

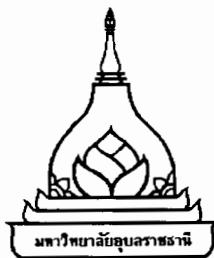
ระบบเฝ้าตรวจระดับเยื่องศูนย์มอเตอร์เห็นี่ยวนำแบบเวลาจริง

ผดุง กิจแสวง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**REAL-TIME MONITORING SYSTEM OF INDUCTION MOTOR
MISALIGNMENT**

PADUNG KITSAWANG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
MAJOR IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
YEAR 2012**

COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ในรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง ระบบเฝ้าระวังระดับเบื้องต้นมือถือเพื่อยield เวลาจริง

ผู้วิจัย นายพุดุง กิจแสง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มงคล ปุ่มขุนนท์)
กรรมการ

.....

(ดร. ปานพัชัย บัวศรี)
กรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ อุทัย สุขสิงห์)
กรรมการ

.....

(ดร. บงกช สุขอนันต์)
กรรมการ

.....

(ดร. ประสิทธิ์ นครราช)
คณบดี

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพ. แสงเทียน)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2555

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มงคล ปุญยตานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เคยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดระยะเวลา ที่ทำการศึกษา และให้ความรู้ในเชิงวิชาการอันเป็นแนวทางในการทำวิจัย แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ปลูกฝังให้มีความละเอียด รอบคอบ มีความมานะพยายามในการศึกษาและทำวิจัย เป็นแบบอย่างที่ดี แก่ผู้วิจัย โดยตลอด

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ อุทัย สุขสิงห์ ดร. ปานหยา บัวศรี ดร. บงกช สุขอนันต์ และ ดร. ประสิทธิ์ นครราช ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ รวมถึง ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา

ขอขอบพระคุณบุคลากรและนักศึกษาปริญญาโท-เอก ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและ อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณทุนรัฐบาลกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ทุนการศึกษาและ ทุนวิจัย ขอขอบพระคุณงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนวิจัยบ่างส่วนที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา แม่ค่า ครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ สนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ทำให้สามารถทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณแด่นุพารี และผู้มีพระคุณทุกท่าน



(นายพงษ์ กิจแสง)

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง	: ระบบเฝ้าตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์มอเตอร์เหนี่ยววนแบบเวลาจริง
โดย	: ผดุง กิจแสง
ชื่อปริญญา	: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	: วิศวกรรมไฟฟ้า
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มงคล ปุ่มยตานันท์
ศัพท์สำคัญ	: ระบบเฝ้าตรวจวัด ระดับเยื่องศูนย์ แบบเวลาจริง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาเทคนิคการตรวจสอบความผิดปกติในมอเตอร์ เหนี่ยวสามเฟสแบบกรงกระรอก อันเนื่องจากการเยื่องศูนย์ของแกนเพลามอเตอร์ โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณกระแสเตาเตอร์จากกรอบอ้างอิง สามเฟส abc ของกระแส I_a ร่วมกับกรอบอ้างอิงสามเฟส $dq0$ ของ Park's Vector ในแนวแกน I_d หากนาคสัญญาณความถี่ແຄบข้างที่สัมพันธ์กับระดับเยื่องศูนย์ของมอเตอร์และสร้างอัลกอริทึมในการวินิจฉัยด้วยวิธีทางสถิติใช้ Multiple Linear Regression พร้อมสร้างระบบเฝ้าตรวจระดับเยื่องศูนย์ไร์สายแบบเวลาจริงด้วยโปรแกรม LabVIEW พบร่วมระบบสามารถวินิจฉัยและรายงานผลระดับ การเยื่องศูนย์มอเตอร์ได้ สามารถนำไปใช้เป็นระบบเฝ้าตรวจวินิจฉัยระดับเยื่องศูนย์ที่รายงานแบบเวลาจริงเป็นที่น่าพอใจ

ABSTRACT

TITLE : REAL-TIME MONITORING SYSTEM OF INDUCTION MOTOR MISALIGNMENT
BY : PADUNG KITSAWANG
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
MAJOR : ELECTRICAL ENGINEERING
CHAIR : ASST. PROF. MONGKOL PUSAYATANONT, Ph. D.

KEYWORDS : MONITOING SYSTEM / MOTOR MISALIGNMENT / REAL-TIME

This thesis presents the real-time monitoring of three phase squirrel cage rotor misalignment using stator current analysis in microcontroller. The analysis is performed in positive phase sequence associated with dq0 – Park's vector by considering I_a and I_d. Relationship of side band signal and misalignment level is determined and modeled using multiple linear regression. In this thesis, the real-time monitoring system interfaced using personal computer is programmed in LabView. It is found that the system can correctly detect and report misalignment levels. Therefore, it can be implemented in practical.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	น
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ภ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	6
2.3 ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	8
2.4 การเยื่องศูนย์ของแกนเพลาบนมอเตอร์และ การวิเคราะห์ การเยื่องศูนย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	13
2.5 dq0 Transformation	19
2.6 การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล	22
2.7 การวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์ด้วยถดถอยเชิงเส้นตรงพหุคูณ	25
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.2 วิธีการทดลอง	39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1 ผลการทดลองทางนาคของสัญญาณเชิงความถี่นอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ที่ระดับเสียงศูนย์ 0.000 น.m. ถึง 0.150 น.m.	52
โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	
4.2 ทดลองหาข้อมูลเพื่อการสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระดับเสียงศูนย์	56
การสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระดับเสียงศูนย์	60
ผลการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์วิเคราะห์และวินิจฉัยระดับการเสียงศูนย์	60
4.5 ผังระบบรายงานผู้ตรวจสอบระดับเสียงศูนย์ไร้สายแบบเวลาจริง	62
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	63
5.2 งานที่ได้ดำเนินงาน	64
5.3 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	
ก ผลการทดลอง	70
ข การเกิดสารมอนิกในนอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยววนា	78
ค การสร้างอัลกอริทึมในการวินิจฉัยระดับเสียงศูนย์	86
ง การใช้โปรแกรมระบบตรวจวัดระดับเสียงศูนย์นอเตอร์เหนี่ยวแบบเวลาจริง	90
จ การสื่อสารไร้สายด้วย XBEE	94
ฉ โค้ดโปรแกรม LabVIEW	100
ช โค้ดโปรแกรมภาษาซีของไมโครคอนโทรลเลอร์ LPC1768	102
ซ ผลงานตีพิมพ์เนื่องจากวิทยานิพนธ์	121
ฌ ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	135
ประวัติผู้วิจัย	147

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	31
3.2 ผลการทดสอบวงจรของความถี่ตั้งแต่ 500 Hz	36
3.3 เกณฑ์ในการวินิจฉัยระดับการเสื่อมศูนย์	46
4.1 สเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ เมื่อปรับระดับเสื่อมศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่ 1	52
4.2 สเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ เมื่อปรับระดับเสื่อมศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่ 2	53
4.3 สเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ เมื่อปรับระดับเสื่อมศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่ 3	53
4.4 อัตราส่วนสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $(f_s / f_s - f_r)$ เมื่อปรับระดับเสื่อมศูนย์ ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว	54
4.5 อัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_a ที่ความถี่ $(f_s / f_s - f_r)$	57
4.6 อัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_a ที่ความถี่ $2f_s / (2f_s - f_r)$	57
4.7 ผลการทดลองเฝ้าตรวจวัดระดับเสื่อมศูนย์ที่ 0 % ถึง 12%	60
4.8 ผลการวิเคราะห์ทดลองตรวจวัดระดับเสื่อมศูนย์	62

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	6
2.2 โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรุงกระอก	7
2.3 โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ โรเตอร์	8
2.4 การจำแนกการชำรุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	8
2.5 ผังการจำแนกการชำรุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	9
2.6 ถักยณะการเกิดการเยื่องศูนย์ของเกนเพลามอเตอร์	13
2.7 ถักยณะความไม่สม่ำเสมอของช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์	14
2.8 การเปลี่ยนซ่องว่างอากาศเมื่อมอเตอร์เกิดการเยื่องศูนย์	15
2.9 การแปลงจากการอ้างอิงสามเฟสในระบบ abc ไปสู่การอ้างอิงไดๆ ในระบบ $dq0$	19
2.10 สัญญาณในเชิงเวลาและスペกตรัมที่ได้จากการแปลง FFT	24
3.1 ไดอะแกรมขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของงานวิจัย	30
3.2 มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.3 ระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์	31
3.4 แผนผังระบบเฝ้าตรวจระดับเยื่องศูนย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	32
3.5 ระบบเฝ้าตรวจวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์และการวัดระยะเยื่องศูนย์ด้วย Dial gauge	33
3.6 รูปร่างและการกำหนดตำแหน่งขาทرانส์ฟอร์มnidicrateและเส้น (LEN-HX-10NP)	33
3.7 วงจรวัดกระแสด้วยทرانส์ฟอร์มnidicrateและเส้น (LEN-HX-10NP)	34
3.8 วงจรยกระดับสัญญาณกระแส	35
3.9 ผลการทำงานของวงจรยกระดับสัญญาณ	35
3.10 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 500Hz	36
3.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 500Hz	37
3.12 วงจรวัดสัญญาณกระแสสเตเตอร์ 1 เฟส	38
3.13 บอร์ดวัดสัญญาณกระแสสเตเตอร์ของมอเตอร์ 3 เฟส	38
3.14 ไมโครคอนโทรลเลอร์ LPC1768 ที่ใช้ในงานวิจัย	39
3.15 ผังงานขั้นตอนการเก็บข้อมูล	41
3.16 สัญญาณกระแสสเตเตอร์ (ก) โคล เมนเวลา (ข) โคล เมนความถี่ที่ระยะการเยื่องศูนย์ 0.00 มม.	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.17 ผังงานขั้นตอนการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างอัลกอริทึม	43
3.18 สัญญาณกระแสเดตเตอร์ที่ระยะ การเยื่องศูนย์ 0.060 มม.	44
3.19 ตัวอย่างสัญญาณกระแสเดตเตอร์ในโดเมนเวลาที่ระยะการเยื่องศูนย์ 0.060 มม.	44
3.20 ตัวอย่างสัญญาณกระแสเดตเตอร์แนวแกน I_d ที่ระยะการเยื่องศูนย์ 0.060 มม.	45
3.21 LED ที่ใช้แสดงผลที่ชุดตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์	47
3.22 ชุดส่งรายงานผลวินิจฉัยการเยื่องศูนย์แบบไร้สายด้วย XBEE	48
3.23 ชุดรับรายงานผลการวินิจฉัยการเยื่องศูนย์แบบไร้สายด้วย XBEE	48
3.24 ตัวอย่างโปรแกรมรายงานผลการวินิจฉัยการเยื่องศูนย์ด้วยคอมพิวเตอร์	49
4.1 ตัวอย่างกระแทกในสภาวะปกติ (ที่ระยะเยื่องศูนย์ 0 ม.) ของมอเตอร์ตัวที่ 1	52
4.2 สัญญาณที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ สัมพันธ์กับระยะเยื่องของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว	54
4.3 สเปกตรัมกำลังของสัญญาณกระแส ในโดเมนทางความถี่ที่ระดับเยื่องศูนย์ 0 %	55
4.4 สเปกตรัมกำลังของสัญญาณกระแส ในโดเมนทางความถี่ที่ระดับเยื่องศูนย์ 12%	56
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบการเยื่องกับอัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_a และสเปกตรัมกำลังของกระแส I_d	58
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบการเยื่องกับค่าเฉลี่ยขนาดกระแส I_a และขนาดกระแสในแนวแกน I_d	58
ก.1 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 0%	76
ก.2 ผลโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 0%	76
ก.3 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 2%	77
ก.4 ผลโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 2%	77
ก.5 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 4%	78
ก.6 ผลโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 4%	78
ก.7 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 6%	79
ก.8 ผลโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 6%	79
ก.9 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 8%	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ก.10 ผลโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 8%	80
ก.11 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 10%	81
ก.12 ผลโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 10%	81
ก.13 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 12%	82
ก.14 ผลโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 12%	82
ง.1 โปรแกรมตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์มอเตอร์เห็นiywแบบเวลาจริง	96
ง.2 การตั้งชื่อไฟล์ข้อมูลของการรายงานผลการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์	97
ง.3 ข้อมูลของการรายงานผลการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์	98
จ.1 ลักษณะเด่นของการทำงานของ ZigBee	100
จ.2 รูปแบบเครือข่ายการทำงานของ XBee	101
จ.3 XBee ที่ใช้งานวิจัยและการวางแผนงาน	102
จ.4 โปรแกรม X-CTU การกำหนดให้ XBee เป็น Coordinator	102
จ.5 โปรแกรม X-CTU ในการกำหนดให้ XBee เป็น End Device	103
ฉ.1 โค้ดโปรแกรมรายงานผลการวินิจฉัยการเยื่องศูนย์มอเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์	106

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ระยะการเยื่องศูนย์	mm
$B(\theta, t)$	ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก	Wb/m^2
b_0	ค่าคงที่	-
b_1	ค่าสัมประสิทธิ์สมการผลด้อยพหุคูณของตัวแปรอิสระ X_1	-
b_2	ค่าสัมประสิทธิ์สมการผลด้อยพหุคูณของตัวแปรอิสระ X_2	-
b_k	ค่าสัมประสิทธิ์สมการผลด้อยพหุคูณของตัวแปรอิสระ X_k	-
E_m	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด	V
E_2	แรงดันไฟฟ้าของโรเตอร์ที่ข้างมาด้านสเตเตอร์	V
$F_T(\theta)$	ผลลัพธ์แรงเคลื่อนแม่เหล็ก	Amp-turn
$F_s(\theta, t)$	แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์	Amp-turn
$F_{r,1}(\theta, t)$	แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่สเตเตอร์จากความถี่หลัก	Amp-turn
$\hat{F}_{s,v}$	แรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงสุดที่สเตเตอร์	Amp-turn
$\hat{F}_{r,1}$	แรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงสุดที่โรเตอร์ที่ความถี่หลัก	Amp-turn
$F_{r,2}(\theta, t)$	แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์จากกระแสสารมอนิก	Amp-turn
f_s	ความถี่แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตเตอร์มีหน่วยเป็น Hz	Hz
f_r	ความถี่ของโรเตอร์	Hz
f_{ecc}	ความถี่ที่เกิดจากผลของการเยื่องศูนย์	Hz
f_{\max}	ความถี่สูงสุดของสัญญาณ	Hz
k	จำนวนตัวแปรอิสระ	-
$g_s(\theta)$	ระยะของห่างช่องว่างอากาศที่องคากไดๆ	mm
l_g	ระยะช่องว่างอากาศที่องคากไดๆรอบ โรเตอร์เมื่อ โรเตอร์และ สเตเตอร์ไม่เกิดการเยื่องศูนย์	mm
I_a	กระแสในกรอบอ้างอิง abc ของเฟส A	A
I_d	กระแสในกรอบอ้างอิง $dq0$ ในแนวแกน I_d	A
I_2	กระแสไฟฟ้าของโรเตอร์ที่ข้างมาด้านสเตเตอร์	A
i_d	กระแสแนวแกน d ในกรอบอ้างอิง $dq0$	A

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
i_q	กระแสแนวแกน q ในกรอบอ้างอิง $dq0$	A
i_{dl}	กระแสสูงสุดของความถี่ harmonic อนิจແเกบข้าง ($f_s - f_r$)	A
i_{dr}	กระแสสูงสุดของความถี่ harmonic อนิจແเกบข้าง ($f_s + f_r$)	A
N	จำนวนรอบขดลวด	Turn
N_s	ความเร็วซิงไครนัส	rpm
N_{sl}	ความเร็วสลิป	rpm
N_r	ความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์	rpm
n	จำนวนตัวอย่างข้อมูล	-
P_{in}	กำลังไฟฟ้าด้านเข้า	W
P_{SCL}	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดบนสเตเตอร์	W
P_{AG}	กำลังไฟฟ้าส่งผ่านช่องว่างอากาศ	W
P_{RCL}	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวด โรเตอร์	W
$P_x(k)$	สเปกตรัมของกำลังที่ความถี่ใดๆ	dB
p	จำนวนคู่ข้ามแม่เหล็กที่สเตเตอร์	-
Q_s	จำนวนสล็อตในสเตเตอร์	-
Q_r	จำนวนสล็อตที่โรเตอร์	-
q_s	จำนวนสล็อตในสเตเตอร์ต่อเฟส	-
R_2	ค่าความต้านทานของโรเตอร์ที่ยึดมาด้านสเตเตอร์	Ohms
R_s	รัศมีของสเตเตอร์	mm
R_r	รัศมีของโรเตอร์	mm
r_1	ระยะจากจุดศูนย์กลางการหมุนถึงผิวด้านในของสเตเตอร์	mm
r_2	ระยะจากจุดศูนย์กลางการหมุนถึงผิวด้านนอกของโรเตอร์	mm
r	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ	-
r^2	สัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด	-
s	slip	-
Se	ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า	-

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T_e	แรงบิดสนามแม่เหล็กสามเฟส	N/M
t	เวลา	s
T_{Process}	เวลาในการประมวลผล	s
T_s	เวลาของการสูนซ้อมูล	s
$x(n)$	สัญญาณทางเวลาแบบไม่ต่อเนื่องที่อันดับข้อมูลใดๆ	-
$X(k)$	ผลของการแปลงฟูเรียร์ที่ความถี่ใดๆ	-
X_2	ค่ารีแอคเดนซ์ของโรเตอร์ที่ข่ายมาด้านสเตเตอร์	Henry
X	ระยะเยื้องศูนย์	mm
X_1	ตัวแปรอิสระตัวที่หนึ่ง	-
X_2	ตัวแปรอิสระตัวที่สอง	-
X_k	ตัวแปรอิสระตัวที่ k	-
\hat{Y}	ตัวแปรพยากรณ์ตัวแปรตาม	-
ϕ	มุมต่างเพสของกระแสและแรงเกลี้ยงไฟฟ้า	rad
μ_0	ค่าซึ่มซับทางแม่เหล็กในอากาศ	Wb / A
$\Lambda(\theta, t)$	ค่าซึ่มซับทางแม่เหล็กของอากาศต่อหน่วยพื้นที่	Wb / m^2
$\delta(\theta, t)$	ระยะห่างช่องว่างอากาศ	m
φ_1	มุมเพสทางไฟฟ้าของแหล่งจ่าย	rad
v	อันดับ harmonic นิกเชิงระยะ	-
μ	อันดับ harmonic นิกเชิงระยะ	-
φ_μ	มุมเพสของ MMF สาร์มอนิกส์ที่โรเตอร์	rad
ξ_1	แฟคเตอร์ของการพัฒนาของคลาดสเตเตอร์	-
ξ_μ	แฟคเตอร์การเหนี่ยวนำของกระแสสาร์มอนิก	-
ω	ความเร็วเชิงมุม	rad/s
ω_1	ความเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กหมุน	rad/s
ω_2	ความเร็วเชิงสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโรเตอร์	rad/s

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
ω_r	ความเร็วเชิงมุนการหมุนของโรเตอร์	rad/s
$\Lambda_{se}(\theta)$	การซึ่มซับแม่เหล็กของช่องว่างอากาศแบบสแตติก	Wb/A
Λi_{se}	ค่าซึ่มซับทางแม่เหล็กที่หาร์มอนิกใดๆ	Wb/A
i_{se}	ลำดับหาร์มอนิกมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3...	-
ε	ระดับการเยื่องศูนย์	%
$\Lambda_{de}(\theta)$	การซึ่มซับทางแม่เหล็กของช่องว่างอากาศแบบไนโนามิก	Wb/A
α	เฟสเริ่มต้นของกระแสของแหล่งจ่าย	rad
β_l	เฟสเริ่มต้นของความถี่หาร์มอนิกเดบข้าง ($f_s - f_r$)	rad
β_r	เฟสเริ่มต้นของความถี่หาร์มอนิกเดบข้าง ($f_s + f_r$)	rad

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าเห็นได้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพราะเป็นเครื่องจักรกลที่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพใช้งานง่าย มีความแข็งแรง ราคาถูก และมีความต้องการบำรุงรักษาต่ำ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมา ถึงแม้ว่ามอเตอร์เห็นได้จะสามารถทำงานได้อย่างดีก็ตาม ก็ยังเกิดความผิดปกติได้ถ้าเกิดความผิดปกติที่รุนแรงก็สามารถเปลี่ยนมอเตอร์ตัวใหม่ แต่เมื่อเกิดความผิดปกติเพียงเล็กน้อยก็สามารถนำไปซ่อมแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ถึงแม้จะมีความผิดปกติเพียงเล็กน้อย ก็ส่งผลต่อขบวนการผลิตทั้งหมด หรือความผิดปกติเพียงเล็กน้อยก็อาจถูกมองเป็นความเสียหายของมอเตอร์ที่รุนแรงได้ ดังนั้นการบอกรหัสล่วงหน้าได้ ก็สามารถที่วางแผนในการซ่อมบำรุงเพื่อทำให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และเป็นการขัดَاขุการใช้งานมอเตอร์ให้นานขึ้น ความผิดปกติของมอเตอร์บางกรณีสามารถสังเกตได้ด้วยประสบการณ์ แต่บางกรณีจำเป็นต้องใช้สัญญาณทางไฟฟ้าที่อยู่ในมอเตอร์มาทำการวิเคราะห์และวินิจฉัยและระดับความการผิดปกติของมอเตอร์ การตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์สามารถทำได้ดังนี้

1.1.1 ตรวจสอบโดยต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์ ในช่วงที่มอเตอร์ทำงานอยู่ ไม่สามารถตรวจสอบได้จนกว่าจะหยุดการทำงานของมอเตอร์แล้วทดสอบชิ้นส่วนของมอเตอร์เพื่อทำการตรวจสอบสภาพของมอเตอร์ หรือจนมอเตอร์เกิดความเสียหาย วิธีนี้มีข้อเสียคือต้องหยุดขบวนการผลิตนั้น

1.1.2 ตรวจสอบโดยขณะมอเตอร์ใช้งานอยู่ ในการตรวจสอบความผิดปกติมอเตอร์เห็นได้ สามารถตรวจสอบได้หลายวิธี เช่น การวิเคราะห์จากสัญญาณจากการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรและสัญญาณรบกวน แรงบิดช่องอากาศ เส้นแรงแม่เหล็ก จากสัญญาณเสียงและการใช้สัญญาณกระแสเตเตอร์

การวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์ขณะใช้งานอยู่ เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถวัดและวินิจฉัยความผิดปกติได้ทุกเวลาในขณะที่มอเตอร์ทำงานอยู่ โดยไม่มีผลกระทบต่อระบบใช้เวลาในการตรวจสอบน้อยและสามารถทราบความผิดปกติก่อนจะเกิดความเสียหายที่รุนแรง โดยเฉพาะการตรวจสอบความผิดปกติจากการเบื้องศูนย์มอเตอร์

ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่แบร์ริ่ง ผลของการพิจารณาดังนี้ คือการเยื่องศูนย์มอเตอร์ทำให้เกิดแรงในแนววัลว์มีที่เกิดขึ้นจากความไม่สม่ำเสมอของช่องอากาศกระทำบนแกนเหล็กสเตเตอเร์ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น หรือเกิดการสีกันระหว่างชุดลวดสเตเตอเร์กับโรเตอเร่อร์ส่งผลให้จำนวนชุดลวดสเตเตอเร์เสียหายได้ ดังนั้นการวินิจฉัยการเกิดการเยื่องศูนย์ในขณะที่มอเตอร์ใช้งานอยู่ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อป้องกันการเสียหายรุนแรงที่เกิดขึ้นของมอเตอร์

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การตรวจสอบการเยื่องศูนย์สามารถตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์สัญญาณกระแสเตอเร่อร์เพียง 1 เฟส ในเชิงความถี่ของสัญญาณความถี่แบบข้าง (Side band frequency) ของความถี่หลัก [1] ขนาดของสัญญาณความถี่แบบข้างดังกล่าวจะสัมพันธ์กับระดับของการเยื่องศูนย์ที่เกิดขึ้นและพบว่า มอเตอร์ที่มีขนาดพิกัดเดียวกัน ขนาดของสัญญาณความถี่แบบข้างมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์กับระยะการเยื่องศูนย์ที่มากขึ้น เช่นเดียวกัน [2] และมอเตอร์ที่มีขนาดพิกัดต่างกัน ไม่สามารถใช้ขนาดของสัญญาณความถี่แบบข้างเป็นข้อมูลอ้างอิงในการตรวจสอบระบบการเยื่องศูนย์เดียวกันได้ [3] และ ได้มีการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์จากการเยื่องศูนย์จากการแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟส abc เป็นกรอบอ้างอิงในระบบ $dq0$ แล้วใช้วิธี Park's Vector Modulus หากองค์ประกอบความถี่ของมอเตอร์ที่ผิดปกติ [4]

ในการตรวจสอบระดับการเยื่องศูนย์ยังไม่มีการนำไปใช้เป็นตัวประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ระดับการเยื่องศูนย์โดยการวิเคราะห์สัญญาณกระแสเตอเร่อร์ 1 เฟสในแนว I_d ในเชิงความถี่ ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีของปรัค์เวกเตอเร่ในแกนแนว I_d เชิงความถี่ โดยวิธี (Fast Fourier Transform) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์จากการเยื่องศูนย์ รายงานผลแบบ ไร์สายแบบเวลาจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณความผิดปกติที่ความถี่แบบข้าง กับระดับเยื่องศูนย์เมื่อมอเตอร์มีขนาดเดียวกันด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาและหาวิธีการสร้างอัลกอริทึมตรวจสอบระดับเยื่องศูนย์มอเตอร์

1.2.3 สร้างเครื่องมือเฝ้าตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์และวินิจฉัยระดับเยื่องศูนย์ของมอเตอร์ ไร์สายแบบเวลาจริง

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

ออกแบบและสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการเฝ้าตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์

1.3.1 ในงานวิจัยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบกรุงกระอก ขนาดพิกัด 7.5 kW จำนวน 3 ตัว

1.3.2 ศึกษาใช้ในโครงตน โทรลเลอร์คำนวณทางคณิตศาสตร์ จากสัญญาณกระแส เสตเตอร์เพื่อสร้างอัลกอริทึมในการวินิจฉัยความผิดปกติมอเตอร์จากการเยื่องศูนย์

1.3.3 ออกแบบและสร้างเครื่องมือเฝ้าตรวจวัดวินิจฉัยระดับเยื่องศูนย์ของมอเตอร์ ไร้สายแบบเวลาจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลตัวบ่งชี้ระดับการเยื่องศูนย์มอเตอร์โดยวิเคราะห์จากสัญญาณกระแส เสตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสที่มีขนาดพิกัดเดียวกัน

1.4.2 ได้วิธีการในการวิเคราะห์และวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์มอเตอร์

1.4.3 ได้ระบบเฝ้าตรวจเฝ้าตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์มอเตอร์ ไร้สายแบบเวลาจริง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาพบว่า ความผิดปกติมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสมีผู้วิจัยได้นำเสนอการเยื่องศูนย์ของแกนเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสใช้เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณกระแสเตเตอร์ทางโคลเมนความถี่พบร่วมกับในสภาวะไม่มีโหลดระยะ การเยื่องศูนย์ที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์ระหว่างกับขนาดของสเปกตรัมที่ความถี่แบบข้าง $f_{ecc} = |f_s \pm kf_r|$ ที่มากขึ้น ส่วนในสภาวะต่อโหลดเดิมพิกัดขนาดของสเปกตรัมนี้ความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะ การเยื่องศูนย์ที่เพิ่มขึ้นและสัญญาณของความผิดปกติของมอเตอร์จากการเยื่องศูนย์ที่วัดจากทั้ง 3 เฟสมีขนาดเท่ากัน [1] ต่อมา มีผู้เสนองานวิจัยการหาระยะเยื่องศูนย์ของแกนเพลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยวิเคราะห์กระแสเตเตอร์ในขณะไม่มีโหลดเชิงปริมาณ ผลงานวิจัยพบว่า มอเตอร์ขนาดเดียวกันระดับการเยื่องศูนย์ที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับขนาดของสัญญาณความถี่แบบข้างสามารถใช้เป็นข้อมูลตัดสินว่าระยะเยื่องศูนย์อยู่ในระดับใดได้ และการเปรียบเทียบสัญญาณความผิดปกติของกระแสไฟฟ้าที่มีผลจากการเยื่องศูนย์มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดต่างกัน พบว่าสัญญาณความผิดปกติมีค่าต่างกันไม่สามารถใช้เป็นระดับอ้างอิงการเยื่องศูนย์ได้ [2, 3]

นอกจากการใช้สัญญาณของกระแสเตเตอร์แล้ว ได้นำเสนองานวิจัย การตรวจจับความผิดปกติมอเตอร์จากความไม่สมดุลย์ของโหลดและการเยื่องศูนย์ของแกนเพลาจากผลกระทบของโหลด โดยวิเคราะห์สเปกตรัมจากสัญญาณกระแสเตเตอร์และสเปกตัมการสั่นสะเทือนพบว่า ขนาดของสเปกตรัมไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงระดับโหลดและระดับการสั่นสะเทือนจะลดลงเมื่อขนาดของโหลดเพิ่มขึ้น [5] ต่อมาได้มีผู้เสนองานวิจัย การตรวจจับระดับการสั่นสะเทือนของแกนเพลาของมอเตอร์ในแต่ละความไม่สมดุลของแกนเพลาโดยใช้เทคนิคทางแสง นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟประเมินความรุนแรงของการสั่นสะเทือนเพื่อหาคุณภาพของมอเตอร์ โดยใช้มอเตอร์ 3 ตัวที่มีอายุการใช้งานแตกต่างกัน พบว่าเครื่องมือและวิธีการสามารถใช้ได้ในการตรวจวัดในแต่ละความไม่สมดุลของแกนเพลาได้ดี [6]

นอกจากการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์จากขนาดสัญญาณในโดเมนความถี่จากการแปลง FFT แล้วได้เสนองานวิจัยการเฝ้าระวังนิจจัยการผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำอันเนื่องจากแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสไม่สมดุลและขาดหายไปหนึ่งเฟสใช้โดยเทคนิคการวิเคราะห์ สัญญาณกระแสสเตเตอร์ของ Current Park's Vector ($dq0$) แล้วใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการวินิจฉัยการเกิดความผิดปกติ พบว่าในงานวิจัยมีความถูกต้อง 97% [7] ต่อ ได้มีผู้เสนองานวิจัยการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์จากการลัดรอบ (Short Turn) โดยวิเคราะห์องค์ประกอบสเปกตรัมกระแส $dq0$ ของ Park's transform แล้วใช้เทคนิค DWT ในการลดสัญญาณรบกวนและจำแนกความผิดปกติของมอเตอร์จากการลัดรอบ (Short Turn) [8] ในปีเดียวกันนำเสนองานวิจัย การวิเคราะห์และวินิจฉัยความผิดปกติแบบความไม่สม่ำเสมอของช่องว่างอากาศแบบสแตติก โดยมีสภาวะโหลดแบบออนไลน์ โดยใช้สัญญาณจากเซนเซอร์หลายชนิด จากกระแสสเตเตอร์ การสั่นสะเทือน และเส้นแรงแม่เหล็ก วิเคราะห์ในโดเมนความถี่ (FFT) ใช้ข้อมูลคุณลักษณะและสถิติวิธีการ Weighted linear combination (WLC) ในการจำแนกชนิดความผิดปกติของมอเตอร์ [9] ต่อมาได้มีผู้นำเสนองานวิจัยการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำจากการเยื่องศูนย์ของแกนเพลามอเตอร์ โดยวิธีรู้จำและสัมประสิทธิ์เชปตัมของเวกเตอร์คุณลักษณะของสัญญาณ ใช้เป็นฐานข้อมูลการเยื่องศูนย์โดยแบบจำลองซิกเด็นมาร์คอฟ (Hidden Markov Model:HMM) และใช้การแปลงเวฟเลท (Wavelet Transform) ในส่วนหน้าเพื่อเพิ่มผลอัตราการรู้จำ พบว่าสามารถเพิ่มอัตรารู้จำได้ถึง 95.58% และมีอัตราการรู้จำสูงขึ้น 22.23% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สัมประสิทธิ์เชปตัมเปอร์เซนต์ [10] ต่อมาได้เสนองานวิจัยการตรวจวัดการเยื่องศูนย์ของแกนเพลามอเตอร์โดยวิเคราะห์จากสเปกตัมของกระแสสเตเตอร์และแรงบิดภายในให้สภาวะการเปลี่ยนแปลงระดับโหลดและระดับความเร็วของมอเตอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มระดับของโหลดและผลกระทบความเร็วของมอเตอร์ต่ำๆ จะมีผลต่อร้อยละของการเยื่องศูนย์ที่ลดลง [11] ต่อมาได้มีผู้นำเสนองานวิจัยในการตรวจความผิดปกติของมอเตอร์ (Normal, Misalignment, Unbalance, Bearing fault) ใช้สัญญาณกระแสสเตเตอร์ 3 เฟสและสัญญาณการสั่นสะเทือน ใช้เทคนิค Support Vector Machine (SVM) วิเคราะห์ในโดเมนความถี่และการจำแนกความผิดปกติของมอเตอร์ โดยใช้ kernel functions และ polynomial function ในเงื่อนไขการปรับระดับความเร็วของมอเตอร์และระดับของโหลด โดยในงานวิจัยมีความถูกต้อง 97.1% [12]

นอกจากงานวิจัยข้างต้นแล้วยังมีงานวิจัยที่ได้นำตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล มาใช้ในงานวิจัยดังนี้ ได้มีผู้นำเสนองานวิจัยระบบวัดสัญญาณกระแสโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega128L (Atmel) ควบคุมผ่าน AD7654 (Analog device) A/D Converter 16 bit ส่งข้อมูลผ่านอินเตอร์เน็ตเพื่อตรวจวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์ [13] และในปีเดียวกันได้เสนองานวิจัยพัฒนาระบบรายงานการเฝ้าระวังสอบความผิดปกติของมอเตอร์แบบเวลาจริงโดยใช้ สัญญาณกระแสสเตเตอร์

สัญญาณการสั่นสะเทือน แรงดัน และเส้นแรงแม่เหล็ก ระบบจะติดตั้งที่ตัวมอเตอร์และสามารถแสดงชนิดความผิดปกติและสามารถส่งข้อมูลผ่าน Network and Web Server [14] และต่อมาได้เสนอระบบเฝ้าตรวจวินิจฉัยความผิดปกติมอเตอร์แบบส่งข้อมูลระบบสื่อสารไร้สาย (WSN) โดยระบบวัดสัญญาณจากการสั่นสะเทือนจาก accelerometer sensor ที่ติดตั้งที่ตัวมอเตอร์แล้วส่งข้อมูลผ่านระบบสื่อสารไร้สายที่เรียกว่า Zigbee/IEEE 802.15.4 ให้กับชุดแม่เพื่อตรวจสอบความผิดปกติและรายงานผลกระทบของระบบเฝ้าตรวจวินิจฉัยความผิดปกติได้ [15]

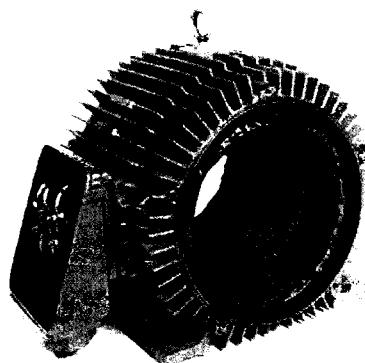
2.2 มอเตอร์เหนียวนำสำหรับเฟส

เป็นที่ทราบกันดีในปัจจุบัน ได้มีการนำมอเตอร์เหนียวนำมาใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีข้อดีด้านโครงสร้างและการทำงาน ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาความผิดปกติของมอเตอร์เหนียวนำ 3 เฟส ชนิด โรเตอร์ เป็นแบบวงกระรอก ดังนั้นก่อนจะนำไปสู่การวินิจฉัยความผิดปกติจะต้องศึกษา ทฤษฎีพื้นฐานของมอเตอร์เหนียวนำ ได้แก่ โครงสร้างของมอเตอร์เหนียวนำ หลักการทำงานของมอเตอร์เหนียวนำโดยรวม ไปถึงการวิเคราะห์วงจรสมมูล การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ การผิดปกติจากสาเหตุต่างๆ ของมอเตอร์ ทฤษฎีพื้นฐานกรณีความไม่สมมาตรของเกนโรเตอร์ และการวิเคราะห์ความผิดปกติกรณีความไม่สมมาตรของเกนโรเตอร์

2.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนียวนำสำหรับเฟส

สามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วนคือ ส่วนของสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และส่วนของโรเตอร์ (Rotor) เป็นส่วนที่หมุน แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1.1 สเตเตอร์ (Stator) สเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่นิ่งกับที่มีโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.1

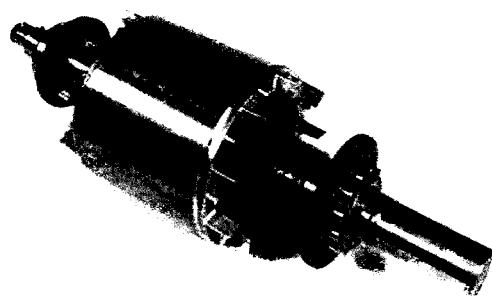


ภาพที่ 2.1 สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนียวนำ 3 เฟส

ชิ้นสเตเตอร์ประกอบด้วยแผ่นลามิเนทซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าซิลิกอน อัดประับซ้อนกันเป็นตัวถังรูปทรงกระบอกเพื่อทำหน้าที่เป็นสล็อต (Slot) เป็นทางเดินของสนามแม่เหล็ก มีขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) ฝังตัวอยู่ในร่องสล็อตของแกนเหล็ก โดยขดลวดของแต่ละเฟสจะมีการพันจะจัดวางให้กระจายรอบๆ ทรงกระบอก ทำให้สามารถใช้แกนเหล็กและขดลวดอาร์เมเจอร์อย่างมีประสิทธิผล ทำให้การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและการสร้างแรงบิดแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอได้ดีขึ้น

2.2.1.2 โรเตอร์ (Rotor) โรเตอร์ของมอเตอร์เป็นส่วนของการหมุนเป็นทรงกระบอก (Cylindrical rotor) สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทดังนี้

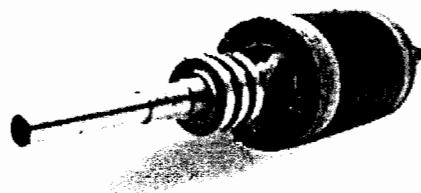
1) โรเตอร์แบบกรงกระอก (Squirrel cage rotor) โรเตอร์ชนิดนี้แกนของโรเตอร์ทำด้วยเหล็กลามิเนท (Laminated sheet steel) ภายหลังจะเป็นร่องสำหรับอัดแท่งตัวนำทองแดงหรืออะลูมิเนียมฝังในร่อง โรเตอร์และปิดท้ายวงแหวนทองแดงหรืออะลูมิเนียมเพื่อตัวคงจรขดลวด เมื่อนำแกน โรเตอร์เข้าไปปะรังแบบพิมพ์ (Mold) แล้วฉีดอะลูมิเนียมเหลวเข้าไปจะได้รีบบี้นออกไปทั้งสองข้างใช้เป็นในพัฒนากลไกความร้อน รูปร่างของโรเตอร์แบบกรงกระออก ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โรเตอร์ของมอเตอร์หนี่ยวน้ำแบบกรงกระออก

2) โรเตอร์แบบขดลวดพันรอบ โรเตอร์ (Wound rotor) โรเตอร์แบบนี้แตกต่างกับแบบกรงกระออก คือมีขดลวดพันอยู่ในร่องสล็อต เช่นเดียวกับสเตเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดจะต่ออยู่กับวงแหวนลื่น (Slip ring) และมีแปรรูปถ่านสัมผัสอยู่โดยแบล็คถ่านจะต่อ กับวงจรภายนอกเพื่อทำการต่อวงจรสตาร์ท แบบสตาร์ หรือเดลต้า มอเตอร์ที่มีโรเตอร์ประเภทนี้มีข้อจำกัดคือจำต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วของสเตเตอร์ และไม่สามารถด้วยความเร็วมากได้เนื่องจากความแข็งแกร่งทางกลต่ำ นอกจานนี้ราคาซึ่งสูงเมื่อเทียบกับโรเตอร์แบบกรงกระออก

แต่มีข้อดีของโรเตอร์ประเกนท์คือสามารถกำหนดแรงบิดขณะการสตาร์ทโดยอาศัยการต่อความต้านทานภายนอกรูป่างของโรเตอร์แบบขาด漉ดพันรอบโรเตอร์ ดังภาพที่ 2.3

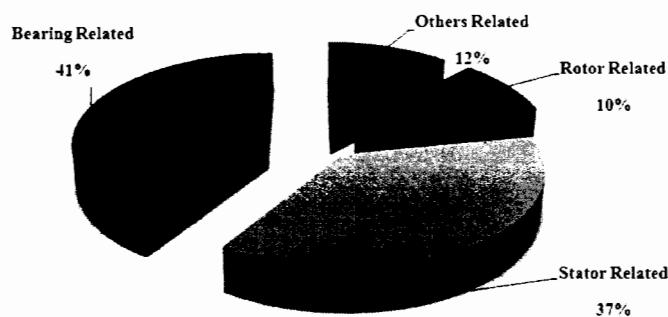


ภาพที่ 2.3 โรเตอร์แบบขาด漉ดพันรอบโรเตอร์

2.3 ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นผลมาจากการไม่สมมาตรของส่วนประกอบนั้นในมอเตอร์ การชำรุดเสียหายบางกรณีก็สามารถสังเกตได้ด้วยประสบการณ์ แต่บางกรณีก็ต้องอาศัยสัญญาณที่อยู่ในมอเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดความถี่ที่ความผิดปกติต่าง ๆ ตามประเภท ความผิดปกติของมอเตอร์นั้น ๆ รวมอยู่ในสัญญาณกระแส แรงดัน เส้นแรงแม่เหล็ก การสั่นสะเทือน และสัญญาณอื่น ๆ ซึ่งจากการศึกษาของ [14] ผลการศึกษาจำแนกข้อมูลร่องในแต่ละชั้นส่วนของมอเตอร์จากชำรุด ดังภาพที่ 2.4

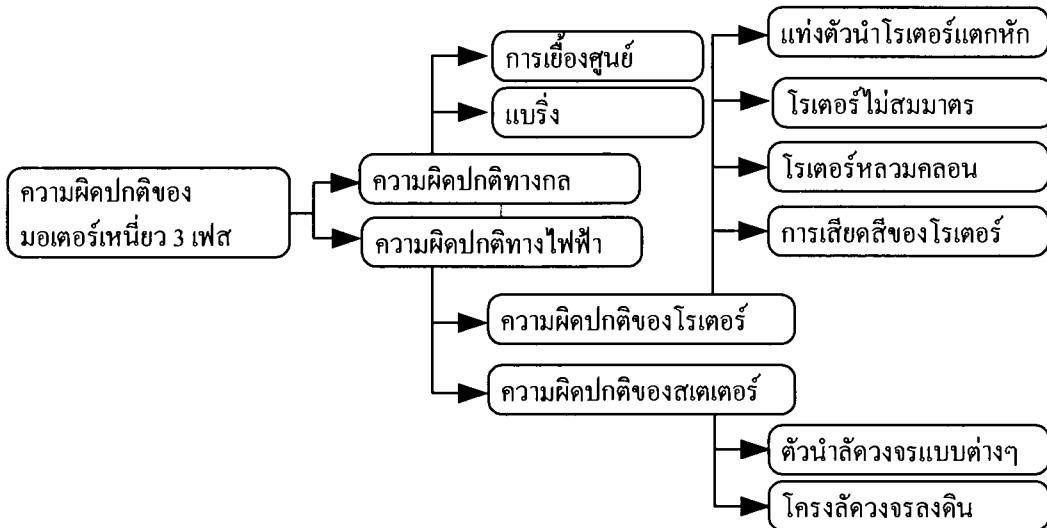
จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการชำรุดเสียหายจะเกิดขึ้นที่ตลับลูกปืนเป็นส่วนใหญ่ และรองลงมาจะเป็นขาด漉ดสเตเตอร์



ภาพที่ 2.4 การจำแนกการชำรุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.3.1 การความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากการศึกษาประเภทของความผิดปกติของมอเตอร์ สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ผังการจำแนกความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2.3.1.1 ความผิดปกติของมอเตอร์ทางกล เป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์เป็นผลทำให้ชิ้นส่วนของมอเตอร์มีอายุการใช้งานสั้นลงความผิดปกติที่พบทั่วไป คือเกิดการเมืองศูนย์ ของแนวแกน (Misalignment) การหลุดคลอนทางกล การโถ่ของเพลา การเสียดสีกันของชิ้นส่วน การเมืองศูนย์ (Eccentric) และจะส่งผลถึงตัวลับลูกปืน (Bearing) ของมอเตอร์ซุครุดได้

2.3.1.2 ความผิดปกติของมอเตอร์ทางไฟฟ้า ประกอบด้วยการชำรุดของ ส่วนประกอบ

ของสเตเตอร์และการชำรุดของโรเตอร์ สาเหตุการชำรุดมาจากการความเค้นและความเรียดที่กระทำกับ มอเตอร์ โดยการรับภาระจากอุณหภูมิ แรงดึงทางแม่เหล็ก แรงทางกล และสภาพแวดล้อม

1) ความผิดปกติที่โรเตอร์ (Rotor Fault)จากการชำรุดโรเตอร์ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น 10% จากการชำรุดทั้งหมด เมื่อโรเตอร์ชำรุดจะแสดงผลทางกายภาพและ อาการของมอเตอร์ดังนี้

- แท่งตัวนำโรเตอร์แตกหัก (Broken Rotor Bar) เกิดจากการ สตาร์ทมอเตอร์ในสภาวะมีโหลดสูงบ่อยครั้ง โดยเฉพาะมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ การสตาร์ทมอเตอร์ ทำให้เกิดความเครียดบนตัวนำโรเตอร์ เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำสูงสุดหรือการเริ่มเดิน โดยความเร็วต่ำกว่าความเร็วซิงโคนัสนมาก เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำจำนวนก่อให้เกิดความ

ร้อนและขยายตัวที่ตัวโรเตอร์ ทำให้ค่าความด้านทานทางไฟฟ้าในแต่ละตัวนำไม่เท่ากัน ส่งผลทำให้อุณหภูมิของเตล็ดตัวนำไม่เท่ากันและการขยายตัวที่ไม่เท่ากันแล้วนำไปสู่การแตกหักของโรเตอร์

- โรเตอร์ไม่สมมาตร (Eccentric Rotor) เกิดขึ้นจากรูปทรงของโรเตอร์ไม่สมมาตร ทำให้เกิดแรงไม่สมดุลทางสนามแม่เหล็ก (Unbalance Magnetic Pull) ส่งผลทำให้เกิดปัญหาการแตกหักของช่วงนวนคลอดสเตเตเตอร์ และนำไปสู่การชำรุดเสียหายของสเตเตเตอร์ต่อไป

- โรเตอร์หลวมคอน (Loose Rotor) การหลวมคอนของโรเตอร์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของโหลดหรือแรงดันไฟฟ้า ทำให้โรเตอร์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น และเกิดการขยายตัวของโรเตอร์ และบางครั้งอาจทำให้โรเตอร์คลอนแกว่งไปมาแล้วทำให้เกิดการสั่นได้

- การเสียดสีของโรเตอร์ (Rotor Rub) การเสียดสีของโรเตอร์จาก การหมุนกับส่วนที่อยู่กับที่ จะเกิดในแนวรัศมี (Radial) บางครั้งอาจเกิดในแนวแกนได้ เช่น กันถังมีแรงม้ากระทำในแนวแกนมากพอที่จะทำให้เสียดสีกันได้

2) ความผิดปกติที่สเตเตเตอร์(Stator Fault) จากการชำรุดสเตเตเตอร์ของ มอเตอร์เนี้ยวนำที่เกิดขึ้น 37% จากการชำรุดทั้งหมด โดยสาเหตุเริ่มมาจากความผิดปกติของ ชุดลวดสเตเตเตอร์ภายในชุดเดียวกัน และตามไปที่ชุดต่อชุด เพสต่อเพส หรืออาจตามไปที่เพสต่อกราวด์ แล้วทำให้มอเตอร์ชำรุดเสียหายใช้งานไม่ได้

- ตัวนำลัดวงจรแบบต่างๆ ภายในสเตเตเตอร์ เรียกว่าลัคดรอบ (Short turn) หรือลัดวงจร การลัดวงจรของชุดลวดสเตเตเตอร์ เช่น เกิดขึ้นระหว่างเพสเดียวกัน ระหว่างลัดวงจรของเพสต่อเพส หรือระหว่างลัดวงจรของเพสทั้งหมด ลัดวงจรระหว่างชุดลวดเพสกับแกนสเตเตเตอร์ ความผิดปกติเหล่านี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงฉับพลันและเกิดรอยขูดขีดขึ้นที่ชุดลวดสเตเตเตอร์

- การหายไปของชุดลวดสเตเตเตอร์บางเพส หรือกรณีวงจรเปิด (Open-Circuit single phase) มอเตอร์ทำงานไม่สมบูรณ์กระแสไฟฟ้าไหลเข้าชุดลวดสเตเตเตอร์ไม่ครบ ทุกเพส ในขณะที่ทำงานถ้าไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าชุดลวดสเตเตเตอร์ไม่ครบ หมายความว่ามีการขาดวงจร แต่เมื่อมอเตอร์ทำงานในภาวะโหลดความเสียหายจะมากกว่า แต่จะสังเกตเห็นความผิดปกติได้ไม่ชัดเจนนัก ต่างจากความผิดปกติจากการลัดวงจร

2.3.2 การตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์

ในการตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์เห็นได้ว่าสามารถตรวจวัดได้ระบบทางกล เช่น การวิเคราะห์จากการสั่นสะเทือน เสียงรบกวน การหมุนไม่นิ่ง และทางไฟฟ้า เช่น จากการวัดกระแส การวัดแม่เหล็กไฟฟ้าร่วม การวัดความผิดปกติของฟลักซ์แม่เหล็ก การวัดความผิดปกติของอุณหภูมิ

2.3.2.1 การวัดและวิเคราะห์จากการสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) เมื่อมอเตอร์มีความผิดปกติ จะเกิดการสั่นสะเทือน ใช้ทรายส่วนเชอร์วัคแรงสั่นสะเทือนของมอเตอร์ ทางกลศาสตร์ ใช้วัดค่าความสั่นสะเทือนความเร็ว วัดค่าความสั่นสะเทือนความเร่ง และวัดค่าความสั่นสะเทือนระยะทาง ซึ่งจะติดตั้งที่ต่อลับลูกปืน โดยวิเคราะห์เชิงความถี่

2.3.2.2 การวัดและวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสสเตเตเตอร์มอเตอร์ (Motor Current Signature Analysis) เป็นวิธีที่สามารถตรวจจับได้ง่าย ถึงแม้มอเตอร์จะอยู่ในที่อันตรายและไม่สามารถเข้าตรวจสอบได้ โดยวัดกระแสที่ที่จ่ายให้กับมอเตอร์แล้วนำมาระบุหาความผิดปกติ มอเตอร์ โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์

2.3.2.3 การวัดและวิเคราะห์จากอุณหภูมิ (Temperature Analysis) โดยแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ตามมาตรฐานของ NEMA (MG-12.43) กำหนดแรงดันที่ $\pm 10\%$ ซึ่งถ้าสูงหรือต่ำกว่านี้ทำให้มอเตอร์มีอายุการใช้งานลดลง ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ เนื่องมาจากความร้อนของอุณหภูมิที่อยู่รอบบริเวณตัวมอเตอร์ จากมาตรฐาน NEMA ได้ออกแบบให้มอเตอร์ทำงานในอุณหภูมิแรกล้อมสูงสุดที่ 40 องศาเซลเซียส

2.3.2.4 การวัดทางเสียง (Acoustic Emission Analysis) วัดความผิดปกติของต่อลับลูกปืนโดยวัดสัญญาณเสียงอุตตราโซนิกและเสียงในระดับที่มนุษย์ได้ยิน โดยเปียโซอิเลคทริก นอกจากจะใช้ตรวจวัดความผิดปกติจากต่อลับลูกปืนแล้วยังใช้วิเคราะห์หาความผิดปกติของการหลอนถอนของคลื่นด้วย

2.3.2.5 การตรวจจับคลื่นสเตเตเตอร์ลัดวงจรโดยใช้ผลรวมแรงดันไฟฟ้า ชั้นพลัน โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานอาศัยการเปลี่ยนแปลงหรือการไม่สมดุลของค่าอิมพีเดนซ์ของแต่ละเฟสของมอเตอร์เห็นได้ว่า ถ้าไม่มีฟอลต์เมื่อจากความไม่สมดุลจะได้ผลรวมของแรงดันที่เวลาชั้นพลันเท่าศูนย์ และเมื่อผลรวมของแรงดันไม่เท่ากับศูนย์นั้นหมายความว่าเกิดกรณีฟอลต์จากชั้นคลื่นสเตเตเตอร์ลัดวงจร

2.3.3 อัลกอริทึมการตรวจจับ

ในการตรวจจับความผิดปกติมอเตอร์ ใช้การประมวลผลแนวใหม่ชั้นสูง ต่างๆ เพื่อประยุกต์ใช้กับงานเฝ้าตรวจมอเตอร์ไฟฟ้า ทั้งในการวิเคราะห์ในทางโคล เมนเวลา และการแปลงในโคล เมนความถี่ โดยตรวจสอบหาขนาดและเฟสของスペกตรัมของการเกิดความผิดปกติ อัลกอริทึมการตรวจจับมีดังนี้ [16]

2.3.3.1 การแปลงฟูเรียร์เร็ว (Fast Fourier Transform), FFT ทำการแปลงสัญญาณในโคล เมนเวลาเป็นโคล เมนทางความถี่ เพื่อวิเคราะห์ขนาดスペกตรัมที่ความถี่ที่มอเตอร์ผิดปกติ

2.3.3.2 ไบสเปกตรัม (Bispectrum) วิธีไบสเปกตรัมคือเรียกว่าスペกตรัมอันดับสามที่พิสูจน์มาจากสถิติอันดับสูง ในการหาเทอมของการแปลงฟูเรียร์ 2 มิติ หาได้ทั้งขนาดและเฟสของสัญญาณ ได้เช่นกัน การตรวจจับความไม่สมดุลของแรงดันสเตเตอร์

2.3.3.3 การวิเคราะห์スペกตรัมความละเอียดสูง (High Resolution Spectral Analysis) จากจากวิธีการแปลง FFT นั้นปัญหาของการประมาณค่าของスペกตรัม คือผลกระทบของการร้าวไฟลของโอลบข้าง สามารถใช้วิธี MEM (Maxi-mun Entropy Method) เพื่อแก้ปัญหารื่องการร้าวไฟลของスペกตรัม ได้อีกด้วย การเปลี่ยนแปลงโนเมลของ MEM จะขึ้นอยู่กับโนเมลพารามิเตอร์ สามารถประยุกต์ใช้คำนวณความเร็วมอเตอร์และตรวจจับชำรุดอนิกาได้อย่างแม่นยำ

2.3.3.4 การวิเคราะห์เวฟเลต (Wavelet Analysis) การวิเคราะห์แบบเวฟเลต ได้นำมาวิเคราะห์ความผิดปกติมอเตอร์ในสภาวะทันทีทันใด และสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ ปัญหาดังกล่าวนำมาวิเคราะห์ช่วงเวลาสั้นๆ หรือช่วงเวลาที่ต้องการ ที่เรียกว่า (Short-Time Fourier Transform, STFT) หรือเทคนิคหน้าต่าง (Windowing Technique) ข้อเสียของวิธีนี้คือขนาดของหน้าต่าง เหมาะสมกับการวิเคราะห์ช่วงขณะตรวจจับความผิดปกติมอเตอร์ โดยใช้สัญญาณกระแสเตอร์ในขณะสตาร์ทมอเตอร์

2.3.3.5 เวคเตอร์ของปาร์ค (Park's Vector) ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสจากการแปลงรูปแบบของ แรงดัน กระแส และฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยว กล้องที่เกี่ยวข้องกับสเตเตอร์ จากการอบอ้างอิงสามเฟส abc แปลงสู่กรอบอ้างอิง 2 เฟส dq0 เพื่อตรวจจับความผิดปกติมอเตอร์จากแท่งตัวนำโรเตอร์ การไม่สม่ำเสมอของว่างอากาศ การเยื้องศูนย์ เป็นต้น

2.3.4 วิธีการวินิจฉัยความผิดปกติของมอเตอร์เห็นได้ชัด

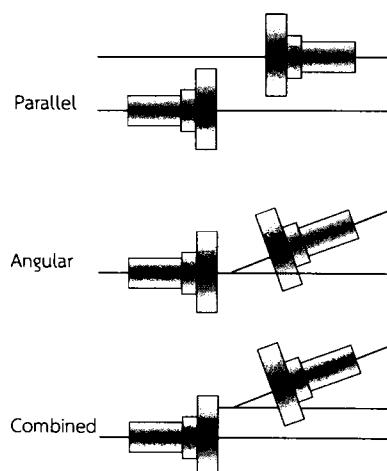
ในการวินิจฉัย สำหรับใช้ในการตัดสินใจ ซึ่งบอกถึงระดับความรุนแรงความผิดปกติของมอเตอร์ จากการศึกษาพบว่าสามารถใช้วิธีฟลูซ์โลจิก (Fuzzy Logic) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบฟลูซ์โลจิก การใช้วิธีดังกล่าวจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน โดยการนำข้อดีของฟลูซ์โลจิกที่การมีเหตุผลเชิงตรรกะและการนำดีของโครงข่ายประสาทเทียมคือการเรียนรู้จากข้อมูล โดยนำทั้งสองรวมกันเรียกว่า โครงข่ายประสาทเทียมแบบฟลูซ์ นอกจากนั้นยังมีการใช้ขนาดของสเปกตรัมของความถี่ชาร์มอนิกที่เกิดความผิดปกติของมอเตอร์ช่วยในการตัดสินใจ และใช้ข้อมูลทางสถิติในการบอกรถึงระดับความรุนแรงความผิดปกติของมอเตอร์

2.4 การเยื่องศูนย์ของแกนเพลามอเตอร์และการวิเคราะห์การเยื่องศูนย์ของมอเตอร์เห็นได้ชัด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการลักษณะของการเยื่องศูนย์ของแกนเพลามอเตอร์ ผลกระทบของค่าซึ่งขึ้นชี้บ่งจากอาการจากการเยื่องศูนย์ การวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่จากการเยื่องศูนย์ของมอเตอร์

2.4.1 ลักษณะของการเยื่องศูนย์ของแกนเพลามอเตอร์

จากการวิจัยหลายงานวิจัยพบว่าการเยื่องศูนย์เกิดจากการผลิตและประกอบชิ้นส่วนต่างๆ หรือเกิดจากการติดตั้งเครื่องจักรที่ไม่แม่นยำ เช่น จุดศูนย์กลางผิดเพี้ยน ไปจากตำแหน่งที่กำหนดไว้ทำให้ระยะห่างจากแกนหมุนไม่คงที่ และ โหลดที่ต่อ กับ มอเตอร์เห็นได้ชัดแนวแกนเพลามอเตอร์ไม่เป็นเส้นตรง (Shaft Misalignment) สามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ แสดงดังภาพที่ 2.6 [17]



ภาพที่ 2.6 ลักษณะการเกิดการเยื่องศูนย์ของแกนเพลามอเตอร์

2.4.1.1 Parallel misalignment เมื่อแนวแกนเพลามอเตอร์ต่อ กับ โหลด มีแนวระนาบเดียวกันแต่ศูนย์กลางจุดหมุนของแต่ละแกนเพลามนานกัน

2.4.1.2 Angular misalignment เมื่อแนวแกนเพลามอเตอร์ต่อ กับ โหลด อยู่ในแนวระนาบเดียวกันแต่ศูนย์กลางจุดหมุนทำมุมซึ่งกันและกัน

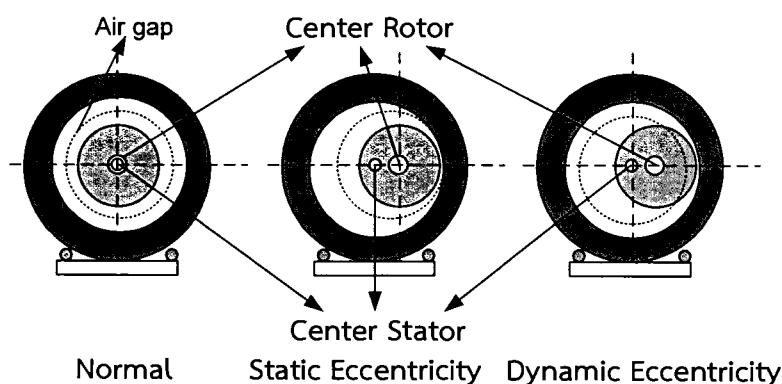
2.4.1.3 Combined Misalignment เมื่อแนวแกนเพลามอเตอร์ต่อ กับ โหลด ไม่อยู่ในแนวระนาบเดียวกันและศูนย์กลางจุดหมุนทำมุมซึ่งกันและกัน

2.4.2 ผลกระทบของช่องว่างอากาศจากการเยื่องศูนย์

จากลักษณะการเยื่องศูนย์ข้างต้น เป็นผลทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของช่องอากาศ (Air-gap) ระหว่าง โรเตอร์ กับ สเตเตอร์ สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด [1, 2]

2.4.2.1 การเยื่องศูนย์แบบสแตติก (Static Eccentricity) เกิดจากแกนเพลามอเตอร์ถูกบังคับให้ไปด้านใดด้านหนึ่งของมอเตอร์ส่งผลต่อการหมุนของโรเตอร์จะไม่หมุนรอบจุดศูนย์กลางสนามแม่เหล็กหมุนแต่จะหมุนรอบจุดศูนย์กลางตัวเอง แสดงดังภาพที่ 2.7

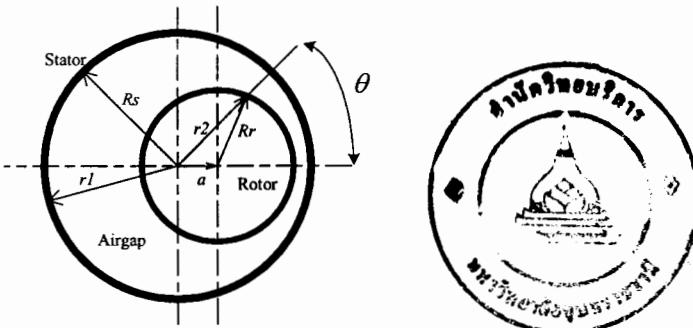
2.4.2.2 การเยื่องศูนย์แบบไดนามิก (Dynamic Eccentricity) เกิดจากแกนเพลามอเตอร์ถูกบังคับให้ไปด้านใดด้านหนึ่งของมอเตอร์ เมื่อเกิดการหมุนจะทำให้ตำแหน่งของโรเตอร์ถูกบังคับหมุนรอบจุดศูนย์กลางสนามแม่เหล็กหมุน แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะความไม่สม่ำเสมอของช่องว่างอากาศระหว่าง สเตเตอร์ และ โรเตอร์

2.4.3 ผลกระทบของค่าซึ่งขึ้นชื่องว่างอากาศจากการเยื่องศูนย์

เมื่อเกิดความไม่สม่ำเสมอของช่องอากาศของมอเตอร์ดังภาพที่ 2.8 และสามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเยื่องศูนย์และการเปลี่ยนแปลงช่องว่างได้ตามสมการ (2.1), (2.2) และ (2.3) [3, 18]



ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนช่องว่างอากาศเมื่อมอเตอร์เกิดการเยื่องศูนย์

โครงสร้างมอเตอร์ ระยะจากจุดศูนย์กลางการหมุนของมอเตอร์ถึงผิวค้านในของสเตเตอร์ จะเท่ากับรัศมีของสเตเตอร์

$$r_1 = R_s \quad (2.1)$$

จากภาพที่ 2.8 มอเตอร์เกิดการเยื่องศูนย์จะทำให้ระยะช่องว่างอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง สมการของจุดใดๆ ที่ผิวโรเตอร์ในระบบเชิงขี้วแสดงได้ในสมการที่ (2.2)

$$r_2 = a \cos \theta + \sqrt{R_r^2 - (a \sin^2 \theta)} \quad (2.2)$$

ระยะห่างช่องอากาศที่องศาใดๆ ดังแสดงในสมการที่ (2.30)

$$g_s(\theta) = R_s - a \cos \theta - R_r \sqrt{1 - \frac{a^2}{R_r^2} \sin^2 \theta} \quad (2.3)$$

เมื่อมอเตอร์เกิดการเยื่องศูนย์แบบสเตติก $R_s >> a$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.3) สามารถประมาณการเยื่องศูนย์ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$g_s(\theta) \approx l_g - a \cos \theta \quad (2.4)$$

ซึ่งการเยื่องศูนย์มอเตอร์จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการซึมซับแม่เหล็กของช่องอากาศ (Air-gap Permeance) ดังสมการ (2.5)

$$\Lambda_{se} = \frac{1}{g_s} = \frac{1}{l_g - a \cos \theta} = \frac{1}{g(1 - \varepsilon \cos \theta)} \quad (2.5)$$

โดยที่

$$\varepsilon = \frac{a}{l_g} \quad (2.6)$$

การซึมซับแม่เหล็กของช่องอากาศ สามารถแสดงด้วยอนุกรมฟูเรีย์ได้ตามสมการ (2.7)

$$\Lambda_{se} = \frac{1}{l_s} (\Lambda_0 + \Lambda_1 \cos \theta + \dots) \quad (2.7)$$

สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\Lambda_{se}(\theta) = \sum_{i_{se}}^{\infty} \Lambda_{i_{se}} \cos i_{se} \theta \quad (2.8)$$

โดยที่

$$\Lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (2.9)$$

$$\Lambda i_{se} = 2 \frac{[1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2}]^{i_{se}}}{\varepsilon^{i_{se}} \sqrt{1 - \varepsilon^2}} \quad (2.10)$$

ในการณ์ที่มอเตอร์มีการเยื่องศูนย์แบบไคนามิก มอเตอร์จะหมุนรอบจุดศูนย์กลางของแกนหมุนด้วย $\omega_r t$ การเปลี่ยนแปลงของมุม θ' จะสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์มุม θ ที่สัมพันธ์กับการเยื่องศูนย์ ดังแสดงในสมการ (2.11) และ (2.12)

$$\theta' = \theta - \omega_r t \quad (2.11)$$

$$\omega_r = (1-s) \frac{\omega}{p} \quad (2.12)$$

เมื่อมอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงช่องอากาศแบบไคนามิก เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.11) และ (2.12) ในสมการที่ (2.7) ได้สมการของค่าการซึ่งชั้บทางแม่เหล็ก ดังแสดงในสมการ (2.13)

$$\Lambda_{de}(\theta, t) = \sum_{i_{de}=0}^{\infty} \Lambda_{i_{se}} \cos[i_{de}(\theta - \omega_r t)] \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.7) และ (2.13) แสดงความสัมพันธ์ของค่าซึ่งชั้บทางแม่เหล็กของช่องว่างอากาศเมื่อเกิดการเยื่องศูนย์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าระยะเยื่องศูนย์และความเร็วของโรเตอร์ที่ส่งผลกับการเปลี่ยนแปลงค่าซึ่งชั้บทางแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ เป็นผลให้ความหนาแน่นแม่เหล็กเกิดไม่สม่ำเสมอตัว

2.4.4 การวิเคราะห์สัญญาณเชิงความถี่จากการเยื่องศูนย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากหลักการมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส จะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยสนามแม่เหล็กหมุนทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าถูกมอดูลูเลตกับค่าซึ่งชั้บทางแม่เหล็กของช่องว่างอากาศไปเห็นได้ว่ากับโรเตอร์ ทำให้เกิดกระแสที่โรเตอร์ แต่เมื่อมอเตอร์เกิดการเยื่องศูนย์ทำให้ว่างช่องว่างอากาศไม่สม่ำเสมอ เกิดชาร์มอนิกขึ้นส่งผลทำให้เกิดกระแสและแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์จะเป็นชาร์มอนิกเช่นเดียวกัน ดังสมการที่ (2.14) และ (2.15) แสดงเพิ่มเติมในภาคผนวก ข [8]

$$F(\theta, t)_h = \sum_{\mu=1}^{\infty} \hat{F}_\mu \cos(\mu p \theta - \omega_\mu t) \quad (2.14)$$

$$\omega_\mu = \omega_l \left[1 + \frac{g_2 Q_r (1-s)}{p} \right] \quad (2.15)$$

กระแสชาร์มอนิกที่ไหลในแท่งตัวนำในโรเตอร์ ซึ่งโรเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเร็ว ω_μ ผ่านช่องอากาศตัดขาดลวดสแตเตอเรอร์ เกิดการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็ก (Air gap flux density) ดังแสดงในสมการที่ (2.16)

$$B(\theta, t) = \Lambda(\theta, t).F(\theta, t)_h \quad (2.16)$$

โดยที่ค่าของ $\Lambda(\theta, t)$ จะประกอบด้วยผลรวมค่าการซึมซับทางแม่เหล็กสามส่วนดังแสดงในสมการที่ (2.17)

$$\Lambda(\theta, t) = [\Lambda_0 + \Lambda_{se} \cos(\theta) + \Lambda_{de} \cos(\theta - \omega t)] \quad (2.17)$$

แทนค่าสมการที่ (2.14) และ (2.17) ในสมการที่ (2.16) ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสามารถแสดงเป็นสมการใหม่ที่ (2.18)

$$B(\theta, t) = \Lambda_0 \left[\sum_{\mu=1}^{\infty} \overset{\Lambda}{F}_r \cos(\mu p \theta - \omega_\mu t) \right]_l + \\ \left[\frac{\Lambda_{se}}{2} \sum_{\mu=1}^{\infty} \overset{\Lambda}{F}_r \{ \cos[(\mu p + 1)\theta - \omega_\mu t] + \cos[(\mu p - 1)\theta + \omega_\mu t] \} \right] + \\ \left[\frac{\Lambda_{de}}{2} \sum_{\mu=1}^{\infty} \overset{\Lambda}{F}_r \{ \cos[(\mu p + 1)\theta - (\omega_\mu + \frac{\omega_r}{p})t] + \cos[(\mu p - 1)\theta + (\omega_\mu - \frac{\omega_r}{p})t] \} \right] \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) แสดงให้เห็นการมดูเดตของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้เกิดความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในช่องอากาศที่ตัดกับชุดลวดสแตเตอเรอร์ โดยแบ่งออกเป็นสามส่วนดังนี้

- (1) ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ความถี่หลัก
- (2) ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเยื่องศูนย์แบบสแตติก
- (3) ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเยื่องศูนย์แบบไนโอมิก

จากสมการที่ (2.18) ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาได้ความถี่ที่เกิดการเหนี่ยวนำดังสมการที่ (2.19)

$$f_{ind} = \frac{1}{2\pi} \left[(\omega_\mu \pm \frac{\omega_r}{p}) \right] \quad (2.19)$$

เมื่อพิจารณาเพียงชาร์มอนิกอันดับที่หนึ่ง โดยแทนค่าสมการที่ (2.15) ลงในสมการที่ (2.19) จะแสดงได้ดังสมการที่ (2.20)

$$f_{ecc} = \left[(kQ_r \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm n \right] f_s \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) เมื่อไม่พิจารณาชาร์มอนิกที่ผลกระแทบจากแท่งตัวนำของโรเตอร์สามารถเขียนใหม่ได้สมการที่ (2.21)

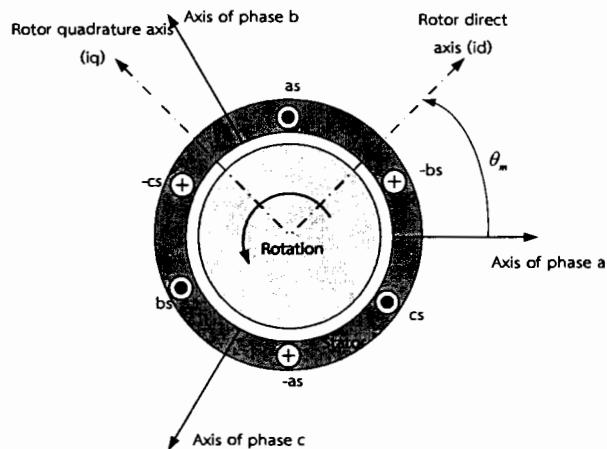
$$f_{ecc} = f_s \pm mf_r = f_s \left[(1 \pm k) \frac{(1-s)}{p} \right] \quad (2.21)$$

สามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงซึ่งว่างอากาศอันเนื่องจากการเยื้องศูนย์นั้นจะส่งผลต่อขนาดสัญญาณความถี่แบบข้างที่ความถี่ $f_r \pm f_s$

2.5 The dq0 Transformation

ในการวิเคราะห์หม้อเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสนั้นได้มีการนำเสนอการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ แรงดัน กระแส และฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสเตเตอร์ ให้อยู่ในรูปของตัวแปรที่หมุนไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของโรเตอร์เพื่อกำจัดตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามของขาของการหมุนของโรเตอร์ ที่เกิดจากสองปัจจัยอันได้แก่ ปัจจัยอันเนื่องมาจากการหมุนของโรเตอร์ และปัจจัยอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของค่าริลัคเคนซ์ (Reluctance) ของโรเตอร์ โดยการแปลงดังกล่าวกระทำโดยการแปลงตัวแปรต่างๆ ของขดลวด

สเตเตอเร่อร์ให้อยู่ในกรอบอ้างอิงโรเตอร์แสดงดังภาพที่ 2.9 ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเดียวกันกับโรเตอร์ นั่นเอง การแปลงดังกล่าวเรียกว่าการแปลงปาร์ก (Park's Transformation)



ภาพที่ 2.9 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสในระบบ abc ไปสู่กรอบอ้างอิงไดๆ ในระบบ $dq0$

จากภาพที่ 2.9 อธิบายการคำนวณฟังก์ชันของกระแสสเตเตอเร่อร์ของมอเตอร์ 3 เฟส i_a , i_b และ i_c ในลักษณะสมมาตร สามารถแปลงบนพื้นฐานขององค์ประกอบของกระแสสเตเตอเร็นแกน d (i_d) และแกน q (i_q) โดยที่แนวแกน q จะนำหน้าแนวแกน d เป็นมุม 90 องศา เมื่อ θ_m คือมุมการหมุนระหว่างแนวแกน d และ แกนอ้างอิงเฟส A ในการแปลงแกนของ $dq0$ ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงได้จากสมการที่ (2.22) [19, 20]

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & \cos\left(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{me} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_{me}) & -\sin\left(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{me} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) เป็นการแยกกรอบอ้างอิง abc ไปสู่กรอบอ้างอิงไดๆ ในระบบ $dq0$ ในกรณีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวหนึ่งมีการต่อสายนิวทรอลเข้ากับระบบ ส่งผลให้เกิดทางเดินของกระแสสำคัญ i_0 ดังสมการที่ (2.23)

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (2.23)$$

ในกรณีที่มอเตอร์สมมาตรและมีการต่อวงจรแบบเดลต้าหรือแบบสตาร์ที่ไม่มีการต่อ
นิวทรอลเข้าสู่ระบบ ค่ากระแส i_0 จะมีค่าเท่ากับ 0

จากการแปลงกรอบจากอ้างอิงสามเฟส abc ไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆที่หมุนด้วยความเร็ว ωt ในระบบ $dq0$ ในกรณีที่มอเตอร์เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงซ่องว่างอากาศอันเนื่องจากการ
เชื่อมต่อที่นั่นจะส่งผลทำให้เกิดชาร์โนนิกที่สัญญาณความถี่แอนข้างที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ ของกระแส
ทั้งสามเฟส แสดงดังสมการที่ (2.24),(2.25) และ (2.26)

$$\begin{aligned} i_a &= I_m \cos(\omega_s t - \alpha) + i_{dl} \cos(\omega_s t - \omega_r t - \beta_l) \\ &\quad + i_{dr} \cos(\omega_s t + \omega_r t - \beta_r) \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} i_b &= I_m \cos\left(\omega_s t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{dl} \cos\left(\omega_s t - \omega_r t - \beta_l - \frac{2\pi}{3}\right) \\ &\quad + i_{dr} \cos\left(\omega_s t + \omega_r t - \beta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} i_c &= I_m \cos\left(\omega_s t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{dl} \cos\left(\omega_s t - \omega_r t - \beta_l + \frac{2\pi}{3}\right) \\ &\quad + i_{dr} \cos\left(\omega_s t + \omega_r t - \beta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.26)$$

เมื่อให้ $\theta_{me} = \omega_s t$ จะได้องค์ประกอบของกระแสในแนวแกน i_d และแนวแกน i_q ดัง
แสดงในสมการที่ (2.27) และสมการที่ (2.28) ตามลำดับ

$$i_d = \frac{2}{3} \left[i_a \cos \theta_{me} + i_b \cos \left(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta_{me} + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.27)$$

$$i_q = -\frac{2}{3} \left[i_a \sin \theta_{me} + i_b \sin \left(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\theta_{me} + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.28)$$

แทนค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสสมการ (2.24), (2.25) และ (2.26) ในสมการที่ (2.27) และสมการที่ (2.28) ได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (2.29) และสมการที่ (2.30) ที่เวลา $t = 0$

$$i_d = I_m \quad (2.29)$$

$$i_q = 0 \quad (2.30)$$

ในกรณีที่มอเตอร์หมุนในสภาพวงคงตัว ให้ $\theta_{me} = \omega_s t$ ได้สมการใหม่ที่ (2.31) และสมการที่ (2.32)

$$i_d = \frac{2}{3} \left[I_m \cos(2\omega_s t - \alpha) + i_{dl} \cos(2\omega_s t - \omega_r t - \beta_l) \right] \quad (2.31)$$

$$i_q = -\frac{2}{3} \left[I_m \sin(2\omega_s t - \alpha) + i_{dl} \sin(2\omega_s t - \omega_r t - \beta_l) \right] \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.31) และสมการที่ (2.32) แสดงสเปกตรัมของกระแส มีองค์ประกอบของความถี่ดังนี้ $2\omega_s \pm \omega_r$ เมื่อ $\omega_s = 2\pi f_s$ และ $\omega_r = 2\pi f_r$ สามารถอธิบายได้เมื่อมีเบลี่ยนแปลงซึ่งว่างานอาจอันเนื่องจากการเบื้องศูนย์นั้น เมื่อแยกกรอบอ้างอิง abc ไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ ในระบบ $dq0$ จะส่งผลต่อขนาดสัญญาณความถี่เด่นข้างที่ความถี่ $2f_s \pm f_r$

2.6 การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processing)

2.6.1 การสุ่มสัญญาณ (Sampling)

สัญญาณที่ได้จากสัญญาณเป็นสัญญาณอะนาล็อกซึ่งเป็นสัญญาณต่อเนื่อง ต้องมีการสุ่มสัญญาณเพื่อไปประมวลผลด้วยวิธีดิจิตอลต่อไป ดังนั้นทฤษฎีการสุ่มสัญญาณได้ระบุไว้ว่า ถ้าสัญญาณที่ต้องการสุ่นจะต้องมีการสุ่นที่ความถี่สูงสุดที่ f_{max} เพื่อให้ได้สัญญาณที่สุ่มเป็นตัวแทนที่ถูกต้องของสัญญาณนั้น ความถี่ของการสุ่นต้องมากกว่าสองเท่าของสัญญาณที่ถูกสุ่มดังสมการ (2.33)

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (2.33)$$

ซึ่งในทางปฏิบัติมักใช้ $f_s \geq 2.5f_{\max}$ เพื่อชดเชยตัวกรอง Anti-aliasing สำหรับความถี่สูงสุดของการสุ่ม f_s จะขึ้นกับความเร็วของวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลและความสามารถของตัวประมวลผลที่เลือกใช้ ถ้าความถี่ f_s สูงขึ้นก็ต้องแปลงสัญญาณที่เร็วขึ้นและปริมาณการแปลงข้อมูลจะมากขึ้น โดยเวลาในการประมวลผลแต่ละค่าต้องน้อยกว่าเวลาของการสุ่ม ดังสมการ (2.34)

$$T_{\text{Process}} < T_s \quad (2.34)$$

2.6.2 การแปลง FFT (Fast Fourier Transform)

การแปลง FFT เป็นการแปลงสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องจากโดยเน้นเวลาเป็นสัญญาณในโดยเน้นความถี่หรือจากสัญญาณในโดยเน้นความถี่เป็นสัญญาณในโดยเน้นเวลา ซึ่งได้คิดค้นพัฒนามาจากวิธีการคำนวณ DFT (Discrete Fourier Transform) ให้เร็วขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าปกติ การแปลง FFT ก็คือ “การคำนวณ DFT อย่างเร็ว” กว่าปกตินั้นเอง คำว่า FFT เป็นชื่อกalgoฯที่ไม่ได้บ่งบอกว่าเป็นวิธีไหน วิธีทำ FFT วิธีพื้นฐานวิธีหนึ่งคือวิธี radix-2 แบบ decimation-in-time ขั้นตอนการแปลง FFT ใช้เทคนิคในการแตกสัญญาณออกเป็น n เป็นเลขคู่และเป็นเลขคี่ โดยเฉพาะขนาดหรือจำนวนจุดในการแปลง FFT จะต้องมีจำนวนจุดเป็นเลขยกกำลังเลขจำนวนเต็ม $N = 2^n$ จากสมการการแปลง DFT แสดงดังสมการที่ (2.35)[21] โดยกระจายสัญญาณ $x(n)$ ออกเป็นเทอมที่ n เป็นเลขคู่และเลขคี่

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}, \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (2.35)$$

จะเห็นว่า $X(k)$ เป็นผลบวกของสองเทอม แต่ละเทอมเป็นรูปแบบของการคำนวณ DFT ที่ $N/2$ จุด โดยเทอมแรกกระทำกับสัญญาณ $x(0), x(2), \dots, x(N-2)$ และเทอมที่สองกระทำกับสัญญาณ $x(1), x(3), \dots, x(N-1)$ สรุปได้ว่าในการแปลง FFT สามารถกระทำการโดย DFT จำนวน N จุด สามารถกระจายให้อยู่ในเทอมของ DFT จำนวน $N/2$ จุดสามารถลดการคำนวณครึ่งหนึ่งและแตกเทอม DFT ที่ $N/2$ จุดในแต่ละเทอมก็สามารถกระกระจายให้กล้ายเป็นผลบวกของ DFT เป็น $N/4$ จุดสองเทอม เราสามารถกระกระจายเทอมเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งทุกตัวอยู่ในรูปของ DFT 2 จุด ก็สามารถคำนวณได้ง่ายๆดังนี้

$$\text{เมื่อ } x(n) \text{ มีความยาว } 2 \text{ จุดจะได้ } X(k) = \sum_0^1 x(n)W_2^{kn}$$

โดยที่ $W_2^0 = 1$ และ $W_2^1 = e^{-j\pi} = -1$ จะได้ดังสมการที่ (2.36)

$$\begin{aligned} X(0) &= x(0) + x(1) \\ X(1) &= x(0) - x(1) \end{aligned} \quad (2.36)$$

2.6.3 สเปกตรัมของพลังงานและสเปกตรัมกำลัง

เมื่อผลลัพธ์ของการแปลง FFT เรียกว่า สเปกตรัมทางขนาด (หรือสเปกตรัมของโวลท์เตจ) ถ้าสัญญาณที่นำมาหาสเปกตรัมนี้เกิดขึ้นและลิ้นสุดภายนอกช่วงที่นำมาคำนวณเท่านั้น หรือที่เวลาอื่น ๆ สัญญาณมีค่าสัญญาณประ勾เงนนี้เรียกว่า สัญญาณที่มีพลังงานจำกัด (Finite-Energy Signal) สัญญาณที่มีพลังงานจำกัดมีสเปกตรัมของพลังงาน (Energy Spectrum) หาได้จากสมการที่ (2.37)

$$S_x(k) = |X(k)|^2 \quad (2.37)$$

โดยที่ $S_x(k)$ คือสเปกตรัมของพลังงาน $x(n)$ และ $X(k)$ คือผลของการแปลง FFT ของสัญญาณ $x(n)$ แต่ถ้าสัญญาณที่นำมาหาสเปกตรัมนี้เป็นเพียงส่วนย่อยหนึ่งของสัญญาณที่ยาวไปจนถึงเป็นอนันต์ แต่ตัดเอามาดูเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น แต่มีคุณลักษณะทางสถิติที่คงที่ สัญญาณประ勾เงนนี้เรียกว่า สัญญาณที่มีพลังงานไม่จำกัดซึ่งไม่สามารถหาค่าพลังงานได้แต่สามารถหา “กำลังงานเฉลี่ย” ของสัญญาณได้ ดังนั้นสเปกตรัมของกำลัง (Power Spectrum) หาได้จากสมการที่ (2.38)

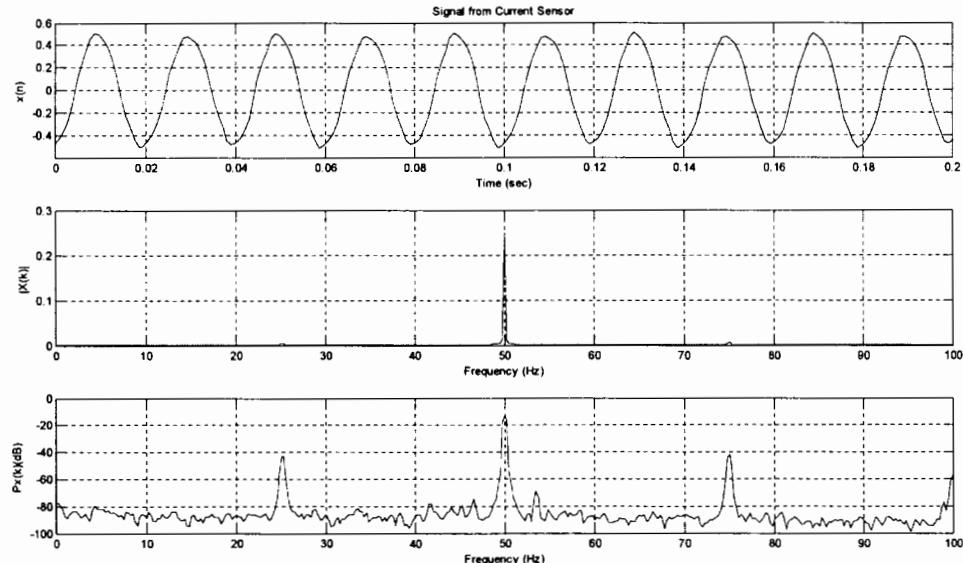
$$P_x(k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2 \quad (2.38)$$

สเปกตรัมของกำลังเป็นตัวบวกกว่าสัญญาณมีกำลังกระจายอยู่ในความถี่ต่าง ๆ อย่างไร ถ้าเรา ragazzi ทุกค่าของ $S_x(k)$ เข้าด้วยกัน ก็จะได้กำลังรวมของสัญญาณในทุก ๆ ความถี่ ซึ่งก็เท่ากับกำลังเฉลี่ยของสัญญาณนั้นเอง “กำลังงานเฉลี่ย” ในทางเวลาจะเท่ากับกำลังงานเฉลี่ยในทางความถี่” หาได้จากสมการที่ (2.39)

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (2.39)$$

มักนิยมแสดงสเปกตรัมของกำลังในหน่วยของ dB ซึ่งดังสมการที่(2.40) แสดงดังภาพที่ 2.10

$$P_x(k) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} |X(k)|^2 \right) (dB) \quad (2.40)$$



ภาพที่ 2.10 สัญญาณในเชิงเวลาและสเปกตรัมที่ได้จากการแปลง FFT

ข้อสังเกตว่าสเปกตรัมของกำลังที่แสดงในหน่วย dB จะสามารถแสดงให้เห็นถึงในรายละเอียดของสเปกตรัมได้ดีกว่า โดยเฉพาะในย่านที่มีกำลังของสัญญาณต่ำ ๆ ในแต่ละความถี่ในสเปกตรัมมีระยะห่างกันเรียกว่า Resolution Frequency (Δf) ดังสมการที่ (2.41)

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2.41)$$

2.7 วิเคราะห์การคัดถอยเชิงเส้นตรงพหุคุณ (Multiple Linear Regression Analysis)

วิธีการวิเคราะห์การคัดถอยเชิงเส้นพหุคุณนั้น เป็นการใช้ตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไปในการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระสามารถกำหนดสมการคัดถอยพหุคุณเชิงเส้นดังสมการที่ (2.42) [22]

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots + b_k X_k \quad (2.42)$$

สำหรับสมการทดด้วยพหุคูณเชิงเส้นที่มีตัวอิสระ 2 ตัวมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ ดังสมการที่ (2.43)

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (2.43)$$

2.7.1 การสร้างสมการทดด้วยพหุคูณและการพยากรณ์

จากสมการที่ (2.43) สามารถคำนวณหาค่า b_0, b_1 และ b_2 จากค่า Y, X_1 และ X_2 ได้จากการสำรวจข้อมูล ทำให้สามารถกำหนดสมการการพยากรณ์ \hat{Y} ได้ ซึ่งเพื่อความสะดวกจึงกำหนดครุปแบบการคำนวณและการใช้งานดังสมการที่ (2.44)

$$\begin{aligned} A &= n \sum X_1 Y - (\sum X_1)(\sum Y) \\ B &= n \sum X_2^2 - (\sum X_2)^2 \\ C &= n \sum X_1 X_2 - (\sum X_1)(\sum X_2) \\ D &= n \sum X_2 Y - (\sum X_2)(\sum Y) \\ E &= n \sum X_1^2 - (\sum X_1)^2 \\ F &= EB - C^2 \end{aligned} \quad (2.44)$$

โดยที่ n คือจำนวนข้อมูล และสามารถเขียนสูตรคำนวณหาค่า b_0, b_1 และ b_2 ดังสมการที่ (2.45), (2.46), (2.47) ตามลำดับ

$$b_0 = \frac{\sum Y - b_1 \sum X_1 - b_2 \sum X_2}{n} \quad (2.45)$$

$$b_1 = \frac{AB - CD}{F} \quad (2.46)$$

$$b_2 = \frac{DE - AC}{F} \quad (2.47)$$

เมื่อคำนวณหาค่า b_0, b_1 และ b_2 แล้วสามารถแทนค่าในสมการ $\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2$ ทำให้สามารถกำหนดสมการทดด้วยพหุคูณเชิงเส้นเพื่อใช้พยากรณ์ค่าตัวแปรตาม \hat{Y} ได้

2.7.2 ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าการพยากรณ์

จะสังเกตได้ว่าเมื่อค่าที่วัดหรือสังเกตได้ \hat{Y} กับค่าที่จากการพยากรณ์คือค่าที่คำนวณจากสมการทดแทนโดยพหุคูณ \hat{Y} จะมีค่าไม่เท่ากันโดยที่ $\hat{Y} - \bar{Y} = e$ เมื่อ e คือค่าคลาดเคลื่อน (Error) ที่ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า (Standard error of emanate = Se) ได้ ก็คือค่าคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ค่าตัวแปรตามจากตัวอิสระนั้นเอง ในกรณีที่ตัวแปรอิสระมีจำนวน k ตัว ค่าคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าดังสมการที่ (2.48)

$$Se = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{n - k - 1}} \quad (2.48)$$

ในกรณีที่ตัวแปรอิสระจำนวน 2 ตัว สมการคำนวณค่าคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าดังสมการที่ (2.49)

$$Se = \sqrt{\frac{\sum Y^2 - b_0 \sum Y - b_1 \sum X_1 Y - b_2 \sum X_2 Y}{n - 3}} \quad (2.49)$$

2.7.3 สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple correlations)

เป็นการวัดความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เพื่อเป็นการบอกให้ทราบถึงตัวแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด เป็นสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Coefficient of multiple correlations) แทนด้วย r มีสูตรคำนวณดังสมการที่ (2.50)

$$r = \sqrt{\frac{\sum(\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2}} \quad (2.50)$$

เพื่อให้การคำนวณหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีความยุ่งยากลดลง จึงนิยมคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีตัวแปรอิสระ 2 ตัว ได้ดังสมการที่ (2.51)

$$r = \sqrt{\frac{n(b_0 \sum Y + b_1 \sum X_1 Y + b_2 \sum X_2 Y) - (\sum Y)^2}{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2}} \quad (2.51)$$

ค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคุณจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 กล่าวคือถ้าค่า r เข้าใกล้ 0 หมายความว่า ตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันน้อย และถ้า $r = 0$ กล่าวได้ว่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์กันเลย ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า $r = 1$ ตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์สูงสุด

2.7.4 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Multiple Determinations)

เป็นการบอกให้ทราบว่าตัวแปรอิสระสามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งในสมการตัดสินใจแทนด้วย r^2 ก็จะบอกว่าตัวแปรอิสระทั้งหมดจะพยากรณ์ตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด มีสูตรคำนวณดังสมการที่ (2.52)

$$r^2 = \frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} \quad (2.52)$$

เพื่อให้การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีความยุ่งยากลดลง จึงนิยมคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในกรณีตัวแปรอิสระ 2 ตัว ได้ดังสมการที่ (2.53)

$$r^2 = \frac{n(b_0 \sum Y + b_1 \sum X_1 Y + b_2 \sum X_2 Y) - (\sum Y)^2}{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2} \quad (2.53)$$

ค่าของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 กล่าวคือถ้าค่า $r^2 = 0$ หมายความว่า ตัวแปรอิสระไม่สามารถพยากรณ์ตัวแปรตามได้ และถ้า $r^2 = 1$ หมายความว่า ตัวแปรอิสระสามารถพยากรณ์ตัวแปรตามได้สมบูรณ์สูงสุด

2.7.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variance, C.V.)

ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน เป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูล 2 ชุดขึ้นไป ซึ่งค่า C.V. จะไม่มีหน่วย และข้อมูลที่มีค่า C.V. มากจะมีการกระจายของข้อมูลมากกว่าข้อมูลที่มีค่า

C.V. คือ สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (2.54)

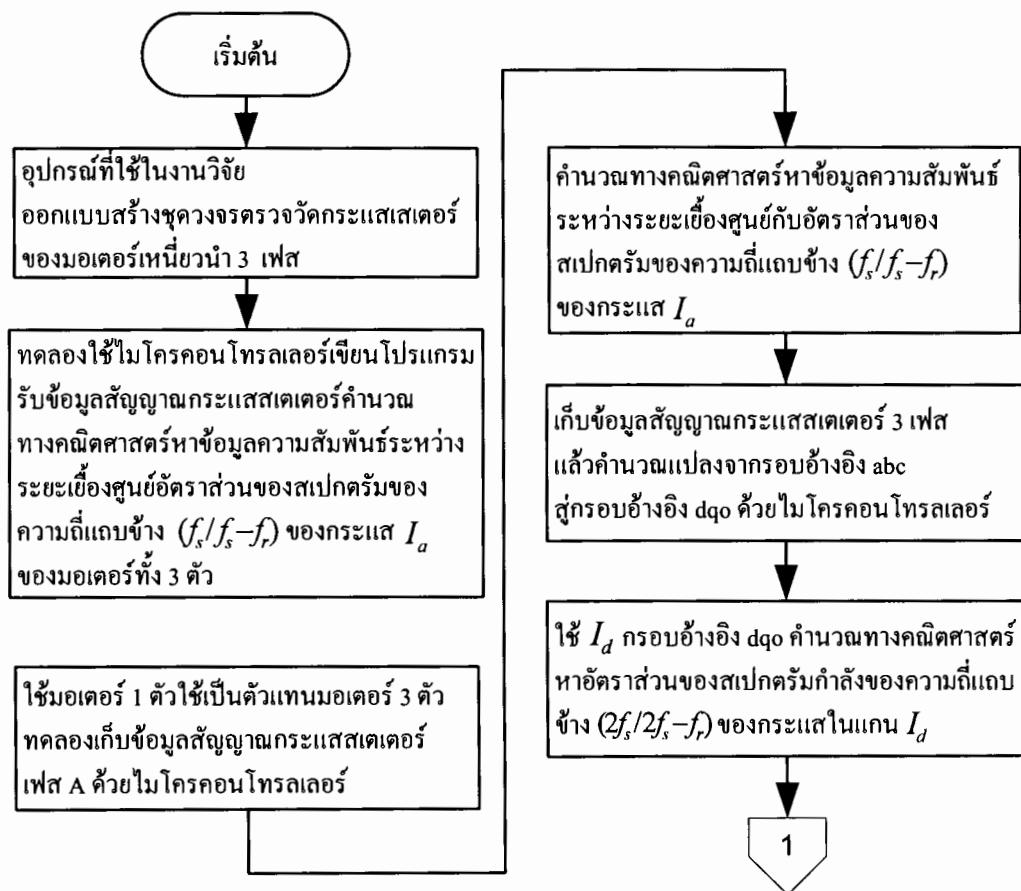
$$C.V. = \frac{s}{\bar{X}} \quad (2.54)$$

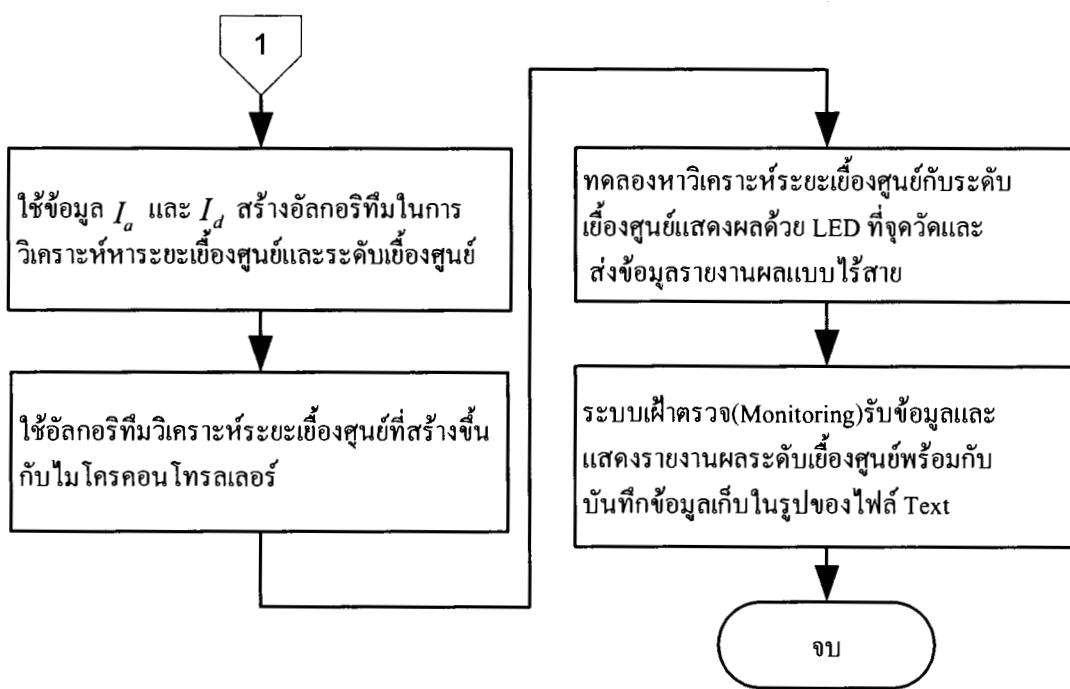
โดยที่ s คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและ \bar{X} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลของสัญญาณกระแส สเตเตอร์ของมอเตอร์ วิธีการในการเก็บข้อมูล การสร้างอัลกอริทึม การวิเคราะห์ระดับเสียงคุณภาพ ระบบรายงานผลการวินิจฉัยระดับเสียงคุณภาพเบลาจิง ซึ่งได้ออกแบบขั้นตอนการทำงานทั้งหมด ของงานวิจัยแสดง ดังภาพที่ 3.1 ส่วนขั้นตอนการทำงานย่อจะแสดงในหัวข้อวิธีการทดลอง





ภาพที่ 3.1 ໄโคะแกรมขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 มอเตอร์

ในงานวิจัยนี้ มอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งใบ ขนาด โรเตอร์แบบกรุงกระอกขนาด 7.5 kW รุ่นเดียวกัน จำนวน 3 ตัว มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 3.2 และมีข้อมูลทางเทคนิคดังตารางที่ 3.1



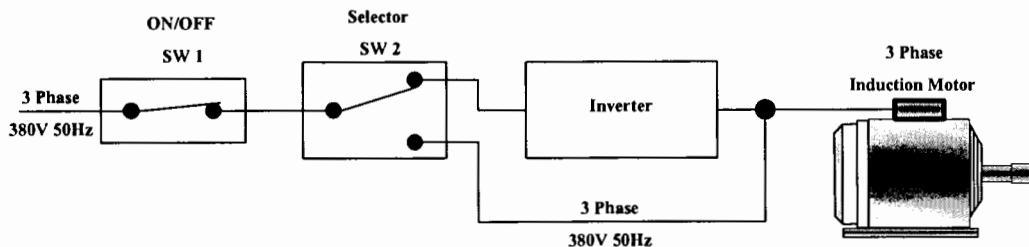
ภาพที่ 3.2 มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของมอเตอร์เห็นี่ยวนำ

พิกัด กำลัง (kW)	พิกัด แรงดัน (V)	พิกัด กระแส (A)	PF $(\cos \phi)$	ความเร็ว รอบ (rpm)	ความถี่ ใช้งาน (Hz)	ช่องว่าง อากาศ (mm)	จำนวน คุ้มข้าว (คู่)
7.5	660/690	8.98	0.83	1440	50	0.50	4

3.1.2 ชุดจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์

ในงานวิจัย ชุดจ่ายไฟฟ้าจะสตาร์ทมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์และปรับความเร็วของมอเตอร์เพื่อลดกระแสไฟฟ้าเริ่มสตาร์ท หลังจากนั้นจะกดสวิตช์สามทางเพื่อสลับการจ่ายไฟฟ้าสามเฟสจากอินเวอร์เตอร์เป็นการจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายโดยตรง ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ระบบจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์

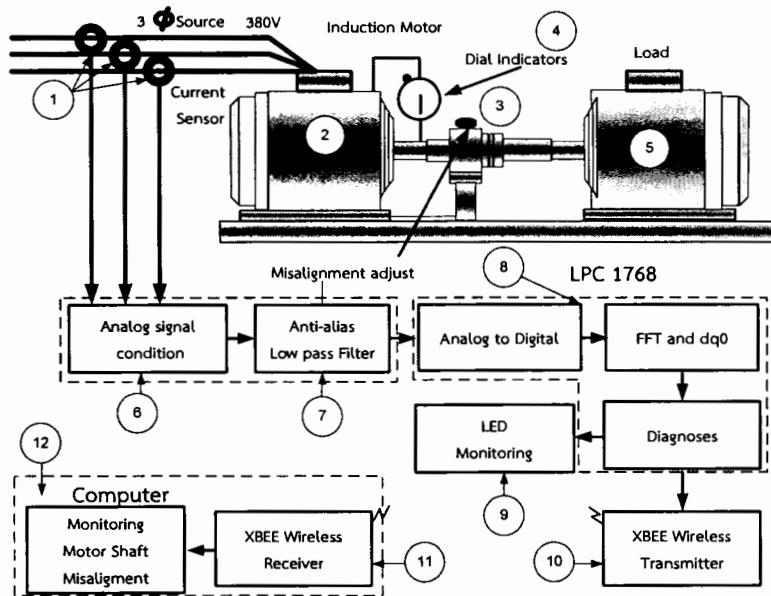
3.1.3 ชุดปรับระดับการเย็บสูนย์

ชุดทดลองของงานวิจัยสามารถปรับระดับการเย็บสูนย์ได้ โดยการปรับสกรู (Adjusting Screw) กดบังคับให้แกนเพลามอเตอร์ติด牢 ตัวลงจะเป็นการเย็บสูนย์แบบสแตติก และวัดระดับการเย็บสูนย์ด้วยเครื่องมือ Dial Indicators ติดตั้งที่ตัวมอเตอร์วัดที่แกนเพลามอเตอร์มีความละเอียด 0.010 mm จากภาพที่ 3.4 ซึ่งเป็นระบบผ่าตรวจวัดระดับเย็บสูนย์ของมอเตอร์เห็นี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัย สามารถอธิบายระบบดังนี้

หมายเลข 1 คือ วงจรวัดกระแสจากคลาดสเตรเตอร์ 3 เฟสสัญญาณที่ได้ทางเอ้าต์พุตเป็นแรงดัน

หมายเลข 2 คือ มอเตอร์ที่ใช้ทดลองในงานวิจัยซึ่งพิกัดแสดงดังตารางที่ 3.1

หมายเลข 3 คือ สกรูปรับระดับเย็บสูนย์เพื่อบังคับให้แกนเพลามอเตอร์เกิดการเย็บสูนย์



ภาพที่ 3.4 แผนผังระบบเฝ้าตรวจวัดระดับเสียงศูนย์ของมอเตอร์เหนี่ยววนิềา

หมายเลข 4 กือ Dial Indicator วัดระยะเสียงศูนย์ความละเอียด 0.010 mm

หมายเลข 5 กือ โหลดที่ต่อกับมอเตอร์แต่ไม่สามารถปรับโหลดได้

หมายเลข 6 กือ วงจรยกระดับสัญญาณกระแสสเตเตอเร่อ +1.65 โวลต์

หมายเลข 7 กือ วงจรกรองความถี่ต่ำกว่า 500 Hz

หมายเลข 8 กือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยรับสัญญาณมาจากการกรองความถี่ต่ำกว่าและแปลงสัญญาณออนไลน์เป็นสัญญาณดิจิตอลความถี่สูง 1024 Hz จำนวน 2048 ข้อมูลแล้วทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ วิเคราะห์หาระยะเสียงศูนย์และระดับเสียงศูนย์

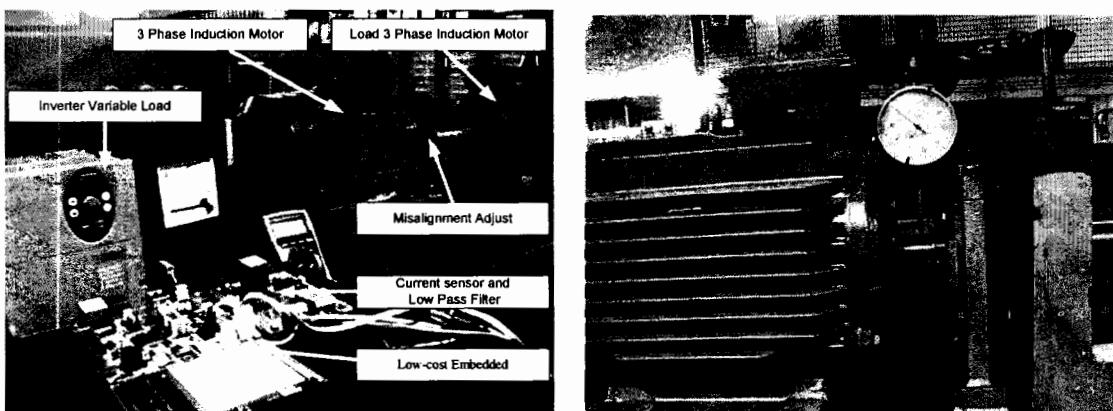
หมายเลข 9 กือ ส่วน LED แสดงผลของระดับเสียงศูนย์

หมายเลข 10 กือ ชุดส่งข้อมูลระดับเสียงศูนย์ไร้สาย ด้วย XBEE

หมายเลข 11 กือชุดรับข้อมูลระดับเสียงศูนย์ไร้สาย ด้วย XBEE

หมายเลข 12 กือ คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมที่เฝ้าตรวจระดับเสียงศูนย์ เก็บข้อมูลโดยผู้ที่ทำวิจัยรับข้อมูลจาก XBEE ทำหน้าเฝ้าตรวจระดับเสียงศูนย์ของมอเตอร์แบบเวลาจังหวะและบันทึกข้อมูลในรูปแบบไฟล์ Text

ระบบเฝ้าตรวจวัดระดับเสียงศูนย์ของมอเตอร์เหนี่ยววนิềา ที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยและการวัดระดับเสียงศูนย์แสดงดังภาพที่ 3.5



(ก) ชุดปรับระดับการเยื่องศูนย์ในงานวิจัย

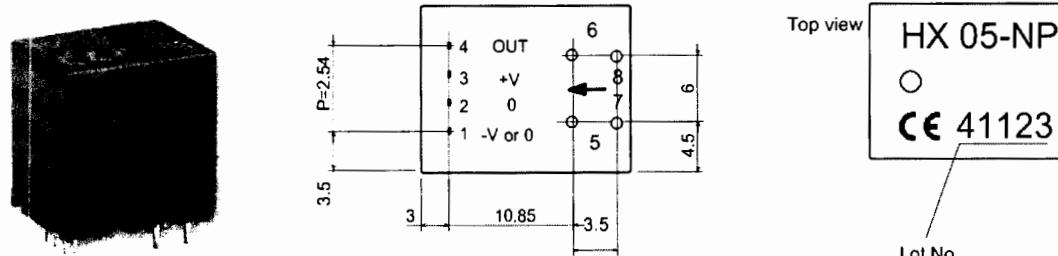
(ข) การวัดระยะเยื่องศูนย์ด้วย Dial Indicators

ภาพที่ 3.5 ชุดทดลองปรับระดับการเยื่องศูนย์ในงานวิจัยและการวัดระยะเยื่องศูนย์ด้วย Dial gauge

3.1.4 วงจรวัดกระแสสเตเตอร์

3.1.4.1 วงจรวัดกระแสสเตเตอร์ ด้วยเซนเซอร์ชนิดกระแสเบอร์ (LEN-HX-10NP),

Accuracy $\pm 1\%$, Linearity $\pm 1\%$, DC to 50 kHz Frequency bandwidth, Input Current $I_p \pm 20$ (A), Output voltage $\pm 4V$ เพื่อป้อนสัญญาณกระแสให้กับในโครค่อน โทรลเดอร์ ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 รูป่างและการกำหนดตำแหน่งขาทرانสistorชนิดกระแสเบอร์ (LEN-HX-10NP)

ซึ่งกำหนดตำแหน่งขาทرانสistorชนิดกระแสเบอร์ (LEN-HX-10NP)

ขา 1 คือไฟเลี้ยง $-15V$

ขา 2 คือไฟเลี้ยง $0V$

ขา 3 คือไฟเลี้ยง $+15V$

ขา 4 คือ Output

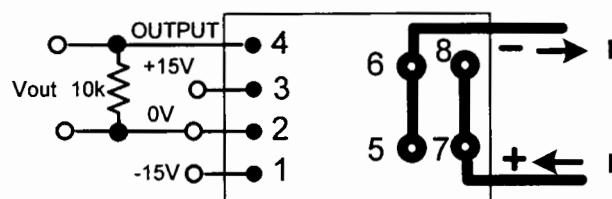
ขา 5 คือ Primary input 1 Current (-)

ขา 6 คือ Primary input 2 Current (-)

ขา 7 คือ Primary input 1 Current (+)

ขา 8 คือ Primary input 2 Current (+)

เมื่อใช้ Current Transducer HX10-NP ต่อวงจรใช้งานดังภาพที่ 3.7 สามารถวัดกระแสสูงสุด ± 20 A ได้แรงดันเอาต์พุตที่ ± 4 V มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีพิกัดกระแส 8.98 A การทดลองในงานวิจัย มอเตอร์จะทำงานในสภาพไม่มีโหลด ต่อตัวด้านท่าน 10 kΩ ที่เอาต์พุตของทรานสิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับวงจรและต่อขา 5 เป็นกับขา 6 และขา 7 เป็นกับขา 8



ภาพที่ 3.7 วงจรวัดกระแสด้วยทรานสิสเตอร์ชนิดกระแสเบอร์ (LEN-HX-10NP)

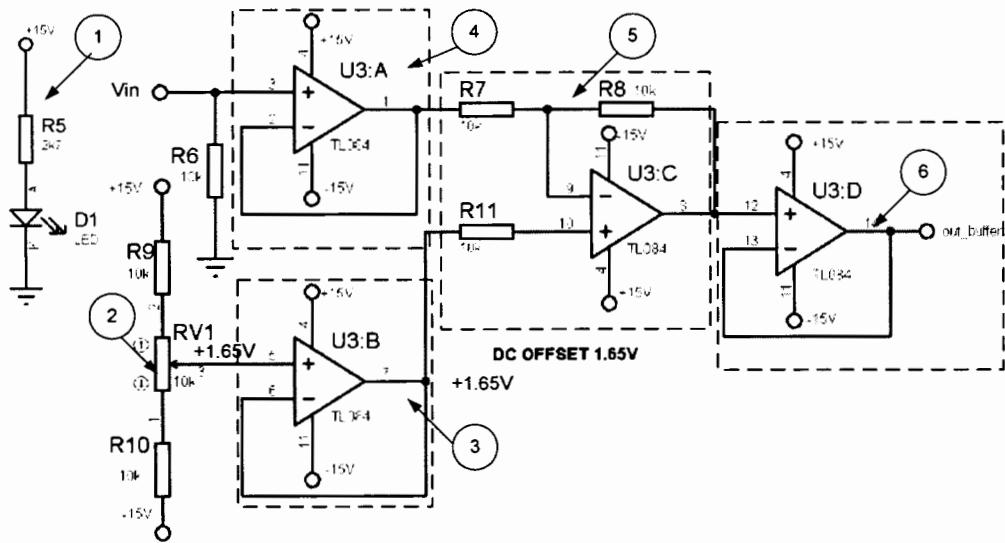
3.1.4.2 วงจรยกระดับสัญญาณ เนื่องจากการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) ของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด LPC1768 ระดับแรงดันตั้งแต่ 0 V ถึง +3.3 V ซึ่งสัญญาณกระแสเต็มของมอเตอร์จะมีสัญญาณทั้งในช่วงบวกและช่วงลบ ดังนั้นจึงต้องยกระดับสัญญาณด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ +1.65 V จะส่งผลให้สัญญาณอยู่ในช่วงบวกทั้งหมด ทำให้การแปลงสัญญาโนนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลได้อย่างถูกต้อง วงจรยกระดับสัญญาณกระแส แสดงดังภาพที่ 3.8 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

หมายเลข 1 คือส่วนแสดงผลแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแก่วงจร โดยใช้ LED1

แสดงผล

หมายเลข 2 คือ ตัว RV1 เป็นส่วนปรับการยกระดับแรงดันเป็น +1.65 V

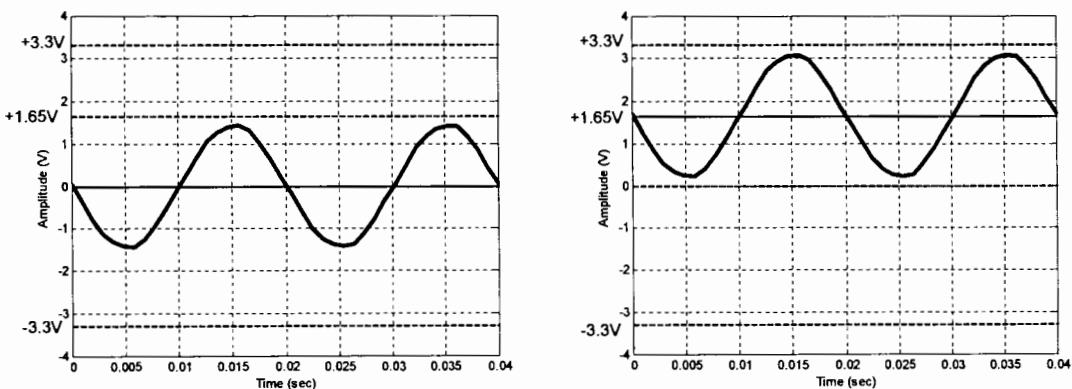
หมายเลข 3, 4 คือ วงจรบัฟเฟอร์แรงดันไฟฟ้า หรือวงจรกันชน เป็นวงจรที่ใช้เชื่อมวงจรสองวงจรเข้าด้วยกัน โดยอปเปนเป็นต่อแล้วทำให้อัตราขยายแรงดันเท่ากับ 1 และสัญญาณเอาต์พุต ไม่มีการกลับเพสหรือกลับข้างกับสัญญาณอินพุต แรงดันทางอินพุตจึงเท่ากับเอาต์พุต $V_{in} = V_{out}$ จึงทำให้แรงดันที่เอาต์พุตของวงจรบัฟเฟอร์ของ U3:B เท่ากับ +1.65 V ส่วนแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรบัฟเฟอร์ของ U3:A จึงเท่ากับแรงดันสัญญาณที่มาจากการวัดกระแส



ภาพที่ 3.8 วงจรยกระดับสัญญาณกระแส

หมายเหตุ 5 วงจรขยายผลต่างกือใช้วงจรอปเป损ปีที่ทำหน้าที่ขยายผลต่างของแรงดันทั้งสองคือ U3: C ทางค้านอินพุตจากการยกระดับสัญญาณ U3: B และแรงดันทางค้านอินพุตของสัญญาณกระแสที่ผ่านวงจรบีฟเฟอร์ U3: A ซึ่งมีการป้อนกลับทางลงเพื่อความคุ้มอัตราของวงจรตาม

หมายเหตุ 6 เป็นวงจรบีฟเฟอร์ เป็นวงรั้นชนสัญญาณของเอาดีพุต ก่อนที่จะต่อเข้ากับวงจรกรองความถี่ต่ำ ซึ่งสัญญาณที่ได้จากการวัดกระแสเตอร์ก่อนเข้าวงจรยกระดับสัญญาณ ดังภาพที่ 3.9 (ก) เมื่อผ่านวงจรยกระดับสัญญาณ แสดงดังภาพที่ 3.9 (ข)

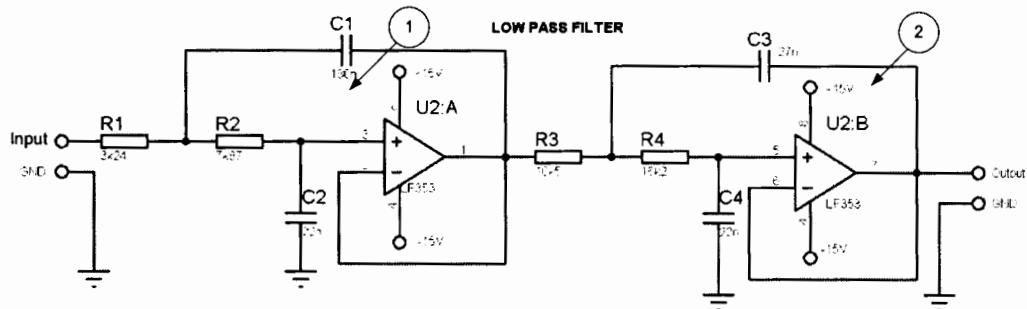


(ก) สัญญาณก่อนเข้าวงจรยกระดับสัญญาณ

(ข) สัญญาณหลังผ่านวงจรยกระดับสัญญาณ

ภาพที่ 3.9 ผลการทำงานของวงจรยกระดับสัญญาณ

3.1.4.3 วงจรกรองความถี่ต่ำ สัญญาณจากวงจรยกระดับแรงดันเท่ากับ +1.65 โวลต์ จากนั้นนำสัญญาณเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำ (*LPF 4th – Order*) สัญญาณของการกระແສສເຕເຕອຣ໌ ຂອງມອເຕອຣ໌ຈະນີອັກ໌ປ່ຽນກົດຂອງພື້ນຖານ ເພື່ອກຳຈັດສัญญาณຄວາມຄືສູງອັກໄປ ເນື່ອງຈາກຄວາມຄືຂອງສະເປັກຕົ້ນກຳລັງທີ່ມອເຕອຣ໌ເກີດກາເຫື່ອງສູນຍິ່ງໃນ I_a ທີ່ຄວາມຄື $(f_s \pm f_r)$ ແລະໃນ ແນວແກນ I_d ທີ່ຄວາມຄື $(2f_s \pm f_r)$ ຈຶ່ງເລືອກໃຊ້ວັງຈາກຮອງຄວາມຄືຕໍ່າຜ່ານທີ່ 500 Hz ແສດງດັ່ງວັງຈາກພັກທີ່ 3.10



ພັກທີ່ 3.10 ວັງຈາກຮອງຄວາມຄືຕໍ່າຜ່ານທີ່ 500Hz

ເນື່ອນວັງຈາກຮອງຄວາມຄືຕໍ່າຜ່ານໄປທົດລອງໜາພລຕອບສນອງທາງຄວາມຄືເນື່ອແຮງດັ່ນອິນພຸດ ($V_{in} = 1Vp-p$) ຜຶ່ງພລຕອບສນອງທາງຄວາມຄືໄດ້ຄວາມຄືຕ້ອອຟອຝູ່ໃນໜັງ 480 Hz ຊຶ່ງ 490 Hz ແສດງ ໄດ້ດັ່ງຕາງໆທີ່ 3.2 ຜຶ່ງໄກລ໌ເຄີຍກັນຄ່າທີ່ອອກແບບໄວ້

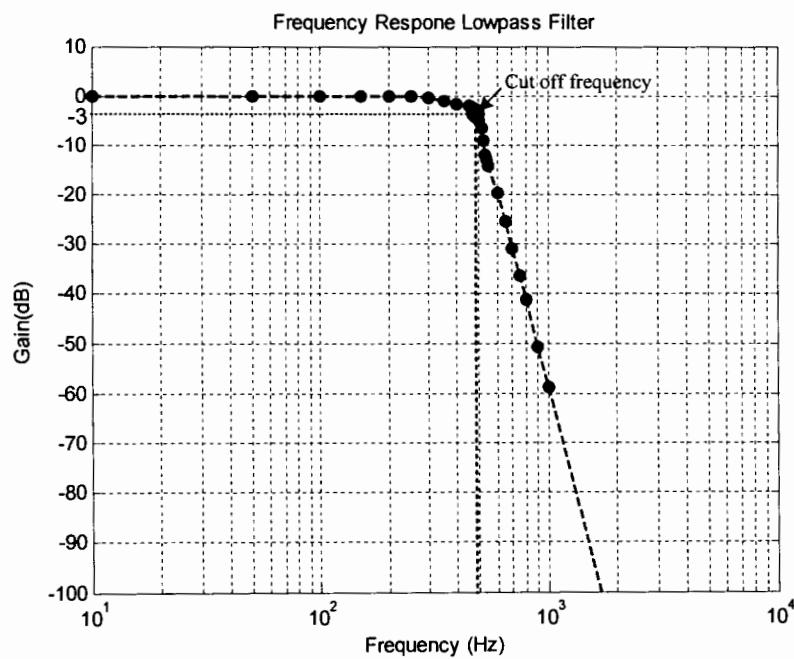
ຕາງໆທີ່ 3.2 ພລກາຮົດສອບວັງຈາກຮອງຄວາມຄືຕໍ່າ 500 Hz

Frequency (Hz)	Vin (rms)	Vout (rms)	Output (dB)	Frequency (Hz)	Vin (rms)	Vout (rms)	Output (dB)
10	353.5	353.5	0	520	353.5	223.8	-9.143
50	353.5	353.5	0	530	353.5	193.6	-12.042
100	353.5	353.5	0	540	353.5	183.6	-13.103
150	353.5	353.5	0	550	353.5	173.9	-14.188
200	353.5	353.1	-0.023	600	353.5	131.4	-19.793
250	353.5	352.2	-0.074	650	353.5	99	-25.455
300	353.5	345.8	-0.441	700	353.5	75	-31.008

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบวงจรกรองความถี่ต่ำ 500 Hz (ต่อ)

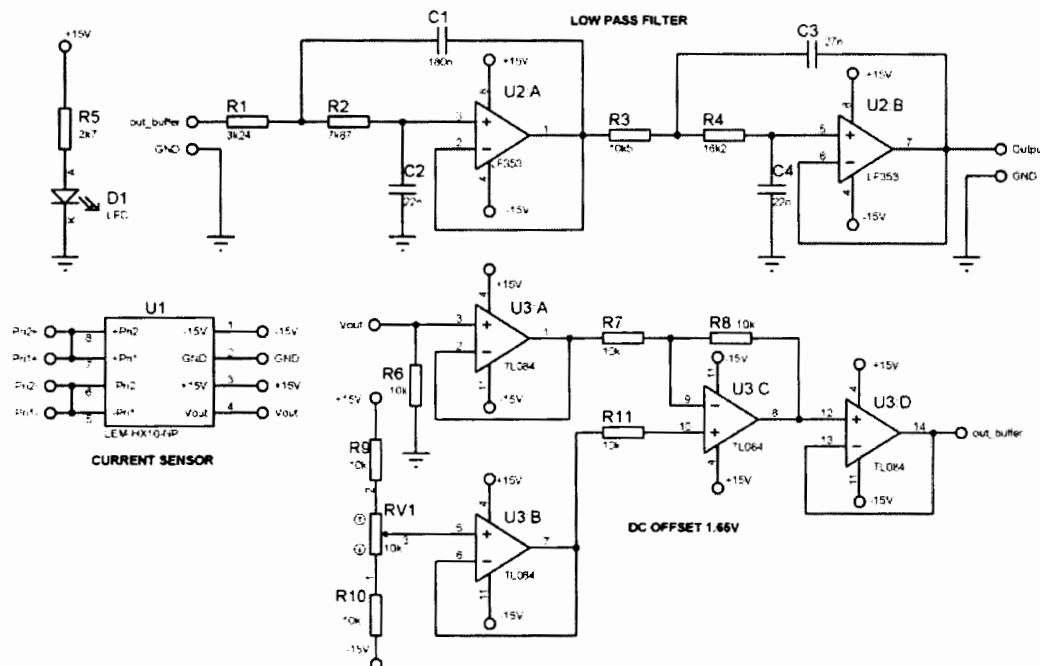
Frequency (Hz)	Vin (rms)	Vout (rms)	Output (dB)	Frequency (Hz)	Vin (rms)	Vout (rms)	Output (dB)
350	353.5	333.9	-1.141	750	353.5	57	-36.497
400	353.5	325	-1.681	800	353.5	45	-41.224
450	353.5	320.2	-1.979	900	353.5	28	-50.714
460	353.5	315.5	-2.275	1000	353.5	18.7	-58.787
470	353.5	312.4	-2.472	2000	353.5	1.2	-113.711
480	353.5	306.5	-2.853	3000	353.5	0.1	-163.409
490	353.5	296.5	-3.517	4000	353.5	0.021	-194.622
500	353.5	276.8	-4.892	5000	353.5	0.0017	-244.9
510	353.5	254.2	-6.595	10000	353.5	0.001	-255.513

เมื่อนำผลการทดลองในตารางที่ 3.2 มาเขียนบนกราฟสเกลแสดงได้ดังภาพที่ 3.10

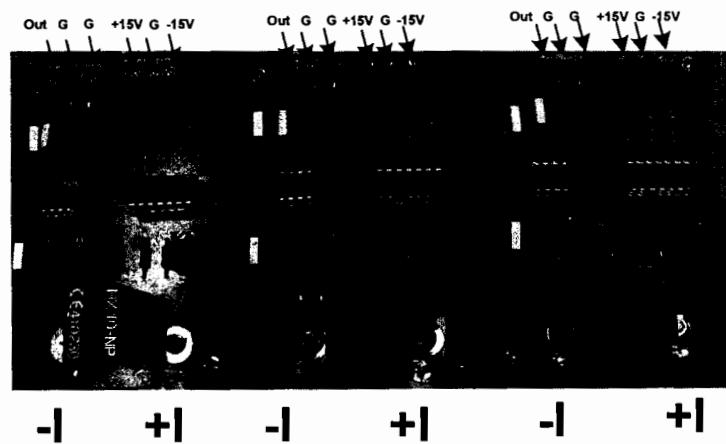


ภาพที่ 3.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 500Hz

เมื่อนำส่วนของวงจรวัดสัญญาณกระแส วงจรยกระดับสัญญาณและวงจรกรองความถี่ต่ำรวมเข้าด้วยกันเป็นวงจรวัดสัญญาณกระแสสเตเตอเร่อร์ 1 เฟส ดังภาพที่ 3.12 และสร้างเป็นบอร์ดชุดวัดสัญญาณกระแสสเตเตอเร่อร์ 3 เฟสแสดงดังภาพที่ 3.13



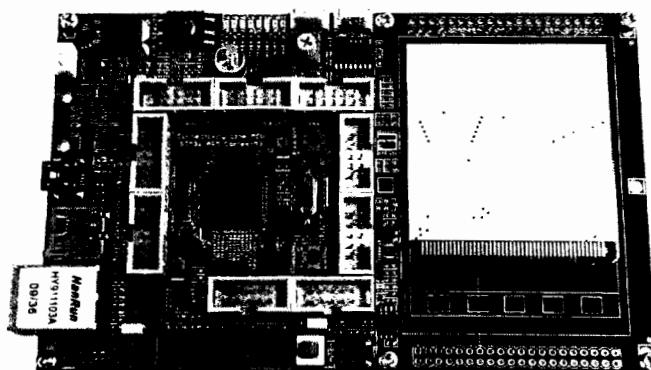
ภาพที่ 3.12 วงจรวัดสัญญาณกระแสสเตเตอเร่อร์ 1 เฟส



ภาพที่ 3.13 บอร์ดชุดวัดสัญญาณกระแสสเตเตอเร่อร์ 3 เฟส

3.1.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

เมื่อได้ Algorithm ของการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์จากทดลองจากหัวข้อที่ (3.1.6) แล้วใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างระบบวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์ จะใช้ ARM Cortex M3 Core เบอร์ LPC1768 ประมวลผล 32 บิต ด้วยความเร็ว 100 MHz หน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash ขนาด 512KB, Static RAM ขนาด 64KB ความละเอียดในการแปลงสัญญาณอนาคตเป็นคิจิตอลขนาด 12 บิต จำนวน 8 ช่อง จะสุ่มสัญญาณแอนalog เป็นสัญญาณคิจิตอลจำนวน 3 ช่อง ด้วยความถี่ 1024 Hz จำนวนข้อมูล 2048 ข้อมูล คำนวณทางคณิตศาสตร์ ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 ไมโครคอนโทรลเลอร์ LPC1768 ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 วิธีการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลองโดยแบ่งเป็นหัวข้อ การติดตั้งชุดทดลอง ขั้นตอนการเก็บข้อมูล การประมวลผลสัญญาณ การสร้างอัลกอริทึม การวิเคราะห์หาระยะเยื่องศูนย์ และระบบรายงานผลการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ ซึ่งขั้นตอนการทำวิจัยแสดง ดังภาพที่ 3.1

3.2.1 การติดตั้งชุดทดลอง

ในงานวิจัยมีขั้นตอนในการทดลองและเก็บข้อมูลโดยใช้ภาพที่ 3.4 ประกอบการอธิบายดังนี้

3.2.1.1 ติดตั้งมอเตอร์ขนาด 7.5 kW ติดตั้งบนชุดทดลองแกนเพลาบนเตอร์กับโหลดคงที่ ขันสกรูยึดฐานมอเตอร์และโหลดให้แน่น

3.2.1.2 หมุนสกรูที่ยึดแผ่นเดือนให้หลุม แล้วขันสกรูปรับระยะเยื่องศูนย์ให้พอด้วยผู้ดำเนินของแผ่นเดือน

3.2.1.3 นำชุดวัดระยะการเยื่องศูนย์ (Dial Indicator) และด้านบนของแกนเพลา มอเตอร์ตั้งค่าให้เป็นศูนย์ หลังจากนั้นให้ขันสกรูยึดแผ่นเลื่อนให้แน่น

3.2.1.4 หลังจากตั้งค่าตำแหน่งศูนย์แล้วยกแกน Dial Indicator ให้ลอยขึ้นเหนือ เพลาของมอเตอร์เพื่อป้องกันไม่สัมผัสแกนเพลาของมอเตอร์ในขณะที่มอเตอร์หมุน ซึ่งมอเตอร์ใน สภาวะปกติหรือที่ตำแหน่งศูนย์คือระยะเยื่องศูนย์ที่ 0.000 mm.

3.2.1.5 กดสวิตช์ (SW2) เลือกจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยผ่านอินเวอร์เตอร์ (โดย อินเวอร์เตอร์ต้องอยู่ในสภาวะปิด) เข้ากดสวิตช์ (SW1) เพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ตามภาพที่ 3.3

3.2.1.6 กดปุ่มเปิดอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วมอเตอร์จากอินเวอร์เตอร์ ความถี่ต่ำ จนถึงที่ความถี่ 50 Hz เท่ากับความถี่ที่จ่ายจากระบบไฟฟ้าโดยตรง หลังจากนั้นกดสวิตช์ (SW2) เลือกจ่ายกระแสไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าโดยตรง ให้กับมอเตอร์ โดยไม่ผ่านอินเวอร์เตอร์

3.2.1.7 ใช้บอร์ดวัดสัญญาณวัดกระแสสเตเตอร์และวงจรปรับยกสัญญาณที่ +1.65 Volt และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ 500 Hz ทั้งสามเฟส บอร์ดวัดสัญญาณวัดกระแสสเตเตอร์ดัง ภาพที่ 3.13

3.2.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูล

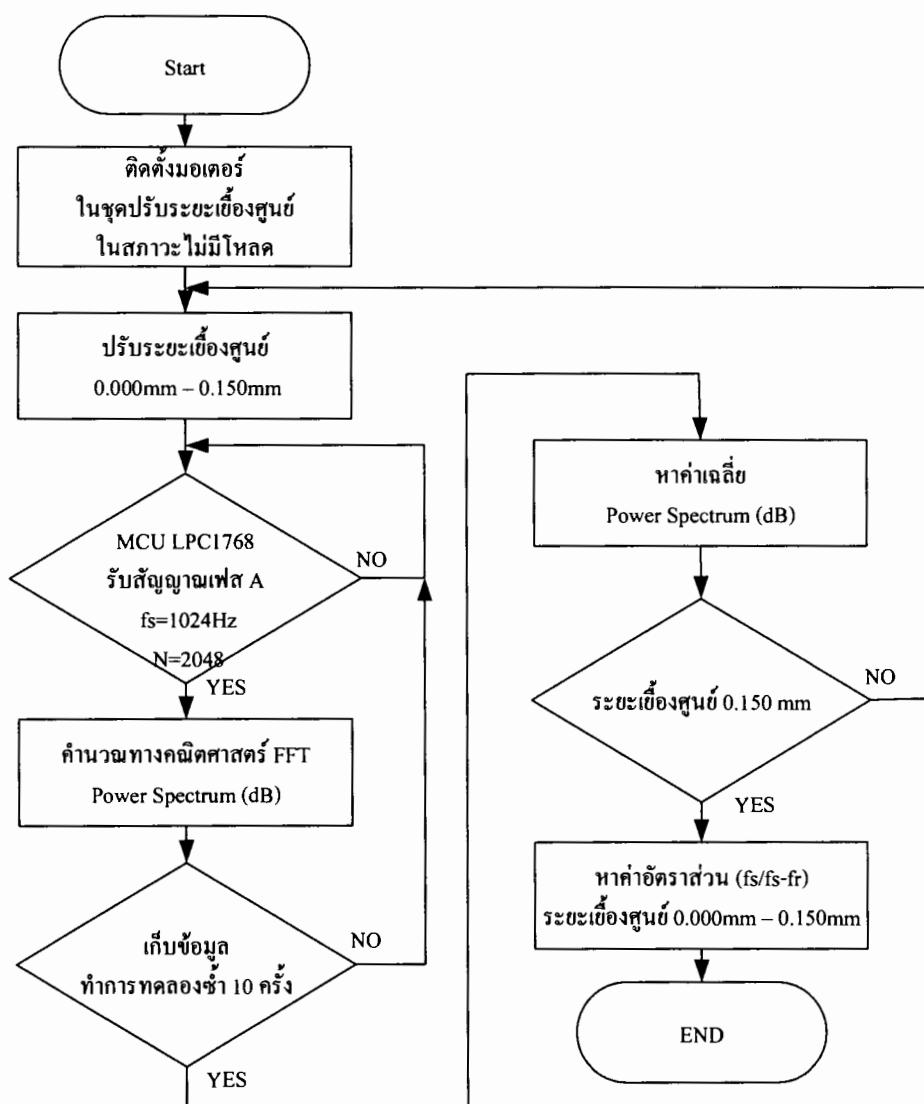
3.2.2.1 ทดลองหาขนาดของสัญญาณเชิงความถี่ที่สัมพันธ์กับระยะเยื่องศูนย์ของ มอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ขั้นตอนการเก็บข้อมูล ดังภาพที่ 3.15 มีขั้นตอนดังนี้

1) ใช้มอเตอร์ขนาด 7.5 kW จำนวน 3 ตัวโดยทดลองครั้งละ 1 ตัว ปรับ ระยะเยื่องศูนย์ที่ 0.000 mm, 0.030 mm, 0.060 mm, 0.090 mm, 0.120 mm, 0.150 mm

($\varepsilon = 0\%$, $\varepsilon = 6\%$, $\varepsilon = 12\%$, $\varepsilon = 18\%$, $\varepsilon = 24\%$, $\varepsilon = 30\%$) ตามลำดับ

2) ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ LPC1768 รับข้อมูลจากสัญญาณกระแส สเตเตอร์ที่ผ่านวงจรปรับแต่งสัญญาณกระแสสเตเตอร์เพียงหนึ่งเฟส สุ่มสัญญาณด้วยความถี่ 1024 Hz จำนวน 2048 ข้อมูล สัญญาณกระแสสเตเตอร์เฟส A สัญญาณที่ได้แสดงในโคเมนเวลาเมื่อ มอเตอร์อยู่ในสภาวะปกติ (ระยะเยื่องศูนย์ 0.000mm) แสดงดังภาพที่ 3.16 (ก)

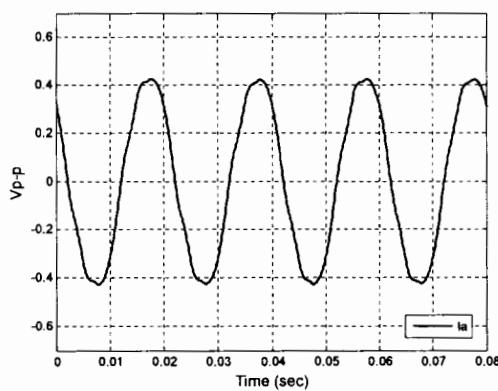
3) ทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์เปลี่ยนสัญญาณในทางโคเมนเวลาเป็น โคเมนความถี่ด้วยวิธี FFT แสดงスペกตรัมของกำลังในหน่วยของ dB



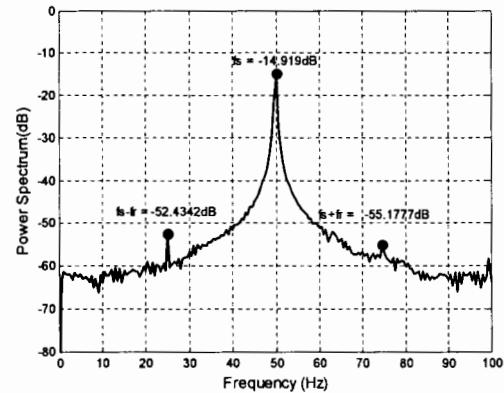
ภาพที่ 3.15 ผังงานขั้นตอนการเก็บข้อมูล

4) ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 1 และข้อที่ 3 ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง แล้วหาเฉลี่ยค่าสเปกตรัมกำลัง แสดงดังภาพที่ 3.16 (ข)

5) หาขนาดของสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ແண谱写 ($f_s \pm f_r$) ทำการหาอัตราส่วนโดยใช้ขนาดของสัญญาณสเปกตรัมที่ความถี่ $f_s/(f_s - f_r)$ ทำการทดลองซ้ำของมอเตอร์ตัวที่ 2 และมอเตอร์ตัวที่ 3 ตามข้อที่ 1 ถึงข้อที่ 5



(ก) สัญญาณกระแสในโอดเมนเวลา



(ข) สัญญาณกระแสในโอดเมนความถี่

ภาพที่ 3.16 สัญญาณกระแสเตเตอร์ของมอเตอร์สกาวะปกติ (ระยะเบื้องศูนย์ 0.000 ม.m.)

3.2.2.2 ทดลองเพื่อสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระยะเบื้องศูนย์และระดับการเบี้ยงศูนย์มอเตอร์ ผังขั้นตอนการเก็บข้อมูล ดังภาพที่ 3.17 มีขั้นตอนดังนี้

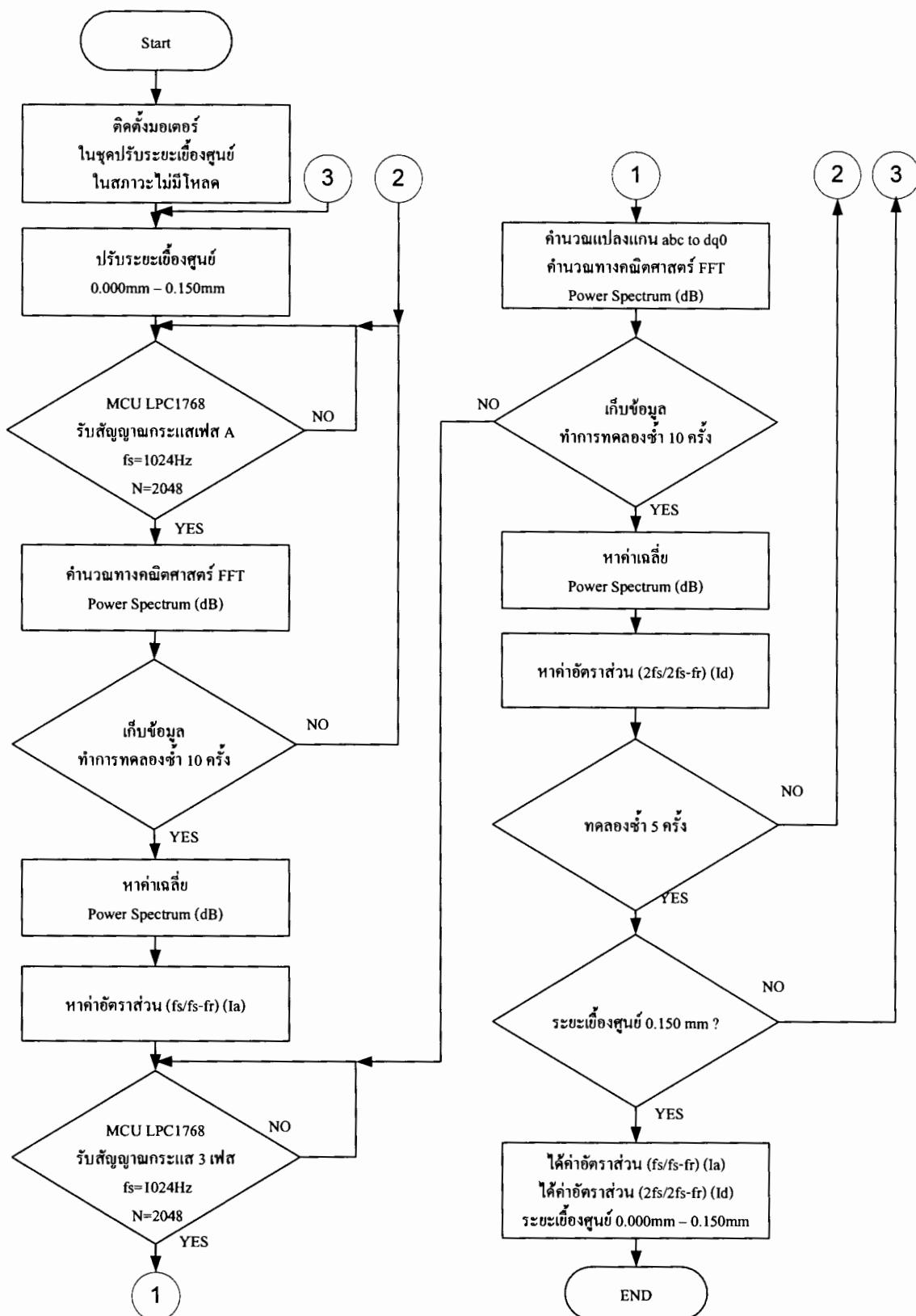
1) ใช้มอเตอร์ขนาด 7.5 kW จำนวน 1 ตัว ทดลองปรับระยะเบื้องศูนย์ที่ 0.000 mm, 0.010 mm, 0.020 mm, 0.030 mm, 0.040 mm, 0.050 mm, 0.060 mm ($\varepsilon = 0\%, \varepsilon = 2\%, \varepsilon = 4\%, \varepsilon = 6\%, \varepsilon = 8\%, \varepsilon = 10\%, \varepsilon = 12\%$)

2) ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ LPC1768 รับข้อมูลจากสัญญาณกระแสเตเตอร์ที่ผ่านวงจรปรับแต่งสัญญาณเพียงหนึ่งเฟส สุ่มสัญญาณด้วยความถี่ 1024 Hz จำนวนข้อมูล 2048 ข้อมูล ข้อมูลจากสัญญาณกระแสจากเฟส A ตัวอย่างการทดลองระยะเบื้องศูนย์ 0.060 mm. แสดงโอดเมนทางเวลาดังภาพที่ 3.18 (ก)

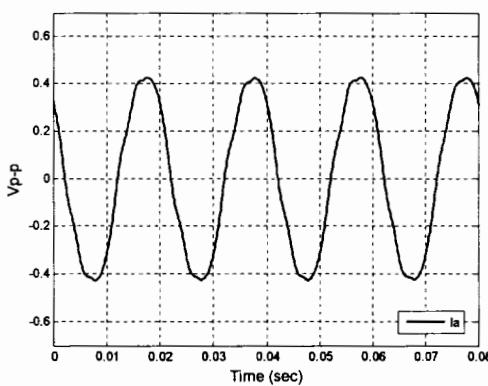
3) ทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์เปลี่ยนสัญญาณในทางโอดเมนเวลาเป็นโอดเมนความถี่แสดงスペกตรัมของกำลังในหน่วยของ dB

4) ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 1 และข้อที่ 3 ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง แล้วเฉลี่ยค่าスペกตรัมกำลังแสดงในทางโอดเมนทางเวลา แสดงดังภาพที่ 3.18 (ข)

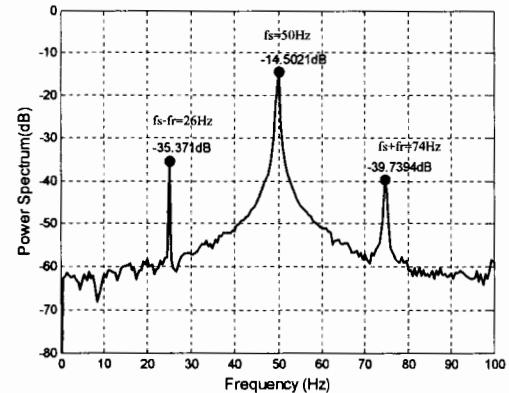
5) หาขนาดของสัญญาณที่ความถี่แนบซ้ำ ($f_s \pm f_r$) ทำการหาอัตราส่วนโดยใช้ขนาดของสัญญาณスペกตรัมที่ความถี่ $f_s / (f_s - f_r)$



ภาพที่ 3.17 ผังงานขั้นตอนการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างอัลกอริทึม



(ก) สัญญาณกระแสในโคล เมนเวลา

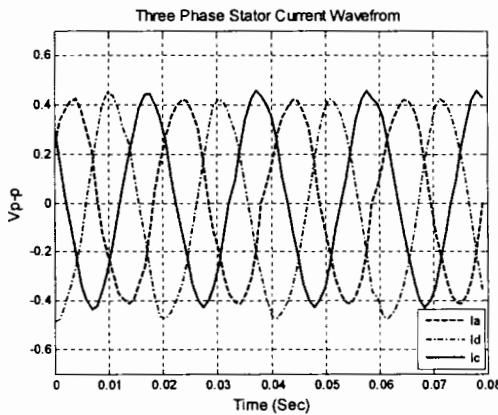
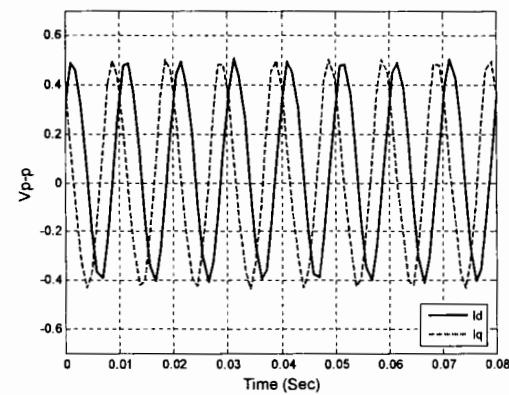


(ข) สัญญาณกระแสในโคล เมนความถี่

ภาพที่ 3.18 สัญญาณกระแสเตตอร์ที่ระเบียบการเยื่องศูนย์ 0.060 มม.

6) ใช้ในโครค่อนไทรอลเดอร์เบอร์ LPC1768 รับข้อมูลจากสัญญาณกระแสเตตอร์ที่ผ่านวงจรปรับแต่งสัญญาณทั้งสามเฟส สุ่มสัญญาณกระแสเตตอร์สามเฟส ด้วยความถี่ 1024 Hz จำนวน 2048 ข้อมูลต่อเฟส และคงสัญญาณทางโคล เมนเวลาทั้ง 3 เฟส ดังภาพที่ 3.19 (ก)

7) ทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์แปลงสัญญาณจากการอบอ้างอิงสามเฟส abc ไปสู่กรอบอ้างอิงในระบบ $dq0$ และแสดงสัญญาณกระแสในแนวแกน I_d และ I_q ในโคล เมนเวลาดังภาพที่ 3.19 (ข)

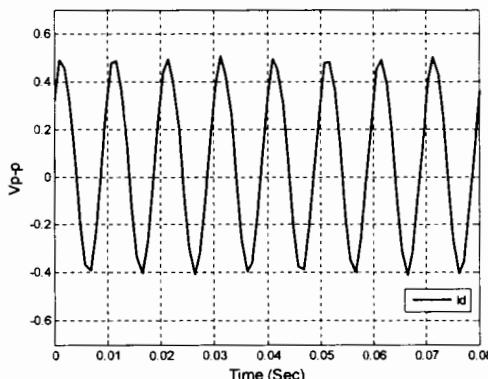
(ก) สัญญาณกระแสในระบบสามเฟส abc (ข) สัญญาณกระแสในแนวแกน I_d และ I_q

ภาพที่ 3.19 ตัวอย่างสัญญาณกระแสเตตอร์ในโคล เมนเวลาที่ระเบียบการเยื่องศูนย์ 0.060 มม.

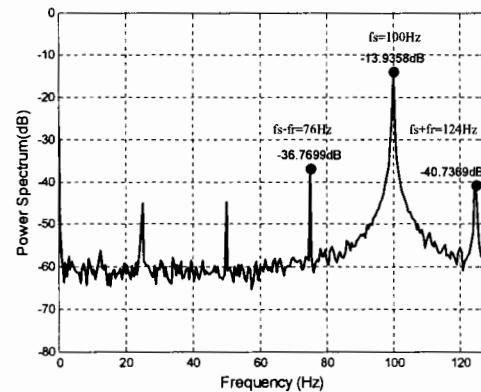
8) คำนวณทางคณิตศาสตร์แปลงสัญญาณกระแสแแนวแกน I_d ของโอดเมนเวลาแสดงดังภาพที่ 3.19 (ก) เป็นโอดเมนความถี่แสดงสเปกตรัมของกำลังหน่วยของ dB ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 6 ถึงข้อที่ 7 ซ้ำจำนวน 10 ครั้ง แล้วเฉลี่ยค่าสเปกตรัมกำลัง ผลการคำนวณแสดงได้ดังภาพที่ 3.19 (ข)

9) หาขนาดของสเปกตรัมกำลังที่ความถี่เด่นชัด $(2f_s \pm f_r)$ แล้วทำการหาอัตราส่วนโดยใช้ขนาดของสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $2f_s/(2f_s - f_r)$

10) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อที่ 9 จำนวน 5 ครั้งต่อระยะการเยื่องศูนย์ แล้วนำค่าที่ผ่านการหาอัตราส่วน $2f_s/(2f_s - f_r)$ มาหาค่าเฉลี่ยที่ระยะการเยื่องศูนย์ต่างๆ



(ก) สัญญาณกระแสในโอดเมนเวลา
ภาพที่ 3.20 ตัวอย่างสัญญาณกระแสเตอร์แแนวแกน I_d ที่ระยะการเยื่องศูนย์ 0.060 nm.



3.2.3 การสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระยะการเยื่องศูนย์
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระยะการเยื่องศูนย์ โดยใช้ข้อมูลของ I_a และ I_d จากการทดลองในข้อที่ 4 ข้อที่ 9 และข้อที่ 10 ของขั้นตอนการเก็บข้อมูล สร้างอัลกอริทึมการวิเคราะห์ระยะการเยื่องศูนย์ โดยใช้วิธีการทางสถิติสร้างสมการทดแทนพหุคูณ เชิงเส้นตามหัวข้อที่ 2.4 แสดงได้ดังสมการที่ (3.1)

$$X = b_0 + b_1 I_a + b_2 I_d \quad (3.1)$$

3.2.4 การวิเคราะห์ระเบการเยื่องศูนย์

นำอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระเบการเยื่องศูนย์ที่ได้จากการสร้างสมการที่ (3.1) มาใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อวิเคราะห์หาระเบการเยื่องศูนย์ทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ต่อระเบการเยื่องศูนย์

3.2.5 การวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์

ค่าซ่องว่างอากาศของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าเท่ากับ 0.500 น.m. และตามมาตรฐานการเยื่องศูนย์จากการผู้ผลิตที่ยอมรับได้ไม่เกิน 5% และในขณะที่ผู้ใช้งานมอเตอร์มีการเยื่องศูนย์ค่ายอมรับไม่เกิน 10% ของซ่องว่างอากาศ [3] โดยการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเยื่องศูนย์แสดงดังสมการที่ (3.2)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเยื่องศูนย์} = \varepsilon = \left(\frac{0.500}{100} \right) \cdot X \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.2) เป็นการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเยื่องศูนย์จากซ่องว่างอากาศ แล้ว ผลจากการคำนวณสามารถจำแนกเกณฑ์ระดับเยื่องศูนย์ ซึ่งจากการเยื่องศูนย์ระดับที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์การเยื่องศูนย์ไม่เกิน 5% ของมอเตอร์อยู่ในสภาพที่ปกติ เมื่อมอเตอร์มีการเยื่องศูนย์ระดับที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์การเยื่องศูนย์มากกว่า 5% แต่น้อยกว่า 10% ของมอเตอร์เริ่มผิดปกติในระดับต่ำ ระดับการเยื่องศูนย์ที่ 3 เปอร์เซ็นต์การเยื่องศูนย์มากกว่า 10% แต่น้อยกว่า 15% ของมอเตอร์มีความผิดปกติในระดับค่อนข้างสูงจะต้องมีการแจ้งเตือน และถ้าระดับเยื่องศูนย์ที่ 4 เปอร์เซ็นต์การเยื่องศูนย์มากกว่า 15% แต่น้อยกว่า 20% ของมอเตอร์มีระดับความผิดปกติที่รุนแรงจะต้องหยุดการทำงานของมอเตอร์และต้องมีการแก้ไขตรวจสอบโดยค่าวัน ซึ่งเกณฑ์การวินิจฉัยระดับเยื่องศูนย์จะเพิ่มครึ่งละ 5% ต่อระดับความรุนแรง ซึ่งในการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์ ซึ่งในงานวิจัยสามารถกำหนดดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์ในการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์

ระดับการเยื่องศูนย์	เปอร์เซ็นต์การเยื่องศูนย์	สภาพมอเตอร์
1	$\varepsilon < 5\%$	ระดับปกติ
2	$5\% < \varepsilon < 10\%$	ระดับเริ่มผิดปกติ
3	$10\% < \varepsilon < 15\%$	ระดับค่อนข้างแจ้งเตือน
4	$15\% < \varepsilon < 20\%$	ระดับแก้ไขโดยค่าวัน

3.2.6 การแสดงผลการวินิจฉัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการแสดงผลระดับเยื่องศูนย์ของการวินิจฉัย ซึ่งประกอบด้วยแสดงผลที่จุดเฝ้าตรวจระดับเยื่องศูนย์ และผลการรายงานผลการวินิจฉัยแบบการสื่อสารไร้สายตามมาตรฐาน XBEE ไปยังคอมพิวเตอร์

3.2.6.1 การแสดงผลระดับเยื่องศูนย์ที่จุดเฝ้าตรวจเมื่อไม่ได้รับสัญญาณ สำหรับมวลผลวิเคราะห์หาระยะและระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงผลระดับการเยื่องศูนย์ที่จุดตรวจวัดโดยใช้ LED 4 หลอด แสดงระดับของการเยื่อง 4 ระดับ โดยใช้เกณฑ์การจำแนกระดับเยื่องศูนย์ในตารางที่ 3.2 ดังนี้ การเยื่องศูนย์ระดับที่ 1 ให้ LED1 ติด ส่วน LED ที่เลือกหมวด การเยื่องศูนย์ระดับที่ 2 ให้ LED2 ติด ส่วน LED ที่เลือกหมวด การเยื่องศูนย์ระดับที่ 3 ให้ LED3 ติด ส่วน LED ที่เลือกหมวด และการเยื่องศูนย์ระดับที่ 4 ให้ LED4 ติด ส่วน LED ที่เลือกหมวด ซึ่งสามารถบอกระดับเยื่องศูนย์ที่ตำแหน่งตรวจวัดได้ส่วนการแสดงผลแสดงดังภาพที่ 3.21

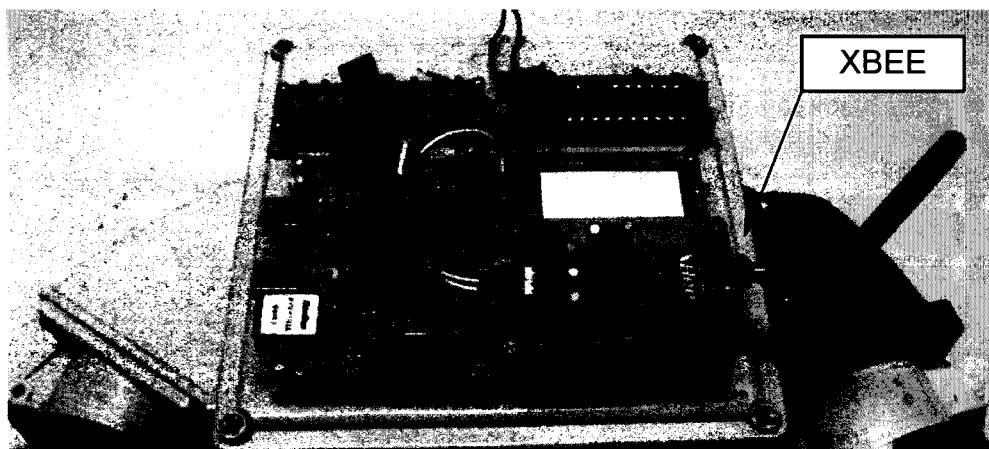


ภาพที่ 3.21 LED ที่ใช้แสดงผลที่จุดตรวจระดับการเยื่องศูนย์

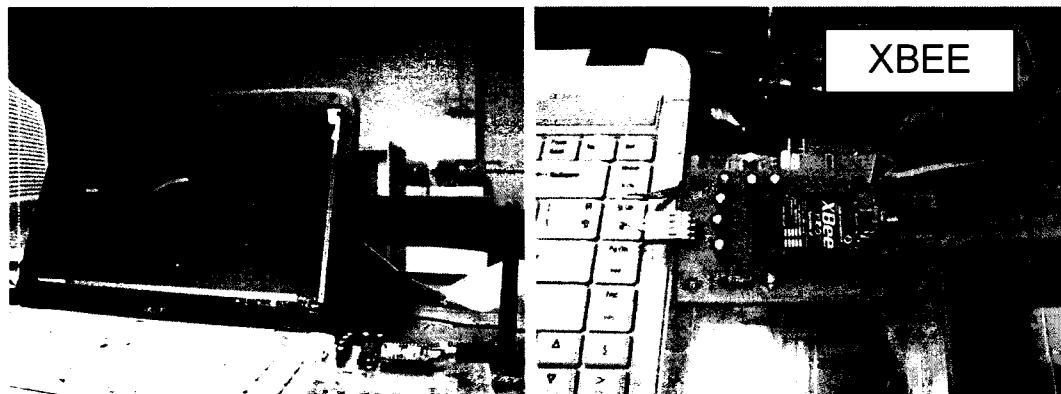
3.2.6.2 การรายงานผลการวินิจฉัยไปยังระบบเฝ้าตรวจวินิจฉัย ระดับการเยื่องศูนย์แบบไร้สาย ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

1) การส่งข้อมูลแบบไร้สาย เมื่อไม่ได้รับสัญญาณ สำหรับมวลผลวิเคราะห์และวินิจฉัยระดับเยื่องศูนย์ จะส่งข้อมูลรายงานผลไปยังระบบเฝ้าตรวจแบบไร้สาย ผ่านการสื่อสาร RS232 ให้กับ XBEE Pro 50mW RPSMA - Series 2 (ZB) รับ-ส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 9600 bps จากนั้น XBEE จะส่งข้อมูลแบบไร้สายตามมาตรฐานโปรโตคอล ZigBee/IEEE 802.15.4 ย่านความถี่ 2.4 GHz ดังภาพที่ 3.22

- 2) การรับข้อมูลแบบไร้สาย ใช้ XBEE Pro 50mW RPSMA - Series 2 (ZB) รับ-ส่งด้วยความเร็ว 9600 bps รับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วส่งข้อมูลต่อให้กับคอมพิวเตอร์ผ่านมาตรฐาน RS232 ดังภาพที่ 3.23



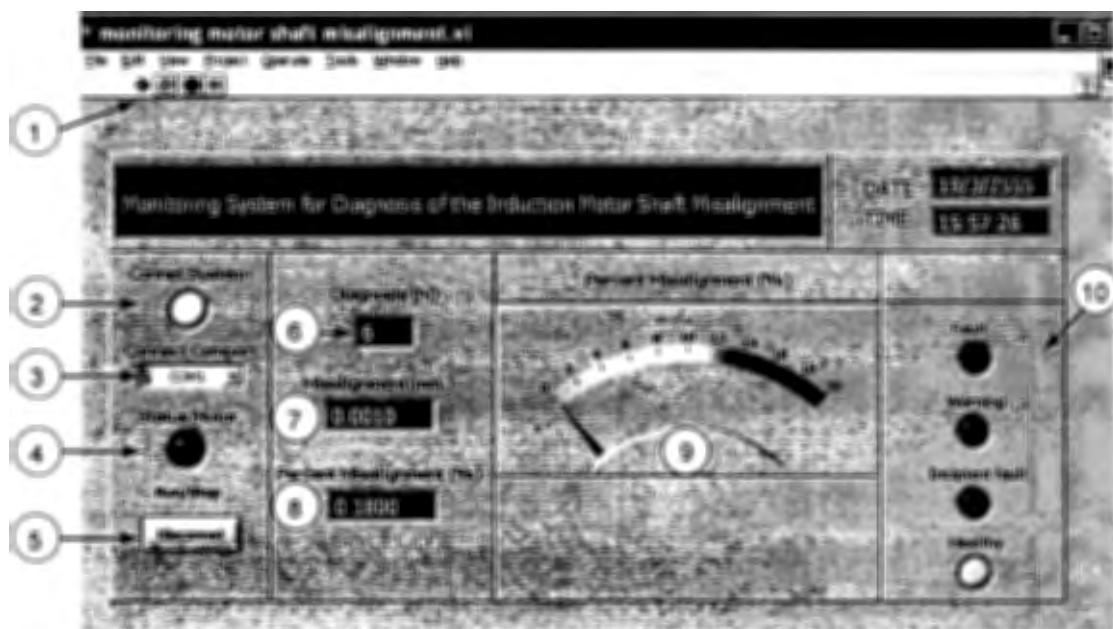
ภาพที่ 3.22 ชุดส่งรายงานผลวินิจฉัยการเยื่องศูนย์แบบไร้สายด้วย XBEE



ภาพที่ 3.23 ชุดรับรายงานผลการวินิจฉัยการเยื่องศูนย์แบบไร้สายด้วย XBEE

- 3) โปรแกรมแสดงผลระดับเยื่องศูนย์บนคอมพิวเตอร์ ทำหน้าเพื่อตรวจระดับเยื่องศูนย์ของมอเตอร์ เป็นโปรแกรมที่พัฒนาจากโปรแกรม LabVIEW 8.5 [24] รับข้อมูลจากพอร์ตการสื่อสาร RS-232 รับข้อมูลรายงานผลแบบไร้สายของ XBEE ซึ่งแสดงผลการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ ตามจำนวนครั้งของตรวจวัด ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 6

ส่วนครั้งที่ 6 คือการหาค่าเฉลี่ยของระยะเยื่องศูนย์ แล้วทำการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์ โดยใช้เกณฑ์ในตารางที่ 3.2 โปรแกรมรายงานผลการวินิจฉัยการเยื่องศูนย์ดังภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 ตัวอย่างโปรแกรมรายงานผลการวินิจฉัยการเยื่องศูนย์ด้วยคอมพิวเตอร์

มีรายละเอียดดังนี้

หมายเลข 1 สั่งโปรแกรมทำงาน (RUN)

หมายเลข 2 แสดงการเชื่อมต่อ กับ XBEE

หมายเลข 3 เลือก Comport ในการติดต่อ กับ XBEE โปรแกรมกำหนดเริ่มต้นเป็น COM1

หมายเลข 4 แสดงการสถานะของมอเตอร์ทำงานอยู่หรือหยุดทำงาน

หมายเลข 5 ยกเลิกการเชื่อมต่อ กับการรับส่งข้อมูล

หมายเลข 6 แสดงครั้งที่ของการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ ครั้งที่ 6 คือค่าเฉลี่ยของตรวจวัดครั้งที่ 1 ถึง 5

หมายเลข 7 แสดงระดับเยื่องศูนย์เป็นหน่วยมิลลิเมตร(mm)

หมายเลข 8 แสดงระดับเยื่องศูนย์เป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

หมายเลข 9 แสดงระดับเยื่องศูนย์เป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ที่แสดงเป็นกราฟิก

หมายเลขอ 10 แสดงระดับความผิดปกติจากการเยื่องศูนย์แสดงเป็น 4 ระดับดังนี้
(Healthy) การเยื่องศูนย์ระดับ 1 คือมอเตอร์ปกติ
(Incipient fault) การเยื่องศูนย์ระดับ 2 คือระดับเริ่มผิดปกติ
(Warning) การเยื่องศูนย์ระดับ 3 คือระดับต้องแจ้งเตือน
(Fault) การเยื่องศูนย์ระดับ 4 คือระดับต้องแก้ไขโดยด่วน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้ เป็นผลการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ในการประมวลผล การตรวจวัดสัญญาณกระแสเตอร์เฟส A (I_a) ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว คำนวณทางคณิตศาสตร์แปลงสัญญาณในโอดเมนทางเวลาเป็นโอดเมนทางความถี่ หาอัตราส่วนของขนาดสัญญาณที่ความถี่ ($f_s / f_s - f_r$) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์วินิจฉัยระยะเบื้องศูนย์ของมอเตอร์รุ่นเดียวกัน และทดลองหาข้อมูลเพื่อการสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระดับเบื้องศูนย์โดยใช้สัญญาณกระแสเตอร์เฟส A (I_a) หาอัตราส่วนของขนาดสัญญาณที่ความถี่ ($f_s / f_s - f_r$) และกระแสในแนวแกน (I_d) คำนวณหาอัตราส่วนของขนาดสัญญาณที่ความถี่ $2f_s / (2f_s - f_r)$ ใช้ข้อมูลดังกล่าว สร้างอัลกอริทึมในวิเคราะห์ระดับเบื้องศูนย์จากนั้นนำอัลกอริทึมที่สร้างขึ้น ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทดลองตรวจวัดระดับเบื้องศูนย์พร้อมกับรายงานผลการตรวจวัดล่งข้อมูลໄร์สายแบบเวลาจริง

4.1 ผลการทดลองของขนาดของสัญญาณเชิงความถี่มอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ที่ระยะเบื้องศูนย์ 0.000 นม. ถึง 0.150 นม. โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

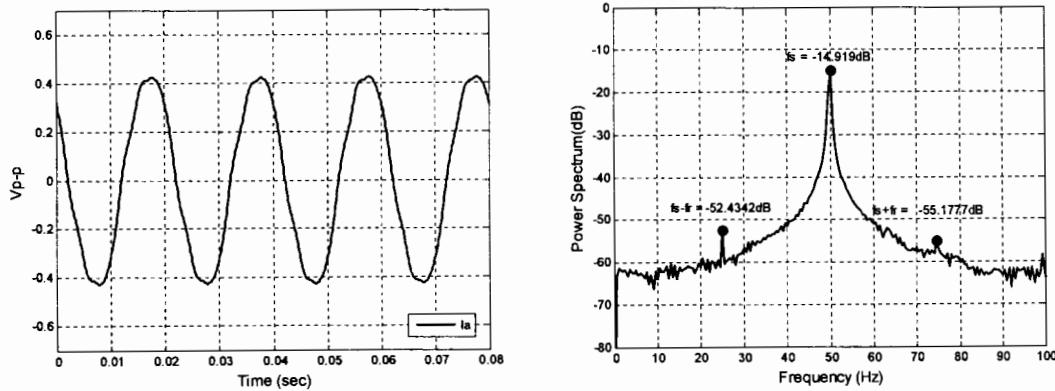
ในงานวิจัยใช้มอเตอร์ขนาดพิกัด 7.5 kW 4 Pole ซึ่งข้อมูลการทำงานในสภาวะปกติในสภาวะไม่มีโหลด ความเร็วรอบที่ได้จากการวัด 1,437 rpm ค่ากระแส 1.75 A ความถี่ใช้งาน 50 Hz และ $f_r = 1437/60 = 23.95$ Hz ดังนั้นจึงสามารถคำนวณความถี่ที่สัมพันธ์กับการเบื้องศูนย์ คำนวณได้จากสมการ

$$f_{ecc} = f_s \pm mf_r$$

แทนค่า $f_s = 50$ Hz, $m = 1$

ได้ความถี่ที่สัมพันธ์กับการเบื้องศูนย์ $f_s - f_r = 26.05$ Hz และ $f_s + f_r = 73.95$ Hz

ตัวอย่างกระแสเตเตอร์มอเตอร์ในสภาวะปกติ (ที่ระยะเยื่องศูนย์ 0.000 มม.) ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ทางโคมนเวลา แสดงดังภาพที่ 4.1 (ก) แล้วใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลคำนวณทางคณิตศาสตร์เปลี่ยนสัญญาณในโคมนทางเวลาเป็นสัญญาณทางโคมนความถี่ เพื่อหาขนาดสัญญาณที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ แสดงดังภาพที่ 4.1 (ข)

(ก) สัญญาณกระแส I_a ในโคมนเวลา(ข) สัญญาณกระแส I_a ในโคมนความถี่

ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างกระแสในสภาวะปกติ (ที่ระยะเยื่องศูนย์ 0 มม.) ของมอเตอร์ตัวที่ 1

ในการางผลการทดลองที่ 4.1 เมื่อปรับระยะเยื่องศูนย์ตั้งแต่ 0.000 มม. ถึง 0.150 มม. ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในสภาวะปกติ ขนาดสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s - f_r = -54.3545$ dB ที่ความถี่ $f_s = -13.7843$ dB และที่ความถี่ $f_s + f_r = -57.9979$ dB ซึ่งจะเป็นข้อมูลของมอเตอร์ในสภาวะปกติ และมีขนาดสเปกตรัมที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระยะเยื่องศูนย์ที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.1 สเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ เมื่อปรับระยะเยื่องศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่ 1

ขนาดสเปกตรัมกำลังของมอเตอร์ตัวที่ 1 (dB)						
ระยะเยื่องศูนย์	0.000 มม.	0.030 มม.	0.060 มม.	0.090 มม.	0.120 มม.	0.150 มม.
$f_s - f_r$	-54.3545	-53.7502	-50.7069	-51.6747	-44.2633	-39.3191
f_s	-13.7843	-13.6993	-14.0399	-14.1654	-13.3519	-13.6263
$f_s + f_r$	-57.9979	-54.5935	-51.0586	-56.5247	-46.6175	-41.6385

ในตารางผลการทดลองที่ 4.2 เมื่อปรับระบayer เยื่องศูนย์ตั้งแต่ 0.000 นม. ถึง 0.150 นม. ของมอเตอร์ตัวที่ 2 ในสภาพปปกติ ขนาดสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $(f_s - f_r) = -54.312$ dB ขนาดสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s = -13.7844$ dB และที่ความถี่ $(f_s + f_r) = -56.7931$ dB ซึ่งจะเป็นข้อมูลของมอเตอร์ในสภาพปปกติ และมีขนาด spectrum ที่ความถี่ $(f_s \pm f_r)$ เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระบayer เยื่องศูนย์ที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.2 สเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $(f_s \pm f_r)$ เมื่อปรับระบayer เยื่องศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่ 2

ขนาดสเปกตรัมกำลังของมอเตอร์ตัวที่ 2 (dB)						
ระบayer เยื่องศูนย์	0.000 นม.	0.030 นม.	0.060 นม.	0.090 นม.	0.120 นม.	0.150 นม.
$f_s - f_r$	-54.312	-51.9004	-52.606	-47.8628	-46.2369	-40.9317
f_s	-13.7844	-13.7017	-14.0405	-14.1674	-13.3532	-13.6262
$f_s + f_r$	-56.7931	-53.5873	-54.9238	-48.8735	-48.7649	-43.9002

ในตารางผลการทดลองที่ 4.3 เมื่อปรับระบayer เยื่องศูนย์ตั้งแต่ 0.000 นม. ถึง 0.150 นม. ของมอเตอร์ตัวที่ 3 ในสภาพปปกติ ขนาดสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s - f_r = -54.9539$ dB ขนาดสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s = -13.7824$ dB และขนาดสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s + f_r = -58.0156$ dB ซึ่งจะเป็นข้อมูลของมอเตอร์ในสภาพปปกติ และมีขนาด spectrum ที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระบayer เยื่องศูนย์ที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.3 สเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ เมื่อปรับระบayer เยื่องศูนย์ของมอเตอร์ตัวที่ 3

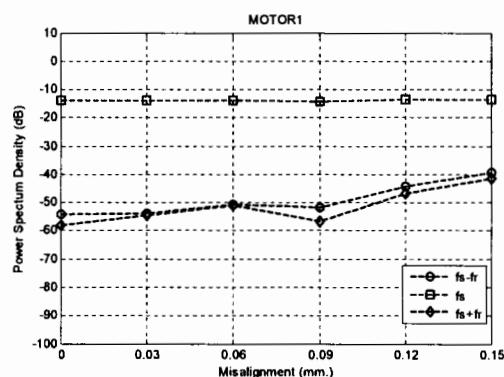
ขนาดสเปกตรัมกำลังของมอเตอร์ตัวที่ 3 (dB)						
ระบayer เยื่องศูนย์	0.000 นม.	0.030 นม.	0.060 นม.	0.090 นม.	0.120 นม.	0.150 นม.
$f_s - f_r$	-54.9539	-52.8173	-51.1164	-46.8398	-41.7433	-38.115
f_s	-13.7824	-13.7008	-14.0417	-14.1644	-13.3537	-13.6261
$f_s + f_r$	-58.0156	-55.9705	-56.0247	-53.6737	-44.4474	-42.9519

เมื่อนำข้อมูลในตารางผลการทดลองที่ 4.1 มาแสดงดังภาพที่ 4.2 (ก) ตารางผลการทดลองที่ 4.2 แสดงดังภาพที่ 4.2 (ข) และ ตารางผลการทดลองที่ 4.3 แสดงดังภาพที่ 4.2 (ค) เมื่อหา

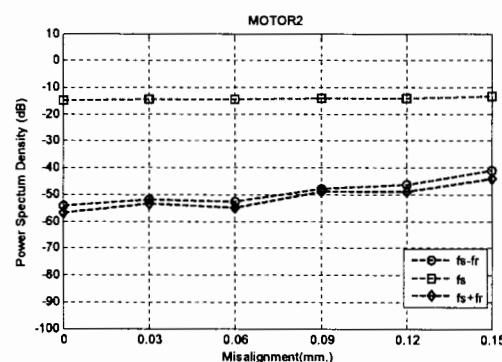
อัตราส่วนขนาดสัญญาณที่ความถี่ ($f_s / f_s - f_r$) ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว แสดงในตารางที่ 4.4 มีค่าใกล้เคียงกันที่ระยะเยื่องศูนย์ตั้งแต่ 0.000 น.m. ถึง 0.060 น.m. แต่เมื่อระยะเยื่องศูนย์มากกว่า 0.060 น.m. ถึง 0.150 น.m. มีค่าขนาดสัญญาณที่ไม่แน่นอน ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวแสดงดังภาพที่ 4.2 (ง)

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ ($f_s / f_s - f_r$) เมื่อปรับระยะเยื่องศูนย์มอเตอร์ทั้ง 3 ตัว

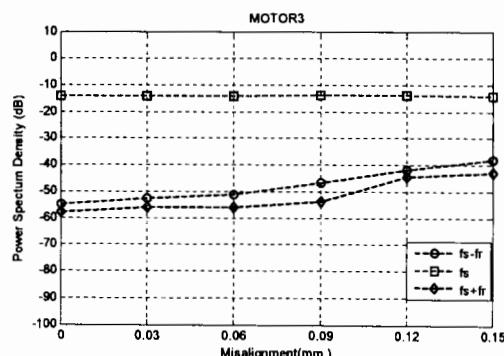
อัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ ($f_s / f_s - f_r$)						
ระยะเยื่องศูนย์	0.000 น.m.	0.030 น.m.	0.060 น.m.	0.090 น.m.	0.120 น.m.	0.150 น.m.
มอเตอร์ตัวที่ 1	0.2536	0.2549	0.2769	0.2741	0.3016	0.3466
มอเตอร์ตัวที่ 2	0.2538	0.2640	0.2669	0.2960	0.2888	0.3329
มอเตอร์ตัวที่ 3	0.2508	0.2594	0.2747	0.3024	0.3199	0.3575



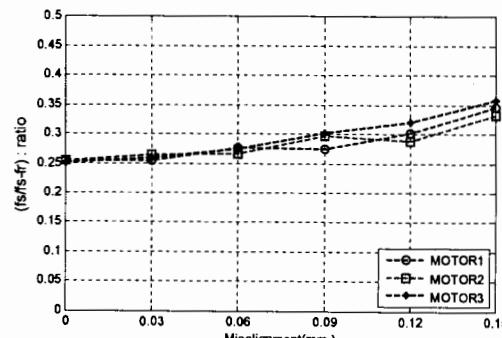
(ก) ขนาดสัญญาณ $f_s \pm f_r$ มอเตอร์ตัวที่ 1



(บ) ขนาดสัญญาณ $f_s \pm f_r$ มอเตอร์ตัวที่ 2



(ก) ขนาดสัญญาณ $f_s \pm f_r$ มอเตอร์ตัวที่ 3



(ง) ขนาดสัญญาณ ($f_s / f_s - f_r$) มอเตอร์ทั้ง 3 ตัว

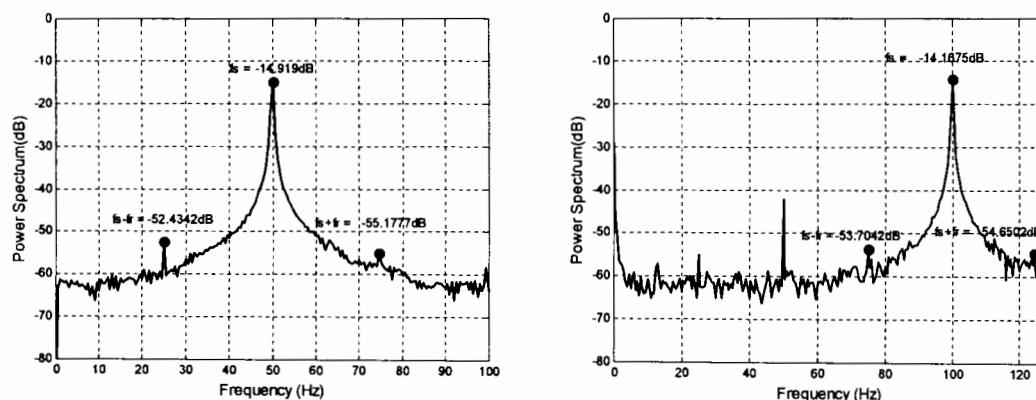
ภาพที่ 4.2 สัญญาณที่ความถี่ $f_s \pm f_r$ สัมพันธ์กับระยะเยื่องของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว

จากมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาด 7.5 kW จำนวน 3 ตัวพิกัดเดียวกัน วิเคราะห์ผลท้ายการทดลอง เปรียบเทียบระดับเสียงศูนย์กับอัตราส่วนของขนาดสัญญาณ ($f_s / f_s - f_r$) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขนาดสัญญาณที่ ($f_s / f_s - f_r$) มีค่าเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกันมาก และมีค่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระดับเสียงศูนย์ที่เพิ่มขึ้น ของมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง ตัวที่สองและตัวที่สามตามลำดับ จากการคำนวณพบว่า ที่ระดับเสียงศูนย์ 0.000 นม.ถึง 0.150 นม.ค่าขนาดสัญญาณของมอเตอร์ตัวที่หนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 0.093 มอเตอร์ตัวที่สองเพิ่มขึ้น 0.0791 และมอเตอร์ตัวที่สามเพิ่มขึ้น 0.1067 ซึ่งมอเตอร์ตัวที่หนึ่งกับตัวที่สามมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกันแต่ไม่ใกล้เคียงกับตัวที่สอง ในระดับเสียงศูนย์ตั้งแต่ 0.000 นม.ถึง 0.060 นม.ขนาดสัญญาณมีค่าการเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกันทั้งสามตัว แต่เมื่อระดับเสียงศูนย์มากกว่า 0.060 นม.ค่าสัญญาณที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกัน

ฉะนั้นระดับเสียงศูนย์ที่เป็นเกณฑ์ในการจำแนกระดับเสียงตั้งแต่ 0.000 นม.ถึง 0.060 นม. หรือ (0 % ถึง 12 %) ซึ่งข้อมูลของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวที่มีขนาดสัญญาณมีค่าการเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกันแสดงในตารางที่ 4.6

4.2 ทดลองหาข้อมูลเพื่อการสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระดับเสียงศูนย์

ในการทดลองหาข้อมูลเพื่อสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระดับเสียงศูนย์ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1 ทดลองหาขนาดของสัญญาณความถี่แบบข้างที่ระดับเสียงศูนย์ 0.000 นม.ถึง 0.0060 นม. (ระดับเสียงศูนย์ 0 % ถึง 12 % คำนวณจากสมการที่ 3.2) ใช้ข้อมูลจากมอเตอร์เพียง 1 ตัว จากรезультатการทดลองเมื่อปรับแกนเพลาให้อยู่ในสภาพะปกติมีระดับเสียงศูนย์ 0 % ซึ่งสัญญาณในโอดเมนทางความถี่ แสดงดังภาพที่ 4.3



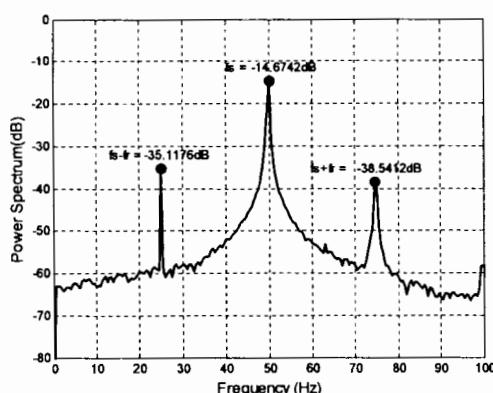
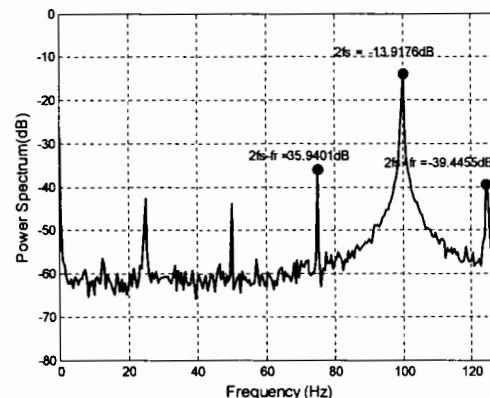
(ก) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณกระแส I_a

(ข) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณกระแส I_d

ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมกำลังของสัญญาณกระแส ในโอดเมนทางความถี่ที่ระดับเสียงศูนย์ 0 %

จากภาพที่ 4.3 สเปกตรัมกำลังของกระแส I_a ที่ความถี่ $f_s - f_r = -52.4342$ dB ที่ความถี่ $f_s = -14.9190$ dB และที่ความถี่ $f_s + f_r = -55.1777$ dB ส่วนกระแสเปล่งจากกรอบอ้างอิงสามเฟส abc เป็นกรอบอ้างอิง dq0 สเปกตรัมกำลังกระแส I_d ที่ความถี่ $2f_s - f_r = -53.7042$ dB ที่ความถี่ $f_s = -14.1675$ dB, และที่ความถี่ $2f_s + f_r = -54.6502$ dB ซึ่งสเปกตรัมกำลังของความถี่แทนข้างของกระแส I_a และ I_d ทั้งสองมีขนาดที่ต่างมาก

เมื่อปรับแกนเพลาให้มีระดับเสียงศูนย์เท่ากัน 12 % เป็นระบบที่มากที่สุดที่ใช้ในงานวิจัย สเปกตรัมกำลังกระแสเฟส I_a ที่ความถี่แทนข้าง $f_s - f_r = -35.1176$ dB ความถี่ $f_s = -14.6742$ dB และความถี่ $f_s + f_r = -38.4512$ dB ส่วนสัญญาณกระแสที่เปล่งจากกรอบอ้างอิงสามเฟส abc เป็นกรอบอ้างอิง dq0 สเปกตรัมกำลังกระแสในแนวแกน I_d ที่ความถี่ $2f_s - f_r = -35.4091$ dB ที่ความถี่ $f_s = -13.9176$ dB และที่ความถี่ $2f_s + f_r = -39.4455$ dB ซึ่งสเปกตรัมกำลังของความถี่แทนข้างของกระแส I_a และ I_d มีขนาดที่มากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.4

(ก) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณกระแส I_a (ข) สเปกตรัมกำลังของสัญญาณกระแส I_d

ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมกำลังของสัญญาณกระแส ในโอดเมนทางความถี่ที่ระดับเสียงศูนย์ 12%

เมื่อผลการทดลองที่ระดับเสียงศูนย์ของแกนเพลามอเตอร์ตั้งแต่ 0 % ถึง 12 % ทดลองจำนวน 5 ครั้งต่อระดับเสียงศูนย์ อัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังที่ความถี่ $(f_s / f_s - f_r)$ ของกระแส I_a มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.12 ดังตารางที่ 4.5 และอัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_d ที่ความถี่ $2f_s / (2f_s - f_r)$ มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.12 เช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 4.6

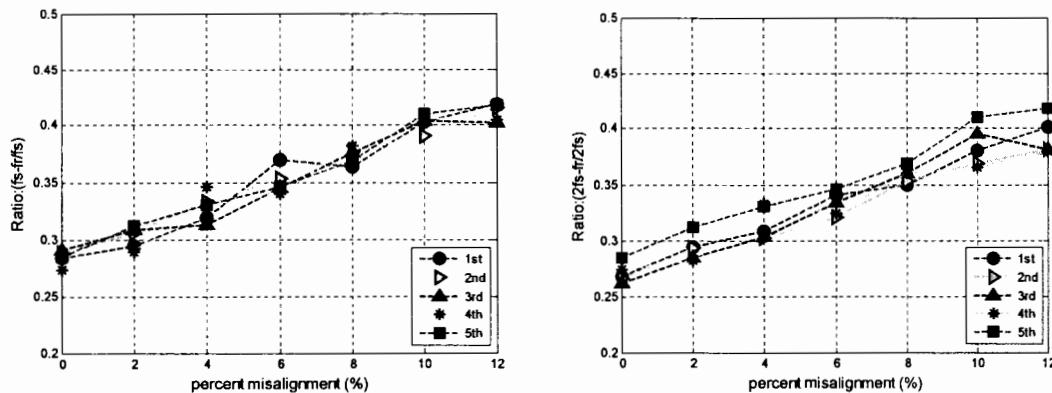
ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_a ที่ความถี่ $(f_s / f_s - f_r)$

อัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังกระแส I_a ที่ความถี่ $(f_s / f_s - f_r)$								
เบอร์เซ็นต์ระดับเยื่องศูนย์	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	
ทดลองครั้งที่	1	0.284	0.294	0.319	0.370	0.364	0.403	0.419
	2	0.288	0.306	0.333	0.353	0.377	0.391	0.415
	3	0.291	0.308	0.313	0.345	0.376	0.404	0.402
	4	0.273	0.289	0.346	0.340	0.382	0.407	0.405
	5	0.285	0.312	0.330	0.346	0.369	0.410	0.418
ค่าเฉลี่ย		0.284	0.302	0.328	0.351	0.374	0.403	0.412

ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_d ที่ความถี่ $2f_s / (2f_s - f_r)$

อัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังกระแส I_d ที่ความถี่ $2f_s / (2f_s - f_r)$								
เบอร์เซ็นต์ระดับเยื่องศูนย์	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	
ทดลองครั้งที่	1	0.268	0.294	0.308	0.341	0.350	0.380	0.401
	2	0.266	0.293	0.302	0.321	0.353	0.369	0.381
	3	0.262	0.285	0.303	0.334	0.360	0.395	0.381
	4	0.274	0.282	0.333	0.324	0.360	0.365	0.379
	5	0.264	0.289	0.302	0.337	0.348	0.379	0.387
ค่าเฉลี่ย		0.267	0.289	0.310	0.331	0.354	0.378	0.386

เมื่อนำข้อมูลการทดลองในตารางที่ 4.5 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระดับเยื่องศูนย์กับอัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_a ที่ความถี่ $(f_s / f_s - f_r)$ แสดงดังภาพที่ 4.5 (ก) และนำข้อมูลการทดลองในตารางที่ 4.6 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระดับเยื่องศูนย์กับอัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_d ที่ความถี่ $2f_s / (2f_s - f_r)$ แสดงดังภาพที่ 4.5 (ข)

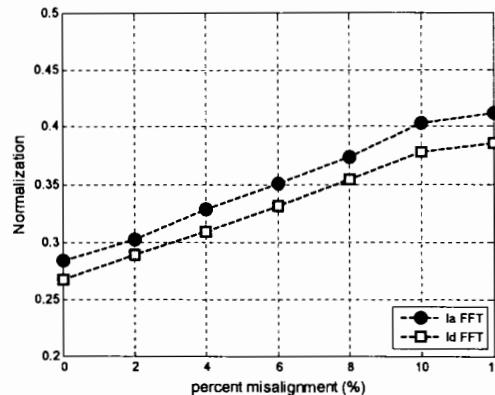


(ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง比率การเยื่องกับอัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_a ที่ความถี่ $(f_s / f_s - f_r)$

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง比率การเยื่องกับอัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_d ที่ความถี่ $2f_s / (2f_s - f_r)$

ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง比率การเยื่องกับอัตราส่วนของสเปกตรัมกำลังของกระแส I_a และสเปกตรัมกำลังของกระแส I_d

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 หาค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละระดับเยื่อง แสดงดังภาพที่ 4.6 (ก)



ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับเยื่องกับค่าเฉลี่ยขนาดกระแส I_a และขนาดกระแส I_d

จากการทดลองในข้อ 4.1.2 พบว่ามอเตอร์ทั้ง 3 ตัวมีการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณ $(f_s / f_s - f_r)$ ที่ระดับเยื่องศูนย์ 0 %-12 % เมื่อค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำข้อมูลเพียง 1 ตัวใช้เป็นข้อมูลแทนมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวได้ที่ระดับเยื่องศูนย์ไม่เกิน 12% การทดลองเลือกใช้มอเตอร์ตัวที่หนึ่ง และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ขนาดสัญญาณกระแส (I_a) ที่

$(f_s / f_s - f_r)$ มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 0.1276 และขนาดสัญญาณกระแสในแนวแกน (I_d) ที่ $2f_s / (2f_s - f_r)$ มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 0.1190 อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันและสัมพันธ์กับระดับการเยื่องศูนย์ที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.6 เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ของค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับการเยื่องศูนย์มาสร้างสมการวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์

4.3 การสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์

ใช้นำข้อมูลในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ของค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับการเยื่องศูนย์สร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์โดยวิธีการถอดสายเชิงเส้นพหุคุณนี้เป็นการใช้ตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวคือกระแสในเฟส A (I_a) และกระแสในแนวแกน (I_d) เพื่อการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามคือระดับเยื่องศูนย์ แสดงเพิ่มเติมในภาคผนวก ก ซึ่งได้สมการวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์ดังสมการที่ (4.1)

$$X = -0.1267 + (0.2042)I_a + (0.2574)I_d \quad (4.1)$$

4.4 ผลการใช้ในโครคอนโทรลเลอร์วิเคราะห์และวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์

เมื่อนำสมการที่ 4.1 ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการทดลองวินิจฉัยระดับเยื่องศูนย์ของมอเตอร์ ที่ระดับเยื่องศูนย์ 0% - 12% มีผลการทดลองตามตารางที่ 4.7

จากผลการทดลองเฝ้าตรวจที่มอเตอร์ปกติ (ระดับเยื่องศูนย์ 0 %) ทดลองช้ำจำนวน 5 ครั้ง ผลกระทบเยื่องศูนย์อยู่ในช่วง -0.1380 % ถึง 0.517 % เมื่อนำผลการทดลองทั้ง 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย แล้วแสดงผลจะทำให้ผลการวิเคราะห์หาระดับเยื่องศูนย์มีค่าเข้าใกล้ระดับมากขึ้น จากระดับเยื่องศูนย์มากที่สุด 0.517 % ลดลงเป็นระดับเยื่องศูนย์ 0.18 % ส่วนโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์แสดงในระดับที่ 1 คือมอเตอร์อยู่ในสภาพปกติ แสดงในภาคผนวก ก ภาพที่ ก.2

ผลการทดลองเฝ้าตรวจระดับเยื่องศูนย์ 2 % ทดลองช้ำจำนวน 5 ครั้ง ผลกระทบเยื่องศูนย์อยู่ในช่วง 1.7660 % ถึง 4.0690 % เมื่อนำผลการทดลองทั้ง 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย แล้วแสดงผลจะทำให้ผลการวิเคราะห์หาระดับเยื่องศูนย์มีค่าเข้าใกล้ระดับมากขึ้น จากระดับเยื่องศูนย์มากที่สุด 4.0690 % ลดลงเป็นระดับเยื่องศูนย์ 2.6920 % ส่วนโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงในระดับที่ 1 คือมอเตอร์อยู่ในสภาพปกติ แสดงในภาคผนวก ก ภาพที่ ก.4

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเพื่อตรวจวัดระดับเสียงคุณย์ที่ 0 % ถึง 12 %

ค่าการเยื่องคุณย์ จากการวัด ค่าการ เยื่องคุณย์ จากการตั้งค่า ชุดทดลอง	ครั้งที่												ระดับเสียงคุณย์ (จากการวัด)	
	1		2		3		4		5		เฉลี่ย			
	%	nm.	%	nm.	%	nm.	%	nm.	%	nm.	%	nm.		
0% (0.000nm.)	0.260	0.001	0.260	0.001	0.260	0.001	0.260	0.001	0.260	0.001	0.180	0.001	ระดับ 1ปกติ	
2% (0.010nm.)	2.746	0.014	2.515	0.013	1.766	0.009	2.363	0.012	4.069	0.020	2.692	0.013	ระดับ 1ปกติ	
4% (0.020nm.)	5.228	0.026	5.446	0.027	5.297	0.026	3.767	0.019	3.859	0.019	4.719	0.024	ระดับ 1ปกติ	
6% (0.030nm.)	6.659	0.030	6.590	0.030	6.511	0.030	6.091	0.030	5.733	0.029	6.317	0.032	ระดับ 2 เริ่มผิดปกติ	
8% (0.040nm.)	7.729	0.039	7.194	0.036	8.166	0.041	8.252	0.041	7.718	0.039	7.812	0.039	ระดับ 2 เริ่มผิดปกติ	
10% (0.050nm.)	10.232	0.051	10.144	0.051	9.085	0.045	9.582	0.048	9.016	0.045	9.612	0.048	ระดับ 2 เริ่มผิดปกติ	
12% (0.060nm.)	12.470	0.062	12.282	0.061	12.421	0.062	11.235	0.056	10.571	0.053	11.796	0.059	ระดับ 3 ต้องแจ้งเตือน	

ผลการทดลองตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ 4 % ทดลองช้าจำนวน 5 ครั้ง ผลกระทบเยื่องศูนย์อยู่ในช่วง 3.7670 % ถึง 5.4460 % เมื่อนำผลการทดลองทั้ง 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยแล้วแสดงผลจะทำให้ผลการวิเคราะห์หาระดับเยื่องศูนย์มีค่าเข้าใกล้ระยะทดสอบมากขึ้น จากระดับเยื่องศูนย์มากที่สุด 5.4460 % ลดลงเป็นระดับเยื่องศูนย์ 3.7670 % ส่วนโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงในระดับที่ 1 คือมอเตอร์อยู่ในสภาพปกติ แสดงในภาคผนวก ก ภาพที่ ก.6

ผลการทดลองเฝ้าตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ 6 % จากผลการทดลอง ทดลองที่ระดับเยื่องศูนย์ 6% ทดลองช้าจำนวน 5 ครั้ง ผลกระทบเยื่องศูนย์อยู่ในช่วง 5.7330 % ถึง 6.6590 % เมื่อนำผลการทดลองทั้ง 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยแล้วแสดงผลจะทำให้ผลการวิเคราะห์หาระดับเยื่องศูนย์มีค่าเข้าใกล้ระยะตั้งค่าทดสอบมากขึ้น จากระดับเยื่องศูนย์มากที่สุด 6.6590 % ลดลงเป็นระดับเยื่องศูนย์ 5.7330 % ส่วนโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงในระดับที่ 2 คือมอเตอร์อยู่ในสภาพเริ่มเสีย แสดงในภาคผนวก ก ภาพที่ ก.8

ผลการทดลองเฝ้าตรวจที่ระดับเยื่องศูนย์ 8 % ทดลองช้าจำนวน 5 ครั้ง ผลกระทบเยื่องศูนย์อยู่ในช่วง 7.1940 % ถึง 8.2520 % เมื่อนำผลการทดลองทั้ง 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยแล้วแสดงผลจะทำให้ผลการวิเคราะห์หาระดับเยื่องศูนย์มีค่าเข้าใกล้ระยะทดสอบมากขึ้น จากระดับเยื่องศูนย์มากที่สุด 8.2520 % ลดลงเป็นระดับเยื่องศูนย์ 7.8120 % ส่วนโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงในระดับที่ 2 คือมอเตอร์อยู่ในสภาพเริ่มเสีย แสดงในภาคผนวก ก ภาพที่ ก.10

ผลการทดลองเฝ้าตรวจที่ระดับเยื่องศูนย์ 10 % ทดลองช้าจำนวน 5 ครั้ง ผลกระทบเยื่องศูนย์อยู่ในช่วง 9.0160 % ถึง 10.2320 % เมื่อนำผลการทดลองทั้ง 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยแล้วแสดงผลจะทำให้ผลการวิเคราะห์หาระดับเยื่องศูนย์มีค่าเข้าใกล้ระยะทดสอบมากขึ้น จากระดับเยื่องศูนย์มากที่สุด 10.2320 % ลดลงเป็นระดับเยื่องศูนย์ 9.6120 % ส่วนโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงในระดับที่ 2 คือมอเตอร์อยู่ในสภาพเริ่มเสีย แสดงในภาคผนวก ก ภาพที่ ก.12

ผลการทดลองเฝ้าตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ 12 % ทดลองช้าจำนวน 5 ครั้ง ผลกระทบเยื่องศูนย์อยู่ในช่วง 10.5710 % ถึง 12.4700 % เมื่อนำผลการทดลองทั้ง 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยแล้วแสดงผลจะทำให้ผลการวิเคราะห์หาระดับเยื่องศูนย์มีค่าเข้าใกล้ระยะทดสอบมากขึ้น จากระดับเยื่องศูนย์มากที่สุด 12.4700 % ลดลงเป็นระดับเยื่องศูนย์ 11.7960 % ส่วนโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงในระดับที่ 3 คือมอเตอร์อยู่ในต้องแจ้งเตือน แสดงในภาคผนวก ก ภาพที่ ก.14

การวิเคราะห์ผลการทดลองเฝ้าตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ จากทดลอง 5 ครั้งต่อระดับเยื่องศูนย์ นำผลการตรวจวัดคำนวณหาค่าเฉลี่ยเพื่อบอกเป็นระดับเยื่องศูนย์ ในครั้งที่ 6 ทำให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าทดสอบมากขึ้น และทำให้ลดค่าผิดพลาดจากตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ทดสอบตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์

ระดับเยื่องศูนย์ (%)	ค่าเฉลี่ย ระดับเยื่องศูนย์ (%)	ค่าผิดพลาด ระดับเยื่องศูนย์ (%)	C.V.
0	0.1800	0.1800	1.4137
2	2.6920	0.6920	0.3161
4	4.7190	0.7190	0.1763
6	6.3170	0.3170	0.0624
8	7.8120	0.1880	0.0542
10	9.6120	0.3880	0.0593
12	11.7960	0.2040	0.0721

จากการทดสอบในงานวิจัยนี้ที่ตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์โดยใช้อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นแล้วทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้งจากข้อมูลในตารางที่ 4.8 เมื่อทดสอบตรวจวัดที่ระดับเยื่องศูนย์ 0% มีค่าสัมประสิทธิ์ผันแปรมากที่สุดคือ 1.4137 ในระดับเยื่องศูนย์มากที่สุดตั้งแต่ 6 % - 12 % ค่าสัมประสิทธิ์ผันแปรลดลงเมื่อใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดจากค่าเฉลี่ยของการทดสอบการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ทั้ง 5 ครั้งต่อระยะเยื่องศูนย์ จะสามารถลดค่าความผิดพลาดได้

4.5 ผลระบบรายงานผ้าตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ไร้สายแบบเวลาจริง

จากการทดสอบของเตอร์ติดตั้งในห้องปฏิบัติการ ระบบสามารถรายงานผ้าตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ไร้สายแบบเวลาจริง จะส่งข้อมูลรายงานผลทุกๆ เวลา 3.33 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสัญญาณกระแสและประมวลผล ส่วนระยะเวลาในการส่งข้อมูลสูงสุดประมาณ 300 เมตร ผลการทดสอบรายงานผลไร้สายแบบเวลาจริงจะแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งสามารถรายงานผลดังนี้

- 4.5.1 แสดงระดับเยื่องศูนย์มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร
- 4.5.2 แสดงระดับเยื่องศูนย์เป็นเปอร์เซ็นต์
- 4.5.3 รายงานสภาพของเตอร์ว่าอยู่ในระดับใด
- 4.5.4 รายงานว่ามอเตอร์ทำงานอยู่หรือหยุดทำงาน
- 4.5.5 สามารถบันทึกผลของรายงานผลระดับเยื่องศูนย์ได้ในรูปแบบของ Text File

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัยระบบไฟต์รวจวัดระดับเยื่องคุณย์มอเตอร์ เหนี่ยวน้ำแบบเวลาจริงโดยมุ่งเน้นใช้ในโครค่อนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผลของระบบ ใช้เทคนิค การวิเคราะห์จากการแสดงผลในคอมเมนเชิงความถี่สามารถสรุปได้ดังนี้

สามารถใช้ในโครค่อนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัย หากความสัมพันธ์ของขนาดของ สัญญาณกระแสที่ความถี่เด่นชัด $f_s \pm f_r$ กับระดับเยื่องคุณย์ พบร้า ระดับเยื่องคุณย์ที่มากก็จะทำให้ ขนาดอัตราส่วนของสัญญาณความถี่ $f_s / (f_s - f_r)$ มีค่าเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกันในช่วงระดับเยื่องคุณย์ 0 % ถึง 12 % ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ส่วนระดับเยื่องคุณย์ที่มากกว่า 12 % มีค่าที่ไม่แน่นอน เนื่องจาก โครงสร้างของมอเตอร์เองมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถทดสอบองค์ประกอบระดับเยื่องคุณย์ที่เท่ากันได้ ใน งานวิจัยจึงสามารถใช้ข้อมูลอ้างอิงในการตรวจสอบระดับเยื่องคุณย์ที่ไม่เกิน 12 %

หากค่าของสัญญาณกระแส I_a ที่ความถี่เด่นชัด $f_s / (f_s - f_r)$ และค่าสัญญาณกระแส I_d ที่ความถี่เด่นชัด $2f_s / (2f_s - f_r)$ ที่ความสัมพันธ์กับระดับเยื่องคุณย์ พบร้า ค่าของสัญญาณ กระแสทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.12 มีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่ระดับเยื่องคุณย์ 0 %-12 % แต่ค่า เริ่มต้นของสัญญาณทั้งสองไม่เท่ากัน สามารถนำข้อมูลของสัญญาณทั้งสองมารวมกันสร้าง อัลกอริทึมตรวจวัดระดับเยื่องคุณย์ได้ด้วยวิธี MRA มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงถึง 0.9928

ในการตรวจวัดระดับเยื่องคุณย์ และวินิจฉัยระดับความผิดปกติมอเตอร์โดยใช้อัลกอริทึม ที่สร้างขึ้น พบร้า การตรวจวัดระดับการเยื่องคุณย์จำนวน 5 ครั้งต่อระดับเยื่องคุณย์ ที่ระดับเยื่องคุณย์ ตั้งแต่ 0 %- 4 % จะมีค่าความสัมประสิทธิ์ความผันแปรและค่าผิดพลาดมากกว่าในระดับเยื่องคุณย์ ตั้งแต่ 6 %- 12 % แต่เมื่อนำผลการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ย ทำให้ผลการตรวจวัดระดับเยื่องคุณย์มีความ ผิดพลาดลดลง ส่วนระบบรายงานผลการตรวจวัดระดับการเยื่องคุณย์ไร้สายแบบเวลาจริงจะรายงาน ผลทุกๆเวลา 3.33 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ระบบสามารถประมวลผลได้เร็วที่สุด ระบบสามารถแสดงผล การตรวจวัดระยะเยื่องคุณย์มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร แสดงระดับเยื่องคุณย์เป็นเปอร์เซ็นต์ ระดับความ รุนแรงของการเยื่องคุณย์อยู่ในระดับใด มอเตอร์ทำงานอยู่หรือหยุดทำงาน และสามารถบันทึกผล ของรายงานผลระดับเยื่องคุณย์ได้ในรูปแบบของ Text File

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์จากการเยื่องศูนย์ ด้วยการวิเคราะห์จากสัญญาณกระแสเต็ม เก่าสามารถตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องจักร ทำให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาของมอเตอร์เป็นไปอย่างสะดวก รวดเร็ว ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ซึ่งจากการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการเฝ้าตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์จากการเยื่องศูนย์ได้

5.2 งานที่ได้ดำเนินการ

5.2.1 ออกแบบชุดตรวจวัดสัญญาณกระแส (Current Sensor)

ได้ออกแบบสร้างชุดตรวจวัดสัญญาณกระแสจำนวน 3 ชุด ประกอบไปด้วยวงจรตรวจวัดสัญญาณกระแสเต็ม เวลา 1 วินาที วงจรยกระดับแรงดันสัญญาณและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่ 500 Hz ก่อนที่จะต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์

5.2.2 ทดลองและออกแบบสร้างอัลกอริทึม

ในการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญ ใช้เวลาในการทำวิจัยก้อนข้างมาก ทดลองหาระดับเยื่องศูนย์ที่สัมพันธ์กับสัญญาณกระแสเต็มที่ผิดปกติของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และทดลองหาข้อมูลที่ใช้ในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์

5.2.3 ออกแบบสร้างชุดรับ-ส่งข้อมูล

เป็นส่วนส่งข้อมูลที่รายงานผลการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ไว้สายแบบเวลาจริง การส่ง-รับข้อมูลจะใช้ XBEE ตามมาตรฐาน ZigBEE/IEEE 802.15.4 ย่านความถี่ 2.4 GHz สามารถรับและส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 9600 bps การกำหนดรูปแบบการรับ-ส่งข้อมูลแบบสตาร์

5.2.4 ออกแบบโปรแกรมแสดงผลตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์

เป็นส่วนที่แสดงผลของการรายงานระดับเยื่องศูนย์ ซึ่งจะแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW ทำหน้าที่เฝ้าตรวจการผิดปกติของมอเตอร์จากการเยื่องศูนย์ ซึ่งมีส่วนที่จะแสดงผลดังนี้ และบันทึกผลของการรายงานระดับเยื่องศูนย์ในรูปแบบของ Text File

5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.3.1 ความละเอียดของการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลให้มากขึ้น ทำให้ข้อมูลที่ได้จากการแปลงจะเป็นตัวแทนของสัญญาณ ซึ่งในงานวิจัยใช้ความละเอียดขนาด 12 บิต

5.3.2 การใช้ความถี่สุ่มข้อมูล (Sampling Rate) 4096 Hz เป็นอย่างน้อย ซึ่งในงานวิจัยใช้ความถี่สุ่มข้อมูลน้อยที่สุดคือ 1024 Hz เนื่องจากข้อจำกัดของจำนวนหน่วยข้อมูลของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เอง

5.3.3 ข้อจำกัดของเทคนิค FFT ใน การแปลงโคล เมนเวลาเป็นโคล เมนความถี่ที่ต้องใช้จำนวนข้อมูลมาพิจารณาให้ครบถ้วนเวลาและการร่วงไหลของสเปกตรัม

5.3.4 ระบบสื่อสารที่รายงานผลผ่านตรวจวัดระดับเสียงศูนย์ เนื่องจากเป็นระบบไร้สาย และใช้งานในห้องปฏิบัติการ จึงทำให้ระยะทางการรับ-ส่งข้อมูลประมาณ 300 เมตร

5.3.5 ข้อจำกัดของชุดทดลองปรับการเยื่องศูนย์เมื่อใช้ทดลองกับมอเตอร์ที่ขนาดพิกัด 7.5 kW เมื่อปรับระยะเยื่องศูนย์มากกว่า 12 % ไม่สามารถปรับระยะเยื่องศูนย์ให้มีความแม่นยำได้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

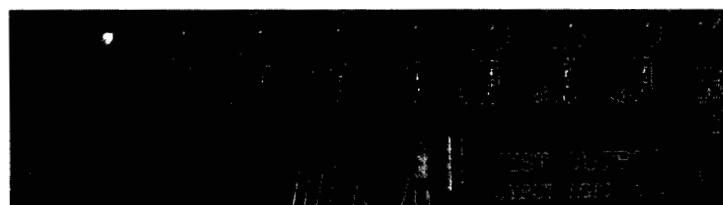
ผลการทดสอบ

ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์วิเคราะห์และวินิจฉัยระดับการเบี้องศูนย์

ในภาคผนวก ก ในส่วนนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์และวินิจฉัยระดับเบี้องศูนย์ สามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วนคือส่วนที่ 1 จะแสดงผลระดับเบี้องศูนย์ที่จุดวัดโดย LED ส่วนที่ 2 เป็นโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดโดยผ่านการรายงานผลด้วยระบบสื่อสาร ไร้สาย ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในครั้งที่ 6 เป็นผลค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้ง 5 ครั้งต่อร率为เบี้องศูนย์ มีผลการทดลองดังนี้

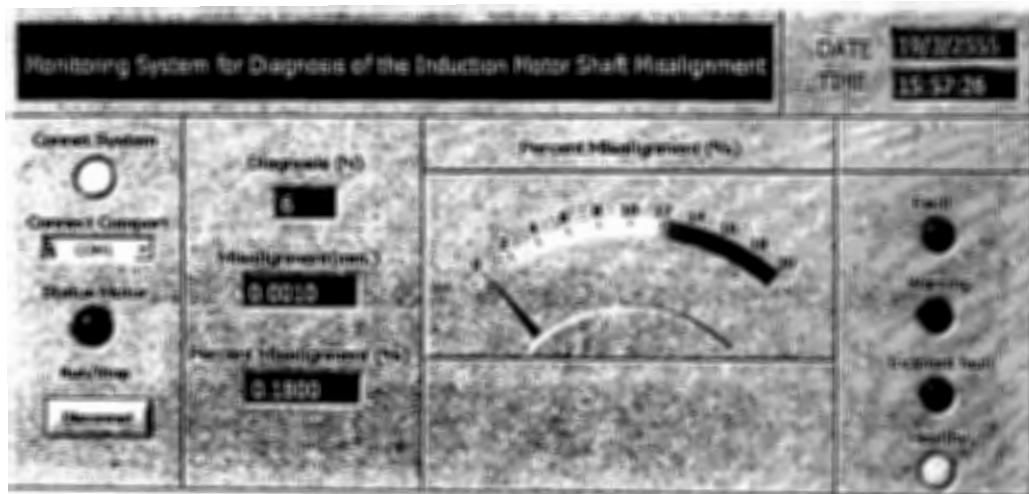
ก.1 ค่าเฉลี่ยของตรวจวัดระดับเบี้องศูนย์ 0 % แสดงเป็น ครั้งที่ 6

การทดลองตรวจวัดระดับการเบี้องศูนย์ที่จุดตรวจวัด โดยใช้ LED ผลการทดลอง ระดับการเบี้องศูนย์อยู่ในระดับที่ 1 ไมเตอร์อยู่ในสภาพปกติ ดังภาพที่ ก.1



ภาพที่ ก.1 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเบี้องศูนย์เฉลี่ย 0 %

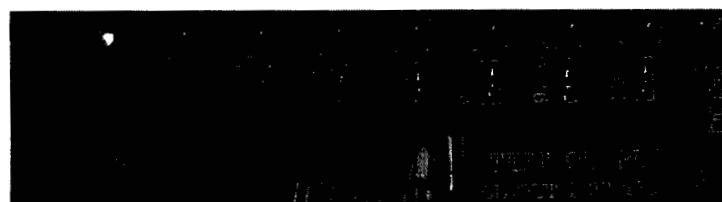
ใช้โปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเบี้องศูนย์จะแสดงอยู่ในระดับที่ 1 ไมเตอร์อยู่ในสภาพปกติ ดังภาพที่ ก.2



ภาพที่ ก.2 ผล โปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเบี้องศูนย์ 0 %

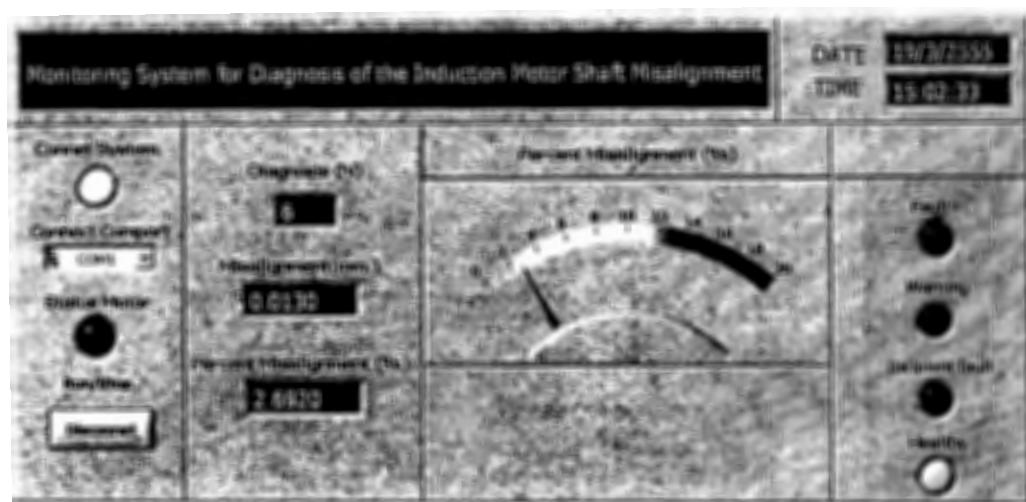
ก.2 ค่าเฉลี่ยของตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ 2 % แสดงเป็น ครั้งที่ 6

การทดลองตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์ที่จุดตรวจวัด โดยใช้ LED ผลการทดลอง ระดับการเยื่องศูนย์อยู่ในระดับที่ 1 ไมเตอร์อยู่ในสภาพปกติ ดังภาพที่ ก.3



ภาพที่ ก.3 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 2 %

ใช้โปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงอยู่ในระดับที่ 1 ไมเตอร์อยู่ใน สภาพปกติ ดังภาพที่ ก.4



ภาพที่ ก.4 ผล โปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 2 %

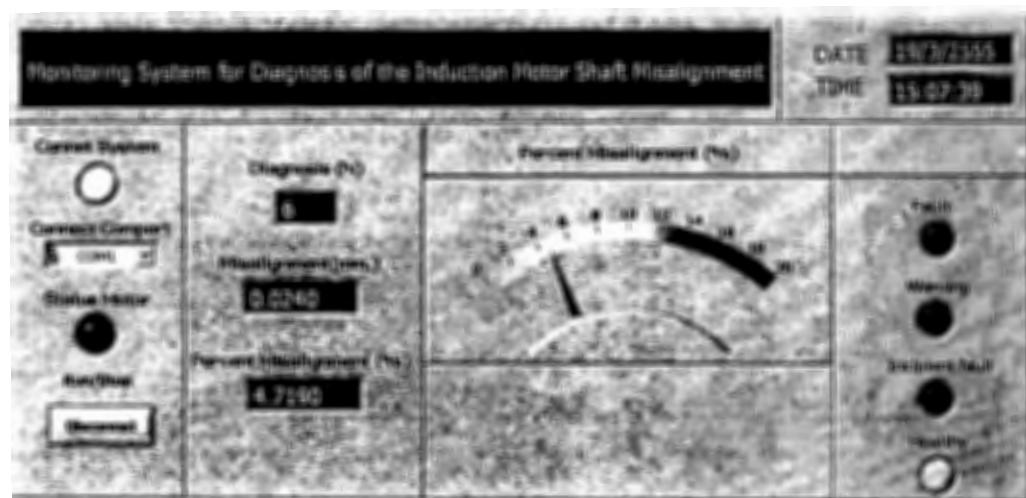
ก.3 ค่าเฉลี่ยของตรวจวัดระดับเยื่อง 4 % ศูนย์แสดงเป็น ครั้งที่ 6

การทดลองตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์ที่จุดตรวจวัด โดยใช้ LED ผลการทดลอง ระดับการเยื่องศูนย์อยู่ในระดับที่ 1 ไมเตอร์อยู่ในสภาพปกติ ดังภาพที่ ก.5



ภาพที่ ก.5 ผลการตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 4 %

ใช้โปรแกรมเพื่อตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงอยู่ในระดับที่ 1 ไมเตอร์อยู่ใน สภาพปกติ ดังภาพที่ ก.6



ภาพที่ ก.6 ผลโปรแกรมเพื่อตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 4 %

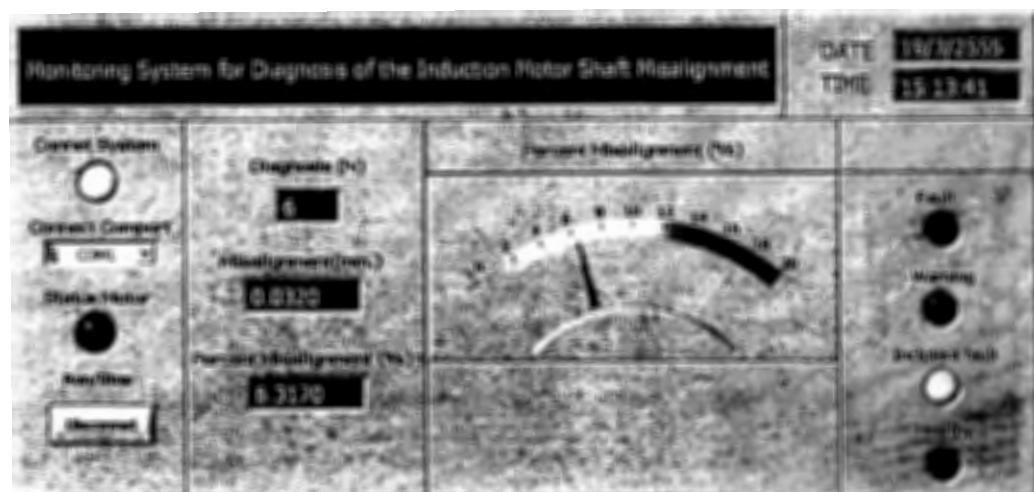
ก.4 ค่าเฉลี่ยของตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ 6 % แสดงเป็น ครั้งที่ 6

การทดลองตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์ที่จุดตรวจวัด โดยใช้ LED ผลการทดลอง ระดับการเยื่องศูนย์อยู่ในระดับที่ 2 มองเห็นอยู่ในระดับที่เฝ้าตรวจ ดังภาพที่ ก.7



ภาพที่ ก.7 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 6 %

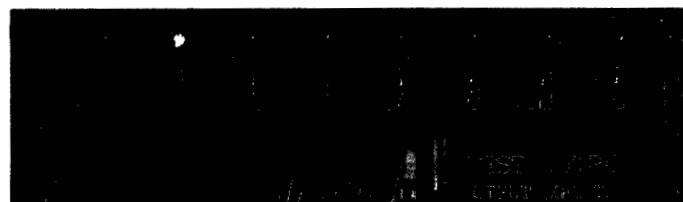
ใช้โปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงอยู่ในระดับที่ 2 มองเห็นอยู่ใน สภาพระดับที่เฝ้าตรวจ ดังภาพที่ ก.8



ภาพที่ ก.8 ผลโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 6 %

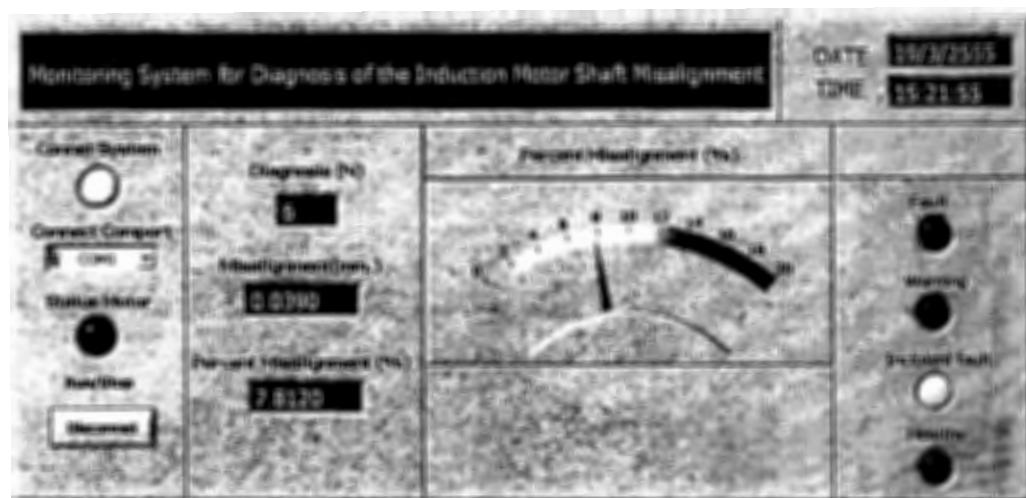
ก.5 ค่าเฉลี่ยของตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ 8 % แสดงเป็น ครั้งที่ 6

การทดลองตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์ที่จุดตรวจวัด โดยใช้ LED ผลการทดลอง ระดับการเยื่องศูนย์อยู่ในระดับที่ 2 นอเตอร์อยู่ในระดับที่ผ่านตรวจ ดังภาพที่ ก.9



ภาพที่ ก.9 ผลการผ่านตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 8 %

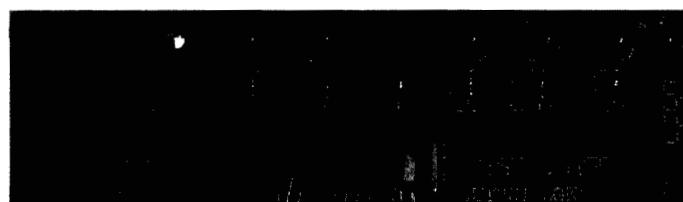
ใช้โปรแกรมผ่าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงอยู่ในระดับที่ 2 นอเตอร์อยู่ในสภาพระดับที่ผ่านตรวจ ดังภาพที่ ก.10



ภาพที่ ก.10 ผลโปรแกรมผ่าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 8 %

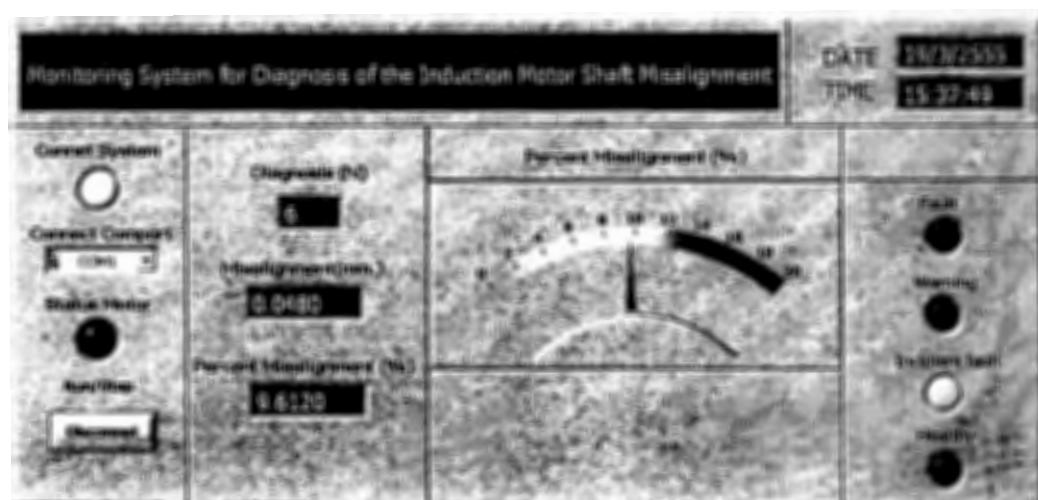
ก.6 ค่าเฉลี่ยของตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ 10 % แสดงเป็น ครั้งที่ 6

การทดสอบตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์ที่จุดตรวจวัด โดยใช้ LED ผลการทดสอบระดับการเยื่องศูนย์อยู่ในระดับที่ 2 ไมเตอร์อยู่ในระดับที่ผ่านตรวจ ดังภาพที่ ก.11



ภาพที่ ก.11 ผลการผ่านตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 10 %

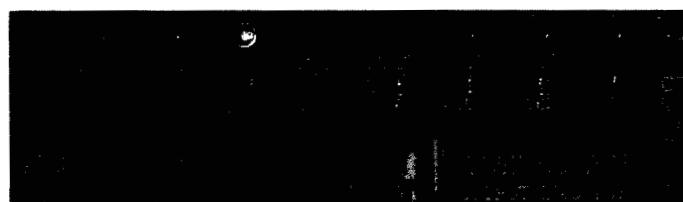
ใช้โปรแกรมผ่าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงอยู่ในระดับที่ 2 ไมเตอร์อยู่ในสภาพระดับที่ผ่านตรวจ ดังภาพที่ ก.12



ภาพที่ ก.12 ผลโปรแกรมผ่าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์ 10 %

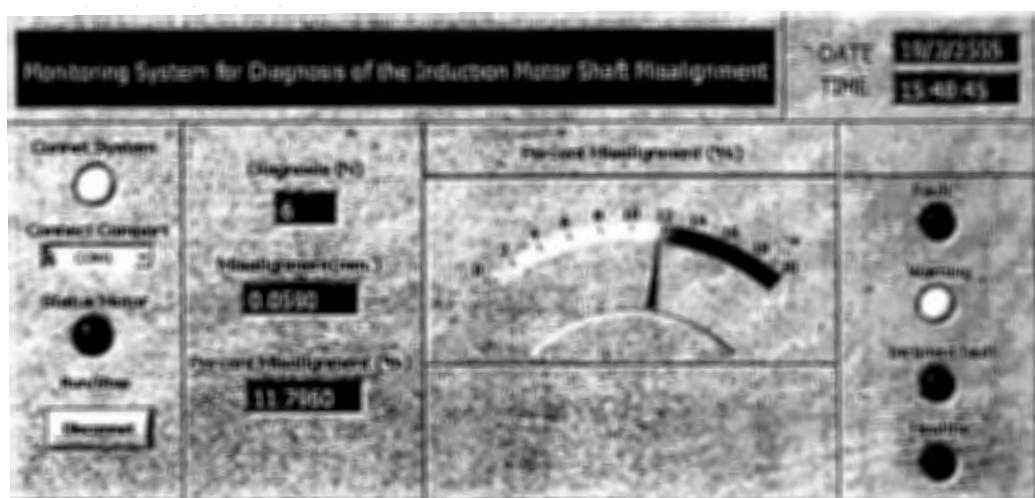
ก.7 ค่าเฉลี่ยของตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์ 12 % แสดงเป็น ครั้งที่ 6

การทดลองตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์ที่ชุดตรวจวัด โดยใช้ LED ผลการทดลอง ระดับการเยื่องศูนย์อยู่ในระดับที่ 3 นาฬอร์อยู่ในสภาพระดับต้องแจ้งเตือนดังภาพที่ ก.13



ภาพที่ ก.13 ผลการเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 12 %

ใช้โปรแกรมเฝ้าตรวจวัดระดับการเยื่องศูนย์จะแสดงอยู่ในระดับที่ 3 นาฬอร์อยู่ใน สภาพระดับต้องแจ้งเตือนดังภาพที่ ก.14



ภาพที่ ก.14 ผลโปรแกรมเฝ้าตรวจวัดเฉลี่ยที่ระดับการเยื่องศูนย์เฉลี่ย 12 %

ภาคผนวก ข
การเกิดอาร์มอนิกในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยววน้ำ

การเกิดอาร์มอนิกในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ข.1 การเกิดอาร์มอนิกเชิงระยะในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การเกิดอาร์มอนิกเชิงระยะเกิดขึ้นจากช่องว่างอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงคดีลมสนามแม่เหล็กช่องอากาศ (Airgap Magnetomotive Force, MMF) และเกิดอาร์มอนิกเนื่องจากการกระจายตัวของคลาวด์ในแต่ละช่องสล็อต (Slot) ในสเตเตอร์ที่ไม่สม่ำเสมอ ส่วนการเกิดอาร์มอนิกเชิงเวลาเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคลาวด์สเตเตอร์ของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงโดยตรงกับการเกิดการเปลี่ยนแปลง MMF ในช่องว่างอากาศ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงส่งผลถึงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Airgap flux density) ด้วย นอกจาก MMF จะมีผลกระแทบแล้ว การเปลี่ยนแปลงระยะของช่องว่างอากาศมีผลกระแทบท่อความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก เช่นกัน ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซึ่งกันและกัน ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ (ข.1) [8]

$$B(\theta, t) = \frac{\mu_0 \Lambda}{\delta(\theta, t)} \cdot \frac{1}{\Lambda} \cdot F(\theta, t) = \frac{\mu_0}{\delta(\theta, t)} \cdot F(\theta, t)$$

$$B(\theta, t) = \Lambda(\theta, t) \cdot F(\theta, t) \quad (\text{ข.1})$$

$B(\theta, t)$ = ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (Wb/m^2)

μ_0 = ค่าซึ่งกันและกันของแม่เหล็กในอากาศ (Wb/A)

$\Lambda(\theta, t)$ = ค่าซึ่งกันและกันของอากาศต่อหน่วยพื้นที่ (Wb/m^2)

$F(\theta, t)$ = แรงคดีลมแม่เหล็กของอากาศที่องศาใดๆ ($Amp-turn$)

$\delta(\theta, t)$ = ระยะห่างช่องว่างอากาศ (m)

ข.2 การเกิดอาร์มอนิกเชิงเวลาในช่องว่างอากาศของสเตเตอร์

เมื่อแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คลาวด์สเตเตอร์ไม่เป็นรูปไซน์ที่สมบูรณ์ จะส่งผลให้เกิดอาร์มอนิกส์อันคับต่างๆ การเกิดอาร์มอนิกส์ของ MMF ในช่องว่างอากาศในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เกิดจากการป้อนกระแสในแต่ละเฟส แสดงได้ดังสมการที่ (ข.2)

เฟสที่ 1

$$I_{a,k} = I_{m,k} \cos(k\omega_l t - \phi)$$

$$\text{ทำให้เกิด MMF} \quad m_{a,k} = \frac{N_{se}}{2} \cdot I_{m,k} \cos(k\omega_l) \cos(p\theta)$$

$$\text{เฟสที่ } 2 \quad I_{b,k} = I_{m,k} \cos(k\omega_l t - \phi - \frac{2\pi}{3})$$

$$\text{ทำให้เกิด MMF} \quad m_{a,k} = \frac{N_{se}}{2} \cdot I_{m,k} \cos(k\omega_l - \frac{2\pi}{3}) \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$\text{เฟสที่ } 3 \quad I_{c,k} = I_{m,k} \cos(k\omega_l t - \phi + \frac{2\pi}{3})$$

$$\text{ทำให้เกิด MMF} \quad m_{c,k} = \frac{N_{se}}{2} \cdot I_{m,k} \cos(k\omega_l + \frac{2\pi}{3}) \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3})$$

$$\text{ดังนั้น} \quad m_{m,k} = m_{a,k} + m_{b,k} + m_{c,k} = \frac{3}{2} \frac{N_{se} I_{m,k}}{2} \cos(p\theta - k\omega_l t) \quad (\text{ xl.2 })$$

I_m = กระแสสูงสุด (A)

I_a, I_b, I_c = กระแสไฟฟ้าต่อเฟส (A)

m_a, m_b, m_c = แรงคดลื่นแม่เหล็กต่อเฟส ($Amp-turn$)

N_{se} = จำนวนขดลวดที่สเตเตอร์

k = อันดับชาร์มนิกของการหมุนสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์เชิง

เวลา

p = มีค่าเท่ากับ $1, 2, 3, \dots$

p = จำนวนคู่ขั่วแม่เหล็กที่สเตเตอร์

ω_l = ความถี่ของความเร็วเชิงมุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Hz)

θ = องศาที่จุดอ้างอิงที่สเตเตอร์

จากสมการที่ (xl.2) อนิบาลการเกิดชาร์มนิกของแรงคดลื่นแม่เหล็กที่สเตเตอร์เป็นผลมาจากการหมุนนิกเชิงเวลา จากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าสามเฟส และผลกระทบจากการกระจำตัวของ การวางแผนของขดลวดเหนือบันดาห์องค์ต่างกันรอบสเตเตอร์

ข.3 MMF ในช่องอากาศของมอเตอร์

ในช่องว่างอากาศของมอเตอร์ เกิดแรงเคลื่อนแม่เล็กจากผลรวมของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขดลวดสเตเตเตอร์และแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากโรเตอร์ แสดงได้ดังสมการที่ (ข.3)

$$F(\theta, t) = F_s(\theta, t) + F_r(\theta, t) \quad (\text{ข.3})$$

$$F(\theta, t) = \text{MMF ในช่องว่างอากาศของมอเตอร์} \quad (\text{Amp-turn})$$

$$F_s(\theta, t) = \text{MMF ในช่องว่างอากาศที่เกิดจากสเตเตเตอร์} \quad (\text{Amp-turn})$$

$$F_r(\theta, t) = \text{MMF ในช่องว่างอากาศที่เกิดจากโรเตอร์} \quad (\text{Amp-turn})$$

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเนี่ยบวนนำสามเฟสให้ p เท่ากับจำนวนคู่ขั้วเท่ากับ 2 ขั้วและให้ q เท่ากับจำนวนสล็อตต่อขั้วต่อเฟส ดังนั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

ข.3.1 MMF ที่เกิดจากสเตเตเตอร์

การเกิด MMF ที่สเตเตเตอร์เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตเตอร์แต่ละชุดในเวลาเดียวกันทำให้ MMF กระจายรอบขดลวดสเตเตเตอร์ แสดงดังสมการที่ (ข.4)

$$F_s(\theta, t) = \sum_{v=1}^{\infty} \hat{F}_{s,v} \cos(vp\theta - \omega_1 t - \varphi_1) \quad (\text{ข.4})$$

เมื่อ

$$v = (6g_1 + 1) \quad \text{โดยที่ } g_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$$

$$\hat{F}_{s,v} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{qN}{v} k_{pv} k_{dv} I_1$$

$$\hat{F}_{s,v} = \text{MMF สูงสุดที่สเตเตเตอร์} \quad (\text{Amp-turn})$$

$$\omega_1 = \text{ความเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กหมุน (Hz)}$$

$$\varphi_1 = \text{มุมเฟสทางไฟฟ้าของแหล่งจ่าย (rad)}$$

$$N = \text{จำนวนแท่งตัวนำต่อ Slot ของสเตเตเตอร์}$$

$$I_1 = \text{กระแสไฟฟ้าต่อเฟส (A)}$$

$$k_{dv} = \text{ค่าแฟคเตอร์ระยะห่างขดลวด}$$

k_{pv}	= ค่าเฟคเตอร์การกระจำยขดลวด
v	= อันดับชาร์มอนิกเชิงระยะ
g_1	= เลขจำนวนเต็ม
q	= จำนวนช่อง Slot ต่อขั้วต่อเฟสของสเตเตอร์

จากสมการที่ (x.4) แสดงความสัมพันธ์ของความถี่เชิงมุมหลัก และชาร์มอนิกอันดับต่างๆ เมื่อทำการหาอนุพันธ์ในสมการที่ (x.4) ได้ความเร็วเชิงมุมของ MMF ที่สเตเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (x.5)

$$\omega_v = \frac{\omega_l}{vp} = \frac{\omega_l}{(6g_1+1)p} \quad (\text{x.5})$$

ถ้า v มีค่าเป็นบวก เช่น $v=1, 3, 5, 11, \dots$ หมายความว่า การหมุนของ MMF มีทิศทางเดียวกับทิศทางสนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากความถี่หลัก ถ้า v มีค่าเป็นลบ เช่น $v=-1, -3, -5, -11, \dots$ หมายความว่า การหมุนของ MMF มีทิศทางการหมุนตรงกันข้ามกับการหมุนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากความถี่หลัก ที่สเตเตอร์ชาร์มอนิกที่มีผลจาก Slot Harmonic และชาร์มอนิกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสทางไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการที่ (x.6)

$$v = \left(g_1 \frac{Q_s}{p} + 1 \right) \text{ หรือ } (6g_1 q_s + 1) \quad (\text{x.6})$$

Q_s	= จำนวนสล็อตในสเตเตอร์
q_s	= จำนวนสล็อตในสเตเตอร์ต่อเฟส

x.3.2 MMF ที่เกิดจากโรเตอร์

การเกิด MMF ที่เกิดขึ้นในโรเตอร์ เกิดจากการเหนี่ยวนำแห่งตัวนำในโรเตอร์ตัดกับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น เมื่อสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์เกิดชาร์มอนิก ส่งผลให้เกิดชาร์มอนิกที่โรเตอร์ชั่นกัน เมื่อพิจารณาการเกิด MMF ที่เกิดที่โรเตอร์ประกอบด้วยสองส่วน คือ MMF ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ความถี่หลัก และ MMF ที่เกิดจากการกระแสชาร์มอนิก สามารถอธิบายได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

x.3.2.1 MMF ที่โรเตอร์เกิดจากกระแสไฟฟ้าความถี่หลัก แสดงดังสมการที่ (x.7)

$$F_{r,1}(\theta, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} \hat{F}_{r,1} \cos(\mu_1 p \theta - \omega_{\mu,1} t - \varphi_{\mu}) \quad (\text{4.7})$$

เมื่อ $\mu_1 = \left(g_2 \frac{Q_r}{p} + 1 \right)$ โดยที่ $g_2 = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

และ $\hat{F}_{r,1} = -(-1)^{\mu} \frac{3\sqrt{2}qN}{\pi\mu} \xi_1 \xi_{\mu} I_1 \cos \varphi_1$

$F_{r,1}(\theta, t) = \text{MMF ที่เกิดจากโรเตอร์เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ความถี่}$
หลัก

(Amp-turn)

$\hat{F}_{r,1} = \text{MMF สูงสุดที่เกิดจากโรเตอร์เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่}$
ความถี่

หลัก(Amp-turn)

Q_r = จำนวน Slot ที่โรเตอร์

μ = อันดับชาร์มอนิกเชิงระฆัง

φ_1 = มุมเฟสของกระแสไฟฟ้า (rad)

φ_{μ} = มุมเฟสของ MMF ชาร์มอนิกส์ที่โรเตอร์ (rad)

ξ_1 = แฟคเตอร์ของการพัฒนาของขดลวดสเตเตอร์

ξ_{μ} = แฟคเตอร์การเหนี่ยวนำของกระแสชาร์มอนิก

ความเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากโรเตอร์ เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ความถี่หลัก คือผลบวกของความเร็วเชิงมุมโรเตอร์กับความเร็วสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ เนื่องจากมีทิศทางเดียวกัน แสดงได้ดังสมการที่ (4.8)

$$\omega_{\mu,1} = \left(\frac{\omega_r}{p} + \frac{s\omega_1}{\mu_1 p} \right) \mu_1 p = \omega_1 \left(1 + \frac{g_2 Q_r (1-s)}{p} \right) \quad (\text{4.8})$$

ω_r = ความเร็วเชิงมุมโรเตอร์ (rad)

s = slip

๗.3.2.2 MMF ที่โรเตอร์ที่เกิดจากกระแสหาร์มอนิก ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (๗.๙)

$$F_{r,2}(\theta, t) = \sum_{\mu=2}^{\infty} \hat{F}_{r,2,\mu} \cos(\mu_2 p\theta - \omega_{\mu,2} t - \varphi_{\mu}) \quad (๗.๙)$$

เมื่อ $\mu_2 = \left(g_2 \frac{Q_r}{p} + v \right)$ โดยที่ $g_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

และ $\hat{F}_{r,2,\mu} = -(-1)^{\mu} \sqrt{2} I_v \frac{v}{\mu} \xi_v$

$F_{r,2}(\theta, t) = \text{MMF ที่เกิดจากโรเตอร์เนื่องจากกระแสความถี่ชาร์มอนิก}$
(Amp-turn)

$\hat{F}_{r,2,\mu} = \text{MMF สูงสุดที่เกิดจากโรเตอร์เนื่องจากกระแสความถี่ชาร์มอนิก (Amp-turn)}$

$I_v = \text{ชาร์มอนิกของกระแสที่มาจากการแหวนปิดหัวท้ายโรเตอร์}$

$\xi_1 = \text{แฟคเตอร์การพัฒนาค่าสตีเตเตอร์}$

$\xi_v = \text{แฟคเตอร์การเหนี่ยวนำของกระแสหาร์มอนิก}$

ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ MMF ที่เกิดการเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กที่สตีเตเตอร์ที่ความเร็ว ω_1 / vp ตัดกับตัวนำโรเตอร์ในขณะที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว ω_r / p ดังนั้นความเร็วเชิงมุมสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโรเตอร์ แสดงในสมการที่ (๗.๑๐)

$$\omega_2 = \left(\frac{\omega_1}{vp} - \frac{\omega_r}{p} \right) vp = \omega_1 - v(1-s)\omega_1 \quad (๗.๑๐)$$

$\omega_2 = \text{ความเร็วเชิงมุมสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโรเตอร์ (rad/s)}$

$\omega_1 = \text{ความเร็วเชิงมุมของสนามแม่เหล็กหมุน (rad/s)}$

$\omega_r = \text{ความเร็วเชิงมุมการหมุนของโรเตอร์ (rad/s)}$

ความเร็วของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในช่องว่างอากาศเนื่องจากกระแสสารมอนิกของโอล์เตอร์เทียบกับสเตเตอร์ แสดงดังสมการที่ (๔.11)

$$\omega_{\mu,2} = \left(\frac{\omega_r}{p} + \frac{\omega_l - v(1-s)\omega_l}{\mu_2 p} \right) \mu_2 p = \omega_l \left(1 + \frac{g_2 Q_2(1-s)}{p} \right) \quad (\text{๔.11})$$

๔.3.2.2 จากสมการที่ (๔.4) - (๔.11) สามารถรวมผลของ MMF ในช่องว่างอากาศ แสดงได้ดังสมการที่ (๔.12)

$$\begin{aligned} F(\theta, t) &= \sum_{v=1}^{\infty} \hat{F}_{s,v} \cos(vp\theta \pm \omega_l t - \varphi_l) + \sum_{\mu=1}^{\infty} \hat{F}_{r,\mu} \cos(\mu p\theta \pm \omega_\mu t - \varphi_\mu) \\ &= \hat{F}_0 \cos(p\theta \pm \omega_l t - \varphi_l) \\ &+ \hat{F}_1 \cos((6g_1 + 1)p\theta \pm \omega_l t - \varphi_l) \Big|_{g_1=0,1,2,\dots} \\ &+ \hat{F}_2 \cos((6g_1 + 1)p\theta \pm \omega_l t - \varphi_l) \Big|_{g_1=0,-1,-2,\dots} \\ &+ \hat{F}_3 \cos((6g_1 + 1)p\theta \pm \omega_l t - \varphi_l) \Big|_{g_1=0,1,2,\dots} \\ &+ \hat{F}_4 \cos((Q_s + p)p\theta \pm \omega_l t - \varphi_l) \Big|_{g_1=0,1,2,\dots} \\ &+ \hat{F}_5 \cos((Q_s - p)(\theta \pm \omega_m t - s\omega_l t)) \\ &+ \hat{F}_6 \cos((Q_s + p)(\theta - \omega_m t - s\omega_l t)) \end{aligned} \quad (\text{๔.12})$$

ภาคผนวก ค
การสร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์

การสร้างอัลกอริทึมการวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์ด้วยสมการทดถอยเชิงเส้นพหุคุณ (Multiple Linear Regression Analysis, MRA)

ใช้ข้อมูลการทดลองตามตารางที่ ค.1 สร้างอัลกอริทึมในการวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์โดยวิธีการทดถอยเชิงเส้นพหุคุณนี้เป็นการใช้ตัวแปรอิสระตัวเดียวสองตัวคือกระในเฟส A (I_a) และกระแสงในแนวแกน (I_d) พยากรณ์ค่าของตัวแปรตามคือระดับเยื่องศูนย์ ข้อมูลดังตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.1 ขนาดสัญญาณกระแส (I_a) และกระแสในแกน (I_d) กับระดับเยื่องศูนย์เฉลี่ย

ระดับเยื่องศูนย์ (mm.) = x	0.000	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060
กระแส (I_a) = y_1	0.2842	0.3018	0.3282	0.3508	0.3736	0.4030	0.4118
กระแสในแกน (I_d) = y_2	0.2668	0.2886	0.3096	0.3314	0.3542	0.3776	0.3858

ตารางที่ ค.2 การคำนวณหาสมการทดถอยพหุคุณ

n	y_1	y_2	x	x^2	y_1x	y_2x	y_1y_2	y_1^2	y_2^2
1	0.2842	0.2668	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0758	0.0808	0.0712
2	0.3018	0.2886	0.0100	0.0001	0.0030	0.0029	0.0871	0.0911	0.0833
3	0.3282	0.3096	0.0200	0.0004	0.0066	0.0062	0.1016	0.1077	0.0959
4	0.3508	0.3314	0.0300	0.0009	0.0105	0.0099	0.1163	0.1231	0.1098
5	0.3736	0.3542	0.0400	0.0016	0.0149	0.0142	0.1323	0.1396	0.1255
6	0.4030	0.3776	0.0500	0.0025	0.0202	0.0189	0.1522	0.1624	0.1426
7	0.4118	0.3858	0.0600	0.0036	0.0247	0.0231	0.1589	0.1696	0.1488
Σ	2.4534	2.3140	0.2100	0.0091	0.0799	0.0752	0.8242	0.8742	0.7770

$$\sum x = 0.2100$$

$$\sum x^2 = 0.0091$$

$$\sum y_1x = 0.0799$$

$$\sum y_1 = 2.4534$$

$$\sum y_1^2 = 0.8742$$

$$\sum y_2x = 0.0752$$

$$\sum y_2 = 2.3140$$

$$\sum y_2^2 = 0.7770$$

$$\sum y_1y_2 = 0.8242$$

เพื่อความสะดวกจึงกำหนดรูปแบบการคำนวณและการใช้งาน

$$A = n \sum y_1 x - (\sum y_1) (\sum x) = (7)(0.0799) - (2.4534)(0.2100) = 0.0441$$

$$B = n \sum y_1^2 - (\sum y_1)^2 = (7)(0.7770) - (2.3140)^2 = 0.0844$$

$$C = n \sum y_1 y_2 - (\sum y_1) (\sum y_2) = (7)(0.8242) - (2.4534)(2.3140) = 0.0922$$

$$D = n \sum y_2 x - (\sum y_2) (\sum x) = (7)(0.0752) - (2.3140)(0.2100) = 0.0405$$

$$E = n \sum y_1^2 - (\sum y_1)^2 = (7)(0.8742) - (2.4534)^2 = 0.1002$$

$$F = EB - C^2 = (0.1002)(0.0844) - (0.0922)^2 = -4.398 \times 10^{-5}$$

หาค่าสัมประสิทธิ์คงด้อยของตัวแปรอิสระ b_0 ในสมการที่ (ค.1) หา b_1 ในสมการที่ (ค.2) และหา b_2 ในสมการที่ (ค.3)

$$b_0 = \frac{\sum x - b_1 \sum y_1 - b_2 \sum y_2}{n} \quad (ค.1)$$

$$b_1 = \frac{AB - CD}{F} \quad (ค.2)$$

$$= \frac{((0.0441)(0.0844) - (0.0922)(0.0405))}{-4.398 \times 10^{-5}}$$

$$b_1 = 0.2042$$

$$b_2 = \frac{DE - AC}{F} \quad (ค.3)$$

$$= \frac{((0.0405)(0.1002) - (0.0441)(0.0922))}{-4.398 \times 10^{-5}}$$

$$b_2 = 0.2574$$

$$b_0 = \frac{\sum x - b_1 \sum y_1 - b_2 \sum y_2}{n}$$

$$b_0 = \frac{((0.2100) - (0.2268)(2.4534) - (0.2316)(2.3140))}{7}$$

$$b_0 = -0.1267$$

แทนค่าในสมการที่ (ค.1) ได้ค่าคงที่ คำนวณจากการแทนค่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระสมการวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์ได้เท่ากับ -0.1267 เมื่อแทนค่าในสมการที่ (ค.2) ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระคือกระแส (I_a) เท่ากับ 0.2042 ส่วนกระแสในแกน (I_d) แทนค่าใน

สมการที่ (ค.3) ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระเท่ากับ 0.2574 จะได้สมการการวิเคราะห์ระดับเยื่องศูนย์ดังสมการที่ (ค.4)

$$X = -0.1260 + (0.2268)y_1 + (0.2316)y_2 \quad (\text{ค.4})$$

$$X = \text{ระยะเยื่องศูนย์ (mm)}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Multiple Determinations) เป็นการบอกให้ทราบว่าตัวแปรอิสระสามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งในสมการดูดอย พหุคูณมีตัวแปรตาม 1 ตัว และตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแทนด้วย r^2 ก็จะบอกว่าตัวแปรอิสระทั้งหมดจะพยากรณ์ตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใดดังสมการที่ (ค.5)

$$r^2 = \frac{n(b_0 \sum x + b_1 \sum y_1 x + b_2 \sum y_2 x) - (\sum x)^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (\text{ค.5})$$

$$r^2 = \frac{7[(-0.1260)(0.2100) + (0.2268)(0.0799) + (0.2316)(0.0752)] - (0.2100)^2}{7(0.0091) - (0.2100)^2}$$

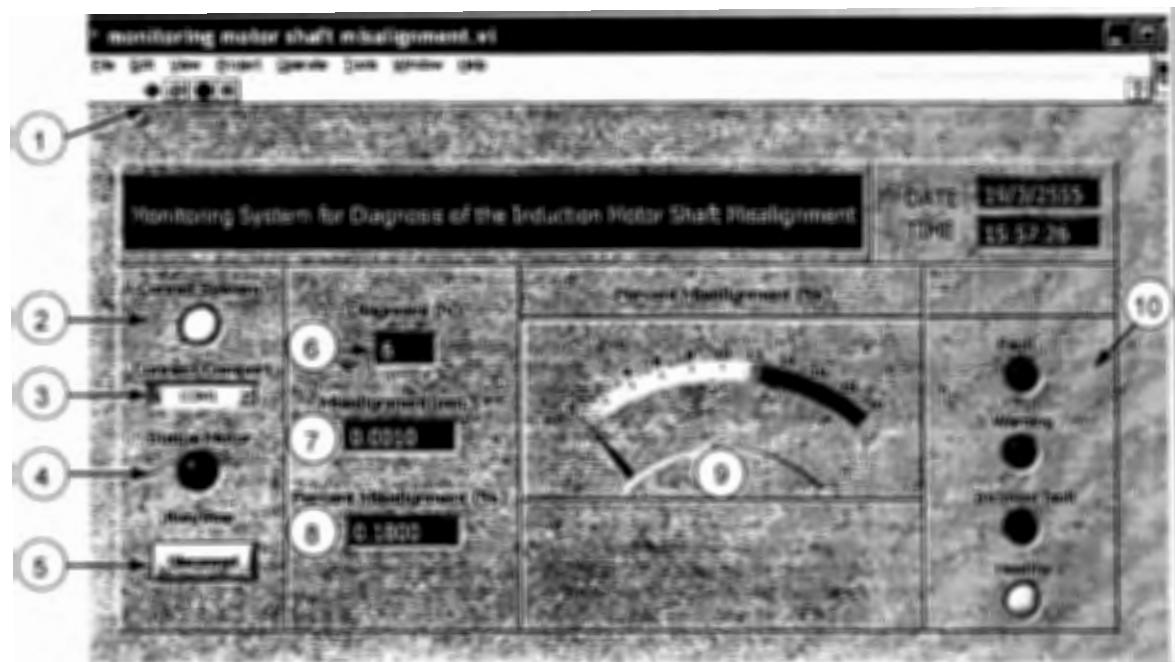
$$r^2 = 0.9928$$

จากผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่า $r^2 = 0.9928$ ซึ่งหมายความว่าตัวแปรอิสระกระแส (I_a) และ กระแสในแนวแกน (I_d) สามารถวิเคราะห์ตัวแปรตามมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระดับสูงมาก

ภาคผนวก ง

การใช้โปรแกรมระบบตรวจระดับเยื่องศูนย์มอเตอร์เห็นี่ยวแบบเวลาจริง

การใช้งานโปรแกรมตรวจวัดระดับเบื้องคุณย์มอเตอร์เหนี่ยวแบบเวลาจริง
เมื่อเปิดโปรแกรมตรวจวัดระดับเบื้องคุณย์มอเตอร์เหนี่ยวแบบเวลาจริงจะปรากฏดัง
ภาพที่ ง.1 และมีความหมายดังนี้



ภาพที่ ง.1 โปรแกรมตรวจวัดระดับเบื้องคุณย์มอเตอร์เหนี่ยวแบบเวลาจริง

หมายเลข 1 สั่งโปรแกรมทำงาน (RUN)

หมายเลข 2 แสดงการเชื่อมต่อ กับ XBEE

หมายเลข 3 เลือก Comport ในการติดต่อ กับ XBEE โปรแกรมกำหนดเริ่มต้น
เป็น COM1

หมายเลข 4 แสดงการสถานะของ มอเตอร์ ทำงานอยู่หรือหยุดทำงาน

หมายเลข 5 ยกเลิกการเชื่อมต่อ กับ การรับส่งข้อมูล

หมายเลข 6 แสดงครั้งที่ของการตรวจวัดระดับเบื้องคุณย์ ครั้งที่ 6 คือค่าเฉลี่ยของตรวจวัด
ครั้งที่ 1-5

หมายเลข 7 แสดงระดับเบื้องคุณย์ เป็นหน่วยมิลลิเมตร (mm)

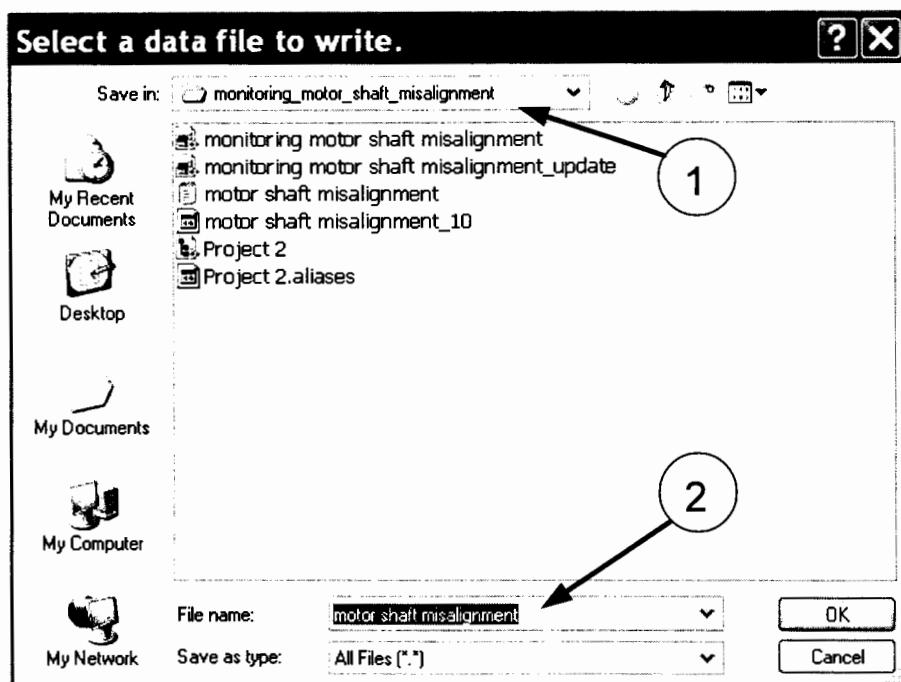
หมายเลข 8 แสดงระดับเบื้องคุณย์ เป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

หมายเลข 9 แสดงระดับเบื้องคุณย์ เป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ที่แสดงเป็นกราฟิก

หมายเลขอ 10 แสดงระดับความผิดปกติจากการเสื่อมศูนย์แสดงเป็น 4 ระดับดังนี้
 (Healthy) คือระดับปกติ
 (Incipient fault) คือระดับเริ่มผิดปกติ
 (Warning) คือระดับต้องแจ้งเตือน
 (Fault) คือระดับต้องแก้ไขโดยด่วน

ซึ่งมีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

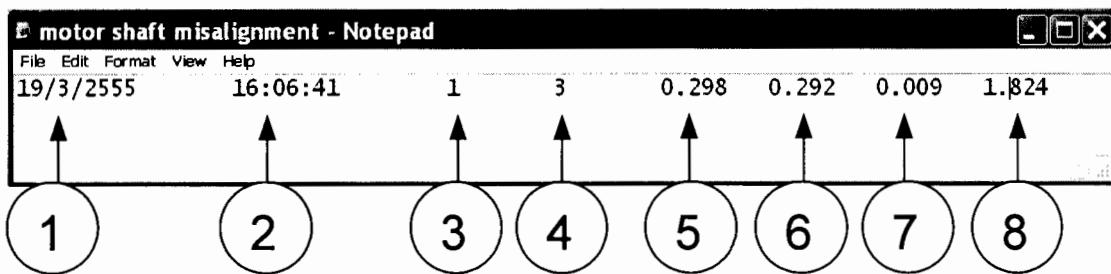
1. กดปุ่มหมายเลขอ 1 สั่งโปรแกรมทำงาน (RUN)
2. จะปรากฏหน้าต่างดังภาพที่ ง.2 เพื่อให้ได้ชื่อไฟล์ข้อมูล ของการรายงานผลการตรวจวัดระดับเสื่อมศูนย์ โดยชื่อไฟล์กำหนดเริ่มต้นคือ motor shaft misalignment.txt และสามารถตั้งชื่อไฟล์ใหม่ได้ตามหมายเลขอ 1 และเลือกโฟลเดอร์ในการเก็บไฟล์ตามหมายเลขอ 2



ภาพที่ ง.2 การตั้งชื่อไฟล์ข้อมูลของการรายงานผลการตรวจวัดระดับเสื่อมศูนย์

3. หน้าโปรแกรมตรวจวัดระดับเสื่อมศูนย์มอเตอร์เห็นแบบเวลาจริงจะปรากฏดังภาพที่ ข.1 และเมื่อต้องการหยุดการทำงานของโปรแกรมกดปุ่มหมายเลขอ 5 หรือหมายเลขอ 1

4. ผลของไฟล์ข้อมูลรายงานผลการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์แสดงดังภาพที่ ง.3



ภาพที่ ง.3 ข้อมูลของการรายงานผลการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์

ข้อมูลจากภาพที่ ง.3 มีความหมายดังนี้

1. หมายเลข 1 วันที่ เดือน ปี ที่เก็บข้อมูลการรายงานผลการเพื่อตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์
2. หมายเลข 2 เวลา(ชั่วโมง:นาที:วินาที) ที่เก็บข้อมูลของการรายงานผลการเพื่อตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์
3. หมายเลข 3 สถานะของมอเตอร์เมื่อเท่ากับ 0 คือมอเตอร์หยุดทำงาน และเท่ากับ 1 มอเตอร์ทำงานอยู่
4. หมายเลข 4 ครั้งที่ของการตรวจวัดระดับเยื่องศูนย์
5. หมายเลข 5 ค่าของสัญญาณ Ratio: $f_s / (f_s - f_r)$
6. หมายเลข 6 ค่าของสัญญาณ Ratio: $2f_s / (2f_s - f_r)$
7. หมายเลข 7 ระดับเยื่องศูนย์มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)
8. หมายเลข 8 ระดับเยื่องศูนย์เป็นเปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก จ
การสื่อสารไร้สายด้วย XBEE

การสื่อสารไร้สายด้วย XBee

ในงานวิจัยใช้ XBee ซึ่งใช้การสื่อสารตามมาตรฐานสากลของ ZigBee ถูกกำหนด มาตรฐานสากลโดย ZigBee Alliance เป็น การสื่อสารแบบไร้สาย ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลและใช้ พลังงานต่ำ ชุดประสงค์เพื่อให้สามารถสร้างระบบที่เรียกว่า Wireless Sensor Network ได้ ซึ่ง ระบบนี้สามารถทำงานในร่ม กลางแจ้ง ทนแอดทน เหมาะสมใช้งานกับ Monitoring ต่างๆ มี การเชื่อมต่อที่ใช้รับและส่งข้อมูลกับ XBee เป็นการสื่อสารแบบอนุกรม UART (TTL) ซึ่งสำหรับ ทางค้านในโครคอนโโทรลเลอร์ สามารถนำเข้าที่ใช้ติดต่อสื่อสาร UART ของ XBee ต่อเข้า กับ UART ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรง

จ.1 การแบ่งย่านความถี่ใช้งานของ ZigBee

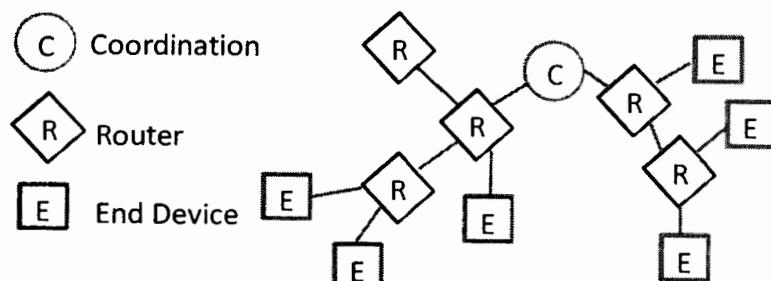
ZigBee กำหนดย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐานไว้ 3 ย่านดังนี้

1. ย่านความถี่ 2.4 GHz มี 16 ช่องสัญญาณ อัตรารับส่งข้อมูล 250 Kbps
2. ย่านความถี่ 915 GHz มี 10 ช่องสัญญาณ อัตรารับส่งข้อมูล 40 Kbps
3. ย่านความถี่ 868 GHz มี 1 ช่องสัญญาณ อัตรารับส่งข้อมูล 20 Kbps

จ.2 ลักษณะการทำงานของ ZigBee

แบ่งตามลักษณะการทำงานของ ZigBee ดังภาพที่ จ.1 ซึ่งแบ่งได้ 3 แบบดังนี้

1. Coordinator มีหน้าที่สร้างการสื่อสาร เชื่อมโยงเครือข่าย ระหว่าง End Device กับ Router หรือ Coordinator กับ Coordinator ด้วยกันหรือ Coordinator กับ Router โดยกำหนด address ให้กับ Device ที่อยู่ในวงเครือข่ายไม่ให้ซ้ำกัน
2. End Device เป็นอุปกรณ์ปลายทางสุด ซึ่งจะใช้รับข้อมูลหรือสัญญาณ จาก Sensor ที่ปลายทางโดยที่ใช้พลังงานต่ำในการทำงานเทียบได้กับ RFD หรือ FFD บางกรณี ขึ้นอยู่กับ sensor ที่ใช้
3. Router มีหน้าที่ รับ-ส่งข้อมูล ในเส้นทางต่างๆ ของเครือข่าย

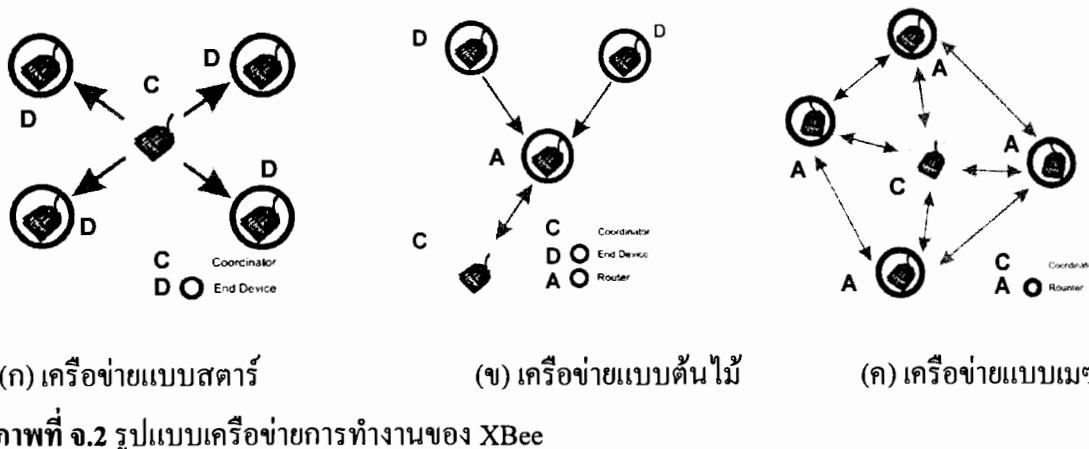


ภาพที่ จ.1 ลักษณะเส้นทางการทำงานของ ZigBee

จ.3 เครือข่ายการทำงานของ XBee

จ.3.1 เครือข่ายแบบสตาร์ (Star Network) ประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อ

โดยTOCOL XBee 1 จุดและอุปกรณ์ปลายทางหลายๆ ในเครือข่ายแบบสตาร์อุปกรณ์ปลายทางทั้งหมด จะสื่อสารกับอุปกรณ์เชื่อมต่อเท่านั้น ถ้าอุปกรณ์ปลายทางหนึ่งต้องการจะสื่อสารกับอีกอุปกรณ์ปลายทางอื่นๆ จะต้องสื่อสารผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อเท่านั้นดังภาพที่ จ.2(ก)

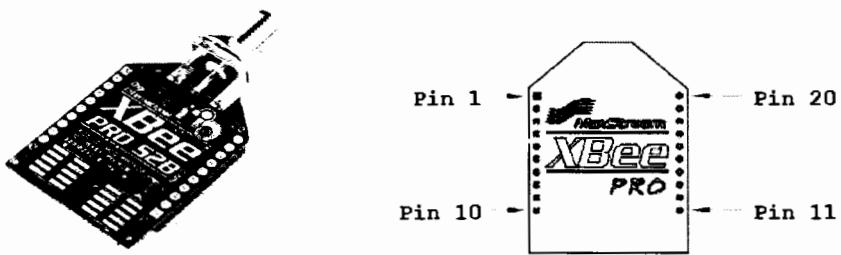


ภาพที่ จ.2 รูปแบบเครือข่ายการทำงานของ XBee

จ.3.2 เครือข่ายแบบต้นไม้ (Cluster Tree Network) ในระบบเครือข่ายแบบนี้ อุปกรณ์ปลายทางสามารถเชื่อมต่อได้ กับอุปกรณ์เชื่อมต่อหรือ XBee โดยTOCOL Router ทำหน้าที่ 2 ประเภทคือ เพิ่มจำนวนโหนดที่สามารถเชื่อมต่ออยู่บนเครือข่าย และขยายขนาดของเครือข่าย เนื่องจาก Router จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ของเครือข่าย แสดงดังภาพที่ จ.2(ข)

จ.3.3 เครือข่ายแบบเมช (Mesh Network) เครือข่ายแบบเมชใช้กับเครือข่ายแบบต้นไม้ มีข้อดีของการเชื่อมต่อแบบนี้ คือ ช่วยลดอัตราความล่าช้าของการส่งและเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบดังภาพที่ จ.2(ค)

ในหัวข้องานวิจัยนี้ใช้ XBee Pro 50mW RPSMA-Series 2(ZB) เป็นอุปกรณ์ในโครงสร้าง IoT ที่สามารถรับ-ส่งข้อมูลแบบ Half Duplex ที่บ้านความถี่ 2.4 GHz ใช้พลังงานต่ำ ซึ่ง XBee สามารถใช้งานตามมาตรฐาน ZigBee ได้ โดยที่ไม่ต้องเขียนโปรแกรมสร้างเครือข่าย ZigBee ทางผู้ผลิตได้จัดทำ firmware ที่จะโหลดเข้าไปในตัว XBee สามารถกำหนดพารามิเตอร์ให้กับ XBee ได้เลย โดยใช้โปรแกรม (X-CTU Software) ซึ่ง XBee ที่ใช้ในงานวิจัย ดังภาพที่ จ.3



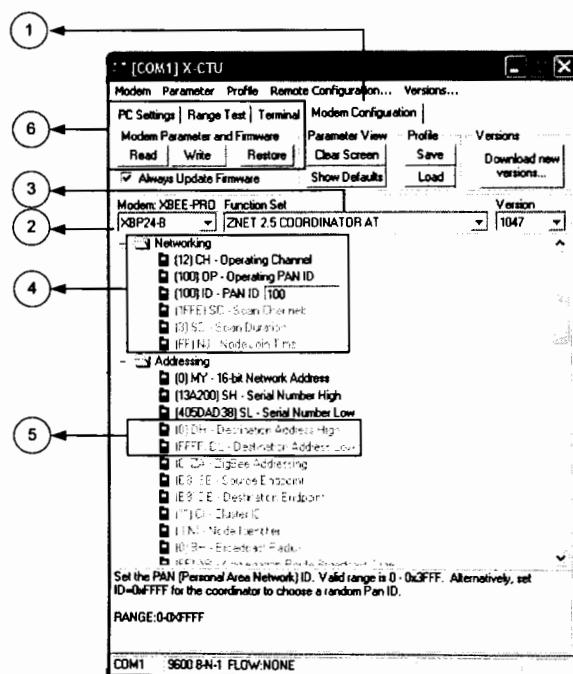
ภาพที่ จ.3 XBee ที่ใช้ในงานวิจัยและการวางแผนตำแหน่งขา

จ.4 การกำหนดการใช้งาน XBee เครือข่ายแบบสตาร์ (Star Network)

การใช้งานแบบสตาร์ จะประกอบไปด้วย XBee ที่ทำงานเป็น 2 รูปแบบคือ แบบที่ 1 เป็น Coordinator ทำหน้าที่ สร้างเครือข่าย และ แบบที่ 2 เป็น End Device ทำหน้าที่เป็นลูกข่าย สามารถทำตามขั้นตอนดังนี้

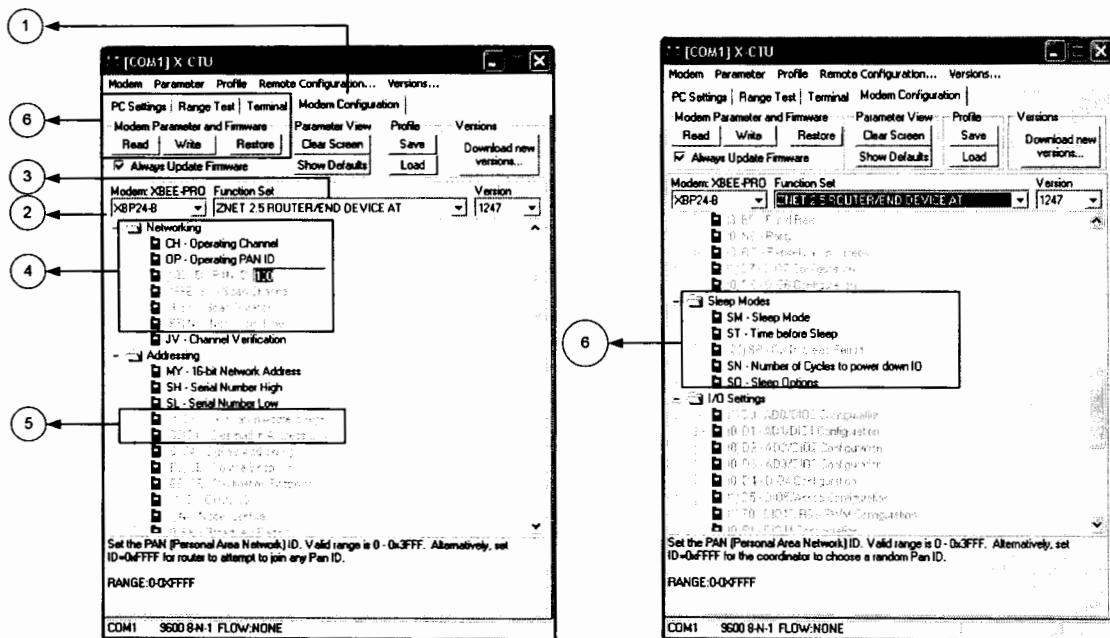
จ.4.1 การตั้งค่า XBee ให้ทำงานเป็น Coordinator มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เปิดโปรแกรม X-CTU เลือกที่ Modem Configuration ดังภาพที่ จ.4



ภาพที่ จ.4 โปรแกรม X-CTU กำหนดให้ XBee เป็น Coordinator

- 2) ให้เลือก Modem XBee ให้ตรงตามรุ่นที่ใช้ในงานวิจัยใช้รุ่น XBP24-B
 3) เปลี่ยน Firmware ให้เป็น ZIGBEE COORDINATOR AT (ใช้กับ XBee รุ่น XB24-ZB) หรือ ZNET 2.5 COORDINATOR AT (ใช้กับ XBee รุ่น XBP24-B) ซึ่งจากข้อ 2, 3 และ 5 สามารถดูข้อมูลได้จากด้านໄດ້ໂມຄູລາໃນແຕ່ລະດ້ວ
 4) ตั้ง PAN (Personal Area Network) สามารถตั้งได้ตามเด่นๆ ใช้ຈະກຳຫັດແຕ່ໃນທີ່ນີ້ຈະຕັ້ງເປັນ 100
 5) ກຳຫັດ Destination (ຈຸດໝາຍທີ່ຕ້ອງການ ຮັບສ່ວນຂໍ້ມູນດ້ວຍ) ໂດຍ ຕັ້ງຄ່າ DH = 00 DL = FFFF
 6) ເລືອກເຄື່ອງໝາຍ ຖຸກ ທີ່ Always Update Firmware ແລ້ວ ຄລິກ Write ເມື່ອ XBee ທີ່ຖຸກກຳຫັດໃຫ້ເປັນ Coordinator ແລ້ວຈະໄໝ່ສາມາດທຳກຳໃນໂທນົດປະຫັດພັດງານໄດ້
- 4.2.2 ການ ຕັ້ງຄ່າ XBee ໃຫ້ກຳຫັດເປັນ End Device ມີຂັ້ນຕອນດັ່ງນີ້**
- 1) ເປີດໂປຣແກຣມ X-CTU ເລືອກທີ່ Modem Configuration ດັ່ງການທີ່ 4.5



ການທີ່ 4.5 ໂປຣແກຣມ X-CTU ກຳຫັດໃຫ້ XBee ເປັນ End Device

- 2) ເລືອກທີ່ Modem XBee ให้ตรงตามຮຸນທີ່ໃຊ້ ໃນງານວິຈີຍໃຫ້ຮຸນ XBP24-B
 3) ໃຫ້ເປີດ Firmware ເປັນ ZIGBEE END DEVICE AT (ໃຊ້ກັບ XBee ຮຸນ XB24-ZB) ຫຼື ZNET 2.5 ROUTER/END DEVICE AT (ໃຊ້ກັບ XBee ຮຸນ XB24-B) ຈາກຂຶ້ວ 2, 3 ແລະ 5 ທ່ານສາມາດດູ້ຂໍ້ມູນໄດ້ຈາກໄດ້ໂມຄູລາໃນແຕ່ລະດ້ວ

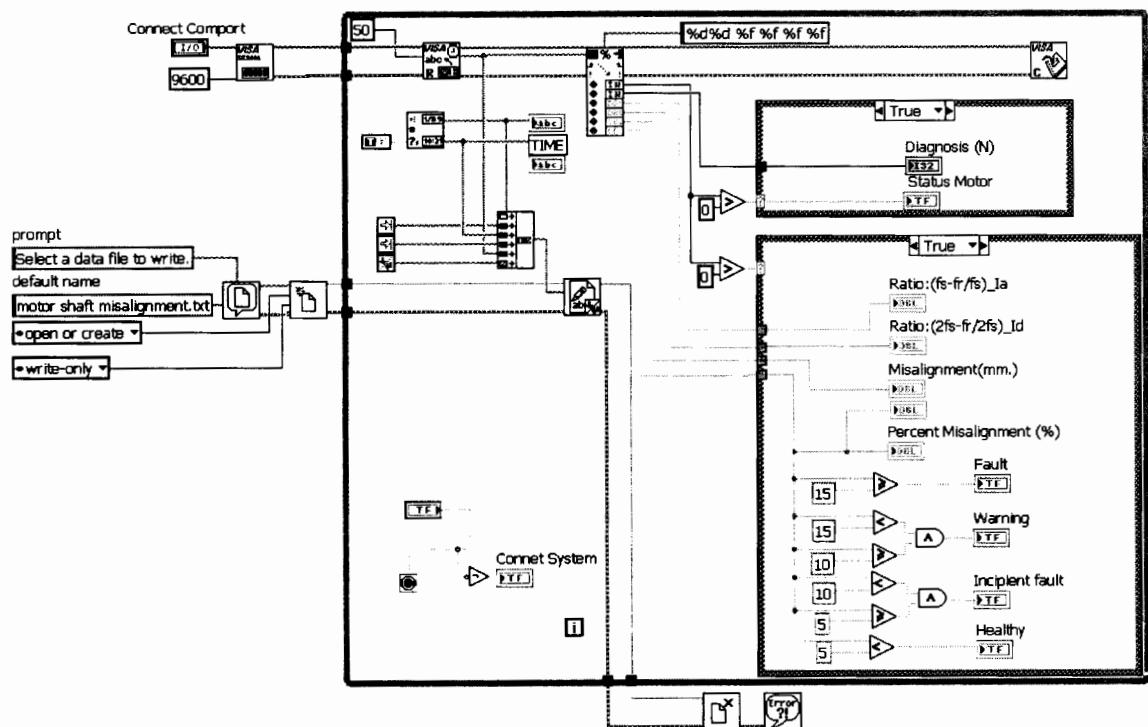
- 4) ตั้ง PAN (Personal Area Network) จะต้องตั้งให้เหมือนกับ Coordinator
- 5) กำหนด Destination (จุดหมายที่ต้องการ รับส่งข้อมูลด้วย) โดย ตั้งค่า

DH = 00 DL = 00

- 6) กำหนดครูปแบบการ Sleep ให้กับ End Device ในที่นี้ได้กำหนดให้ใช้ SM = 4 คือ การ Sleep แบบ CYCLIC SLEEP จะหลับ และตื่นสลับกันไปอยู่ตลอดเวลาและ จะตื่นขึ้นมาทำงานเมื่อถูกกระตุ้น ผ่าน ทาง UART หรือ ได้รับข้อมูลจาก Coordinator หรือ โนดอื่นๆที่ทำการส่งข้อมูลผ่าน สามารถกำหนดรายละเอียดต่างๆได้เพิ่มเติม เช่น ST หากไม่มีการทำงาน นานเท่าไรจะจะเข้า sleep mode SP เวลาในการ หลับและตื่น สลับกัน

ภาคผนวก ฉ

โค้ดโปรแกรม LabVIEW



ภาพที่ ฉ.1 โค้ดโปรแกรมรายงานผลการวินิจฉัยการเบี้องคุณย์มอเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์

ภาคผนวก ช

โค๊ดโปรแกรมภาษาซีของไมโครคอนโทรลเลอร์ LPC1768

```
*****
Diagnose three phase induction motor shaft misalignment
*****
```

```
#include <stdio.h>
#include "ipc17xx.h"
#include "type.h"
#include "uart.h"
#include "timer.h"
#include "math.h"
#define N 2048
#define norm 1/N
char uart_buf[50];
float data[N];
float Ia_max;
float I_max;
float IA;
float IB;
float IC;
float Id;
float IA_rms;
float IB_rms;
float IC_rms;
float I_phase_A[40];
float I_phase_B[40];
float I_phase_C[40];
float phase_A;
float phase_B;
float phase_C;
float theta1;
```

```
float data1[20];
float rsfft[N/2];
float isfft[N/2];
float absfft[N/2];
float psdfft[N/2];
float logfft[N/2];
float mean=0;
float mean_A=0;
float mean_B=0;
float mean_C=0;
float mean1=0;
float vmax=0;
float v_data=0;
float offset=0;
long int i=0,j=0, n=0;
double sumdata_A = 0;
double sumdata_B = 0;
double sumdata_C = 0;
double sumdata = 0;
double sumdata1 = 0;
unsigned long nn = N;
int isign = (int)1;
int a,b,c,m,count_data,nnn;
int adc0_1,adc0_2,adc0_3;
float d,t,ts,fs,wt,we,theta,w1,w2,pi = 3.141592653589793;
float nor_FFT;
float F_max_C_IA;
float F_max_L_IA;
float F_max_H_IA;
float max_C_IA;
```

```

float    max_L_IA;
float    max_H_IA;
float    nor_FFT_Ia;
float    F_max_C_Id;
float    F_max_L_Id;
float    F_max_H_Id;
float    max_C_Id;
float    max_L_Id;
float    max_H_Id;
float    nor_FFT_Id;
float    percent_misalignment;
float    misalignment;
float    mean_percent_misalignment;
float    mean_misalignment;
float    mean_nor_FFT_Ia;
float    mean_nor_FFT_Id;
float aver_fft[256];
int data_0=0;
int data_1=0;
int loop_fft=0,status=0;
float max_c,max_l,max_h,max;
float F_max_c,F_max_l,F_max_h;
extern uint32_t timer0_counter;
uint32_t counter = 0;
int k = 0,DQ0_FFT=0;
int adc_ch1,adc_ch2,adc_ch3;
int Ia_FFT_Id_FFT;
//-----
const unsigned long led_graph[8] = { 0x01, 0x03, 0x07, 0x0F, 0x1F, 0x3F, 0x7F, 0xFF };
//-----

```

```

volatile uint32_t eint0_counter;

void Init_ADC()
{
    LPC_SC->PCONP |= (1 << 12);
    LPC_PINCON->PINSEL1 &= ~0x003FC000;           /* P0.23~26, A0.0~3, function 01 */
    LPC_PINCON->PINSEL1 |= 0x00154000;
    LPC_ADC->ADCR = 0x052106FF;
    LPC_ADC->ADINTEN = 0x1FF;                  /* Enable all interrupts */
}

//-----
void TIMER0_IRQHandler (void)
{
    fs = 1024;
    ts = 1/fs;
    we = 2*pi*50;
    if(DQ0_FFT ==1)
    {
        adc_ch1 = LPC_ADC->ADDR1;
        data[k] = ( adc_ch1 >> 4 ) & 0FFF;
        k = k+1;
    }
    if(DQ0_FFT ==2)
    {
        if (k<N+40)
        {
            adc_ch1 = LPC_ADC->ADDR1;
            adc_ch2 = LPC_ADC->ADDR2;
            adc_ch3 = LPC_ADC->ADDR3;
            phase_A = ( adc_ch1 >> 4 ) & 0FFF;
            phase_B = ( adc_ch2 >> 4 ) & 0FFF;
        }
    }
}

```

```

phase_C = ( adc_ch3 >> 4 ) & 0xFF;
phase_A = ((phase_A-mean)*3.3)/4095;
phase_B = ((phase_B-mean)*3.3)/4095;
phase_C = ((phase_C-mean)*3.3)/4095;
if(k<40)
{
    I_phase_A[k]=phase_A;
    I_phase_B[k]=phase_B;
    I_phase_C[k]=phase_C;
}
if(k==23)
{
    max = -5.00;
    for(i=0;i<22;i++)
    {
        if(I_phase_A[i]> max)
        {
            max = I_phase_A[i];
            I_max = i;
        }
    }
    theta = (I_max+2)*2*pi/20.481 - pi/2 ;
}
if(k >= 40)
{
    i = k-40;
    data[k-40] = (2.00/3.00)*(phase_A*cos(we*ts*i-theta)+phase_B*cos(we*ts*i-
(2.00*pi)/3.00-theta)+ phase_C*cos(we*ts*i+(2.00*pi)/3.00-theta));
}
k = k+1;

```

```

        } }

//-----

if( k>=N+40)

{
    disable_timer( 0 );

}

LPC_TIM0->IR = 1;                                /* clear interrupt flag */

return;

}

//-----FFT-----

#define SWAP

void realft(float data[], unsigned long n, int isign)

{
    void four1(float data[], unsigned long nn, int isign);

    unsigned long i,i1,i2,i3,i4,np3;

    float c1=0.5,c2,h1r,h1i,h2r,h2i;

    double wr,wi,wpr,wpi,wtemp,theta;

    theta=3.141592653589793/(double) (n>>1);

    if (isign==1)

    {
        c2 =-0.5;

        four1(data,n>>1,1);

    }

    else

    {
        c2=0.5;

        theta=-theta;

    }

    wpr=cos(theta);

    wpi=sin(theta);
}

```

```

wr=wpr;
wi=wpi;
np3=n+3;
for (i=2; i<=(n>>2);i++)
{
    i4=1+(i3=np3-(i2=1+(i1=i+i-1)));
    h1r=c1*(data[i1]+data[i3]);
    h1i=c1*(data[i2]-data[i4]);
    h2r=-c2*(data[i2]+data[i4]);
    h2i= c2*(data[i1]-data[i3]);
    data[i1]=(float)(h1r+wr*h2r-wi*h2i);
    data[i2]=(float)(h1i+wr*h2i+wi*h2r);
    data[i3]=(float)(h1r-wr*h2r+wi*h2i);
    data[i4]=(float)(-h1i+wr*h2i+wi*h2r);
    wr=(wtemp=wr)*wpr-wi*wpi;
    wi=wi*wpr+wtemp*wpi;
}
if(isign==1)
{
    data[1]=(h1r=data[1])+data[2];
    data[2]=h1r-data[2];
}
else
{
    data[1]=c1*((h1r=data[1])+data[2]);
    data[2]=c1*(h1r-data[2]);
    four1(data,n>>1,-1);
}
#define SWAP(a,b) temp=(a);(a)=(b);(b)=temp

```

```

void four1( float data[], unsigned long nn, int isign)
{
    unsigned long n, mmax,m,j,istep,i;
    double wtemp, wr,wpr,wpi,wi,theta;
    float tempr,tempi;
    n=nn << 1;
    j=1;
    for(i=1;i<n;i+=2)
    {
        if(j>i)
        {
            SWAP(data[j],data[i]);
            SWAP(data[j+1],data[i+1]);
        }
        m=n >> 1;
        while(m>=2 && j>m)
        {
            j-=m;
            m >>=1;
        }
        j+=m;
    }
    mmax=2;
    while(n>mmax)
    {
        istep=mmax << 1;
        theta=isign*(6.28318530717959/mmax);
        wpr=cos(theta);
        wpi=sin(theta);
        wr=1.0;
    }
}

```

```

wi=0.0;
for(m=1;m<mmax;m+=2)
{
    for(i=m;i<=n;i+=istep)
    {
        j=i+mmax;
        tempr=(float)(wr*data[j]-wi*data[j+1]);
        tempi=(float)(wr*data[j+1]+wi*data[j]);
        data[j]=data[i]-tempr;
        data[j+1]=data[i+1]-tempi;
        data[i]+=tempr;
        data[i+1]+=tempi;
    }
    wr=(wtemp=wr)*wpr-wi*wpi;
    wi=wi*wpr+wtemp*wpi;
}
mmax=istep;
}

//-----
void fft()
{
    realft(data-1,nn,isign);
    j = 0, n = 0;
    for (i=0;i < N;i++)
    {
        if (i%2 == 0)          // sort fft output
        {
            rsfft[j] = data[i]*data[i];      // real part
            j++ ;
        }
    }
}

```

```

        }

    else
    {

        isfft[n] = data[i]*data[i];           // imag part
        isfft[0] = 0;
        absfft[n] = sqrt(rsfft[n] + isfft[n]) ;
        psdfft[n] = (absfft[n]*absfft[n])/N ;
        logfft[n] = 10*log10(psdfft[n]*norm);
        n++;
    }
}

}

}

//-----

void delay(unsigned long int count1)
{
    while(count1 > 0) {count1--;}           // Loop Decrease Counter
}

//***** **** //

void convert_volt()
{
    sumdata =0 ;
    for(i=0;i<N;i++)
    {
        sumdata = sumdata+data[i];
    }

    mean = sumdata/N;

    for(i=0;i<N;i++)
    {
        data[i] = data[i]-mean;
        data[i] = (data[i]*3.3)/4095;
    }
}

```

```

        }

//===== Sum average fft =====

void sum_fft()
{
    for(i = 0;i<256;i++)
    {
        aver_fft[i] += logfft[i];
    }
}

//-----

void aver_sum_fft_Ia()
{
    for(i=0;i<256;i++)
    {
        aver_fft[i] = aver_fft[i]/10;
    }
}

//-----

void aver_sum_fft_Id()
{
    for(i=0;i<256;i++)
    {
        aver_fft[i] = aver_fft[i]/10;
    }
}

//----- fine magnitude maximun and frequency -----
void fine_max_FFT_Ia()
{
    max_c = -100;
}

```

```

max_l = -100;
max_h = -100;
F_max_c = 0;
F_max_l = 0;
F_max_h = 0;
for(i=0;i<10;i++)
{
    if(aver_fft[i+95]> max_c)
    {
        max_c = aver_fft[i+95];
        F_max_c = i+95;
    }
    if(aver_fft[i+45]> max_l)
    {
        max_l = aver_fft[i+45];
        F_max_l = i+45;
    }
    if(aver_fft[i+145]> max_h)
    {
        max_h = aver_fft[i+145];
        F_max_h = i+145;
    }
    F_max_c = F_max_c/2;
    F_max_l = F_max_l/2;
    F_max_h = F_max_h/2;
    nor_FFT = max_c/max_l;
}
//-----

```

```

void fine_max_FFT_Id()
{
    max_c = -100;
    max_l = -100;
    max_h = -100;
    F_max_c = 0;
    F_max_l = 0;
    F_max_h = 0;
    for(i=0;i<10;i++)
    {
        if(aver_fft[i+195]> max_c)
        {
            max_c = aver_fft[i+195];
            F_max_c = i+195;
        }
        if(aver_fft[i+145]> max_l)
        {
            max_l = aver_fft[i+145];
            F_max_l = i+145;
        }
        if(aver_fft[i+245]> max_h)
        {
            max_h = aver_fft[i+245];
            F_max_h = i+245;
        }
    }
    F_max_c = F_max_c/4;
    F_max_l = F_max_l/4;
    F_max_h = F_max_h/4;
}

```

```

    nor_FFT = max_c/max_l; }

//-----

int main (void)
{
    SystemInit();

    LPC_GPIO2->FIODIR = 0xFF;           // P2[0..7] defined as Outputs
    LPC_GPIO2->FIOPIN = 0xFF;           // OFF all LED
    UARTInit(0,9600);                  //Initial UART0 = 9600 Baud

    delay(2000000);

    Init_ADC();

    while(1)
    {
        for(Ia_FFT_Id_FFT = 1;Ia_FFT_Id_FFT<6;Ia_FFT_Id_FFT++)
        {
            for(i=0;i<N;i++)
            {
                data[i]=0;
            }

            delay(2000000);

//-----

            for (i=0;i<256;i++)
            {
                aver_fft[i]=0;
            }

            init_timer( 0, TIME_INTERVAL );
            DQ0_FFT = 1;

            for(loop_fft = 0;loop_fft<10;loop_fft++)
            {
                enable_timer( 0 );
                while(k <N);
                disable_timer( 0 );
            }
        }
    }
}

```

```

k=0;

convert_volt();
fft();
sum_fft();
}

aver_sum_fft_Ia();
fine_max_FFT_Ia();
nor_FFT_Ia = nor_FFT ;
for (i=0;i<256;i++)
{ aver_fft[i]=0;
}

//-----
for(i=0;i<N;i++)
{
    data[i]=0;
}

DQ0_FFT = 2;
for(loop_fft = 0;loop_fft<10;loop_fft++)
{
    enable_timer( 0 );
    while(k <N+40);
    k=0;
    fft();
    sum_fft();
}

aver_sum_fft_Id();
fine_max_FFT_Id();
nor_FFT_Id = nor_FFT ;
for (i=0;i<256;i++)

```

```

    { aver_fft[i]=0;
}

//-----

for(i=0;i<40;i++)
{
    IA_rms += I_phase_A[i]*I_phase_A[i];
    IB_rms += I_phase_B[i]*I_phase_B[i];
    IC_rms += I_phase_C[i]*I_phase_C[i];
}

IA_rms = IA_rms/40.00; IA_rms = sqrt(IA_rms)*5;
IB_rms = IB_rms/40.00; IB_rms = sqrt(IB_rms)*5;
IC_rms = IC_rms/40.00; IC_rms = sqrt(IC_rms)*5;

//-----

mean_nor_FFT_Ia += nor_FFT_Ia;
mean_nor_FFT_Id += nor_FFT_Id;
misalignment = (-0.1260) + ((0.2268)*nor_FFT_Ia) + ((0.2316)*nor_FFT_Id);
percent_misalignment = (100.00/0.500)*misalignment;
if(IA_rms>1.25&IB_rms>1.25&IC_rms>1.25)
{
    status =1;
}
else
{
    status =0;
}

//-----

sprintf(uart_buf,"%d\t%d\t%1.3f\t%1.3f\t%3.3f\t%2.3f\n",status,Ia_FFT_Id_FFT
,nor_FFT_Ia,nor_FFT_Id,misalignment,percent_misalignment);
printUART0((unsigned int *)uart_buf);

```

```

    }

mean_nor_FFT_Ia = mean_nor_FFT_Ia /5.00;
mean_nor_FFT_Id = mean_nor_FFT_Id /5.00;
misalignment = (-0.1260) + ((0.2268)*mean_nor_FFT_Ia) +
((0.2316)*mean_nor_FFT_Id);

percent_misalignment = (100.00/0.500)*misalignment;

delay(50000000);

if(IA_rms>1.25&IB_rms>1.25&IC_rms>1.25)

{nnn= 6;

if(percent_misalignment<5.00)

{

LPC_GPIO2->FIOPIN = 0xFE;           // display level degree misalignment

}

if(percent_misalignment>=5.00 & percent_misalignment<10.00 )

{

LPC_GPIO2->FIOPIN = 0xFD;           // display level degree misalignment

}

if(percent_misalignment>=10.00 & percent_misalignment<15.00 )

{

LPC_GPIO2->FIOPIN = 0xFB;           // display level degree misalignment

}

if(percent_misalignment>=15.00)

{

LPC_GPIO2->FIOPIN = 0xF7;           // display level degree misalignment

}

}

else

{

nnn = 0;
}
}
```

```

sprintf(uart_buf,"%d\t%d\t%1.3f\t%1.3f\t%3.3f\t%2.3f\n",status,nnn,mean_nor_FFT_Ia,mean_nor
_FFT_Id,misalignment,percent_misalignment);
printUART0((unsigned int *)uart_buf);

    Ia_FFT_Id_FFT = 1;
    mean_misalignment = 0;
    mean_nor_FFT_Ia = 0;
    mean_nor_FFT_Id = 0;
}

}
}

//*****End Of Program*****

```



ประชุมวิชาการ มหาบ.วิจัย ครั้งที่ 5
เอกสารสืบเนื่องจากการประชุม

4 - 5 สิงหาคม 2554

ณ โรงแรมสุนีย์ แกรนด์ แอคโซน คอนเวนชัน เซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี

ระบบวินิจฉัยระดับการเบี้องศูนย์มอเตอร์ไฟฟ้าตัวไนโตรคอนโทรลเลอร์

Microcontroller Based Diagnostic System

For The Degree Of Motor Shaft Misalignment

ผู้ก่อตั้ง มงคล บุญดานันท์ และบงกช สุขอนันต์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

E-mail : padung2513@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนองานวิจัยระบบวินิจฉัยระดับการเบี้องศูนย์มอเตอร์ไฟฟ้าแบบออนไลน์ซึ่งประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต ในสภาวะไม่มีโหลด ด้วยเทคนิคเคราะห์สัญญาณกระแสสัมภาระ (Fast Fourier Transform) FFT หากัดของสัญญาณความถี่แทนข้าง $f_s \pm f_r$ ซึ่งขนาดของสัญญาณดังกล่าวสัมพันธ์กับระดับการเบี้องศูนย์ที่เปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยใช้มอเตอร์เห็นี่ยาน้ำ 3 เฟสขนาด 10 HP รุ่นเดียวันจำนวน 3 ตัวเพื่อใช้เป็นข้อมูลทางสถิติในการวินิจฉัยระดับการเบี้องศูนย์มอเตอร์ จากการวิจัยพบว่าสามารถหาเกณฑ์ในการวินิจฉัยระดับการเบี้องศูนย์ 3 ระดับ และระบบสามารถวินิจฉัยระดับการเบี้องศูนย์ มีความถูกต้อง 88.33%

คำสำคัญ : การเบี้องศูนย์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ การวิเคราะห์กระแสสัมภาระ

Abstract

This paper presents a diagnostic system to determine the degree of motor shaft misalignment. The 32-bit microcontrollers are employed as the central unit to analyze and determine such conditions carried under no-load test conditions. Stator current signal analysis techniques are primarily used with the current signal to the frequency domain method (Fast Fourier Transform) to determine the magnitude of the frequency sideband. ($f_s \pm f_r$) The magnitude of the signal correlated with the degree of motor shaft misalignment. The researchers used the same three 3-phase 10HP induction motors. These were used to gather statistical data to diagnose the degree of motor shaft misalignment. Research indicates that the criteria for the diagnosis of the three levels of motor shaft misalignment can be measured with an accuracy of 88.33%.

Keywords : Misalignment, Microcontroller, Motor Current Signature Analysis

บทนำ

เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าเห็นี่ยวนำเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพราะเป็นเครื่องจักรกลที่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ใช้งานง่าย มีความแข็งแรง ราคาถูก และมีความต้องการบำรุงรักษาต่ำ ถึงแม้ว่ามอเตอร์เห็นี่ยวน่าจะสามารถทำงานได้อย่างดีก็ตาม เมื่อเกิดความผิดปกติเกิดขึ้นส่งผลต่อขบวนการผลิตทั้งหมด หรือความผิดปกติเพียงเล็กน้อยก็อาจลุกลามเป็นความเสียหายของมอเตอร์ที่รุนแรงได้ ดังนั้นการบอกรหัสล่วงหน้าได้ ก็สามารถที่วางแผนในการซ่อมบำรุงเพื่อทำให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และเป็นการรักษาภาระให้กับผู้ใช้งานน้อยลง การตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์สามารถทำได้โดยหยุดการทำงานของมอเตอร์ แล้วดูด

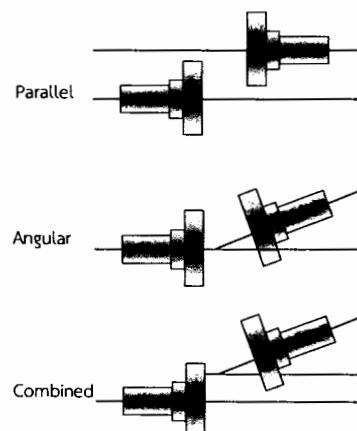
ขั้นส่วนของมอเตอร์เพื่อทำการตรวจสอบสภาพหรือซ่อมบำรุง วิธีนี้มีข้อเสียคือต้องหยุดขบวนการผลิตนั้น และการตรวจสอบความผิดปกติโดยขณะมอเตอร์ใช้งานอยู่ไม่ต้องหยุดขบวนการผลิต สามารถตรวจสอบได้หากวิธี เช่น การวิเคราะห์จากการสั่นและสัญญาณรบกวน เสียง เส้นแรงแม่เหล็ก แรงดัน และการใช้สัญญาณกระแสเตาเตอร์ [1]

ในการวัดสัญญาณกระแสเตาเตอร์ของมอเตอร์ขั้นตอนอย่างไร เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์ เป็นวิธีไม่มีผลกระทบต่อระบบการผลิต ไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมที่ตัวมอเตอร์ใช้เวลาในการตรวจสอบน้อยและสามารถทราบความผิดปกติก่อนมอเตอร์จะเสียหายที่รุนแรง โดยเฉพาะความผิดปกติจากการเบี้องศูนย์ของแกนเพลา มอเตอร์ ทำให้เกิดแรงดึงแม่เหล็กไม่สมดุล ส่งผลให้มอเตอร์เกิดการสั่นสะเทือน เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อาชญาการใช้งาน ของลับลูกปืนมอเตอร์สั่นลงและคิดเป็น 40 % ของการชำรุดของมอเตอร์ทั้งหมด [1] จากบทความวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สามารถตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ความผิดปกติของขนาดสัญญาณความถี่แบบข้าง $f_s \pm f_r$ ขนาดของสัญญาณที่ความถี่ตังกกล่าวมีความสัมพันธ์กับระยะของการเบี้องศูนย์ [1- 7] แต่จากการศึกษาพบว่า ยังไม่มีการใช้ในโครงสร้างไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์และวินิจฉัยระดับการเบี้องศูนย์แบบออนไลน์ เพื่อตรวจสอบระดับการเบี้องศูนย์มอเตอร์ไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาการใช้ในโครงสร้างไฟฟ้าสำหรับการเบี้องศูนย์และวินิจฉัยระดับการเบี้องศูนย์ของ มอเตอร์ไฟฟ้าเนี่ยนานา 3 ไฟฟ้าแบบออนไลน์วิเคราะห์จากสัญญาณกระแสเตาเตอร์ใช้เทคนิคในโหมดเมนความถี่จากการ แปลงฟูร์เรีย FFT ใช้มอเตอร์ที่ขนาดเดียวกันจำนวน 3 ตัว ใช้เป็นข้อมูลทางสถิติเพื่อหาเกณฑ์ในการตัดสินการ วินิจฉัยระดับการเบี้องศูนย์

การเบี้องศูนย์ของแกนเพลาของมอเตอร์

จากการวิจัยหลายงานวิจัยพบว่าการเบี้องศูนย์เกิดจากการผลิตและประกอบขึ้นส่วนต่างๆ หรือเกิดจากการ ติดตั้งเครื่องจักรที่มักมีตำแหน่งจุดศูนย์กลางผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งที่กำหนดไว้ทำให้ระยะห่างจากแกนหมุนไม่คงที่ โหลดที่ต่อกับมอเตอร์เนี่ยนานาแนวแกนเพลาไม่เป็นเส้นตรง(Shaft Misalignment) สามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ [6]



ภาพที่ 1 ลักษณะการเกิดการเบี้องศูนย์ของแนวแกนเพลาของมอเตอร์เมื่อต่อ กับโหลด

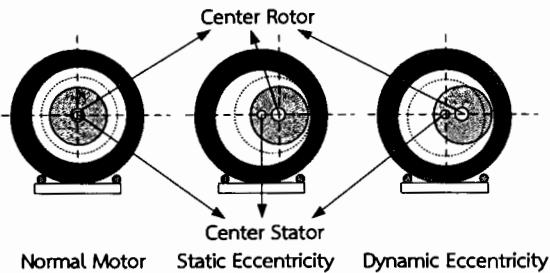
1. Parallel misalignment เมื่อแนวแกนเพลาของมอเตอร์ต่อ กับโหลดมีแนวระนาบเดียวกันแต่ศูนย์กลางจุดหมุน ของแต่ละแกนเพลาห่างกัน
2. Angular misalignment เมื่อแนวแกนเพลาของมอเตอร์ต่อ กับโหลดอยู่ในแนวระนาบเดียวกันแต่ศูนย์กลางจุด หมุนทำมุมซึ่งกันและกัน

3. Combined Misalignment เมื่อแนวแกนเพลานومเตอร์ต่อ กับ โรล์ไม่อยู่ในแนวระนาบเดียวกัน และศูนย์กลางจุดหมุนทำมุมซึ่งกันและกัน

จากลักษณะการเยื่องศูนย์ข้างต้น เป็นผลทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของช่องอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ (Eccentricity) สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด

1. การเยื่องศูนย์แบบสตاتิก (Static Eccentricity) เกิดจากแนวแกนเพลานومเตอร์ถูกบังคับให้ไปด้านใดด้านหนึ่งของมอเตอร์ส่งผลต่อการหมุนของโรเตอร์จะไม่หมุนรอบจุดศูนย์กลางสนามแม่เหล็กหมุนแต่จะหมุนรอบจุดศูนย์กลางตัวเอง

2. การเยื่องศูนย์แบบไนโตรมิก (Dynamic Eccentricity) เกิดจากแนวแกนเพลานومเตอร์ถูกบังคับให้ไปด้านใดด้านหนึ่งของมอเตอร์ เมื่อกิจกรรมหมุนจะทำให้ตำแหน่งของโรเตอร์ถูกบังคับหมุนรอบจุดศูนย์กลางสนามแม่เหล็กหมุน ดังภาพที่ 2 [3]



ภาพที่ 2 ลักษณะความไม่สม่ำเสมอของช่องอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์

หลักการตรวจจับการเยื่องศูนย์ของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยววนิềา 3 เพส

เมื่อการทำงานพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวสามเฟสคือ การสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่ขัดจลาจลสเตเตอร์ด้วยระบบไฟฟ้าสามเฟส สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่โรเตอร์และมีกระแสไหลในโรเตอร์ซึ่งกระแสจะสร้างสนามแม่เหล็กที่ดึงดูดของโรเตอร์ เมื่อมอเตอร์ที่เกิดการเยื่องศูนย์ ทำให้ความไม่สม่ำเสมอของอากาศ ระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์ ค่าความนำแม่เหล็กของช่องอากาศ (Airgap permeance) เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงส่งผลให้สนามสร้างแม่เหล็กที่โรเตอร์ไม่สำเร็จตามระเบียบของอากาศ สนามแม่เหล็กทั้งสองจะถูก Modulate กันด้วยความถี่ $f_s \pm f_r$ และขนาดของสัญญาณดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับระบบการเยื่องศูนย์ [1], [2], [4], [6] สามารถอธิบายได้ดังสมการ

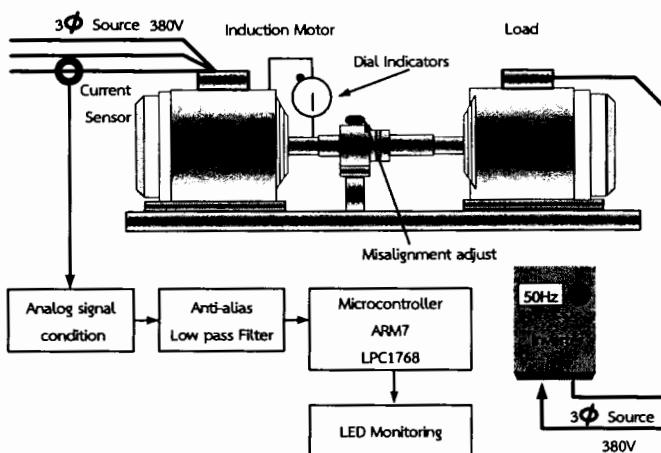
$$f_{ecc} = |f_s \pm kf_r| = f_s [1 \pm 2m(1-s)/p]$$

f_{ecc}	=	ความถี่ที่เกิดจากการเยื่องศูนย์มีหน่วยเป็นไฮร์ท (Hz)
f_s	=	ความถี่ของแหล่งจ่ายให้มอเตอร์มีหน่วยเป็นไฮร์ท (Hz)
f_r	=	ความถี่ของความเร็วมอเตอร์ (Hz)
k	=	ลำดับอาร์โนนิคค่าเท่ากับ 1, 2, 3...
m	=	ลำดับอาร์โนนิคค่าเท่ากับ 1, 2, 3...
s	=	ค่า slip ของมอเตอร์
p	=	จำนวนขั้วของมอเตอร์

วิธีการทดลอง

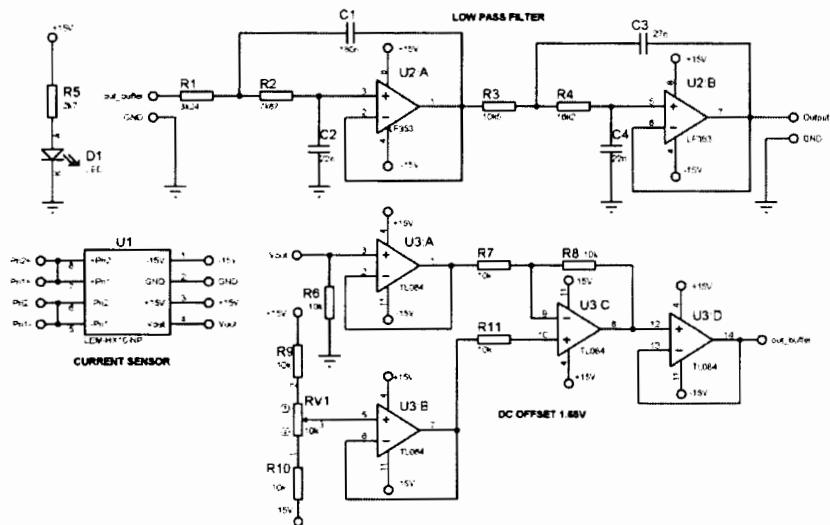
1. เครื่องมือและอุปกรณ์

การทดลองใช้ชั้นอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเห็นได้ที่ว่ามี 3 เฟส รุ่นเดียวกันจำนวน 3 ตัว ขนาด 7.5kW, 50Hz, 4poles, 1440 rpm. ระยะห่างจากตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 2 และ 3 คือ 0.5m. ชุดทดลองสามารถปรับระดับการเบี้องศูนย์ และวัดระดับการเบี้องศูนย์ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Dial Indicators ซึ่งแกนเพลาของอเตอร์ต่ออยู่กับโหลดที่สามารถปรับระดับโหลดได้ด้วยอินเวอร์เตอร์ ภาพของระบบชุดทดลองวิเคราะห์สภาวะและระดับการเบี้องศูนย์ ดังภาพที่ 3

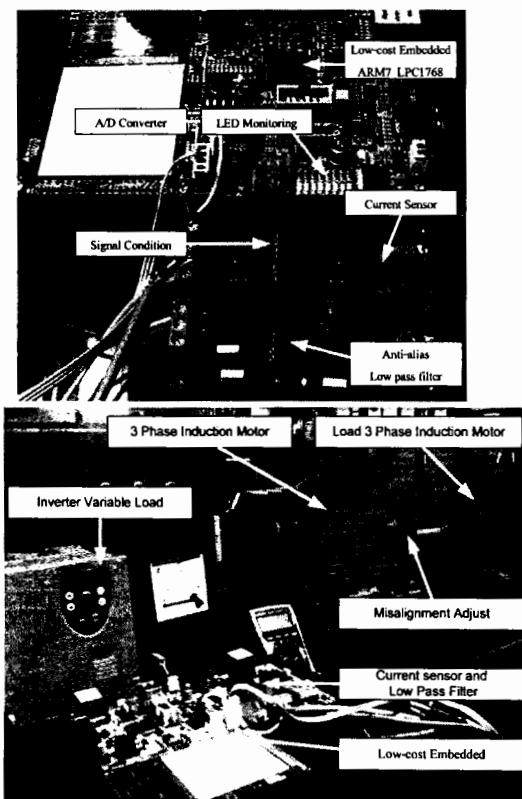


ภาพที่ 3. แผนผังชุดทดลองวิเคราะห์สภาวะและระดับการเบี้องศูนย์ในงานวิจัย

ในภาพที่ 4 เป็นวงจรวัดสัญญาณกระแสจากขดลวดอเตอร์ 1 เฟส ด้วยเซนเซอร์กระแส Current Sensor เบอร์ (LEN-HX-10NP), Accuracy $\pm 1\%$, Linearity $\pm 1\%$, DC to 50 kHz Frequency bandwidth, Input Current $I_p \pm 20$ (A), Output voltage $\pm 4V$ นำสัญญาณเข้าวงจรปรับแต่งสัญญาณให้ระดับแรงดัน offset เพิ่มกับ 1.65 โวลต์ จากนั้นนำสัญญาณเข้าวงจรกรองความถี่ที่ต้องมีแบนด์วิดท์ 500 Hz และภาพที่ 5 (ก)จะต่อวงจรต่อเข้ากับตัวประมวลผลสัญญาณคือไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex M3 Core เบอร์ LPC1768 ประมวลผล 32 บิต ประมวลด้วยความเร็ว 100 MHz หน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash ขนาด 512KB, Static RAM ขนาด 64KB ใน การสุมสัญญาณอนาคตอภิ朮เป็นตัวติดต่อ ขนาด 12 บิต ด้วยความถี่สูง 1024 kHz จำนวนข้อมูล 2048 ข้อมูลใช้เทคนิค วิเคราะห์ข้อมูลทางโดยเม้นความถี่แบบ FFT เมื่อ (frequency resolution) $\Delta f = (f_s / N) = (1024 / 2048) = 0.5\text{Hz}$ ทำการแปลง FFT จำนวน 10 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย เพื่อทำการวิเคราะห์ที่ระดับความผิดปกติของการเบี้องศูนย์ของอเตอร์ ดังภาพที่ 5 (ข)



ภาพที่ 4 วงจรรับสัญญาณกระแสจ่ายกรายการดับแรงดันและวงจรกรองແບกความถี่ต่ำ



(ก)

(ข)

ภาพที่ 5. (ก) วงจรปรับแต่งสัญญาณและไมโครคอนโทรลเลอร์ (ข) ระบบชุดทดลองวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและระดับการเยื่องศูนย์

2. การทดลองหาเกณฑ์ในการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์

2.1 ปรับระยะการเยื่องศูนย์ 0.00 ม. 0.03 ม. 0.06 ม. 0.09 ม. 0.12 ม. และ 0.15 ม. สภาวะไม่มีโหลด

2.2 ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลจากสัญญาณกระแสเดือร์ทاخนาดที่ความถี่แบบข้าง $f_s \pm f_r$

2.3 ใช้ขนาดความถี่แบบข้าง ($f_s / (f_s - f_r)$) ทำการ Normalization เป็นเกณฑ์ในการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์

3. ทดลองวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์

วินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์แบบออนไลน์โดยใช้เกณฑ์ในข้อที่ 2.3 ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำการทดลองซ้ำจำนวน

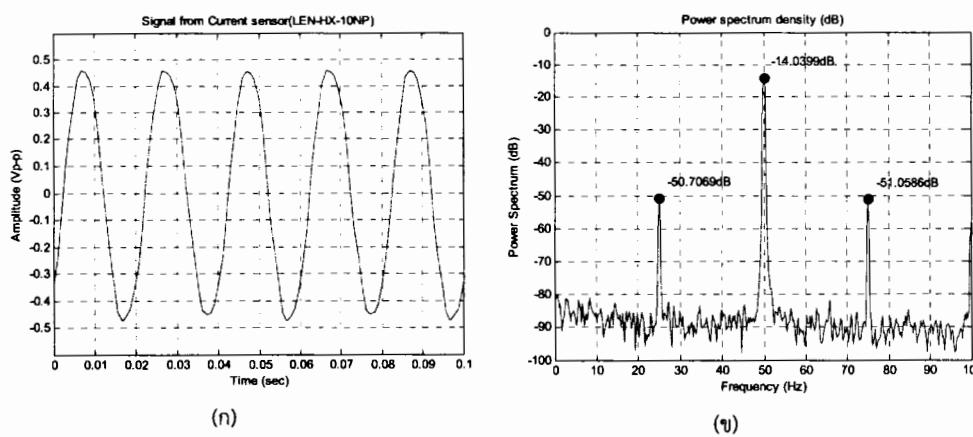
10 ครั้งต่อระยะการเยื่องศูนย์ แสดงผลระดับการเยื่องศูนย์ด้วยแอลอตตี้ คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการวินิจฉัย

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. การทดลองหาเกณฑ์ในการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์ จากผลการทดลองดังตารางที่ 1

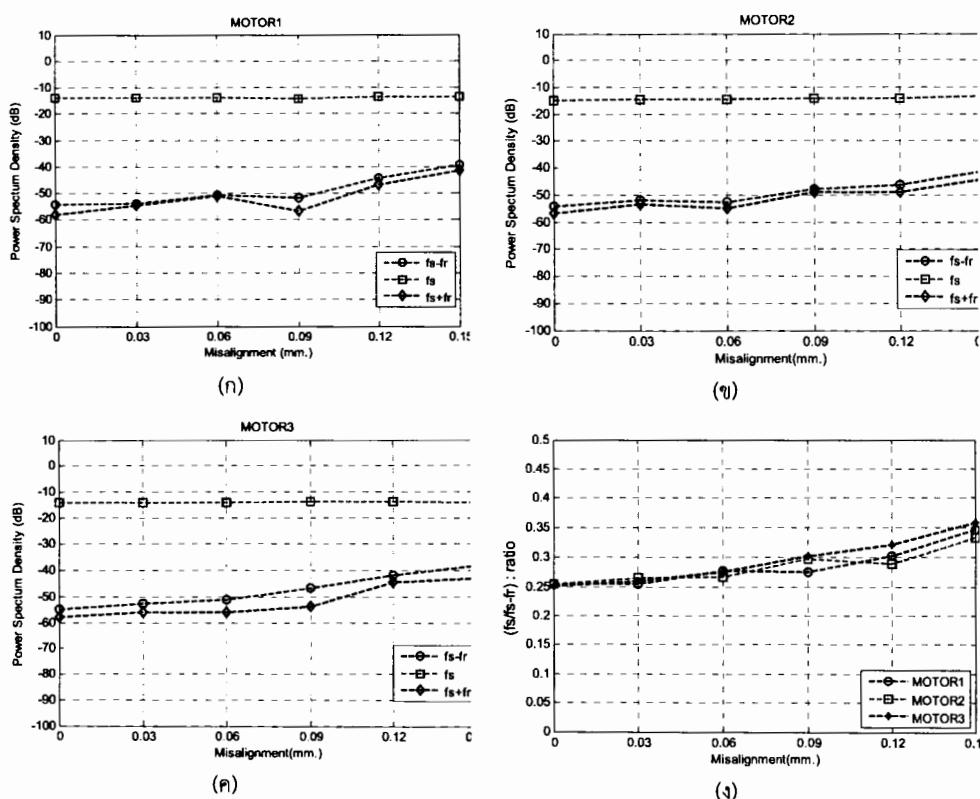
ตารางที่ 1 : ผลของการทดสอบหาเกณฑ์ในการวินิจฉัยของขนาดความถี่แบบข้างเมื่อปรับระยะการเยื่องศูนย์

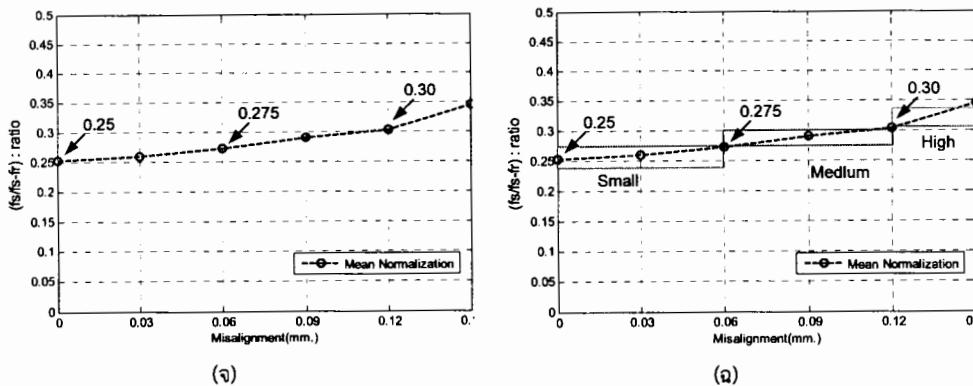
มอเตอร์ ตัวที่	No Load				
	$f_s - f_r$ (dB)	f_s (dB)	$f_s + f_r$ (dB)	Normalization ($f_s / (f_s - f_r)$)	ระยะการเยื่องศูนย์ (ม.m.)
1	-54.3545	-13.7843	-57.9979	0.2536	0.000
	-53.7502	-13.6993	-54.5935	0.2549	0.030
	-50.7069	-14.0399	-51.0586	0.2769	0.060
	-51.6747	-14.1654	-56.5247	0.2741	0.090
	-44.2633	-13.3519	-46.6175	0.3016	0.120
	-39.3191	-13.6263	-41.6385	0.3466	0.150
2	-54.312	-14.7924	-56.7931	0.2538	0.000
	-51.9004	-14.6734	-53.5873	0.2640	0.030
	-52.606	-14.5274	-54.9238	0.2669	0.060
	-47.8628	-14.1487	-48.8735	0.2960	0.090
	-46.2369	-14.0265	-48.7649	0.2888	0.120
	-40.9317	-13.4318	-43.9002	0.3329	0.150
3	-54.9539	-14.2126	-58.0156	0.2508	0.000
	-52.8173	-14.1263	-55.9705	0.2594	0.030
	-51.1164	-14.1436	-56.0247	0.2747	0.060
	-46.8398	-13.8705	-53.6737	0.3024	0.090
	-41.7433	-13.8528	-44.4474	0.3199	0.120
	-38.115	-14.0218	-42.9519	0.3575	0.150



ภาพที่ 6. ตัวอย่างสัญญาณกระแสสเตเตอร์เมื่อเกิดการเบี้องศูนย์ 0.06 มม.

(ก) สัญญาณโดยเม้นเวลา (h) สัญญาณโดยเม้นความถี่





ภาพที่ 7. (ก) (ข) (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเยื่องศูนย์กับ $f_s - f_r$, $f_s + f_r$ (จ) Normalization ($f_s/(f_s - f_r)$) ภาวะไม่มีโนล็อกของมอเตอร์ทั้ง 3 และ (จ) ค่าเฉลี่ย Normalization ของมอเตอร์ทั้ง 3

ในการทดสอบทำเกณฑ์จำแนกระดับการเยื่องศูนย์ ภายใต้สภาวะไม่มีโนล็อก ความเร็วรอบมอเตอร์เท่ากับ 1492 rpm ความถี่เดียวกับชั้งสัมพันธ์กับการเยื่องศูนย์เมื่อ $f_r = 50\text{Hz}$, $m = 1, s = 0.0053$, $p = 4$ ดังนั้นความถี่เดียวกับ $f_s - f_r = 25\text{Hz}$ และ $f_s + f_r = 75\text{Hz}$ จากการงานวิจัยได้ปรับแกนเพลานมอเตอร์ให้อยู่ในสภาวะปกตินี้เมื่อการเยื่องศูนย์ โดยในตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผล 10 ครั้ง และสามารถหาขนาดของสัญญาณความถี่เดียวกับ $f_s - f_r$ มอเตอร์ที่ 1 เท่ากับ -54.3545 dB มอเตอร์ที่ 2 เท่ากับ -54.312 dB มอเตอร์ที่ 3 เท่ากับ -54.9539 dB และ $f_s + f_r$ มอเตอร์ที่ 1 เท่ากับ -57.9979 dB มอเตอร์ที่ 2 เท่ากับ -56.7931 dB มอเตอร์ที่ 3 เท่ากับ -58.0156 dB เมื่อปรับระดับการเยื่องศูนย์เพิ่มขึ้นขนาดความถี่เดียวกับ $f_s \pm f_r$ จะเพิ่มระดับการเยื่องศูนย์ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว เป็นไปทิศทางเดียวกันดังข้อมูลแสดงตารางที่ 1 และภาพที่ 7(ก) (ข) (ค) และทำการ Normalization ($f_s/(f_s - f_r)$) ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวใช้ ดังภาพที่ 7(ง) และหาค่าเฉลี่ยของค่าข้อมูล Normalization ของมอเตอร์ทั้ง 3 ในภาพที่ 7(จ) ส่วนเกณฑ์จำแนกระดับการเยื่องศูนย์ดังภาพที่ 7(จ) และค่าเกณฑ์จำแนกระดับการเยื่องศูนย์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ค่าเกณฑ์จำแนกระดับการเยื่องศูนย์

ค่าเกณฑ์จำแนกระดับการเยื่องศูนย์	ระดับการเยื่องศูนย์
ตั้งแต่ 0.25 ถึง 0.275	น้อย
อยู่ระหว่าง 0.275 ถึง 0.3	ปานกลาง
อยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 0.35	มาก

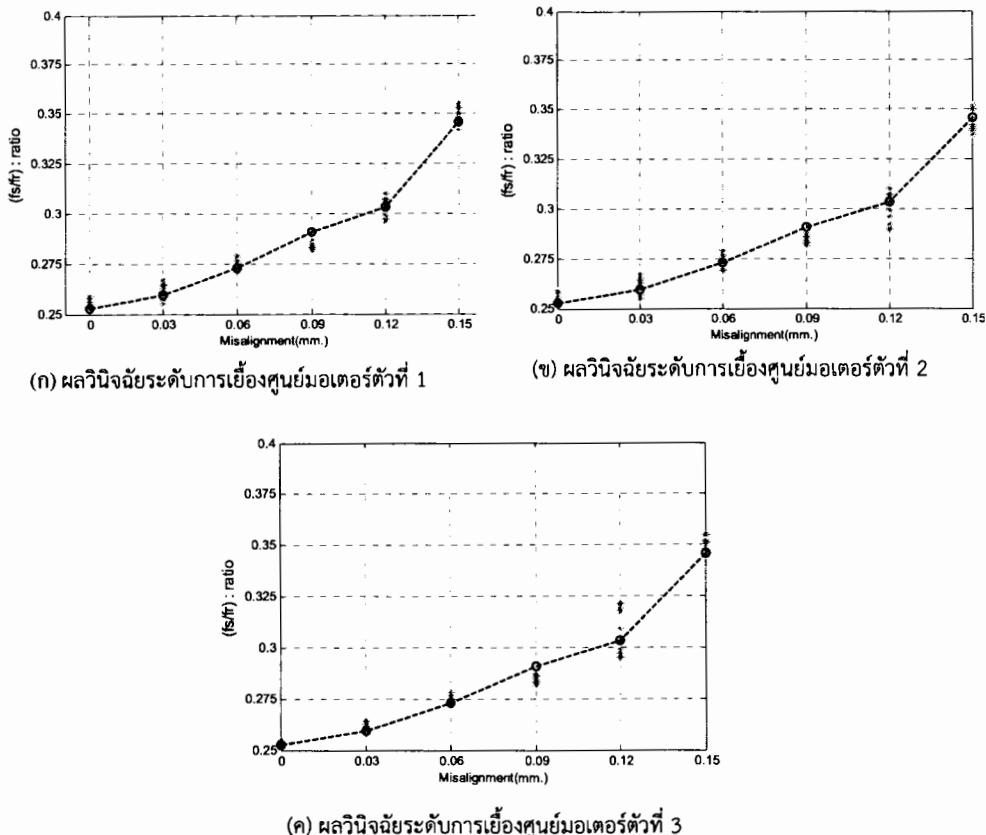
2. ทดลองวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์

ในการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์แบบออนไลน์ จะทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้งต่อระดับการเยื่องศูนย์ แสดงผลระดับการเยื่องศูนย์ด้วยผลลัพธ์ ผลการทดสอบวินิจฉัยดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 : ผลการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์

มอเตอร์ ตัวที่	จำนวน ครั้งการ ทดสอบ	ผลการทดสอบระดับการเยื่อง ศูนย์			ระยะการเยื่อง ศูนย์ (มม.)	ผลการวินิจฉัย ระดับการเยื่อง ศูนย์	เปอร์เซ็นต์ ความถูกต้อง
		น้อย	ปาน กลาง	มาก			
1	10	10	0	0	0.000	น้อย	100
	10	10	0	0	0.030	น้อย	100
	10	4	6	0	0.060	ปานกลาง	60
	10	0	10	0	0.090	ปานกลาง	100
	10	0	3	7	0.120	มาก	70
	10	0	0	10	0.150	มาก	100
2	10	10	0	0	0.000	น้อย	100
	10	10	0	0	0.030	น้อย	100
	10	4	6	0	0.060	ปานกลาง	60
	10	0	10	0	0.090	ปานกลาง	100
	10	0	4	6	0.120	มาก	60
	10	0	0	10	0.150	มาก	100
3	10	10	0	0	0.000	น้อย	100
	10	10	0	0	0.030	น้อย	100
	10	3	7	0	0.060	ปานกลาง	70
	10	0	10	0	0.090	ปานกลาง	100
	10	0	3	7	0.120	มาก	70
	10	0	0	10	0.150	มาก	100
รวม							88.33

จากตารางที่ 3 การทดสอบวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์ของมอเตอร์ทั้ง 3 จำนวน 10 ครั้งต่อระดับการเยื่องศูนย์ ผลการวินิจฉัยมีความถูกต้องสูงในช่วงค่าการเยื่องศูนย์ต่างจากค่าเกณฑ์จำแนกการเยื่องศูนย์เข้าใกล้ค่าเกณฑ์การจำแนกระดับการเยื่องศูนย์ผลการวินิจฉัยมีความถูกต้องลดลง เมื่อจากค่าเกณฑ์จำแนกเป็นค่าเดียวกับการทดสอบระดับการเยื่องศูนย์และข้อจำกัดของชุดทดสอบที่ปรับระดับการเยื่องศูนย์ให้มีความแม่นยำทำได้ล้าบาก ซึ่งผลการทดสอบในตารางที่ 3 นำมาเขียนการผลการวินิจฉัยของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวดังภาพที่ 8 (ก) และ (ค)



ภาพที่ 8. กราฟผลการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์มอเตอร์ทั้ง 3 ตัว

สรุป

ในการวิเคราะห์ความผิดปกติมอเตอร์เห็นได้ชัดเจน 3 เฟสใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลวิเคราะห์สัญญาณกระแสเฟสเดียว ใช้ขนาดของความถี่แบบข้าง $f_r \pm f_c$ เพื่อหาเกณฑ์วินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์ของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว เกณฑ์การวินิจฉัยมีการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมอเตอร์เกิดการเยื่องศูนย์ที่เพิ่มขึ้น ใช้เป็นเกณฑ์จำแนกระดับการเยื่องศูนย์ได้ 3 ระดับ ในกรณีที่มีความถูกต้องร้อยละ 88.33 การวินิจฉัยไม่สามารถตัดสินด้วยเกณฑ์ที่ชัดเจนได้ เพราะระดับการเยื่องศูนย์มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง แต่หากการเปลี่ยนแปลงการเยื่องศูนย์อยู่ช่วงกำหนดไว้ ซึ่งอาจจะแยกออกเป็นระดับต่างๆ ระดับ 1 มีการเยื่องศูนย์น้อยอยู่ในสภาพที่ยอมรับได้ ระดับ 2 มีการเยื่องศูนย์ปานกลางอยู่ในสภาพที่ต้องมีการเตือน และระดับ 3 มีการเยื่องศูนย์มากอยู่ในสภาพที่ต้องได้รับการแก้ไขด่วน จึงสามารถช่วยให้การวินิจฉัยได้ถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามการศึกษาในขั้นตอนนี้ คือการใช้เทคนิคอื่น ๆ ร่วมในการวินิจฉัยระดับการเยื่องศูนย์มอเตอร์เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการวินิจฉัย เช่นวิธีการของ Park's vector

เอกสารอ้างอิง

- [1] W.T. Thomson, D. Rankin, and D. G. Dorrell, 1999. "On-line Current Monitoring to Diagnose Airgap Eccentricity in Large Three-phase Induction Motor-Industrial case Histories Verify the Predictions" **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol 14, No. 4, December
- [2] Subhasis Nandi, Raj Mohan Bharadwaj, and Hamid A. Toliyat, 2002. "Performance Analysis of a Three-Phase Induction Motor Under Mixed Eccentricity Condition", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 17, No. 3, December
- [3] Randy Supangat, Jason Grieger, Nesimi Ertugrul, Wen L. Soong, Douglas A. Gray, and Colin Hansen, 2006. "Investigation of Static Eccentricity Fault Frequencies using Multiple Sensors in Induction Motors and Effects of Loading", **IEEE 4/06/2006**
- [4] Jawad Faiz, Bashir Mahdi Ebrahimi, Bilal Akin, and Hamid A. Toliyat, 2008. "Finite-Element Transient Analysis of Induction Motors Under Mixed Eccentricity Fault", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 44, No. 1, January
- [5] Jose D. Martinez-Morales, E. Palacios, D.U. Campos-Delgado, 2010. **Data Fusion for Multiple Mechanical Fault Diagnosis in Induction Motor at Variable Operating Conditions.** International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE 2010) 8-10 September Chiapas, México.
- [6] José M. Bossio, Guillermo R. Bossio, and Cristian H. De Angelo, 2009. "Angular Misalignment in Induction Motors with Flexible Coupling", **IEEE 978-1-4244-4649**
- [7] มนัส พันธุ์สูก, อุดมย์ จรรยาเลิศศุลย์ และ มงคล ปุซยิดานนท์. 2553."การเปรียบเทียบสัญญาณความผิดปกติของกระแสไฟฟ้าที่มีผลจากการเบี้องศูนย์มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาดต่างกัน". วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 20: 434-442

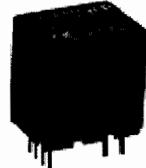
ภาคผนวก ณ
ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



Current Transducer HX 05 .. 15-NP

$I_{PN} = 5 .. 15 A$

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed, mixed, with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



Electrical data

Primary nominal current rms I_{PN} (A)	Primary current, measuring range I_{PM} (A)	Primary conductor diameter x turns (mm)	Type	RoHS since date code
Serial	Parallel	Series	Parallel	
± 5	± 10	± 15	± 30	$0.8d \times (6T+6T)$
± 10	± 20	± 30	± 60	$1.0d \times (3T+3T)$
± 15	± 30	± 45	± 90	$1.2d \times (2T+2T)$
V_{OUT}	Output voltage (Analog) @ $\pm I_{PN}$, $R_L = 10 k\Omega$, $T_A = 25^\circ C$ ± 4			
R_{OUT}	Output internal resistance			
R_L	Load resistance			
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$) ¹⁾			
I_c	Current consumption			
V_d	Rms voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min			
	Primary to secondary			
	Primary 1 to primary 2			
V_e	Partial discharge extinction voltage rms @ 10 pC			
\hat{V}_w	Impulse withstand voltage, 1.2/50 μs			

Accuracy-Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ C$ (excluding offset)	$< \pm 1$ % of I_{PN}
ε_L	Linearity error (0 .. $\pm I_{PN}$)	$< \pm 1$ % of I_{PN}
V_{OE}	Electrical offset voltage @ $T_A = 25^\circ C$	$< \pm 40$ mV
V_{OH}	Hysteresis offset voltage @ $I_p = 0$; after an excursion of $1 \times I_{PN}$	$< \pm 15$ mV
TCV_{OE}	Temperature coefficient of V_{OE}	$< \pm 1.5$ mV/K
TCV_{OUT}	Temperature coefficient of V_{OE} (% of reading)	± 0.1 %/K
t_r	Response time to 90% of I_{PN} step	≤ 3 μs
BW	Frequency bandwidth (-3 dB) ²⁾	50 kHz

General data

T_A	Ambient operating temperature	-25 .. +85 $^\circ C$
T_s	Ambient storage temperature	-25 .. +85 $^\circ C$
m	Mass	8 g
dCp	Creepage distance	≥ 5.5 mm
	Isolation material group	I
	Standards	EN50178: 1997

Notes :¹⁾ Also operate at $\pm 12V$ power supplies, measuring range reduced to $\pm 2.5 \times I_{PN}$

²⁾ Small signal only to avoid excessive heating of the magnetic core

Features

- Galvanic isolation between primary and secondary circuit
- Hall effect measuring principle
- Isolation voltage 3000V
- 2 isolated primary windings
- Low power consumption
- Extended measuring range($3 \times I_{PN}$)
- Power supply from $\pm 12V$ to $\pm 15V$
- Isolated plastic case recognized according to UL94-V0.

Advantages

- Low insertion losses
- Easy to mount with automatic handling system
- Only one design for wide current ratings range
- Small size and space saving
- High immunity to external interference.

Applications

- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- AC variable speed drives
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Electrical appliances
- Battery supplied applications
- DC motor drives

Application domain

- Industrial



LPC1769/68/67/66/65/64/63

**32-bit ARM Cortex-M3 microcontroller; up to 512 kB flash and
64 kB SRAM with Ethernet, USB 2.0 Host/Device/OTG, CAN**

Rev. 8 — 14 November 2011

Product data sheet



1. General description

The LPC1769/68/67/66/65/64/63 are ARM Cortex-M3 based microcontrollers for embedded applications featuring a high level of integration and low power consumption. The ARM Cortex-M3 is a next generation core that offers system enhancements such as enhanced debug features and a higher level of support block integration.

The LPC1768/67/66/65/64/63 operate at CPU frequencies of up to 100 MHz. The LPC1769 operates at CPU frequencies of up to 120 MHz. The ARM Cortex-M3 CPU incorporates a 3-stage pipeline and uses a Harvard architecture with separate local instruction and data buses as well as a third bus for peripherals. The ARM Cortex-M3 CPU also includes an internal prefetch unit that supports speculative branching.

The peripheral complement of the LPC1769/68/67/66/65/64/63 includes up to 512 kB of flash memory, up to 64 kB of data memory, Ethernet MAC, USB Device/Host/OTG interface, 8-channel general purpose DMA controller, 4 UARTs, 2 CAN channels, 2 SSP controllers, SPI interface, 3 I²C-bus interfaces, 2-input plus 2-output I²S-bus interface, 8-channel 12-bit ADC, 10-bit DAC, motor control PWM, Quadrature Encoder interface, four general purpose timers, 6-output general purpose PWM, ultra-low power Real-Time Clock (RTC) with separate battery supply, and up to 70 general purpose I/O pins.

The LPC1769/68/67/66/65/64/63 are pin-compatible to the 100-pin LPC236x ARM7-based microcontroller series.

2. Features and benefits

- ARM Cortex-M3 processor, running at frequencies of up to 100 MHz (LPC1768/67/66/65/64/63) or of up to 120 MHz (LPC1769). A Memory Protection Unit (MPU) supporting eight regions is included.
- ARM Cortex-M3 built-in Nested Vectored Interrupt Controller (NVIC).
- Up to 512 kB on-chip flash programming memory. Enhanced flash memory accelerator enables high-speed 120 MHz operation with zero wait states.
- In-System Programming (ISP) and In-Application Programming (IAP) via on-chip bootloader software.
- On-chip SRAM includes:
 - ◆ 32/16 kB of SRAM on the CPU with local code/data bus for high-performance CPU access.



- ◆ Two/one 16 kB SRAM blocks with separate access paths for higher throughput. These SRAM blocks may be used for Ethernet, USB, and DMA memory, as well as for general purpose CPU instruction and data storage.
- Eight channel General Purpose DMA controller (GPDMA) on the AHB multilayer matrix that can be used with SSP, I²S-bus, UART, Analog-to-Digital and Digital-to-Analog converter peripherals, timer match signals, and for memory-to-memory transfers.
- Multilayer AHB matrix interconnect provides a separate bus for each AHB master. AHB masters include the CPU, General Purpose DMA controller, Ethernet MAC, and the USB interface. This interconnect provides communication with no arbitration delays.
- Split APB bus allows high throughput with few stalls between the CPU and DMA.
- Serial interfaces:
 - ◆ Ethernet MAC with RMII interface and dedicated DMA controller. (Not available on all parts, see [Table 2](#).)
 - ◆ USB 2.0 full-speed device/Host/OTG controller with dedicated DMA controller and on-chip PHY for device, Host, and OTG functions. (Not available on all parts, see [Table 2](#).)
 - ◆ Four UARTs with fractional baud rate generation, internal FIFO, and DMA support. One UART has modem control I/O and RS-485/EIA-485 support, and one UART has IrDA support.
 - ◆ CAN 2.0B controller with two channels. (Not available on all parts, see [Table 2](#).)
 - ◆ SPI controller with synchronous, serial, full duplex communication and programmable data length.
 - ◆ Two SSP controllers with FIFO and multi-protocol capabilities. The SSP interfaces can be used with the GPDMA controller.
 - ◆ Three enhanced I²C bus interfaces, one with an open-drain output supporting full I²C specification and Fast mode plus with data rates of 1 Mbit/s, two with standard port pins. Enhancements include multiple address recognition and monitor mode.
 - ◆ I²S (Inter-IC Sound) interface for digital audio input or output, with fractional rate control. The I²S-bus interface can be used with the GPDMA. The I²S-bus interface supports 3-wire and 4-wire data transmit and receive as well as master clock input/output. (Not available on all parts, see [Table 2](#).)
- Other peripherals:
 - ◆ 70 (100 pin package) General Purpose I/O (GPIO) pins with configurable pull-up/down resistors. All GPIOs support a new, configurable open-drain operating mode. The GPIO block is accessed through the AHB multilayer bus for fast access and located in memory such that it supports Cortex-M3 bit banding and use by the General Purpose DMA Controller.
 - ◆ 12-bit Analog-to-Digital Converter (ADC) with input multiplexing among eight pins, conversion rates up to 200 kHz, and multiple result registers. The 12-bit ADC can be used with the GPDMA controller.
 - ◆ 10-bit Digital-to-Analog Converter (DAC) with dedicated conversion timer and DMA support. (Not available on all parts, see [Table 2](#))
 - ◆ Four general purpose timers/counters, with a total of eight capture inputs and ten compare outputs. Each timer block has an external count input. Specific timer events can be selected to generate DMA requests.
 - ◆ One motor control PWM with support for three-phase motor control.

- ◆ Quadrature encoder interface that can monitor one external quadrature encoder.
- ◆ One standard PWM/timer block with external count input.
- ◆ RTC with a separate power domain and dedicated RTC oscillator. The RTC block includes 20 bytes of battery-powered backup registers.
- ◆ WatchDog Timer (WDT). The WDT can be clocked from the internal RC oscillator, the RTC oscillator, or the APB clock.
- ◆ ARM Cortex-M3 system tick timer, including an external clock input option.
- ◆ Repetitive interrupt timer provides programmable and repeating timed interrupts.
- ◆ Each peripheral has its own clock divider for further power savings.
- Standard JTAG test/debug interface for compatibility with existing tools. Serial Wire Debug and Serial Wire Trace Port options.
- Emulation trace module enables non-intrusive, high-speed real-time tracing of instruction execution.
- Integrated PMU (Power Management Unit) automatically adjusts internal regulators to minimize power consumption during Sleep, Deep sleep, Power-down, and Deep power-down modes.
- Four reduced power modes: Sleep, Deep-sleep, Power-down, and Deep power-down.
- Single 3.3 V power supply (2.4 V to 3.6 V).
- Four external interrupt inputs configurable as edge/level sensitive. All pins on Port 0 and Port 2 can be used as edge sensitive interrupt sources.
- Non-maskable Interrupt (NMI) input.
- Clock output function that can reflect the main oscillator clock, IRC clock, RTC clock, CPU clock, and the USB clock.
- The Wake-up Interrupt Controller (WIC) allows the CPU to automatically wake up from any priority interrupt that can occur while the clocks are stopped in deep sleep, Power-down, and Deep power-down modes.
- Processor wake-up from Power-down mode via any interrupt able to operate during Power-down mode (includes external interrupts, RTC interrupt, USB activity, Ethernet wake-up interrupt, CAN bus activity, Port 0/2 pin interrupt, and NMI).
- Brownout detect with separate threshold for interrupt and forced reset.
- Power-On Reset (POR).
- Crystal oscillator with an operating range of 1 MHz to 25 MHz.
- 4 MHz internal RC oscillator trimmed to 1 % accuracy that can optionally be used as a system clock.
- PLL allows CPU operation up to the maximum CPU rate without the need for a high-frequency crystal. May be run from the main oscillator, the internal RC oscillator, or the RTC oscillator.
- USB PLL for added flexibility.
- Code Read Protection (CRP) with different security levels.
- Unique device serial number for identification purposes.
- Available as LQFP100 (14 mm × 14 mm × 1.4 mm) and TFBGA100¹ (9 mm × 9 mm × 0.7 mm) package.

1. LPC1768/65 only.

3. Applications

- eMetering
- Lighting
- Industrial networking
- Alarm systems
- White goods
- Motor control

4. Ordering information

Table 1. Ordering information

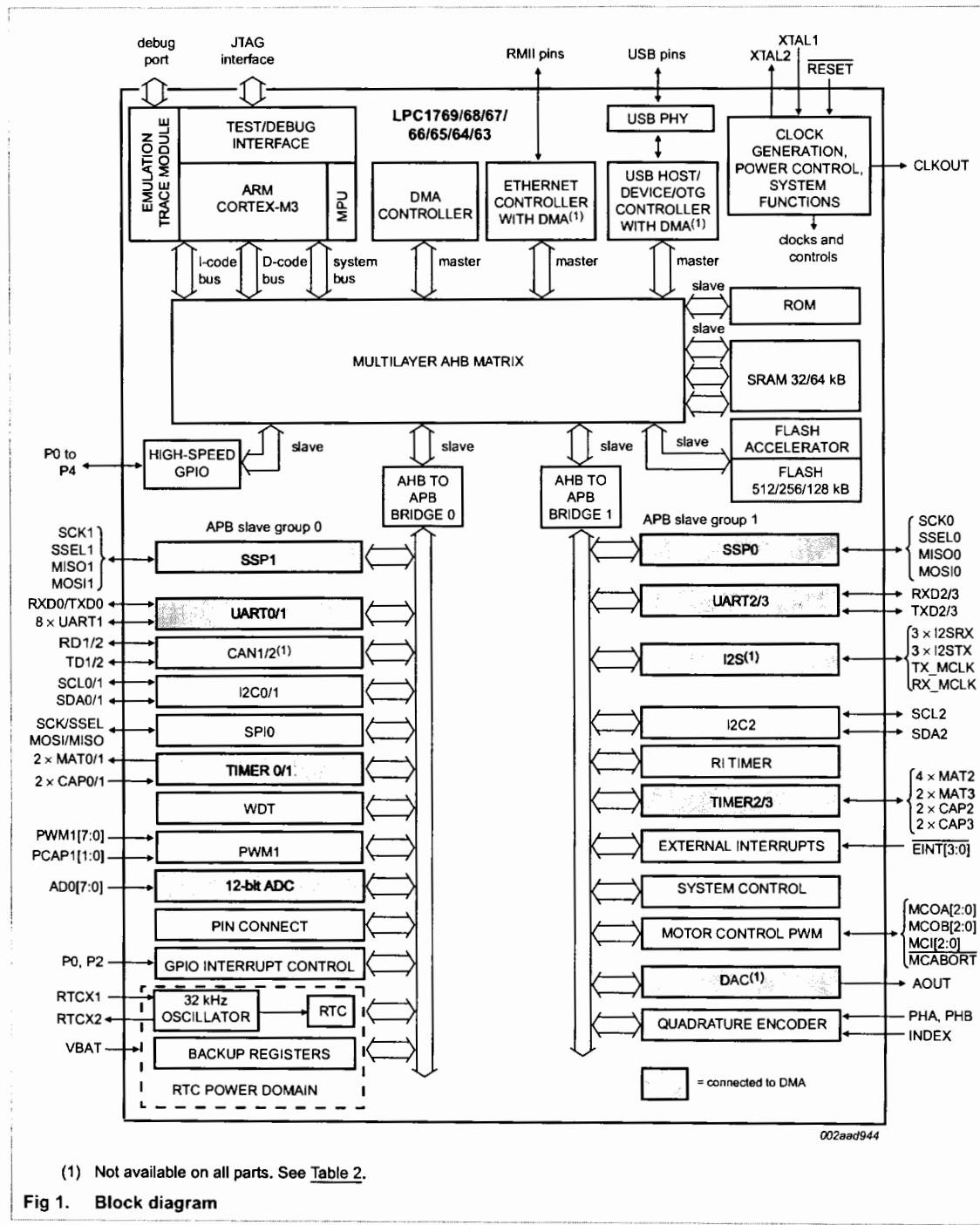
Type number	Package	Name	Description	Version
LPC1769FBD100	LQFP100		plastic low profile quad flat package; 100 leads; body 14 × 14 × 1.4 mm	SOT407-1
LPC1768FBD100	LQFP100		plastic low profile quad flat package; 100 leads; body 14 × 14 × 1.4 mm	SOT407-1
LPC1768FET100	TFBGA100		plastic thin fine-pitch ball grid array package; 100 balls; body 9 × 9 × 0.7 mm	SOT926-1
LPC1767FBD100	LQFP100		plastic low profile quad flat package; 100 leads; body 14 × 14 × 1.4 mm	SOT407-1
LPC1766FBD100	LQFP100		plastic low profile quad flat package; 100 leads; body 14 × 14 × 1.4 mm	SOT407-1
LPC1765FBD100	LQFP100		plastic low profile quad flat package; 100 leads; body 14 × 14 × 1.4 mm	SOT407-1
LPC1765FET100	TFBGA100		plastic thin fine-pitch ball grid array package; 100 balls; body 9 × 9 × 0.7 mm	SOT926-1
LPC1764FBD100	LQFP100		plastic low profile quad flat package; 100 leads; body 14 × 14 × 1.4 mm	SOT407-1
LPC1763FBD100	LQFP100		plastic low profile quad flat package; 100 leads; body 14 × 14 × 1.4 mm	SOT407-1

4.1 Ordering options

Table 2. Ordering options

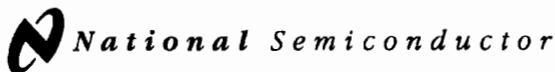
Type number	Flash	SRAM in kB			Ethernet	USB	CAN	I ² S	DAC	Maximum CPU operating frequency	
		CPU	AHB	AHB							
		SRAM0	SRAM1	Total							
LPC1769FBD100	512 kB	32	16	16	64	yes	Device/Host/OTG	2	yes	yes	120 MHz
LPC1768FBD100	512 kB	32	16	16	64	yes	Device/Host/OTG	2	yes	yes	100 MHz
LPC1768FET100	512 kB	32	16	16	64	yes	Device/Host/OTG	2	yes	yes	100 MHz
LPC1767FBD100	512 kB	32	16	16	64	yes	no	no	yes	yes	100 MHz
LPC1766FBD100	256 kB	32	16	16	64	yes	Device/Host/OTG	2	yes	yes	100 MHz
LPC1765FBD100	256 kB	32	16	16	64	no	Device/Host/OTG	2	yes	yes	100 MHz
LPC1765FET100	256 kB	32	16	16	64	no	Device/Host/OTG	2	yes	yes	100 MHz
LPC1764FBD100	128 kB	16	16	-	32	yes	Device only	2	no	no	100 MHz
LPC1763FBD100	256 kB	32	16	16	64	no	no	no	yes	yes	100 MHz

5. Block diagram



(1) Not available on all parts. See [Table 2](#).

Fig 1. Block diagram



February 1995

LF353 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier

General Description

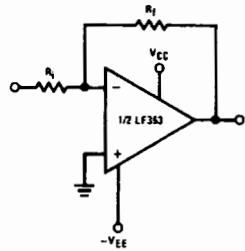
These devices are low cost, high speed, dual JFET input operational amplifiers with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF353 is pin compatible with the standard LM1558 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM1558 and LM358 designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The devices also exhibit low noise and offset voltage drift.

Features

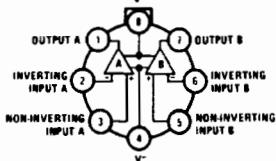
■ Internally trimmed offset voltage	10 mV
■ Low input bias current	50 pA
■ Low input noise voltage	25 nV/√Hz
■ Low input noise current	0.01 pA/√Hz
■ Wide gain bandwidth	4 MHz
■ High slew rate	13 V/μs
■ Low supply current	3.6 mA
■ High input impedance	$10^{12}\Omega$
■ Low total harmonic distortion $A_V = 10$, $R_L = 10k$, $V_O = 20V_p-p$, $BW = 20$ Hz-20 kHz	<0.02%
■ Low 1/f noise corner	50 Hz
■ Fast settling time to 0.01%	2 μs

Typical Connection

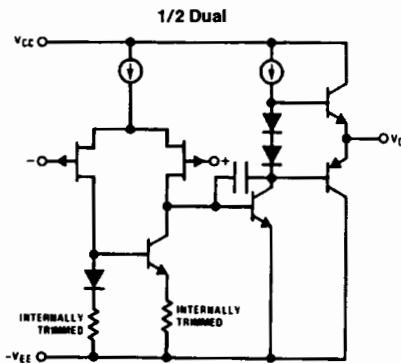


Connection Diagrams

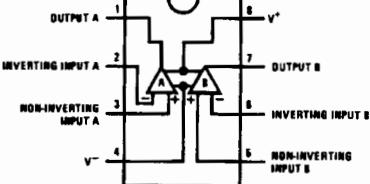
Metal Can Package (Top View)

Order Number LF353H
See NS Package Number H08A

Simplified Schematic



Dual-In-Line Package (Top View)

Order Number LF353M or LF353N
See NS Package Number M08A or N08E

BI-FET II™ is a trademark of National Semiconductor Corporation.

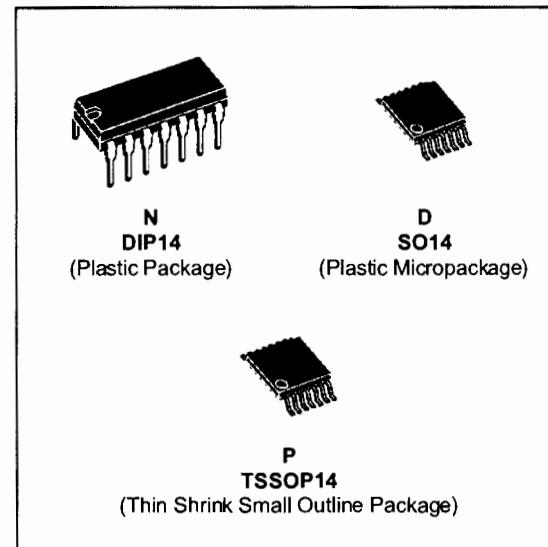
TL/H/5649-1



TL084 TL084A - TL084B

GENERAL PURPOSE J-FET QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC}^+) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : 16V/ μ s (typ)



DESCRIPTION

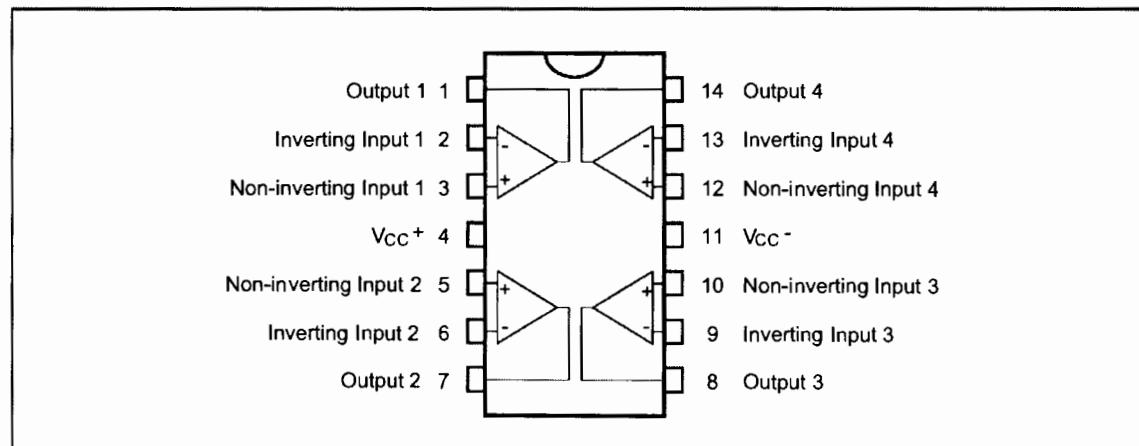
The TL084, TL084A and TL084B are high speed J-FET input quad operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

ORDER CODES

Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
TL084M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•	•
TL084I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•	•
TL084C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•	•
Examples : TL084CN, TL084CD				

PIN CONNECTIONS (top view)



1. Overview

This manual describes the operation of the XBee/XBee-PRO ZB RF module, which consists of ZigBee firmware loaded onto XBee S2 and S2B hardware, models: XBEE2, XBEEPRO2 and PRO S2B. The XBee/XBee-PRO ZB RF Modules are designed to operate within the ZigBee protocol and support the unique needs of low-cost, low-power wireless sensor networks. The modules require minimal power and provide reliable delivery of data between remote devices.

The modules operate within the ISM 2.4 GHz frequency band and are compatible with the following:



- XBee RS-232 Adapter
- XBee RS-485 Adapter
- XBee Analog I/O Adapter
- XBee Digital I/O Adapter
- XBee Sensor
- XBee USB Adapter
- XStick
- ConnectPort X Gateways
- XBee Wall Router.

The XBee/XBee-PRO ZB firmware release can be installed on XBee ZNet or ZB modules. The XBee ZB firmware is based on the EmberZNet 3.x ZigBee PRO Feature Set mesh networking stack, while the XBee ZNet 2.5 firmware is based on Ember's proprietary "designed for ZigBee" mesh stack (EmberZNet 2.5.x). ZB and ZNet 2.5 firmware are similar in nature, but not over-the-air compatible. Devices running ZNet 2.5 firmware cannot talk to devices running the ZB firmware.

What's New in 2x7x

Firmware

XBee/XBee-PRO ZB firmware includes the following new features (compared with 2x6x):

- Using Ember stack version 3.4.1.
- Support for the PRO S2B with temperature compensation and an overvoltage check. Within 15 seconds of the supply voltage exceeding 3.9V, the API will emit a 0x08 modem status (Overvoltage) message, and then the AT/API versions will do a watchdog reset.
- ZDO pass-through added. If AO=3, then ZDO requests which are not supported by the stack will be passed out the UART.
- An attempt to send an oversized packet (256+ bytes) will result in a Tx Status message with a status code of 0x74.
- End devices have two speed polling. 7.5 seconds is the slow rate, which switches to the fast rate to transact with its parent. When transactions are done, it switches back to the slow rate.
- A new receive option bit (0x40) indicates if the packet came from an end device.
- Added extended timeout option since end devices need more time than routers to ack their packets.
- An option bit (0x01) was added to disable APS retries.
- If an end device has not had its poll answered for 5 secs, it will leave and attempt to rejoin the network.
- XBee S2B has a new TP command which returns the temperature compensation sensor reading in units of Celsius degrees.
- The PP command returns the power dBm setting when PL4 is selected.
- The PO command sets the slow polling rate on end devices. Range is 1-0x1770 in units of 10 msec (10 msec to 60 sec). Default is 0 which invokes a 100 msec delay.
- Rejoining now can proceed without a NR or NRO command after a Mgmt_Leave_req is processed.
- Command ranges were changed for the SC, IR, and LT commands.
- A PAN ID corruption problem was fixed.

See the 2x7x release notes for a complete list of new features and bug fixes at www.digi.com/support.

Specifications

Specifications of the XBee®/XBee-PRO® ZB RF Module

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)	XBee-PRO (S2B)
Performance			
Indoor/Urban Range	up to 133 ft. (40 m)	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 400 ft. (120 m)	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant
Transmit Power Output	2mW (+3dBm), boost mode enabled 1.25mW (+1dBm), boost mode disabled	50mW (+17 dBm) 10mW (+10 dBm) for International variant	63mW (+18 dBm) 10mW (+10 dBm) for International variant
RF Data Rate	250,000 bps	250,000 bps	250,000 bps
Data Throughput	up to 35000 bps (see chapter 4)	up to 35000 bps (see chapter 4)	up to 35000 bps (see chapter 4)
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 bps - 1 Mbps (non-standard baud rates also supported)	1200 bps - 1 Mbps (non-standard baud rates also supported)	1200 bps - 1 Mbps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-96 dBm, boost mode enabled -95 dBm, boost mode disabled	-102 dBm	-102 dBm
Power Requirements			
Supply Voltage	2.1 - 3.6 V	3.0 - 3.4 V	2.7 - 3.6 V
Operating Current (Transmit, max output power)	40mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 35mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	295mA (@3.3 V) 170mA (@3.3 V) international variant	205mA, up to 220 mA with programmable variant (@3.3 V) 117mA, up to 132 mA with programmable variant (@3.3 V), International variant
Operating Current (Receive))	40mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 38mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	45 mA (@3.3 V)	47 mA, up to 62 mA with programmable variant (@3.3 V)
Idle Current (Receiver off)	15mA	15mA	15mA
Power-down Current	< 1 µA @ 25°C	3.5 µA typical @ 25°C	3.5 µA typical @ 25°C
General			
Operating Frequency Band	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960 x 1.297 (2.438cm x 3.294cm)	0.960 x 1.297 (2.438cm x 3.294cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip, RPSMA, or U.FL Connector	Integrated Whip, Chip, RPSMA, or U.FL Connector	Integrated Whip, PCB Embedded Trace, RPSMA, or U.FL Connector
Networking & Security			
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer, and Mesh	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer, and Mesh	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer, and Mesh
Number of Channels	16 Direct Sequence Channels	14 Direct Sequence Channels	15 Direct Sequence Channels
Channels	11 to 26	11 to 24	11 to 25
Addressing Options	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)
Agency Approvals			
United States (FCC Part 15.247)	FCC ID: OUR-XBEE2	FCC ID: MCQ-XBEEPRO2	FCC ID: MCQ-PROS2B
Industry Canada (IC)	IC: 4214A-XBEE2	IC: 1846A-XBEEPRO2	IC: 1846A-PROS2B
Europe (CE)	ETSI	ETSI (International variant)	ETSI (10 mW max)

XBee®/XBee-PRO® ZB RF Modules

Specifications of the XBee®/XBee-PRO® ZB RF Module

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)	XBee-PRO (S2B)
Australia	C-Tick	C-Tick	C-Tick
Japan	R201WW07215215	R201WW08215142 (international variant)	R201WW10215062 (international variant)
RoHS	Compliant	Compliant	Compliant

Hardware Specs for Programmable Variant

The following specifications need to be added to the current measurement of the previous table if the module has the programmable secondary processor. For example, if the secondary processor is running and constantly collecting DIO samples at a rate while having the RF portion of the XBEE sleeping the new current will be $I_{\text{total}} = I_{r2} + I_s$. Where I_{r2} is the runtime current of the secondary processor and I_s is the sleep current of the RF portion of the module of the XBEE-PRO (S2B) listed in the table below.

Specifications of the programmable secondary processor

Optional Secondary Processor Specification	These numbers add to S2B specifications (Add to RX, TX, and sleep currents depending on mode of operation)
Runtime current for 32k running at 20MHz	+14mA
Runtime current for 32k running at 1MHz	+1mA
Sleep current	+0.5uA typical
For additional specifications see Freescale Datasheet and Manual	MC9S08QE32
Minimum Reset low pulse time for EM250	+50 nS (additional resistor increases minimum time)
VREF Range	1.8VDC to VCC

Mechanical Drawings

Mechanical drawings of the XBee®/XBee-PRO® ZB RF Modules (antenna options not shown)



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ ประวัติการศึกษา	นายพดุง กิจแสรวง พ.ศ. 2529-2531 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (สาขาช่างอิเล็กทรอนิกส์) วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ.2533-2535 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (สาขาช่างอิเล็กทรอนิกส์) วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ.2537-2539 วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ.2545-2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ.2552-2555 ทุนการศึกษาจากกระทรวงวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี
ประวัติการวิจัย	พ.ศ.2552-2554 ทุนสนับสนุนการท่องเที่ยวจากกระทรวงวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี และบางส่วนจากการบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติการทำงาน	พ.ศ.2536-2542 นายช่างอิเล็กทรอนิกส์ ระดับ 5 สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ.2542-2552

ครุ ระดับ 5

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ดำเนินการและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

พ.ศ.2552-ปัจจุบัน

ผู้ปฏิบัติงานวิทยาศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ที่อยู่ปัจจุบัน

บ้านเลขที่ 118 หมู่ที่ 5 ตำบลธาตุ อําเภอวารินชำราบ

จังหวัดอุบลราชธานี 34190 โทร.089-6252030

