

สำนักหอสมุดกลาง [พระจอมเกล้าลาดกระบัง]

การศึกษาผลกระทบของอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มต่อสัญญาณเพลาและรองสั้น
A Study of PWM Inverter Effect on Shaft and Bearing Signal



โดย

นายสมพงษ์

ชินเมือง

นายธีรพงษ์

เรืองเดช

นายนรภัทร

พะยอมหอม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิจิตร

กิณเรศ

อ.เฉลิมชาติ

มานพ

เลขหมู่..... 61520
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี 18 ก.ค. 2549

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มต่อสัญญาณเพลาและรองล้อ
A Study of PWM Inverter Effect on Shaft and Bearing Signal

ผู้จัดทำ

1. นายสมพงษ์ ชื่นเมือง
2. นายธีรพงษ์ เรืองเดช
3. นายนรภัทร พะยอมหอม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของอินเวอร์เตอร์แบบพีดับลิวเอ็มต่อสัญญาณเพลาและรอกัน

นายสมพงษ์	ชินเมือง	45015124
นายธีรพงษ์	เรืองเดช	45015154
นายนรภัทร	พะยอมหอม	45015157
รศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.เฉลิมชาติ	มานพ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547		

บทคัดย่อ

ปัญหานี้พบในระดับนี้เสนอการศึกษาการเกิดขึ้นของสัญญาณเพลาและสัญญาณรอกันที่เกิดขึ้นในมอเตอร์เหนี่ยวนำ การวัดสัญญาณรอกันและเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะกระทำภายใต้แหล่งจ่ายคลื่นไซน์และ PWM อินเวอร์เตอร์ ทั้งนี้ PWM อินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะเป็นการควบคุมแบบ V/F คงที่และมีสัญญาณ มีอคตดูเลตเป็นคลื่นไซน์ ทำการทดสอบที่ความถี่สวิตซ์ 2.9-11.7 kHz การศึกษานี้จะได้นำไปเพื่อเพิ่มความรู้สำหรับการตรวจจับและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นตามมา ทั้งนี้สาเหตุส่วนหนึ่งของความเสียหายของรอกันมาจากแหล่งจ่าย PWM อินเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 380 โวลต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก พิกัด 2 แรงม้าที่ได้ออกแบบสำหรับการทดลอง พบว่าระดับของสัญญาณเพลาและรอกันจะลดลงเมื่อต่อกราวด์

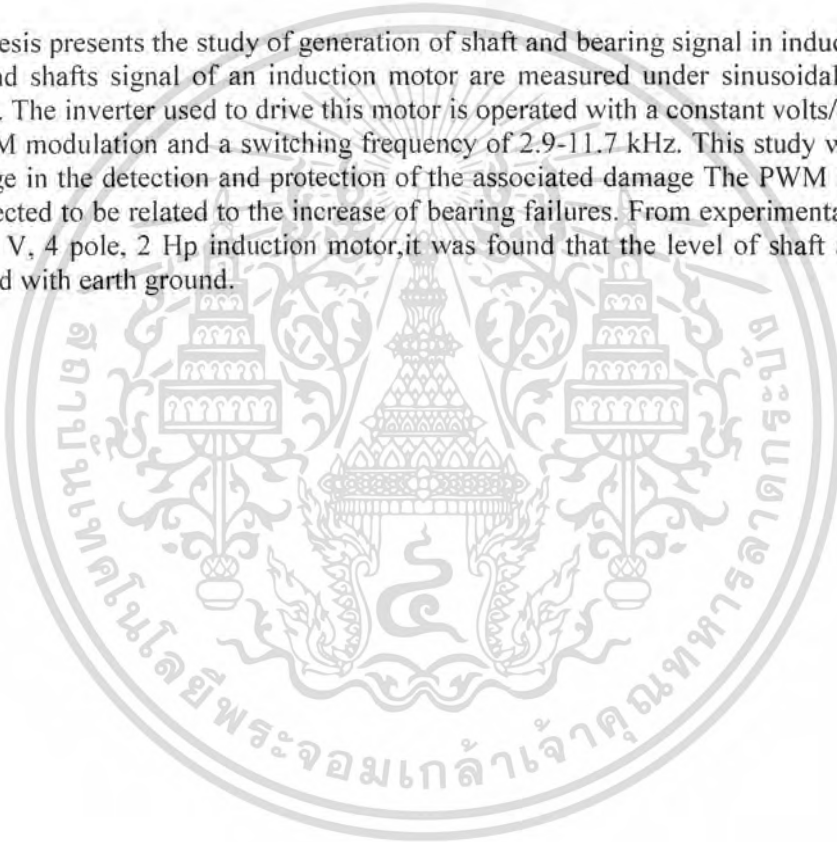
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of PWM Inverter Effect on Shaft and Bearing Signal

Mr.Sompong	Chunmueng	45015124
Mr.Theerapong	Ruangdach	45015154
Mr.Norapat	Payomhom	45015157
Asst. Prof. Dr. Vijit	Kinnares	Advisor
Chalermchat	Manop	Advisor

ABSTRACT

This thesis presents the study of generation of shaft and bearing signal in induction motor. The bearing and shafts signal of an induction motor are measured under sinusoidal and PWM inverter supply. The inverter used to drive this motor is operated with a constant volts/hertz with a sinusoidal PWM modulation and a switching frequency of 2.9-11.7 kHz. This study will increase more knowledge in the detection and protection of the associated damage The PWM inverter has also been suspected to be related to the increase of bearing failures. From experimental results on a 3 phase, 380 V, 4 pole, 2 Hp induction motor, it was found that the level of shaft and bearing signal decreased with earth ground.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ และอาจารย์เฉลิมชาติ มานพ อาจารย์ที่ปรึกษาโปรเจก ที่ได้ให้ความเอาใจใส่ แนะนำและช่วยเหลือเสมอมา และต้องขอบคุณในการให้ความร่วมมือและช่วยจากเพื่อนๆที่ใช้ห้องทดลองด้วยกันและผู้ที่ให้คำแนะนำดีๆในการทดลอง รวมถึงเจ้าหน้าที่คนอื่นๆที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	VI
สารบัญภาพ	IX
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหาที่ทำการทดลอง	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	1
1.4 ลำดับขั้นการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 เพลลาและร่องลื่นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	3
2.1 ลักษณะของเพลลาและร่องลื่นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	4
2.2 ความเสียหายของเพลลาและร่องลื่น	6
บทที่ 3 แรงดันเพลลา กระแสเพลลา แรงดันร่องลื่นและกระแสร่องลื่น	11
3.1 สาเหตุของการเกิดแรงดัน กระแสเพลลาและร่องลื่น	14
3.1.1 ความเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic)	14
3.1.2 Electrostatic	15
3.1.3 External Voltage Supplied to the rotor Winding	16
3.1.4 Magnetic Dissymmetry in an electrical winding	17
3.2 กรณีแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์	18
3.3 กรณีแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์	20
3.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบ 6 ขั้น (Six-step)	20
3.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบ PWM	21
3.4 รูปสัญญาณของ PWM อินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB	26
3.4.1 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์	26
3.4.2 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal)	27
3.4.3 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นคลื่นไซน์ร่วมกับสัญญาณฮาร์มอนิกที่ 3	28
3.5 รูปการเปรียบเทียบสเปกตร้าของสัญญาณอ้างอิงแบบต่างๆ	30
3.5.1 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์	30
3.5.2 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	30
3.5.3 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ร่วมกับสัญญาณฮาร์มอนิกที่ 3	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ชุดทดสอบ	32
4.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง	32
4.2 รูปจริงของชุดทดลอง	33
4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ	36
4.2.2 AC Line	36
4.2.3 โหลด (DC Machine)	36
4.3 ตำแหน่งการทดสอบสัญญาณเพลาและรอกลิ้น	36
4.3.1 ลักษณะการวัดแรงดันเพลา	37
4.3.2 ลักษณะการวัดกระแสเพลา	37
4.3.3 ลักษณะการวัดแรงดันรอกลิ้น	38
4.3.4 ลักษณะการวัดกระแสรอกลิ้น	38
4.4 แหล่งจ่ายที่ใช้ในการการทดสอบ	39
4.4.1 เอซีไลน์	39
4.4.2 เอซีไดรฟ์(อินเวอร์เตอร์แบบ PWM)	39
บทที่ 5 ผลการทดลอง	42
5.1 ทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์	42
5.2 ทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM	44
5.2.1 สัญญาณแรงดันและกระแสเพลา	44
5.2.2 สัญญาณแรงดันและกระแสรอกลิ้น	50
5.3 ทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายไม่สมดุล	56
5.4 ทดสอบเพิ่ม-ลดความถี่ของอินเวอร์เตอร์ (ในช่วง 10-50 Hz)	60
5.5 ทดสอบภายใต้ที่มีจุดต่อลงกราวด์	64
5.6 ทดสอบเปรียบเทียบสัญญาณ PWM กับสัญญาณต่างๆ	67
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	73

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เพลอร์เซ็นต์ความเสียหายของส่วนประกอบต่างๆ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	3
รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	4
รูปที่ 2.3 เพลลาแบบต่างๆของมอเตอร์	5
รูปที่ 2.4 ร่องลื่นแบบดลับลูกปืน	5
รูปที่ 2.5 ร่องลื่นแบบปลอก	6
รูปที่ 2.6 ความเสียหายของเพลลา	7
รูปที่ 2.7 ความเสียหายของเพลลาเนื่องจากผลกระทบจากโหลด	7
รูปที่ 2.8 รูปแบบการติดตั้งร่องลื่นที่ไม้ตี 4 แบบ	8
รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมคาปาซิแตนซ์ของมอเตอร์	9
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูล common mode	9
รูปที่ 2.11 วงแหวนนอกของร่องลื่นชำรุด	10
รูปที่ 2.12 วงแหวนในของร่องลื่นชำรุด	10
รูปที่ 3.1 การเกิดกระแสเพลลาของมอเตอร์	11
รูปที่ 3.2 กระแสเพลลาที่เกิดจากสนามแม่เหล็กตามแกนเพลลาและผ่านร่องลื่น	15
รูปที่ 3.3 กระแสเพลลาที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก	15
รูปที่ 3.4 แรงดันเพลลาที่เกิดจาก Electrostatic	16
รูปที่ 3.5 กระแสเพลลาที่เกิดเนื่องจากแรงดันภายนอกบน โรเตอร์ของเครื่องจักรกล	17
รูปที่ 3.6 กระแสเพลลาแบบไม่สมมาตรในสเตเตอร์หรือ โรเตอร์เกิดโดย แรงดันจากแต่ละด้านของเพลลา	17
รูปที่ 3.7 กระแสร่องลื่นเกิดเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่แกนเพลลาเป็นเหตุให้เกิดความ ไม่สมมาตรของสนามแม่เหล็กในเครื่องจักรกล	18
รูปที่ 3.8 คลื่นไซน์	19
รูปที่ 3.9 สเปกตร้าของคลื่นไซน์	19
รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันเฟส (Van) ของอินเวอร์เตอร์แบบ 6 ชั้น	20
รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (Vab)ของอินเวอร์เตอร์แบบ 6 ชั้น	20
รูปที่ 3.12 สเปกตร้าของรูปคลื่น 6 ชั้น	21
รูปที่ 3.13 สวิตช์โหมคอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกึ่ง	21
รูปที่ 3.14 พื้นฐานสร้างสัญญาณแบบ PWM (ก) ใช้สัญญาณไซน์ตัดกับสัญญาณสามเหลี่ยม (ข) สัญญาณแบบ PWM (ค) สเปกตร้าของสัญญาณ PWM	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.15 รูปคลื่น PWM แบบโอเวอร์มอดูเลชัน	25
รูปที่ 3.16 สเปกตราของรูปคลื่น PWM แบบ โอเวอร์มอดูเลชัน	25
รูปที่ 3.17 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 3 \text{ kHz}$	26
รูปที่ 3.18 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 6 \text{ kHz}$	26
รูปที่ 3.19 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 9 \text{ kHz}$	26
รูปที่ 3.20 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 12 \text{ kHz}$	27
รูปที่ 3.21 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 3 \text{ kHz}$	27
รูปที่ 3.22 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 6 \text{ kHz}$	27
รูปที่ 3.23 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 9 \text{ kHz}$	28
รูปที่ 3.24 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 12 \text{ kHz}$	28
รูปที่ 3.25 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 3 \text{ kHz}$	28
รูปที่ 3.26 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 6 \text{ kHz}$	29
รูปที่ 3.27 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 9 \text{ kHz}$	29
รูปที่ 3.28 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรา(ขวา)เมื่อ $f_s = 12 \text{ kHz}$	29
รูปที่ 3.29 สัญญาณสเปกตราที่ได้จากการขยายเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์	30
รูปที่ 3.30 สัญญาณสเปกตราที่ได้จากการขยายเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	30
รูปที่ 3.31 สัญญาณสเปกตราที่ได้จากการขยายเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ รวมกับสัญญาณฮาร์โมนิกที่ 3	31
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการทดลอง	32
รูปที่ 4.2 ภาพโดยรวมของชุดทดลอง	33
รูปที่ 4.3 ภาพการคัปปลิงระหว่างอินดักชันมอเตอร์กับดีซีเจนเนอเรเตอร์และแปร่งถ่าน ที่ใช้ในการจับสัญญาณ	33
รูปที่ 4.4 ภาพวงจรเรกติไฟเออร์สำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสนาม ของดีซีเจนเนอเรเตอร์	34
รูปที่ 4.5 ภาพหลอดไฟที่ใช้เป็นโหลดในการทดลองโดยต่อจากดีซีเจนเนอเรเตอร์	34
รูปที่ 4.6 ภาพแปร่งถ่านที่ปลายเพลลาอีกด้านหนึ่งที่ใช้ในการจับสัญญาณ	35
รูปที่ 4.7 ภาพกล่องทดลองที่ใช้ในการจับสัญญาณต่างๆ	35
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งในการทดสอบหาค่าต่างๆ	36
รูปที่ 4.9 แปร่งถ่านที่ติดตั้งอยู่กับเพลลา (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง	37
รูปที่ 4.10 วิธีการวัดแรงดันเพลลาโดยวัดที่จุด A กับ B	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 วิธีการวัดกระแสเฟลาโดย Current Probe	37
รูปที่ 4.12 วิธีการวัดแรงดันรอสันโดยวัดที่จุด A หรือ B เทียบกับจุด G	38
รูปที่ 4.13 วิธีการวัดกระแสรอสันโดยเชื่อมต่อจุด A หรือ B เข้ากับจุด G	38
รูปที่ 4.14 สัญญาณแรงดันไล่น์และสเปคตราที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายเอซี	39
รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดันไล่น์และสเปคตราที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ความถี่ $f_s = 2.9 \text{ kHz}$	39
รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันไล่น์และสเปคตราที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ความถี่ $f_s = 5.9 \text{ kHz}$	40
รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดันไล่น์และสเปคตราที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ความถี่ $f_s = 8.8 \text{ kHz}$	40
รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงดันไล่น์และสเปคตราที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ความถี่ $f_s = 11.7 \text{ kHz}$	41
รูปที่ 5.1 รูปสัญญาณแรงดันเฟลา(ซ้าย)และกระแสเฟลา(ขวา)	42
รูปที่ 5.2 รูปสัญญาณแรงดันรอสัน(ซ้าย)และกระแสรอสัน(ขวา)	42
รูปที่ 5.3 สัญญาณแรงดันเฟลา(ซ้าย)และกระแสเฟลา(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 2.9 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ	44
รูปที่ 5.4 สัญญาณแรงดันเฟลา(ซ้าย)และกระแสเฟลา(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 5.9 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ	45
รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงดันเฟลา(ซ้าย)และกระแสเฟลา(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 8.8 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ	46
รูปที่ 5.6 สัญญาณแรงดันเฟลา(ซ้าย)และกระแสเฟลา(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 11.7 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ	47
รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงดันเฟลาพิกัด โหลด 100% ที่ความถี่ (f_s) ต่างๆ	49
รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงดันรอสัน(ซ้าย)และกระแสรอสัน(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 2.9 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ	50
รูปที่ 5.9 สัญญาณแรงดันรอสัน(ซ้าย)และกระแสรอสัน(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 5.9 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ	51
รูปที่ 5.10 สัญญาณแรงดันรอสัน(ซ้าย)และกระแสรอสัน(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 8.9 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ	52
รูปที่ 5.11 สัญญาณแรงดันรอสัน(ซ้าย)และกระแสรอสัน(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 11.7 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.12 สัญญาณแรงดันรองคลื่นพิกัด โหลด 100% ที่ความถี่ (fs) ต่างๆ	55
รูปที่ 5.13 สัญญาณแรงดันเพลา(ซ้าย)และกระแสเพลา(ขวา)เมื่อแหล่งจ่ายคลื่น ไซน์เกิดสภาวะแรงดันสูงกว่าปกติ Van=220V, Vbn=238VและVcn=238V	56
รูปที่ 5.14 สัญญาณแรงดันเพลา(ซ้าย)และกระแสเพลา(ขวา)เมื่อแหล่งจ่ายคลื่น ไซน์เกิดสภาวะแรงดันสูงกว่าปกติ Van=230V, Vbn=230VและVcn=220V	57
รูปที่ 5.15 สัญญาณแรงดันเพลา(ซ้าย)และกระแสเพลา(ขวา)เมื่อแหล่งจ่ายคลื่น ไซน์เกิดสภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ Van=220V, Vbn=210VและVcn=210V	58
รูปที่ 5.16 สัญญาณแรงดันเพลา(ซ้าย)และกระแสเพลา(ขวา)เมื่อแหล่งจ่ายคลื่น ไซน์เกิดสภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ Van=220V, Vbn=204VและVcn=204V	59
รูปที่ 5.17 สัญญาณการเพิ่มความถี่มูลฐานที่อินเวอร์เตอร์มี fs = 2.9 kHz	60
รูปที่ 5.18 สัญญาณการเพิ่มความถี่มูลฐานที่อินเวอร์เตอร์มี fs = 5.9 kHz	61
รูปที่ 5.19 สัญญาณการเพิ่มความถี่มูลฐานที่อินเวอร์เตอร์มี fs = 8.8 kHz	62
รูปที่ 5.20 สัญญาณการเพิ่มความถี่มูลฐานที่อินเวอร์เตอร์มี fs = 11.7 kHz	63
รูปที่ 5.21 สัญญาณแรงดันเพลา ก่อนและหลังต่อสวิตซ์ลงกราวน์ เมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ fs = 2.9 kHz(บน)และ fs = 8.8 kHz(ล่าง)	64
รูปที่ 5.22 สัญญาณกระแสเพลา ก่อนและหลังต่อสวิตซ์ลงกราวน์ เมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ fs = 2.9 kHz(บน)และ fs = 8.8 kHz(ล่าง)	65
รูปที่ 5.23 สัญญาณกระแสรองคลื่น ก่อนและหลังต่อสวิตซ์ลงกราวน์ เมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ fs = 2.9 kHz(บน)และ fs = 8.8 kHz(ล่าง)	66
รูปที่ 5.24 สัญญาณจากการชุมเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ PWM กับแรงดันเพลา ที่ fs = 5.9 kHz	67
รูปที่ 5.25 สัญญาณจากการชุมเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ PWM กับกระแสเพลา ที่ fs = 5.9 kHz	68
รูปที่ 5.26 สัญญาณจากการชุมเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ PWM กับแรงดันรองคลื่น ที่ fs = 5.9 kHz	69
รูปที่ 5.27 สัญญาณจากการชุมเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ PWM กับกระแสรองคลื่น ที่ fs = 5.9 kHz	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 สเปกตรารวมอนิกที่เกิดขึ้นในแรงดันโตนซ์ของเทคนิค PWM
ที่มีสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ ($m_a \leq 1$)

24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหาที่ทำการทดลอง

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในเพลลาของเครื่องจักรกลหมุนได้เกิดขึ้นพร้อมกับการได้นำอินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายต้นกำลัง นั่นคือเป็นสาเหตุให้รอกลิ้น (bearing) และซีล (seal) เสื่อมสภาพ โดยปกติปัญหาดังกล่าวจะสัมพันธ์กับการฉนวนที่แย่หรือไม่มีการฉนวนของรอกลิ้น ทั้งนี้ผู้ออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าก็ไม่ได้คาดหวังว่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าในเพลลาจะเกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ได้ออกแบบขึ้น กล่าวคือการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงเรื่องดังกล่าวนี้ผลของปรากฏการณ์ดังกล่าวในยุคหลัง ค.ศ.1985 ที่แรงดันแบบ PWM (Pulse Width Modulate) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทำให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าต้องทนกับหลายสถานะที่สำคัญได้แก่ ความถี่ที่เพิ่มสูงขึ้นรวมถึงแรงดันและกระแสเพลลาแรงดันและกระแสรอกลิ้นที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการเกิดขึ้นของสัญญาณแรงดันเพลลา กระแสเพลลา แรงดันรอกลิ้นและกระแสรอกลิ้น โดยได้ทำการทดลองภายใต้สภาวะดังต่อไปนี้

- 1.2.1 สภาวะแหล่งจ่ายไม่สมดุล
- 1.2.2 สภาวะความผิดปกติของเครื่องจักรกล
- 1.2.3 สภาวะที่มีและไม่มีกรต่อสกรวด์

1.3 ขอบเขตของปริญญาพันธ

- 1.3.1 สร้างชุดทดสอบสำหรับการศึกษาสัญญาณแรงดันเพลลา กระแสเพลลา แรงดันรอกลิ้นและกระแสรอกลิ้น
- 1.3.2 ศึกษาพฤติกรรมของสัญญาณแรงดันเพลลา กระแสเพลลา แรงดันรอกลิ้นและกระแสรอกลิ้น
- 1.3.3 ทดสอบกับแหล่งจ่ายคลื่นไซน์กรณีสภาวะแรงดันไม่สมดุล
- 1.3.4 ทดสอบกับแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่การสวิตช์
- 1.3.5 ศึกษาหาวิธีการลดสัญญาณแรงดันเพลลา กระแสเพลลา แรงดันรอกลิ้นและกระแสรอกลิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ลำดับขั้นการดำเนินโครงการ

ตอนที่ 1 - ค้นคว้าข้อมูลและศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีของแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในรอกสัน และเพลลา

- จัดทำชุดทดลอง ประกอบด้วยมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและการควบคุมโหลด
- ตั้งสมมติฐานการทดลอง
- ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบสัญญาณที่เกิดขึ้น ว่าสอดคล้องกับทฤษฎีหรือไม่

ตอนที่ 2 - ทำการทดลองเพิ่มเติมกรณีแหล่งจ่ายแรงดันคลื่นไซน์ไม่สมดุล แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์ PWM ที่ความถี่การสวิตซ์ซึ่งต่างกัน

- หาข้อสรุปถึงพฤติกรรมของสัญญาณดังกล่าวพร้อมทั้งแนวทางการลดสัญญาณดังกล่าว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

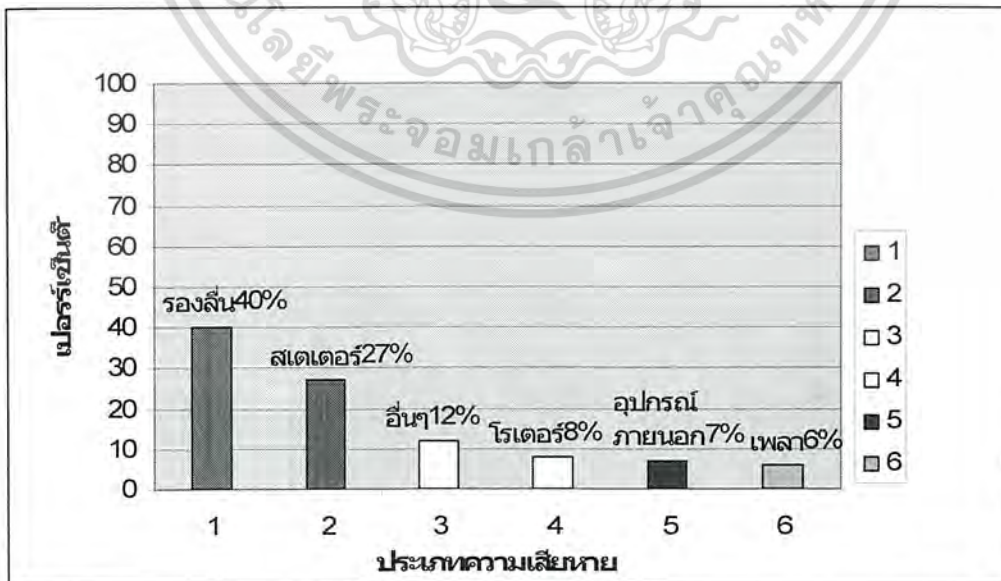
บทที่ 2

เพลลาและรอนถิ่นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีโครงสร้างที่ได้เปรียบมอเตอร์ดีซีอยู่หลายประการด้วยกัน เช่น ใช้เพียงแหล่งจ่ายเดียวในการขับเคลื่อนมีความแข็งแรงสูง การบำรุงรักษาต่ออย่างไรก็ตามปัญหาที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับความเสียหาย ก็เนื่องมาจากแหล่งจ่ายไฟที่ควบคุมการทำงานเช่น การควบคุมความเร็ว อุปกรณ์โซลิดสเตต (Solid-state device) ที่นำมาสร้างเป็นแหล่งจ่ายไฟจะถูกควบคุมด้วยความถี่สูงเพื่อลดค่าการสูญเสียที่จะเกิดขึ้นในตัวเครื่องจักรกลไฟฟ้า แรงดันที่ได้จากอุปกรณ์โซลิดสเตตหรือเรียกรวมเป็นแหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์ จะจ่ายแรงดันที่มีลักษณะเป็นขั้น (Step)หรือเป็นพัลส์ที่รู้จักกันดีในชื่อของแหล่งจ่ายไฟแบบ PWM ซึ่งแหล่งจ่ายไฟอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ดังกล่าวจะมีปรากฏการณ์ต่างๆกระทำกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ามากกว่าแหล่งจ่ายไฟที่เป็นคลื่นไซน์ดังนี้

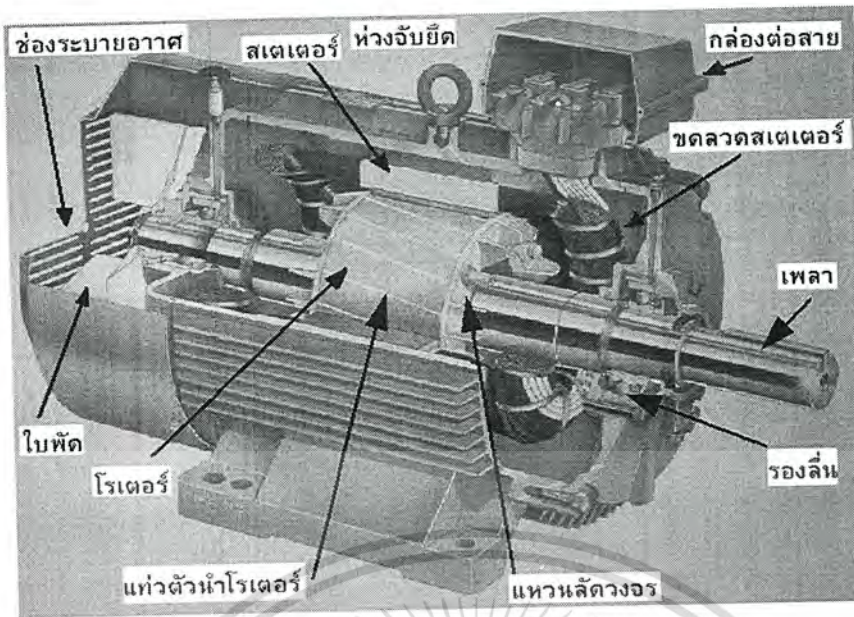
- เกิดแรงดันเหนี่ยวนำใน โครงของมอเตอร์
- เกิดกระแสไหลจากโครงลงกราวด์
- เกิดแรงดันเพลลาและกระแสเพลลา

จากรายงานที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายของมอเตอร์ พบว่าสาเหตุสำคัญหลักๆที่ทำให้มอเตอร์เกิดการชำรุดเสียหาย มีรายละเอียดของความเสียหายทั้งหมดแสดงในรูปที่ 2.1 จากรูปแสดงให้เห็นว่ารอนถิ่นจะเป็นจุดอ่อนอันดับที่ 1 ที่มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละประมาณ 40 ที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเกิดการชำรุดเสียหาย ทั้งนี้การเกิดขึ้นของแรงดันเหนี่ยวนำใน โครงของมอเตอร์จนถึงการเกิดแรงดันและกระแสเพลลาจะเป็นสาเหตุเริ่มต้นที่ทำให้เกิดปัญหาต่างๆกับรอนถิ่น



รูปที่ 2.1 เปอร์เซนต์ความเสียหายของส่วนประกอบต่างๆในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

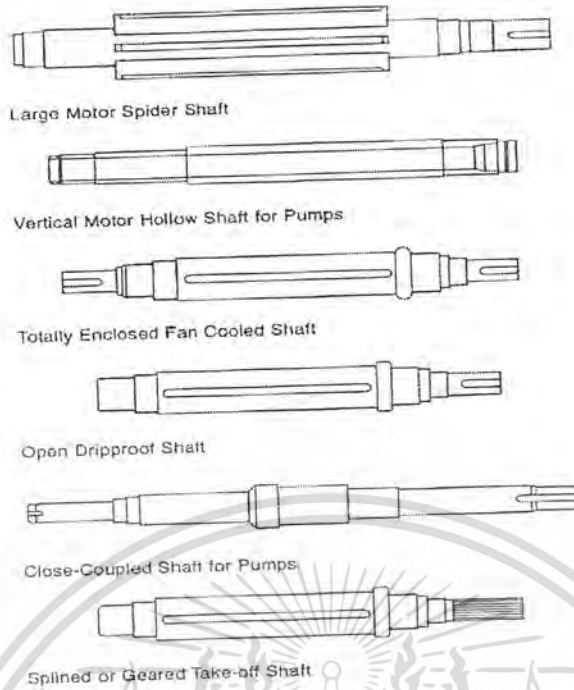


รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

2.1 ลักษณะของเฟลาและร่องลื่นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

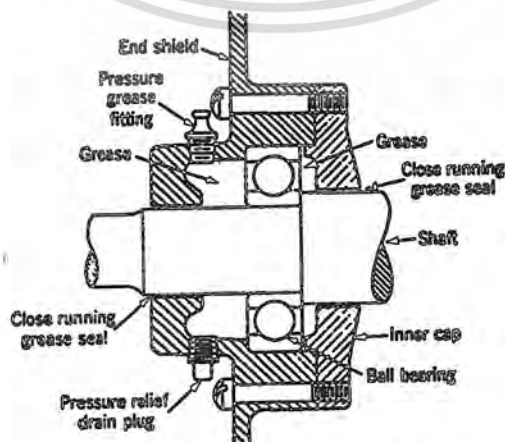
เฟลาโรเตอร์โดยปกติแล้วจะทำมาจากเหล็ก 1,045 ซึ่งเป็นเกรดที่มีความแข็งแรงสูงหรือเหล็กที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน รวมถึงวัสดุอื่นๆ สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ที่พิเศษ ตัวอย่างเช่น CR-MO 1,442 สแตนเลส 416 และคาร์บอน 1,144 ขนาดของเฟลาจะออกแบบโดยพิจารณาจากแรงบิดทั้งในสภาวะปกติและสภาวะชั่วคราว (Transient) โรเตอร์จะต้องไม่ยืดและจะต้องไม่สัมผัสกับสเตเตอร์ขณะที่เริ่มเดินและขณะเดิน (Startup of running) รูปที่ 2.3 แสดงเฟลาของมอเตอร์หลายรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



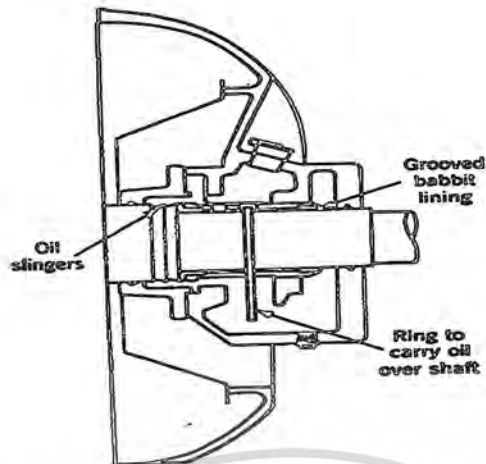
รูปที่ 2.3 เพลานแบบต่างๆของมอเตอร์

ปกติแล้วโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตมอเตอร์จะเลือกใช้รอกันอยู่ 2 ชนิดได้แก่ รอกันแบบปลอก (Sleeve bearing) และรอกันแบบลูกกลิ้ง (Rolling bearings) หรือรอกันแบบตลับลูกปืน ซึ่งถ้าพูดถึงเรื่องของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นแล้ว รอกันแบบตลับลูกปืนจะมีมากกว่าแบบรอกันแบบปลอก ซึ่งสาเหตุของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากรอกันแบบปลอกนี้จะมีสาเหตุมาจากพื้นผิวของปลอกไม่เรียบ การหล่อลื่น ความไวของฟิล์มน้ำมันในรอกัน และความถี่ของเครื่องจักรกล ส่วนฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากรอกันแบบตลับลูกปืน ได้แก่ ลูกปืน (Ball) รางสำหรับใส่ลูกปืนที่มีความกว้างไม่เท่ากัน ผงฝุ่น (ซึ่งรวมถึงวัตถุที่แปลกปลอมด้วย) สถานะการหล่อลื่น การหมุน โหลด อุณหภูมิ และความสมดุล เป็นต้น



รูปที่ 2.4 รอกันแบบตลับลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ร่องลื่นแบบปลอก

ร่องลื่นแบบปลอกนิยมนำมาใช้ในมอเตอร์ขนาดใหญ่ ที่มีความเร็วสูงหรือมีโหลดมากๆ ซึ่งร่องลื่นแบบนี้จะมีอายุการใช้งานนานและยังมีเสียงเบากว่าแบบอื่น รูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 แสดงร่องลื่นแบบตลับลูกปืนและแบบปลอกตามลำดับ ในเรื่องของศูนย์กลางแม่เหล็กบนร่องลื่นแบบปลอก โดยปกติแล้วเมื่อโรเตอร์อยู่ในแนวที่เหมาะสมจะทำให้ผลรวมของแรง (ศูนย์กลางแม่เหล็ก) ในทิศทางตามแนวแกนมีค่าเป็นศูนย์ แต่เมื่อโรเตอร์ไม่อยู่ในแนวอันเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น ร่องลื่นชำรุดมอเตอร์รับโหลดมากเกินไป ฯลฯ และรวมถึงการจัดวางร่องลื่นด้วย ก็จะทำให้ศูนย์กลางแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปทำให้ผลรวมของแรงในทิศทางตามแนวแกนมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากศูนย์กลางทางกลกับศูนย์กลางแม่เหล็กจะไม่ตรงกันเสมอไป ในการเริ่มเดินของมอเตอร์กรณีจุดศูนย์กลางทางกลกับศูนย์กลางแม่เหล็กไม่ตรงกันจะทำให้โรเตอร์แกว่ง (Hunt) หรือสั่น (Oscillate) โดยปกติแล้วร่องลื่นแบบปลอกนี้ ศูนย์กลางแม่เหล็กสามารถกำหนดได้ที่เพลลาซึ่งโรเตอร์จะถูกกำหนดตำแหน่งที่จุดซึ่งเหมาะสมที่สุดของมันภายในช่องอากาศ และศูนย์กลางแม่เหล็กจะถูกกำหนดอยู่ที่เพลลาที่ต่อเมื่อมอเตอร์ทำงานที่แรงดันซึ่งบอกไว้ที่ป้ายฉลาก

2.2 ความเสียหายของเพลลาและร่องลื่น

แรงดันและกระแสในเพลลาจะทำให้เกิดความล้มเหลวและความเสียหายของเพลลา ซึ่งก็จะทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีอายุการใช้งานที่สั้นลง รูปที่ 2.6 และ 2.7 แสดงตัวอย่างปัญหาของเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



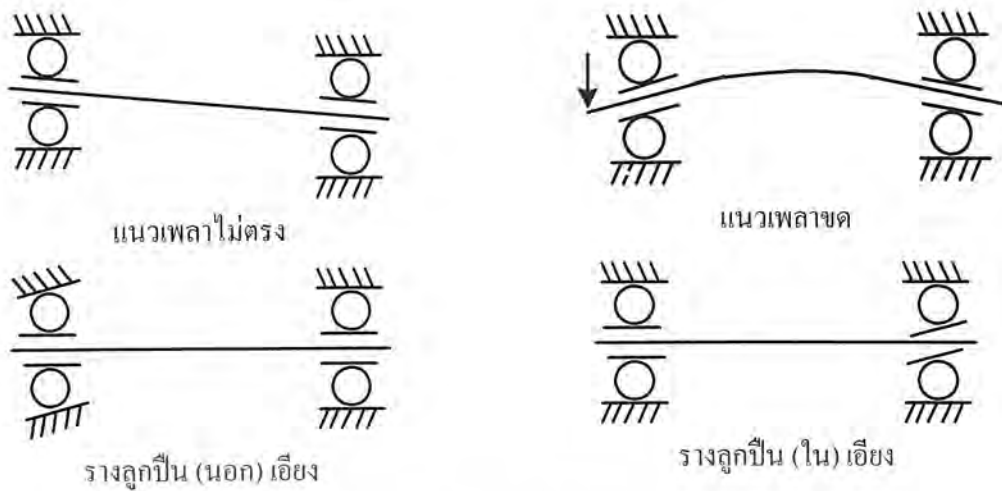
รูปที่ 2.6 ความเสียหายของเพลลา



รูปที่ 2.7 ความเสียหายของเพลลาเนื่องจากผลกระทบทจากไหลด

ส่วนประกอบของรองลื่นแบบดรัมลูกปืนโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยแหวนอยู่ 2 วง คือ วงแหวนนอก (Outer) และวงแหวนใน (Inner) ระหว่างกลางจะมีลูกบอลสำหรับรับแรงเพื่อความสมดุลกัน การเสียหายจะเริ่มจากรอยแยกเล็ก ๆ บนผิวของรางวิ่งและลูกปืน ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาตามมาคือ เกิดการสั่นสะเทือนและมีเสียงดัง ความเครียดดังกล่าวที่เกิดขึ้นในรองลื่นอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดความล้าและเป็นสาเหตุทำให้ลูกปืนแตกได้ โดยเริ่มต้นจากการสูญเสียสารหล่อลื่นในรองลื่นไปเรื่อยๆ และการได้รับไหลดเพียงส่วนหนึ่งส่วนใดก็จะมีผลทำให้เกิดความฝืดในขณะที่รองลื่นหมุน ปกติแล้วความฝืดจะมีหลายสาเหตุได้แก่ ความสกปรก การเกิดสนิม การใช้สารหล่อลื่นที่ไม่เหมาะสม การติดตั้งไม่ถูกวิธี การเกิดกรด ความสกปรก การเกิดสนิม (จะเป็นตัวเร่งให้รองลื่นเกิดความเสียหายเพราะไปทำความเสียหายให้กับสารหล่อลื่น การเกิดสนิมมีสาเหตุมาจากความเป็นกรด) สารหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพ การไหลออกของสารหล่อลื่นตอนติดตั้ง ผลจากการทำปฏิกิริยาเคมีซึ่งที่กล่าวมานี้จะทำให้เกิดความเสียหายแก่รองลื่นได้ การมีสารหล่อลื่นมากไปหรือน้อยไป ก็อาจจะทำให้รองลื่นไม่หมุนตามที่ได้ออกแบบไว้ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนที่มากเกินไปเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการหล่อลื่นลดน้อยลง ทำให้เกิดความเสียหายแก่รองลื่นได้ โดยความเสียหายของลูกปืนจะเป็นสาเหตุของการสั่นสะเทือน รูปที่ 2.8 แสดงการวางรองลื่นที่ไม่ดี 4 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 รูปแบบการติดตั้งร่องลื่นที่ไม่ดี 4 แบบ

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนจะรุนแรงเท่าใดนั้น มีสาเหตุมาจากกระแส Electric Discharge Machining (EDM) ที่เกิดจากฟลักเตอร์หลายตัว พื้นที่ผิวสัมผัสประกอบไปด้วยพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอของลูกปืนหรือโรลเลอร์และร่องของตลับลูกปืน การหาว่ากระแสเท่าไรที่สามารถไหลได้โดยที่ไม่ทำให้ตลับลูกปืนร้อนเกินไป ในขณะที่มอเตอร์หยุดหมุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสขึ้นและตลับลูกปืนมีความต้านทานต่ำขณะที่มอเตอร์เร่งความเร็วขึ้น (มากกว่า 10% ของความเร็วที่พิกัด) ลูกปืนในตลับลูกปืนจะลอยอยู่ในฟิล์มน้ำมัน ค่าความต้านทานของฟิล์มน้ำมันนี้ ขึ้นอยู่กับค่าความหนาและชนิดของสารหล่อลื่นที่ใช้

เมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีความต้านทานสูงและตลับลูกปืนอยู่ในสภาวะลอยอยู่ในฟิล์มน้ำมัน คุณลักษณะของวงจรสมมูลจะเปลี่ยนจากตัวต้านทานเป็นคาปาซิเตอร์ ความไม่สม่ำเสมอของผิวของตลับลูกปืน สามารถเจาะฟิล์มน้ำมันให้ทะลุและเกิดการดีสชาร์จของโรเตอร์ (การดีสชาร์จเกิดจากโลหะกับ โลหะสัมผัสกันที่ระดับของแรงดันต่ำและทำให้เกิดรอยเล็กๆที่ผิวของตลับลูกปืน)

ตลับลูกปืนที่คุณภาพดี จะเกิดการดีสชาร์จที่แรงดันต่ำน้อยมากๆ ทำให้โรเตอร์เกิดการชาร์จประจุในช่วงเวลาที่ยาวนานและเกิดในระดับแรงดันสูง โดยทั่วไปตลับลูกปืนคุณภาพต่ำจะชาร์จประจุมากกว่า 80% ของเวลาทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของฟิล์มน้ำมันตลับลูกปืนคุณภาพต่ำจะชาร์จประจุน้อยกว่า 5% ของเวลาทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่การสัมผัสกันของโลหะที่โรเตอร์เพิ่มขึ้นเข้าใกล้ระดับแรงดัน (V_{th}) ของฟิล์มน้ำมันระหว่างลูกปืนหรือโรลเลอร์และร่องของตลับลูกปืนค่า dielectric strength ของฟิล์มน้ำมันจะถูกเพิ่มขึ้นด้วยที่จุดนี้จะเกิดกระแส EDM ทำลายตลับลูกปืนและเกิดการอาร์กขึ้น นอกจากนี้สิ่งที่สังเกตได้อีกประการหนึ่งนั่นคือระยะเวลาการสัมผัสกันของตลับลูกปืนกับด้านนอกของตลับลูกปืนจะนานกว่า เวลาในการสัมผัสกันระหว่างลูกปืนกับร่องด้านในของตลับลูกปืนทำให้การสึกของตลับลูกปืนเนื่องจากกระแส EDM และกระแส dv/dt ที่เกิดขึ้นมากกว่าร่องด้านนอกของตลับลูกปืน

กระแส EDM ที่เกิดจากการขับมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM นั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆดังนี้

1. การกระตุ้น (Excitation) ซึ่งเกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันลงกราวด์ (V_{sg})

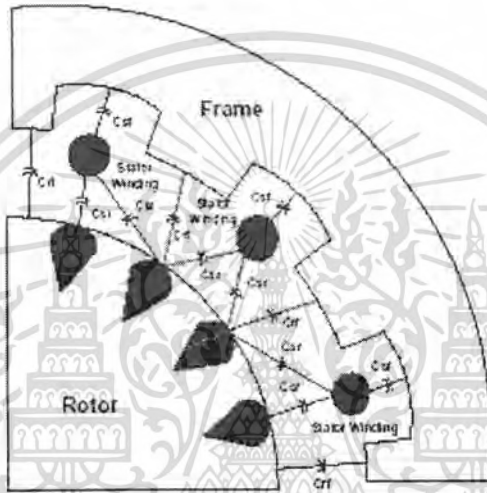
2. ค่าคาปาซิทีฟที่เกิดขึ้นทางกระแสระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ (Csr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

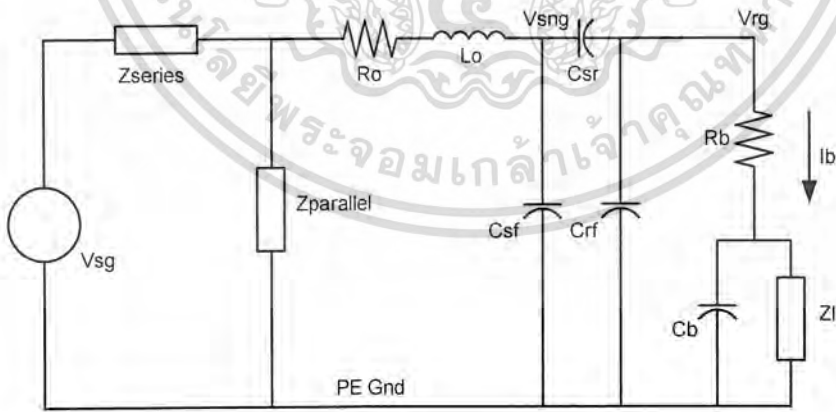
3. มีแรงดันเกิดขึ้นในโรเตอร์เพียงพอ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคาปาซิแตนซ์ของตลับลูกปืน (Cb)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงมี 2 แบบซึ่งทำให้เกิดการกระทบกระเทือนต่อค่า capacitive bearing current คือ

การเปลี่ยนแปลงทางกลแรงดันที่แกนหมุนและกระแสที่ตลับลูกปืนนั้นจะขึ้นอยู่กับค่า Cb อิมพีแดนซ์ของตลับลูกปืนจะกลายเป็นค่าคาปาซิทิฟเพียงอย่างเดียว เมื่อเกิดฟิล์มน้ำมันขึ้นระหว่างช่องว่างของลูกปืนและช่องของตลับลูกปืนค่าคาปาซิแตนซ์นั้นขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มน้ำมันซึ่งความหนาของฟิล์มน้ำมันขึ้นอยู่กับรัศมีของโหลด ความเร็ว อุณหภูมิ ค่า dielectric strength ของสารหล่อลื่นและความหนืดของสารหล่อลื่น พื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับโหลดที่ตลับลูกปืนรับเพิ่มขึ้นประมาณครึ่งหนึ่งของกำลัง (power)



รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมคาปาซิแตนซ์ของมอเตอร์

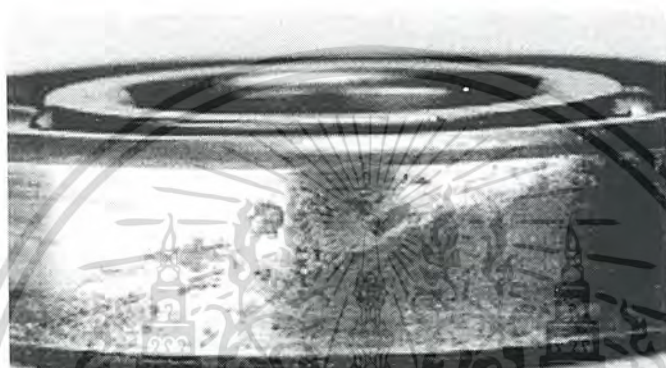


รูปที่ 2.10 วงจรสมมูล common mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ของระบบรูปที่ 2.9 และ 2.10 ประกอบด้วยค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างสเตเตอร์และเฟรม (Csf) Zero Sequencr Impedance ของขดลวดที่สเตเตอร์ (Lo และ Ro) ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างโรเตอร์กับเฟรม (Crf,Csr และ Cb) Z1 คือความผิดปกติทางกลและทางไฟฟ้าและการสั่นเลือกตลับลูกปืน

การศึกษาการเกิดขึ้นของแรงดันและกระแสเพลาดังกล่าวจะนำไปสู่การป้องกัน ลด และการไม่ให้เกิดขึ้นเลยในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีประโยชน์ทำให้ช่วยลดค่าการบำรุงรักษาในตัวขมอมอเตอร์เหนี่ยวนำที่สำคัญได้แก่ กรณีปัญหาของรองลื่น ที่พบบ่อยคือลูกปืนแตก(ปัญหาของรองลื่นจะตามมาหากเกิดแรงดันและกระแสเพล่า) ถ้าปัญหาดังกล่าวถูกทำให้ลดลงได้ ก็จะทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นกว่าเดิม รูปที่ 2.11และ 2.12 แสดงตัวอย่างปัญหาของรองลื่น



รูปที่ 2.11 วงแหวนนอกของรองลื่นชำรุด



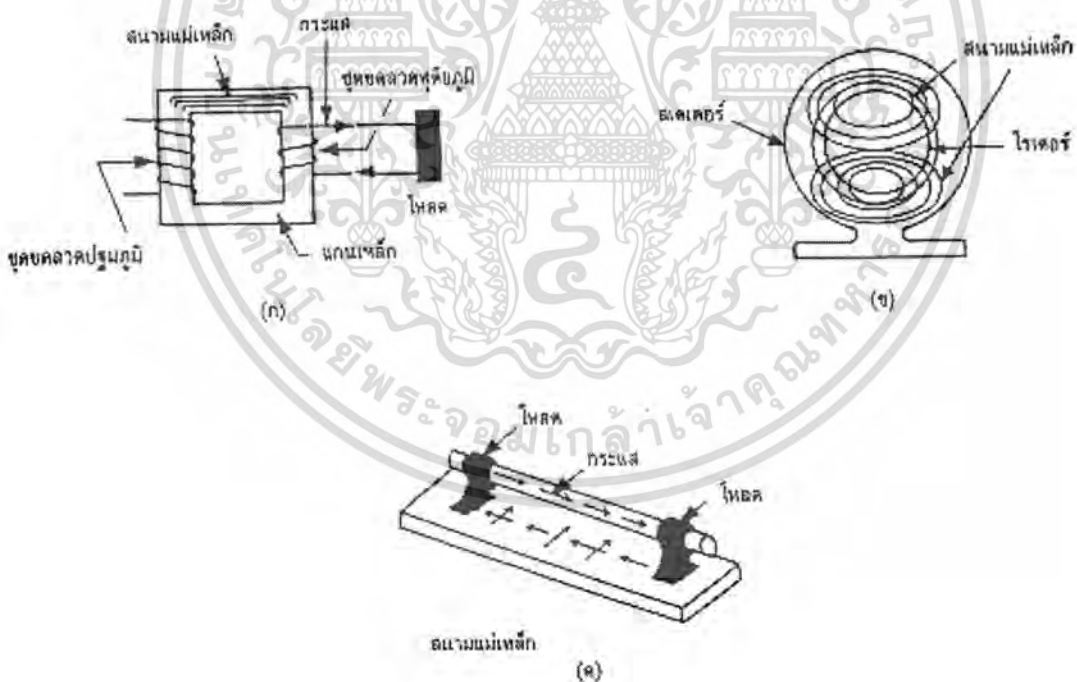
รูปที่ 2.12 วงแหวนในของรองลื่นชำรุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นในเพลาและรอกลื่น

กระแสเพลามอเตอร์เกิดขึ้นโดยหลักการแบบเดียวกันที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อป้อนกระแสสลับเข้าไปที่ชุดขดลวดปฐมภูมิในรูปที่ 3.1(ก) จะเกิดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆ กลับไปกลับมาทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนชุดขดลวดทุติยภูมิถ้ามีโหนดต่ออยู่ ก็เกิดกระแสในชุดขดลวดทุติยภูมิสำหรับกรณีของเครื่องจักรกลหมุนดังรูปที่ 3.1 (ข) มอเตอร์ที่มีช่องอากาศไม่สมมาตรสนามแม่เหล็กนี้ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นบนเพลามอเตอร์ ซึ่งเปรียบเสมือนกับเป็นชุดขดลวดทุติยภูมิรอบเดียวของหม้อแปลงในรูปที่ 3.1(ก)กระแสจะมีทางเดินโดยเริ่มจากโรเตอร์หรือเพลาผ่านรอกลื่นและผ่าน โครงสเตเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.1(ค)สนาม แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากผลของช่องอากาศที่ไม่สมมาตรนี้เป็นคนละส่วนกับที่ทำให้มอเตอร์หมุนซึ่งจะเป็นไปได้ยาก ที่จะปรับแต่งให้โรเตอร์มีช่องอากาศหรือวงจรแม่เหล็กที่สมมาตรกัน อย่างสมบูรณ์โดยเฉพาะกับมอเตอร์ขนาดใหญ่และถ้าคิดในด้านเศรษฐกิจด้วยแล้วก็ไม่คุ้มที่จะทำเช่นนั้น เพราะจะทำให้มอเตอร์มีราคาโดยรวมสูงขึ้น



รูปที่ 3.1 การเกิดกระแสเพลามอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนเพลลาของมอเตอร์ แรงดันนี้จะไม่อันตราย แต่ถ้ามีการทำให้ครบวงจรจะมีกระแสไหล ซึ่งถ้าสูงจนมีความสำคัญต้องนำมาพิจารณาด้วยเช่นเดียวกับกระแสที่เกิดจากการลัดวงจรเบตเตอร์ขนาด 12 โวลต์ซึ่งจะเห็นว่าสามารถทำให้สายไฟร้อนจนลุกแดงได้

องค์ประกอบส่วนที่หมุนได้หรือลูกปืนของรองคลื่นอาจเสียหายได้ จากอิทธิพลของกระแสเพลลา มอเตอร์ที่ไหลวนอยู่ กระแสนี้จะมีความหนาแน่นสูงมากตรงบริเวณรอยสัมผัสที่มีขนาดเล็กกระแสที่มีความหนาแน่นสูงนี้จะทำให้เกิดผลเช่นเดียวกับที่เกิดจากเครื่องเชื่อมแบบจุด กระแสขณะต่อวงจรและกระแสขณะตัดวงจรที่เกิดขึ้นซ้ำๆ ซากๆ ขณะที่เพลลาหมุนอยู่จะทำให้เกิดอาร์กทางไฟฟ้า ซึ่งจะกัดกร่อนผิวของโลหะ เมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นแล้วอาการดังกล่าวก็จะลุกรวดเร็วขึ้น จากผลของผิวโลหะที่ไม่เรียบสม่ำเสมอและจากการอาร์กจนทำให้รองคลื่นวิบัติเสียหายใช้งานไม่ได้

ปรากฏการณ์ของแรงดันไฟฟ้าที่แกนหมุนของมอเตอร์ (shaft voltages) ที่ทำให้เกิดกระแสไหลวนที่แกนหมุน (circulating shaft current) เป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1920 เมื่อมอเตอร์ทำงานด้วยกำลังไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นซายน์แรงดันที่แกนหมุนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของ flux linkage การเกิด linkage มีความสัมพันธ์กับการที่ฟลักซ์ไม่สมดุล ซึ่งมีสาเหตุมาจาก

- โรเตอร์หมุนไม่เป็นวงกลม
- ช่องว่างระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์
- รุระบายความร้อนตามแนวแกนในสเตเตอร์หรือในโรเตอร์
- รูสลักที่แกน (shaft keyway)
- Support arms ของแกนโรเตอร์
- รอยต่อระหว่างชิ้นส่วน
- คุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็ก
- แหล่งจ่ายที่ไม่สมดุล
- เกิดทรานเซียน (transient) ขึ้น

แรงดันที่แกนหมุนของมอเตอร์ถ้าเกินกว่า 300 mV นั้นต้องใช้ตัวลัดลูกปืนชนิดที่เป็นฉนวน เพื่อกันไม่ให้กระแสไหลครบวงจร และป้องกันไม่ให้ตัวลัดลูกปืน (bearing) เสียหายโดยทั่วไปปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นกับเครื่องจักรขนาดใหญ่เท่านั้น โดยปกติจะเลือกใช้ตัวลัดลูกปืนแบบ Opposite Drive End (ODE) ถ้าตัวลัดลูกปืนแบบ Drive End (DE) เป็นฉนวน โหลดที่มอเตอร์ขับเคลื่อนจะมีทางเดินไฟฟ้าที่สมบูรณ์ ทำให้กระแสไหลครบวงจรได้

ชุดไดรฟ์แบบ PWM เป็นสาเหตุของการเพิ่มกระแสไหลวนมีผลกับเส้นแรงแม่เหล็กความถี่สูงซึ่งเกิดจากกระแส common-mode ซึ่งไปคล้องสเตเตอร์ โรเตอร์และตัวลัดลูกปืนทำให้เกิดผลกระทบทางอินดักทีฟ (inductive) มากกว่าคาปาซิทีฟ (capacitive) มอเตอร์จะเกิดการไม่สมมาตรขึ้นที่ความถี่สูง เพราะกระแส capacitively coupled ความถี่สูงจะเกิดขึ้นจำนวนมากในตำแหน่งของรอบแรกของขดลวดภายในสลอต ดังนั้นการควบคุมมอเตอร์แบบ random-wound ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจึงไม่สามารถทำได้ดีเพราะเกิดการสมมาตรในกรณีที่มีความถี่ต่ำและจะไม่สมมาตรในกรณีความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดไดรฟ์แบบใช้ Bipolar Junction Transistors (BJTs) หรือ (IGBTs) เป็นสาเหตุของการเกิด กระแส Electric Discharge Machining (EDM) อินเวอร์เตอร์แบบ PWM เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดค่า capacitive coupling ระหว่างขดลวดของสเตเตอร์โรเตอร์และ โคร่งของสเตเตอร์กระแส common-mode ไม่สามารถไหลวนได้ในมอเตอร์แต่สามารถไหลลงกราวด์ได้ดังนั้นทางเดินของกระแสลงกราวด์ต้องผ่านตัว ถูกป้อนทั้งคู่ของมอเตอร์ คือ ตัวลดับถูกป้อนของโหมดหรือตัวลดับถูกป้อนของอุปกรณ์ช่วยต่างๆ

เราสามารถค้นหาสาเหตุของการเกิดแรงดันไฟฟ้าที่แกนหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ PWM ได้ซึ่งจาก ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ เราสามารถหาวิธีการลดผลกระทบที่ทำให้เกิดความเสียหาย

ในทางความคิดนั้นเราสามารถค้นหาสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นของตัวลดับถูกป้อนได้ อย่างไรก็ตาม ใ้ก้อ ตามตัวลดับถูกป้อนที่ถูกติดตั้งใช้งานแล้ว และมีการบำรุงรักษาใช้งานตามปกตินั้นเราอาจจะไม่พบเห็นปัญหาที่ เกิดขึ้นได้ขณะตรวจสอบและเป็นการยากที่จะจัดการกับต้นเหตุของความเสียหายที่เกิด

รอยความเสียหายของตัวลดับถูกป้อนจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากไฟฟ้าประการแรกคือ การเกิดร่องขึ้นในตัวลดับถูกป้อนโดยกระแส EDM ทำให้เกิดรอยเล็กๆที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าขึ้นในตัวลดับ ถูกป้อน ระยะห่างของรอยที่เกิดขึ้นนี้เท่ากับช่องว่างของถูกป้อนของตัวลดับถูกป้อน รอยเล็กๆที่มองด้วยตาเปล่าไม่ เห็นนี้ เป็นสาเหตุของความสั่นสะเทือนที่เล็กน้อยมากและค่อยๆแรงมากขึ้น ซึ่งความสั่นสะเทือนนี้เราทราบค่า ได้จากการวัดและวิเคราะห์ความสั่นสะเทือนถูกป้อนในตัวลดับถูกป้อนซึ่งส่วนที่รับแรงจะตกลงในตัวลดับถูกป้อนด้วยตา เปลาไม่เห็นนี้ และจะค่อยๆดันเอาสารหล่อลื่นในตัวลดับถูกป้อนออกไปสารหล่อลื่นที่ถูกดันออกไปนี้จะทำให้ค่า ความเป็นฉนวนของตัวลดับถูกป้อนลดลง จึงเกิดแรงดันทรานเซียน (voltage transient) ขึ้นเป็นเหตุให้เกิดการ ไหลของกระแสไฟฟ้าจำนวนมาก ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ตัวลดับถูกป้อนสามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ ต่ำลงจึงทำให้แรงดันทรานเซียนแม้จะมีค่าต่ำๆแต่ก็สามารถทำให้เกิดรอยบนตัวลดับถูกป้อนเพิ่มมากขึ้นได้ ซึ่งการ เสื่อมสภาพลงอย่างต่อเนื่องนี้ มักจะเกิดที่จุดต่ำสุดของรอยเดิมในช่องของตัวลดับถูกป้อนจึงทำให้รู้ว่าทำไมจึงเกิด รอยในจุดต่ำสุดที่รับแรงและทำไมตัวลดับถูกป้อนหลายๆตัวจึงเกิดความเสียหายจากรอยในลักษณะเดียวกัน

จากการศึกษาผลการทดสอบมอเตอร์ 1150 ASD Powered ac Motors ที่ใช้งานในห้องที่สะอาด ผล การทดลองพบว่า 25% ของมอเตอร์ที่ใช้งานน้อยกว่า 18 เดือน มีตัวลดับถูกป้อนที่เกิดความเสียหายเพราะมีการคาย ประจุไฟฟ้า ผลการทดสอบของมอเตอร์ที่ใช้งานเกิน 18 เดือน หรืออายุเฉลี่ยประมาณ 2 ปี จะมีความเสียหาย ของตัวลดับถูกป้อนที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าถึง 65% โดยมีการขับมอเตอร์ให้หมุนด้วยความถี่สูง (12kHz หรือ สูงกว่านั้น) เพื่อลดเสียงรบกวนให้เหลือน้อยที่สุดและขับมอเตอร์ด้วยความเร็วเดียวกันอย่างต่อเนื่อง (24 ชม/วัน .7วัน/สัปดาห์) ทั้งนี้ตามทฤษฎีแล้วคาบเวลาของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจะประกอบไปด้วยความถี่มูลฐานบวกกับ ความถี่ฮาร์โมนิกส์เพราะว่า IGBTs มี rise time ที่เร็วมาก PWM จึงผลิตสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์ใน ความถี่ที่สูงได้ โดยประมาณว่าคาบพัลส์ที่ความถี่สูง IGBTs จึงเห็นยวนำกระแสได้มากกว่าอุปกรณ์ อื่นๆที่ช้ากว่า

การส่งความถี่ที่สูงกว่าจะเห็นยวนำให้เกิดค่าปาซิทีฟที่โรเตอร์และสเตเตอร์จากประสพการณ์ทำให้ ทราบว่าการใช้ชุดไดรฟ์ที่ใช้ IGBT ที่มีการส่งความถี่สูงๆ (มากกว่า 8 kHz) นั้นทำให้ตัวลดับถูกป้อนเสื่อมสภาพ ลงอย่างรวดเร็วว่าการใช้การส่งความถี่ที่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างของปัญหาที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์แบบ ASDs ก็คือ ที่โรงงานอุตสาหกรรมผู้ผลิตเซมิคอนดักเตอร์ขนาดใหญ่ใน US Pacific Northwest หลังจากที่ใช้งานมอเตอร์ 18 เดือน ตลับลูกปืนของมอเตอร์เกิดเสียง และการสั่นสะเทือนประมาณ 100 เครื่อง มอเตอร์แบบ open drip proof (ODP) 15 HP ,460V,900 rpm ใช้กำลังงานจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM IGBT ที่ส่งความถี่สูงมีการติดตั้งชุดไครฟ์ พัดลมใน clean-room chip ทำให้ใช้งานได้สะดวกสบายขึ้น การเกิดเสียงและการสั่นสะเทือนของมอเตอร์นั้นมีความสัมพันธ์กับการใช้งานของมอเตอร์อย่างต่อเนื่อง และการใช้งานยังคงทำให้เกิดความเสียหายต่อไป จากการตรวจสอบพบว่า ตลับลูกปืนเกิดความเสียหายเพราะผลของกระแสที่แกนหมุนที่มีสาเหตุมาจากอินเวอร์เตอร์แบบ IGBT

หลังจากนั้นมีการซ่อมมอเตอร์และการประยุกต์ใช้งาน countermeasures เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้น ทั้งนี้ในการลดต้นทุนควรจะใช้ตลับลูกปืนแบบ single insulated bearing bracket จึงจะเหมาะสมที่สุด ซึ่งวิธีนี้นับว่าเป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้ในเครื่องจักรขนาดใหญ่ส่วนการใช้ตลับลูกปืนที่ทำให้เป็นฉนวนเพียงอันเดียว ผลที่ได้ก็ยังไม่น่าพอใจ เพราะตลับลูกปืนที่ไม่ได้เป็นฉนวนเกิดความเสียหายเร็วมาก การปฏิบัติต่อไปก็คือ การติดตั้งแปรงถ่านเพื่อต่อแกนมอเตอร์ลงกราวด์ (shaft grounding brushes) แต่ผลที่ได้ก็ยังไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้เพราะตำแหน่งการติดตั้งแปรงถ่านทำให้เกิดปัญหาในการบำรุงรักษา และทำให้เกิดความสกปรกเนื่องจากแปรงถ่านเป็นคาร์บอน ถึงแม้ว่าในการใช้ตลับลูกปืนที่ทำให้เป็นฉนวนเพียงอันเดียวและการต่อแปรงถ่านลงกราวด์ ยังถือว่าไม่เหมาะสมแต่ก็เป็นแนวทางที่น่าปฏิบัติตามที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตลับลูกปืนที่เป็นฉนวนทั้งสองอัน ก็ยังถือว่าดีกว่า

3.1 สาเหตุของการเกิดแรงดัน และกระแสที่เพลลาและรองคลื่น

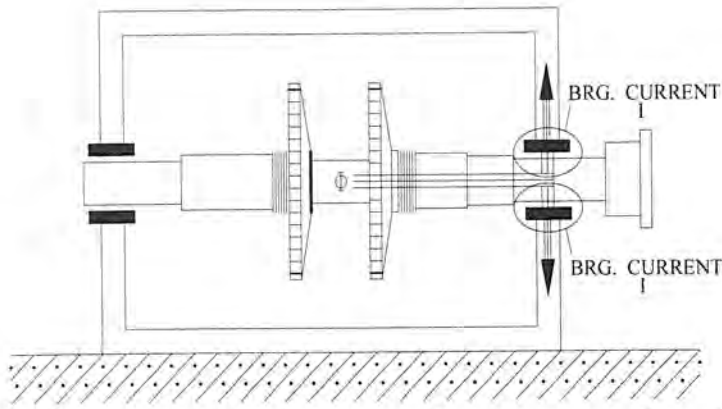
ที่มาของแรงดันที่เพลลาของเครื่องจักรกลหมุนจะมาจาก 4 แหล่งที่สำคัญดังต่อไปนี้

3.1.1 ความเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic)

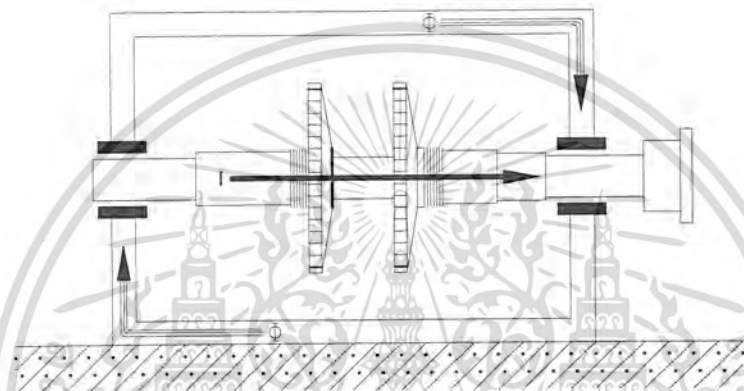
แรงดันเพลลาที่เกิดจากการหมุนของเครื่องจักร ไฟฟ้าจะมีสาเหตุจากแหล่งจ่ายแม่เหล็ก ที่เป็นผลมาจากขดลวด สเตเตอร์อย่างไรก็ตามเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะมีขดลวดอาร์มาเจอร์เพื่อกระจายการเหนี่ยวนำ ของกระแสไฟฟ้า ในทางตรงกันข้ามด้านปฐมภูมิของเครื่องจักรกลไฟฟ้าได้แก่รองคลื่น เพลลา ฯลฯ ซึ่งในการที่จะทำให้เกิดแรงดันที่เพลลาโดยวิธีทางกลนี้จะมียอดประกอบคือ

- ก. แหล่งกำเนิดของอำนาจแม่เหล็กที่สูงอาจเกิดขึ้นได้ที่ โรเตอร์ รองคลื่น โครง และอื่นๆ
- ข. ความสัมพันธ์ของความเร็วภายนอกที่สูง เช่น ในเครื่องจักรที่มีใบพัด
- ค. ค่าความต้านทานของวงจรแม่เหล็กต่ำ
- ง. มีช่องว่างที่เล็กมาก ซึ่งทำให้แรงดันสามารถ Discharge ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กระแสเพลลาที่เกิดจากสนามแม่เหล็กตามแกนเพลลาและผ่านรองดิน



รูปที่ 3.3 กระแสเพลลาที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก

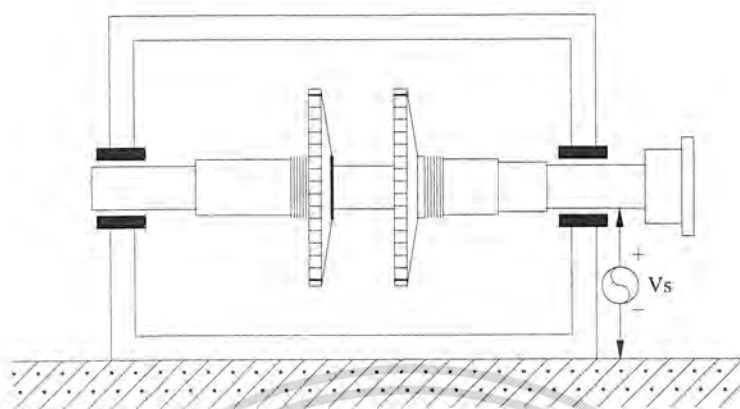
รูปที่ 3.2 และ 3.3 แสดงถึงสองความหมายของการเกิดแรงดันที่เพลลาเนื่องจากแหล่งกำเนิดของแม่เหล็กมีแกนของฟลักซ์และแกนของกระแสไฟฟ้า ผู้ใช้บางคนมีการติดตั้งฉนวนเข้าไป เพื่อพยายามป้องกันการส่งผ่านของกระแสในเพลลาส่วนที่ส่วนท้ายมันมีความสำคัญนั่นคือการหาฟลักซ์ (ที่ไหลผ่าน) หรือกระแสรวมทั้งฉนวนซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละแบบนั่นคือโลหะที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก จะเว้นช่วงไว้เพื่อป้องกันฟลักซ์ไหลผ่าน อย่างไรก็ตามตัวนำจะง่ายต่อการส่งผ่านของกระแสถ้าส่วนหลังยังคงสถานะนี้อยู่ แรงดันที่เพลลาที่เกิดจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสำหรับแหล่งจ่ายดีซี ซึ่งจะยังคงมี ส่วนประกอบของเอซีเพิ่มในแรงดันดีซีในบางครั้ง มันเป็นไปได้ที่จะเกิด แรงดันเอซีส่วนกระแสนั้นก็จะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน

ถ้ากระแสในเพลลาหาผลลัพท์จากแหล่งจ่ายแม่เหล็กมันจำเป็นที่จะต้องขจัดแม่เหล็กออกจาก แหล่งจ่ายนั้นให้เหมาะสมระบบจะมีผู้ผลิต โดยเฉพาะสำหรับขจัดแม่เหล็กอัตโนมัติของส่วนประกอบมอเตอร์ในส่วนประกอบที่มีส่วนตัดใหญ่ๆ มีลักษณะขั้วที่กลับกันเมื่อขึ้นส่วนหรือส่วนประกอบใหม่ได้ติดตั้งซึ่งควรจะทำการขจัดแม่เหล็กมาใช้ให้เป็นประโยชน์มาตรฐานของระดับ สนาม แม่เหล็ก

3.1.2 Electrostatic

แรงดันที่เพลลาจากแหล่งจ่ายนี้ มีการร่วมกำเนิดโดยการชาร์จแยกใน ส่วนหลังของ steam turbine ซึ่ง steam จะไม่เกิด super heat เป็นเวลานาน การกระทำของ wet steam brushing การตัดเป็นเหตุให้มีดเก็บอิเล็กตรอนและชาร์จและได้แรงดัน นอกจาก steam turbine แล้วจะไม่มีข้อยกเว้นสำหรับแหล่งจ่าย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electrostatic และจะแสดงเป็น wet gas compressor หรือ belt driven machine หรือเกิดขึ้นโดยการชาร์จ โดยสารหล่อลื่นเนื่องจาก oil filter



รูปที่ 3.4 แรงดันเพลลาที่เกิดจาก *Electrostatic*

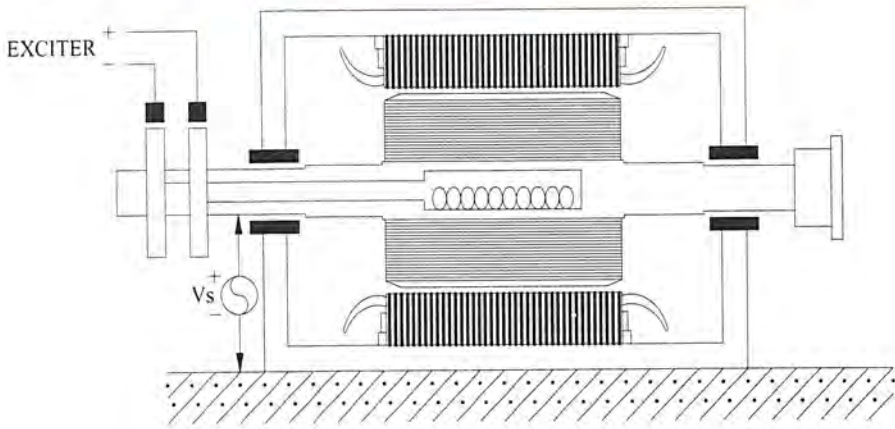
รูปที่ 3.4 แสดง โครงสร้างสำหรับแรงดันที่เพลลาจากการเกิดของ steam condensing turbine เป็นเรื่องที่ดีที่แหล่งจ่ายจะมีความสัมพันธ์ลดลงและไม่สามารถจ่ายกระแสสูงไปกราวด์ได้ ในการแก้ไขปัญหานี้เพลลาต้องมีกราวด์และแปลงถ่านต้องมีกราวด์ เราต้องหาชนิดของแปลงถ่านที่พัฒนาโดยเฉพาะพิเศษสำหรับการใช้งานเพื่อให้มีสมรรถนะที่มากกว่าคาร์บอน ทองแดงหรือทองเหลือง แปลงถ่านแบบคาร์บอน ได้มีการพัฒนาและมีใช้เกือบจะเฉพาะแบบนี้ โดยที่ผู้ผลิต electrical machinery ตามที่ commutator สำหรับระบบกระตุ้นของเครื่องจักรกล มันมีการทำงานที่ดีมากในการนำไปใช้งานตั้งแต่ค่ากระแสที่มีความสำคัญและคงที่ ดังนั้นการนำกระแสของ film จะปรากฏขึ้นระหว่าง brush และ collector ring โดยสมบูรณ์เสมอถ้า electrical machine มีปัญหาของ electrical brush วิธีแก้ก็คือการ brush แต่นั่นก็ยังมีกระแสมากขึ้น brush ด้วยเหตุนี้ทำให้ความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้น เนื่องจากธรรมชาติของ electrostatic กระแสต่ำมาก carbon brush มีการพัฒนาไม่ให้มีการนำของ film และเพราะฉะนั้นจึงทำให้ใช้การไม่ได้

จากปรากฏการณ์ของเรา brush ที่เป็นเหล็กอ่อนในบริเวณที่เป็น oil atmosphere ซึ่งจะทำตัวในลักษณะที่เหมือนกับรองลื่น นั่นคือ oil film และมันเกี่ยวกับ impedance สูงระหว่างเพลลาและผิวของแปลงถ่าน

3.1.3 External Voltage Supplied to the rotor Winding

นี่คือเริ่มแรกในการบรรยายถึงระบบการกระตุ้น electrical machine แรงดันที่เพลลา แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องหรือสัญญาณดีซีเริ่มแรก ปกติแล้ว Pulse ของ rectifier จะเกิดในแรงดันที่เพลลาบางวิธีของกราวด์ที่เพลลาบนการขับเคลื่อนของ electrical machine หรือจัดให้มีการสมมาตรบนด้านดีซีของ rectifier และหลีกเลี่ยงการไม่สมมาตรในวงจรการกระตุ้นดูรูปที่ 3.5 เป็น โครงร่างของแหล่งจ่ายนี้

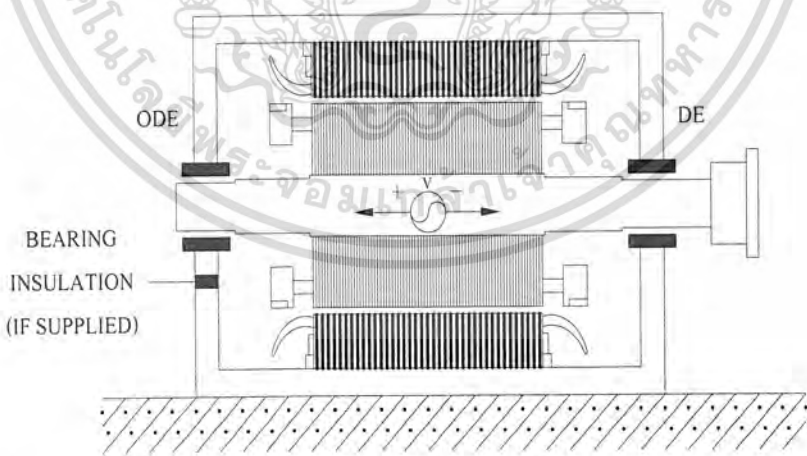
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กระแสเฟลาที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันภายนอกบนโรเตอร์ของเครื่องจักรกล

3.1.4 Magnetic Dissymmetry in an electrical winding

ความสามารถของแม่เหล็กใน Electrical winding มี 2 สถานะที่สามารถหาผลลัพธ์ในแรงดันที่เกิด จากแหล่งจ่ายนี้ อันดับแรกแรงดันจากเฟลาต้านหนึ่งถึงอีกด้านหนึ่ง อันดับที่สองคือฟลักซ์จากเฟลาต้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ชนิดแรกโดยปกติที่ได้เจอและได้ผลลัพธ์จาก electrical machine มีความไม่สมมาตรเนื่องจาก ความทนทานในการผลิต ตามผลลัพธ์แรงดันที่เฟลาจากแหล่งจ่ายนี้จะเกิดในทุก electrical machine ในระดับต่างๆมันเป็นผลลัพธ์จากปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กที่น้อยหรือส่งผ่านเฟลา และได้เกิดแรงดันไฟฟ้าจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ดูรูปที่ 3.6 เพราะมี impedance กระแสสามารถไหลผ่านร่องคลื่น โครงของ machine และฐานและกลับมาเฟลา ดังนั้นจึงทำให้ครบวงจร วิธีสำหรับการป้องกันของกระแสที่เฟลา คือการฉนวนร่องคลื่นให้การแพร่กระจายของกระแสไม่ต่อเนื่องแนวทางนี้จะไม่จำกัดแรงดันที่เฟลาแต่จะทำให้ทางเดินยาวขึ้น คือการบล็อกโดยการฉนวน และทั้งหมดคือการป้องกันจากแหล่งกำเนิดแรงดัน

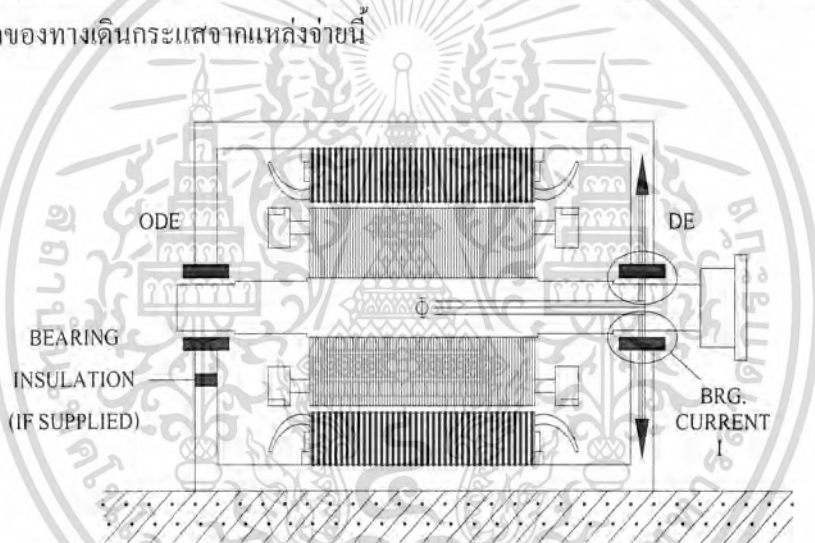


รูปที่ 3.6 กระแสเฟลาแบบไม่สมมาตรในสเตเตอร์หรือโรเตอร์เกิดโดยแรงดันจากแต่ละด้านของเฟลา

61520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันน่าแปลกใจว่าการเสียหายของ bearing เกิดจากความไม่สมมาตรของแม่เหล็กในมอเตอร์ หมายความว่า การแก้ไขไม่สามารถทำได้มากกว่า 100 ปี ถ้าแรงดันที่เพลามีความรุนแรง การฉนวนอาจจะไม่เพียงพอ ในการแก้ปัญหา อย่างไรก็ตามถ้าเกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจนี้มีการฉนวนโดยการติดตั้ง RTD's, TC's Lube oil piping etc นอกจากนี้การฉนวนร่องลื่นโดย seal rub มาตรฐานในการฉนวนยังไม่สมบูรณ์ตรวจสอบและไม่สามารถรู้ปัญหาของศักย์ไฟฟ้า แรงดันที่เพลและการวัดกระแสเป็นผลดีในการหาเงื่อนไขในการฉนวนร่องลื่น นี่คือการบรรยายใน section ต่อไปของรายงานนี้ ชนิดที่ 2 ของความไม่สมมาตรแม่เหล็กคือฟลักซ์เดินทางในเพลาทะลุร่องลื่นผ่านโครงและครบวงจรแม่เหล็กผ่านร่องลื่นไปเพล่า แกนของฟลักซ์นี้คือตัวอย่างการเกิดเนื่องจาก ampere turn เชื่อมต่อไปยังเพล่า (เช่นการต่ออย่างไม่สมมาตรของขดลวด) ส่วนของ end ring , open rotor bar และขอบเขตน้อย ความไม่สม่ำเสมอที่ air gap ผลของกระแสจะแตกต่างจากตัวอย่างก่อน ตั้งแต่การไหลที่ร่องลื่นจากอีกด้านไปอีกด้านตามผลลัพท์ที่ได้ การฉนวนจะมีผลที่ตามมาเล็กน้อยและเพิ่มความเบาบางของ reluctance ในทางเดินฟลักซ์ที่ถูกตัดก็จะต้องแยกแหล่งจ่ายออกความไม่เป็นแม่เหล็กจะกีดขวางสถานที่ในการเกิดวงจรแม่เหล็ก เช่น การติดตั้งร่องลื่นที่ไม่เป็นแม่เหล็ก bearing housing หรือเพล่า รูปที่ 3.7 แสดงฟลักซ์และผลของทางเดินกระแสจากแหล่งจ่ายนี้



รูปที่ 3.7 กระแสร่องลื่นเกิดเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่แกนเพล่าเป็นเหตุให้เกิดความไม่สมมาตรของสนามแม่เหล็กในเครื่องจักรกล

3.2 กรณีแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์

ในกรณีแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์แล้วป้อนเข้าสู่มอเตอร์ รูปคลื่นสัญญาณดังกล่าวจะเป็นสัญญาณรายคาบที่มีคาบเวลาเท่ากับ T ซึ่งจะมีความถี่เท่ากับ f ความถี่ดังกล่าวจะเรียกว่า ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยฮาร์โมนิกการวิเคราะห์ฟูเรียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\}$$

โดยที่

$$F_0 = \frac{1}{2}a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) d(t)$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(h\omega t) d(\omega t) \quad h = 1, \dots, \infty$$

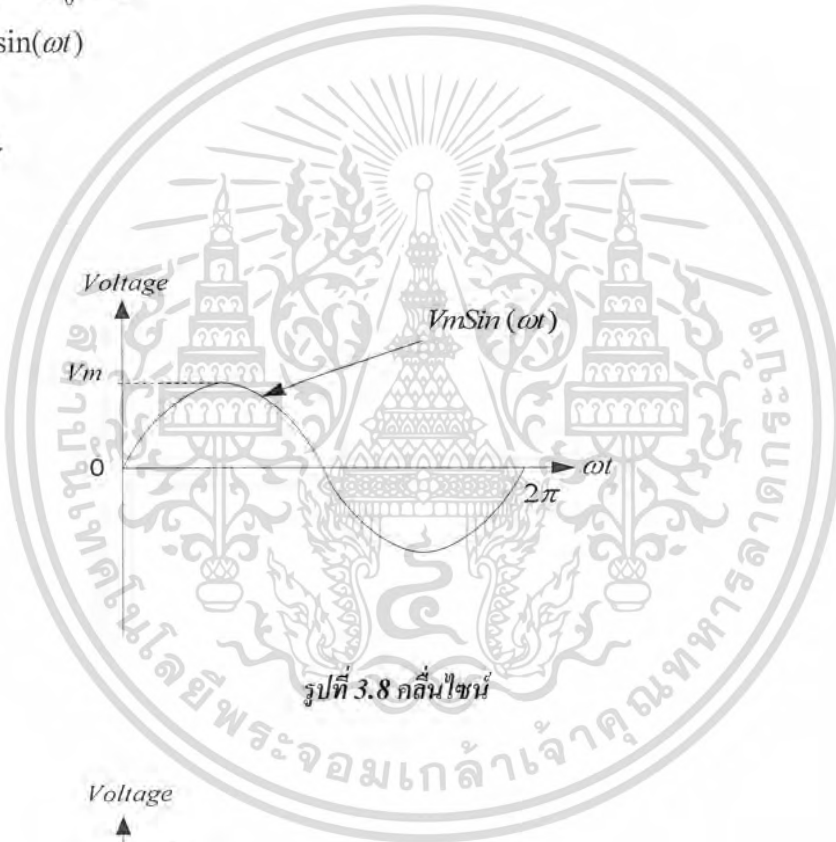
$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad h = 1, \dots, \infty$$

ถ้ารูปสมมาตรได้ $F_0 = 0$

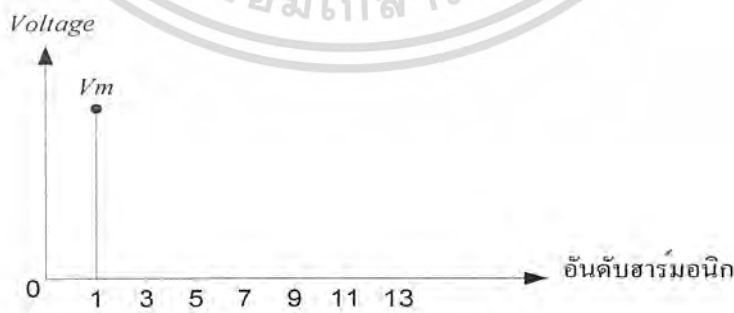
แทนค่า $f(t) = \sin(\omega t)$

จะได้ $a_h = 0$

$$b_h = V$$



รูปที่ 3.8 คลื่นไซน์



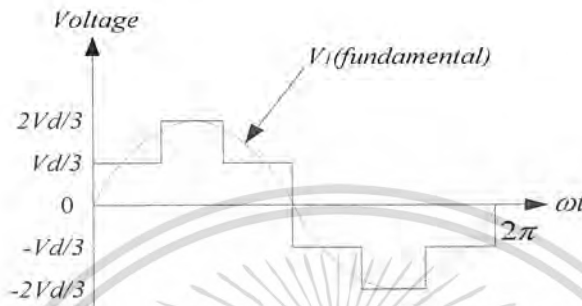
รูปที่ 3.9 สเปกตร้าของคลื่นไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กรณีแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์

3.3.1 อินเวอร์เตอร์แบบ 6 ขั้น (Six-step)

รูปคลื่นของอินเวอร์เตอร์แบบ 6 ขั้น เกิดจากการคอมมิวเตทที่มีระยะห่างที่เท่ากันจำนวน 6 ครั้งต่อรอบของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ลักษณะแรงดันเฟสและแรงดันไลน์ของเทคนิค 6 ขั้น แสดงในรูป 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ จากรูป V_d คือแรงดันเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรง (DC line)



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันเฟส (V_{an}) ของอินเวอร์เตอร์แบบ 6 ขั้น



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันไลน์ (V_{ab}) ของอินเวอร์เตอร์แบบ 6 ขั้น

สามารถแทนคลื่นแรงดันเฟส โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์ได้เป็น

$$V_{an} = \frac{2}{\pi} V_d \left[\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \dots \right]$$

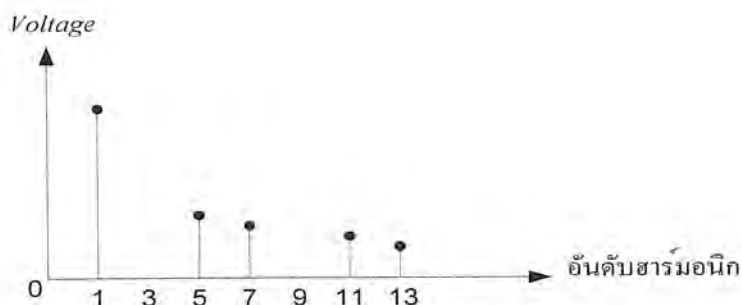
แรงดันเฟสที่ฮาร์มอนิกต่างๆ สามารถแทนด้วยสมการ

$$V_{n(\text{phase,rms})} = \frac{\sqrt{2}}{n\pi} V_d$$

$$n = 1, 5, 7, 11, \dots$$

n : ลำดับฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 สเปกตรัมของรูปคลื่น 6 ชั้น

3.3.2 อินเวอร์เตอร์แบบ PWM

เพื่อความเข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 3.13 จะแสดงเพียงหนึ่งกิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์ คือ กิ่ง A หรือ เฟส A ที่สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าคงที่และกำหนดให้การสวิตช์ทำงานเป็นแบบ PWM



รูปที่ 3.13 สวิตช์โหมคอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวที่หนึ่งกิ่ง

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ดังในรูปที่ 3.14(ก) ความถี่ของการสวิตช์ (f_s) จะเท่ากับความถี่รูปคลื่นสามเหลี่ยม ค่าย่อและความหมายที่สำคัญของการสวิตช์แบบ PWM มีดังต่อไปนี้

- $v_{control}$ สัญญาณควบคุมรูปไซน์ที่ต้องการนำมาสร้างแรงดันไฟฟ้าและความถี่ทางด้านออก
- v_{tri} สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่เป็นตัวกำหนดความถี่สวิตช์
- f_1 ความถี่หลักมูลทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์
- f_s ความถี่ของการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์
- m_a อัตราการมอดูเลตด้านแอมพลิจูด
- m_f อัตราการมอดูเลตด้านความถี่

ถ้า m_a และ m_f จะนิยามจากสมการตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (3.1)$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (3.2)$$

เมื่อ $V_{control}$ คือค่ายอดของสัญญาณควบคุมรูปไซน์

V_{tri} คือค่ายอดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม

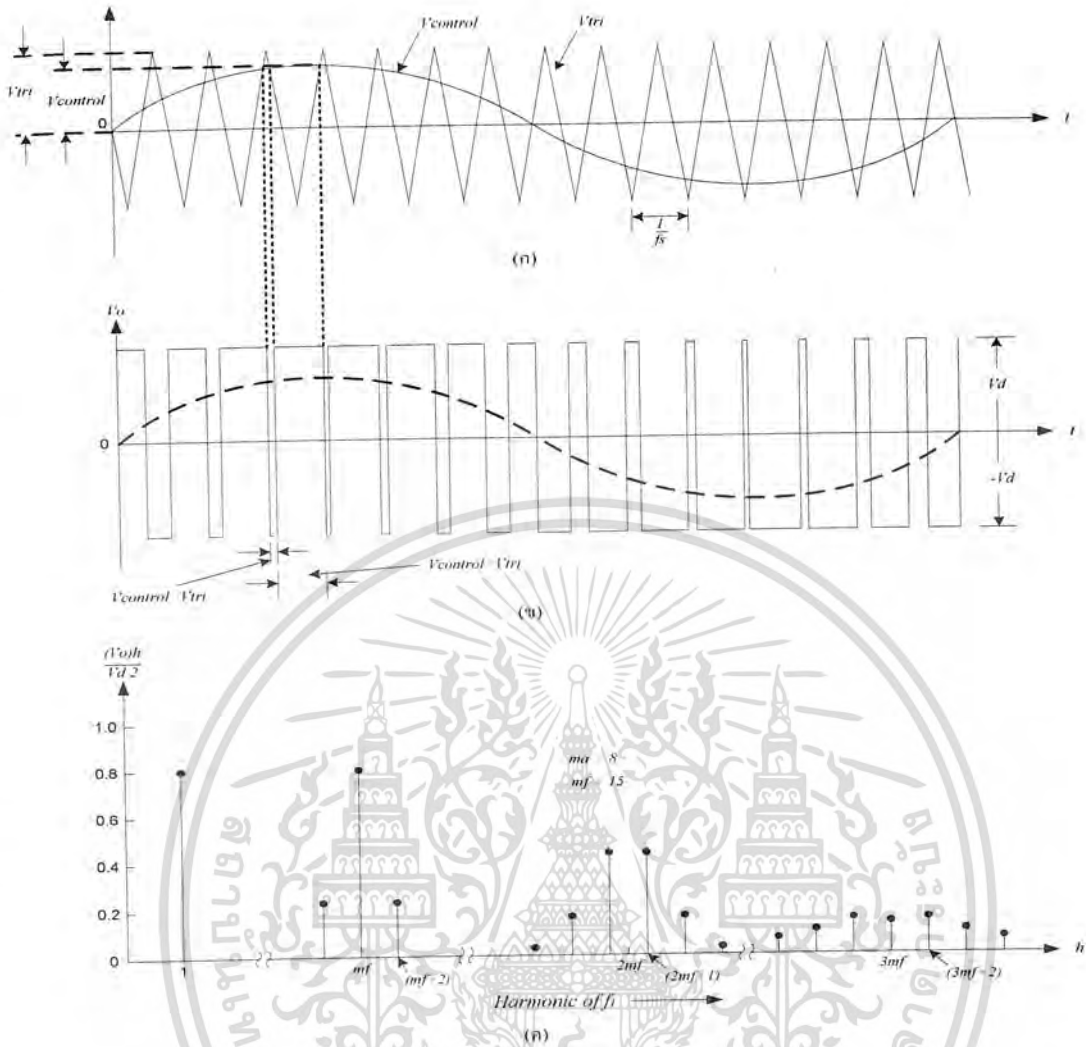
ถ้าค่า $0 \leq m_a \leq 1$ จะเป็นช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น ซึ่งหมายถึงองค์ประกอบหลักมูลของแรงดันไฟฟ้าขาออกโดยจะแปรผันเชิงเส้นกับค่า m_a

ในกรณี $m_a > 1$ จะเป็นช่วงการควบคุมแบบโอเวอร์มอดูเลต ซึ่งผลของแรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกสูงกว่าช่วงการมอดูเลตเชิงเส้น สำหรับเงื่อนไขของการสร้างสัญญาณสวิตซ์แบบ PWM คือ

$$v_{control} > v_{tri} \quad T_{A+} \text{ จะนำกระแส} \quad v_{Ao} = \frac{1}{2}Vd \quad (3.3)$$

$$v_{control} > v_{tri} \quad T_{A-} \text{ จะนำกระแส} \quad v_{Ao} = -\frac{1}{2}Vd \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 พื้นฐานสร้างสัญญาณแบบ PWM (ก) ใช้สัญญาณไซน์ตัดกับสัญญาณสามเหลี่ยม (ข) สัญญาณแบบ PWM (ค) สเปกตรัมของสัญญาณ PWM

การทำงานของสวิตช์ T_A และ T_{A-} จะขึ้นอยู่กับผลการเปรียบเทียบของ $v_{control}$ กับ v_{tri} โดยจะมีเงื่อนไขดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) และจะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแส รูปที่ 3.14 แสดงตัวอย่างเมื่อกำหนดเงื่อนไขที่ $m_a = 0.8$ และ $m_f = 15$ ฮาร์โมนิกสเปกตรัม (harmonic spectrum) ของ v_{Ao} โดยเขียนกราฟเทียบกับค่าแกนตั้ง $(v_{Ao})_h / (V_d/2)$ แสดงในรูปที่ 3.14(ค) จะมีส่วนสำคัญสามส่วนคือ

1. ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล $(v_{Ao})_1 = m_a(V_d/2)$
2. ค่าไซด์แบนด์ฮาร์โมนิก (sideband harmonic) จะเกิดขึ้นรอบๆ $1, m_f, 2, m_f, 3, m_f, \dots$
3. ค่า m_f ฮาร์โมนิกควรจะเป็นเลขคี่ เพราะถ้ากำหนดให้ค่า m_f เป็นเลขคู่ก็จะทำให้เกิดการสมมาตรเลขคี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

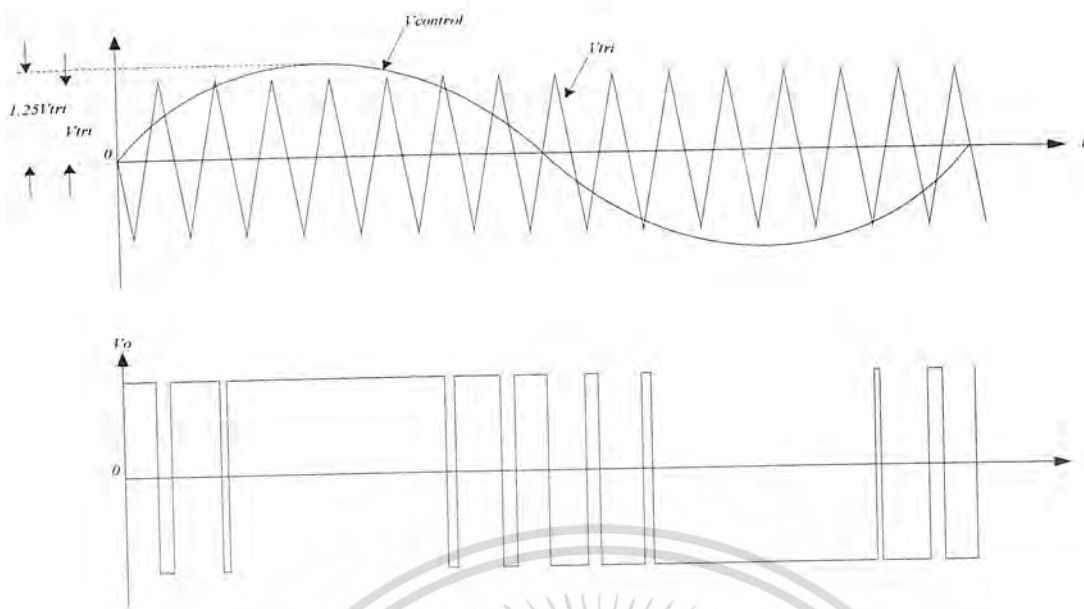
ตารางที่ 3.1 สเปกตรารวมอนิกที่เกิดขึ้นในแรงดันโหนดของเทคนิค PWM ที่มีสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ ($m_a \leq 1$)

h \ m_a	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1 (Fundamental)	0.122	0.245	0.367	0.490	0.612
$m_f \pm 2$	0.010	0.037	0.080	0.135	0.195
$m_f \pm 4$	-	-	-	0.005	0.011
$2m_f \pm 1$	0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2m_f \pm 5$	-	-	-	0.008	0.020
$3m_f \pm 2$	0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3m_f \pm 4$	-	0.007	0.029	0.064	0.096
$4m_f \pm 1$	0.100	0.096	0.005	0.064	0.042
$4m_f \pm 5$	-	-	0.021	0.051	0.073
$4m_f \pm 7$	-	-	-	0.010	0.030

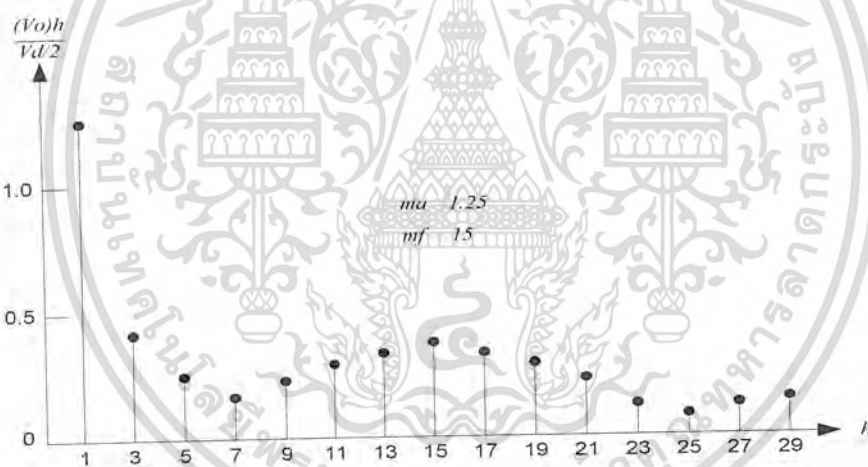
หมายเหตุ ค่าในตารางเป็นแฟกเตอร์ที่นำไปคูณกับค่าแรงดันไฟฟ้าเชื่อมโยงกระแสตรง (V_{dc})

อย่างไรก็ตามข้อเสียของกรณีโอเวอร์มอดูเลชันก็คือทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับต่ำๆ ที่อยู่ใกล้กับฮาร์มอนิกลำดับที่หนึ่งหรือความถี่หลักมูล เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5, 7 เป็นต้น ผลของฮาร์มอนิกอันดับต่ำคือจะทำให้เกิดผลเสียมากหากนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปขับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพราะฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5, 7 จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและทำให้เกิดความเร็วหลายความเร็วในเวลาเดียวกันทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไม่สม่ำเสมอ อาจมีผลเสียต่อสมรรถนะของมอเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 รูปคลื่น PWM แบบโอเวอร์มอดูเลชัน



รูปที่ 3.16 สเปกตรัมของรูปคลื่น PWM แบบ โอเวอร์มอดูเลชัน

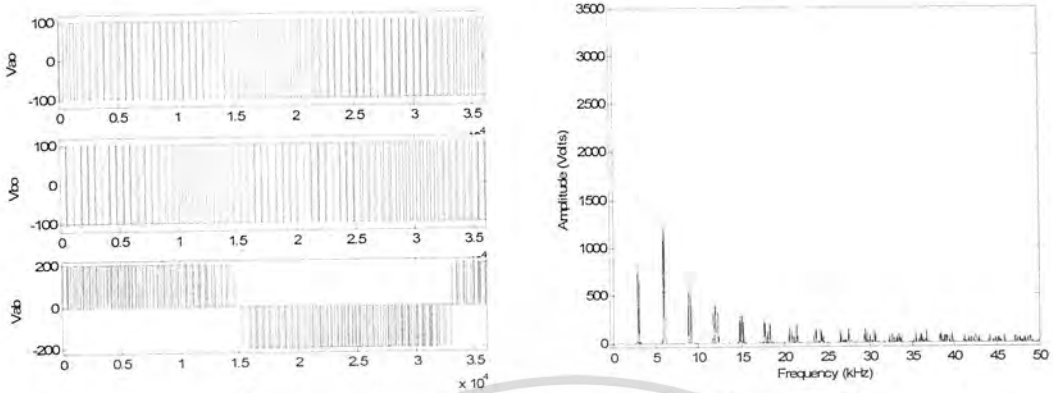
การเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณ ในเงื่อนไขหาก $v_{control} > v_{tri}$ จะได้สัญญาณพัลส์เป็นบวก ในทำนองเดียวกันหาก $v_{control} < v_{tri}$ จะได้พัลส์เป็นลบ กรณีโอเวอร์มอดูเลชันในรูปที่ 3.15 ไซเคิลบวกของ $v_{control}$ จะมีช่วงยอดที่มากกว่า v_{tri} จนถือว่าเป็นได้พัลส์บวกเป็นระยะเวลาหนึ่งเสมือนว่าไม่มีการสวิตชิ่ง เช่นเดียวกับการเกิดขึ้นที่ครึ่งไซเคิลลบของ $v_{control}$ ช่วง peak ล่างจะทำให้ค่าพัลส์เป็นลบหรือศูนย์ เป็นช่วงขณะที่ไม่มีการสวิตชิ่ง

ผลเสียที่จะเกิดเช่นในรูปที่ 3.16 เกิดฮาร์มอนิกที่ใกล้ๆ กับความถี่หลักมูลหรือฮาร์มอนิกอันดับหนึ่ง และเกิดฮาร์มอนิกรอบๆ ความถี่ f_s

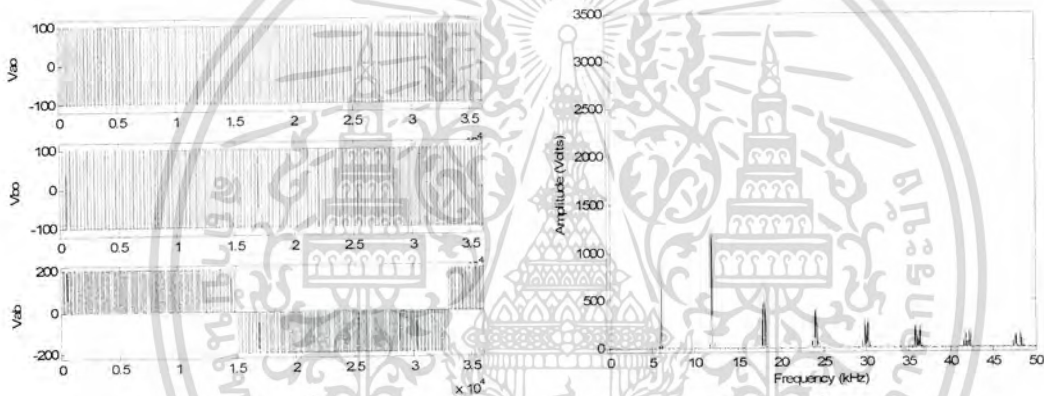
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 รูปสัญญาณของ PWM อินเวอร์เตอร์ที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

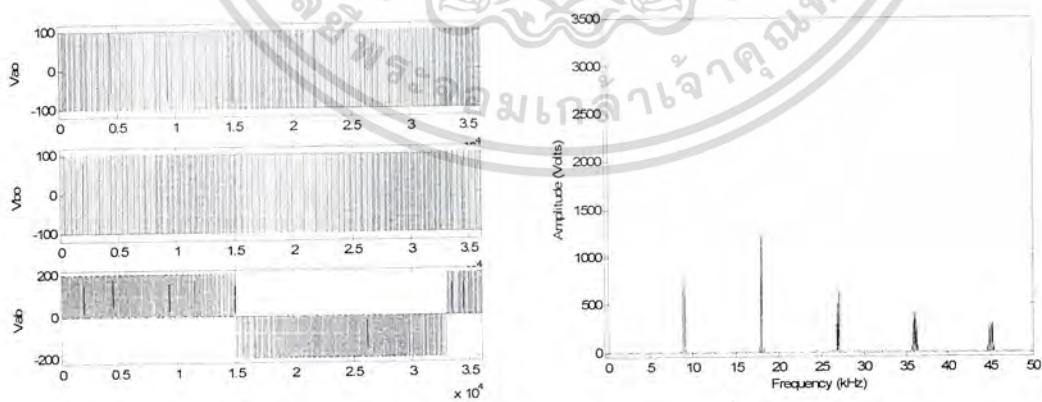
3.4.1 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์



รูปที่ 3.17 แรงดัน PWM (ซ้าย) และสเปกตรัม (ขวา) เมื่อ $f_s = 3 \text{ kHz}$

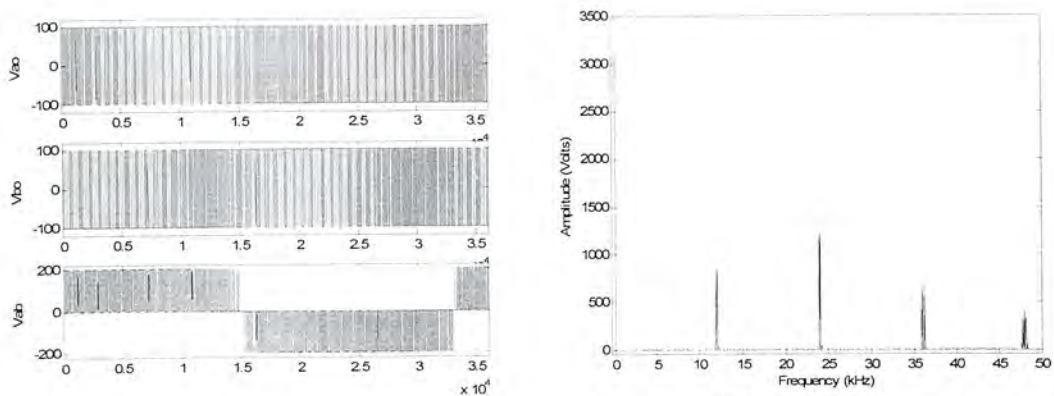


รูปที่ 3.18 แรงดัน PWM (ซ้าย) และสเปกตรัม (ขวา) เมื่อ $f_s = 6 \text{ kHz}$



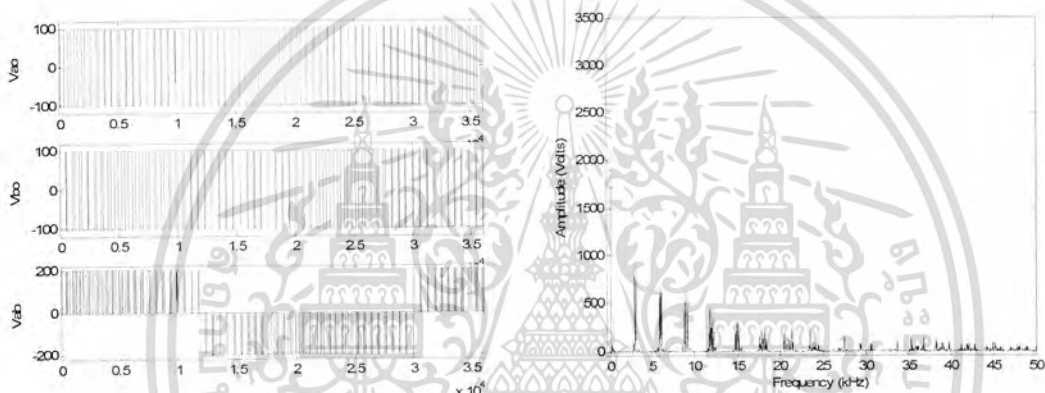
รูปที่ 3.19 แรงดัน PWM (ซ้าย) และสเปกตรัม (ขวา) เมื่อ $f_s = 9 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

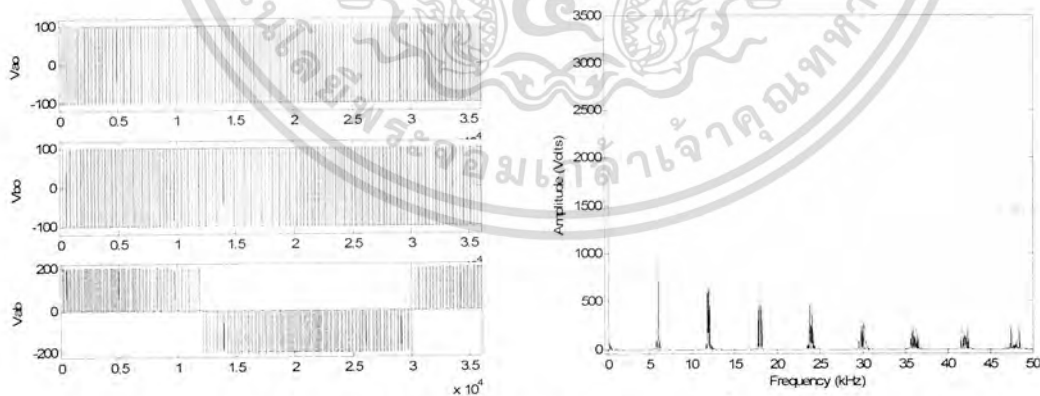


รูปที่ 3.20 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรัม(ขวา)เมื่อ $f_s = 12 \text{ kHz}$

3.4.2 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal)

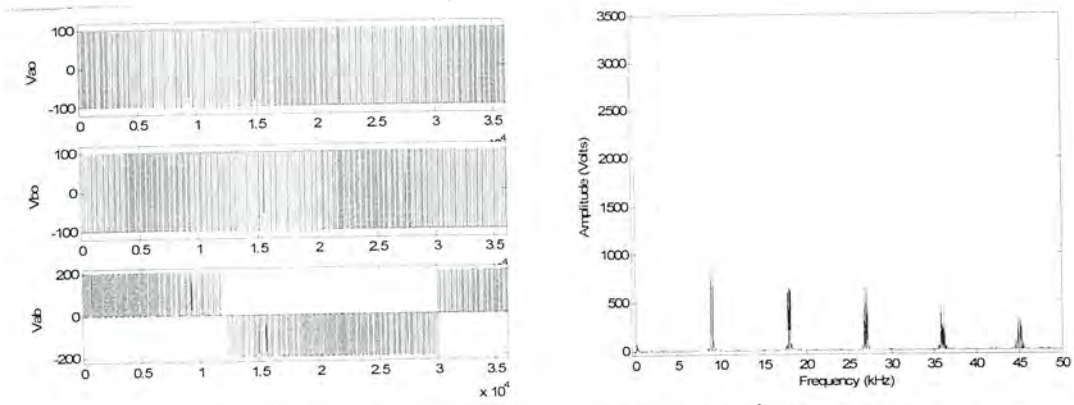


รูปที่ 3.21 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรัม(ขวา)เมื่อ $f_s = 3 \text{ kHz}$

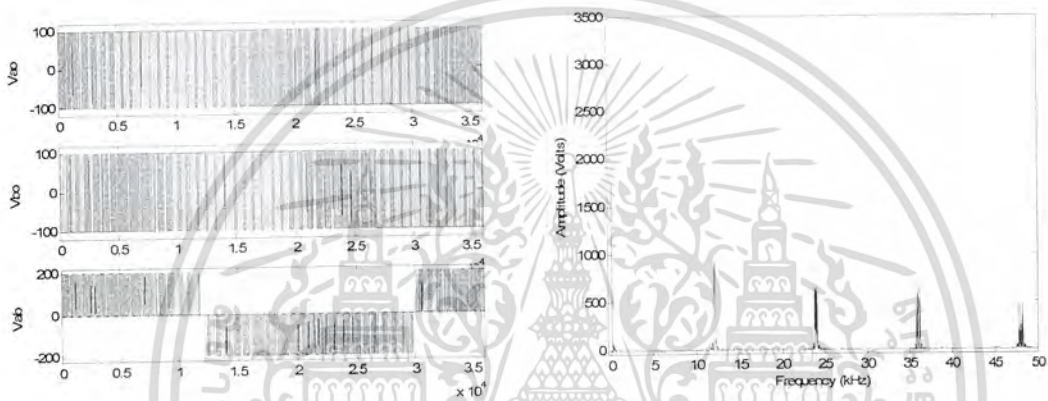


รูปที่ 3.22 แรงดัน PWM (ซ้าย)และสเปกตรัม(ขวา)เมื่อ $f_s = 6 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

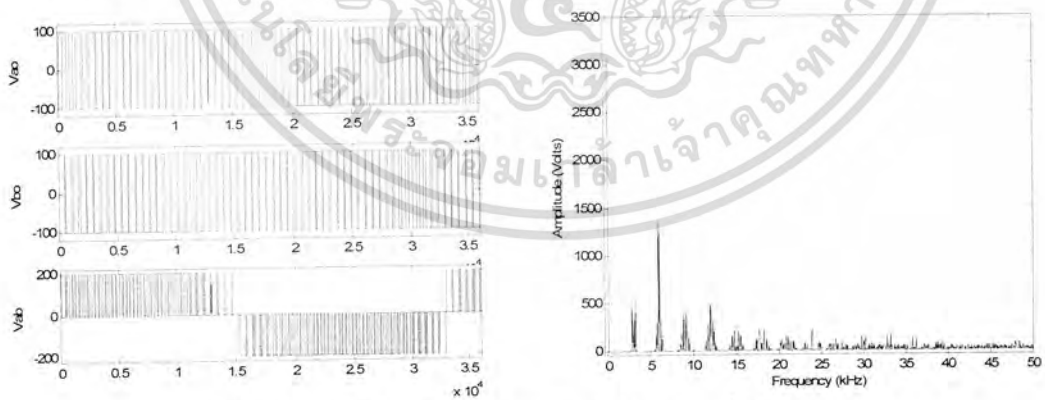


รูปที่ 3.23 แรงดัน PWM (ซ้าย) และสเปกตรัม (ขวา) เมื่อ $f_s = 9 \text{ kHz}$



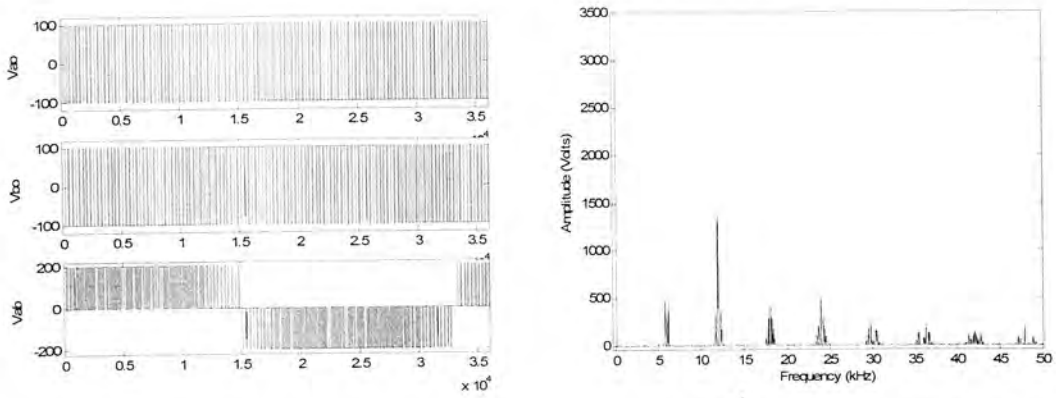
รูปที่ 3.24 แรงดัน PWM (ซ้าย) และสเปกตรัม (ขวา) เมื่อ $f_s = 12 \text{ kHz}$

3.4.3 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นคลื่นไซน์ร่วมกับสัญญาณฮาร์มอนิกที่ 3

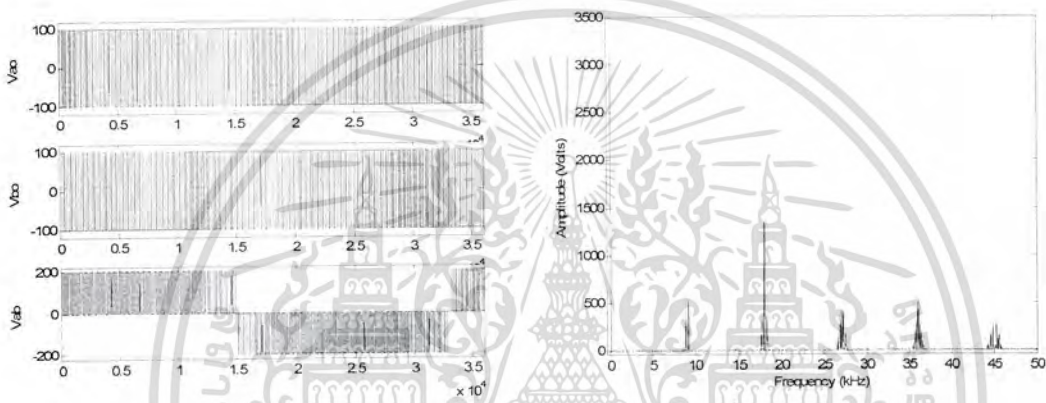


รูปที่ 3.25 แรงดัน PWM (ซ้าย) และสเปกตรัม (ขวา) เมื่อ $f_s = 3 \text{ kHz}$

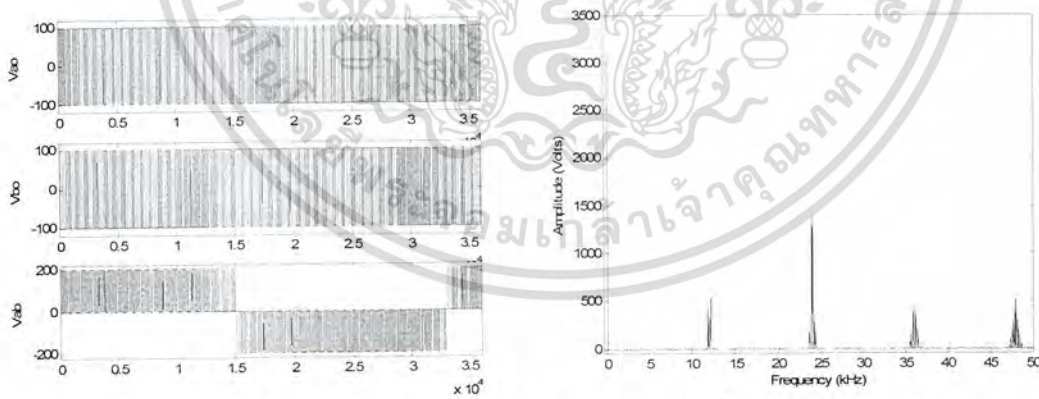
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 แรงดัน PWM (ซ้าย) และสเปกตรัม (ขวา) เมื่อ $f_s = 6 \text{ kHz}$



รูปที่ 3.27 แรงดัน PWM (ซ้าย) และสเปกตรัม (ขวา) เมื่อ $f_s = 9 \text{ kHz}$



รูปที่ 3.28 แรงดัน PWM (ซ้าย) และสเปกตรัม (ขวา) เมื่อ $f_s = 12 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

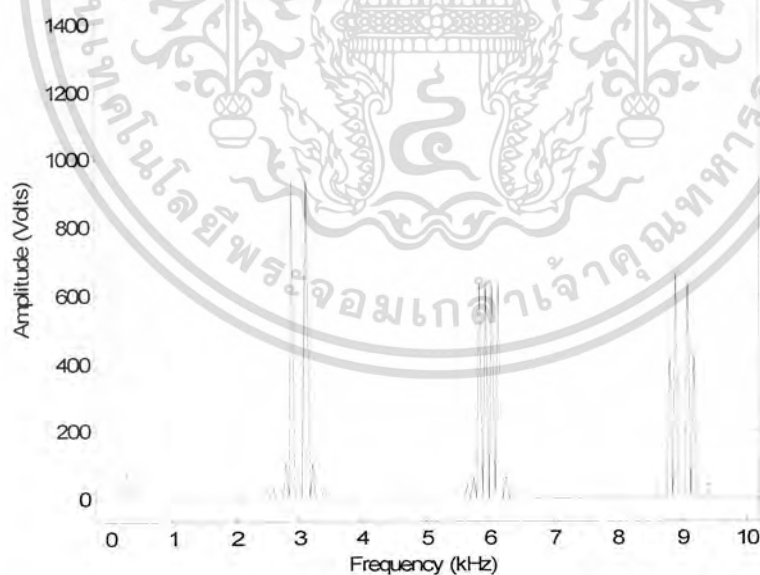
3.5 รูปการเปรียบเทียบสเปกตราของสัญญาณอ้างอิงแบบต่างๆ

3.5.1 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์



รูปที่ 3.29 สัญญาณสเปกตราที่ได้จากการขยายเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์

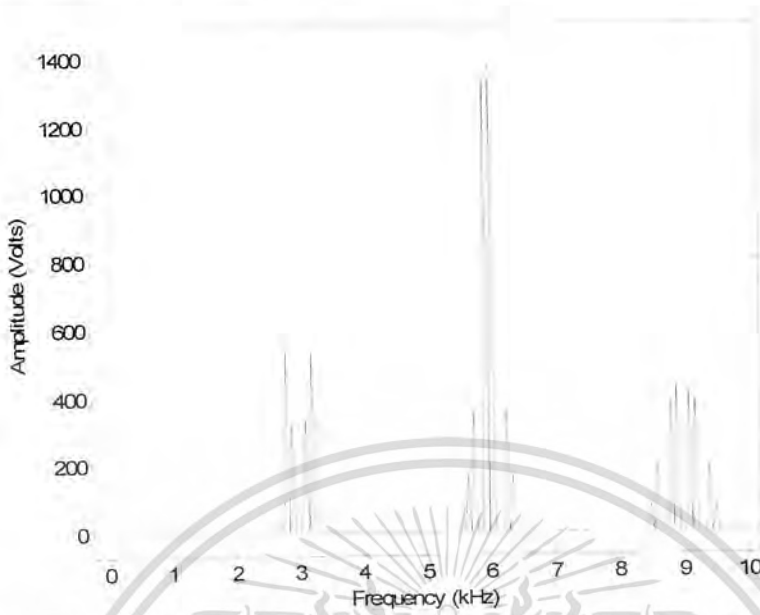
3.5.2 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 3.30 สัญญาณสเปกตราที่ได้จากการขยายเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ร่วมกับสัญญาณฮาร์มอนิกที่ 3



รูปที่ 3.31 สัญญาณสเปกตรัมที่ได้จากการขยายเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ร่วมกับสัญญาณ ฮาร์มอนิกที่ 3

จากผลการจำลองโดยใช้ MATLAB จะได้ว่าที่ความถี่สวิตซ์ที่ต่ำลงจะได้อันดับฮาร์มอนิกที่ต่ำ ดังนั้นจะมีจำนวนกลุ่มของฮาร์มอนิกมาก แต่ที่ความถี่สวิตซ์ที่ต่ำลงจะได้อันดับฮาร์มอนิกสูงกลุ่มของฮาร์มอนิกจะเลื่อนออกไปทำให้จำนวนกลุ่มของฮาร์มอนิกน้อย เมื่อนำไปใช้งานสัญญาณอันดับฮาร์มอนิกต่ำจะทำให้เกิดค่าความสูญเสียมากกว่าฮาร์มอนิกอันดับสูง ซึ่งเปรียบเทียบได้จากรูปที่ 3.17 กับรูปที่ 3.20

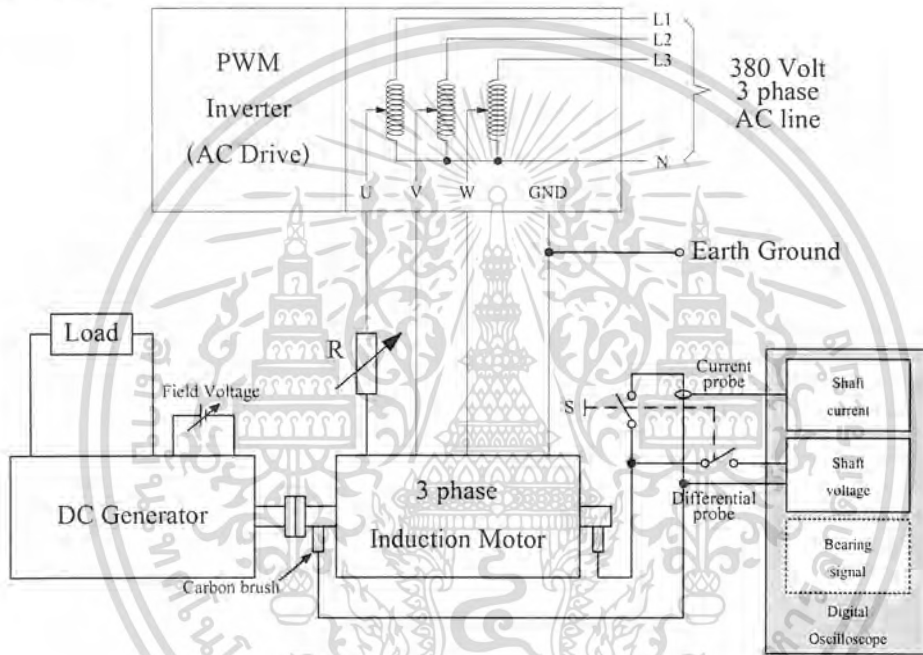
จากการขยายสัญญาณสเปกตรัมเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์จะเห็นว่าค่าไซด์แบนด์ฮาร์มอนิกมีน้อยและจะไม่มีฮาร์มอนิกอันดับต่ำดังรูปที่ 3.29 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจะมีข้อดีคือทำให้แอมพลิจูดของแรงดันพินดาเมนทอลทางด้านเอาต์พุตสูงขึ้น แต่จะมีข้อเสีย คือ มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับต่ำเกิดขึ้นดังรูปที่ 3.30 เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นรูปคลื่นไซน์ร่วมกับสัญญาณฮาร์มอนิกที่ 3 จะมีข้อดีคือจะปรับปรุงสเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกและขยายช่วงดิเนียร์ของแรงดันพินดาเมนทอล ดังนั้นจึงเป็นการลดฮาร์มอนิกและเพิ่มการได้ประโยชน์จากแรงดันดีซีเชื่อมโยง (DC link voltage)

บทที่ 4

ชุดทดสอบ

โครงการนี้ได้จัดทำชุดทดสอบขึ้นไว้สำหรับทำการทดลองแรงดัน กระแส ร่องลื่นและเพลลา เพื่อศึกษาถึงลักษณะสัญญาณที่เกิดขึ้นและนำสัญญาณที่ได้มาวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับร่องลื่นและเพลลา ทั้งนี้เพื่อนำไปสู่วิธีการวิธีป้องกันหรือลดทอนขนาดของสัญญาณดังกล่าว

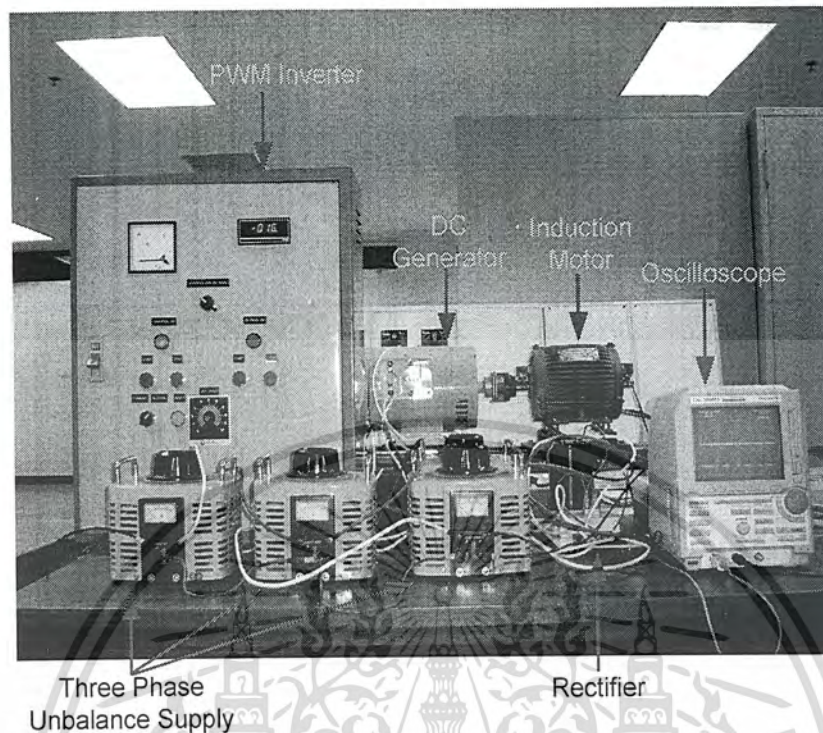
4.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง



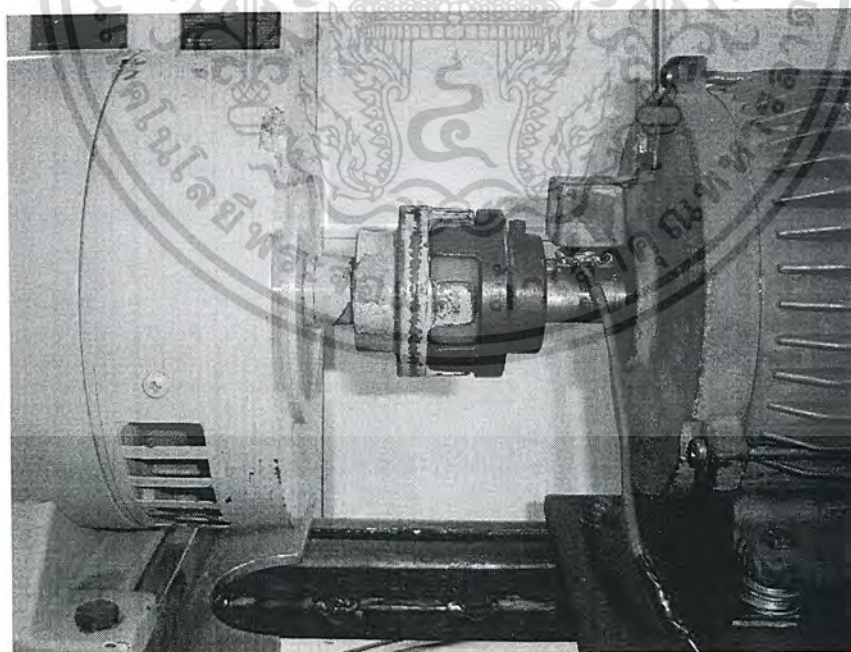
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 รูปจริงของชุดทดลอง

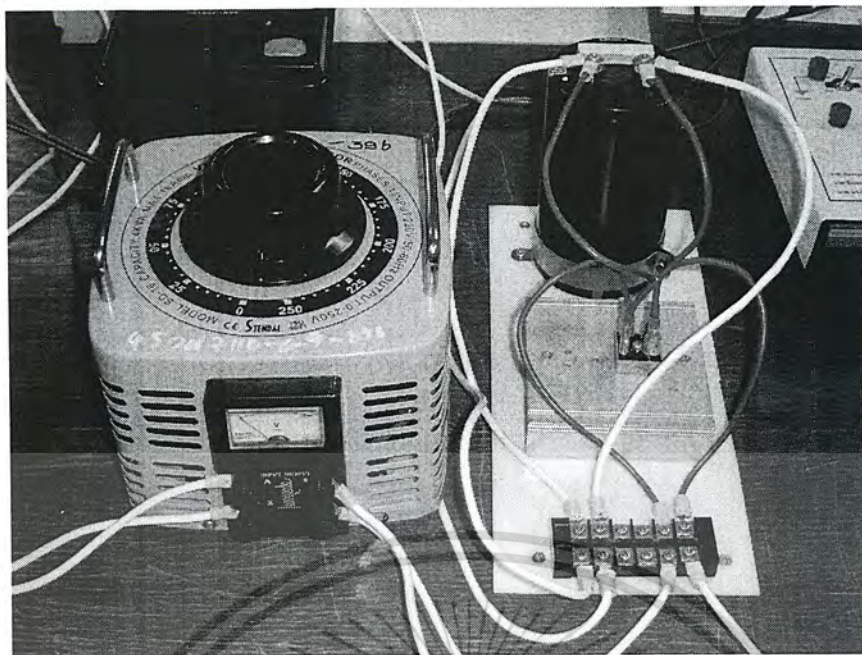


รูปที่ 4.2 ภาพโดยรวมของชุดทดลอง

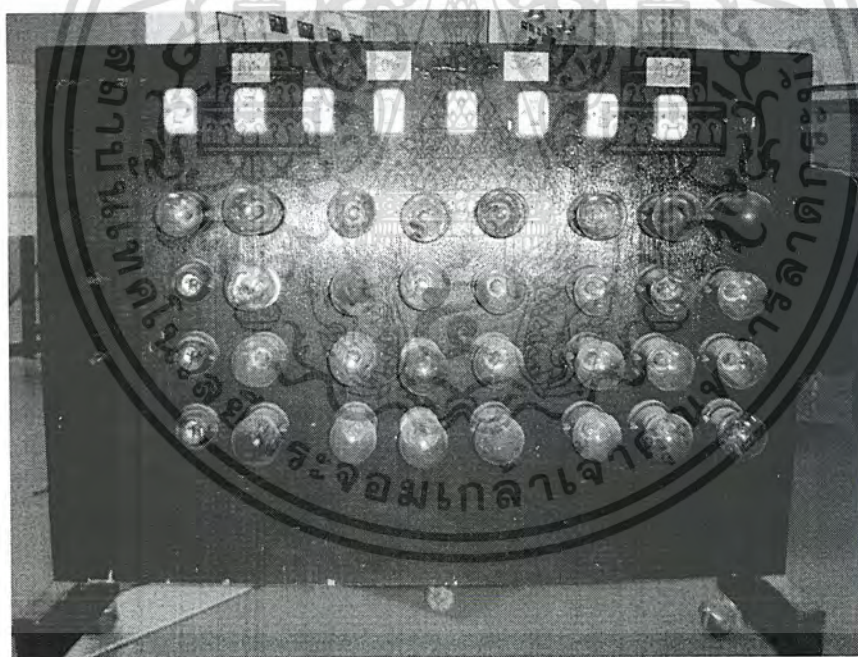


รูปที่ 4.3 ภาพการคัปปลิงระหว่างอินดักชันมอเตอร์กับดีซีเจนเนอเรเตอร์และแปรงถ่านที่ใช้ในการจับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

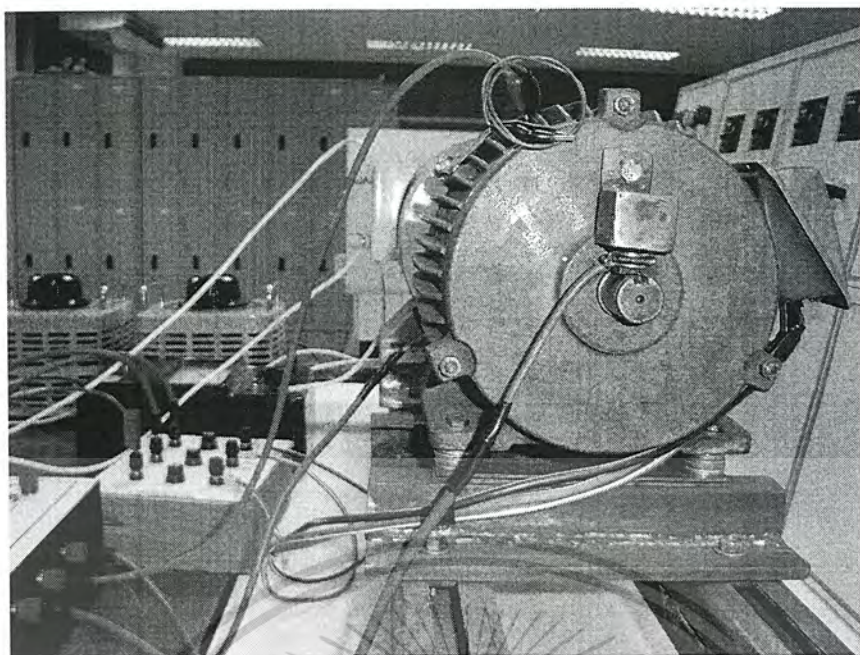


รูปที่ 4.4 ภาพวงจรเรกติไฟเออร์สำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวดสนามของดีซีเจเนอเรเตอร์

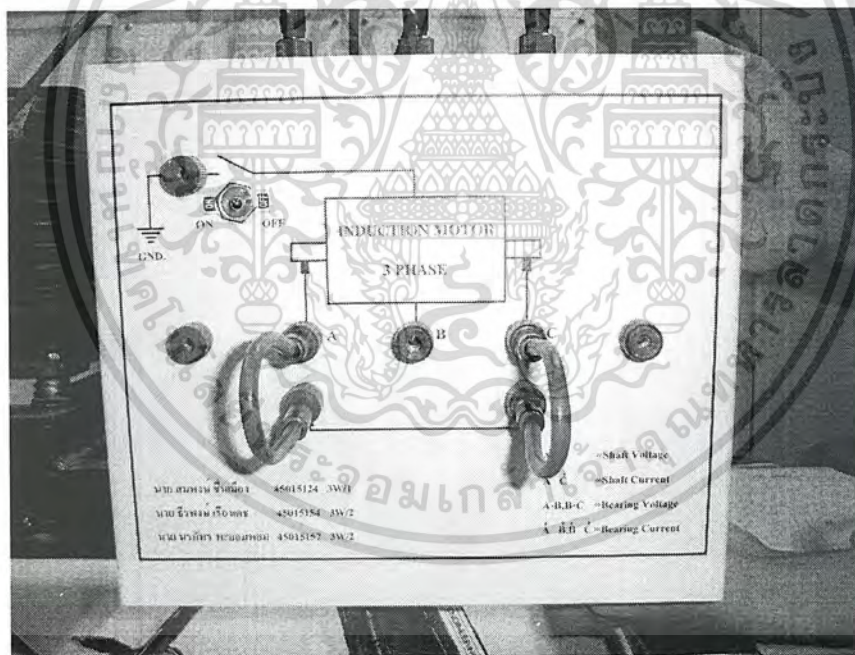


รูปที่ 4.5 ภาพหลอดไฟที่ใช้เป็นโหลดในการทดลองโดยต่อจากดีซีเจเนอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ภาพแปร่งถ่านที่ปลายเพล่อีกด้านหนึ่งที่ใช้ในการจับสัญญาณ



รูปที่ 4.7 ภาพกล่องทดลองที่ใช้ในการจับสัญญาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

3 เฟส 4 ขั้ว Class E Volts 220/380 50 Hz 1420 rpm. โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก
 ร่องลื่นเป็นแบบตลับลูกปืน

4.2.2 AC Line

4.2.2.1 คลื่นไซน์ 3 เฟส 50 Hz

4.2.2.2 Output waveform asynchronous SPWM

Switching frequency at 2.9 kHz-11.7 kHz, Maximum motor size 5.5 kW

4.2.3 โหลด (DC Machine)

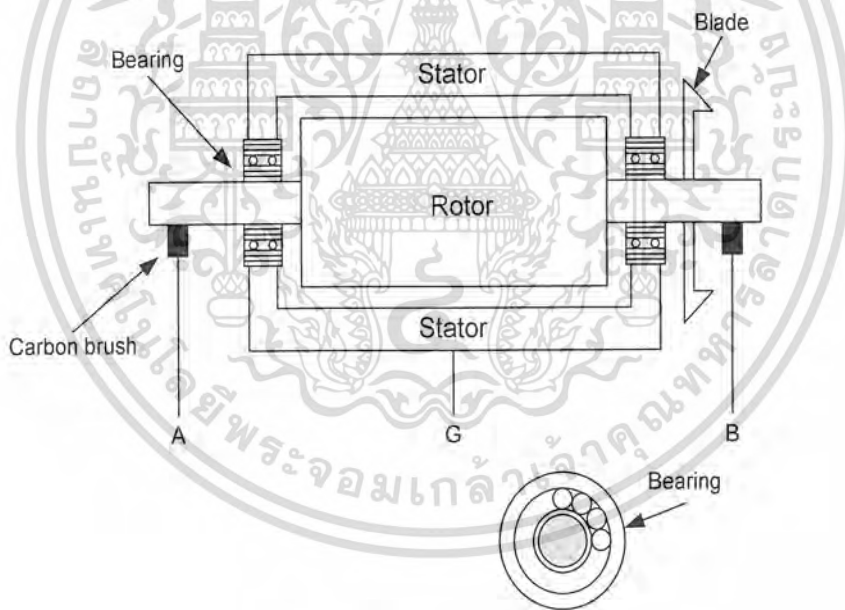
Output 1.5KW. Volts 130 V. Amps. 15A rpm. 1800

FLD. Volts 180 V Duty Cont Would shunt

Type KC-150

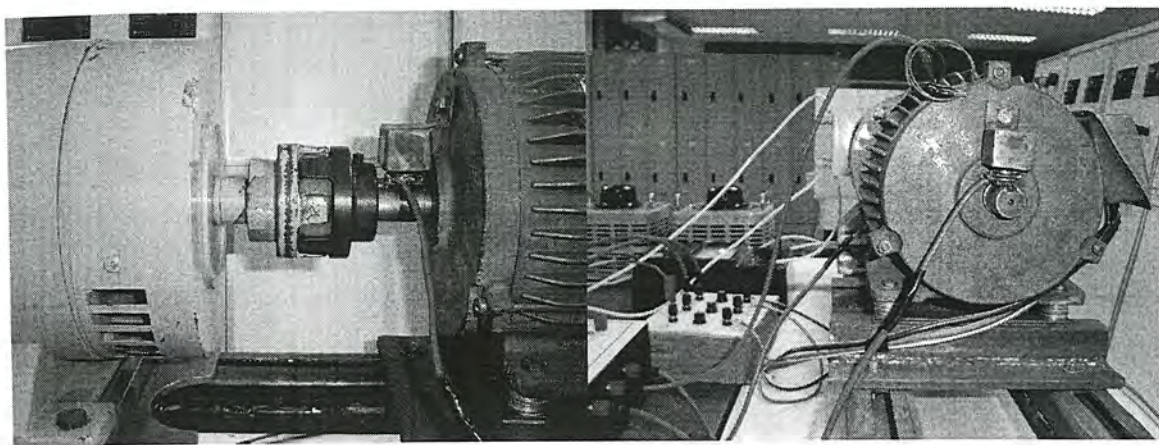
4.3 ตำแหน่งการทดสอบสัญญาณเฟลาและร่องลื่น

ตำแหน่งการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8 โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ ตำแหน่ง A จะเชื่อมต่อกับเพลาด้านหน้าของมอเตอร์โดยผ่านแปรงถ่าน ตำแหน่ง B จะเชื่อมต่อกับเพลาด้านหลัง โดยผ่านแปรงถ่าน แสดงภาพจริงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งในการทดสอบหาค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

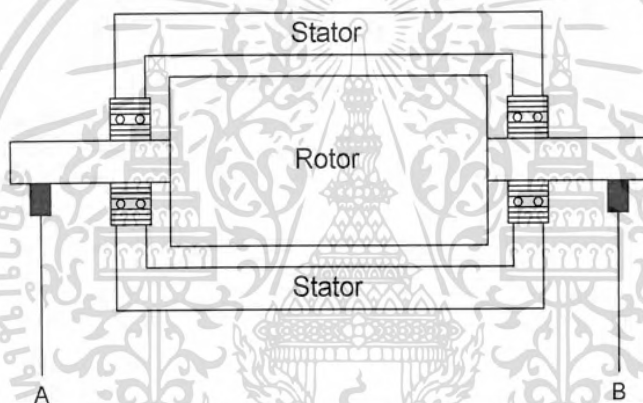


(ก)

(ข)

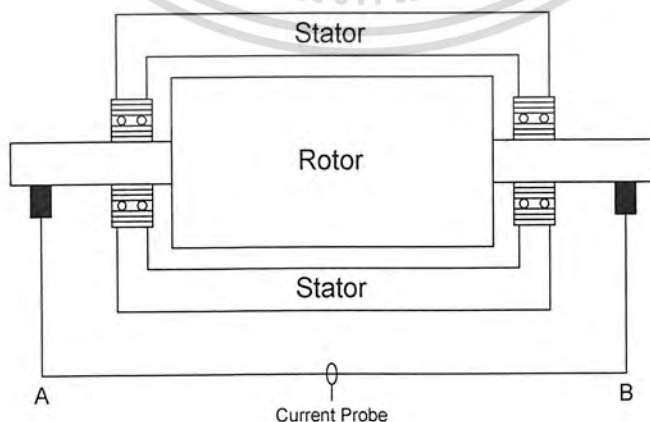
รูปที่ 4.9 แปรถ่านที่ติดตั้งอยู่กับเพลลา (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

4.3.1 ลักษณะการวัดแรงดันเพลลา



รูปที่ 4.10 วิธีการวัดแรงดันเพลลาโดยวัดที่จุด A กับ B

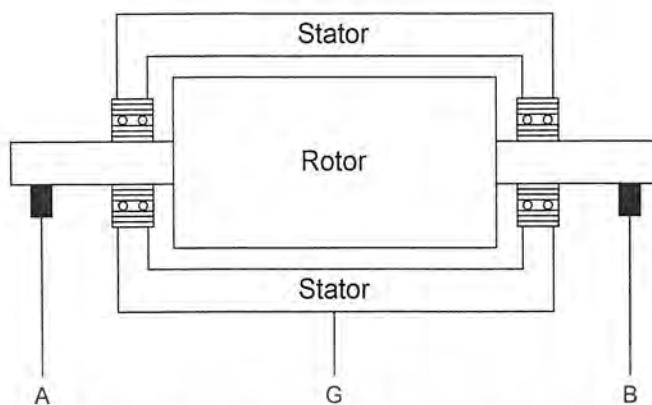
4.3.2 ลักษณะการวัดกระแสเพลลา



รูปที่ 4.11 วิธีการวัดกระแสเพลลาโดย Current Probe

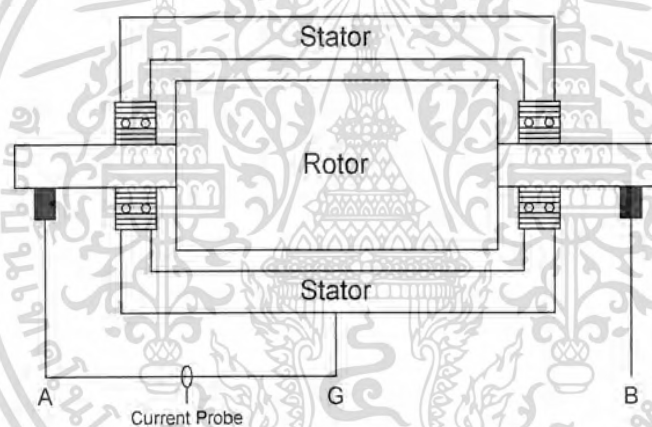
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ลักษณะการวัดแรงดันรองลื่น



รูปที่ 4.12 วิธีการวัดแรงดันรองลื่นโดยวัดที่จุด A หรือ B เทียบกับจุด G

4.3.4 ลักษณะการวัดกระแสรองลื่น



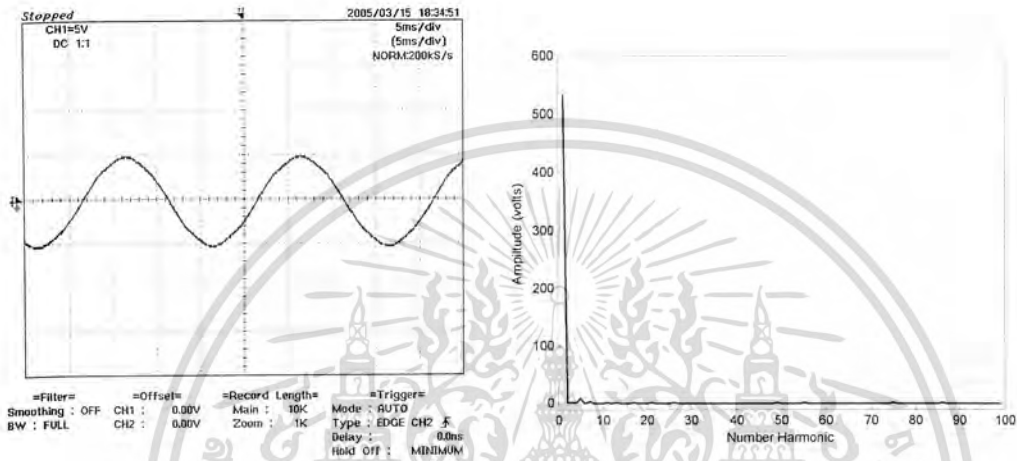
รูปที่ 4.13 วิธีการวัดกระแสรองลื่นโดยเชื่อมต่อจุด A หรือ B เข้ากับจุด G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 แหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดสอบ

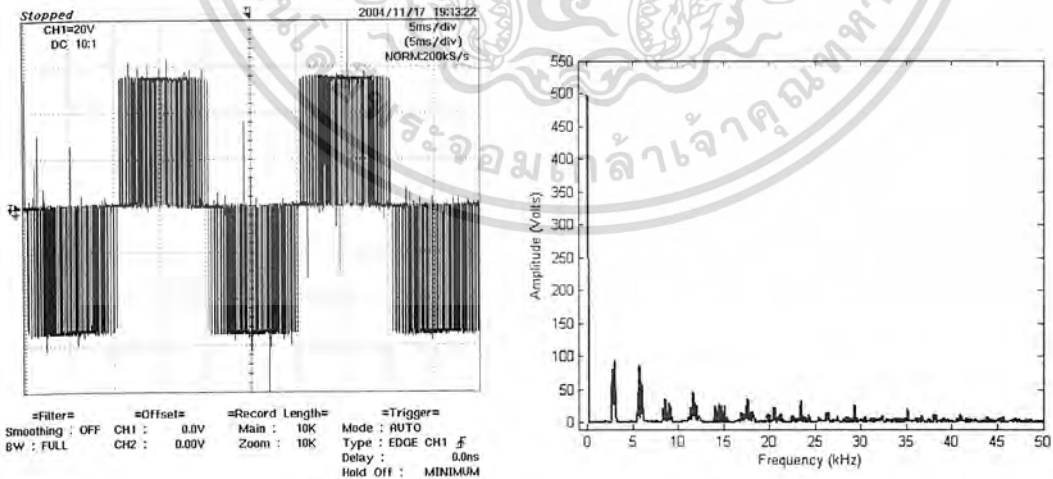
แหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แหล่งจ่ายคลื่นไซน์และแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแหล่งจ่ายคลื่น ไซน์จะไม่มียอดประกอบของฮาร์มอนิกรวมอยู่แต่แหล่งจ่ายที่เป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมียอดประกอบของฮาร์มอนิกรวมอยู่

4.4.1 เอซีไลน์



รูปที่ 4.14 สัญญาณแรงดันไลน์และสเปกตรัมที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายเอซี

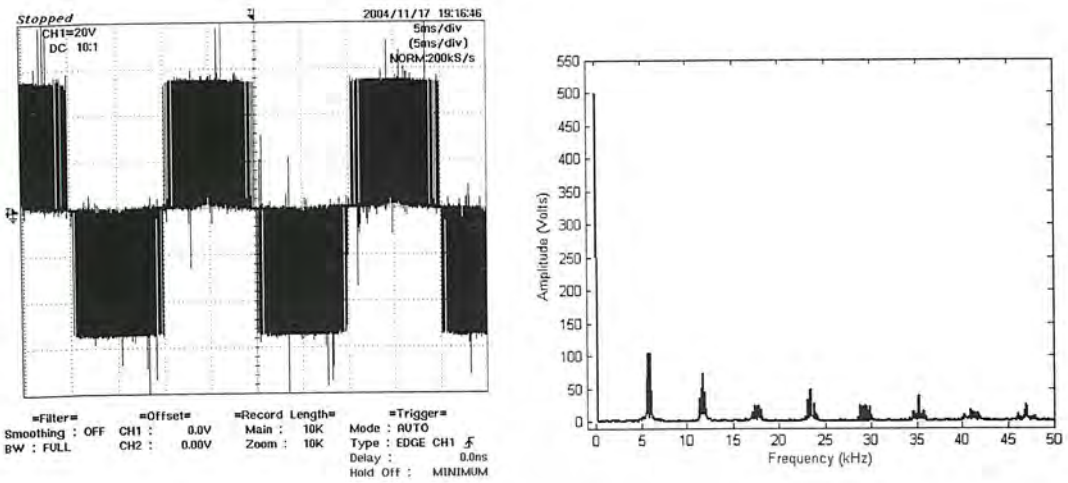
4.4.2 เอซีไครว้(อินเวอร์เตอร์แบบ PWM)



รูปที่ 4.15 สัญญาณแรงดันไลน์และสเปกตรัมที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM

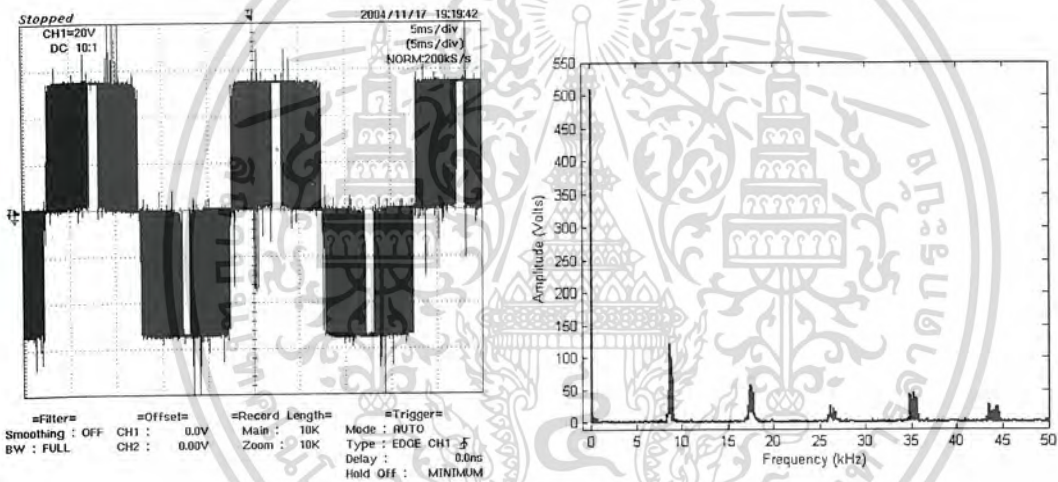
$$\text{ความถี่ } f_s = 2.9 \text{ kHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 สัญญาณแรงดันไลน์และสเปกตราที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM

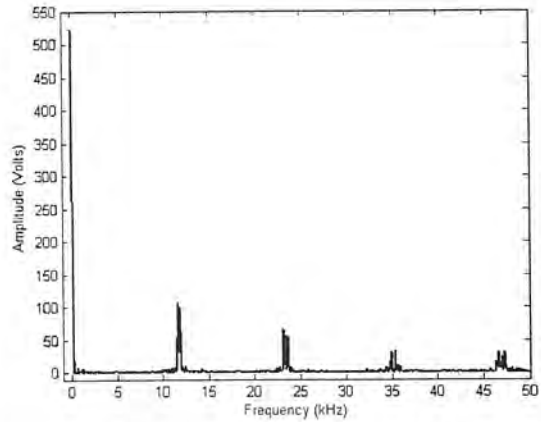
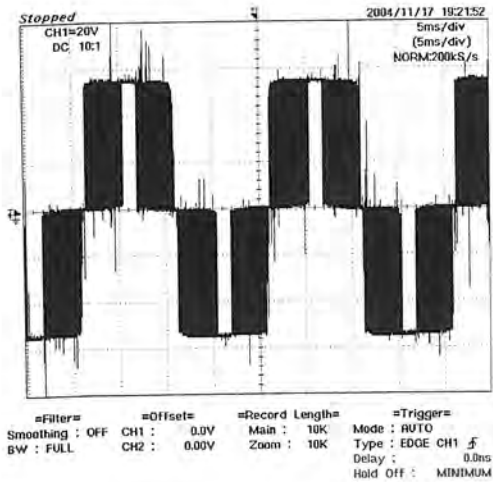
ความถี่ $f_s = 5.9 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.17 สัญญาณแรงดันไลน์และสเปกตราที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM

ความถี่ $f_s = 8.8 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 สัญญาณแรงดันโวลต์และสเปกตรัมที่วัดได้จริงจากแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM
ความถี่ $f_s = 11.7 \text{ kHz}$

จากรูปสัญญาณที่วัดได้จริงเมื่อนำมาใช้ MATLAB ค้นหาค่าสเปกตรัมจะเห็นว่า สัญญาณเอชี่โวลต์จะได้สเปกตรัมของความถี่หลักมูลเพียงอย่างเดียวจะไม่มีองค์ประกอบของฮาร์โมนิก ส่วนสัญญาณเอชี่โวลต์จะเห็นว่า จะมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกที่กระจายเป็นกลุ่มๆอยู่ในสัญญาณและที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งน้อยจะเกิดฮาร์โมนิกอันดับต่ำแต่ที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งมากอันดับของฮาร์โมนิกจะเลื่อนออกไป

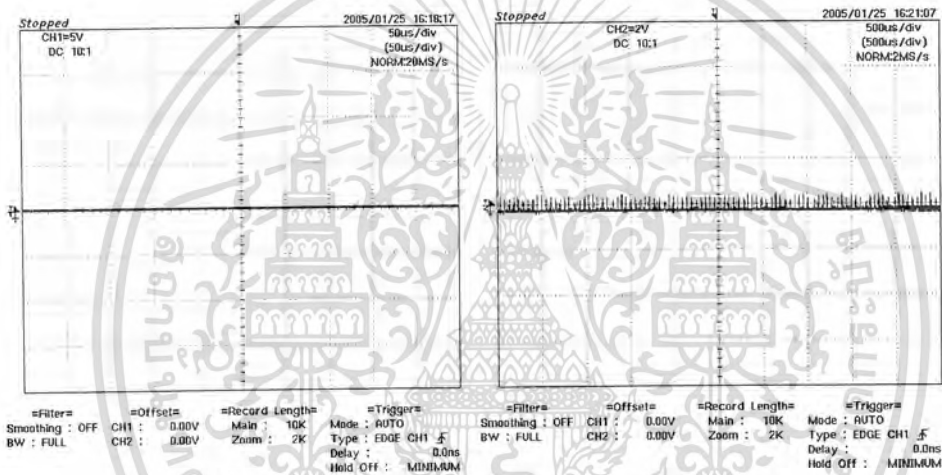
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

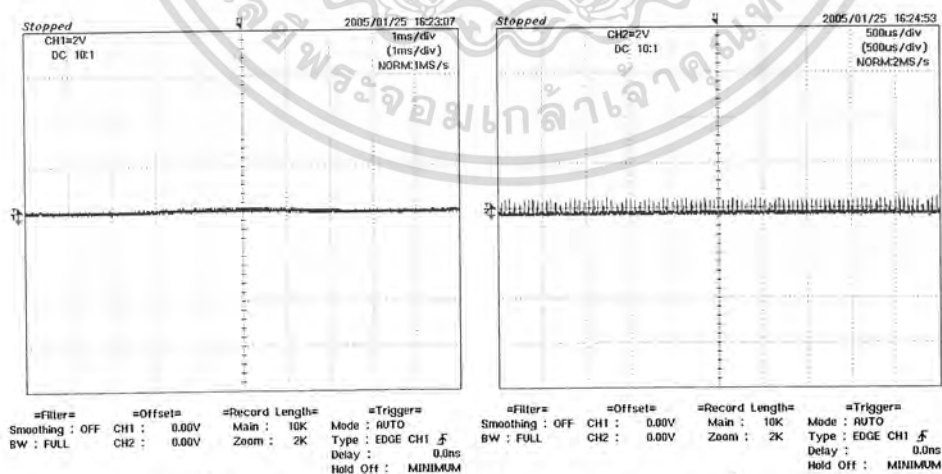
ผลการทดลอง

การทดลองเริ่มจากแหล่งจ่ายรูปคลื่น ไซน์แล้วเก็บสัญญาณดังกล่าวสำหรับเปรียบเทียบกับกรณี แหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่ความถี่สวิชต์ค่าต่างๆ ย่านการทำงานของมอเตอร์ที่ความถี่อินพุท 10-50 Hz (v/f คงที่) มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีพิกัด 2 Hp 4 ขั้วแม่เหล็ก ระดับแรงดัน 380 V_{L-L} ทดสอบตลอด ย่านการทำงานของมอเตอร์ที่พิกัด โหลดต่างๆ ผลการทดลองแสดงโดยแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

5.1 ทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นคลื่น ไซน์



รูปที่ 5.1 รูปสัญญาณแรงดันเฟส(ซ้าย)และกระแสเฟส(ขวา)



รูปที่ 5.2 รูปสัญญาณแรงดันรองคลื่น(ซ้าย)และกระแสรองคลื่น(ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

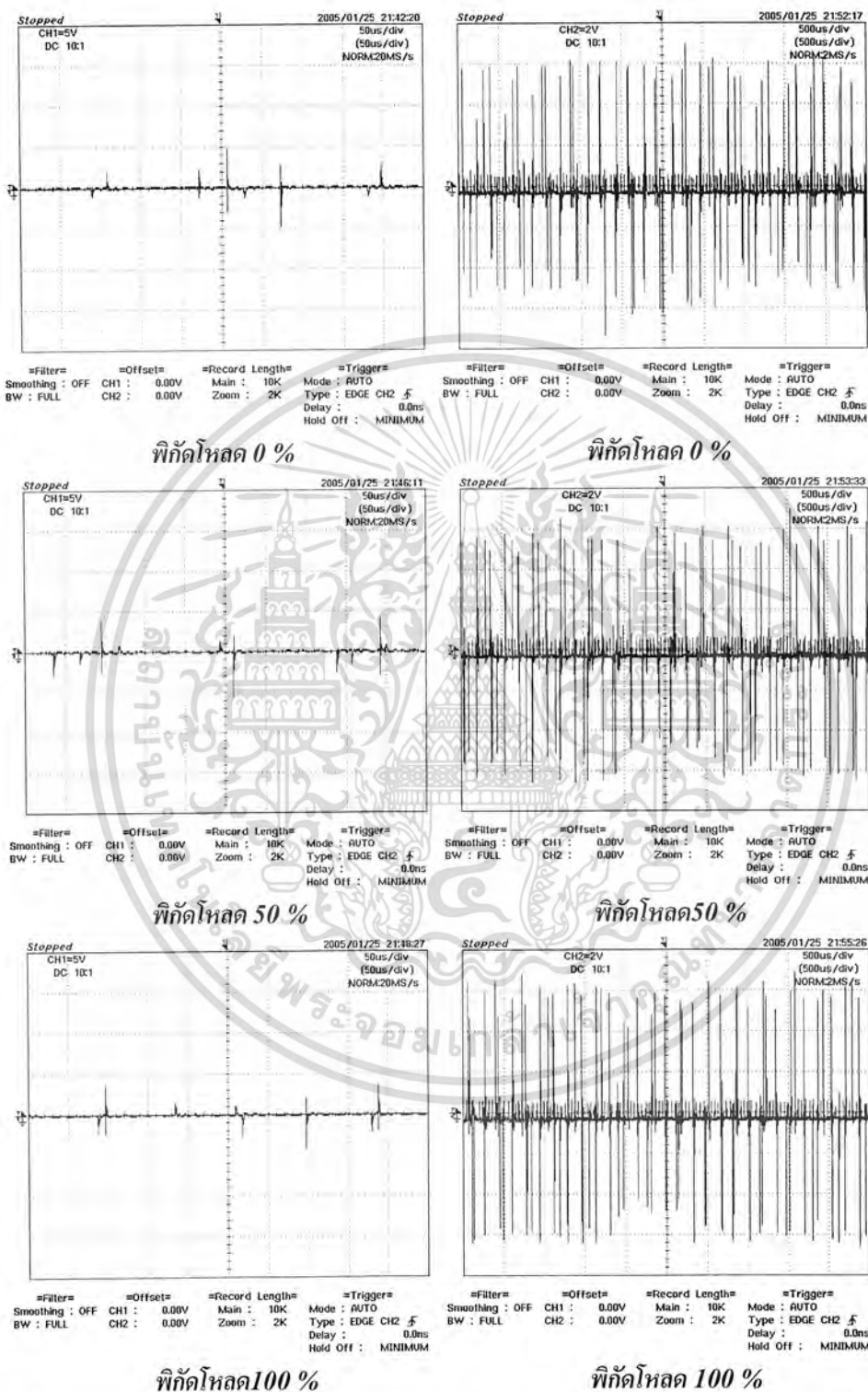
ในมอเตอร์เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์จะเหนี่ยวนำแกนโรเตอร์ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ (Induce voltage) ตามเส้นทางที่ฟลักแม่เหล็กตัดผ่าน จากรูปที่ 5.1 ในกรณีแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์จะไม่ปรากฏสัญญาณแรงดันที่เพลอย่างชัดเจนเนื่องจากการที่แรงดันไซน์ไม่ได้ทำให้เกิดการตัดกลับ ไปมาของเส้นแรงแม่เหล็กด้วยความถี่ที่มากเหมือนแหล่งจ่าย PWM ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เพลจึงมีค่าน้อยมากๆจึงไม่สามารถวัดรูปสัญญาณออกมาได้ ส่วนสัญญาณของกระแสที่เพลมีค่าเกิดขึ้นเล็กน้อยและสามารถวัดค่าสัญญาณได้เนื่องจากเป็นสัญญาณจาก Current Probe มีค่าละเอียดลักษณะดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

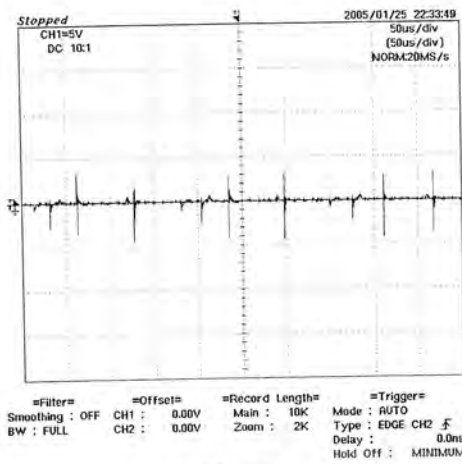
5.2 ทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM

5.2.1 สัญญาณแรงดันและกระแสเพลลา

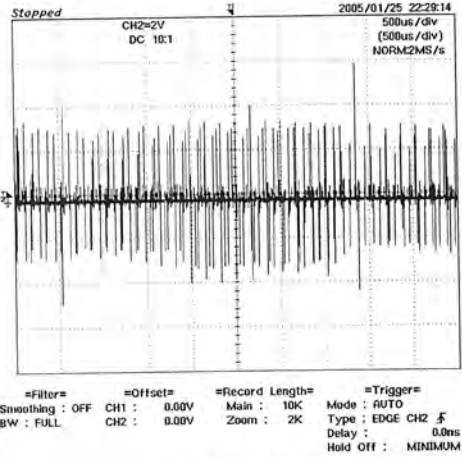


รูปที่ 5.3 สัญญาณแรงดันเพลลา(ซ้าย)และกระแสเพลลา(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s=2.9\text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ

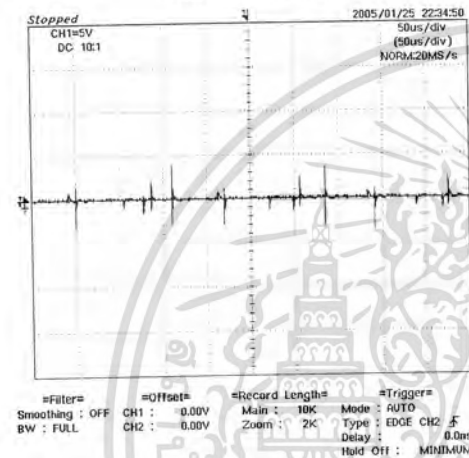
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



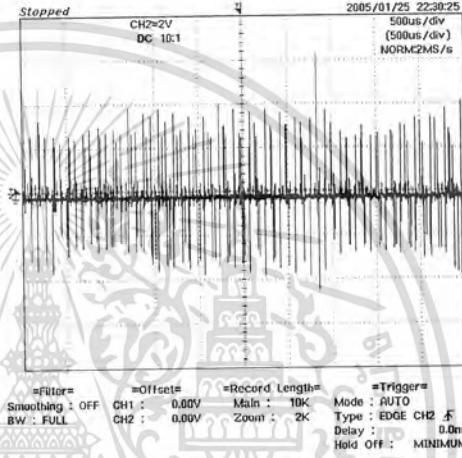
พิกัดโหลด 0 %



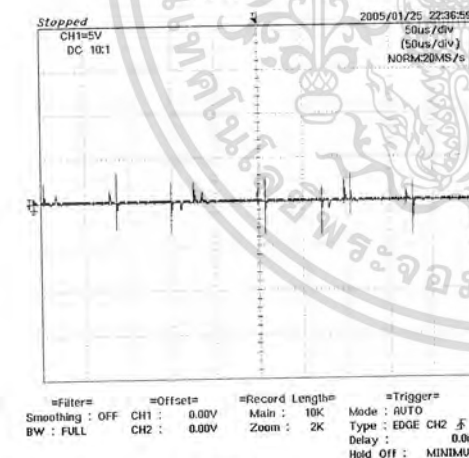
พิกัดโหลด 0 %



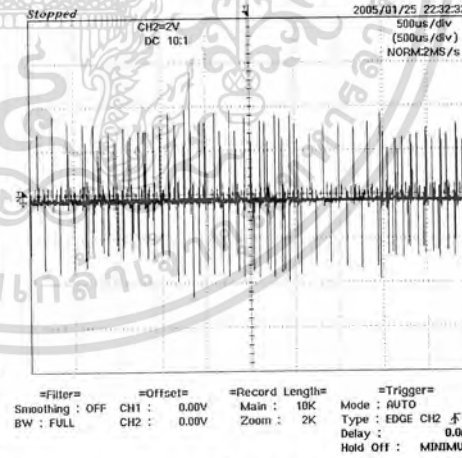
พิกัดโหลด 50 %



พิกัดโหลด 50 %



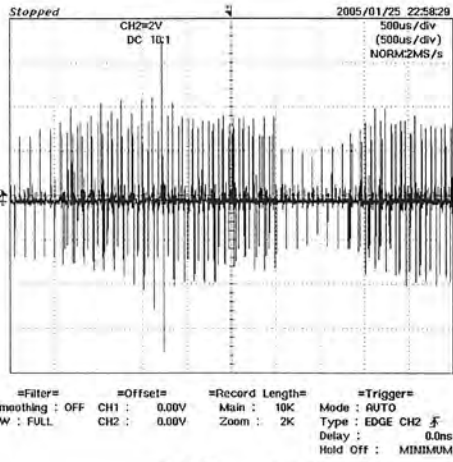
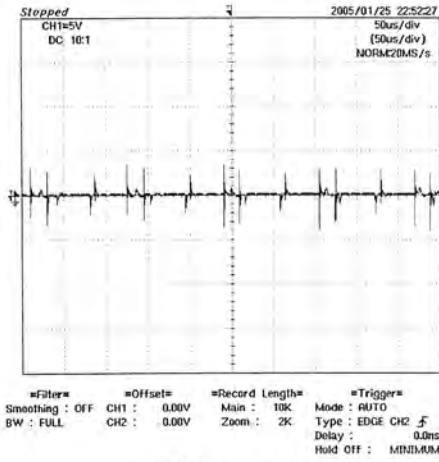
พิกัดโหลด 100 %



พิกัดโหลด 100 %

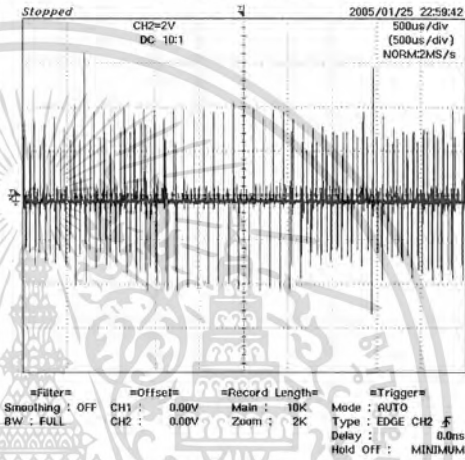
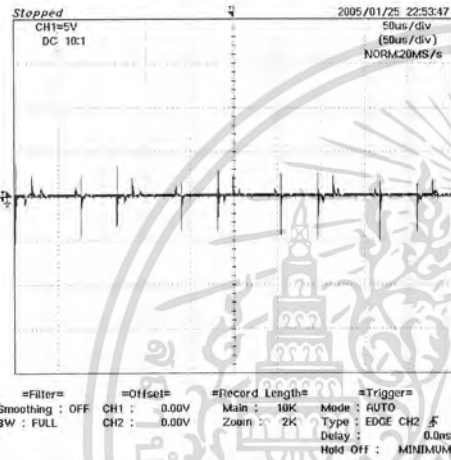
รูปที่ 5.4 สัญญาณแรงดันพลา(ซ้าย)และกระแสพลา(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s=5.9 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



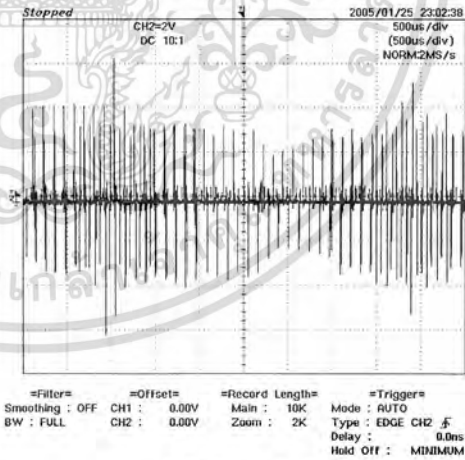
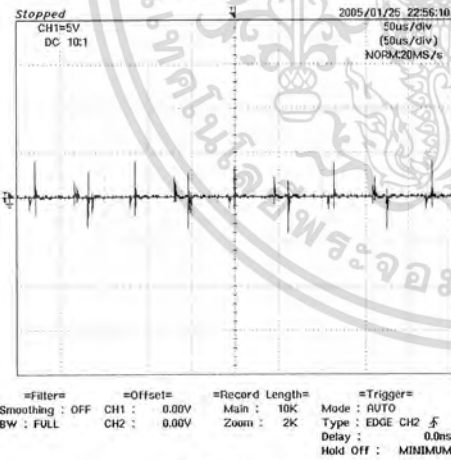
พิกัดโหลด 0 %

พิกัดโหลด 0 %



พิกัดโหลด 50 %

พิกัดโหลด 50 %

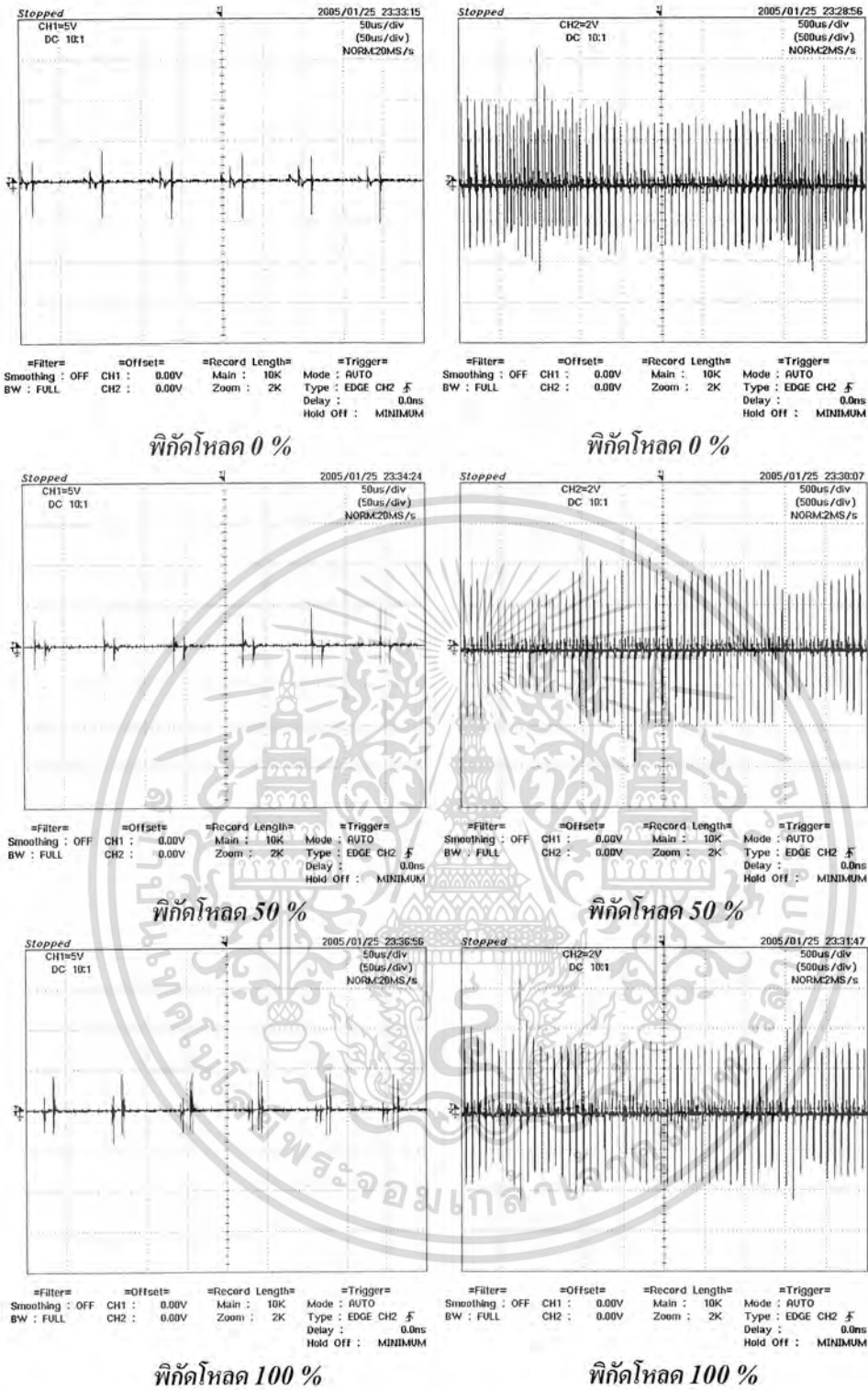


พิกัดโหลด 100 %

พิกัดโหลด 100 %

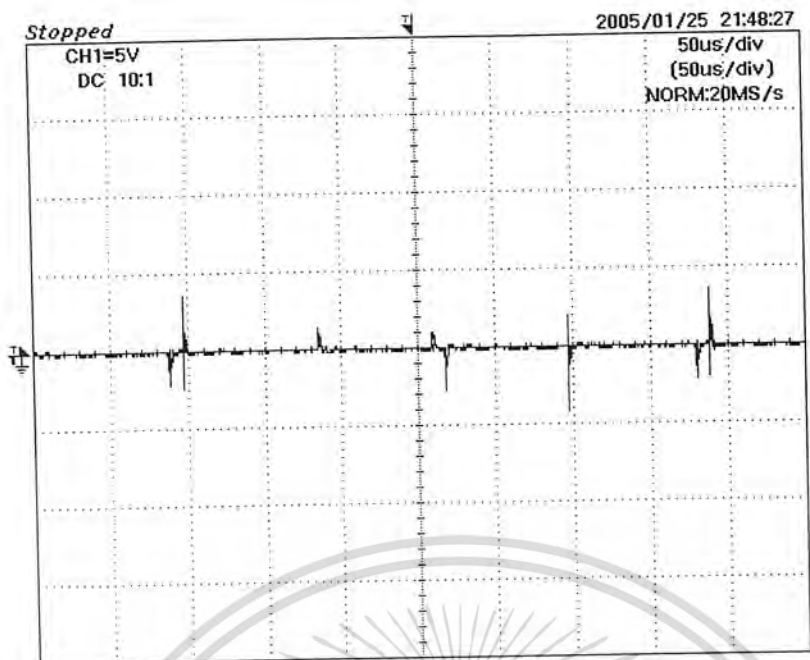
รูปที่ 5.5 สัญญาณแรงดันเพลา(ซ้าย)และกระแสเพลา(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s=8.8 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



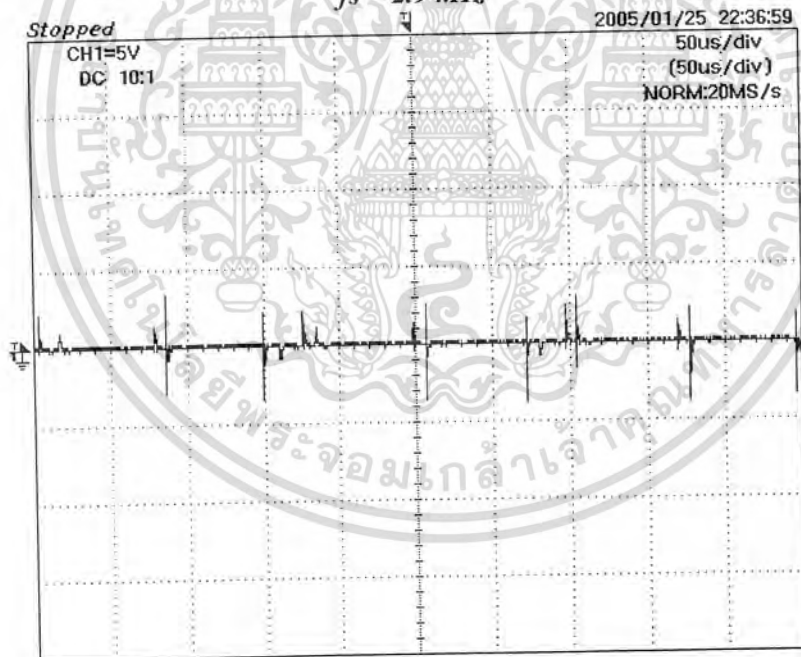
รูปที่ 5.6 สัญญาณแรงดันเพลลา(ซ้าย)และกระแสเพลลา(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s=11.7 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0.00V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 2K Type : EDGE CH2 \uparrow
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

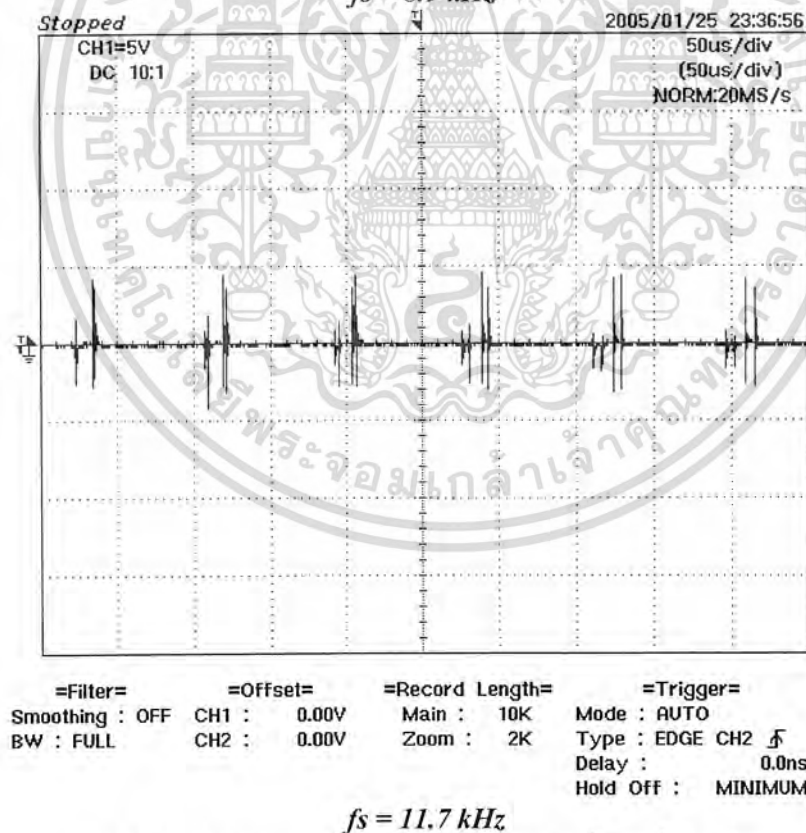
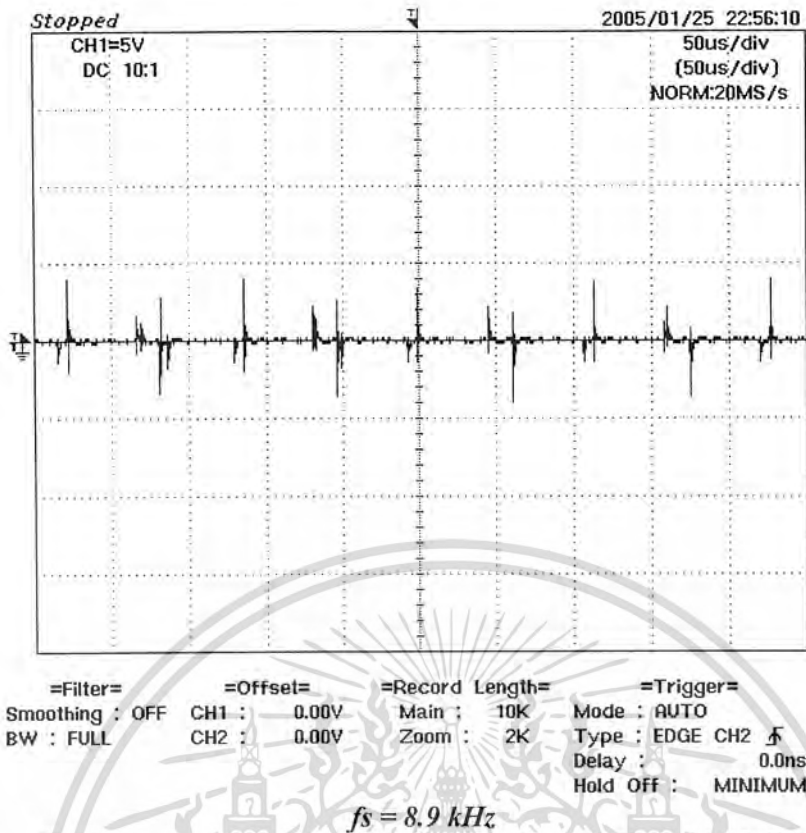
$f_s = 2.9 \text{ kHz}$



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0.00V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 2K Type : EDGE CH2 \uparrow
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

$f_s = 5.9 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



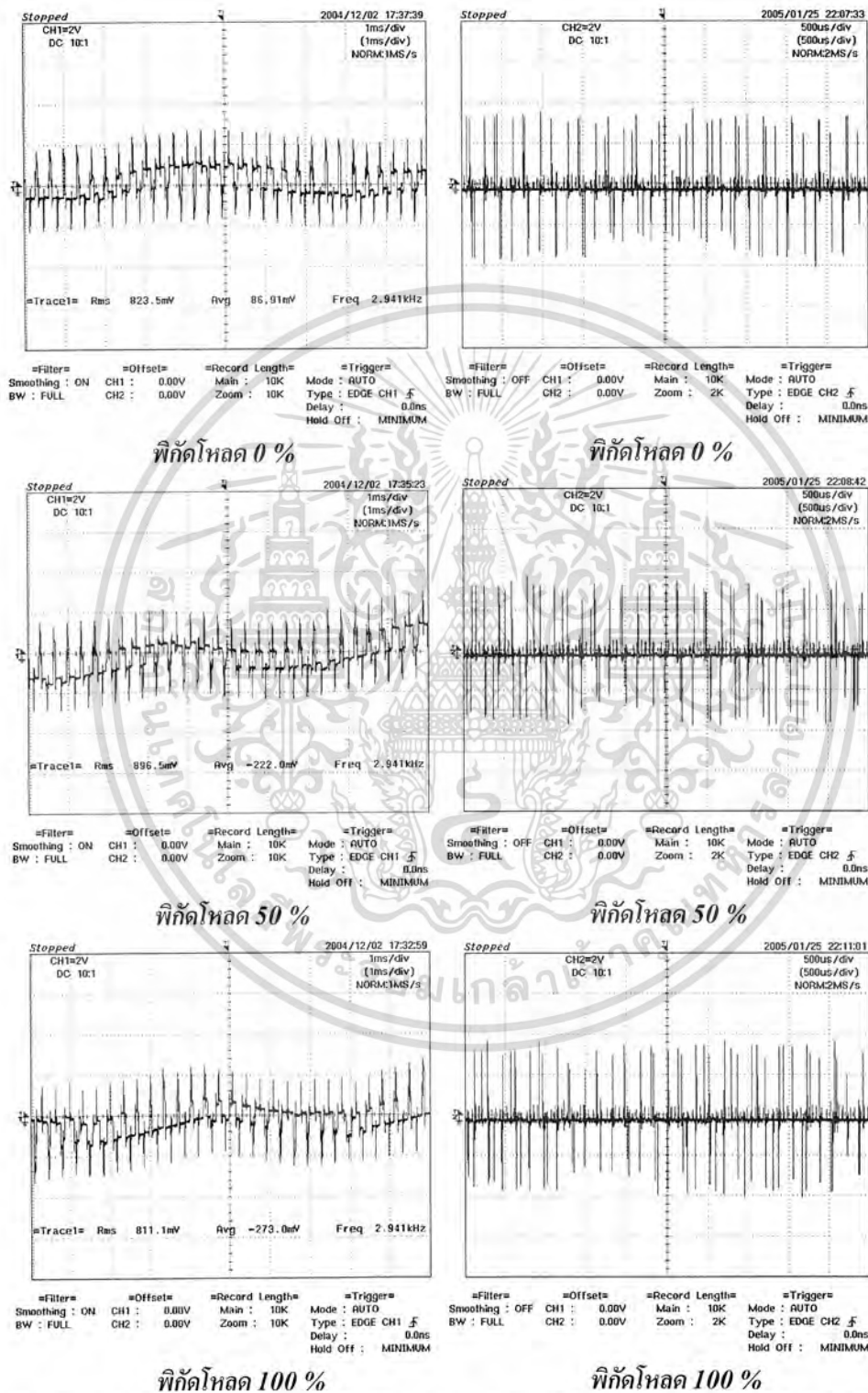
รูปที่ 5.7 สัญญาณแรงดันผลาพิทัดโหลด 100% ที่ความถี่ (f_s) ต่างๆ

จากการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสผลาพิที่พิทัดโหลดต่างๆจะเห็นว่าสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากจะมีรูปสัญญาณที่ได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการปรับความถี่สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ให้มีค่ามากขึ้นก็จะเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ว่ารูปสัญญาณของแรงดันจะมีความถี่ในการเกิดสัญญาณมากขึ้นแต่ขนาดยังคงใกล้เคียงกัน ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 5.7

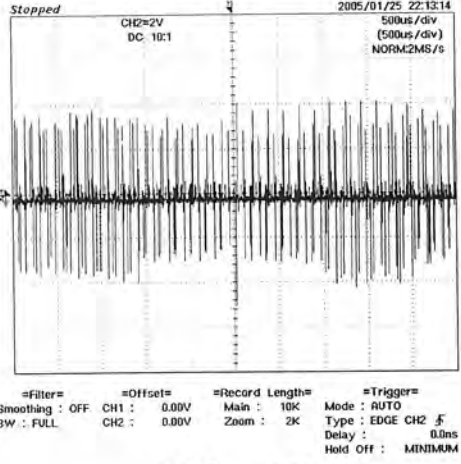
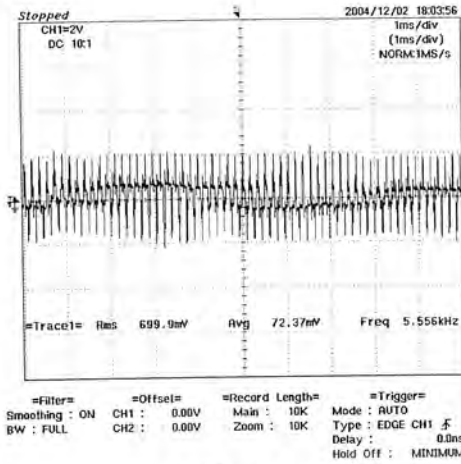
5.2.2 สัญญาณแรงดันและกระแสรอนลิน



รูปที่ 5.8 สัญญาณแรงดันรอนลิน(ซ้าย)และกระแสรอนลิน(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s=2.9$ kHz เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้

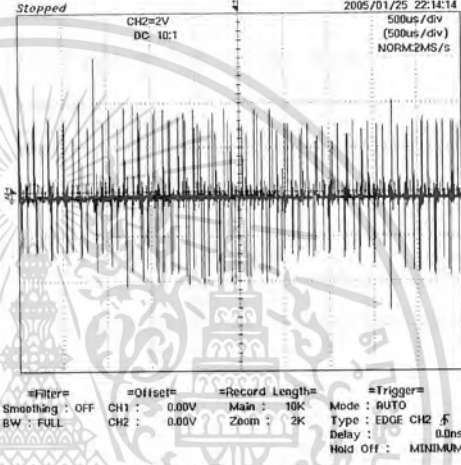
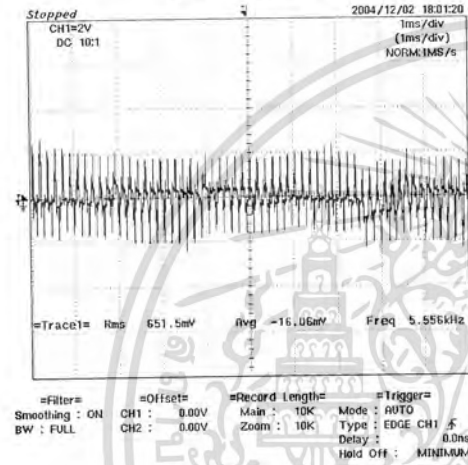
สถานะโหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



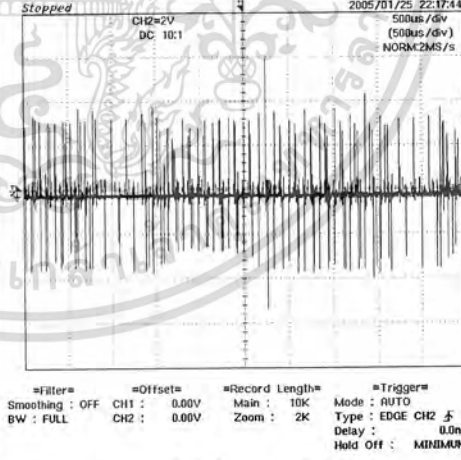
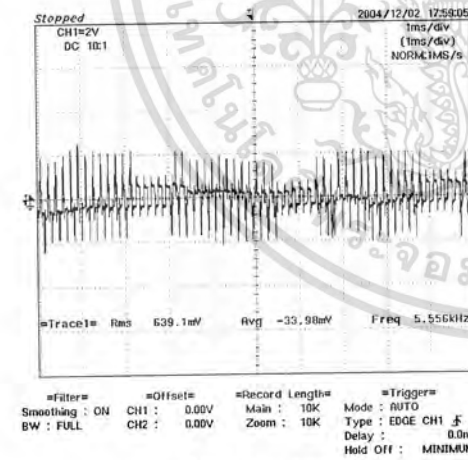
พิกัดโหลด 0 %

พิกัดโหลด 0 %



พิกัดโหลด 50 %

พิกัดโหลด 50 %

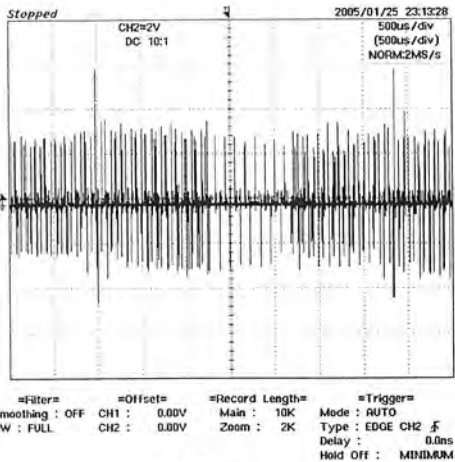
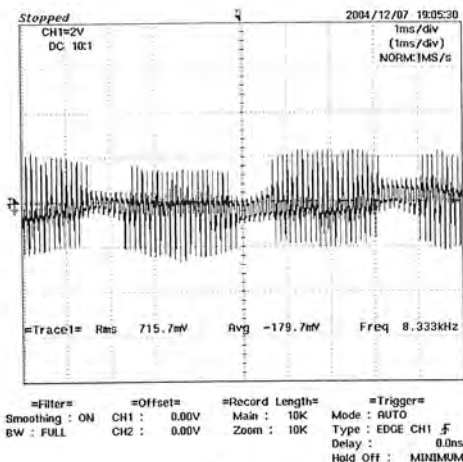


พิกัดโหลด 100 %

พิกัดโหลด 100 %

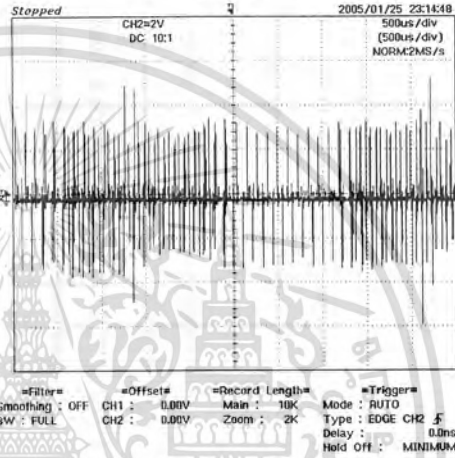
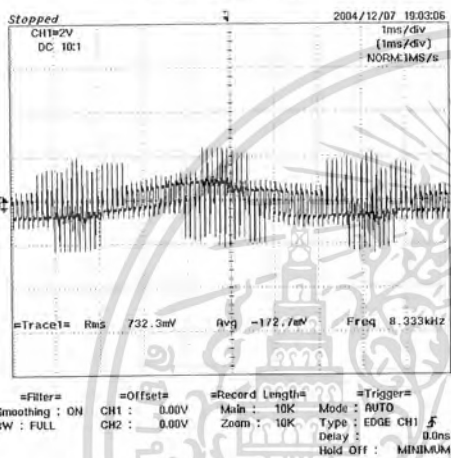
รูปที่ 5.9 สัญญาณแรงดันรองคลื่น(ซ้าย)และกระแสรองคลื่น(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s=5.9 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



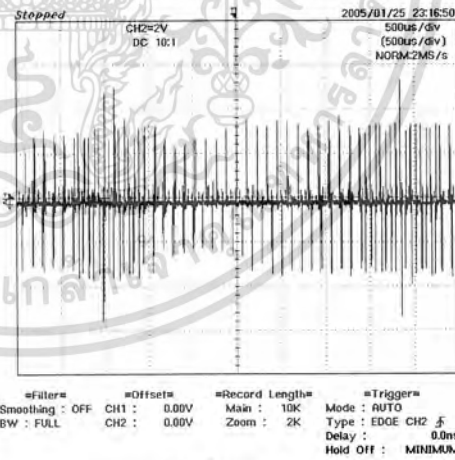
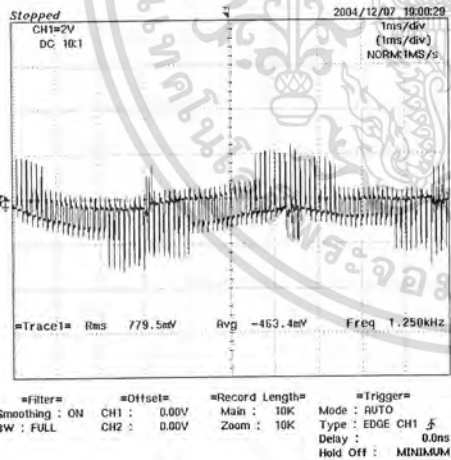
พิกัดโหลด 0 %

พิกัดโหลด 0 %



พิกัดโหลด 50 %

พิกัดโหลด 50 %

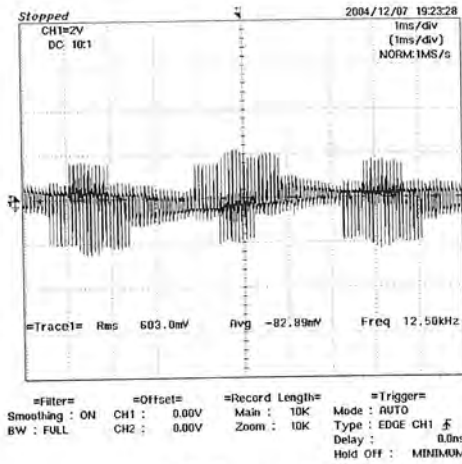


พิกัดโหลด 100 %

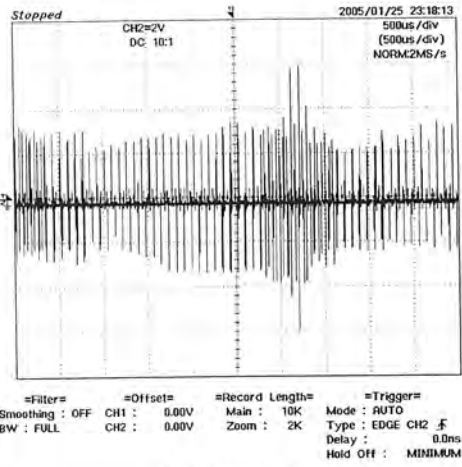
พิกัดโหลด 100 %

รูปที่ 5.10 สัญญาณแรงดันรองคลื่น(ซ้าย)และกระแสคลื่น(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 8.9 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงาน ภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ

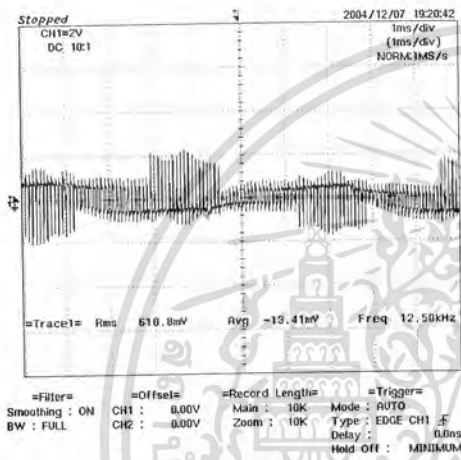
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



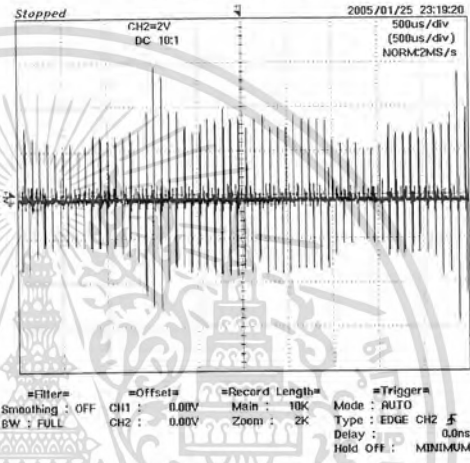
พิกัดโหลด 0 %



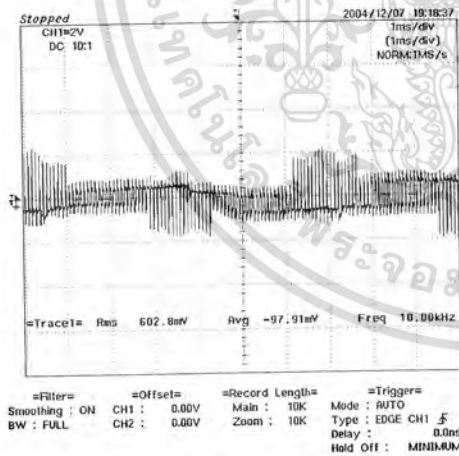
พิกัดโหลด 0 %



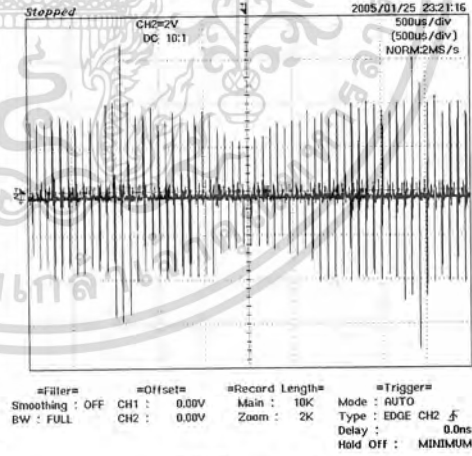
พิกัดโหลด 50 %



พิกัดโหลด 50 %



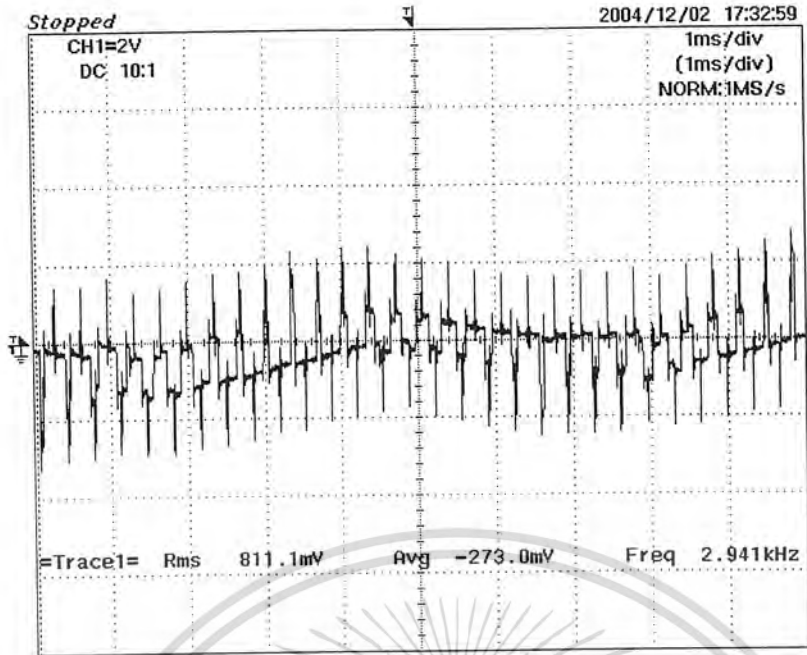
พิกัดโหลด 100 %



พิกัดโหลด 100 %

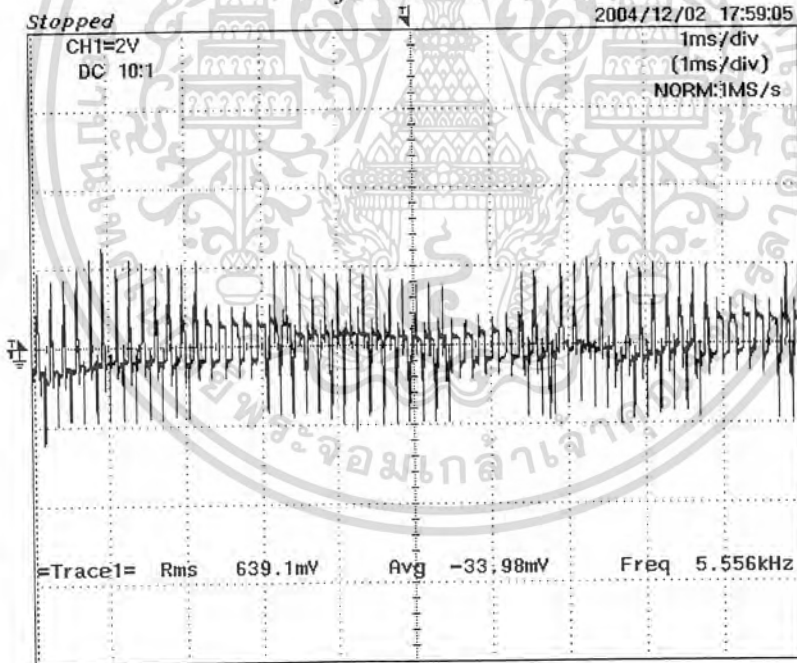
รูปที่ 5.11 สัญญาณแรงดันรองดิน(ซ้าย)และกระแสรองดิน(ขวา)อินเวอร์เตอร์มี $f_s=11.7 \text{ kHz}$ เมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้สภาวะโหลดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.00V CH2 : 0.00V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 \uparrow Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

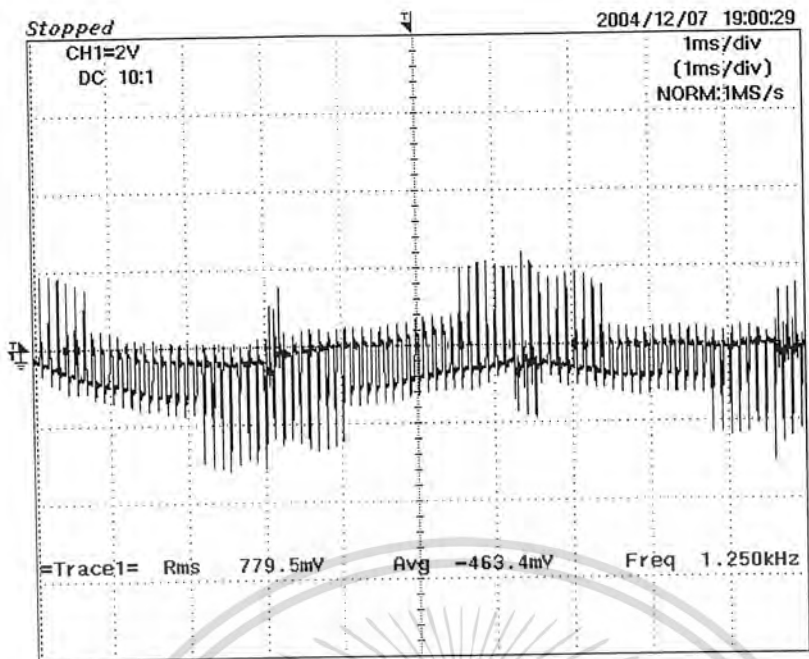
$f_s = 2.9 \text{ kHz}$



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.00V CH2 : 0.00V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 \uparrow Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

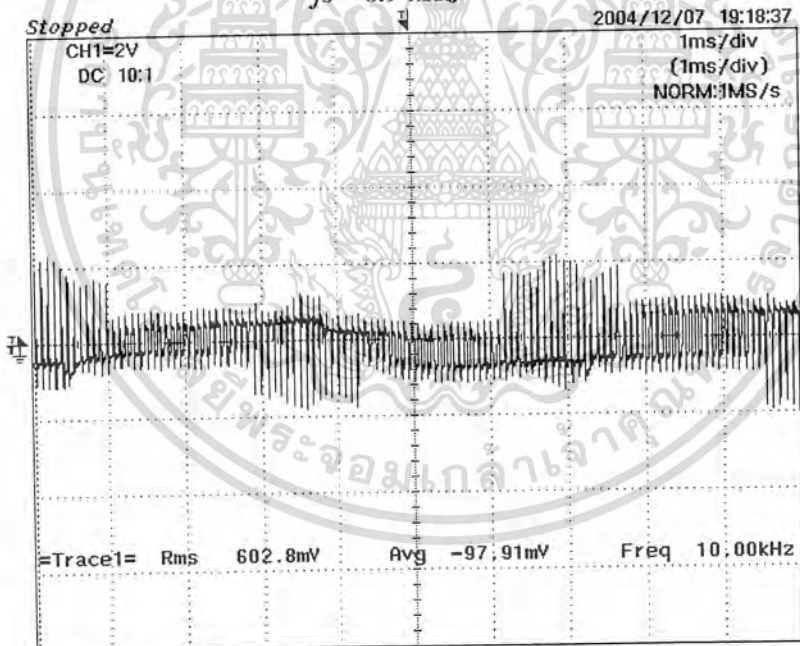
$f_s = 5.9 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.00V CH2 : 0.00V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 \uparrow Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

$f_s = 8.9 \text{ kHz}$



=Filter= Smoothing : ON BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.00V CH2 : 0.00V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 \uparrow Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

$f_s = 11.7 \text{ kHz}$

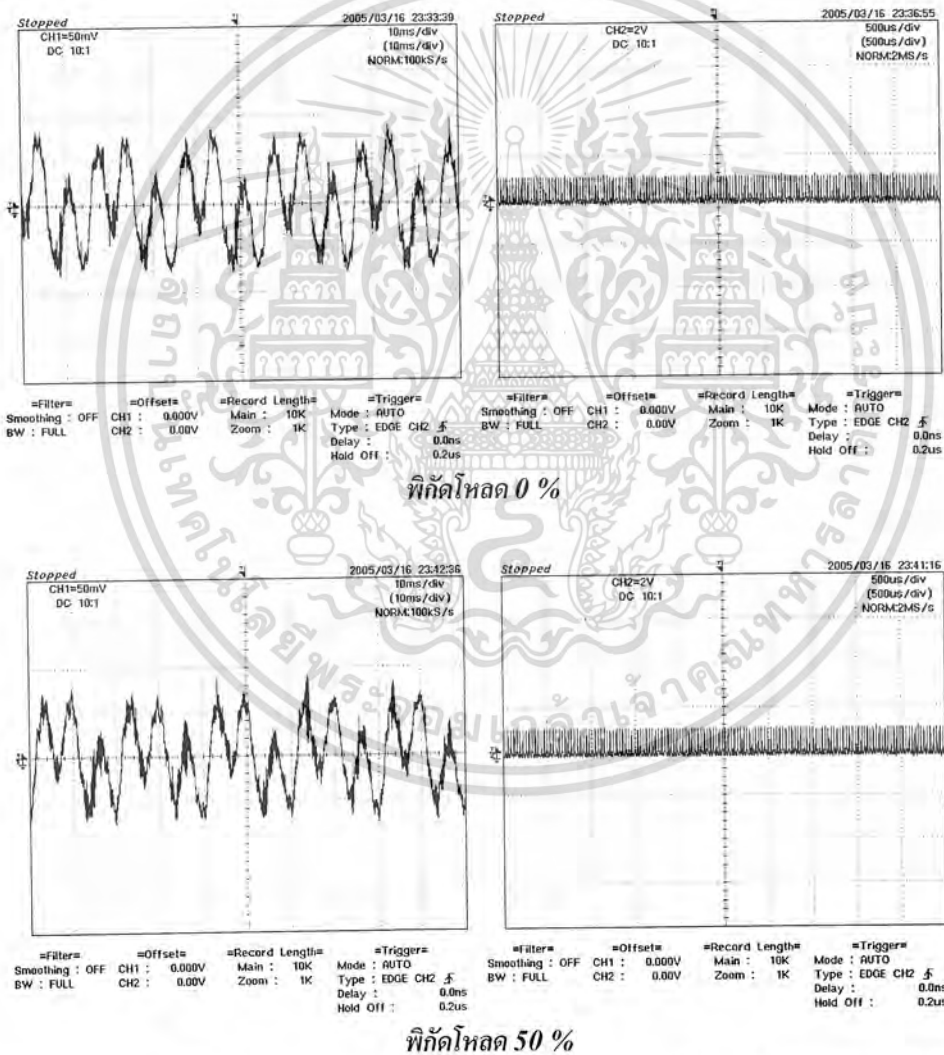
รูปที่ 5.12 สัญญาณแรงดันรอสันที่กดโหลด 100% ที่ความถี่ (f_s) ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดสัญญาณแรงดันและกระแสรอนที่พิกัดโหลดต่างๆ จะเห็นว่าสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากจะมีรูปสัญญาณที่ได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการปรับความถี่สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ให้มีความถี่มากขึ้นก็จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณของแรงดันจะมีความถี่ในการเกิดสัญญาณมากขึ้นและลักษณะของขนาดสัญญาณจะมีลักษณะเพิ่มและลดเป็นช่วงๆ ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 5.12

กรณีแหล่งจ่ายเป็น PWM การเห็นยว่นาของเส้นแรงแม่เหล็กที่แกนโรเตอร์มีการสวิตซ์กลับไปกลับมาด้วยความถี่สูงคั้งนั้นการเห็นยว่นาที่แกนจึงมีค่ามากขึ้นและขึ้นอยู่กัความถี่ของการปรับความถี่สวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์ด้วย (fs) ที่ความถี่ยิ่งมากช่วงในการเกิดสัญญาณจะมีช่วงที่ถี่มากขึ้นตามการปรับสวิตซ์ของอินเวอร์เตอร์

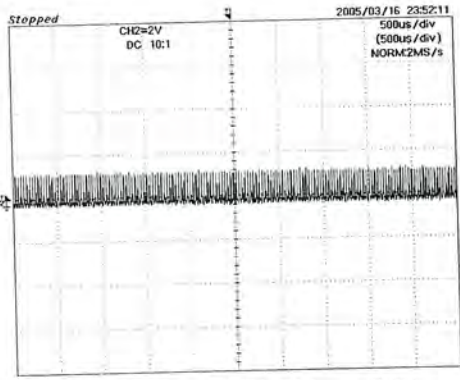
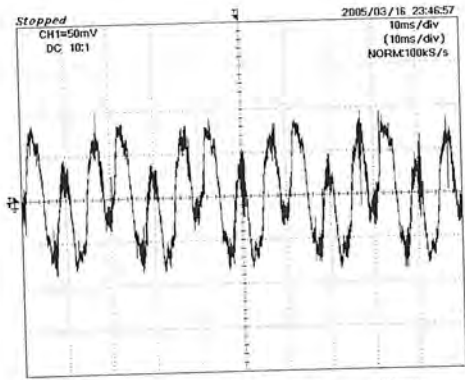
5.3 ทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายไม่สมดุล



รูปที่ 5.13 สัญญาณแรงดันเฟลา(ซ้าย)และกระแสเฟลา(ขวา)เมื่อแหล่งจ่ายคลื่นไซน์เกิดสภาวะแรงดันสูงกว่าปกติ

$$V_{an}=220V, V_{bn}=238V \text{ และ } V_{cn}=238V$$

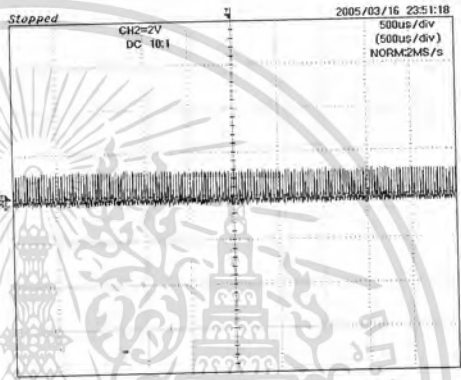
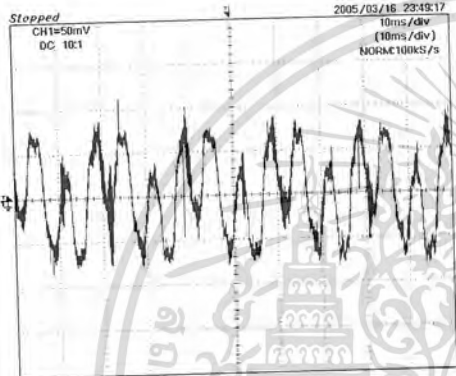
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
 Smoothing : OFF CH1 : 0.000V Main : 10K Mode : AUTO
 BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 1K Type : EDGE CH2

=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
 Smoothing : OFF CH1 : 0.000V Main : 10K Mode : AUTO
 BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 1K Type : EDGE CH2

พิกัดโหลด 0 %



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
 Smoothing : OFF CH1 : 0.000V Main : 10K Mode : AUTO
 BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 1K Type : EDGE CH2

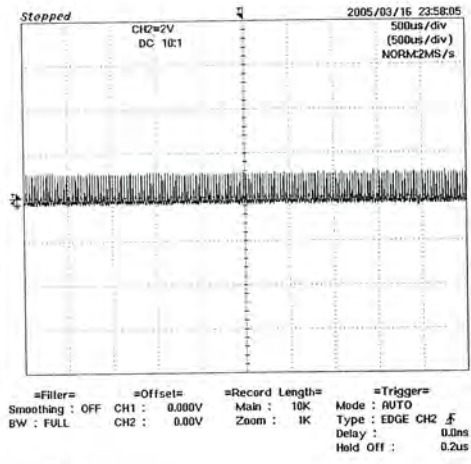
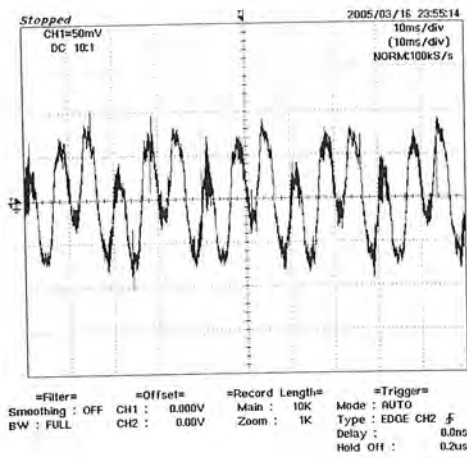
=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
 Smoothing : OFF CH1 : 0.000V Main : 10K Mode : AUTO
 BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 1K Type : EDGE CH2

พิกัดโหลด 50 %

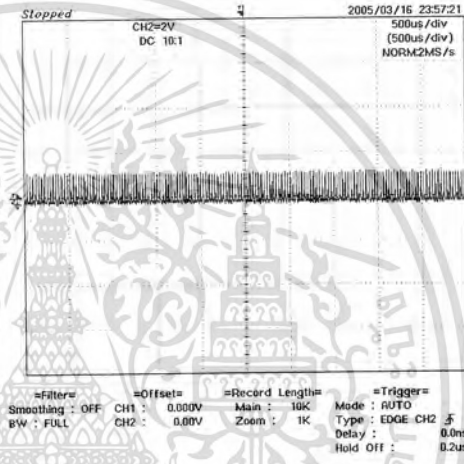
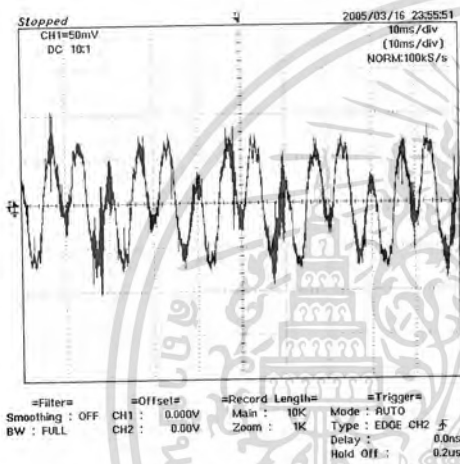
รูปที่ 5.14 สัญญาณแรงดันเฟลา(ซ้าย)และกระแสเฟลา(ขวา)เมื่อแหล่งจ่ายคลื่นไซน์เกิดสภาวะแรงดันสูงกว่าปกติ

$V_{an}=230V, V_{bn}=230V$ และ $V_{cn}=220V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พิกัดโหลด 0 %

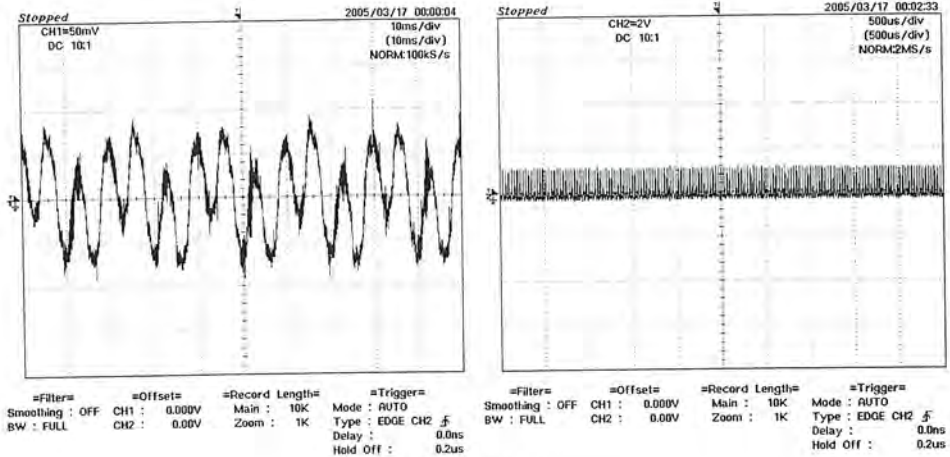


พิกัดโหลด 50 %

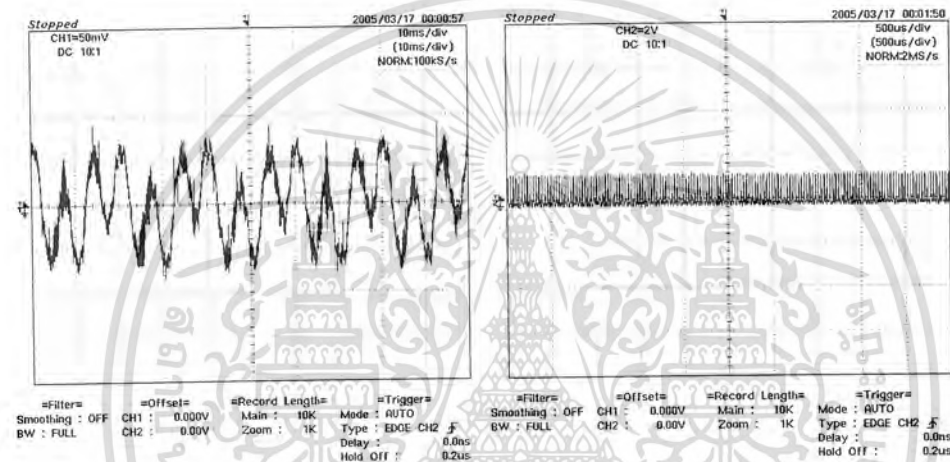
รูปที่ 5.15 สัญญาณแรงดันเฟลา(ซ้าย)และกระแสเฟลา(ขวา)เมื่อแหล่งจ่ายคลื่นไซน์เกิดสภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ

$$V_{an}=220V, V_{bn}=210V \text{ และ } V_{cn}=210V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พิกัดโหลด 0 %



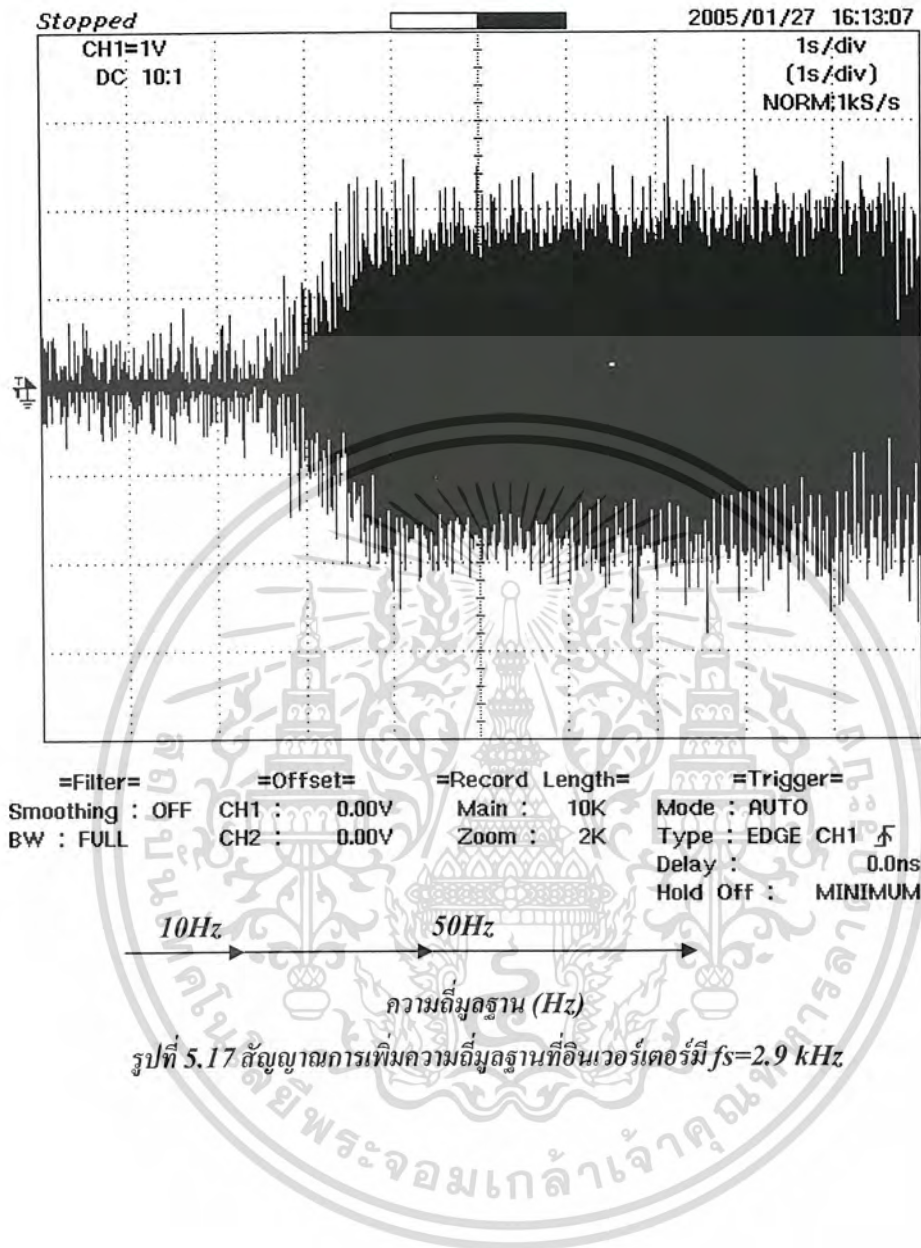
พิกัดโหลด 50 %

รูปที่ 5.16 สัญญาณแรงดันเพลา (ซ้าย)และกระแสเพลา(ขวา)เมื่อแหล่งจ่ายคลื่นไซน์เกิดสภาวะแรงดันต่ำกว่าปกติ
 $V_{an}=220V, V_{bn}=204V$ และ $V_{cn}=204V$

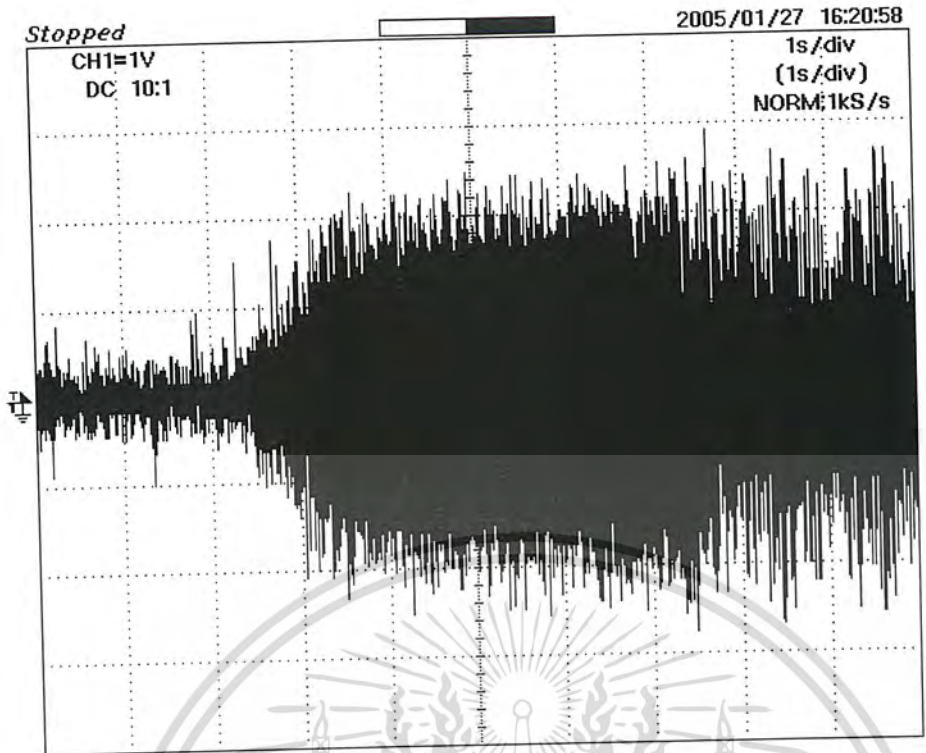
จากการทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายไม่สมดุลจะทำให้เกิดสัญญาณขึ้นที่เพลา เนื่องจากการไม่สมมาตรของสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้ขดลวดแต่ละเฟสเป็นผลให้มอเตอร์ทำงานผิดปกติ เมื่อใช้ไปนานๆก็จะทำให้มอเตอร์ชำรุดเสียหายได้ ดังนั้นในการควบคุมมอเตอร์จึงต้องควบคุมแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ให้สมดุลกันเพื่อที่จะช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการไม่สมดุลของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ทดสอบเพิ่ม-ลดความถี่ของอินเวอร์เตอร์ (ในช่วง 10-50 Hz)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= Smoothing : OFF BW : FULL
 =Offset= CH1 : 0.00V CH2 : 0.00V
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 2K
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

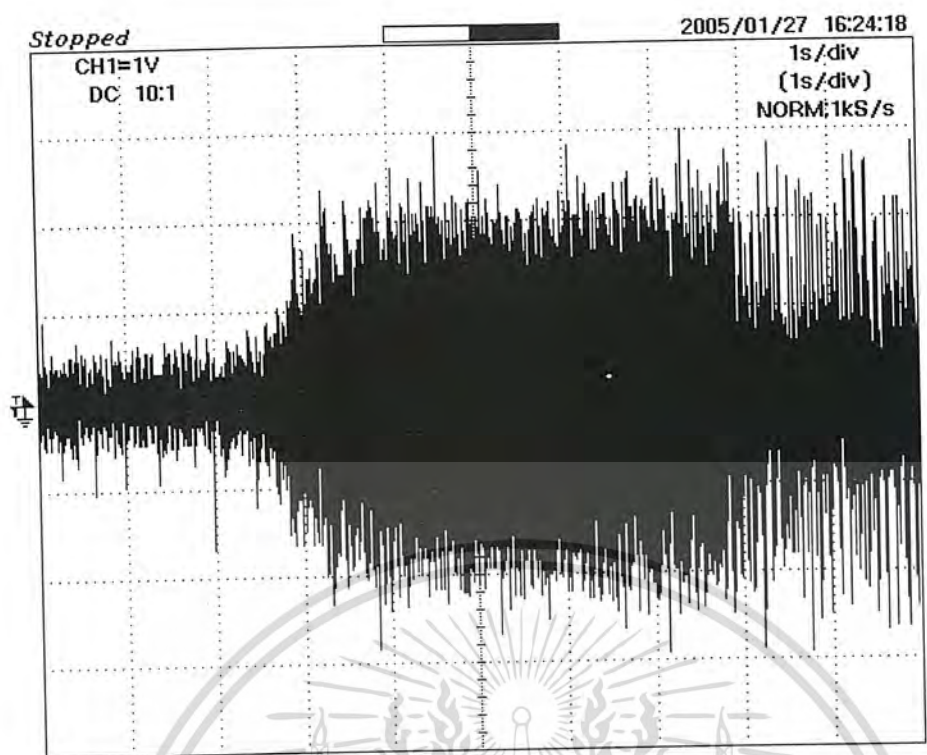
10 Hz

50 Hz

ความถี่มูลฐาน (Hz)

รูปที่ 5.19 สัญญาณการเพิ่มความถี่มูลฐานที่อินเวอร์เตอร์มี $f_s=8.8 \text{ kHz}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0.00V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : 0.00V Zoom : 2K Type : EDGE CH1
Delay : 0.0ns
Hold OFF : MINIMUM

← 10Hz → ← 50Hz →

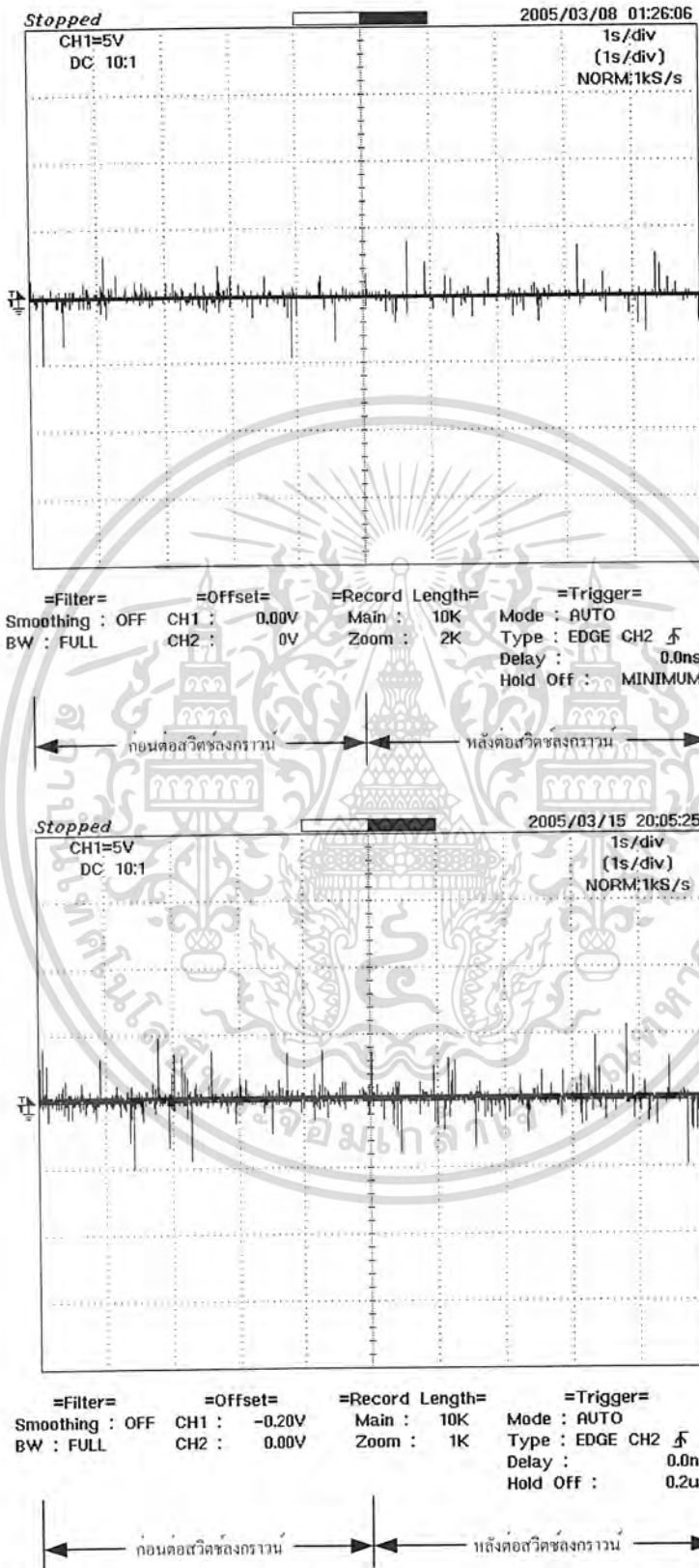
ความถี่มูลฐาน (Hz)

รูปที่ 5.20 สัญญาณการเพิ่มความถี่มูลฐานที่อินเวอร์เตอร์มี $f_s = 11.7 \text{ kHz}$

จากสัญญาณที่วัดได้นั้นขณะที่ความถี่ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์มีค่าน้อยสัญญาณจะมีค่าน้อย เนื่องจาก Flux induce มีการสลับไปมาน้อยกว่าความถี่ที่มากกว่า ดังนั้นเมื่อเพิ่มความถี่ซึ่งหมายถึงการเพิ่มการสลับไปมาของเส้นแรงแม่เหล็กให้ตัดตัวนำที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสัญญาณก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นกรณีเพิ่มความถี่ที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์และเนื่องจากเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมแบบ V/F ก็จะเหมือนกับว่าเป็นการปรับแรงดันที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

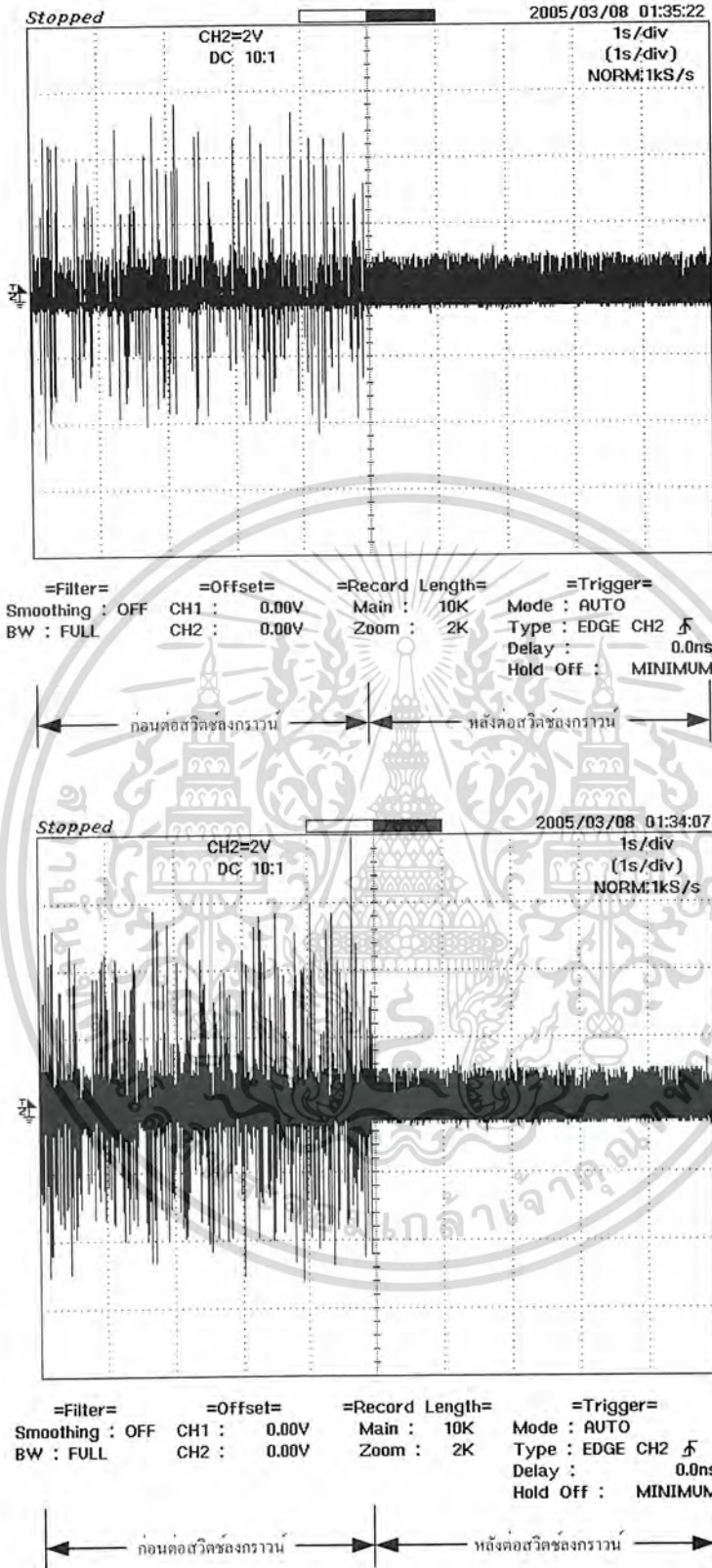
5.5 ทดสอบภายใต้ที่มีจุดต่อลงกราวด์



รูปที่ 5.21 สัญญาณแรงดันเพลา ก่อนและหลังต่อสวิตซ์ลงกราวด์ เมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่

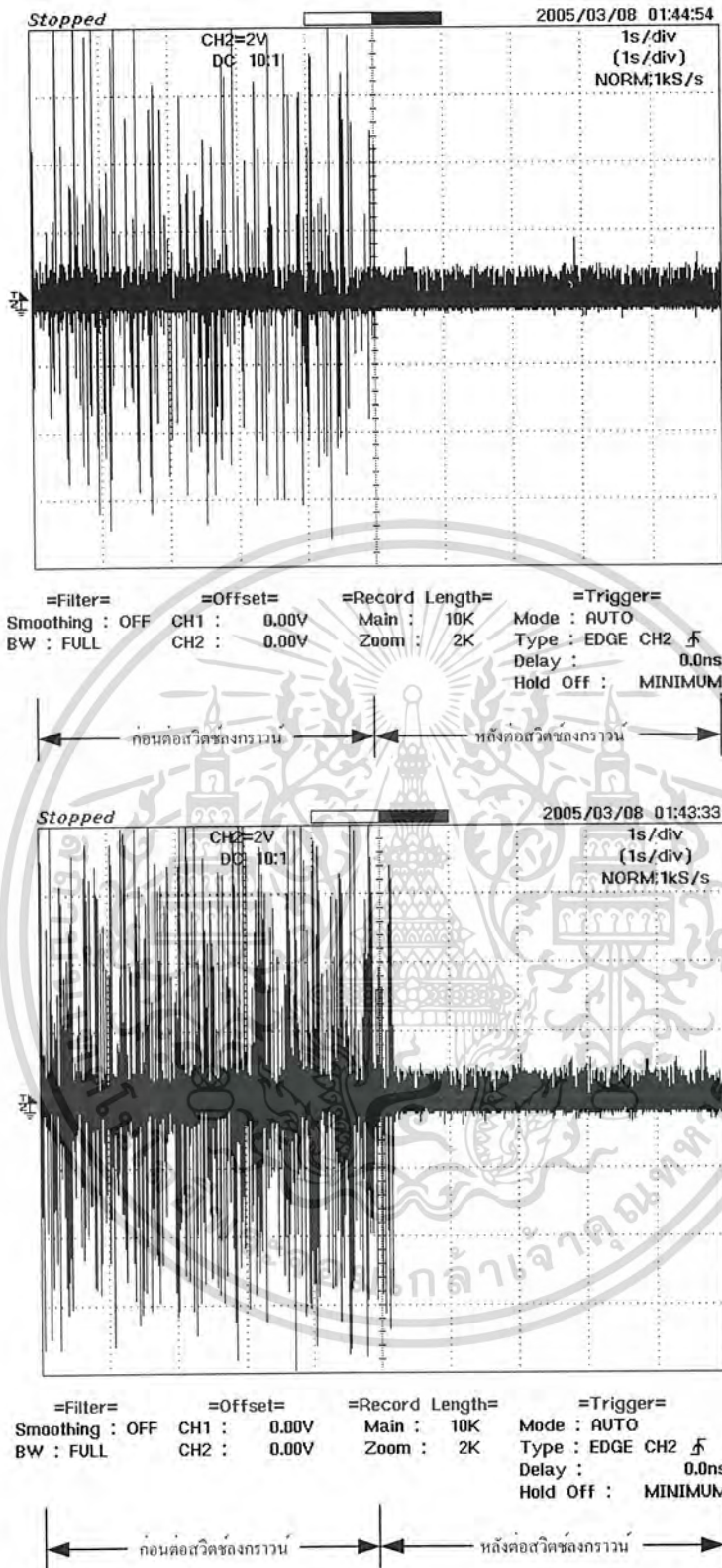
$$f_s = 2.9 \text{ kHz (บน)} \text{ และ } f_s = 8.8 \text{ kHz (ล่าง)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 สัญญาณกระแสเพลาก่อนและหลังต่อสวิตซ์ขงกราวน เมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ $f_s=2.9 \text{ kHz}$ (บน)และ $f_s=8.8 \text{ kHz}$ (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

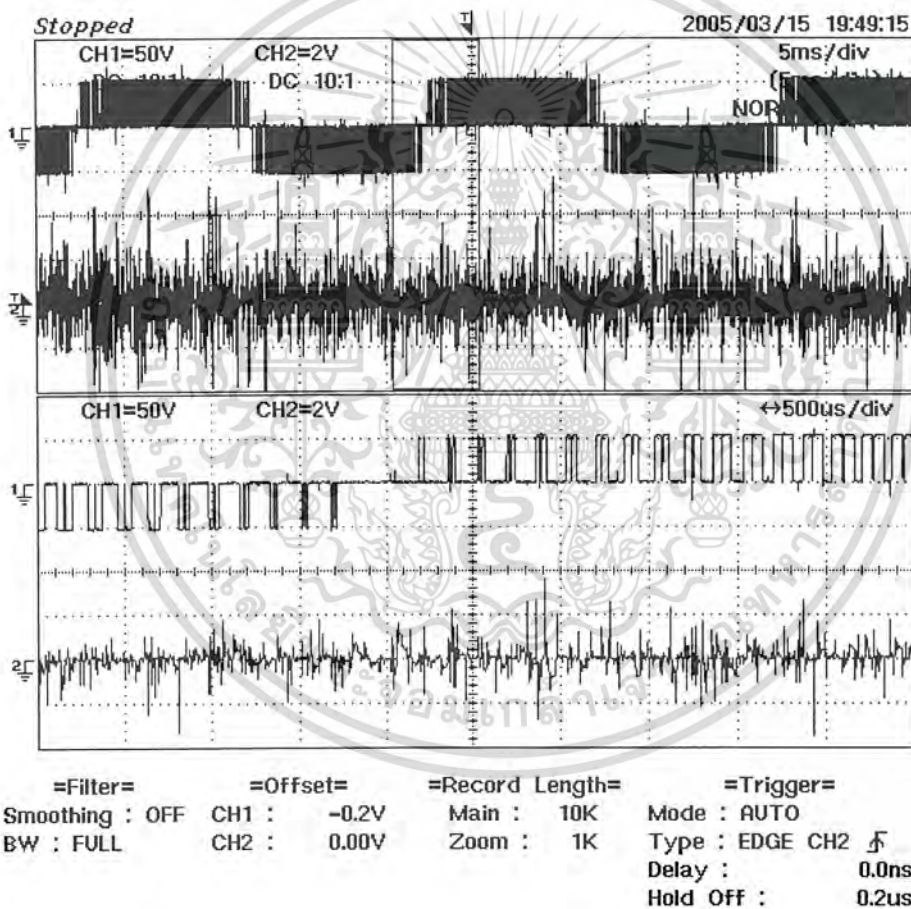


รูปที่ 5.23 สัญญาณกระแสตรงก่อนและหลังต่อสวิตซ์ลงกราวน เมื่อแหล่งจ่ายเป็น PWM อินเวอร์เตอร์ที่ $f_s=2.9 \text{ kHz}$ (บน)และ $f_s=8.8 \text{ kHz}$ (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

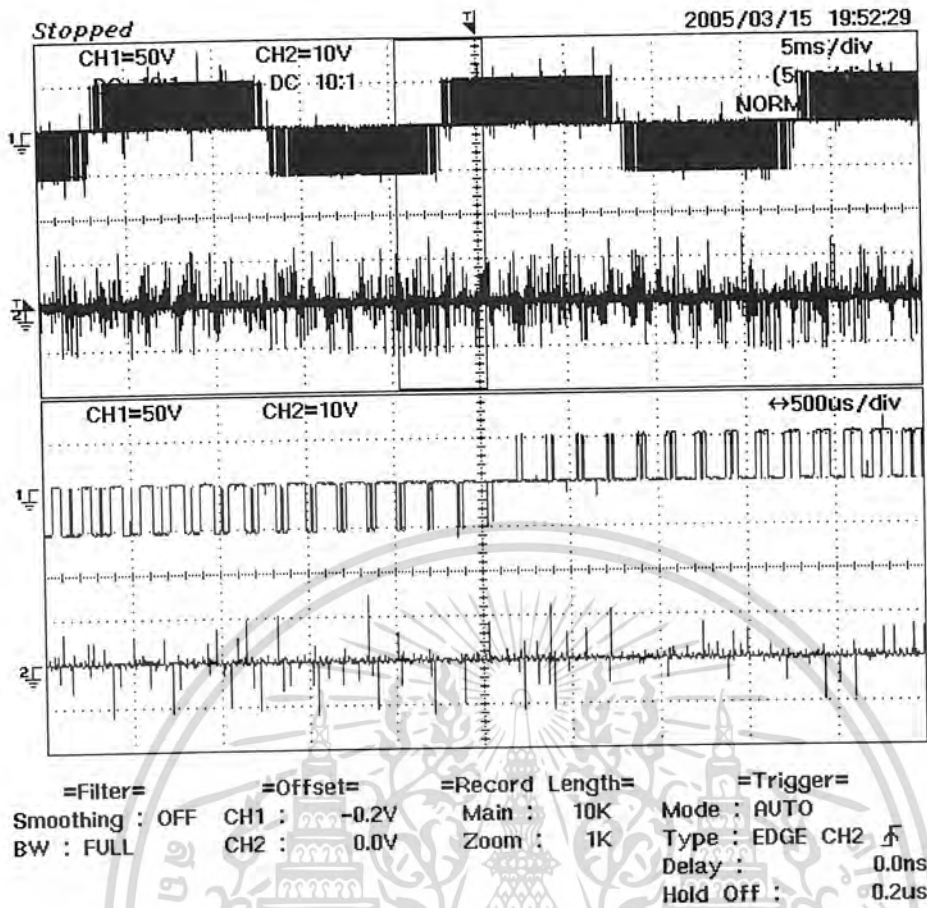
การต่อลงกราวด์เป็นวิธีการแก้ไขการเกิดการเหนี่ยวนำที่เพลลาและรองลื่นวิธีหนึ่ง ซึ่งเมื่อเกิดการเหนี่ยวนำที่แกนและรองลื่นขึ้น ถ้าไม่มีการต่อกราวด์ที่โครงสร้างของมอเตอร์ก็จะเกิดกระแสและแรงดันไหลวนอยู่ในแกน และรองลื่นของมอเตอร์ดังนั้นการกำจัดแรงดันและกระแสไหลวนนี้ทำได้โดยต่อกราวด์ที่โครงของมอเตอร์เพื่อให้กระแสนี้ไหลลงสู่ดินจากรูปเมื่อต่อกราวด์ที่ตัวมอเตอร์แล้วสัญญาณที่เกิดขึ้นหายไปจากสัญญาณที่วัดได้ จะเห็นว่าที่แรงดันเพลลาจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักระหว่างก่อนต่อสวิตซ์ลงกราวด์และหลังต่อสวิตซ์ลงกราวด์ แต่ถ้าพิจารณาสัญญาณของกระแสจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอย่างชัดเจนคือเมื่อต่อสวิตซ์ลงกราวด์แล้วสัญญาณจะมีขนาดเล็กลงค่ากระแสย่อยลงเนื่องจากกระแสไหลลงกราวด์ ดังนั้นในการติดตั้งใช้งานมอเตอร์จึงควรต่อมอเตอร์ลงกราวด์เพื่อลดกระแสที่เกิดขึ้นในแกนของมอเตอร์

5.6 ทดสอบเปรียบเทียบสัญญาณ PWM กับสัญญาณต่างๆ



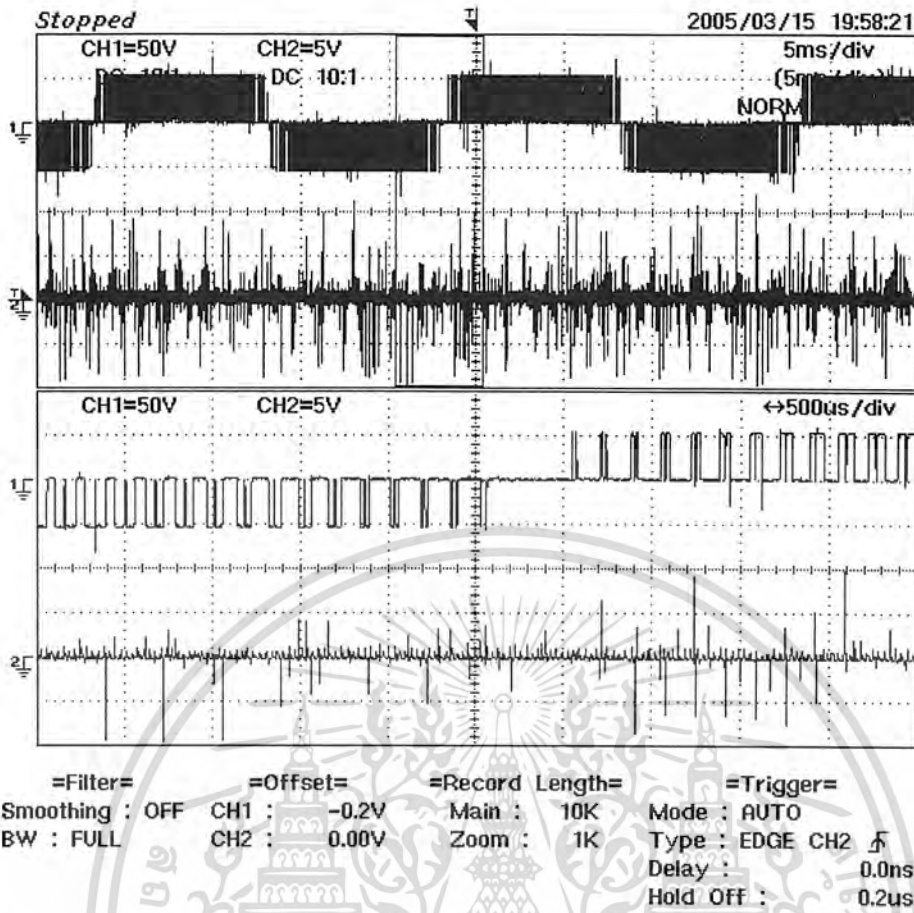
รูปที่ 5.24 สัญญาณจากการซุ่มเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ PWM กับแรงดันเพลลาที่ $f_s=5.9$ kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 สัญญาณจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ PWM กับกระแสไหลที่ $f_s=5.9$ kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 สัญญาณจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณ PWM กับกระแสตรงที่ $f_s=5.9$ kHz

จากสัญญาณที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณ PWM กับสัญญาณต่างๆจะเห็นว่าที่สัญญาณขาขึ้นและขาลงของสัญญาณ PWM จะมีช่วงสัญญาณที่มีค่าสูงเป็นช่วงๆตามสัญญาณการขึ้นลงของสัญญาณ PWM เป็นผลเนื่องจากการสวิตซ์ชิ่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของอินเวอร์เตอร์

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลกระทบของอินเวอร์เตอร์แบบพีดับลิวิตีเอ็มต่อสัญญาณเพลาและรอกสันก็จะสามารถสรุปผลของการศึกษาจำแนกออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. กรณีทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์

จากการทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นคลื่นไซน์จะพบว่าแหล่งจ่ายคลื่นไซน์นี้มีความถี่ 50 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่น้อยจึงไม่ทำให้เกิดสัญญาณแรงดันและกระแสขึ้นที่เพลาและรอกสันหรือถ้ามีก็มีค่าน้อยมากๆ เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวนี้จะเกิดจนเห็นได้ชัดเจนที่ความถี่ในการใช้งานสูงๆ ดังนั้นจากการทดลองจึงไม่สามารถวัดสัญญาณได้ แต่ถ้าแหล่งจ่ายไซน์เกิดไม่สมดุลกันในแต่ละเฟสก็เป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดสัญญาณดังกล่าวขึ้นได้ เนื่องจากการไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้ขดลวดแต่ละเฟสซึ่งจากการศึกษาได้มีการทดสอบที่สภาวะแหล่งจ่ายไม่สมดุลและพบว่า มีสัญญาณดังกล่าวเกิดขึ้นจริงแต่ทั้งนี้ค่าของสัญญาณจะมีขนาดไม่มากเท่ากรณีแหล่งจ่ายเป็นแบบอินเวอร์เตอร์

2. กรณีทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM

กรณีแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะมีความถี่สวิตซ์ค่าสูงซึ่งในการศึกษาได้ใช้ความถี่สวิตซ์อยู่ในช่วงระหว่าง 2.9 – 11.7 kHz ซึ่งที่ความถี่ค่าสูงๆนี้เป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันและกระแสขึ้นที่เพลาและรอกสัน จากการทดสอบภายใต้สภาวะแหล่งจ่ายเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ก็สามารถวัดสัญญาณดังกล่าวได้และได้ทำการทดสอบที่สภาวะโหลดต่างๆก็พบว่าที่สภาวะโหลดต่างๆจะมีรูปสัญญาณที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักและเมื่อทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนความถี่สวิตซ์ที่ค่าต่างๆ พบว่าที่ความถี่สวิตซ์ค่าน้อยจะมีช่วงการเกิดสัญญาณที่กว้างกว่าที่ใช้ความถี่สวิตซ์ค่ามาก ซึ่งเป็นผลมาจากการสวิตซ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอินเวอร์เตอร์

ข้อเสนอแนะ

หลังจากการศึกษาผลกระทบของอินเวอร์เตอร์แบบพีดับลิวิตีเอ็มต่อสัญญาณเพลาและรอกสันทำให้สามารถหาแนวทางในการป้องกันการเกิดของสัญญาณดังกล่าวได้ดังนี้

- ถ้าใช้แหล่งจ่ายที่เป็นคลื่นไซน์ จะต้องมีการปรับแหล่งจ่ายในแต่ละเฟสให้เท่ากันให้เกิดการสมดุลของแรงดันทั้งสามเฟสซึ่งในกรณีนี้อาจจะเกิดสัญญาณไม่มากแต่เมื่อมีการใช้งานไปนานๆ โดยละเอียดในการตรวจสอบก็เป็นสาเหตุที่ทำให้มอเตอร์เกิดการชำรุดเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ถ้าใช้แหล่งจ่ายที่เป็นอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ควรต่อโครงของมอเตอร์สกราว์นเพื่อช่วยลดการเกิดสัญญาณแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นที่เพลลาและรอนกลั่น ซึ่งจากการที่ได้ศึกษาพบว่าเมื่อทำการต่อโครงของมอเตอร์สกราว์นแล้วทำให้สัญญาณของกระแสเพลลาและรอนกลั่นลดลง เนื่องจากถ้าไม่มีการต่อกราว์นที่โครงสร้างของมอเตอร์นั้นกระแสจะมีการไหลวนอยู่ในแกนและรอนกลั่นของมอเตอร์ แต่ถ้าต่อกราว์นที่โครงสร้างของมอเตอร์แล้วกระแสดังกล่าวนี้จะไหลลงสู่ดินจากการทดลองพบว่าเมื่อต่อลงกราว์นแล้วสัญญาณกระแสที่เกิดขึ้นได้หายไป

ดังนั้นในการนำมอเตอร์ไปใช้งานไม่ว่าจะใช้งานที่แหล่งจ่ายสภาวะใดๆควรจะต้องทำตามมาตรฐานความปลอดภัยอย่างถูกต้องและเคร่งครัด เพื่อความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ ควรมีการตรวจสอบการใช้งานของมอเตอร์เป็นระยะเพราะว่าในโรงงานที่ไม่เข้มงวดพบว่ายังมีการละเลยในการที่จะต่อโครงของมอเตอร์สกราว์นอย่างแท้จริงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มอเตอร์มีอายุการใช้งานสั้นลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วชิพล ธาราธิรเศรษฐ์, “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [2] 49 เรื่องนำรู้เทคนิคไฟฟ้า รวบรวมบทความเกี่ยวกับไฟฟ้าจากวารสารเทคนิค ชุดที่ 3 , กระแสเพลามอเตอร์กับความเสียหายที่รื้องสั้น
- [3] วารสาร IEEE Industry Application Magazine, July/August 1999.
- [4] J.M.Erdman, “Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages”, IEEE Transactions on industry Application, Vol.32, No.2, March/April 1996.
- [5] S.Chen, “Source of Induction Motor Bearing Currents Caused by PWM Inverters”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.11, No.1, March 1996.
- [6] M. J. Costllo, “Shaft Voltage and Rotating Machinery”, IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-29, No.2, 1993, pp419-426
- [7] R. Ong , “ A Compraison of Techniques for Measurement of Shaft Current in Rotating Machines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.12, No.4, December 1997.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้