW Meter LOES
6. 3Phase Variac ZENITH
7. 3Phase Load Resistor 4.5/2 kW
8. D.C. Machine ASEA 1.5kW 1100 r/min.
9. 3Phase Induction Motor 2.2 kW (Normal)
10. 3Phase Induction Motor 2.2 kW (Winding Fault)
11. 3Phase Voltage Sensor 220/6V and Current Sensor ACS71230A
12. NI USB-6009 14-Bit, 48 kS/s Low-Cost Multifunction DAQ
13. Computer Notebook HP Pavilion dv3
14. สายต่อวงจร

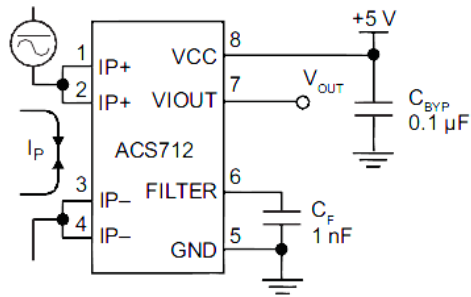
ภาคผนวก ข
วงจรถวายจับสัญญาณ



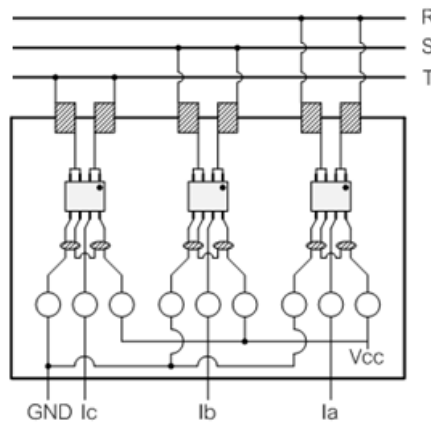
วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส



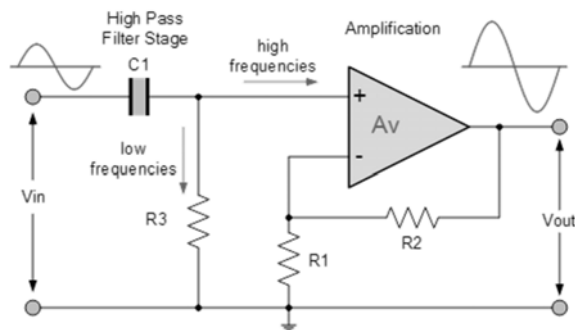
วงจร Op amp Voltage follower



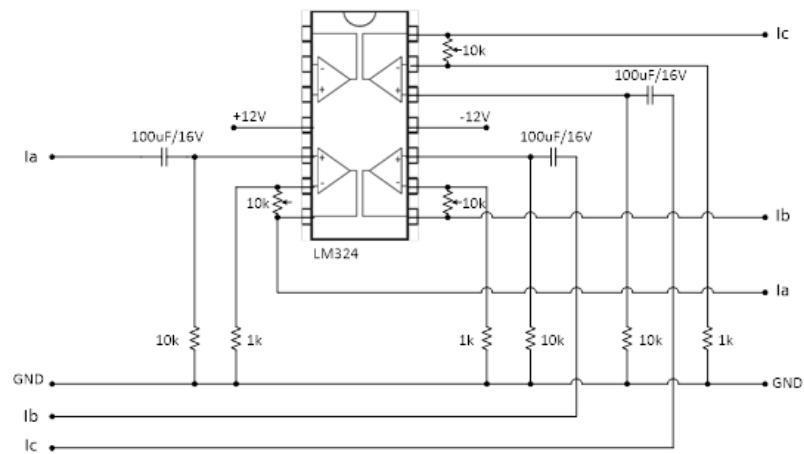
วงจรการต่อ ACS712 [ที่มา: Allegro MicroSystems, Inc.]



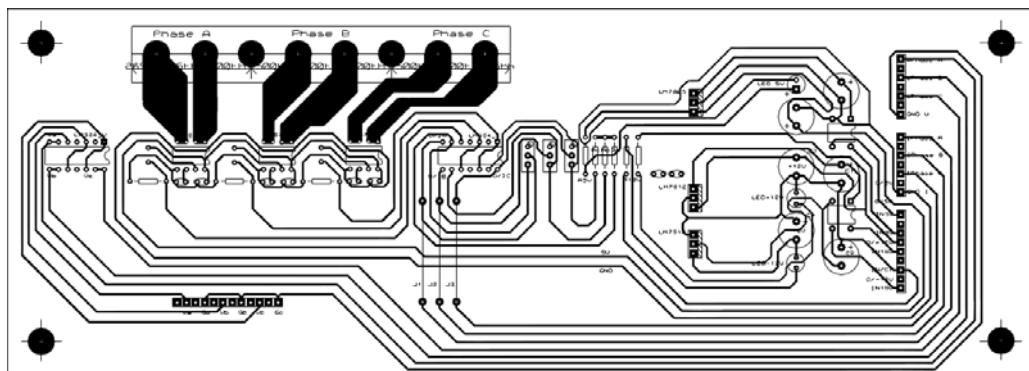
วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้า 3 เฟส



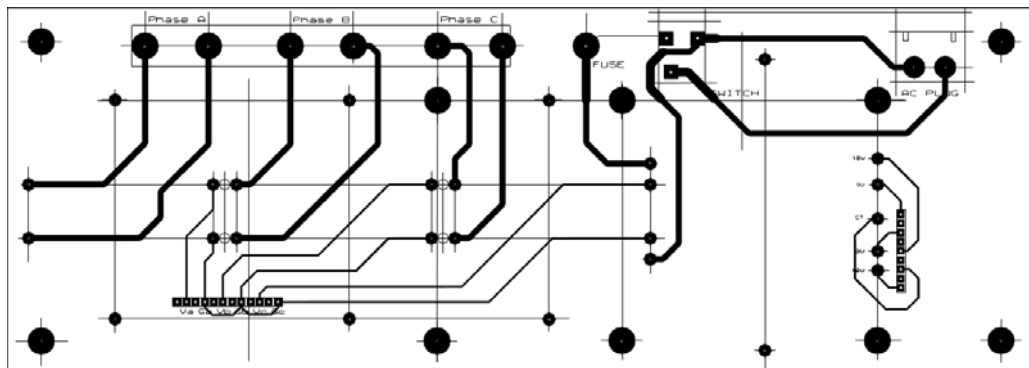
วงจร Non-Inverting amplifier type coupling RC-high pass filter
[ที่มา : http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_6.html]



วงจรการนำสัญญาณแรงดันเอาท์พุทจาก ACS712 เข้าสู่วงจร Non-Inverting amplifier type coupling RC-high pass filter ก่อนเข้า DAQ USB 6009



PCB ของวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า 3 เฟส



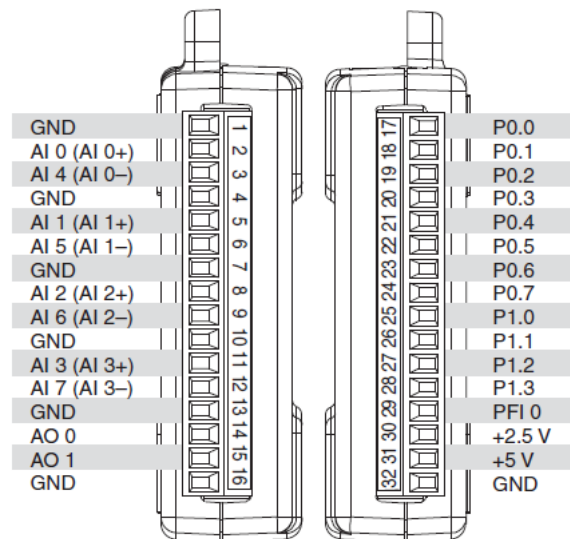
PCB ของวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส

ภาคผนวก ค
DAQ USB Device

Feature	NI USB-6008	NI USB-6009
AI resolution	12 bits differential, 11 bits single-ended	14 bits differential, 13 bits single-ended
Maximum AI sample rate, single channel*	10 kS/s	48 kS/s
Maximum AI sample rate, multiple channels (aggregate)*	10 kS/s	48 kS/s
DIO configuration	Open collector†	Each channel individually programmable as open collector or active drive†

* System-dependent.
† This document uses NI-DAQmx naming conventions. Open-drain is called open collector and push-pull is called active drive.

คุณสมบัติของ Low-Cost USB 6009 [20]



แสดงตำแหน่งของช่องสัญญาณ DAQ USB 6009 [20]

ภาคผนวก ง
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน



ที่ ศธ ๕๔๓๔(๖)/ว ๓๐๗๙

สำนักงานบัณฑิตศึกษา
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ตำบลท่าสุต
อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ๕๗๑๐๐

๒๐ กันยายน ๒๕๕๖

เรื่อง ตอบรับการนำเสนอผลงานวิจัย

เรียน คุณธราปนิศ ตีระพันธ์

ตามที่ ท่านได้สมัครนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ ๒๙ (NGRC 29th The National Graduate Research Conference) ระหว่างวันที่ ๒๔-๒๕ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๕๖ ระหว่างเวลา ๐๘.๓๐-๑๗.๓๐ น. ณ อาคารพลตำรวจเอก เกา สารสิน (C5) มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง นั้น สำนักงานบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ได้พิจารณาผลงานของท่านเรียบร้อยแล้ว และขอเรียนให้ทราบว่าผลงานวิจัยของท่านได้รับการคัดเลือกให้นำเสนอผลงานประเภทบรรยาย และผลงานวิจัยของท่านจะได้รับการเผยแพร่ในรูปแบบรายงานการประชุม (Proceedings) โดยจัดทำเป็นซีดีรอม พร้อมทั้งได้รับใบเกียรติบัตรรับรองการนำเสนอผลงานในครั้งนี้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และเข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยตามวัน เวลา และสถานที่ ดังกล่าว
จิกชอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ตรุณี วิฒนศิริเวช)
วิชาการแทนหัวหน้าสำนักงานบัณฑิตศึกษา

สำนักงานบัณฑิตศึกษา
โทร. ๐ ๕๓๙๓ ๖๑๓๗-๔๐
โทรสาร. ๐ ๕๓๙๓ ๖๑๔๑

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
333 หมู่ 1 ต.ท่าสุต อ.เมือง จ.เชียงราย 57100
โทรศัพท์ (053) 916000 โทรสาร (053) 916034

Mae Fah Luang University
333 Moo 1 Muang District, Chiangrai, Thailand 57100
Tel: (053) 916000 Fax: (053) 916034 www.mfu.ac.th



การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 29
๗ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556

การตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัม

Motor Condition Monitoring Based on Spectrum Analysis

ฐาปนิก ตีระพันธ์^{1*} กุสุมาลย์ เกลิมขานนท์² อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์³ และ วุทธิ วิชกุล⁴

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

^{2,3,4}อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

*ผู้นำเสนอผลงาน E-mail: Thapaniczzzs@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบและพัฒนาโปรแกรม LabVIEW เพื่อประยุกต์ใช้กับงานด้านการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบออนไลน์ ด้วยพื้นฐานการใช้ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ในกรณีที่มอเตอร์เกิดความผิดปกติของขดลวดลัดวงจร การวิเคราะห์และประเมินสถานะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการคำนวณค่าและตรวจสอบปริมาณและคุณภาพต่างๆ ทางไฟฟ้าของมอเตอร์ว่าเป็นไปตามเงื่อนไขการทำงานที่ปกติหรือไม่ รวมทั้งคำนวณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณกระแสมอเตอร์ เพื่อหาองค์ประกอบของความถี่ที่ต้องสงสัยอันเนื่องมาจากการทำงานที่ผิดปกติของมอเตอร์และประเมินแนวโน้มสถานะของมอเตอร์ได้ในขณะทำงาน โดยระบุสถานะเป็นสัญญาณเตือนซึ่งจะเป็นประโยชน์ให้ผู้ใช้งานได้ทราบถึงแนวโน้มที่อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่มอเตอร์เหนี่ยวนำในระยะยาวได้และสามารถตรวจสอบและแก้ไขได้ทันเวลาที่ ผลที่ได้จากการทดลองนั้นสามารถนำไปพัฒนาเพื่อคัดลอกการประเมินและจำแนกสถานะการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำในรูปแบบต่างๆ ต่อไป

คำสำคัญ การตรวจสอบสถานะของมอเตอร์ ปริมาณทางไฟฟ้า สเปกตรัมสัญญาณกระแสมอเตอร์

Abstract

This article presents the design and development of LabVIEW program for online condition monitoring of induction motors based on data of stator voltages and currents. The analysis and evaluation on motor conditions can be divided into 2 sections. The first section is the calculation and evaluation of electrical quantities and quality including energy consumption. The motor current spectrum analysis (MCSA) is used in the second part to diagnose the frequency components due to the unhealthy motors and can help the operator for long term evaluation of the motor. The results from the paper can be able to further develop for various types of motor status evaluations and fault diagnostics.

Keywords: Motor condition monitoring, electrical quantities, the motor current spectrum.

บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ 3 เฟส นั้น จัดได้ว่ามีส่วนสำคัญอย่างมากในสายงานกระบวนการผลิต เนื่องจากการออกแบบที่เรียบง่าย การทำงานที่มีประสิทธิภาพ มีความทนทานและง่ายต่อการบำรุงรักษาโดยเฉพาะอย่างยิ่ง

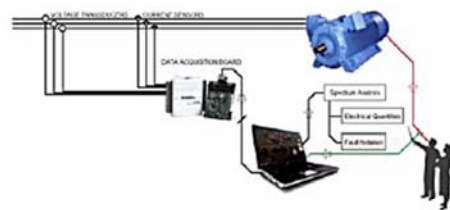
ในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย สัดส่วนของการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะอยู่ที่ประมาณ 70-80% ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าทั้งหมด [1-2] จากข้อมูลสาเหตุหลักๆ ของความเสียหายในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นมีสาเหตุมาจาก แบร์ริงและการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ ดังนั้นการ

การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 29
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556

ตรวจสอบสภาพและสถานะการทำงานจึงมีความสำคัญต่อระบบมอเตอร์ในกระบวนการผลิต เพื่อรักษาความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพการทำงาน

การตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์อย่างถูกต้องในส่วนของปริมาณทางไฟฟ้าจะมีส่วนช่วยให้สามารถวางแผนการใช้งานมอเตอร์เชิงระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงานได้อีกด้วย นอกจากนี้การสามารถบ่งชี้ความผิดปกติในมอเตอร์ได้เร็วกว่าที่วางแผนการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์และระบบเกิดความเสียหายได้ด้วยเหตุผลนี้จึงได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า ตลอดไปจนถึงการระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยวิธีการและทฤษฎีต่างๆกันมากมาย เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการตรวจสอบบำรุงรักษาให้ควบคู่ไปกับการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าเหมือนำนา [3]

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอถึงวิธีการประเมินสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหมือนำนาซึ่งอยู่ในรูปของเครื่องมือตรวจวัดเสมือนบนโปรแกรม LabVIEW โดยการนำข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์มาทำการวิเคราะห์และแสดงผลผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ในแบบออนไลน์ได้



รูปที่ 1 การตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหมือนำนาแบบออนไลน์

วิธีการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์

วิธีการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหมือนำนาในอดีตที่ผ่านมานั้นมีด้วยกันหลายวิธีการแตกต่างกัน

กันไป ไม่ว่าจะเป็นการตรวจสอบเน้นไปที่จุดของปัญหาโดยตรงหรือจะเป็นการตรวจสอบโดยรวมทางอ้อม อาทิ เช่น การตรวจสอบโดยใช้สัญญาณกระแสเตเตอร์ การวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสาย การวัดค่าชั่วขณะของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การวัดประสิทธิภาพ การวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การวิเคราะห์ทางเคมี การตรวจวัดอุณหภูมิ การใช้รังสีอินฟราเรด การวัดสัญญาณรบกวนทางเสียง การตรวจวัดการคายประจุบางส่วน การตรวจวัดการสั้นสะเทือน และการตรวจจับความผิดปกติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ ตลอดจนวิธีการของระบบผู้เชี่ยวชาญหรือระบบอัจฉริยะที่ประกอบด้วยวิธีการของโครงข่ายประสาทเทียม ฟิชชันลจิก และเจเนติกอัลกอริทึม เป็นต้น [4-8]

จากวิธีการต่างๆมากมายที่กล่าวมานั้น จะทำให้เห็นข้อจำกัดของแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการตรวจสอบสถานะการทำงานดังแสดงในตารางที่ 1 จากเหตุผลในเรื่องข้อจำกัดของแต่ละวิธีในงานวิจัยจึงได้เลือกใช้เทคนิควิธีการตรวจสอบมารวมกันสองวิธี คือการใช้วิธีการของการนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามาวิเคราะห์ในเรื่องของการตรวจสอบค่าปริมาณทางไฟฟ้า และการใช้เทคนิควิธีการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ MCSA มาร่วมวิเคราะห์ด้วย

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแต่ละวิธีการ [1]

Method	Insulation Faults	Stator Short turn Faults	Rotor Winding	Rotor Eccentricity	Bearing Faults
Vibration	No	No	Yes	Yes	Yes
MCSA	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Axial flux	No	Yes	Yes	Yes	No
Lubricating oil debris	No	No	No	No	Yes
Cooling gas	Yes	Yes	Yes	No	No
Partial discharge	Yes	No	No	No	No

การวิเคราะห์ค่าปริมาณทางไฟฟ้าของมอเตอร์

ในส่วนนี้จะเป็นที่พื้นฐานการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์โดยทั่วไป โดยจะใช้การตรวจสอบค่า

การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 29
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556

ปริมาณทางไฟฟ้าที่สำคัญ เช่น แรงดันสายและแรงดันเฟสอาร์เอ็มเอส กระแสสายและกระแสเฟสอาร์เอ็มเอส กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ ค่าความถี่ ค่าตัวประกอบกำลัง ค่าความถี่ของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ตลอดจนค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ากิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ซึ่งใช้วิธีการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ว่าด้วยเรื่องการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าภายใต้กรณีเมื่อสัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์และไม่ใช่เป็นรูปคลื่นไซน์ รวมถึงในสถานะของระบบไฟฟ้าสมดุลและไม่สมดุล ทั้งในระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งอ้างอิงการคำนวณจากมาตรฐานเดิมแต่เปลี่ยนแปลงในเรื่องสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น เพื่อใช้เป็นที่เครื่องมือตรวจสอบสถานะการทำงานดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 มาตรฐานการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส IEEE 1459-2010 [9]

Quantity	Combined	Fundamental	Nonfundamental
Apparent	S_e	S_{e1}, S_1^+, S_{1U}	S_{eN}, S_{eH}
Active	P	P_1^+	P_H
Nonactive	N	Q_1^+	D_{e1}, D_{eV}, D_{eH}
Line utilization	$PF = P/S_e$	$PF_1^+ = P_1^+/S_1^+$	---
Harmonic pollution	---	---	S_{eN}/S_{e1}
Load unbalance	---	S_{1U}/S_1^+	---

การวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์

ในการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้า เหนียวนำด้วยเทคนิควิธีการของ การวิเคราะห์สัญญาณกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์หรือที่เรียกว่ากันโดยทั่วไปว่า MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS (MCSA) นั้น จะครอบคลุมในเรื่องของการวินิจฉัยความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ ได้ทั่วถึงมากที่สุด และเป็นวิธีการวิธีหนึ่งที่สามารถทำตรวจจับสัญญาณได้ง่ายสุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นที่ต้องมีตรวจจับสัญญาณร่วมเพื่อใช้ในการตรวจสอบสถานะ ดังแสดงได้จากตารางที่ 1 ดังนั้นใน

บทความนี้จึงเลือกวิธีการดังกล่าวมาใช้ในการตรวจสอบสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนียวนำร่วมด้วย

การวิเคราะห์ทางโดเมนความถี่

จากความก้าวหน้าทางเทคนิคในการประมวลผลสัญญาณในปัจจุบันทำให้เราสามารถที่จะตรวจพบความเสียหายที่ก่อตัวในมอเตอร์แต่เนิ่นๆ ได้ โดยอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว Fast Fourier transform (FFT) ดังแสดงในสมการที่ 1 ซึ่งมีการพัฒนามาจากรากฐานของอนุกรมฟูเรียร์

$$X(f) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วสามารถลดขั้นตอนความซับซ้อนในการแปลงฟูเรียร์ลงได้ ด้วยเหตุนี้ การใช้ FFT ในการวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์นั้นจึงเป็นที่นิยมกันในปัจจุบันอีกทั้งยังเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาเครื่องมือวัดต่างๆ มากมาย โดยปกติแล้วหากสัญญาณที่วัดนั้นไม่ได้มีเพียงรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่มูลฐานความถี่เดียว ซึ่งอาจประกอบด้วยรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่อื่นๆ รวมอยู่ด้วย เราจะไม่สามารถระบุสถานะการทำงานของมอเตอร์ในขณะนั้นได้หากใช้การพิจารณาในโดเมนทางเวลาเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการที่จะพิจารณาสัญญาณที่ซับซ้อนนั้นได้ จึงต้องมีการพิจารณาถึงองค์ประกอบของความถี่ที่รวมกันอยู่นั้น ในโดเมนทางความถี่ หรือที่เรียกว่าการวิเคราะห์สเปกตรัม ในงานวิจัยได้ใช้วิธีการนำสัญญาณกระแสที่ตรวจวัดมาคำนวณแบบลิจิตอลแล้วจึงแสดงองค์ประกอบทางความถี่หรือสเปกตรัมของสัญญาณออกมา หลังจากขั้นตอนการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วแล้วจะทำให้เราทราบถึงองค์ประกอบทางความถี่เฉพาะของมอเตอร์แต่ละกรณีได้ ดังสมการที่ 2 ซึ่งเป็นสมการที่จะอธิบายถึงองค์ประกอบความถี่ร่วมที่เกิดขึ้นในกรณีเมื่อขดลวดลัดวงจร

$$fst = fs \left[\frac{n}{p} (1-s) \pm k \right] \quad (2)$$

เมื่อ f_s คือความถี่อาร์มิกส์เมื่อเกิดขดลวดลัดวงจร, f_r คือความถี่มูลฐาน $n=1,2,3,\dots$, $k=1,3,5,\dots$, s คือค่าสลิป, และ p คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก

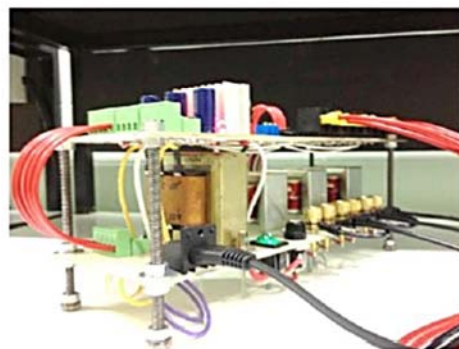
การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 29
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556

เครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัย

ในงานวิจัยได้เลือกใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิด โรเตอร์แบบกรงกระรอก พิกัดแสดงดังตารางที่ 3 จาก รูปแบบการตรวจสอบสถานะการทำงานดังรูปที่ 1 ในส่วนของวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้านั้นจะใช้การลดทอนระดับแรงดันสายแต่ละเฟสลงมาในระดับแรงดัน $6V_{dc}$ ด้วยหม้อแปลงลดระดับแรงดันไฟฟ้า และในส่วนของวงจรตรวจจับกระแส นั้นจะใช้ไอซี ACS712 50A เป็นตัวตรวจวัดกระแส เฟส แสดงวงจรตรวจจับสัญญาณได้ดังรูปที่ 2 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดจะนำเข้าสู่การ์ดแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล DAQ6009 เพื่อนำสัญญาณเข้าสู่การประมวลผลด้วยโปรแกรม LabVIEW ต่อไป

ตารางที่ 3 แสดงแผ่นป้ายมอเตอร์ที่ทำการทดลอง

Machine Parameters	Value
Rated Power	0.5hp
Number of Poles (P)	4
Connection	Y
Rated Voltage	380

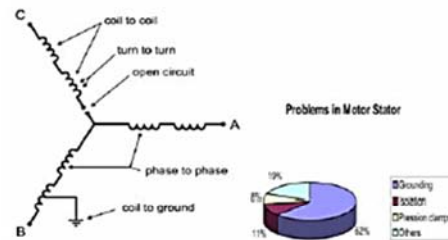


รูปที่ 2 ชุดตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

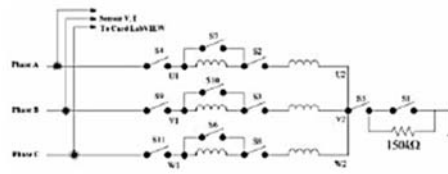
วิธีการทดลอง

ในส่วนของ การทดสอบการทำงาน ของโปรแกรม LabVIEW ในการประเมินสถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเบื้องต้นนั้น ในงานวิจัยได้ทำการเก็บค่าของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากมอเตอร์ในสถานะการทำงานของมอเตอร์ปกติและในสถานะที่เกิดความผิดปกติ

กรณีของขดลวดลัดวงจรแบบขดลวดถึงขดลวด Coil to coil และขดลวดลัดวงจรแบบเฟสถึงเฟส Phase to phase แสดงลักษณะได้ดังรูป 3 และในส่วนของแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองการลัดวงจรของขดลวดแสดงได้ดังรูปที่ 4 โดยจะแบ่งเป็น 2 สถานะการทดลองขึ้นอยู่กับพิกัดกระแสมอเตอร์ คือสถานะการทำงานที่ 80% และ 100% ของพิกัดกระแสมอเตอร์



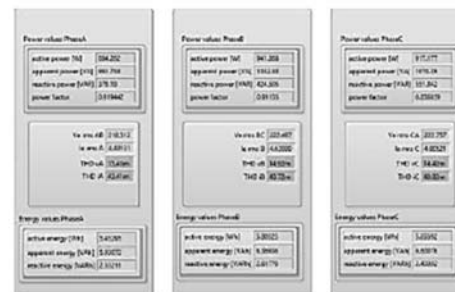
รูปที่ 3 รูปแบบการเกิดความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์ [5]



รูปที่ 4 แบบจำลองการลัดวงจรขดลวดมอเตอร์ต่อแบบ Y

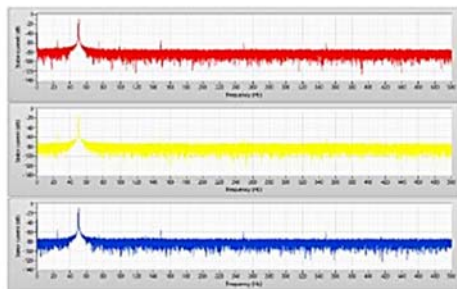
ผลการทดลอง

ผลการคำนวณค่าปริมาณทางไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงสเปกตรัมกระแสเฟสของมอเตอร์ในสถานะการทำงานปกติ



รูปที่ 5 ค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่คำนวณได้จากโปรแกรม

ในการเกิดความคิดพร้อมกรณีสอดคล้องด้วยนั้น จะเห็นได้ว่าลำดับของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยความถี่ฮาร์โมนิกส์ย่อย Subharmonic แต่จะไม่รุนแรงและไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ เพราะเป็นฮาร์โมนิกส์ที่ปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้า แต่จะมีความถี่บางช่วงที่ปรากฏขึ้นเด่นชัดในบางตำแหน่งของสเปกตรัมกระแสมอเตอร์ ในบทความนี้จะใช้วิธีการตรวจสอบหาความถี่ฮาร์โมนิกส์ย่อยซึ่งบ่งชี้ถึงความผิดปกติในมอเตอร์โดยการตั้งค่า Threshold เพื่อตรวจจับความถี่มาเปรียบเทียบระหว่างกรณีสอดคล้องมีสถานะการทำงานปกติกับมอเตอร์ที่เกิดการลัดวงจรภายในของขดลวดสเตเตอร์ขึ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เกิดขึ้นจากการใช้การตั้งค่า Threshold กับค่าของสเปกตรัมกระแสมอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงได้ในตารางที่ 4



รูป 6 สเปกตรัมกระแสเฟส A,B,C ในสถานะการทำงานของมอเตอร์ปกติ

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสมอเตอร์จากการใช้ค่า Threshold ในการหาความถี่ต้องสงสัย

มอเตอร์ปกติที่ค่า Threshold -60 dB

Harmonic order	Peak(Hz)	Phase A Value(dB)	Phase B Value(dB)	Phase C Value(dB)
	25	-53.15	-52.92	-54.79
1	50	-20.84	-20.88	-20.86
	75	-55.74	-	-
3	150	-51.96	-50.75	-52.66
5	250	-56.13	-	-55.72

มอเตอร์ปกติที่ค่า Threshold -70 dB

Harmonic order	Peak(Hz)	Phase A Value(dB)	Phase B Value(dB)	Phase C Value(dB)
	25	-53.15	-52.92	-54.79
1	50	-20.84	-20.88	-20.86
	75	-55.74	-58.39	-60.94
2	100	-66.57	-	-
3	150	-51.96	-50.75	-52.66
5	250	-56.13	-56.68	-55.72
	1545	-68.25	-	-68.09

ขดลวดลัดวงจรเฟส A ที่ค่า Threshold -60 dB

Harmonic order	Peak(Hz)	Phase A Value(dB)	Phase B Value(dB)	Phase C Value(dB)
	25	-36.57	-45.51	-40.16
1	49.89	-3.072	-8.016	-5.198
	75	-38.03	-44.79	-41.17
	125	-52.73	-	-54.94
3	149.7	-32.61	-36.83	-50.58
	174.4	-47.13	-52.87	-54
5	249.4	-47.55	-48.86	-42.5
7	349.3	-43.7	-54.08	-51.69
9	449	-58.54	-	-

ขดลวดลัดวงจรเฟส B ที่ค่า Threshold -60 dB

Harmonic order	Peak(Hz)	Phase A Value(dB)	Phase B Value(dB)	Phase C Value(dB)
	25.19	-40.06	-37.43	-46.72
1	49.92	-5.792	-3.868	-8.614
	74.64	-42.7	-38.42	-43.82
	125	-	-55.36	-
3	149.7	-47.38	-35.09	-36.73
	174.5	-54.9	-48.9	-54.12
5	249.4	-45.76	-47.66	-52.57
7	349.3	-50.32	-46.67	-50.42
	692	-55.76	-55.55	-

ขดลวดลัดวงจรเฟส C ที่ค่า Threshold -60 dB

Harmonic order	Peak(Hz)	Phase A Value(dB)	Phase B Value(dB)	Phase C Value(dB)
	25.16	-47.61	-39.03	-36.64
1	49.87	-8.441	-5.619	-3.753
	74.58	-42.47	-40.88	-36.24
	124.9	-	-56.87	-
3	149.6	-39.59	-34.52	-38.71
	174.3	-53.46	-54.67	-48.4
5	249.4	-54.98	-43.62	-46
7	349	-55.26	-55.39	-50.14

การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 29
๗ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556

ขดลวดลัดวงจรเฟส AB ที่ค่า Threshold -60 dB

Harmonic order	Peak(Hz)	Phase A Value(dB)	Phase B Value(dB)	Phase C Value(dB)
	25.46	-39.23	-38.73	-39.15
1	49.94	-0.5689	-1.669	-5.274
	74.43	-35.58	-38.23	-41.53
	125	-	-	-
3	149.9	-51.41	-51.94	-48.74
	174.3	-46.31	-49.51	-54.58
5	249.7	-48.48	-44.93	-53.55
7	349.6	-43.88	-44.38	-
9	449.5	-56.21	-55.2	-
11	549.4	-	-56.57	-

ขดลวดลัดวงจรเฟส BC ที่ค่า Threshold -60 dB

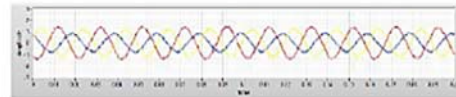
Harmonic order	Peak(Hz)	Phase A Value(dB)	Phase B Value(dB)	Phase C Value(dB)
	25.4	-37.77	-37.86	-36.77
1	49.93	-5.521	-1.048	-2.065
	74.46	-41.71	-34.82	-36.36
	125	-	-	-
3	149.8	-56.22	-44.89	-45.21
	174.3	-46.31	-46.14	-49.19
5	249.6	-50.52	-46.95	-41.78
7	349.5	-	-42.28	-42.4

ขดลวดลัดวงจรเฟส CA ที่ค่า Threshold -60 dB

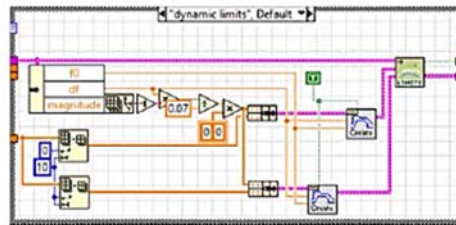
Harmonic order	Peak(Hz)	Phase A Value(dB)	Phase B Value(dB)	Phase C Value(dB)
	25.34	-38.32	-44.27	-35.34
1	49.93	-2.454	-5.445	-1.266
	74.52	-42.55	-38.65	-44.34
	125.2	-	-56.79	-51.84
3	150	-55.54	-54.2	-54.39
	174.4	-45.08	-56.48	-43.61
5	249.6	-48.75	-50.31	-52.7
7	349.5	-45.11	-51.62	-46.86
	688.2	-56.07	-	-53.32

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าช่วงความถี่ที่มีนัยสำคัญที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์ซึ่งอาจก่อให้เกิดแนวโน้มของความเสียหายต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำคานานั้น จะพบปรากฏอยู่ในช่วงค่าความถี่ที่ 125Hz และ 175Hz และอาจมีซิปฮาร์โมนิกส์ที่บางความถี่ซึ่งปรากฏขึ้นมาให้เห็นด้วย จากช่วงความถี่สองช่วงนี้จะนำไปใช้ในการตั้งค่าระบุความถี่หรือที่ที่เกิดจากการลัดวงจรของขดลวดในโปรแกรม LabVIEW ดังรูปที่ 8 ซึ่งการระบุความถี่หรือในส่วนนี้จะ

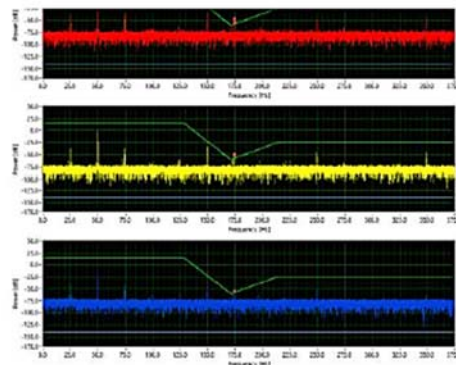
ใช้การตั้งค่าแบบเลือกช่วงความถี่ที่ต้องสงสัยได้ซึ่งจะทำให้โปรแกรมมีความยืดหยุ่นในการวิเคราะห์ความถี่หรือที่ที่เกิดจากกรณีอื่นๆ ได้อีกด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 7 ตัวอย่างลักษณะรูปคลื่นกระแส 3 เฟสทางโดเมนเวลาเมื่อเกิดการลัดวงจรของขดลวดที่เฟส AB



รูปที่ 8 โค้ดโปรแกรมการตั้งค่าตรวจสอบช่วงความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์ความถี่หรือที่เกิดขึ้นในมอเตอร์

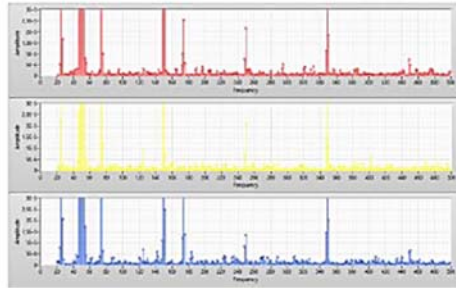


รูปที่ 9 สเปกตรัมกระแส 3 เฟสเมื่อเกิดการลัดวงจรของขดลวดเฟส AB เมื่อใช้การระบุจุดตรวจจับความถี่ที่ 175 Hz ซึ่งเป็นความถี่จะพบได้เมื่อเกิดการลัดวงจรของขดลวด

จากการทดลองในกรณีของขดลวดลัดวงจรเฟส AB, เฟส BC, และ เฟส CA นั้น ให้ผลออกมาในแนวโน้มที่มีลักษณะสอดคล้องกันอธิบายได้ว่า หากเกิดการลัดวงจรของขดลวดในกรณี Phase to phase นั้น ค่ากำลังงานจากสเปกตรัมจะมี

การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 29
ณ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ระหว่างวันที่ 24-25 ตุลาคม 2556

มากที่สุดที่เฟสที่เกิดลัดวงจรซึ่งกันและกันและค่ากำลังงาน
จากสเปกตรัมนี้จะลดลงตามลำดับเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 สเปกตรัมกระแสเฟส A,B,C เมื่อเกิดการลัดวงจรที่
เฟส CA ในช่วงการวิเคราะห์ 20-500 Hz ตั้งค่าการขยายช่วง
ของสเปกตรัม Number of line = 400

สรุป

จากการทดลองโปรแกรมเครื่องมือตรวจวัดเสมือนที่
พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW จากข้อมูลของสัญญาณ
แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสเตเตอร์ของ
มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งรับค่าเข้ามาประมวลผลการ
ทำงานด้วยบล็อกไดอะแกรมเพื่อการคำนวณหาค่าปริมาณ
ทางไฟฟ้าซึ่งอ้างอิงการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE 1459-
2010 นั้น โปรแกรมสามารถที่จะคำนวณค่าปริมาณทาง
ไฟฟ้าต่างๆ ออกมาได้ถูกต้องตามหลักการคำนวณ และใน
ส่วนของการวิเคราะห์สเปกตรัมกระแสมอเตอร์ด้วย FFT ก็
สามารถที่จะตั้งค่าการตรวจจับช่วงความถี่ที่อาจส่งผลให้
เกิดความผิดปกติโดยผู้ใช้งานได้อย่างยืดหยุ่น โดยผลที่ได้
จากการทดสอบจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาต่อยอด
เพื่อให้ได้ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดเสมือนที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ
และมีคุณภาพในการวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ye Zhongming; Wu Bin. "A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis", Power Electronics and Motion Control Conference, Proceedings. IPERC 2000. The Third International. vol. 3, pp. 1353 - 1358, Aug 2000.
- [2] William T. Thomson ; Mark Fenger. "Current Signature Analysis (MCSA) To Diagnose Faults In Three-Phase Induction Motor "IEEE Industry Conference, pp. 1077-2618,2001.
- [3] Singh, G.K.; Al Kazzaz, S.A.S. "Development of an Intelligent Diagnostic System for Induction Machine Health Monitoring ", Systems Journal, IEEE. Vol.2, pp. 273-288, 2008.
- [4] Vilas N.; Ghate and Sanjay V.Dudul; "Cascade Neural-Network-Based Fault Classifier for Three-Phase Induction Motor", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.58, No.5, May 2011.
- [5] Erik Leandro Bonaldi; Levy Ely de Lacerda de Oliveira; Jonas Guedes Borges da Silva and Germano Lambert-Torres PS Solution, Brazil; "Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to induction Motor" 2012.
- [6] Siddique, A.; Yadava, G.S.; Singh, B.; "A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors ", Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol.20, pp.106 - 114 ,2005.
- [7] Neelam Mehala, "Condition Monitoring And Fault Diagnosis Of Induction Motor Using Motor Current Signature Analysis", Electrical Engineering Department National Institute Of Technology Kurukshetra, India October, 2010.
- [8] Pereira, L.A.; da Silva Gazzana, D.; Pereira, L.F.A.; "Motor Current Signature Analysis and Fuzzy Logic Applied to the Diagnosis of Short-Circuit Faults in Induction Motors", Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE, 6 pp, 2005.
- [9] IEEE std 1459-2010, "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced conditions", 2010.