



การตรวจจับและการวินิจฉัยการชำรุดเสียหายล่วงหน้าของ  
มอเตอร์เหนี่ยวนำ

(An Early Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motors)

โดย

ผศ. ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์

รศ. ธนบูรณ์ ศศิภาณุเดช

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สิงหาคม 2553

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจจับและการวินิจฉัยการชำรุดเสียหายล่วงหน้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้เทคนิคการวัดกระแส และวิเคราะห์อาการเสียดของมอเตอร์จากสเปกตรัมของกระแส

มอเตอร์ที่ทำการทำทดสอบจะถูกเบรกด้วยชุดเบรกมอเตอร์ที่สร้างขึ้น โดยชุดเบรกมอเตอร์นี้มีขนาด 1.5 kW สามารถควบคุมได้ทั้งความเร็วและแรงบิด การทำงานของชุดเบรกมอเตอร์จะถูกควบคุมมาจากคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเป็นโปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นด้วย LabVIEW เมื่อมอเตอร์ถูกเบรก กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์จะถูกวัดโดยใช้ตัวตรวจกระแสและถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์และตรวจสอบสเปกตรัมของกระแส โดยโปรแกรมที่ทำงานทั้งหมดนี้ถูกเขียนด้วย LabVIEW เช่นกัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าพอที่จะสามารถจำแนกอาการเสียดของมอเตอร์ได้ทั้งชนิดการชำรุดเสียหายเนื่องจากโรเตอร์ (Rotor faults) และการชำรุดเสียหายเนื่องจากการบิดเบี้ยว (Eccentricity faults) หรือการออนไลน์มันต์ที่ไม่ถูกต้อง

## **Abstract**

An Early Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motors with current spectrum analysis is proposed.

The under test motors are braked by motor braking system. This computer controlled 1.5-kW motor braking system can be controlled either speed or torque mode. Its controlled program is written from LabVIEW. When under test motors are braked, then the motor current is measured by current sensor and send to computer for analysis the current spectrum. All of these tasks are performed by program written in LabVIEW.

It can be seen that the motor faults can be distinguished either rotor fault or Eccentricity faults.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การตรวจจับและการวินิจฉัยการชำรุดเสียหายล่วงหน้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ” นี้เป็นโครงการวิจัยของห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จากเงินงบประมาณประจำปี 2552 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรของคณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกทุกอย่างในการเอื้ออำนวยให้โครงการวิจัยนี้เป็นไปอย่างราบรื่นมา ณ ที่นี้ด้วย

ผศ. ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์

รศ. ธนบูรณ์ ศศิภานุเดช

สิงหาคม 2553

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
1. บทนำ	1
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	2
2.2 การชำรุดเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	2
2.3 NI CompactRIO	12
2.4 LabVIEW	16
3. การออกแบบ	
3.1 บทนำ	19
3.2 ฮาร์ดแวร์	19
3.2.1 ชุดเบรกมอเตอร์	19
3.2.2 แทนทดสอบมอเตอร์	19
3.3 ซอฟต์แวร์	21
4. การทดลอง	
4.1 บทนำ	23
4.2 การทดลองชุดเบรกมอเตอร์	23
4.3 การทดลองวัดกระแสในมอเตอร์ปกติ	24
4.4 การทดลองวัดกระแสในมอเตอร์ที่แบ่งตัวนำโรเตอร์ขาด 4 แ่ง	30
4.5 การทดลองวัดกระแสในมอเตอร์ที่ออนไลน์เมนต์ไม่ถูกต้อง	36
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทนำ	42
5.2 สรุปผลการทดลอง	42
5.3 ข้อเสนอแนะ	42
บรรณานุกรม	43

## สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก

หน้า

44

## สารบัญรูป

ลำดับรูป	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 1	รูปที่ 2.1 จำนวนเปอร์เซ็นต์ของการชำรุดเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	2
รูปที่ 2	รูปที่ 2.2 ตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมของกระแสและแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีความปกติ	4
รูปที่ 3	รูปที่ 2.3 ตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมของกระแสและแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ตัวเดียวกัน แต่โรเตอร์มีอาการชำรุดของแท่งโลหะ 2 แท่ง	4
รูปที่ 4	รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแบร็ริง	5
รูปที่ 5	รูปที่ 2.5 การชำรุดเสียหายของแบร็ริงทั้งสองแบบ	6
รูปที่ 6	รูปที่ 2.6 ผลการทดลองวัดสเปกตรัมการสั่นของมอเตอร์ที่มีรางในของแบร็ริงชำรุดเสียหาย (เส้นขีด) เทียบกับมอเตอร์ที่ปกติ (เส้นทึบ) ในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด	7
รูปที่ 7	รูปที่ 2.7 ผลการทดลองวัดสเปกตรัมแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ที่มีรางในของแบร็ริงชำรุดเสียหาย (เส้นขีด) เทียบกับมอเตอร์ที่ปกติ (เส้นทึบ) ในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด	7
รูปที่ 8	รูปที่ 2.8 ผลการทดลองวัดสเปกตรัมแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ที่มีแบร็ริงเสียหาย (เส้นขีด) ในแง่ของความเป็นจริงเทียบกับมอเตอร์ที่ปกติ (เส้นทึบ) ในเงื่อนไขที่มีโหลด	8
รูปที่ 9	รูปที่ 2.9 การเบี่ยงของช่องว่างอากาศทั้งสองแบบ	9
รูปที่ 10	รูปที่ 2.10 ตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมกระแสของมอเตอร์ปกติ (ก) เมื่อเทียบกับมอเตอร์ที่มีการบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศ (ข)	10
รูปที่ 11	รูปที่ 2.11 ตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมกระแสของมอเตอร์ที่ปกติกับมอเตอร์ที่มีการชำรุดเสียหายจากลัดวงจรระหว่างรอบในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด	12
รูปที่ 12	รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมกระแสของมอเตอร์ที่ปกติกับมอเตอร์ที่มีการชำรุดเสียหายจากลัดวงจรระหว่างรอบในเงื่อนไขโหลดเต็มที่	12
รูปที่ 13	รูปที่ 2.13 สถาปัตยกรรมของ CompactRIO	12
รูปที่ 14	รูปที่ 2.14 ตัวประมวลผลแบบเวลาดิจิทัลรุ่น 9004	13
รูปที่ 15	รูปที่ 2.15 แซสซีฟ FPGA ขนาด 3 ล้านเกต รุ่น 9104	14
รูปที่ 16	รูปที่ 2.16 โมดูลอินพุตแบบแอนะล็อก รุ่น 9201	14
รูปที่ 17	รูปที่ 2.17 โมดูลเอาต์พุตแบบแอนะล็อก รุ่น 9263	15
รูปที่ 18	รูปที่ 2.18 โมดูลอินพุตแบบดิจิทัล รุ่น 9423	15
รูปที่ 19	รูปที่ 2.18 โมดูลเอาต์พุตแบบดิจิทัล รุ่น 9474	16
รูปที่ 20	รูปที่ 2.19 แสดงส่วนประกอบต่างๆใน LabVIEW	18

สารบัญรูป (ต่อ)

ลำดับรูป	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 21	รูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการเบรกมอเตอร์	19
รูปที่ 22	รูปที่ 3.2 แทนทดสอบมอเตอร์	20
รูปที่ 23	รูปที่ 3.3 วงจรอินเวอร์เตอร์และแทนทดสอบมอเตอร์	20
รูปที่ 24	รูปที่ 3.4 โปรแกรมที่ใช้ในการรับและวิเคราะห์กระแส	21
รูปที่ 25	รูปที่ 3.5 โปรแกรมที่ใช้ในหาค่าความถี่ฮาร์มอนิก	22
รูปที่ 26	รูปที่ 4.1 ภาพหน้าจอควบคุมที่คอมพิวเตอร์ขณะยังไม่จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่เบรกมอเตอร์	23
รูปที่ 27	รูปที่ 4.2 ภาพหน้าจอควบคุมที่คอมพิวเตอร์ขณะเบรกด้วยความเร็ว 1,370 rpm	24
รูปที่ 28	รูปที่ 4.3 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (10 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1492.0 rpm	24
รูปที่ 29	รูปที่ 4.4 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (100 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1492.0 rpm	25
รูปที่ 30	รูปที่ 4.5 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)	25
รูปที่ 31	รูปที่ 4.6 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็มที่ (10 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1400.0 rpm	26
รูปที่ 32	รูปที่ 4.7 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็มที่ (100 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1400.0 rpm	26
รูปที่ 33	รูปที่ 4.8 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)	27
รูปที่ 34	รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ No-load จากโปรแกรม LabVIEW	28
รูปที่ 35	รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ Fullload จากโปรแกรม LabVIEW	29
รูปที่ 36	รูปที่ 4.11 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (10 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1492.4 rpm	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

ลำดับรูป	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 37	รูปที่ 4.12 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขไร้อโหลด (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)	30
รูปที่ 38	รูปที่ 4.13 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็มที่ (10 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1398.5 rpm	31
รูปที่ 39	รูปที่ 4.14 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็มที่ (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)	31
รูปที่ 40	รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LabVIEW แสดงให้เห็นว่าจะเกิดฮาร์มอนิกที่ 56.67 Hz และ 42.23 Hz	32
รูปที่ 41	รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ No-load จากโปรแกรม LabVIEW	33
รูปที่ 42	รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ Full load จากโปรแกรม LabVIEW	34
รูปที่ 43	รูปที่ 4.18 รูปขยายผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ No-load จากโปรแกรม LabVIEW	35
รูปที่ 44	รูปที่ 4.19 รูปขยายผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ Full load จากโปรแกรม LabVIEW	35
รูปที่ 45	รูปที่ 4.20 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขไร้อโหลด (100 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1492.8 rpm	36
รูปที่ 46	รูปที่ 4.21 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขไร้อโหลด (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)	36
รูปที่ 47	รูปที่ 4.22 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็มที่ (100 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1404.7 rpm	37
รูปที่ 48	รูปที่ 4.23 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็มที่ (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)	37
รูปที่ 49	รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LabVIEW แสดงให้เห็นว่าจะเกิดฮาร์มอนิกที่ 563.33 Hz, 663.33Hz ...	38
รูปที่ 50	รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ No-load จากโปรแกรม LabVIEW	39

สารบัญรูป (ต่อ)

ลำดับรูป	ชื่อรูป	หน้า
รูปที่ 51	รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์สเปคตรัมขณะ Full load จาก โปรแกรม LabVIEW	40
รูปที่ 52	รูปที่ 4.27 ภาพขณะทำการทดลองวัดกระแส	41
รูปที่ 53	รูปที่ 4.28 ภาพขณะทำการทดลองเปลี่ยนมอเตอร์	41

## บทที่ 1

### บทนำ

ถึงวันนี้แล้ว ไม่มีใครปฏิเสธว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ขับเคลื่อนอุตสาหกรรมให้ก้าวไปข้างหน้าอย่างไม่หยุดยั้ง นั่นเป็นเพราะข้อดีหลายๆประการของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทุกคนยอมรับ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของราคาที่ถูก, โครงสร้างที่แข็งแรง, การดูแลรักษาที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม การเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำก็เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เลย และแน่นอนว่าการเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่อการผลิตไม่มากก็น้อยอันเนื่องมาจากการหยุดสายการผลิต ดังนั้นคงจะเป็นการดีหากเราสามารถทราบถึงอาการชำรุดเพื่อคาดการณ์การชำรุดเสียหายของมอเตอร์แบบล่วงหน้า เพื่อที่จะได้วางแผนป้องกันเหตุที่จะเกิดขึ้นได้ในอนาคต

โครงการนี้จะมุ่งวิจัยถึงวิธีตรวจสอบอาการเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำล่วงหน้าโดยใช้เทคนิคการวัดกระแส โดยมุ่งหวังที่จะใช้ผลการวิจัยเพื่อนำไปใช้ในการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน อันจะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในอุตสาหกรรมการผลิต เพราะจะทำให้การผลิตไม่เกิดการหยุดชะงักเนื่องมาจากมอเตอร์ชำรุดเสียหาย

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

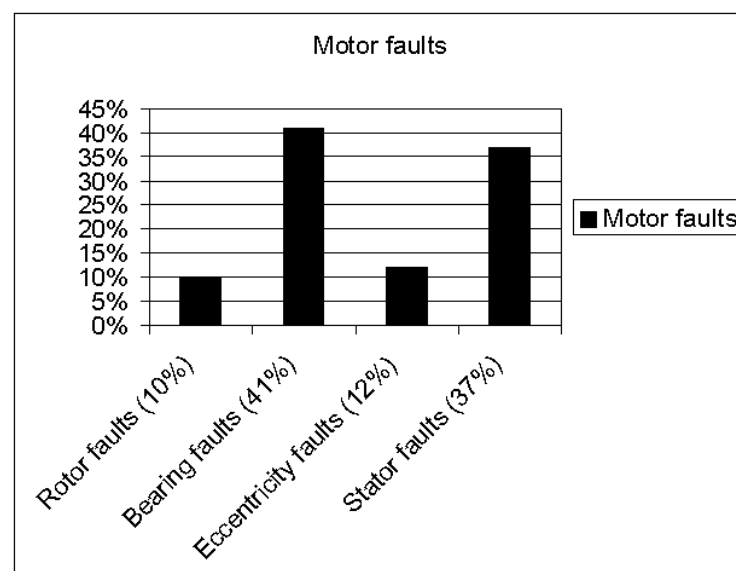
ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจรเรียงกระแสสามเฟสพีดับเบิลยูเอ็มหรือวงจรแปลงผันไฟสลับ-ไฟตรง, ทรานซิสเตอร์ IGBT , การขับนำทรานซิสเตอร์ IGBT, ตัวควบคุมแบบ FPGA และโปรแกรม LabVIEW ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้

### 2.2 การชำรุดเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [1]

ได้มีการวิจัยเรื่องการชำรุดเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และสรุปการเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำออกเป็น 4 ประเภทดังต่อไปนี้

1. การชำรุดเสียหายเนื่องจากโรเตอร์ (Rotor faults)
2. การชำรุดเสียหายเนื่องจากแบร์ริง (Bearing faults)
3. การชำรุดเสียหายเนื่องจากการบิดเบี้ยว (Eccentricity faults)
4. การชำรุดเสียหายเนื่องจากสเตเตอร์ (Stator faults)

และได้มีการประมาณจำนวนเปอร์เซ็นต์การชำรุดเสียหายดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงถึงจำนวนเปอร์เซ็นต์ของการชำรุดเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

#### 2.2.1 การชำรุดเสียหายเนื่องจากโรเตอร์ (Rotor faults)

การชำรุดเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำเนื่องจากโรเตอร์เกิดขึ้นจากการที่แท่งตัวนำของโรเตอร์ (Rotor bars) หรือตัวนำรูปวงแหวน (End ring) ของโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel cage rotors) เกิดชำรุดเสียหายในลักษณะหักหรือขาด ซึ่งเราเรียกว่า Broken bar ซึ่งการชำรุดเสียหายนี้มีสาเหตุเกิดจาก

1. ความเค้นอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนเพราะการทำงานเกินพิกัด, ความร้อนเฉพาะจุด หรือ การสูญเสียที่สูงเกิน
2. ความเค้นแม่เหล็ก เนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force), การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic noise), และการสั่นสะเทือน
3. ความเค้นตกค้าง (Residual stresses) เนื่องจากปัญหาการผลิต
4. ความเค้นไดนามิก เนื่องจากแรงบิดของเพลา, แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง
5. ความเค้นสภาวะแวดล้อม เนื่องจากการเปื้อนประะหรือสึกหรออันเนื่องมาจากเคมีหรือความชื้น
6. ความเค้นทางกล เนื่องมาจากชิ้นส่วนที่ล้า, ลูกปืนเสียหาย

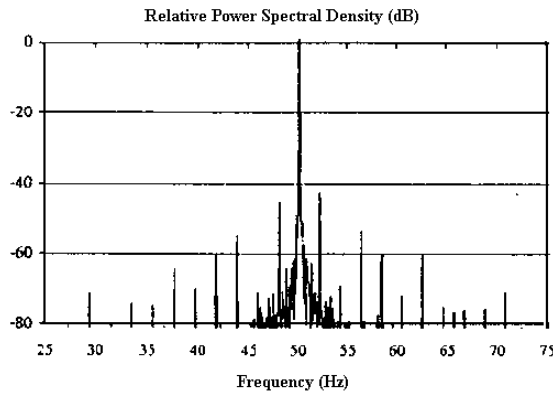
การชำรุดเนื่องจากโรเตอร์นั้นสามารถสังเกตได้จากกระแสไลน์ที่ไหลเข้ามอเตอร์ โดยถ้าหากเราทำการตรวจวัดด้วยวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแสมอเตอร์ เราจะได้ไซด์แบนด์(Sideband) ของกระแสรอบๆค่าองค์ประกอบหลักมูล(Fundamental) ที่แสดงได้ด้วยสมการ

$$f_{rotor} = (1 \pm 2s) f_s \quad (1)$$

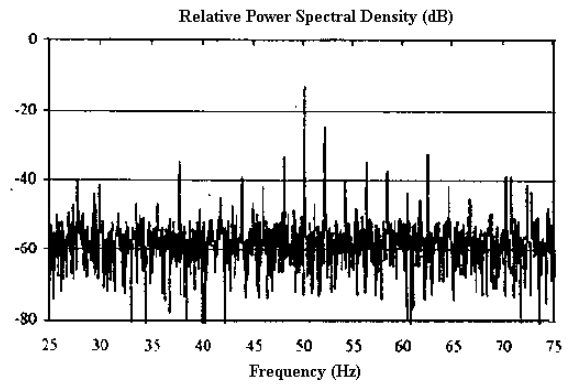
เมื่อ  $f_s$  = ความถี่ของแหล่งจ่าย,  $s$  = สลิปของมอเตอร์

ไซด์แบนด์ด้านล่าง(Lower sideband) มีผลมาจากการชำรุดของแท่งโลหะของโรเตอร์ โดยเฉพาะ (แทนเครื่องหมาย - ในสมการที่ 1) และไซด์แบนด์ด้านบน (Upper sideband) จะเป็นผลเนื่องมาจากการออสซิลเลตของความเร็วหรือ Rotor speed oscillations (แทนเครื่องหมาย + ในสมการที่ 1)

รูปที่ 2.2 และ 2.3 แสดงผลการวัดผลการวัดสเปกตรัมของกระแสและแรงดันของมอเตอร์ที่มีความปกติ และมอเตอร์ที่มีความผิดปกติจากการที่มีแท่งโลหะของโรเตอร์ชำรุดเสียหายจำนวน 2 แท่งตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดการชำรุดเสียหายที่โรเตอร์จะทำให้ไซด์แบนด์ของสเปกตรัมของกระแสและแรงดันมีค่าสูงเกินกว่าปกติ และจะมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงขึ้นไปเรื่อยๆหากเกิดการชำรุดเสียหายมากขึ้น (มีจำนวนแท่งที่ชำรุดเสียหายมากขึ้น)

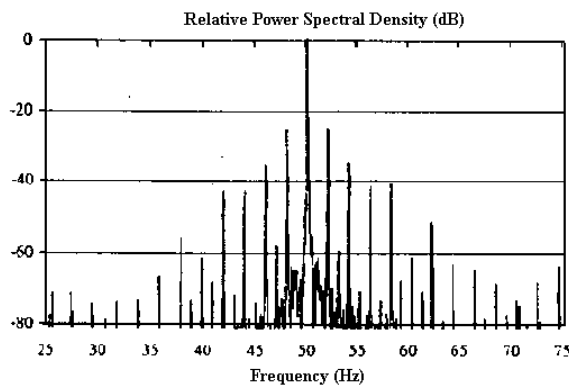


(ก) สเปกตรัมของกระแส

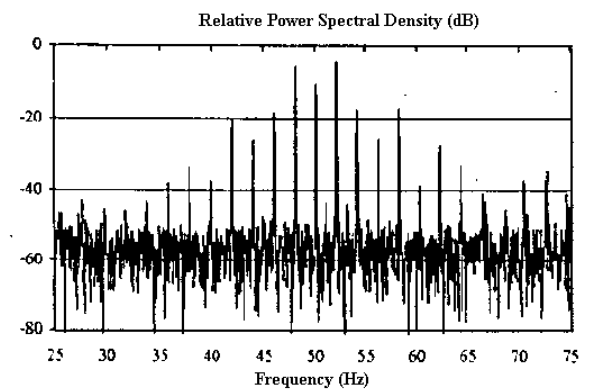


(ข) สเปกตรัมของแรงดัน

รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมของกระแสและแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มี  
ความปกติ



(ก) สเปกตรัมของกระแส



(ข) สเปกตรัมของแรงดัน

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมของกระแสและแรงดันของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ตัว  
เดียวกัน แต่โรเตอร์มีอาการชำรุดของแท่งโลหะ 2 แท่ง

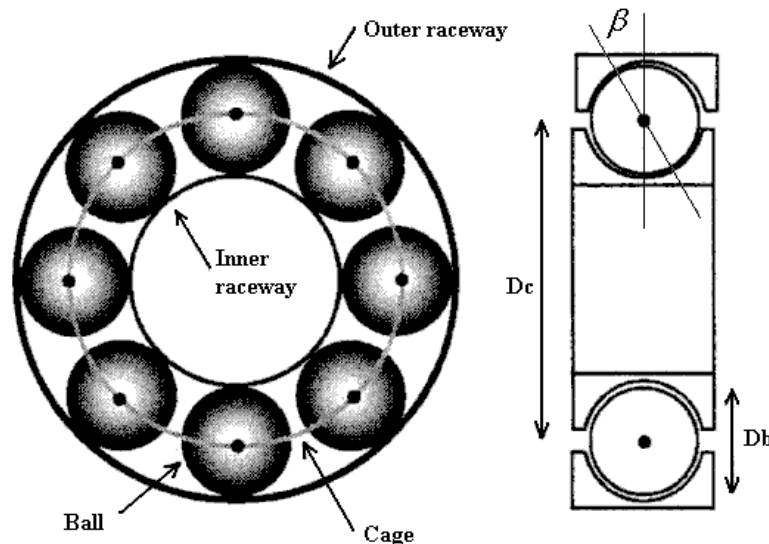
### 2.2.2 การชำรุดเสียหายเนื่องจากแบร์ริง (Bearing faults)

เครื่องจักรกลส่วนใหญ่จะใช้แบร์ริงเพื่อรองรับชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวได้ แบร์ริงจะประกอบไปด้วยปลอกหรือรางด้านใน (Inner raceway), ปลอกหรือรางด้านนอก (Outer raceway) และจะมีลูกปืน (Ball) อยู่ระหว่างสองแหวนนี้ ภายใต้ภาวะการทำงานปกติ แม้ว่ามอเตอร์นั้นจะมีการออกแบบที่ดีและโหลดมีความสมดุลเพียงใดก็ตาม แต่ก็อาจเกิดความผิดพลาดชำรุดเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าของแบร์ริงได้ นอกจากนี้การชำรุดของแบร์ริงยังอาจเกิดมาจากการที่ใช้อินเวอร์เตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำก็ได้ ผลที่ตามมาคืออาจเกิดการเสียหาย, ลูกปืนเกิดแตกสะเก็ดเล็กๆได้ และ

มันจะเป็นสาเหตุให้เกิดการสั่นและเสียงรบกวน หากแบริ่งไม่ได้รับการหล่อลื่นที่เพียงพอและ/หรือได้รับการติดตั้งอย่างไม่ถูกต้อง (Misalignment) ก็จะทำให้เกิดปัญหานี้ยิ่งมากขึ้น

การเสียหายของแบริ่งอาจจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. รานนอกของแบริ่งชำรุดเสียหาย (Outer raceway defect)
2. รานในของแบริ่งชำรุดเสียหาย (Inner raceway defect)
3. ลูกปืนของแบริ่งชำรุดเสียหาย (Ball defect)



รูปที่ 2.4 แสดงถึงโครงสร้างของแบริ่ง

ความถี่การสั่นเนื่องจากการชำรุดเสียหายทั้ง 3 ประเภทแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

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

(2)

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

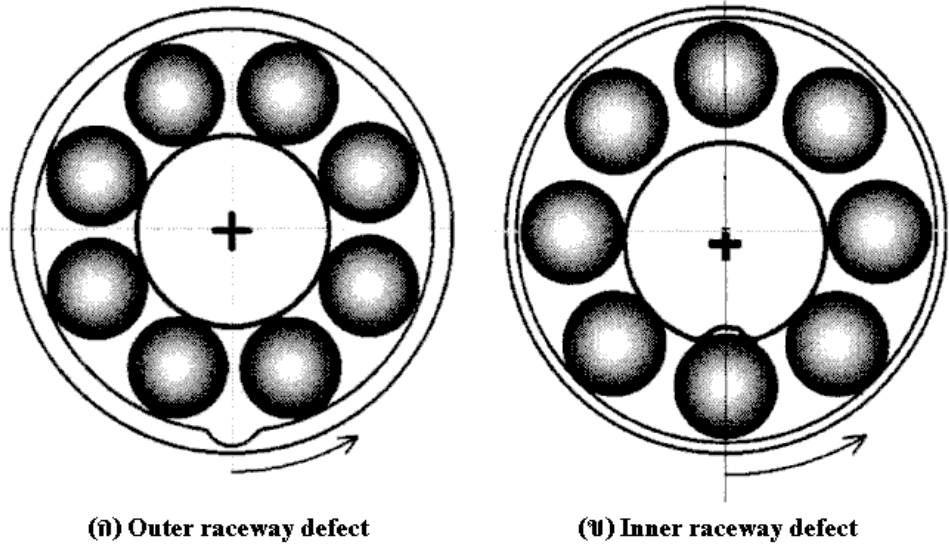
(3)

$$f_b = \frac{D_c}{D_b} f_r \left( 1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2(\beta) \right) \quad \text{สำหรับกรณีลูกปืนแบริ่งชำรุดเสียหาย}$$

(4)

เมื่อ  $f_r$  คือความถี่การหมุนของโรเตอร์,  $N_b$  คือจำนวนของลูกปืน,  $D_b$  และ  $D_c$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและเส้นผ่านศูนย์กลางพิตซ์ของลูกปืนตามลำดับ และ  $\beta$  คือมุมสัมผัสของลูกปืนกับราง

รูปที่ 2.5 แสดงถึงการเสียหายในกรณีรางนอกและรางในของแบริ่งชำรุดเสียหาย



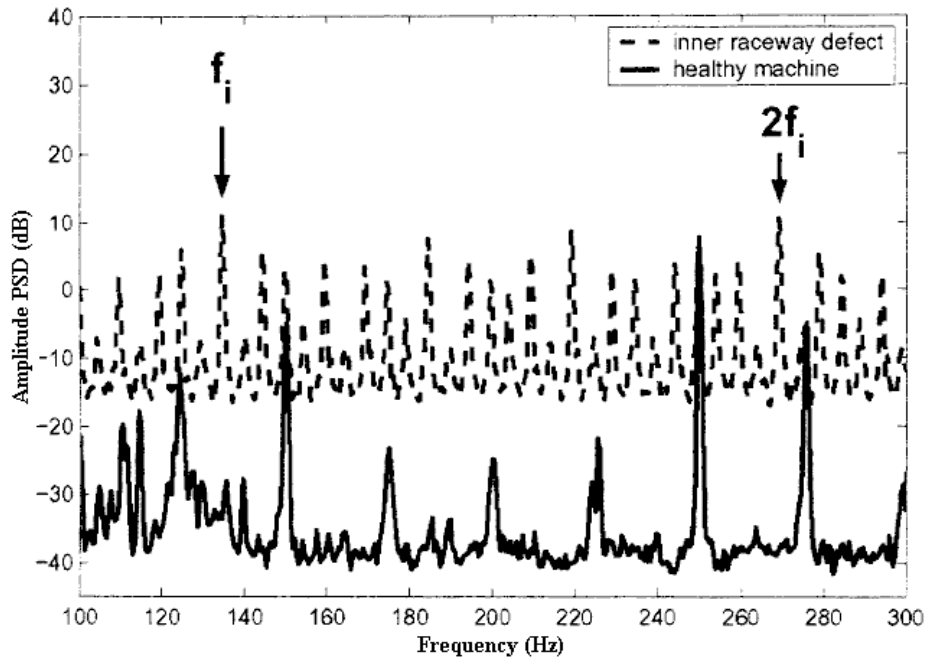
รูปที่ 2.5 แสดงถึงการชำรุดเสียหายของแบริ่งทั้งสองแบบ

การสั่นของแบริ่งนี้ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศ (Air gap flux) ที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีผลกระทบไปถึงกระแสเตเตอร์, แรงบิด ซึ่งการสั่นนี้ทำให้เกิดกระแสเตเตอร์ที่ความถี่ที่สามารถคาดเดาได้และแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

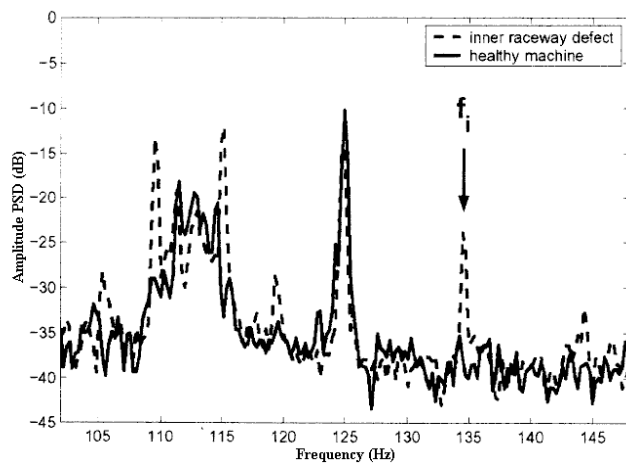
$$f_{bearing} = [f_s \pm kf_c]$$

(5)

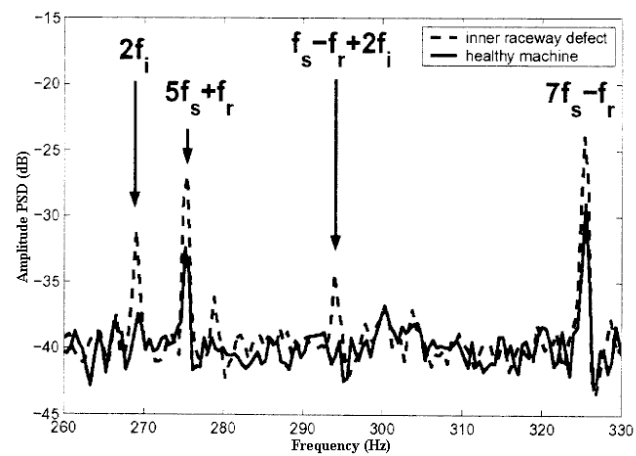
เมื่อ  $k = 1, 2, 3 \dots$  และ  $f_c$  คือคุณสมบัติความถี่การสั่นที่คำนวณจากขนาดแบริ่งโดยคำนวณได้จากสมการที่ (2), (3), หรือ (4)



รูปที่ 2.6 แสดงผลการทดลองวัดสเปกตรัมการสั่นของมอเตอร์ที่มีรางในของแบร์ริงชำรุดเสียหาย (เส้นขีด) เทียบกับมอเตอร์ที่ปกติ (เส้นทึบ) ในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด



(ก) สเปกตรัมของแรงบิด

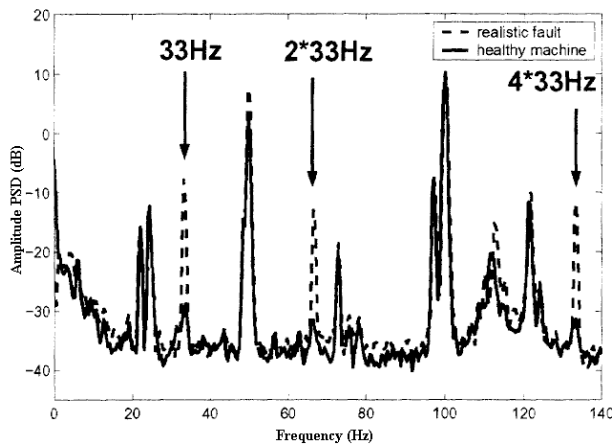


(ข) สเปกตรัมของกระแส

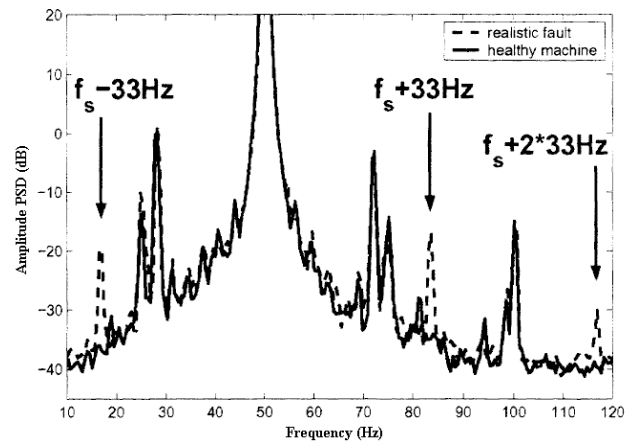
รูปที่ 2.7 แสดงผลการทดลองวัดสเปกตรัมแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ที่มีรางในของแบร์ริงชำรุดเสียหาย (เส้นขีด) เทียบกับมอเตอร์ที่ปกติ (เส้นทึบ) ในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด

รูปที่ 2.6, 2.7 แสดงผลการวัดสเปกตรัมของการสั่น, แรงบิด, และกระแส ของมอเตอร์ที่มีรางในของลูกปืนเสียหายในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลดเทียบกับมอเตอร์ที่ปกติ โดยสมมุติให้  $\beta$  มีค่าประมาณเท่ากับ 0 และมอเตอร์หมุนที่ความถี่ ( $f_r$ ) 24.96 Hz และคำนวณความถี่การสั่น  $f_i$  ได้เท่ากับ 135 Hz

ในรูปที่ 2.7 จะสังเกตเห็นว่าผลการวัดที่มอเตอร์ปกติจะมีองค์ประกอบที่ความถี่  $5f_s + f_r$  และ  $7f_s + f_r$  อันเนื่องมาจาก Dynamic air-gap eccentricity ที่เกิดขึ้นมาอยู่ก่อนแล้ว (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อถัดไป) และเมื่อเกิดการชำรุดเสียหายเนื่องจากแบร็ริงจะยิ่งทำให้้องค์ประกอบเหล่านี้เพิ่มมากขึ้น และนอกจากนั้นยังทำให้เกิดองค์ประกอบที่  $f_s - f_r + 2f_i$  เพิ่มขึ้นมาอีกด้วย (ตามสมการที่ 5)



(ก) สเปกตรัมของแรงบิด



(ข) สเปกตรัมของกระแส

รูปที่ 2.8 แสดงผลการทดลองวัดสเปกตรัมแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ที่มีแบร็ริงเสียหาย (เส้นจีด) ในแง่ของความเป็นจริงเทียบกับมอเตอร์ที่ปกติ (เส้นทึบ) ในเงื่อนไขที่มีโหลด

รูปที่ 2.8 แสดงผลการวัดสเปกตรัมของแรงบิดและกระแสของมอเตอร์ที่มีแบร็ริงชำรุดเสียหาย (เส้นจีด) ในแง่ของความเป็นจริงในเงื่อนไขที่มีโหลดเทียบกับมอเตอร์ที่ปกติ (เส้นทึบ) จากผลการวัดสเปกตรัมของแรงบิดตัวอย่างรูปที่ 2.8 (ก) จะเห็นได้ว่าเกิดค่าพิกที่ 33 Hz และที่ค่า  $k*33\text{Hz}$  ในขณะที่ผลการวัดสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 2.8 (ข) จะเกิดผลกระทบมาจากแรงบิดในรูปที่ 2.8 (ก) โดยจะเกิดไซด์แบนที่  $50 \pm k*33\text{Hz}$  (จากสมการที่ 5)

### 2.2.3 การชำรุดเสียหายที่เกิดจากการบิดเบี้ยว (Eccentricity faults)

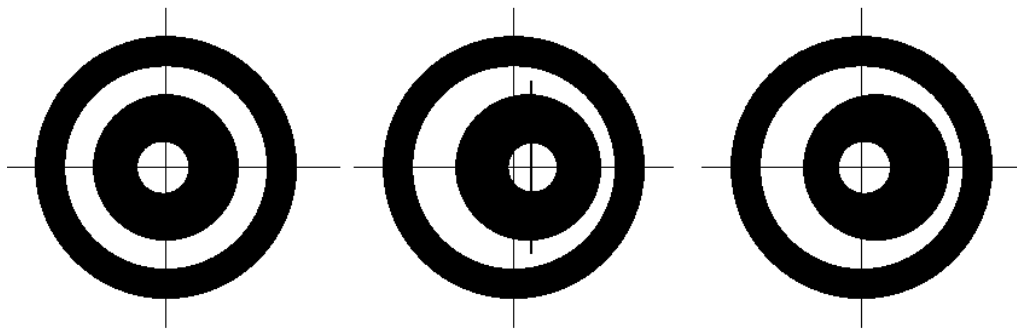
การชำรุดเสียหายนี้เกิดขึ้นจากช่องว่างอากาศ (Air gap) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ไม่เท่ากันหรือไม่สม่ำเสมอ ซึ่งถ้าหากมีความต่างกันมากๆ จะมีผลทำให้เกิดแรงในแนวรัศมี ที่เรียกว่า Unbalance Magnetic Pull (UMP) และทำให้โรเตอร์เสียดสีกับสเตเตอร์ได้

การเบี้ยวของช่องว่างอากาศมีสองชนิดคือ

1. การบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศแบบสถิตย์ (Static air-gap eccentricity)
2. การบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศแบบไดนามิก (Dynamic air-gap eccentricity)

การบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศแบบสแตติกนั้นเกิดจากการที่โถงไม่ถูกต้องหรือตำแหน่งของโรเตอร์และสเตเตอร์ไม่ถูกต้อง หรือสเตเตอร์มีรูปร่างทรงรี โดยขนาดของความเบี้ยวจะมีขนาดคงที่

การบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศแบบไดนามิกนั้นเกิดจากการที่จุดศูนย์กลางของโรเตอร์ไม่ตรงกับจุดศูนย์กลางของสเตเตอร์ ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากแกนโรเตอร์คดงอ, แบร์ริงสึกหรอ, เกิดการเรโซแนนซ์ทางกลที่ความเร็ววิกฤติ เป็นต้น



(ก) Centric rotor (ข) Static eccentricity (ค) Dynamic eccentricity

รูปที่ 2.9 แสดงการเบี้ยวของช่องว่างอากาศทั้งสองแบบ

ในความเป็นจริงการเบี้ยวของช่องว่างอากาศจะเกิดขึ้นจากทั้งสองสาเหตุรวมกัน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกของ สนามแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ โดยสามารถแสดงสมการขององค์ประกอบความถี่ที่เกิดจากการเบี้ยวของช่องว่างอากาศที่เรียกว่า Rotor Slot Harmonics (RSH) ได้ดังนี้

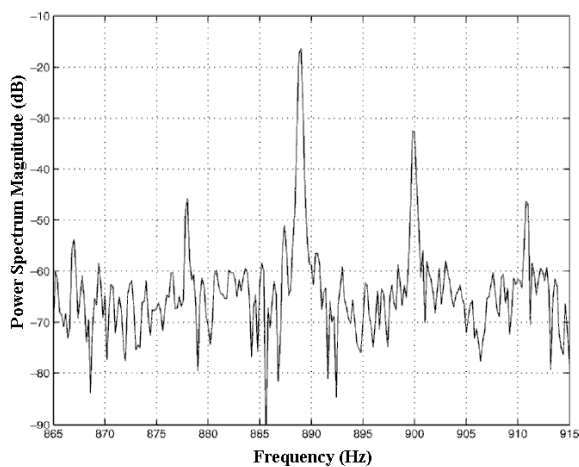
$$f_{ecc} = f_s \left( (kR \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm n_{ws} \right) \quad (6)$$

เมื่อ  $n_d = 0$  ในกรณีของการบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศแบบสแตติก และ  $= 1, 2, 3 \dots$  ในกรณีของการบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศแบบไดนามิก,  $R =$  จำนวนสลิตของโรเตอร์,  $p =$  จำนวนโพล,  $k =$  จำนวนเต็ม  $1, 2, 3 \dots$  และ  $n_{ws} =$  ค่าอันดับฮาร์มอนิกของ MMF ของสเตเตอร์  $= 1, 3, 5 \dots$

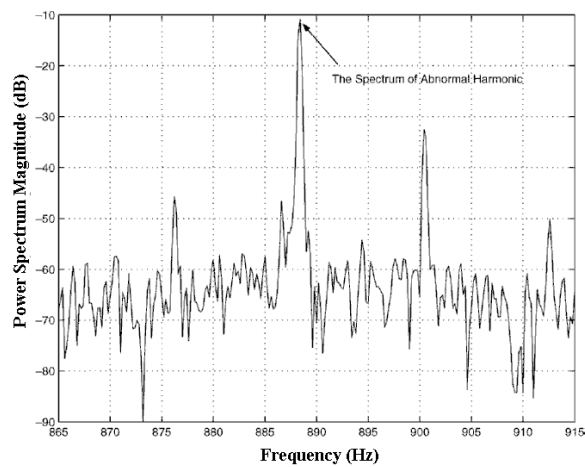
RSH สามารถตรวจจับได้จากการสังเกตกระแสสเตเตอร์เช่นกัน ในกรณีของการบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศแบบไดนามิกจะสามารถเขียนสมการในรูปแบบง่ายๆ ได้ดังนี้

$$f_{RSH} = Rf_r \pm n_{ws} f_s \quad (7)$$

จากสมการจะสังเกตได้ว่า RSH จะปรากฏถึงความถี่สูงเท่านั้น



(ก) มอเตอร์ปกติ



(ข) มอเตอร์ที่ชำรุด

รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมกระแสของมอเตอร์ปกติ (ก) เมื่อเทียบกับมอเตอร์ที่มีการบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศ (ข)

จากตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมของกระแสในรูปที่ 2.10 จะสังเกตได้ถึงผลของการบิดเบี้ยวของช่องว่างอากาศ โดยผลนี้จะปรากฏไปยังสเปกตรัมของกระแสที่ความถี่ 888 Hz

#### 2.2.4 การชำรุดเสียหายเนื่องจากสเตเตอร์ (Stator faults)

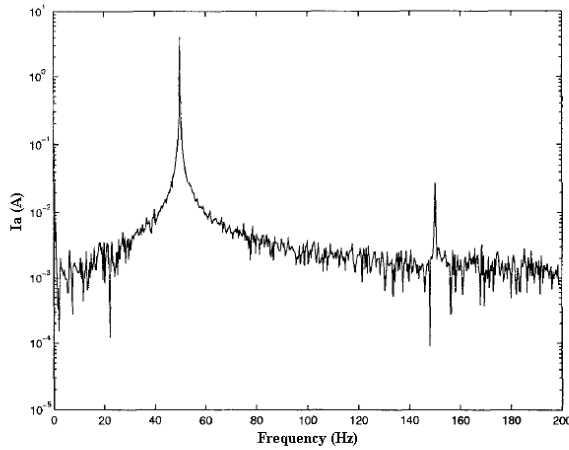
การเสียหายของมอเตอร์อันเนื่องมาจากสเตเตอร์ก็เป็นปัญหาใหญ่อีกปัญหาหนึ่งเช่นกัน โดยที่ปัญหานี้ส่วนใหญ่มักจะเกิดมาจากฉนวนที่เสื่อมสภาพที่เรียกว่าการลัดวงจรเฟสสู่กราวนด์ (Phase-to-ground faults) หรือ การลัดวงจรเฟสสู่เฟส (Phase-to-phase faults) และปัญหานี้เป็นที่เชื่อกันว่าเริ่มมาจากการที่ฉนวนลัดวงจรระหว่างรอบ (Turn-to-turn หรือ Interturn) ที่ไม่สามารถจะตรวจสอบได้โดยง่าย และที่ลุกลามไปเป็นปัญหาใหญ่ในที่สุด โดยมันสามารถแบ่งการชำรุดเสียหายออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

1. การลัดวงจรภายในขดลวดแบบระหว่างรอบ (Turn-to-turn หรือ Interturn)
2. การลัดวงจรระหว่างขดลวดในเฟสเดียวกัน
3. การลัดวงจรระหว่างเฟส
4. การลัดวงจรเฟสสู่กราวนด์
5. การเปิดวงจรในเฟส

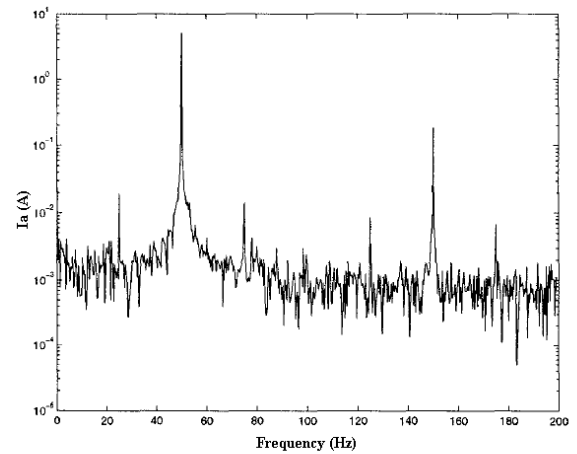
ความถี่ขององค์ประกอบฟลักซ์แม่เหล็กในแนวแกนหาได้จาก

$$f_{stator} = \left( k \pm n \frac{(1-s)}{p} \right) f_s \quad (8)$$

โดย  $k$  = จำนวนเต็ม 1, 3, 5... และ  $n = 1, 2, 3, \dots, (2p-1)$

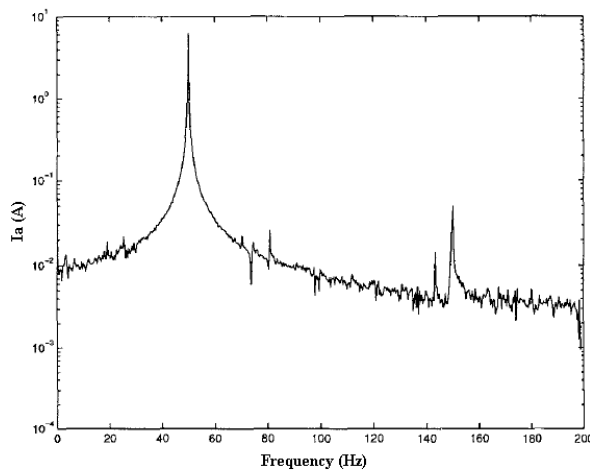


(ก) มอเตอร์ปกติ

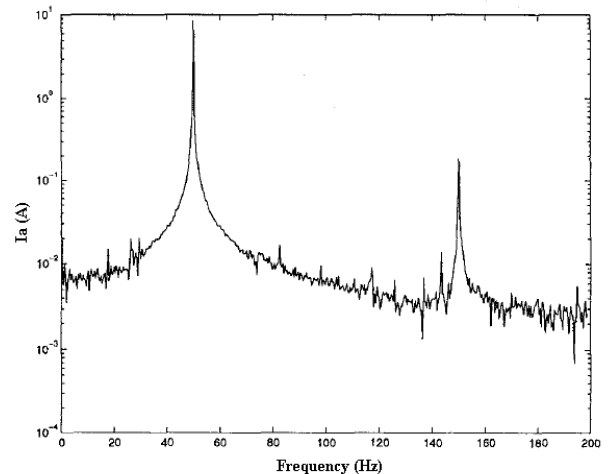


(ข) มอเตอร์ที่มีการชำรุดจากการลัดวงจรระหว่างรอบ

รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมกระแสของมอเตอร์ที่ปกติกับมอเตอร์ที่มีการชำรุดเสียหายจากลัดวงจรระหว่างรอบในเงื่อนไขที่ไม่มีโหลด



(ก) มอเตอร์ปกติ



(ข) มอเตอร์ที่มีการชำรุดจากการลัดวงจรระหว่างรอบ

รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมกระแสของมอเตอร์ที่ปกติกับมอเตอร์ที่มีการชำรุดเสียหายจากลัดวงจรระหว่างรอบในเงื่อนไขโหลดเต็ม

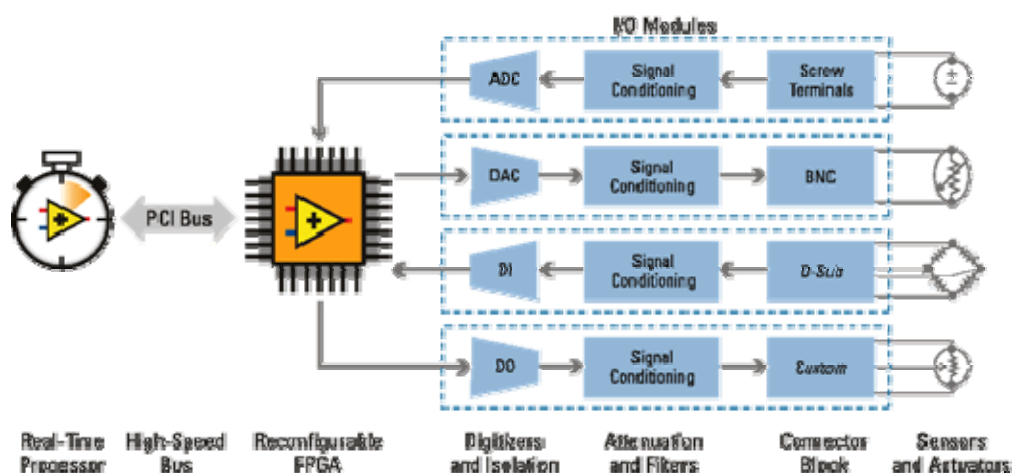
จากรูปที่ 2.11 สังเกตได้ว่ามีองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ความถี่ 25Hz, 75Hz, 125Hz, 175Hz ซึ่งเมื่อเกิดการชำรุดเสียหายจากลัดวงจรระหว่างรอบของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ ก็จะทำให้มีองค์ประกอบเหล่านี้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (ฮาร์มอนิกอันดับที่สามคือที่ 150Hz ก็เพิ่มด้วยเช่นเดียวกัน) ในขณะที่ที่เงื่อนไขโหลดเต็ม (รูปที่ 2.12) จะเห็นว่าฮาร์มอนิกอันดับที่สามคือที่ 150Hz มีขนาดเพิ่มขึ้นมากเลยทีเดียว

### 2.3 NI CompactRIO [2]

NI CompactRIO หรือ NI reconfigurable I/O (RIO) เป็นตัวควบคุมแบบ FPGA แบบ Embedded ของบริษัท National Instruments ที่มีความสามารถสูงมาก มีขนาดเล็ก ทนทาน มีความยืดหยุ่น โปรแกรมด้วยภาษา LabVIEW ที่เป็นภาษากากราฟิก สามารถพัฒนาโปรแกรมได้รวดเร็ว เหมาะกับการสร้างเครื่องต้นแบบ

CompactRIO จะประกอบด้วยตัวประมวลผลแบบเวลาจริง (Real-time processor) และ โมดูลอินพุต/เอาต์พุต โดยที่แต่ละ โมดูลอินพุต/เอาต์พุตจะต่อโดยตรงกับ FPGA ซึ่งทำให้มีการประมวลผลสัญญาณในระดับต่ำ (Low-level signal processing) และ FPGA จะต่อกับตัวประมวลผลแบบเวลาจริง โดยผ่านบัส PCI ดังรูปที่ 2.13 ดังนั้นระบบจะทำงานๆ ได้รวดเร็วเพราะเป็นการประมวลผลในระดับต่ำ หรือในระดับฮาร์ดแวร์

CompactRIO จะสามารถต่อกับ โมดูลอินพุต/เอาต์พุตได้หลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความต้องการในการทำงาน ไม่ว่าจะเป็น อินพุตแบบแอนะล็อกที่สามารถต่อได้กับทั้งแบบแรงดัน, กระแส, เทอร์โมคัปเปิล, RTD, มิเตอร์วัดอัตราเร่ง, และ สเตนเกจ หรือเอาต์พุตแบบแอนะล็อก, อินพุตแบบดิจิทัล, และ เอาต์พุตแบบดิจิทัล เป็นต้น



รูปที่ 2.13 สถาปัตยกรรมของ CompactRIO

### - ตัวประมวลผลแบบเวลาจริงรุ่น 9004

มีคุณสมบัติดังนี้

- หน่วยประมวลผล 195MHz
- หน่วยความจำ DRAM 64MB
- หน่วยความจำภายในแบบถาวร 512MB
- พอร์ต Ethernet
- พอร์ตอนุกรม RS232C
- มี LED อเนกประสงค์ 4 หลอด
- มี DIP Switch อเนกประสงค์ 5 บิต
- มี Remote Panel Web Server
- มี FTP Server

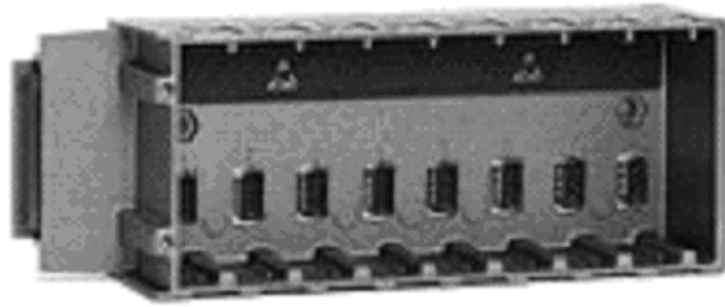


รูปที่ 2.14 ตัวประมวลผลแบบเวลาจริงรุ่น 9004

### - แพลตฟอร์ม FPGA ขนาด 3 ล้านเกต รุ่น 9104

มีคุณสมบัติดังนี้

- มีสล๊อตสำหรับใส่โมดูล 8 สล๊อต
- มี FPGA จำนวน 3 ล้านเกต
- RAM 196kB
- ฐานเวลา 40MHz
- มีฟังก์ชัน PID ในตัวทำให้ใช้ควบคุมที่ความเร็ววงรอบมากกว่า 100kHz



รูปที่ 2.15 แซสซีซี FPGA ขนาด 3 ชั้นเกต รุ่น 9104

### - โมดูลอินพุตแบบแอนะล็อก รุ่น 9201

มีคุณสมบัติดังนี้

- รับอินพุตเป็นแรงดัน +/- 10 V
- 8 ช่องสัญญาณอินพุต
- ความละเอียดในการแปลงสัญญาณ 12 บิต
- ความละเอียดในการสุ่มสัญญาณ 500 kS/S
- มีการแยกโคดแรงดัน



รูปที่ 2.16 โมดูลอินพุตแบบแอนะล็อก รุ่น 9201

### - โมดูลเอาต์พุตแบบแอนะล็อก รุ่น 9263

มีคุณสมบัติดังนี้

- เอาต์พุตเป็นแรงดัน +/- 10 V
- 4 ช่องสัญญาณเอาต์พุต
- ความละเอียดในการแปลงสัญญาณ 16 บิต

- ความละเอียดในการสุ่มสัญญาณ 100 kS/S
- มีการแยกโดดแรงดัน
- ขั้วกระแสได้ 1mA/ช่อง



รูปที่ 2.17 โมดูลเอาต์พุตแบบแอนะล็อก รุ่น 9263

#### - โมดูลอินพุตแบบดิจิตอล รุ่น 9423

มีคุณสมบัติดังนี้

- ระดับแรงดัน 24V
- จำนวนช่องสัญญาณ 8 ช่อง แบบซิงก์กระแส
- เวลาประวิงของอินพุต 1  $\mu$ S
- มีการแยกโดดแรงดัน



รูปที่ 2.18 โมดูลอินพุตแบบดิจิตอล รุ่น 9423

#### - โมดูลเอาต์พุตแบบดิจิตอล รุ่น 9474

มีคุณสมบัติดังนี้

- ระดับแรงดัน 5-30V
- จำนวนช่องสัญญาณ 8 ช่อง แบบซอร์สกระแส
- จ่ายกระแสได้ 1 A/ช่อง
- เวลาประวิงของอินพุต 1 uS
- มีการแยกโคดแรงดัน



รูปที่ 2.18 โมดูลเอาต์พุตแบบดิจิทัล รุ่น 9474

## 2.4 LabVIEW [3]

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือเรียกย่อ ๆ ว่า VI ซึ่งหมายถึง เครื่องมือวัดเสมือน ดังตัวอย่างจากรูปนี้เป็น Oscilloscope ที่ได้ทำการสร้างขึ้นบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

LabVIEW จะมี Front Panel ซึ่งเปรียบเสมือนได้กับสิ่งที่ผู้ใช้จะเห็นและควบคุมการทำงาน ผู้ใช้สามารถสร้างรูปแบบขึ้นเองได้อย่างรวดเร็วเพราะ LabVIEW มีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับ ออกแบบหน้าจอมากมาย เช่น จอแสดงผลแบบออสซิลโลสโคป , ปุ่มหมุน (Dial) และสวิตช์ เป็นต้น โดย LabVIEW จะแสดงผลและควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์

พื้นที่ส่วนที่เขียนโปรแกรมจะเรียกว่า Block Diagram เปรียบเสมือนกับ Hardware ภายในเครื่องมือวัด โดย LabVIEW จะเขียนโปรแกรมโดยอาศัยรูปภาพ

LabVIEW อาศัยหลักการการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดค่าทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบโปรแกรมตามที่ต้องการ หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. Acquisition ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบในที่นี้คือคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจจะมาจาก การ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทาง

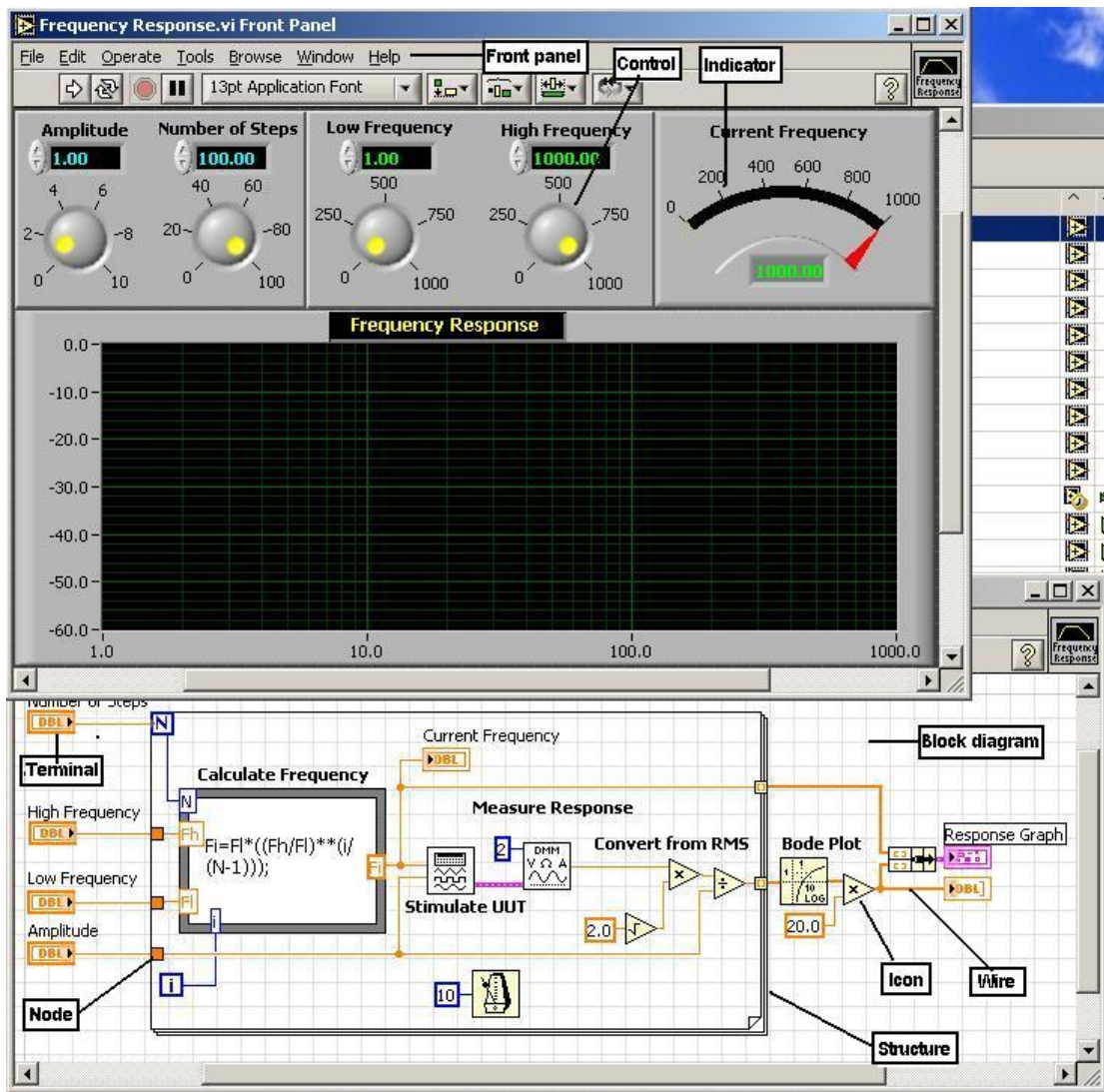
ไฟฟ้า), การ์ด IMAQ (สำหรับข้อมูลประเภทรูป) หรือ GPIB (สำหรับควบคุมเครื่องมือวัด)

2. หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วอาจจะผ่านฟังก์ชันในการทำ Analysis หรือวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสื่อที่วัดได้และใช้งานได้
3. Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น DMM (Digital Multimeter) แสดงผลเฉพาะสัญญาณที่วัดได้โดยไม่จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์กับเวลา หรือ Oscilloscope แสดงผลของข้อมูลที่สัมพันธ์กับเวลา หรือ Spectrum Analyzer จะแสดงสัญญาณในรูปความถี่หรือการพิมพ์ออกมาเป็นรายงานหรือเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์

### ส่วนประกอบต่างๆ ใน LabVIEW (LabVIEW Environment)

อธิบายจากรูป (ตามหมายเลข)

1. Front Panel คือส่วนที่จะติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) ซึ่งส่วนนี้จะประกอบด้วย Control หรือ Input (รับข้อมูลจากผู้ใช้) และ Indicator หรือ Output (แสดงผลให้ผู้ใช้นั้น)
2. Control คือสิ่งที่ผู้ใช้จะป้อนค่าหรือเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งก็คือ Input เข้าสู่ระบบในรูปแบบ Numeric Control (ตัวรับข้อมูลแบบตัวเลข)
3. Indicator เป็นสิ่งที่โปรแกรมแสดงออกมาให้ผู้ใช้นั้น ซึ่งก็คือ Output ที่ออกมาจากระบบ หรือ Application ที่เราพัฒนา ในรูปเป็นตัวอย่างของ Numeric Indicator (ตัวแสดงผลตัวเลข)
4. Block Diagram คือส่วนที่ผู้พัฒนาใช้ในการเขียนโปรแกรม หรือส่วนของ Source Code
5. Terminal จะมีสองรูปแบบ คือจุดกำเนิด (Source) หรือ (Output Terminal) และจุดรับ (Sink) หรือ (Input Terminal)
6. Icons คือส่วนที่มีการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งเมื่อโปรแกรมทำงาน เช่น ฟังก์ชันซึ่งเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่มีอยู่แล้วใน LabVIEW ได้แก่ Add, Subtract หรือ SubVIs ซึ่งจะหมายถึง VI ที่ถูกเรียกอ่านมาจากอีกที่หนึ่ง



รูปที่ 2.19 แสดงส่วนประกอบต่างๆใน LabVIEW

7. Wires คือเส้นทางของข้อมูลที่ส่งผ่านจุดกำเนิดข้อมูล (Source) ไปจุดรับข้อมูล/จุดสิ้นสุด (Sink)
8. Structures คือส่วนที่ควบคุมขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม เช่น For Loop
9. Nodes คือจุดเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างข้อมูลกับ SubVI, Function หรือ Structures

## บทที่ 3

### การออกแบบ

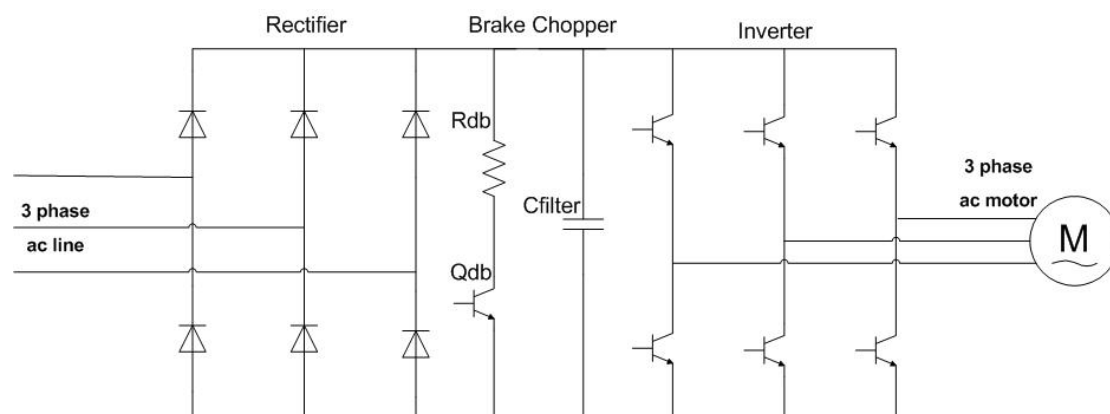
#### 3.1 บทนำ

การออกแบบในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยส่วนของฮาร์ดแวร์หลักๆประกอบไปด้วยชุดเบรกมอเตอร์, แท่นทดสอบมอเตอร์และชุดวัดกระแส ส่วนของซอฟต์แวร์ประกอบไปด้วยโปรแกรมวัดและวิเคราะห์กระแส และโปรแกรมที่ใช้ในหาค่าความถี่ฮาร์มอนิก

#### 3.2 ฮาร์ดแวร์

##### 3.2.1 ชุดเบรกมอเตอร์

ชุดเบรกมอเตอร์ที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 4 ควอดแรนต์ และเครื่องจักรกลไฟฟ้าอซิงโครนัสขนาด 1.5 กิโลวัตต์ที่สามารถปรับความเร็วและแรงบิดที่ใช้ในการเบรกได้ โดยการควบคุมทั้งหมดจะกระทำผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม LabVIEW ที่เขียนขึ้นมา โดยชุดเบรกมอเตอร์นี้จะมีเซ็นเซอร์วัดความเร็วและเซ็นเซอร์วัดแรงบิด



รูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการเบรกมอเตอร์

##### 3.2.2 แท่นทดสอบมอเตอร์

แท่นทดสอบมอเตอร์มีหน้าที่ยึดมอเตอร์และชุดเบรกมอเตอร์เข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยออกแบบให้มีลักษณะที่ถอด-ประกอบมอเตอร์ที่จะทำการทดสอบได้ง่าย และมีจุดยึดเซ็นเซอร์วัดแรงบิดอยู่ที่กลางระหว่างมอเตอร์และตัวเบรกมอเตอร์



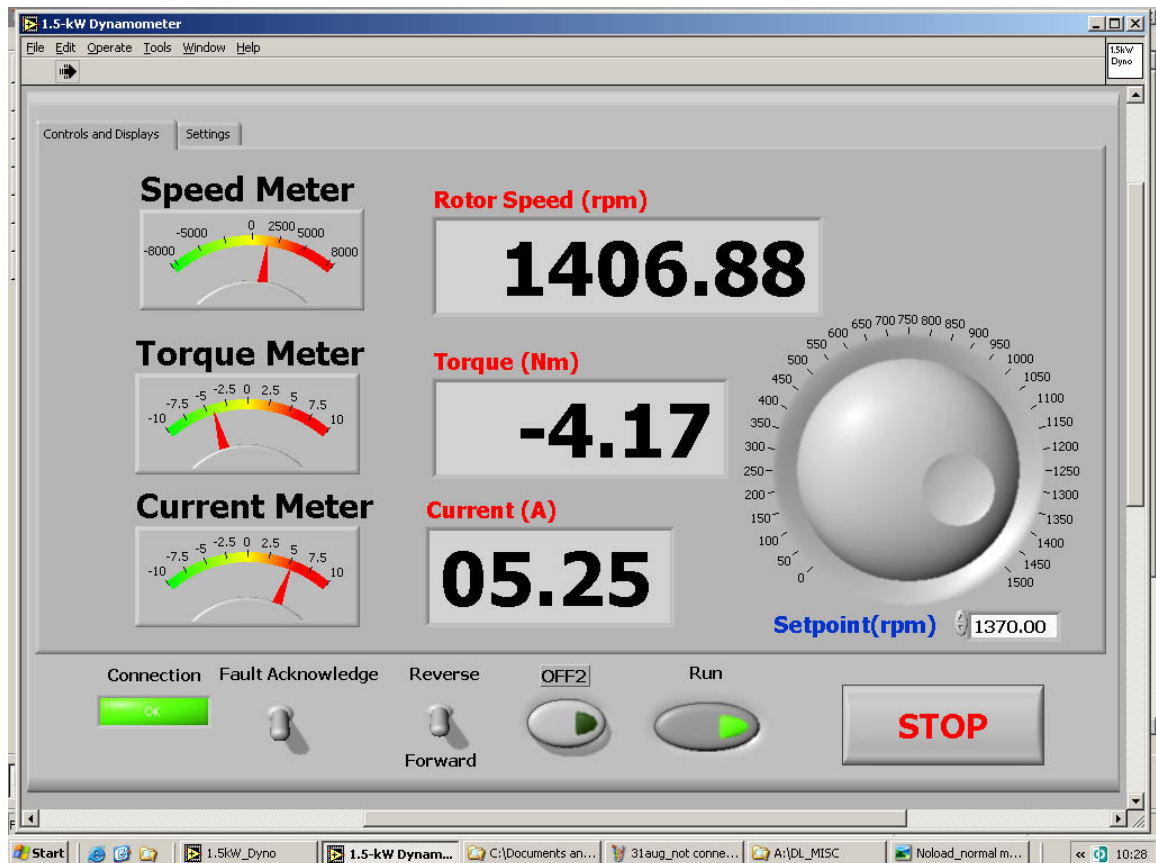
รูปที่ 3.2 แท่นทดสอบมอเตอร์



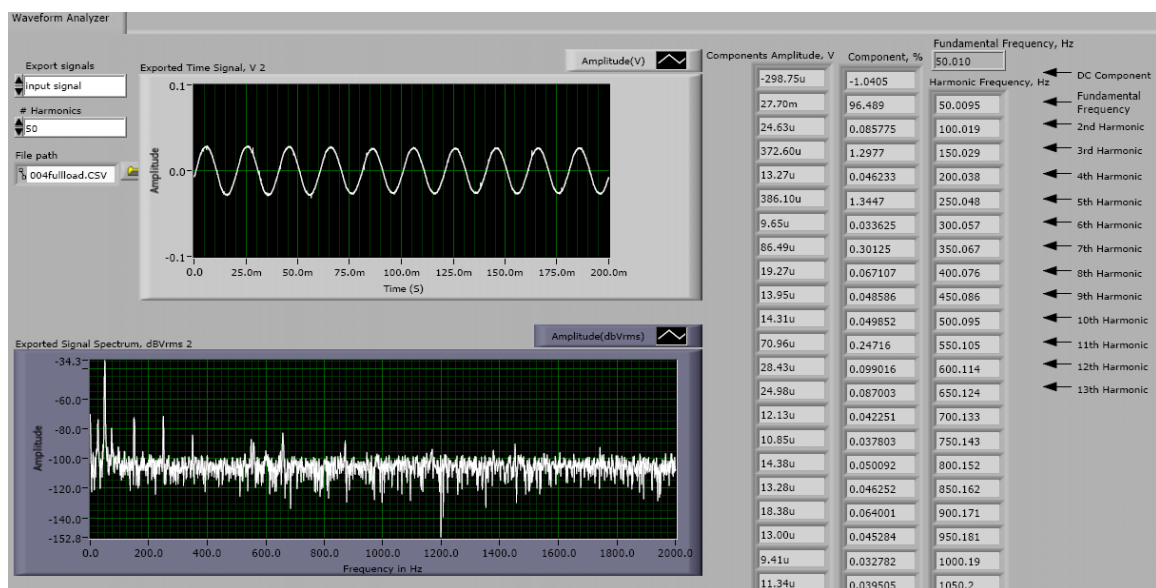
รูปที่ 3.3 วงจรอินเวอร์เตอร์และแท่นทดสอบมอเตอร์

### 3.3 ซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยโปรแกรมที่ใช้ส่งข้อมูลจากการวัดกระแสมายังคอมพิวเตอร์, โปรแกรมควบคุมชุดเบรคมอเตอร์, และโปรแกรมวิเคราะห์กระแส



รูปที่ 3.3 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมชุดเบรคมอเตอร์



รูปที่ 3.4 โปรแกรมที่ใช้ในการรับและวิเคราะห์กระแส

Slip  
0.0666667

Frequency (Hz) Pole Measured speed (rpm)  
50 4 1400

stop  
STOP

Rotor slot nws number fRSH\_upper(Hz) fRSH\_lower(Hz)  
26 7 0 1263.33 1163.33  
1363.33 1063.33  
1463.33 963.333  
1563.33 863.333  
1663.33 763.333  
1763.33 663.333  
1863.33 563.333

**eccentricity faults**  
nws = 1, 3, 5 ...

Slip  
0.0676667

Frequency (Hz) Pole Measured speed (rpm)  
50 4 1398.5

stop  
STOP

**rotor faults (broken bar)** f rotor\_upper(Hz) f rotor\_lower(Hz)  
56.7667 43.2333

รูปที่ 3.5 โปรแกรมที่ใช้ในหาค่าความถี่ฮาร์โมนิก

## บทที่ 4

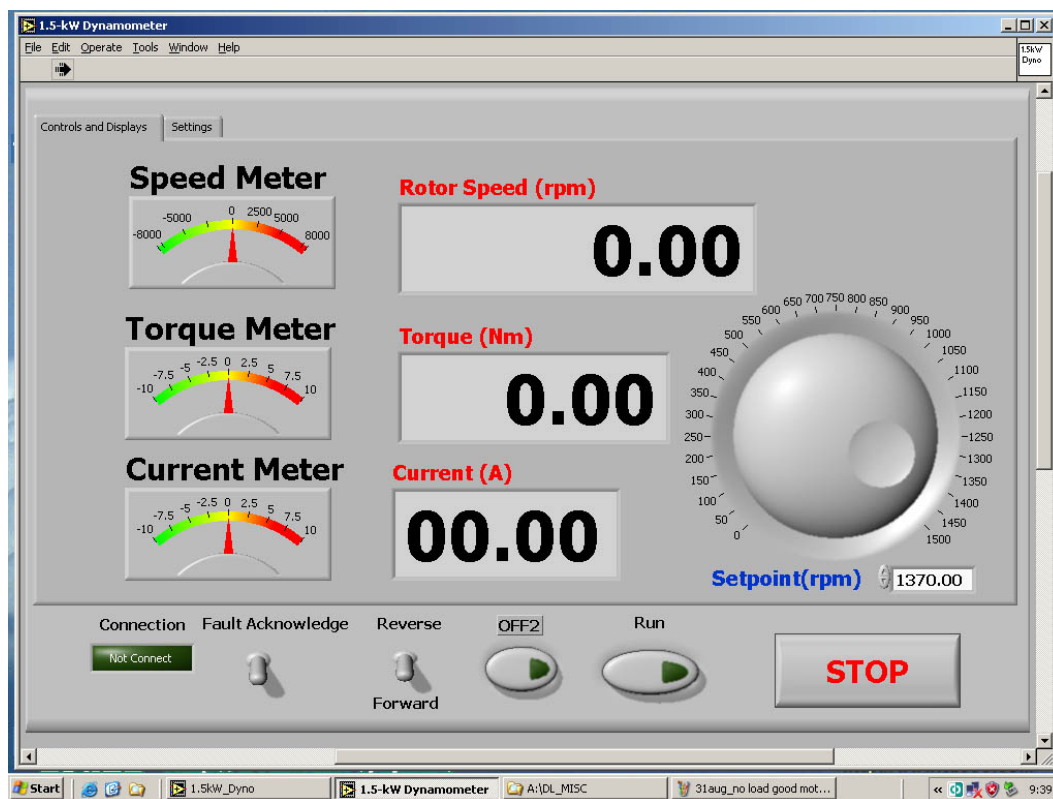
### การทดลอง

#### 4.1 บทนำ

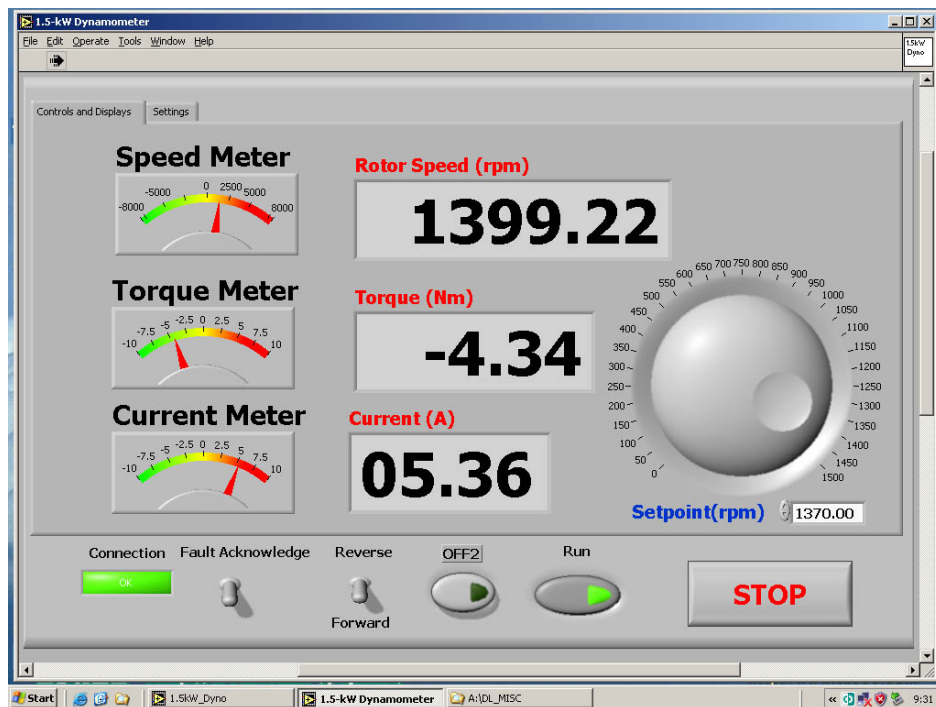
การทดลองการตรวจจับและการวินิจฉัยการชำรุดเสียหายล่วงหน้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำนี้จะใช้เครื่องวัดดังต่อไปนี้

1. 4-Channels oscilloscope - Yokogawa DL1540
2. Current probe - CHAUVIN ARNOUX E3n
3. Current measurement systems – Tektronix AM503S
4. Tachometer – Yokogawa 3632

#### 4.2 การทดลองชุดเบรกมอเตอร์

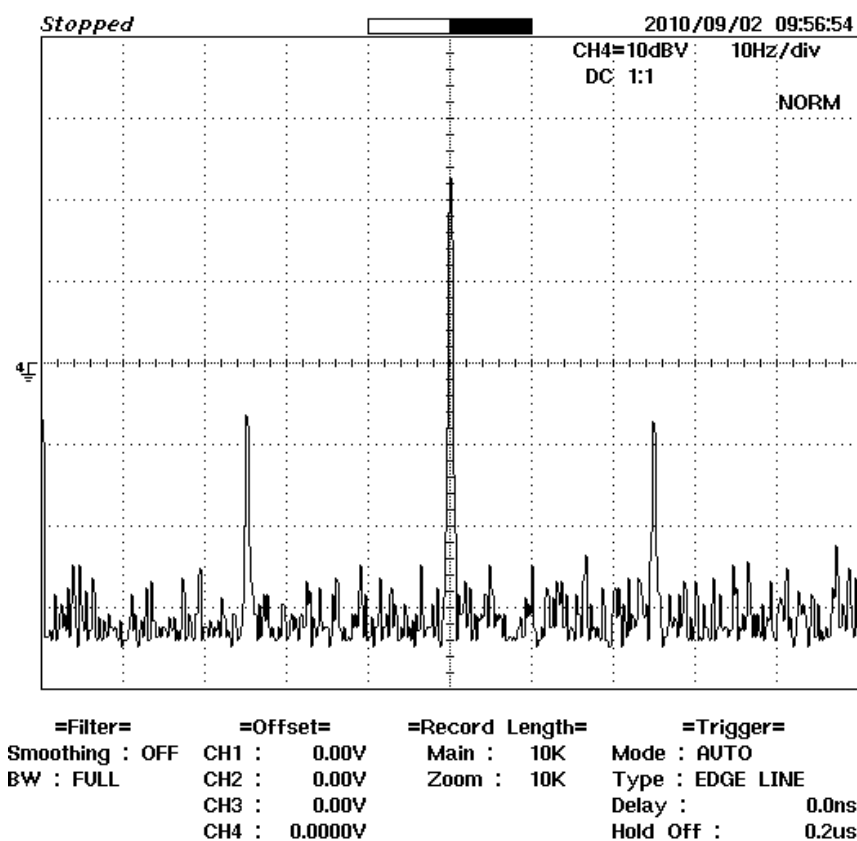


รูปที่ 4.1 ภาพหน้าจอควบคุมที่คอมพิวเตอร์ซึ่งยังไม่จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ชุดเบรกมอเตอร์



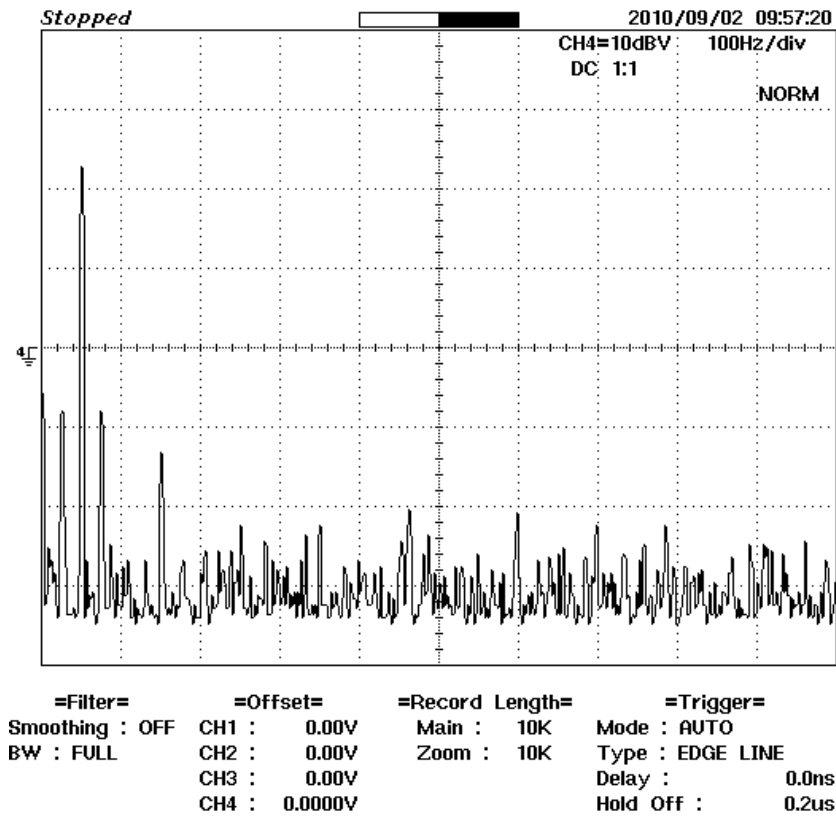
รูปที่ 4.2 ภาพหน้าจอควบคุมที่คอมพิวเตอรืขณะเบรกด้วยความเร็ว 1,370 rpm

#### 4.3 การทดลองวัดกระแสในมอเตอร์ปกติ

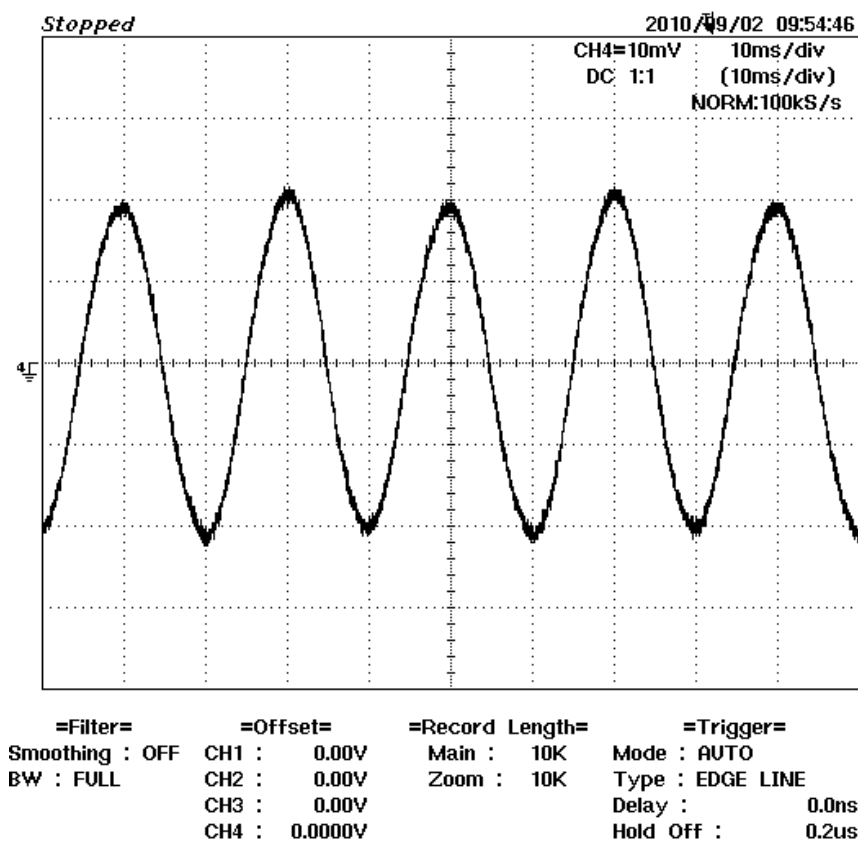


รูปที่ 4.3 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (10 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1492.0

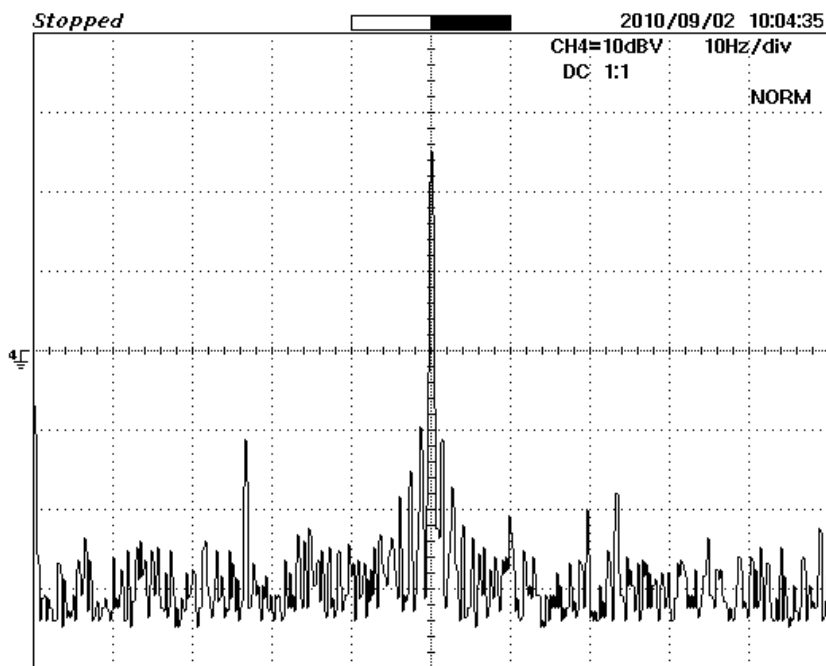
rpm



รูปที่ 4.4 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขไร้อหลด (100 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1492.0 rpm

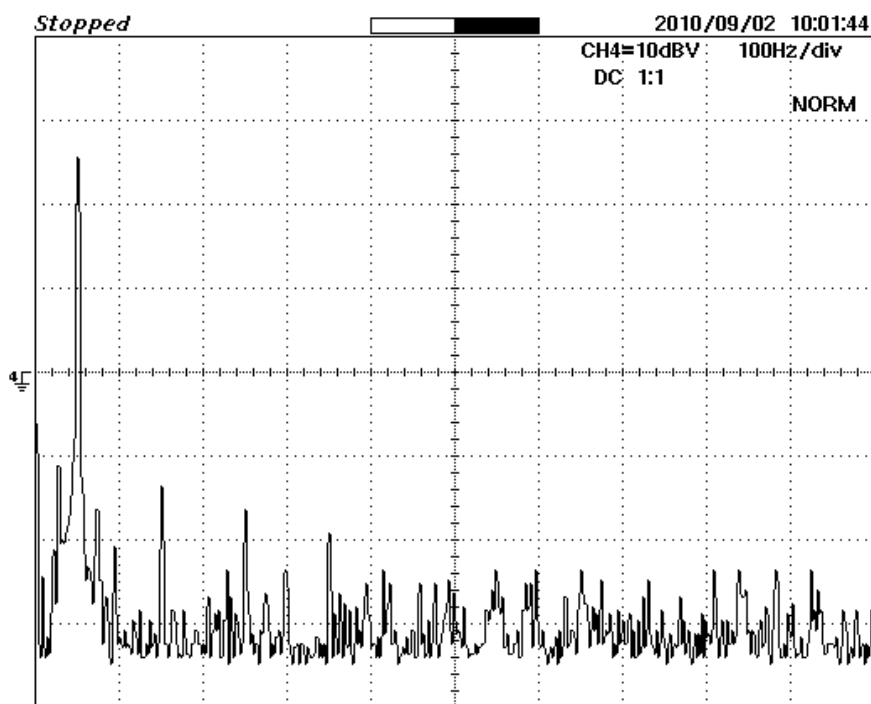


รูปที่ 4.5 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขไร้อหลด (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)



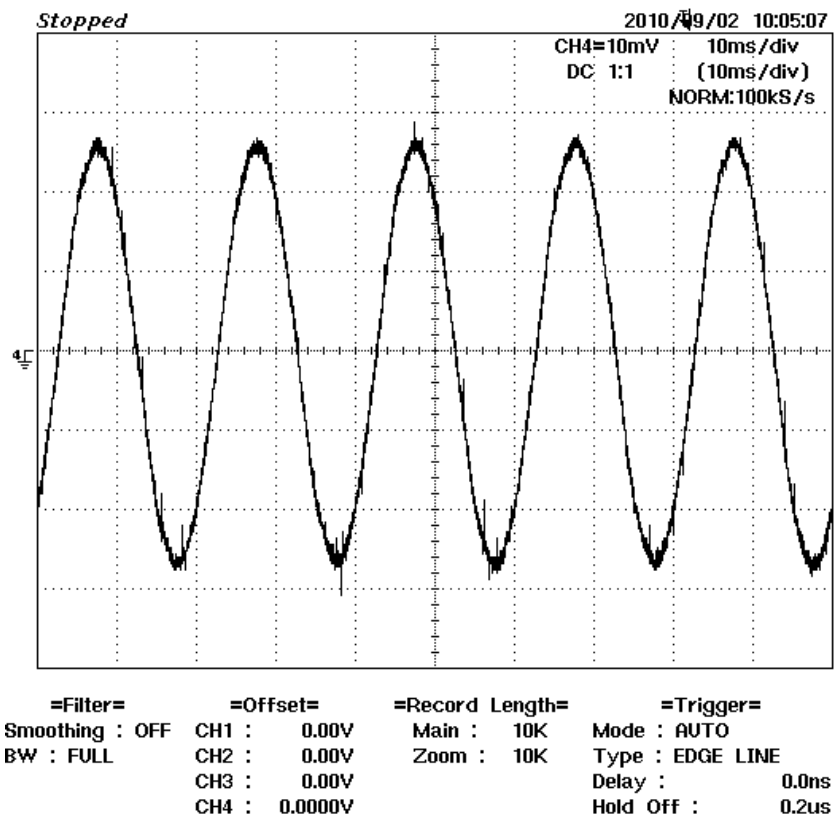
=Filter=      =Offset=      =Record Length=      =Trigger=  
 Smoothing : OFF    CH1 : 0.00V      Main : 10K      Mode : AUTO  
 BW : FULL          CH2 : 0.00V      Zoom : 10K      Type : EDGE LINE  
                       CH3 : 0.00V                                      Delay : 0.0ns  
                       CH4 : 0.0000V                                  Hold Off : 0.2us

รูปที่ 4.6 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็มที่ (10 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1400.0 rpm

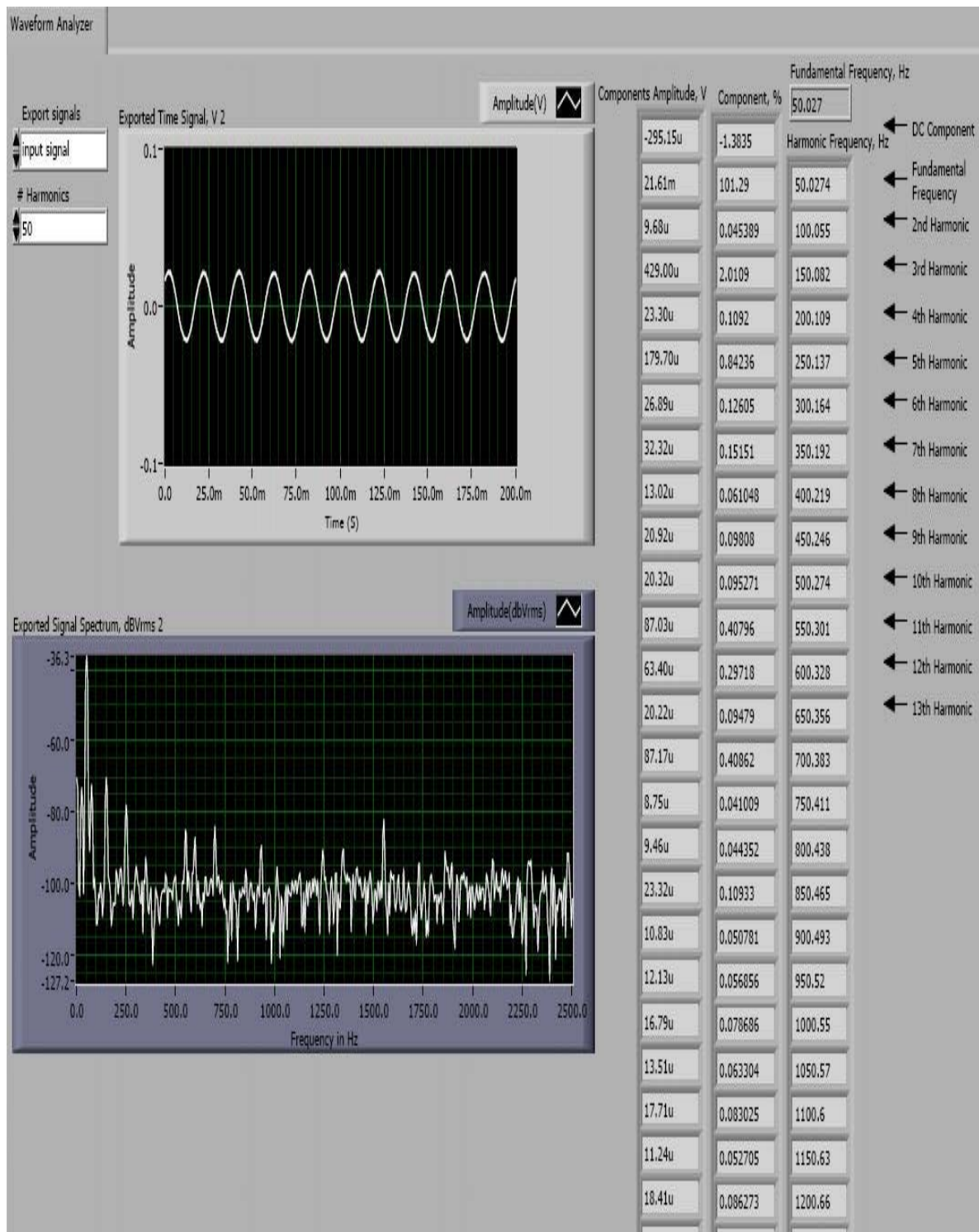


=Filter=      =Offset=      =Record Length=      =Trigger=  
 Smoothing : OFF    CH1 : 0.00V      Main : 10K      Mode : AUTO  
 BW : FULL          CH2 : 0.00V      Zoom : 10K      Type : EDGE LINE  
                       CH3 : 0.00V                                      Delay : 0.0ns  
                       CH4 : 0.0000V                                  Hold Off : 0.2us

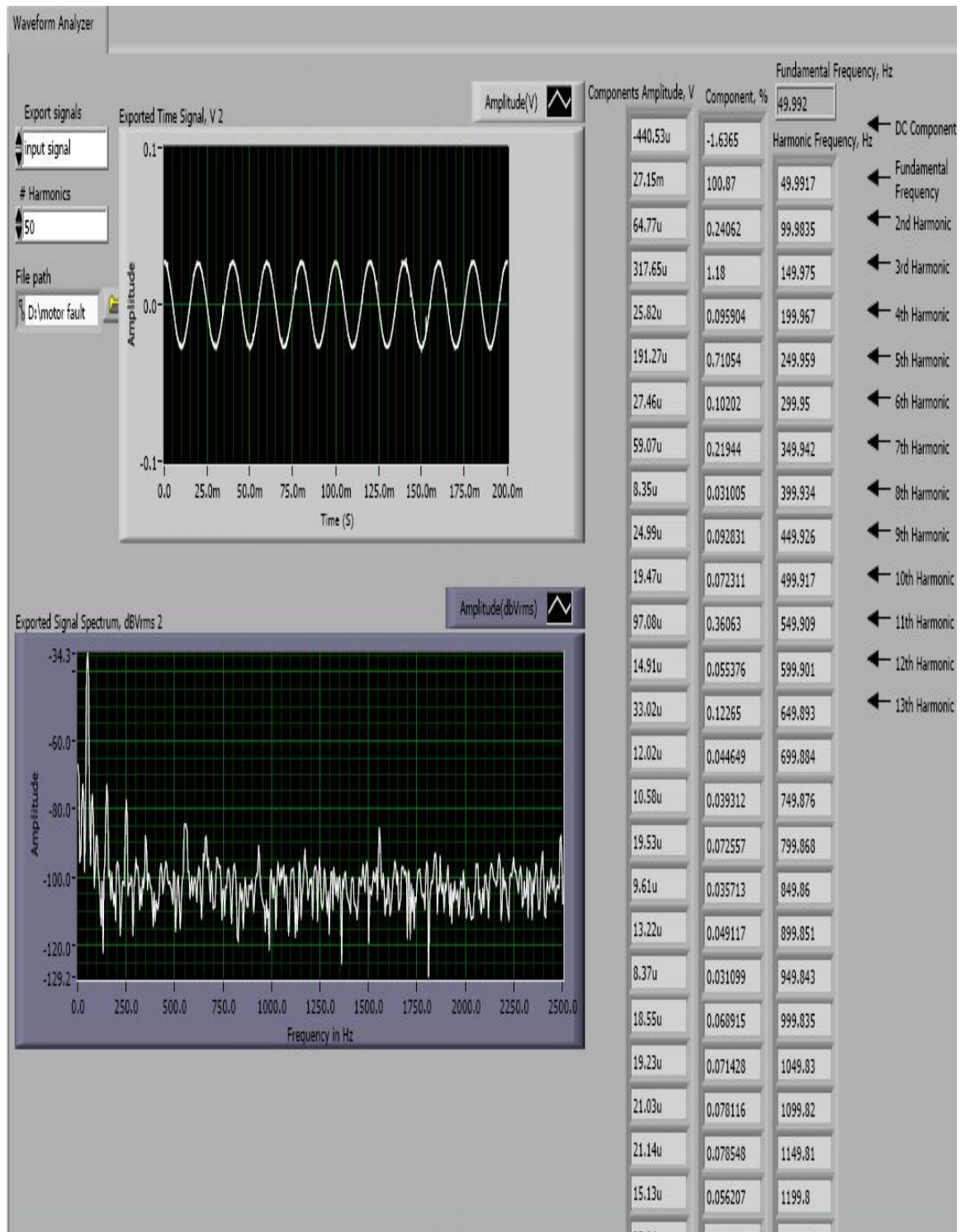
รูปที่ 4.7 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็มที่ (100 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1400.0 rpm



รูปที่ 4.8 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขโหลด (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)

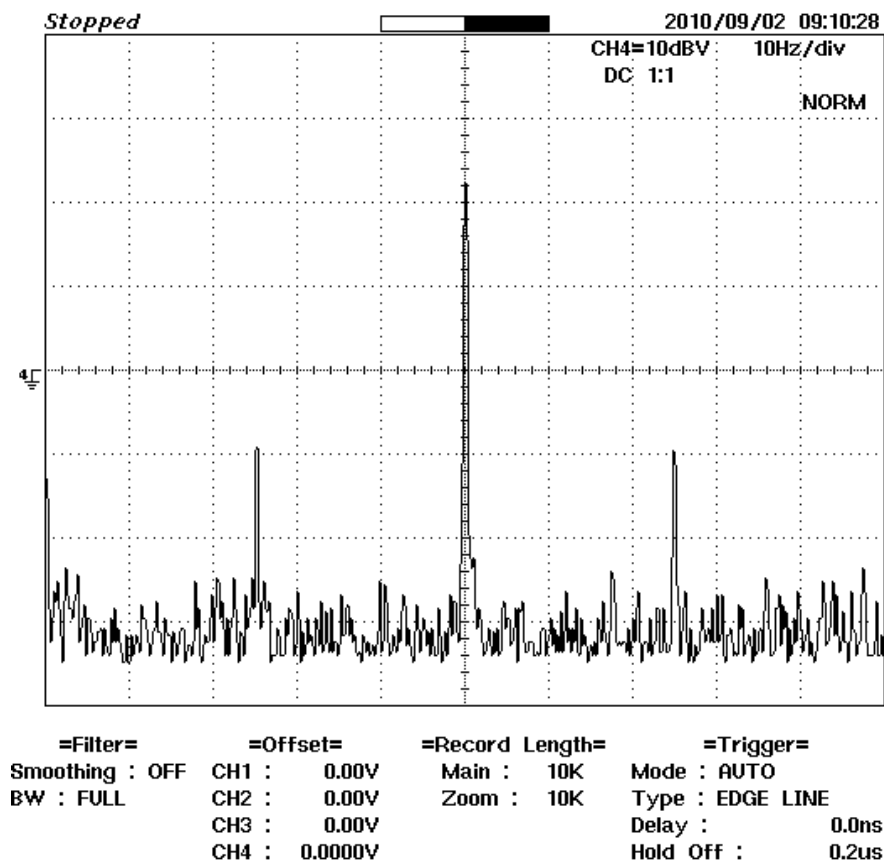


รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ Noload จากโปรแกรม LabVIEW



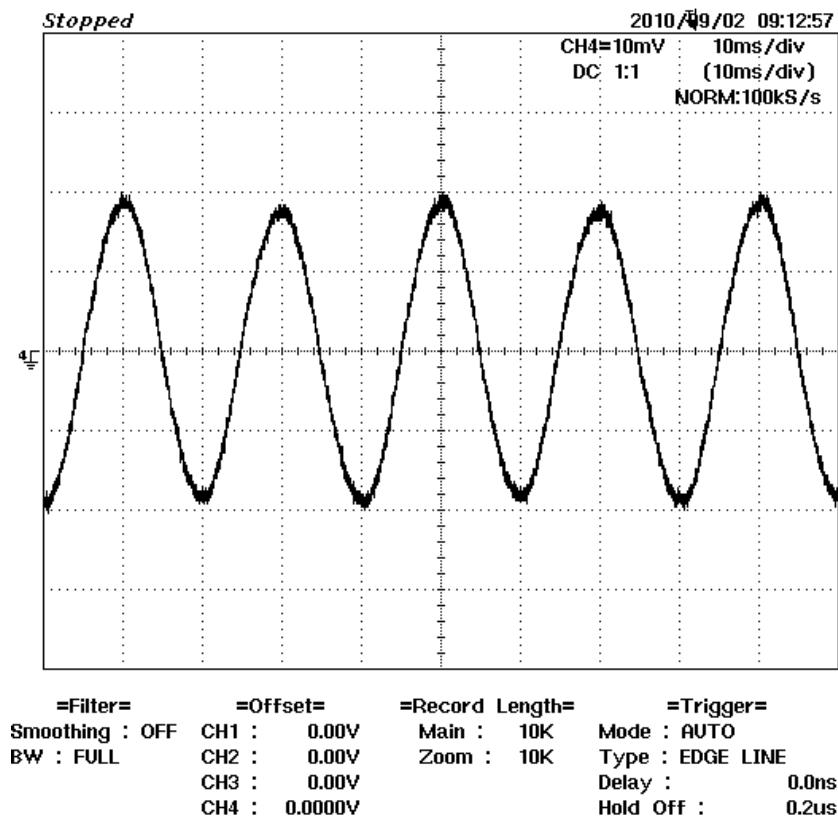
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์สเปคตรัมขณะ Fullload จากโปรแกรม LabVIEW

#### 4.4 การทดลองวัดกระแสในมอเตอร์ที่แบ่งตัวนำโรเตอร์ขาด 4 แท่ง

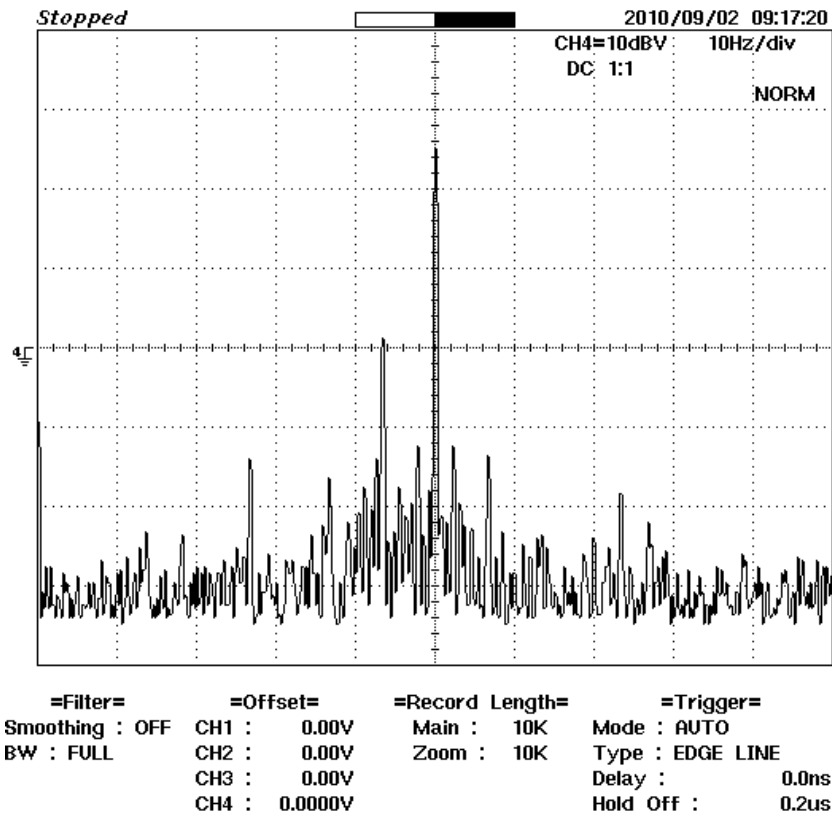


รูปที่ 4.11 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (10 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว

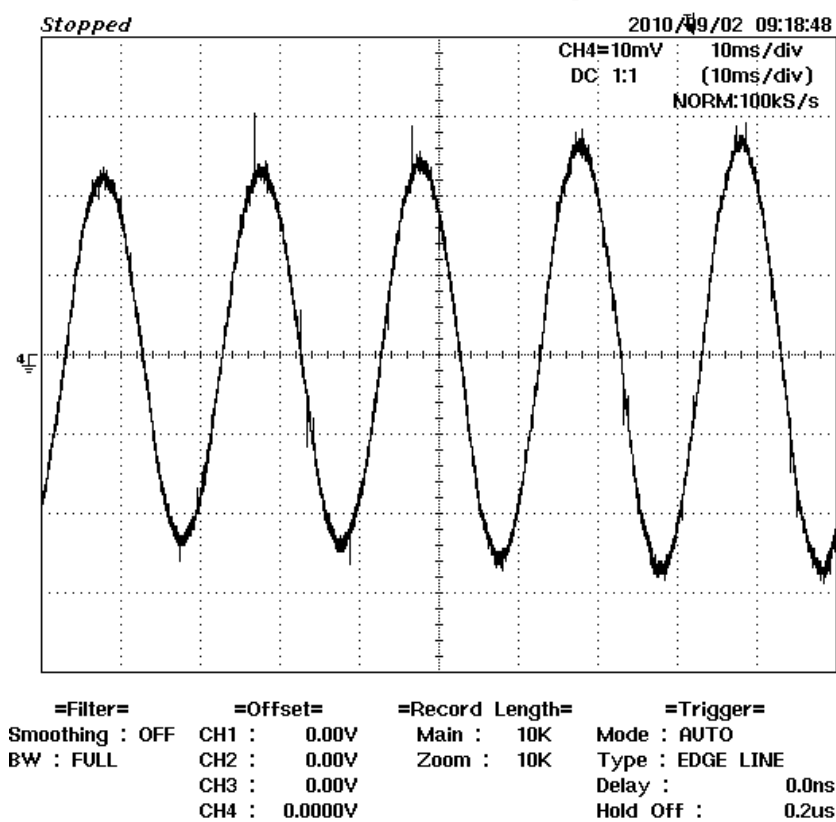
1492.4 rpm



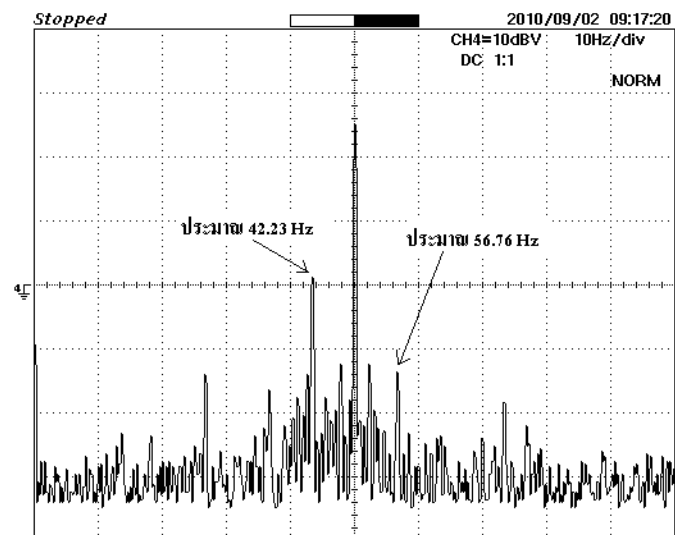
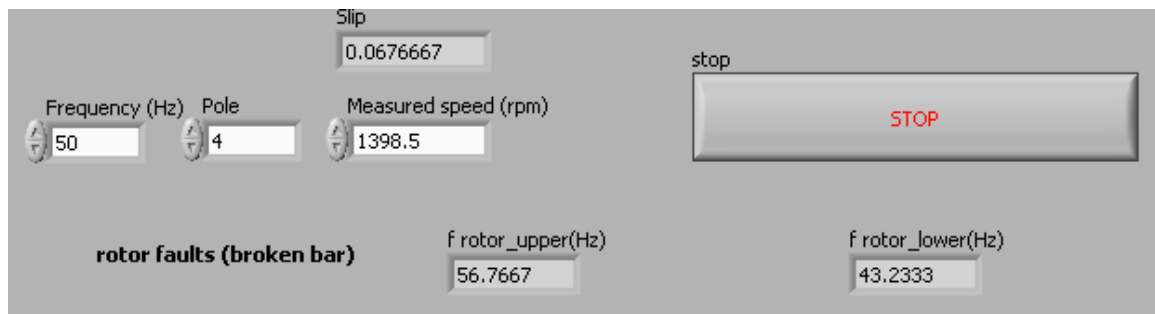
รูปที่ 4.12 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)



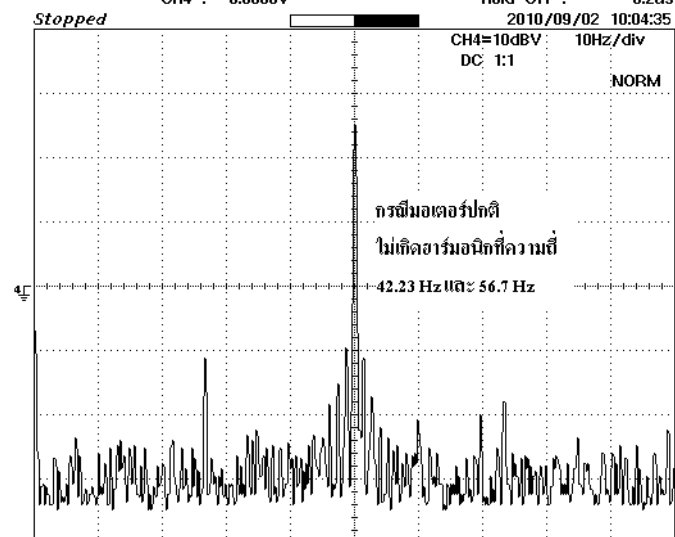
รูปที่ 4.13 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็ม (10 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1398.5 rpm



รูปที่ 4.14 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขโหลดเต็ม (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)

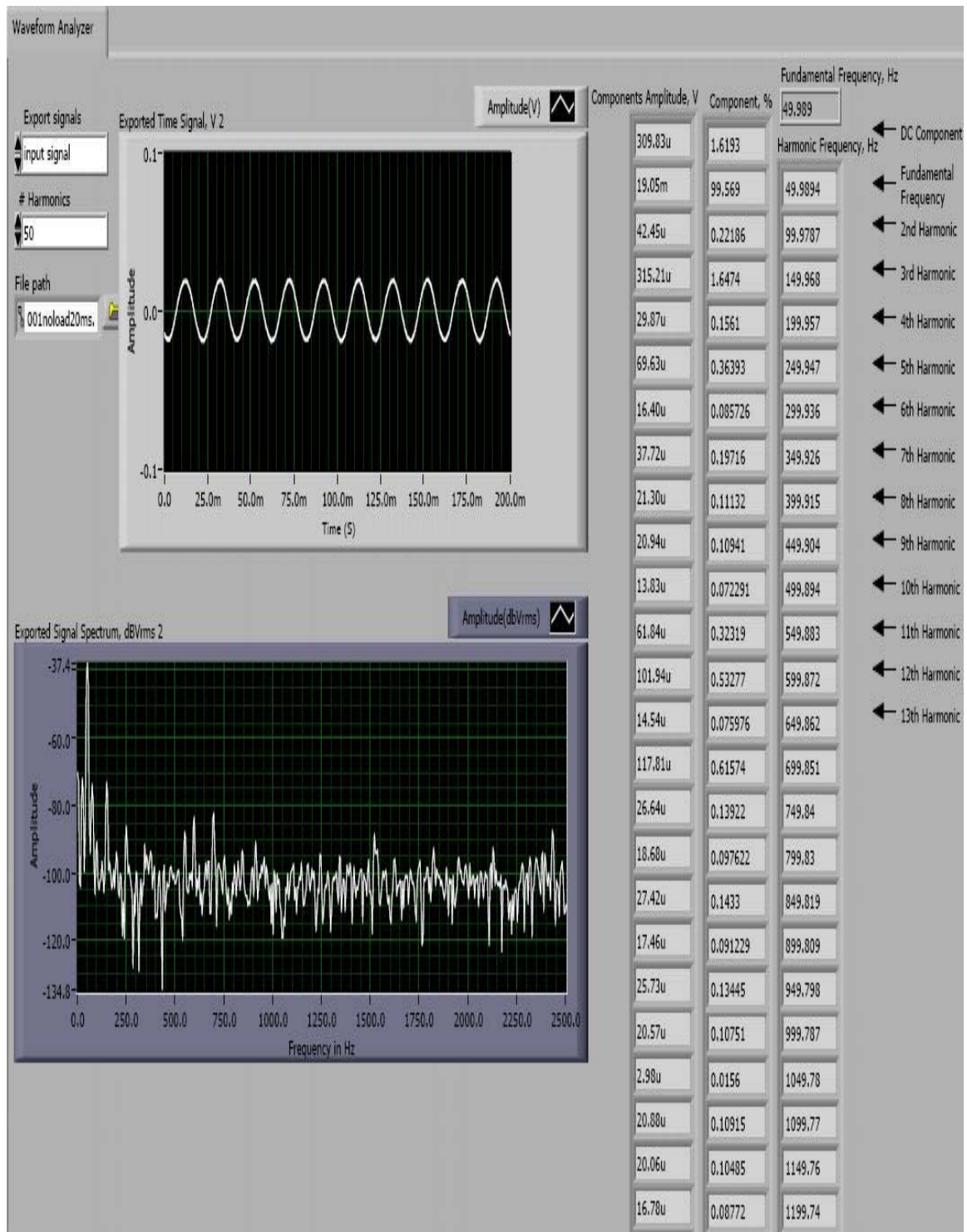


=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=  
Smoothing : OFF CH1 : 0.00V Main : 10K Mode : AUTO  
BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 10K Type : EDGE LINE  
CH3 : 0.00V Delay : 0.0ns  
CH4 : 0.0000V Hold Off : 0.2us

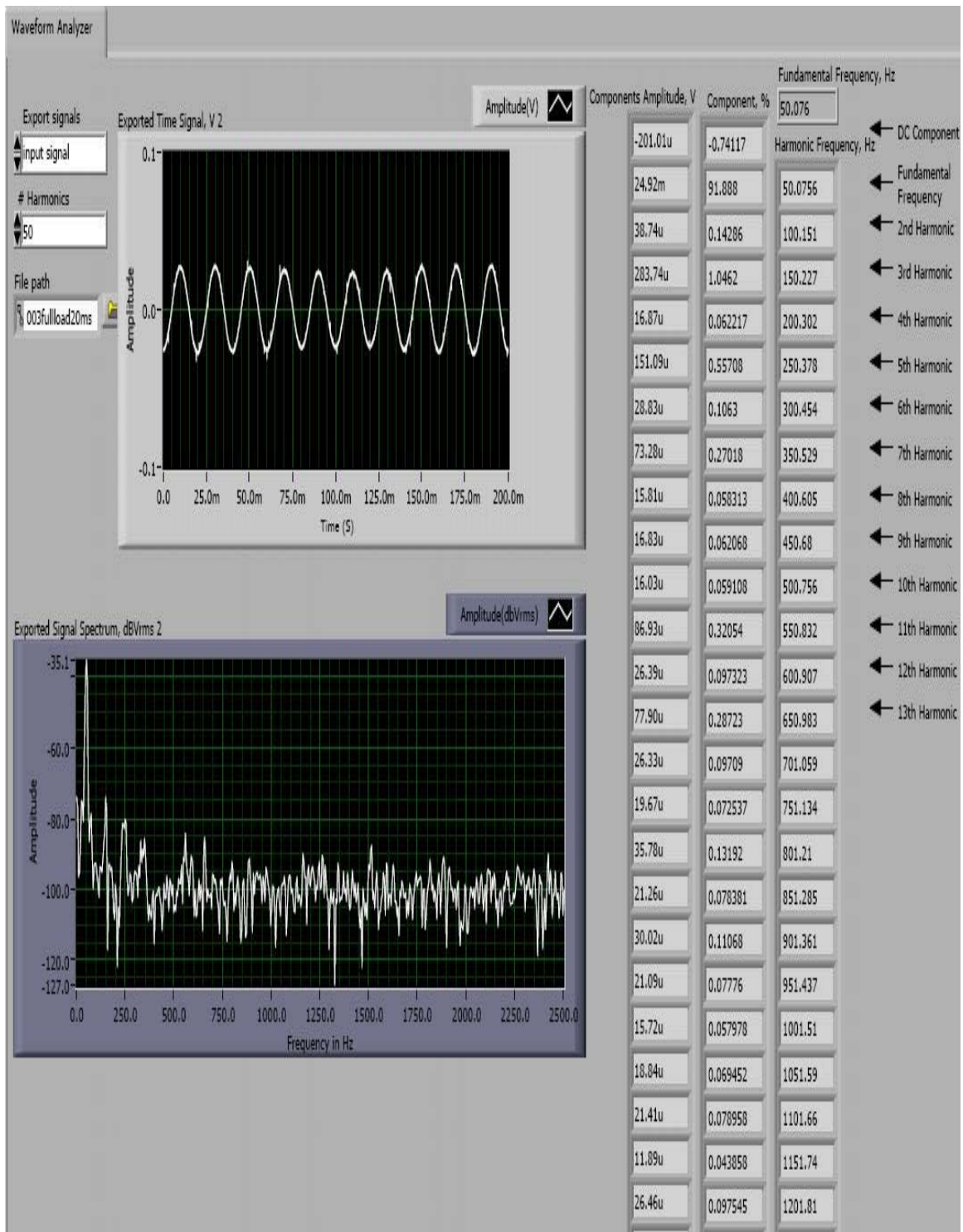


=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=  
Smoothing : OFF CH1 : 0.00V Main : 10K Mode : AUTO  
BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 10K Type : EDGE LINE  
CH3 : 0.00V Delay : 0.0ns  
CH4 : 0.0000V Hold Off : 0.2us

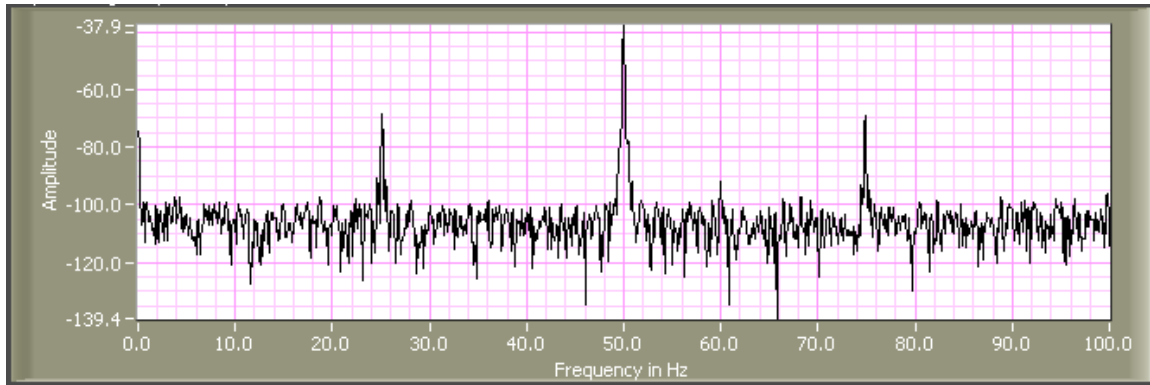
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LabVIEW แสดงให้เห็นว่าจะเกิดฮาร์มอนิกที่ 56.67 Hz และ 42.23 Hz



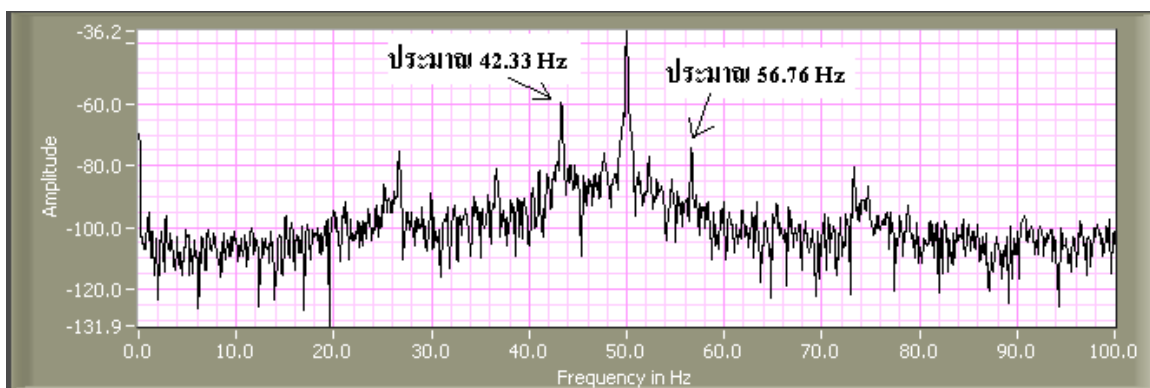
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ Noload จาก โปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ Full load จากโปรแกรม LabVIEW

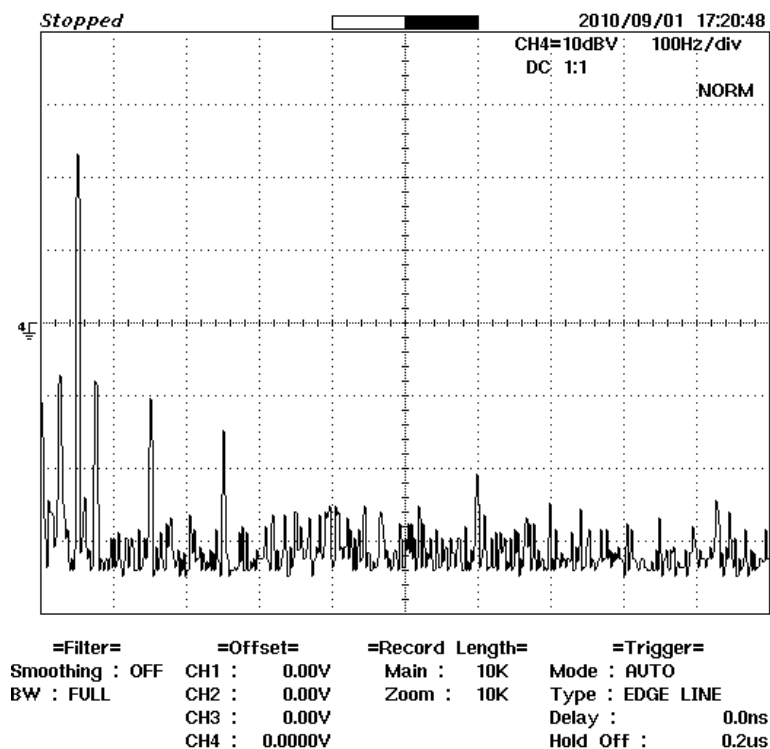


รูปที่ 4.18 รูปขยายผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ No-load จากโปรแกรม LabVIEW

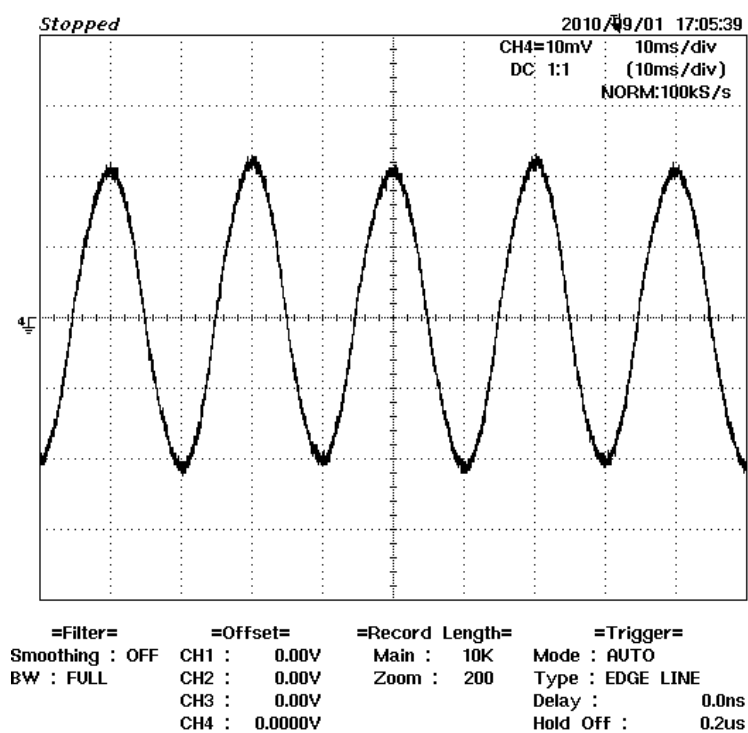


รูปที่ 4.19 รูปขยายผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ Full load จากโปรแกรม LabVIEW

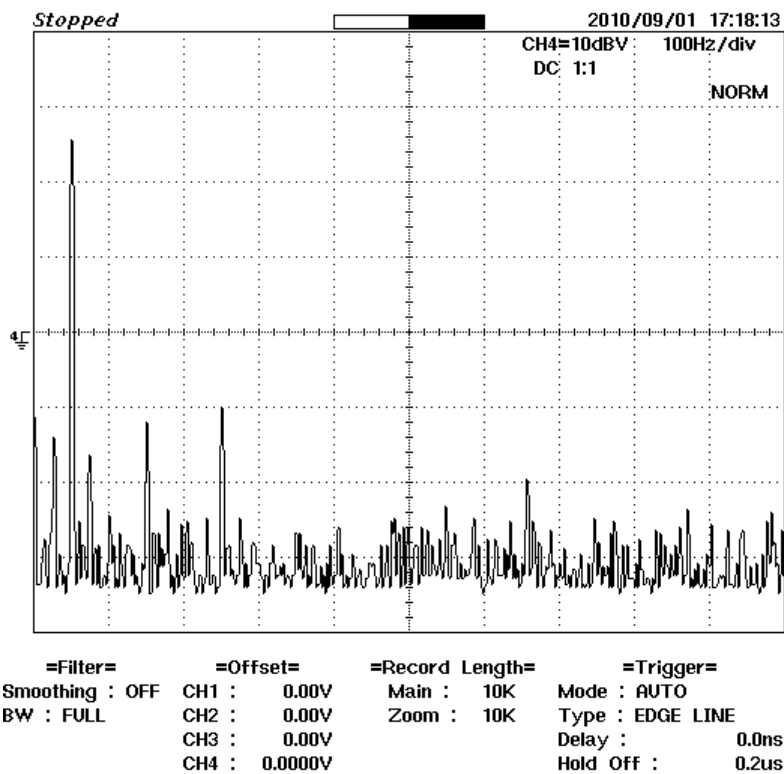
#### 4.5 การทดลองวัดกระแสในมอเตอร์ที่ไลน์เมนตีไม่ถูกต้อง



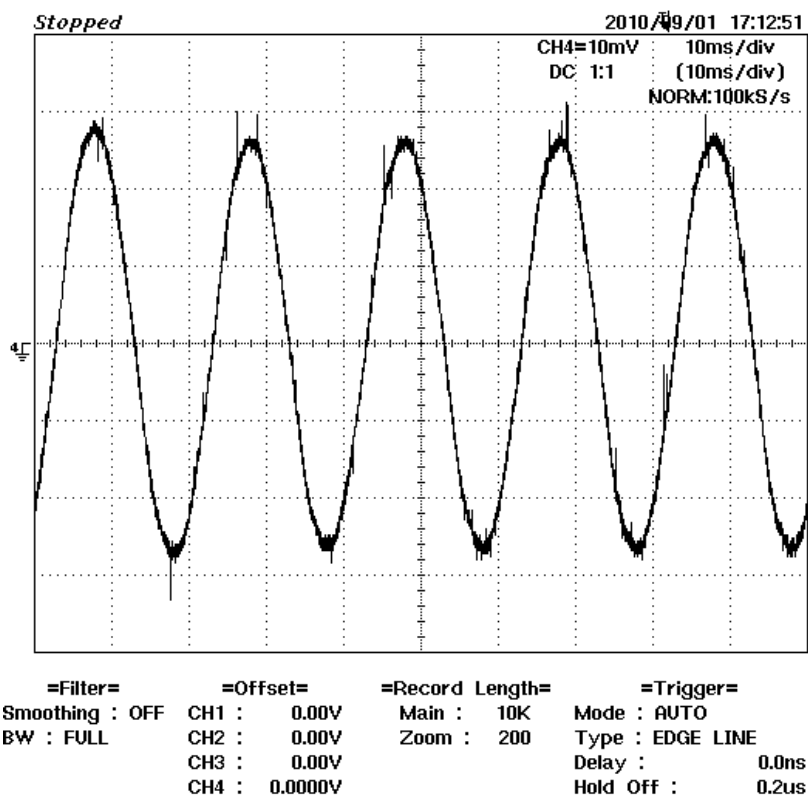
รูปที่ 4.20 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (100 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1492.8 rpm



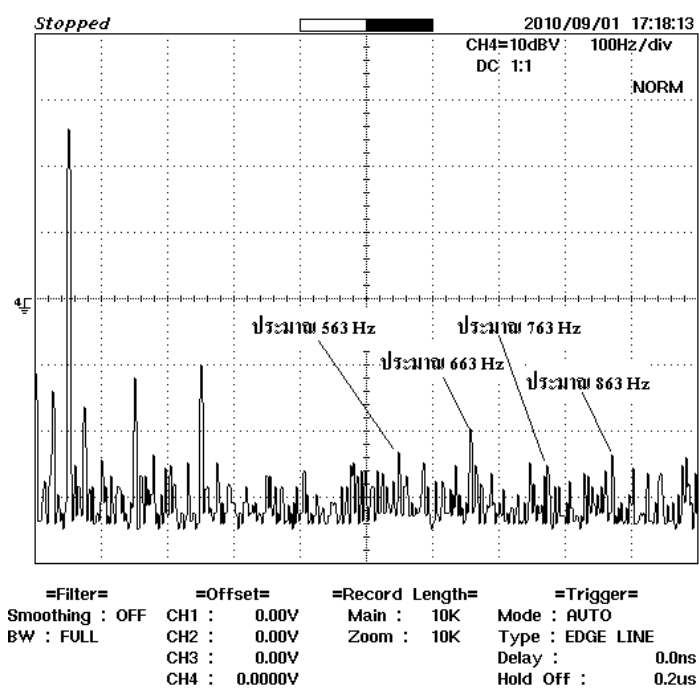
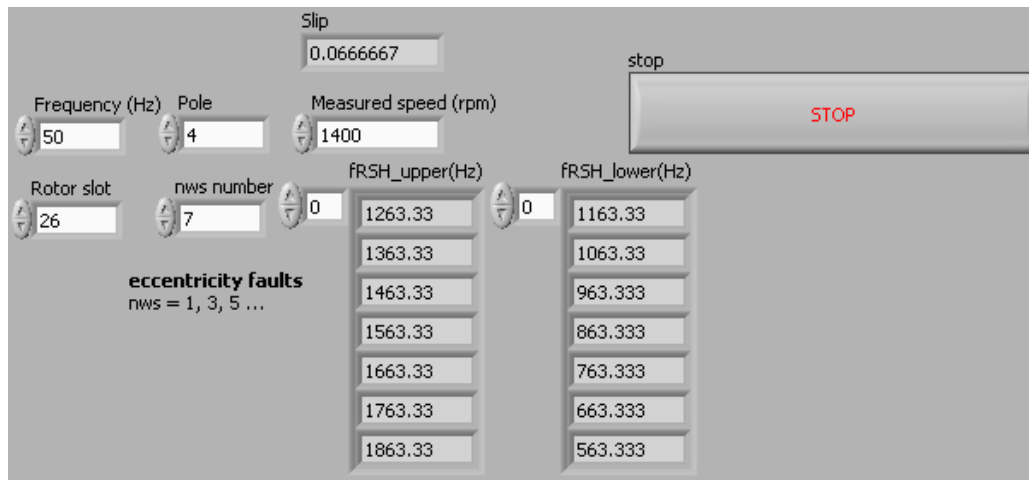
รูปที่ 4.21 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเงื่อนไขไร้โหลด (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)



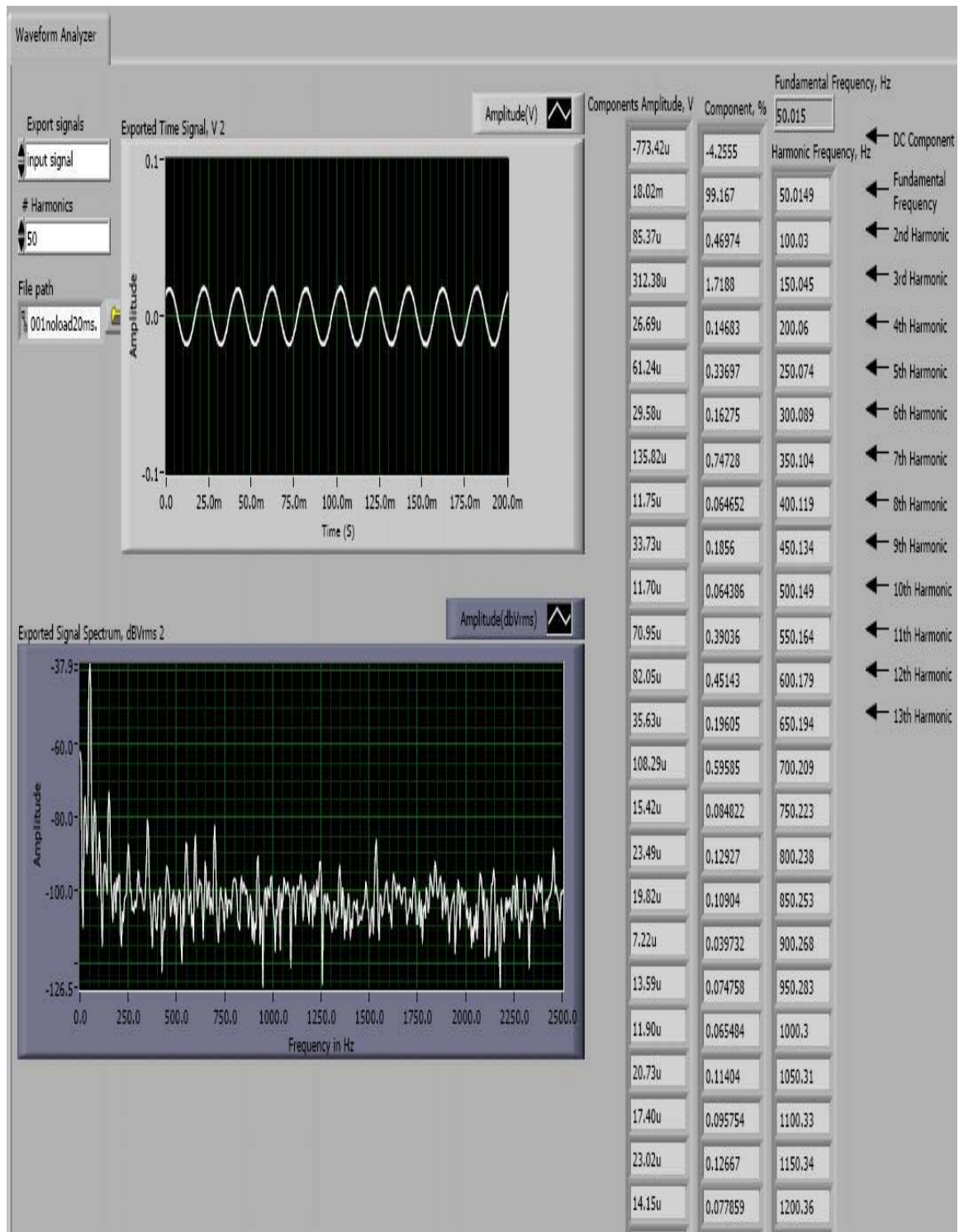
รูปที่ 4.22 ผลการวัดและวิเคราะห์ FFT ขณะทำงานเครื่องไหลดเต็มที่ (100 Hz/ช่อง) ที่ความเร็ว 1404.7 rpm



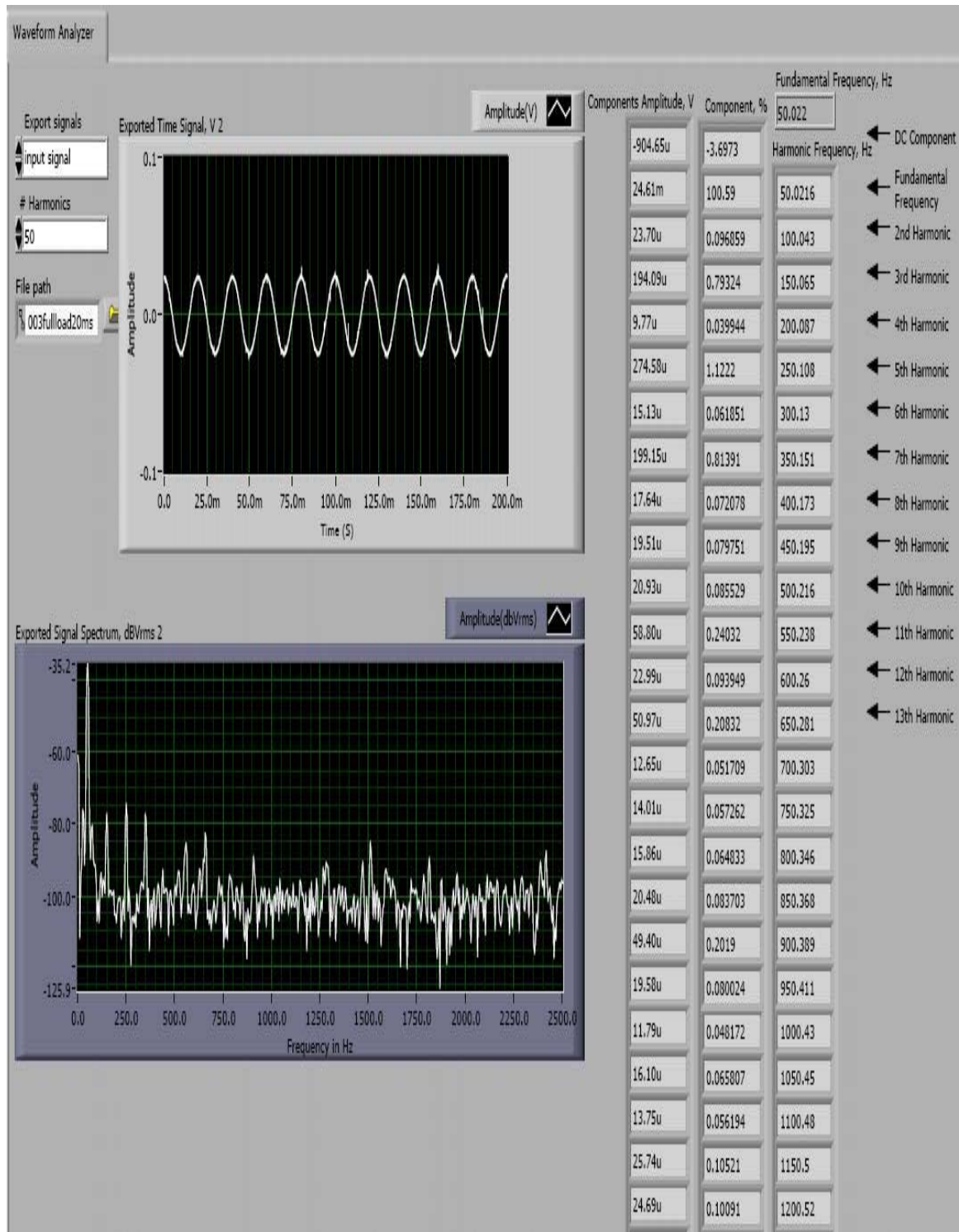
รูปที่ 4.23 ผลการวัดกระแสขณะทำงานเครื่องไหลดเต็มที่ (10ms/ช่อง, 1 A/ช่อง)



รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LabVIEW แสดงให้เห็นว่าจะเกิดฮาร์มอนิกที่ 563.33 Hz, 663.33Hz ...



รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ No-load จากโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมขณะ Full load จากโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 4.27 ภาพขณะทำการทดลองวัดกระแส



รูปที่ 4.28 ภาพขณะทำการทดลองเปลี่ยนมอเตอร์

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะวิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบอาการเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำลวงหน้า โดยใช้เทคนิคการวัดกระแส ซึ่งสามารถขยายผลสำหรับงานอุตสาหกรรมต่อไปได้

#### 5.2 สรุปผลการทดลอง

ได้มีการทดสอบเกี่ยวกับการตรวจสอบอาการเสียของมอเตอร์เหนี่ยวนำสองชนิดคือการชำรุดเสียหายเนื่องจากโรเตอร์ (Rotor faults) และ การชำรุดเสียหายเนื่องจากการบิดเบี้ยว (Eccentricity faults) หรือการออนไลน์เมนต์ที่ไม่ถูกต้อง และสรุปผลได้ดังนี้

##### 5.2.1 การชำรุดเสียหายเนื่องจากโรเตอร์ (Rotor faults)

การชำรุดเสียหายเนื่องจากโรเตอร์จะส่งผลไปยังฮาร์มอนิกของกระแสที่ความถี่ต่ำ ซึ่งสามารถสังเกตได้ง่าย และชัดเจนมากดังเช่นในผลการทดลองจะเกิดฮาร์มอนิกที่ความถี่ 42.33 Hz และ 56.67 Hz

##### 5.2.2 การชำรุดเสียหายเนื่องจากการบิดเบี้ยว (Eccentricity faults) หรือการออนไลน์เมนต์ที่ไม่ถูกต้อง

การชำรุดเสียหายชนิดนี้จะส่งผลยังฮาร์มอนิกของกระแสที่ความถี่สูง ซึ่งสามารถสังเกตได้แต่ไม่ชัดเจนนัก ซึ่งน่าจะเกิดมาจากการที่ไม่สามารถจำลองอาการเสียชนิดนี้ได้ดีพอ (ในการทดลองจะใช้โลหะหมุนไปที่นี้อตยิดฝากรอบด้านหน้าหนึ่งด้านเพื่อทำให้เกิดการเอียงศูนย์) แต่อย่างไรก็ตามก็ยังพอสังเกตได้ว่าเกิดฮาร์มอนิกของกระแสที่ความถี่ 563.33 Hz, 663.33 Hz, 763.33 Hz, 863.33 Hz, 963.33 Hz, 1,063.33 Hz, ...

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ควรเพิ่มการตรวจสอบการชำรุดชนิดอื่นๆ

## บรรณานุกรม

- [1] ยุทธชัย ศิลป์วิจารณ์ “การตรวจสอบการชำรุดเสียหายของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน”, **Industrial Technology Review**, ปีที่ 13 ฉบับที่ 167 กรกฎาคม 2550, หน้าที่ :111-115
- [2] NI website, 2009. [Online]. Available from: <http://www.ni.com> [2009, October 13]
- [3] เจริญ เพชรมณี. “เรียนลัด LabVIEW”. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2547.



