

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ปีการศึกษา 2542

การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ
The Effects of Voltage Harmonics on the Induction Motor

โดย

นายพิชญ

พิทักษ์เจริญ

นายเพียงศักดิ์

โสตติสรเสริญ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. พิชิต ถ้ายอง

เลขหม.....
เลขทะเบียน...36998
วัน, เดือน, ปี...30 ต.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ผู้จัดทำ

1. นายพิชญ พัทธ์ภัยเจริญ
2. นายเพ็ญศักดิ์ โสคติสรเสริญ



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. พิชิต ถ้ายอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ

นายพิชญ พัทธ์เจริญ

นายเพ็ญศักดิ์ โสคติสรเสริญ

ผศ. พิชิต ถ้ำของ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นโครงการที่ทำการศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งในโครงการได้ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีเป็นตัวสร้างฮาร์โมนิกส์ ซึ่งจะนำฮาร์โมนิกส์ที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีไปรวมเข้ากับความถี่มูลฐานป้อนเข้าสู่มอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำในโครงการนี้ จะศึกษาถึงผลของแรงดัน กระแส และประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Effects of Voltage Harmonics on the Induction Motor

PICHAYA PITAKCHAREON
PIENGSAK SOTHISANSERN
Assist. Prof. PICHIT LUMYONG ADVISOR
1999

ABSTRACT

The project presents a study of the effects of voltage harmonics on the induction motor. Synchronous generator produces the voltage harmonics. The fundamental voltage that adds with voltage harmonics feed in to the induction motor. The effects of harmonics are studied in the case of voltage, current and efficiency of the induction motor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญภาพ	III
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ฮาร์โมนิกส์ในระบบอุตสาหกรรม	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
บทที่ 2 เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	3
2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	3
2.2 ความเข้าใจและลักษณะพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	3
2.2.1 กฎและความเข้าใจที่ต้องใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	3
2.2.2 ลักษณะพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	4
2.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	4
2.4 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะหมุน	8
2.4.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส	8
2.4.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดหลายเฟส	9
2.5 แรงดันเหนี่ยวนำในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	12
2.6 ค่าความเหนี่ยวนำและวงจรสมมูล	15
2.6.1 ค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์	16
2.6.2 ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์	17
2.6.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์	18
2.7 การทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร	21
2.7.1 การทดสอบเปิดวงจร	21
2.7.2 การทดสอบลัดวงจร	22
2.7.3 อัตราส่วนการลัดวงจร	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ	24
3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	24
3.2 ความถี่ที่เกิดขึ้นภายในตัวหมุน	26
3.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ตัวหมุน	27
3.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	28
3.5 วงจรสมมูลของตัวหมุน	33
3.6 แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์	39
บทที่ 4 ฮาร์โมนิกส์	41
4.1 สาเหตุของฮาร์โมนิกส์	41
4.2 ฮาร์โมนิกส์และผลกระทบต่อเครื่องจักรไฟฟ้า	41
4.3 ศัพท์และปริมาณต่าง ๆ	41
4.4 ประเภทของฮาร์โมนิกส์	46
4.5 แหล่งกำเนิดและผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า	48
4.5.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์	48
4.5.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์	49
4.6 การแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกส์	49
บทที่ 5 เครื่องจักรกลที่ใช้ในการทดลอง	51
5.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์	52
5.2 เครื่องต้นกำลัง	52
5.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า	52
บทที่ 6 ขั้นตอนในการทดลอง	53
6.1 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	53
6.2 ลำดับขั้นตอนในการทดลอง	54
6.2.1 การทดสอบหาค่าเร็กเทอริสติกของเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส	54
6.2.2 กรณีที่โหลดเป็นความต้านทาน	54
6.2.3 กรณีที่โหลดเป็นความต้านทานและความเหนี่ยวนำ	55
6.2.4 กรณีที่โหลดเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 การทดลองหาค่าแรงเคอร์สติคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส	57
7.1 การทดสอบเปิดวงจร	57
7.2 การทดสอบลัดวงจร	63
7.3 ค่าอิมพีแดนซ์	63
7.4 สรุปผลการทดลอง	64
บทที่ 8 ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อโหลดความต้านทาน	65
8.1 การแสดงผลสัญญาณของแรงดันและกระแส	77
8.2 สรุปผลการทดลอง	79
บทที่ 9 ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำ	80
9.1 การแสดงผลสัญญาณของแรงดันและกระแส	80
9.2 สรุปผลการทดลอง	94
บทที่ 10 ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ	95
10.1 การแสดงผลสัญญาณของแรงดันและกระแส	95
10.2 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	109
10.2.1 ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบโพสิทีฟซีแคว้น	109
10.2.2 ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีแคว้น	112
10.2.3 ค่าประสิทธิภาพที่ค่าโหลดต่าง ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	115
10.3 สรุปผลการทดลอง	121
บทที่ 11 บทสรุปและวิจารณ์	122
11.1 บทสรุปของการทดลอง	134
11.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง	134
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปกำลังไฟฟ้าและกล	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กซึ่งเกิดจากขดลวด 1 ชุด N รอบ ด้านทั้ง 2 ของ ขดลวดห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส ขดลวดจำนวน 3 เฟส ถูกจัดวางเพื่อ ให้เกิดสนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว และด้านทั้งสองของขดลวดแต่ละชุดห่างกัน 180 องศา	6
รูปที่ 2.4 ขดลวดบนสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว	9
รูปที่ 2.5 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส	12
รูปที่ 2.6 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วอนชาเลียน	16
รูปที่ 2.7 (ก) วงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส	20
รูปที่ 2.7 (ข) วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	20
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสซึ่งอยู่ในรูปของลิกเกอร์แอกแตนด์	21
รูปที่ 2.9 กราฟการทดสอบเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	22
รูปที่ 2.10 แสดงวงจรที่ใช้ในการทดสอบลัดวงจร	22
รูปที่ 2.11 กราฟการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร	22
รูปที่ 2.12 กราฟการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร	23
รูปที่ 3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก	24
รูปที่ 3.2 วงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้า	28
รูปที่ 3.3 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	28
รูปที่ 3.4 วงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้า	28
รูปที่ 3.5 วงจรและการไหลของกระแส	29
รูปที่ 3.6 วงจรและการไหลของกระแสขณะไม่มีโหลด	29
รูปที่ 3.7 วงจรขณะวงจรเปิด	30
รูปที่ 3.8 วงจรเทียบเท่าที่ย้ายค่าทุกค่ามาทางด้านปฐมภูมิ	30
รูปที่ 3.9 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	31
รูปที่ 3.10 วงจรแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	31
รูปที่ 3.11 วงจรเทียบเคียงใหม่	32
รูปที่ 3.12 วงจรของโรเตอร์	33
รูปที่ 3.13 วงจรโรเตอร์ที่สมบูรณ์	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดัน	34
รูปที่ 3.15 สามเหลี่ยมของกำลังไฟฟ้า	35
รูปที่ 3.16 วงจรเทียบเคียงของโรเตอร์	37
รูปที่ 3.17 วงจรเทียบเคียงที่สมบูรณ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	38
รูปที่ 3.18 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์	38
รูปที่ 3.19 ค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ที่สลิปใด ๆ	39
รูปที่ 4.1 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล	42
รูปที่ 4.2 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์	42
รูปที่ 4.3 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ	44
รูปที่ 4.4 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดแบบ Integral Cycle Control	47
รูปที่ 5.1 รูปเครื่องจักรซิงโครนัสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 11 KW	51
รูปที่ 5.2 รูปมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า	51
รูปที่ 6.1 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	53
รูปที่ 7.1 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 50 Hz	57
รูปที่ 7.2 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 100 Hz	58
รูปที่ 7.3 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 150 Hz	58
รูปที่ 7.4 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 200 Hz	59
รูปที่ 7.5 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 250 Hz	59
รูปที่ 7.6 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 300 Hz	60
รูปที่ 7.7 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 350 Hz	60
รูปที่ 7.8 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 400 Hz	61
รูปที่ 7.9 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 450 Hz	61
รูปที่ 7.10 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 500 Hz	62
รูปที่ 7.11 กราฟการลัดวงจรที่ความถี่ 50-500 Hz	63
รูปที่ 8.1 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานที่ความถี่มูลฐาน	66
รูปที่ 8.2 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน	

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 8.3 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 10%	68
รูปที่ 8.4 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 15%	69
รูปที่ 8.5 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 20%	70
รูปที่ 8.6 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่ 20%	71
รูปที่ 8.7 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 4 ที่ 20%	72
รูปที่ 8.8 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 ที่ 20%	73
รูปที่ 8.9 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 6 ที่ 20%	74
รูปที่ 8.10 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 7 ที่ 20%	75
รูปที่ 8.11 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 8 ที่ 20%	76
รูปที่ 8.12 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 9 ที่ 20%	77
รูปที่ 8.13 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 10 ที่ 20%	78
รูปที่ 9.1 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและ ความเหนี่ยวนำที่ความถี่มูลฐาน	81
รูปที่ 9.2 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและ ความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5%	82
รูปที่ 9.3 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวมกันของเนื้อหาและข้อมูลจากเอกสารต้นฉบับที่ 833
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 9.4 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 15%	84
รูปที่ 9.5 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 20%	85
รูปที่ 9.6 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่ 20%	86
รูปที่ 9.7 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 4 ที่ 20%	87
รูปที่ 9.8 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 ที่ 20%	88
รูปที่ 9.9 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 6 ที่ 20%	89
รูปที่ 9.10 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 7 ที่ 20%	90
รูปที่ 9.11 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 8 ที่ 20%	91
รูปที่ 9.12 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 9 ที่ 20%	92
รูปที่ 9.13 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 10 ที่ 20%	93
รูปที่ 10.1 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ความถี่มูลฐาน	96
รูปที่ 10.2 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5%	97
รูปที่ 10.3 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 10%	98
รูปที่ 10.4 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 15%	99

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 10.5 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 20%	100
รูปที่ 10.6 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่ 20%	101
รูปที่ 10.7 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 4 ที่ 20%	102
รูปที่ 10.8 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 ที่ 20%	103
รูปที่ 10.9 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 6 ที่ 20%	104
รูปที่ 10.10 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 7 ที่ 20%	105
รูปที่ 10.11 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 8 ที่ 20%	106
รูปที่ 10.12 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 9 ที่ 20%	107
รูปที่ 10.13 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 10 ที่ 20%	108
รูปที่ 10.14 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบโพสิทีฟซีแคว้น	111
รูปที่ 10.15 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีแคว้น	114
รูปที่ 10.16 (ก) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 5%	115
รูปที่ 10.16 (ข) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 10%	115
รูปที่ 10.16 (ค) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 15%	116
รูปที่ 10.16 (ง) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 20%	116
รูปที่ 10.17 (ก) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ที่ 5%	117
รูปที่ 10.17 (ข) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ที่ 10%	117
รูปที่ 10.17 (ค) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ที่ 15%	118
รูปที่ 10.17 (ง) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ที่ 20%	118

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 10.18 (ก) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 ที่ 5%	119
รูปที่ 10.18 (ข) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 ที่ 10%	119
รูปที่ 10.18 (ค) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 ที่ 15%	120
รูปที่ 10.18 (ง) ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 ที่ 20%	120



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 7.1 ตารางแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดเชิง โครนัส ที่ความถี่ 50-500 Hz	63
ตาราง 10.1 แสดงผลของค่ากระแส แรงดันและค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบ โพลซิทีฟซีเควัน ที่เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ 5 %	109
ตาราง 10.2 แสดงผลของค่ากระแส แรงดันและค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบ โพลซิทีฟซีเควัน ที่เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ 10 %	110
ตาราง 10.3 แสดงผลของค่ากระแส แรงดันและค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบ โพลซิทีฟซีเควัน ที่เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ 15%	110
ตาราง 10.4 แสดงผลของค่ากระแส แรงดันและค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบ โพลซิทีฟซีเควัน ที่เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ 20%	111
ตาราง 10.5 แสดงผลของค่ากระแส แรงดันและค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควัน ที่เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ 5 %	112
ตาราง 10.6 แสดงผลของค่ากระแส แรงดันและค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควัน ที่เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ 10%	113
ตาราง 10.7 แสดงผลของค่ากระแส แรงดันและค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควัน ที่เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ 15 %	113
ตาราง 10.8 แสดงผลของค่ากระแส แรงดันและค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควัน ที่เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ 20%	114

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ฮาร์โมนิกส์ในระบบอุตสาหกรรม

ระบบอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการใช้อุปกรณ์ทางด้าน โซลิตสเตรทมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์และใช้ในการควบคุมการทำงานให้ได้ตามที่ต้องการใช้อุปกรณ์การไฟฟ้าดังกล่าวนับว่าเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมให้เจริญก้าวหน้าขึ้นมาในอีกระดับหนึ่ง แต่ปัญหาหรือผลเนื่องจากการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวทำให้ระบบไฟฟ้ากำลัง หรือการจ่ายไฟมีมลภาวะ (Pollution) เพิ่มมากขึ้น มลภาวะดังกล่าวได้แก่ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดในระบบอุตสาหกรรม และเข้ามาในระบบจำหน่ายทำให้กระทบกระเทือนต่อโรงงานหรืออุตสาหกรรมข้างเคียง

ฮาร์โมนิกส์หรือมลภาวะในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดมาจากอุปกรณ์ประเภทเรกติไฟเออร์เตาหลอมแบบใช้อาร์ค และเครื่องจักรกลประเภทปรับความถี่เป็นต้น และโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่สร้างมลภาวะขึ้นมาในระบบไฟฟ้าได้แก่โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ไฟกระแสตรงสำหรับขบวนการผลิต ซึ่งจำเป็นต้องใช้เรกติไฟเออร์ หรือโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีการควบคุมความเร็วควบคุมการผลิตด้วยการปรับความถี่หรือสัปดาห์ไฟฟ้า

ผลเสียหายเนื่องจากฮาร์โมนิกส์และการแก้ไข ได้รับการวิเคราะห์อย่างกว้างขวางในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาซึ่งมีทั้งหาวิธีการแก้ไขไม่ให้ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นทำความเสียหาย หาวิธีกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นให้หมดไปหรือลดน้อยลง มาตรฐานต่างๆ ได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อพิจารณาและหาทางแก้ไขระบบที่มีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นและในหลายประเทศก็ได้กำหนดเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมไม่ให้มีค่าสูงเกินไปจนอาจกลายเป็นมลภาวะในระบบไฟฟ้าและส่งผลกระทบต่อโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ

ความเข้าใจในเรื่องของฮาร์โมนิกส์เพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์แก้ไขในระบบให้ดีขึ้นได้นั้นจำเป็นต้องศึกษาความรู้พื้นฐานถึงแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ที่เป็นไปได้ ผลเสียที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ หรือระบบไฟฟ้าและวิธีการแก้ไขหรือหาวิธีการแก้ไขหรือกำจัดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นออกจากระบบ

1.2 วัตถุประสงค์

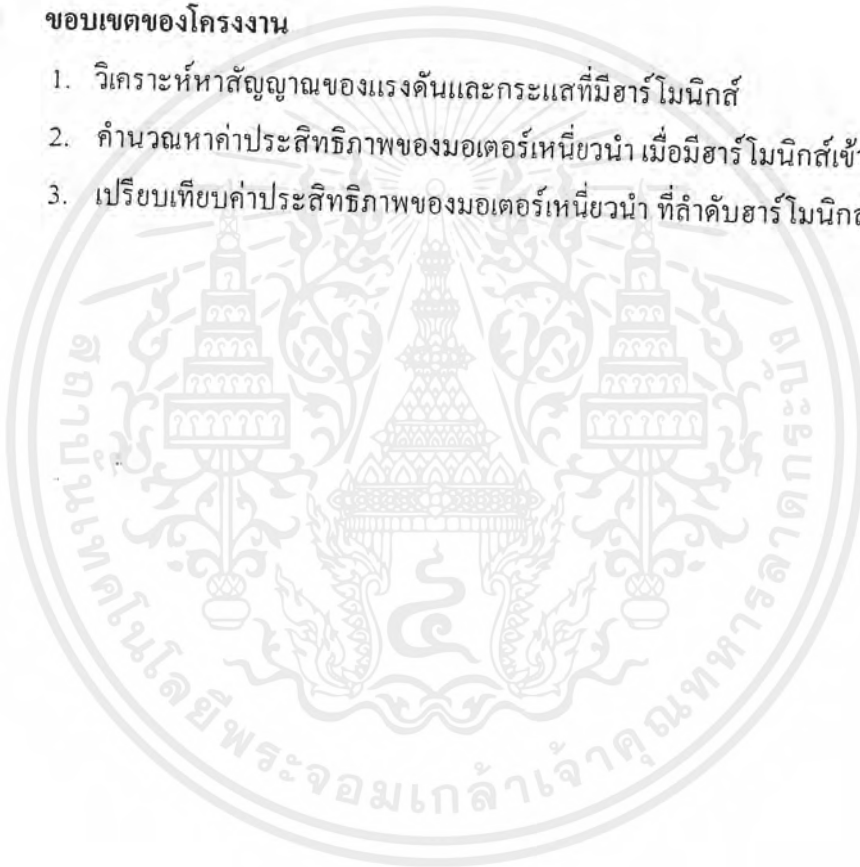
1. ศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และเครื่องกำเนิดขั้วโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาการลักษณะพื้นฐานของฮาร์โมนิกส์ต่างๆ โดยการรวมฮาร์โมนิกส์ ที่ได้จากเครื่องกำเนิดซิงโครนัส กับความถี่มูลฐาน(50Hz) เพื่อนำมาวิเคราะห์ สัญญาณที่ได้
3. ศึกษาผลกระทบของการป้อนฮาร์โมนิกส์เข้าสู่มอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยจะสนใจทางด้านสัญญาณของแรงดัน , กระแส และประสิทธิภาพ
4. ผลการศึกษาสามารถประยุกต์ แก้ปัญหาในด้านอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. วิเคราะห์หาสัญญาณของแรงดันและกระแสที่มีฮาร์โมนิกส์
2. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อมีฮาร์โมนิกส์เข้าสู่ระบบ
3. เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบซิงโครนัสมีลักษณะการใช้งาน 2 แบบคือ

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generators)
2. มอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous Motors)

ในส่วนของกล่าวถึงในบทนี้ จะเน้นการใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีจะรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

สเตเตอร์

เป็นส่วนอยู่กับที่ โดยที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสจะถูกพันเอาไว้บนสเตเตอร์

โรเตอร์

เป็นส่วนหมุน ซึ่งขดลวดสนาม (Field winding) พันอยู่ โรเตอร์มี 2 ลักษณะ

1. โรเตอร์แบบขั้วชาเลียน (Salient pole) ขั้วแม่เหล็กจะยื่นออกมาจากแกนของโรเตอร์
2. โรเตอร์แบบขั้วนอนชาเลียน (Non-salient pole or Cylindrical rotor) ขั้วแม่เหล็กจะเรียบไปกับโรเตอร์

ขดลวดหน่วง

จะมีอยู่ในโรเตอร์แบบขั้วชาเลียน ใช้เพื่อแก้การ Hunting ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

เอ็กไซไซเตอร์

เป็นตัวจ่ายไฟกระแสตรง เข้าที่ขดลวดสนามของเครื่องจักรซิงโครนัส เพื่อสร้างขั้วแม่เหล็ก

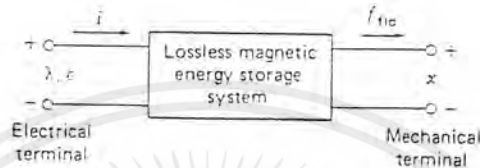
2.2 ความเข้าใจและลักษณะพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

2.2.1 กฎและความเข้าใจที่ต้องใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กฎของฟาราเดย์ ดังในสมการ 1.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสนามแม่เหล็ก
2. การเปลี่ยนรูประหว่างกำลังไฟฟ้าและกล ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อฟลักซ์มีการเปลี่ยนแปลง และมีการเคลื่อนที่ทางกล ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนรูปกำลังงานไฟฟ้าและกำลังงานกล

3. เมื่อมีสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์ต่อกัน จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ

2.2.2 ลักษณะพื้นฐานของเครื่องจักรกลซิงโครนัส

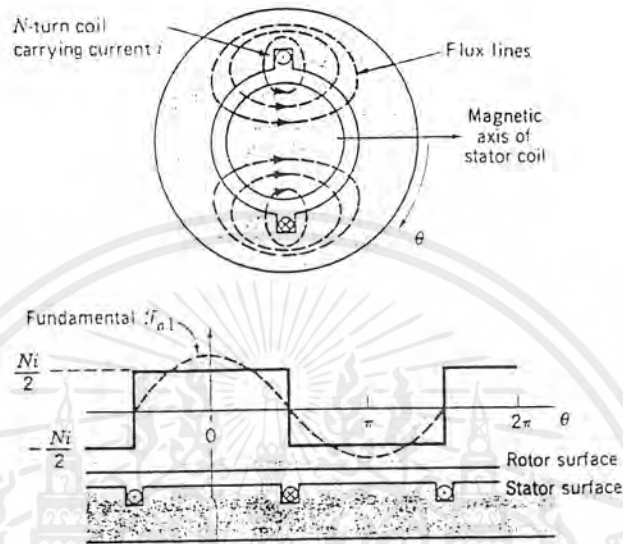
โดยปกติขดลวดอาร์เมเจอร์จะถูกพันอยู่บนสเตเตอร์ และขดลวดสนามจะถูกพันอยู่บนโรเตอร์ ขดลวดสนามจะถูกต่ออยู่กับแรงดันไฟตรง

ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจ่ายกำลังงานไฟฟ้าแก่โหลด จะมีกระแสไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ ทำให้เกิดฟลักซ์ขึ้นในช่องอากาศ และฟลักซ์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous speed) ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นมีผลหักล้างกับฟลักซ์ที่เกิดจากขดลวดสนาม และจากการที่สนามแม่เหล็กทั้ง 2 (จากขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนาม) ทำมุมกัน จึงทำให้เกิดแรงบิดภายในชั้นที่โรเตอร์ โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงบิดภายนอกจากเครื่องต้นกำลัง ดังนั้นเพื่อให้โรเตอร์หมุนและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าต่อไปได้ เครื่องต้นกำลังจึงต้องจ่ายกำลังงานกล (แรงบิด) เพิ่ม ในขณะที่โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพิ่มขึ้น

2.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

ขดลวดที่พันอยู่บนสเตเตอร์มีหลายชุด และถูกจัดเรียงอยู่โดยรอบช่องอากาศ โดยที่ขดลวดแต่ละชุดถูกต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กมีจำนวนขั้วตามต้องการ

การศึกษาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดหลายชุด ทำได้โดยการพิจารณาขดลวดชุดเดียวซึ่งมีจำนวน N รอบ และด้านทั้ง 2 ของขดลวดห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า full-pitch-coil เช่นที่แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด 1 ชุด , N รอบ ด้านทั้ง 2 ของขดลวดห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า

ทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นไปตามกฎมือขวา และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นแม่เหล็กของส่วนที่เป็นโลหะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับอากาศ ดังนั้นจึงสมมติได้ว่าความต้านทานทางแม่เหล็กภายในวงจรแม่เหล็กจะมีค่าเฉพาะในช่องอากาศ

เนื่องจากโครงสร้างของสเตเตอร์สมมาตร สนามแม่เหล็กในช่องอากาศที่มุม θ ภายใต้ขั้วหนึ่งจะมีขนาดเท่ากับที่มุม $\pi + \theta$ ซึ่งอยู่ภายใต้ขั้วตรงข้าม โดยสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งทั้งสอง มีทิศทางตรงกันข้ามกัน

แรงเคลื่อนแม่เหล็กโดยรอบเส้นทางปิด ซึ่งแสดงด้วยเส้นฟลักซ์ (ดังรูปที่ 2.2) มีค่าเท่ากับ Ni และจากสมมติฐานที่กำหนดให้ความต้านทานทางแม่เหล็กในส่วนที่เป็นโลหะมีค่าต่ำ ดังนั้นเทอม $\int H dl$ ในส่วนที่เป็นโลหะจึงมีค่าเกือบเป็นศูนย์

ดังนั้นการสูญเสียแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวงจรแม่เหล็ก จึงมีเฉพาะในช่องอากาศเท่านั้น ในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ ขดลวดจะถูกออกแบบจัดวางอย่างเหมาะสมเพื่อให้แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นซายน์มากที่สุด

เมื่อพิจารณาคลื่นของแรงเคลื่อนแม่เหล็กเช่นที่แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม และเมื่อวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูริเยร์ ก็จะพบว่าประกอบด้วยส่วนของความถี่มูลฐาน และส่วนฮาร์โมนิกสี่ที่ ส่วนความถี่มูลฐาน (\tilde{N}_{a1}) จากการวิเคราะห์จะมีค่าเท่ากับ

$$\tilde{N}_{a1} = \frac{4 Ni}{\pi 2} \cos\theta \quad (2.2)$$

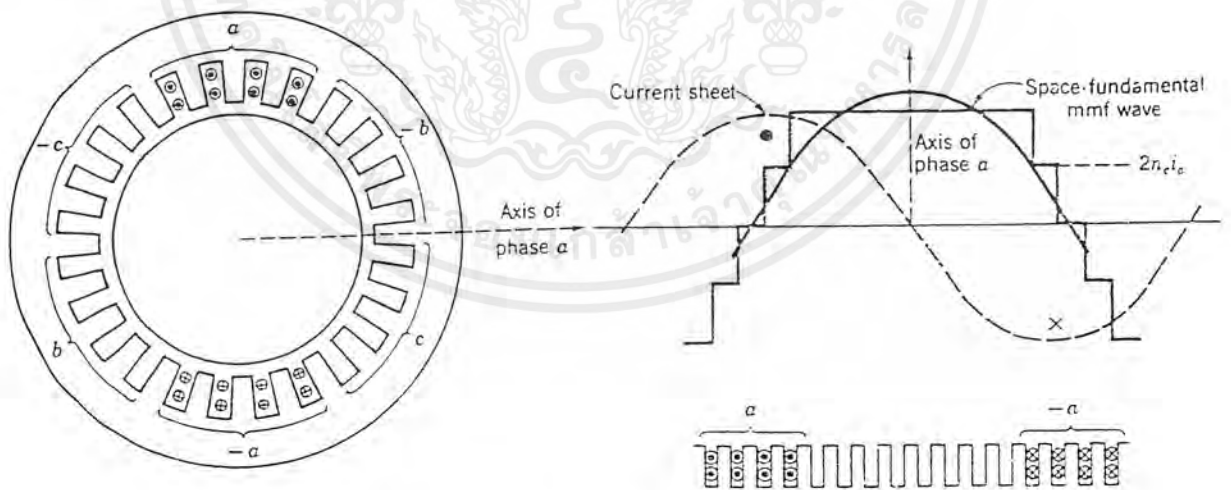
โดยที่ θ เป็นมุมที่วัดจากแกนของขดลวด

ซึ่งส่วนความถี่มูลฐานนี้เป็นคลื่นที่มีขนาด $F_{1,peak}$ อยู่ในแนวแกนสนามแม่เหล็กของขดลวด

$$F_{1,peak} = \frac{4 Ni}{\pi 2} \quad (2.3)$$

การศึกษาผลที่เกิดจากขดลวดที่วางอยู่ในหลายช่อง เช่นรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิด 2 ขั้ว 3 เฟส เป็นดังนี้

ขดลวดแต่ละเฟสมีคุณลักษณะเหมือนกัน และถูกจัดวางเพื่อให้แนวแกนแม่เหล็กที่เกิดจากแต่ละเฟสทำมุมกัน 120 องศาไฟฟ้า



รูปที่ 2.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส ขดลวดจำนวน 3 เฟสถูกจัดวางเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก 2 ขั้ว และด้านทั้งสองของขดลวดแต่ละชุดห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.3 ขดลวดถูกจัดวางเป็น 2 ชั้น ขดลวดแต่ละชุดมีจำนวน N รอบ กระแส i ไหลผ่าน ซึ่งทำให้เกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้นกว่าที่แสดงในรูป 2.2

ส่วนความถี่มูลฐานของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กในกรณีที่ขดลวดถูกออกแบบจัดวางให้เกิดสนามแม่เหล็ก P ขั้ว โดยที่มีขดลวดจำนวน N_{ph} รอบ ต่ออนุกรมกันในแต่ละเฟส คือ

$$\mathcal{F}_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} i_a \cos \theta \quad (2.4)$$

โดยที่เทอม $4/\pi$ มาจากการใช้อนุกรมฟูรีเยร์วิเคราะห์คลื่น mmf ลักษณะสามเหลี่ยมที่เกิดจากด้านของขดลวดที่วางห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า

k_w : ค่า Winding factor มีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวางขดลวด

ดังนั้น k_w และ N_{ph} คือ จำนวนรอบประสิทธิผลที่ต่ออนุกรมกันในแต่ละเฟส ซึ่งทำให้เกิดส่วนความถี่มูลฐานของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก

I_a คือ กระแสในเฟส a

ส่วนความถี่มูลฐานของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้ จะเท่ากับแรงเคลื่อนแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดจากแผ่นกระแสสมมูลที่มีลักษณะการจัดวางแบบรูปคลื่นไซน์ เช่นที่แสดงในรูป 2.3

คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นดังกล่าวที่ผ่านมา มีลักษณะเป็น Standing wave กระจายอยู่ในช่องอากาศแบบ โคไซน์ ขนาดสูงสุดของส่วนความถี่มูลฐาน (F_{max}) คือ

$$F_{max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} I_m \quad (2.5)$$

โดยที่ I_m คือ ขนาดสูงสุดของกระแส $i_a = I_m \cos \omega t$ และ F_{max} อยู่ในแนวแกนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟส a

ด้วยหลักการเดียวกัน ขดลวดที่พันอยู่บนโรเตอร์ก็จะถูกออกแบบจัดวาง เพื่อให้คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ให้มากที่สุด เพื่อให้การลดส่วนฮาร์โมนิกที่สูงขดลวดในแต่ละช่องอาจจะมีจำนวนรอบต่างกัน เช่น ขดลวดที่อยู่ใกล้บริเวณผิวขั้ว จะมีจำนวนรอบน้อยกว่าขดลวดชุดอื่น ๆ ที่อยู่ช่องอื่น

2.4 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะหมุน

เพื่อที่จะให้สมการเข้าใจทฤษฎีและการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหลายเฟสได้ดีจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดหลายเฟสด้วย

ในขั้นแรกจะวิเคราะห์คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กจากขดลวด 1 เฟสในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ 2 ขั้วหรือคู่ขั้วใด ๆ ในเครื่องจักรไฟฟ้าแบบ P ขั้วก่อน ซึ่งเป็นพื้นฐาน และช่วยให้เข้าใจระบบ 3 เฟสได้ดียิ่งขึ้น

2.4.1 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวด 1 เฟส

เมื่อกระแสซึ่งแปรผันตามเวลาแบบรูปคลื่นไซน์

$$i_a = I_a \cos \omega t \quad (2.6)$$

ไหลผ่านขดลวด 1 เฟส จะทำให้เกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (\mathfrak{F}_{a1}) ตามสมการ 2.4 ดังนี้

$$\mathfrak{F}_{a1} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} I_a \cos \omega t \cos \theta \quad (2.7)$$

ขนาดสูงสุดของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (F_{max}) คือ

$$F_{max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} I_a \quad (2.8)$$

นั่นคือ

$$\mathfrak{F}_{a1} = (F_{max} \cos \theta) \cos \omega t \quad (2.9)$$

หรือ

$$\mathfrak{F}_{a1} = F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta + \omega t) \right] \quad (2.10)$$

จะเห็นได้ว่าคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากการที่ขดลวด 1 เฟส ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

$$\mathcal{F}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.11)$$

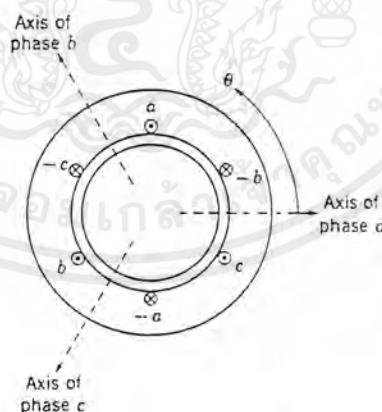
$$\mathcal{F}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t) \quad (2.12)$$

ซึ่ง \mathcal{F}^- และ \mathcal{F}^+ เป็นคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะหมุน มีขนาดเท่ากันคือ $F_{\max}/2$ และ หมุนในทิศทางตรงข้ามกันคือ \mathcal{F}^- หมุนในทิศทาง $+\theta$ และ \mathcal{F}^+ หมุนไปในทิศทาง $-\theta$ ด้วยความเร็วเชิงมุม (ω) เท่ากัน

2.4.2 แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดหลายเฟส

ในหัวข้อนี้จะเลือกวิเคราะห์จากขดลวด 3 เฟส เช่นที่อยู่บนสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซึ่ง โครนีส และเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction machine) โดยในที่นี้จะวิเคราะห์จากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ 2 ขั้ว หรือจากคู่ขั้วใด ๆ ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบ P ขั้ว

ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า 3 เฟส ขดลวดแต่ละเฟสแยกจากกันและห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า เช่นที่แสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ขดลวดบนสเตเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว

คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละเฟส ก็จะต่างมุมกัน 120 องศาไฟฟ้า ด้วยขดลวดเฟส a , b และ c มีกระแส

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad (2.13)$$

$$i_b = I_m \cos (\omega t - 120^\circ) \quad (2.14)$$

$$i_c = I_m \cos (\omega t - 240^\circ) \quad (2.15)$$

ไหลผ่านตามลำดับเฟส a, b และ c

จากสมการ 2.10, 2.11 และ 2.12

$$\mathfrak{I}_{a1} = \mathfrak{I}_{a1}^+ + \mathfrak{I}_{a1}^- \quad (2.16)$$

โดยที่

$$\mathfrak{I}_{a1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos (\theta - \omega t) \quad (2.17)$$

$$\mathfrak{I}_{a1}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos (\theta + \omega t) \quad (2.18)$$

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} k_w \frac{N_{ph}}{P} I_a \quad (2.19)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\mathfrak{I}_{b1} = \mathfrak{I}_{b1}^+ + \mathfrak{I}_{b1}^- \quad (2.20)$$

$$\mathfrak{I}_{b1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos (\theta - \omega t) \quad (2.21)$$

$$\mathfrak{I}_{b1}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos (\theta + \omega t + 120^\circ) \quad (2.22)$$

$$\mathfrak{I}_{c1} = \mathfrak{I}_{c1}^+ + \mathfrak{I}_{c1}^- \quad (2.23)$$

$$\mathfrak{I}_{c1}^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos (\theta - \omega t) \quad (2.24)$$

$$\mathfrak{I}_{c1}^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos (\theta + \omega t - 120^\circ) \quad (2.25)$$

ผลรวมคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ($\mathfrak{I}(\theta, t)$) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathcal{V}(\theta, t) = \mathcal{V}_{a1} + \mathcal{V}_{b1} + \mathcal{V}_{c1} \quad (2.26)$$

$$\mathcal{V}(\theta, t) = \mathcal{V}^+(\theta, t) + \mathcal{V}^-(\theta, t) \quad (2.27)$$

โดยที่ \mathcal{V}^+ เป็น คลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทางบวก หรือ Positive-traveling wave

โดยที่ \mathcal{V}^- เป็น คลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทางลบ หรือ Negative-traveling wave

ซึ่ง

$$\mathcal{V}^-(\theta, t) = \mathcal{V}_{a1}^- + \mathcal{V}_{b1}^- + \mathcal{V}_{c1}^- \quad (2.28)$$

$$= 0 \quad (2.29)$$

$$\mathcal{V}^+(\theta, t) = \mathcal{V}_{a1}^+ + \mathcal{V}_{b1}^+ + \mathcal{V}_{c1}^+ \quad (2.30)$$

$$= \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.31)$$

นั่นคือ เมื่อขดลวด 3 เฟส วางห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า มีกระแส 3 เฟส ต่างมุมกัน 120 องศาไฟฟ้า ไหลผ่าน จะทำให้เกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก เฉพาะส่วนที่เป็น Positive-traveling wave

$$\mathcal{V}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.32)$$

ซึ่งเป็นคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก เมื่อเทียบกับมุม θ ขนาด $(3/2)F_{\max}$ คงที่ และมีเฟส ωt มีลักษณะเชิงเส้นเมื่อเทียบกับเวลา

เทอม ωt แสดงให้เห็นถึงการหมุนของคลื่น ไปรอบช่องอากาศ ด้วยความเร็วเชิงมุม ω

ในกรณีที่เครื่องจักรกลไฟฟ้ามี P ขั้ว ความเร็วเชิงมุมทางกล

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega \text{ rad/sec} \quad (2.33)$$

$$n = \frac{120f}{P} \text{ rev/min} \quad (2.34)$$

โดยทั่วไปสำหรับขดลวด q เฟส มีกระแส q เฟส ที่สมดุลง่ายไหลผ่าน โดยที่แต่ละเฟสห่างกัน $2\pi/q$ rad (มุมทางไฟฟ้า) จะทำให้เกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็ก ที่มีขนาดคงที่เท่ากับ $(q/2)F_{\max}$

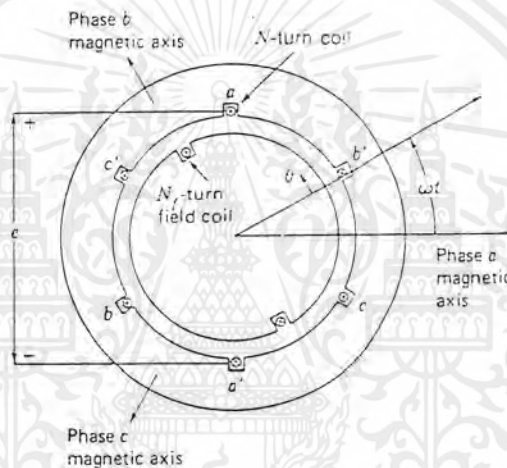
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ F_{max} คือ ขนาดสูงสุดของคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฟสเดียว

2.5 แรงดันเหนี่ยวนำในเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

ในหัวข้อ 2.2 ได้กล่าวถึงลักษณะธรรมชาติการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวด ต่อไปนี้จะเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณถึงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดบนสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส หรือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบอื่น ๆ

เริ่มโดยการพิจารณารูปแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส

แต่ละขดลวดที่แสดงในรูป 2.5 มีด้านห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า

กำหนดให้ขดลวดสนามบนโรเตอร์ ทำให้เกิดฟลักซ์ที่มีลักษณะรูปคลื่นไซน์ (B) ที่ผิวของสเตเตอร์ และโรเตอร์หมุนไปด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ (ω)

$$B = B_{peak} \cos\theta \quad (2.35)$$

โดยที่ B_{peak} คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์สูงสุดที่ผ่านขดลวดเฟส a บนสเตเตอร์

ในขณะที่แกนสนามแม่เหล็กโรเตอร์อยู่ในแนวเดียวกับแกนสนามแม่เหล็กจากขดลวดเฟส a หรือ ขณะที่มีมุม $\theta = 0^\circ$ (ดังรูปที่ 2.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ ฟลักซ์ / ขั้ว ในช่องอากาศ (ϕ) มีค่าดังนี้

$$\phi = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B_{peak} \cos\theta lr d\theta \quad (2.36)$$

$$= 2 B_{peak} lr \quad (2.37)$$

โดยที่ l คือ ความยาวตามแนวแกนของสเตเตอร์

r คือ รัศมีของสเตเตอร์ที่ช่องอากาศ

ในกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มี P ขั้ว

$$\phi = \frac{2}{P} 2 B_{peak} lr \quad (2.38)$$

ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ขั้วจะเป็น $2/P$ เท่า ของกรณีเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มี 2 ขั้ว โดยที่มี l และ r เท่ากัน

ในขณะที่โรเตอร์หมุน ฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดบนสเตเตอร์ (Flux linkage, λ) จะเปลี่ยนแปลงตาม โคไซน์ของมุม θ ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนสนามแม่เหล็กของขดลวดบนสเตเตอร์กับโรเตอร์ และเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (ω) คงที่

$$\lambda = N \phi \cos \omega t \quad (2.39)$$

โดยที่ t คือ เวลาใด ๆ และเลือกกำหนดให้เป็นศูนย์ ในขณะที่แกนสนามแม่เหล็กของขดลวดบนสเตเตอร์และโรเตอร์อยู่ในแนวเดียวกัน

ตามกฎของฟาราเดย์ จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำ (e) ที่ขดลวดบนสเตเตอร์

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \cos \omega t - \omega N \phi \sin \omega t \quad (2.40)$$

ขั้วของแรงดันเหนี่ยวนำ (e) กำหนดได้จากการถ่วงจรรยาที่ปลายของขดลวดบนสเตเตอร์ ซึ่ง e จะต้องทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของ λ ที่ผ่านขดลวดบน สเตเตอร์

ปริมาณฟลักซ์ (ϕ) ที่อยู่ในสมการ 2.40 ได้มาจากการสมมติให้เฉพาะขดลวดสนามบนโรเตอร์เท่านั้นที่ทำให้เกิดฟลักซ์ แต่สมการก็ใช้ได้เช่นกันกับสภาพทั่วไป ซึ่งฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในช่องอากาศเนื่องมาจากขดลวดทั้งบนสเตเตอร์และโรเตอร์

เทอมแรกทางขวาในสมการ 2.40 คือ แรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากฟลักซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า เรียกว่า Transformer voltage

เทอมที่ 2 ทางขวาในสมการ 2.40 คือ แรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างฟลักซ์ในอากาศกับขดลวดบนสเตเตอร์ เรียกว่า Speed voltage

ซึ่งในสภาวะ Steady-state ปริมาณฟลักซ์ (ϕ) ในช่องอากาศมีค่าคงที่ ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะส่วนของ Speed voltage

โดยปกติจะใช้คำว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive force) แทนคำว่า Speed voltage ดังนั้นในช่วงเวลาที่คงที่

$$e = -\omega N \phi \sin \omega t \quad (2.41)$$

และในช่วงเวลาที่คงที่ ตามปกติ จะใช้ค่า rms (root mean square value) ทั้งสำหรับกระแสและแรงดัน

ดังนั้นจากสมการ 2.41 ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (e) คือ

$$E_{\max} = \omega N \phi = 2\pi f N \phi \quad (2.42)$$

และค่า rms ของ E_{\max} คือ

$$E_{\text{rms}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi f N \phi \quad (2.43)$$

โดยที่ f คือ ความถี่ (Hz)

สมการเหล่านี้มีลักษณะเดียวกับสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้านั้นคือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างขดลวดบนสเตเตอร์กับฟลักซ์ที่มีขนาดคงที่ และเคลื่อนที่ในช่องอากาศจะทำให้เกิดผลเช่นเดียวกันกับฟลักซ์ที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งผ่านขดลวดที่นิ่งในหม้อแปลงไฟฟ้า

ดังนั้นผลของการหมุนก็คือ การเปลี่ยนสิ่งที่คงที่ตามเวลา (เช่น ฟลักซ์) ให้เป็นสิ่งที่อื่นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (เช่น แรงดันเหนี่ยวนำ)

แรงดันเหนี่ยวนำตามสมการ 2.41 นั้น เป็นแรงดันเหนี่ยวนำ 1 เฟสเท่านั้น ในการที่จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำ 3 เฟส ก็ทำได้โดยการจัดวางขดลวด 3 ชุด ห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า สมการ 2.43 จะแสดงค่า rms / phase โดยที่ N คือ จำนวนรอบของขดลวดที่อนุกรมกันต่อเฟส และด้านของขดลวดแต่ละชุดห่างกัน 180 องศาไฟฟ้า

ตามปกติขดลวดแต่ละเฟสที่พันอยู่ในเครื่องจักรกลไฟฟ้า จะถูกพันอยู่ในหลายช่อง ดังนั้นค่า k_w จะมีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เพราะแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดแต่ละชุดในเฟสเดียวกัน จะเกิดขึ้นไม่พร้อมกันและทำให้ผลรวมทางเฟสของแรงดันน้อยกว่าผลรวมทางสเกลาร์

โดยมากขดลวด 3 เฟสมีค่า k_w จะประมาณเท่ากับ 0.85 – 0.95 และจากสมการ 2.43 จะได้

$$E_{rms} = \sqrt{2} k_w \omega N_{ph} \phi \quad (2.44)$$

โดยที่ N_{ph} คือ จำนวนรอบของขดลวดที่อนุกรมกันต่อเฟส

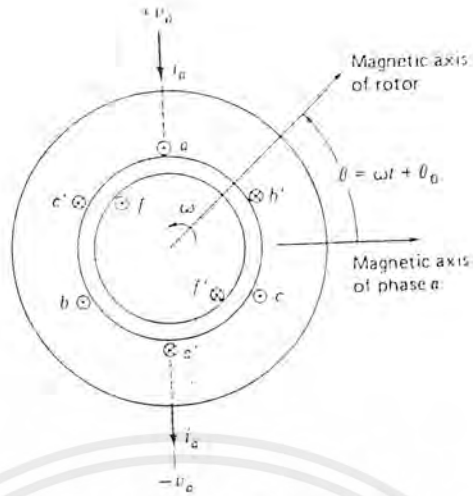
2.6 ค่าความเหนี่ยวนำและวงจรสมมูล

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาที่มาของวงจรสมมูล ซึ่งแสดงให้เห็นคุณสมบัติทางแรงดันและกระแสที่เอาท์พุทของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัส (Terminal Volt-Ampere Characteristics) ขณะทำงานในช่วงเวลาที่คงที่

โดยการพิจารณาจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบ 2 ขั้ว 3 เฟส และมีโรเตอร์แบบ Non-salient ดังแสดงในรูปที่ 2.6

ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นแบบ 3 เฟส คือ ขดลวด aa' , bb' และ cc' แต่ละขดลวดจะทำให้เกิดคลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่มีลักษณะรูปคลื่นไซน์ และความหนาแน่นฟลักซ์ในช่องอากาศ

ขดลวดสนาม ff' บนโรเตอร์ ทำให้คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กและความหนาแน่นฟลักซ์ที่มีลักษณะรูปคลื่นไซน์ และหมุนไปพร้อมกับโรเตอร์



รูปที่ 2.6 เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วอนชาเลียน

ฟลักซ์ที่ผ่าน (Flux linkage) ขดลวด a, b, c และ f ในเทอมของความเหนี่ยวนำและกระแส เขียนแสดงสมการได้ดังนี้

$$\lambda_a = \mathcal{L}_{aa} i_a + \mathcal{L}_{ab} i_b + \mathcal{L}_{ac} i_c + \mathcal{L}_{af} i_f \tag{2.45}$$

$$\lambda_b = \mathcal{L}_{ba} i_a + \mathcal{L}_{bb} i_b + \mathcal{L}_{bc} i_c + \mathcal{L}_{bf} i_f \tag{2.46}$$

$$\lambda_c = \mathcal{L}_{ca} i_a + \mathcal{L}_{cb} i_b + \mathcal{L}_{cc} i_c + \mathcal{L}_{cf} i_f \tag{2.47}$$

$$\lambda_f = \mathcal{L}_{fa} i_a + \mathcal{L}_{fb} i_b + \mathcal{L}_{fc} i_c + \mathcal{L}_{ff} i_f \tag{2.48}$$

โดยที่ $\mathcal{L}_{aa}, \mathcal{L}_{bb}, \mathcal{L}_{cc}$ และ \mathcal{L}_{ff} คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด a, b, c และ f ตามลำดับ

$\mathcal{L}_{ab}, \mathcal{L}_{ac}, \mathcal{L}_{af}, \dots, \mathcal{L}_{fc}$ คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวด 2 ชุด ตามลำดับ

และสัญลักษณ์ \mathcal{L} หมายถึง ค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าขึ้นอยู่กับมุมหรือตำแหน่งของโรเตอร์ และแรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละขดลวด สามารถถูกคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์

2.6.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดของโรเตอร์

เนื่องจากเป็นโรเตอร์แบบขั้วอนชาเลียน ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสนามจึงไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโรเตอร์ และโดยการไม่พิจารณาผลของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากช่องบนสเตเตอร์ จะได้

$$\mathcal{L}_{ff} = L_{ff} = L_{ff0} + L_{ff} \tag{2.49}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่สัญลักษณ์ L หมายถึง ค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าคงที่ ไม่ขึ้นอยู่กับการตำแหน่งของโรเตอร์ หรือ มุม θ

L_{ffo} คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งคำนวณได้จากขนาดของช่องอากาศและข้อมูลเกี่ยวกับขดลวด

L_f คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากส่วนของฟลักซ์ที่วนลัดลงในขดลวดสนาม

ในช่วงทรานเซียนส์หรือเกิดการไม่สมดุลภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส เช่น กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์แต่ละเฟสมีค่าแตกต่างกัน จะทำให้ฟลักซ์ที่วนลัด (λ_f) ที่ผ่านขดลวดสนามมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรรอเตอร์ และเป็นผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรเมื่อต่อแรงดัน (V_f) คงที่เข้ากับปลายของขดลวดสนามที่มีความต้านทาน (R_f) จะทำให้เกิดกระแส $I_f = V_f / R_f$ ไหลในขดลวด

2.6.2 ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์

มีค่าแปรผันแบบเป็นคาบเวลากับมุม θ ระหว่างแกนสนามแม่เหล็กของขดลวดสนามบนโรเตอร์ กับ ขดลวดอาร์เมเจอร์เฟส a บนสเตเตอร์ เช่นที่แสดงในรูป 2.6 เมื่อสมมุติให้คลื่นแรงเคลื่อนแม่เหล็กและฟลักซ์ในช่องอากาศมีลักษณะแบบรูปคลื่นไซน์ จะได้

$$\lambda_{af} = \lambda_{fa} = L_{af} \cos \theta \quad (2.50)$$

และที่เฟส b และ เฟส c จะแทนมุม θ ด้วย $\theta - 120^\circ$ และ $\theta + 120^\circ$ ตามลำดับ เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วเชิงโครนัส (ω) จะได้สมการดังนี้

$$\theta = \omega t + \theta_0 \quad (2.51)$$

โดยที่ θ_0 คือ มุมของโรเตอร์ในขณะ $t = 0$

และเมื่อมีกระแส I_f ไหลในขดลวดสนาม จะได้

$$\lambda_{af} = L_{af} I_f \cos(\omega t + \theta_0) \quad (2.52)$$

2.6.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสเตเตอร์

เมื่อโรเตอร์เป็นแบบขั้วอนชาเดือนและความกว้างของช่องอากาศมีค่าสม่ำเสมอ ไม่ขึ้นอยู่กับมุม θ และ โดยไม่พิจารณาผลจากฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากช่องบนโรเตอร์ จะได้

$$\mathcal{L}_{aa} = \mathcal{L}_{bb} = \mathcal{L}_{cc} = L_{aa} = L_{aaa} + L_{a1} \quad (2.53)$$

โดยที่ L_{aaa} คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศ

L_{a1} คือ ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากส่วนฟลักซ์เกี่ยวค้ำของขดลวดอาร์เมเจอร์

ค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดอาร์เมเจอร์ สามารถคำนวณได้โดยการสมมติให้เกิดขึ้นเฉพาะจากส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศเท่านั้น

$$\mathcal{L}_{ab} = \mathcal{L}_{ba} = \mathcal{L}_{ac} = \mathcal{L}_{ca} = \mathcal{L}_{bc} = \mathcal{L}_{cb} = (1/2)L_{aaa} \quad (2.54)$$

ทั้งนี้เพราะแต่ละเฟสต่างมุมกัน 120° และ $\cos(\pm 120^\circ) = -1/2$

ฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดเฟส a (λ_a) จากสมการ 2.45 มีค่าดังนี้

$$\lambda_a = (L_{aaa} + L_{a1})i_a - \frac{1}{2}L_{aaa}(i_b + i_c) + \lambda_{af} \quad (2.55)$$

โดยที่ λ_{af} มีค่าตามสมการ 2.52

ในกรณีที่กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้ง 3 เฟส สมดุลกัน

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad \text{or} \quad i_b + i_c = -i_a \quad (2.56)$$

เมื่อแทนลงในสมการ 2.55 จะได้

$$\lambda_a = \left(\frac{3}{2}L_{aaa} + L_{a1}\right)i_a + \lambda_{af} \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ค่าความเหนี่ยวนำเชิงโครนีส (L_s) มีค่า

$$L_s = \frac{3}{2}L_{aa0} + L_{af} \quad (2.58)$$

ดังนั้น

$$\lambda_a = L_s i_a + \lambda_{af} \quad (2.59)$$

ค่าความเหนี่ยวนำเชิงโครนีส (L_s) เป็นค่าความเหนี่ยวนำประสิทธิผล เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่เฟสทั้ง 3 สมมูล ในขณะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนีสทำงานในสภาวะปกติ

ค่าความเหนี่ยวนำเชิงโครนีส (L_s) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. L_{aa0} เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งเกิดจากขดลวดเฟส a
 2. L_{af} เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากส่วนสูงเสียดของฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดเฟส a
 3. $(1/2)L_{aa0}$ เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น เนื่องจากฟลักซ์ที่ผ่านขดลวดเฟส a ซึ่งเป็นส่วนความถี่มูลฐานของฟลักซ์ในช่องอากาศที่เกิดจากกระแสในขดลวดเฟส b และ c
- แรงดันที่ปลาย (Terminal voltage) ของขดลวดเฟส a (v_{ia})

$$v_{ia} = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + \frac{d\lambda_{af}}{dt} \quad (2.60)$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่ขดลวดเฟส a (e_{af})

$$e_{af} = \frac{d\lambda_{af}}{dt} = -\omega L_{af} I_f \sin(\omega t + \theta_0) \quad (2.61)$$

เป็นแรงดันที่เกิดจากฟลักซ์ ซึ่งเป็นฟลักซ์จากขดลวดสนามที่หมุน และกำหนดให้ e_{af} เป็น แรงดันกระตุ้น (Excitation voltage) จากสมการ 2.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e_{af} = -\omega L_{af} I_f \cos(\omega t + \theta_0 + \frac{\pi}{2}) \quad (2.62)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดันกระตุ้น (e_{af}) นำพลาซ์เกี่ยวข้องกับ (λ_{af}) เป็นมุม 90°

ค่า rms ของ e_{af} กำหนดให้เป็น E_{af}

$$E_{af} = \frac{\omega L_{af} I_f}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f k_w N_{ph} \Phi_{af} \quad (2.63)$$

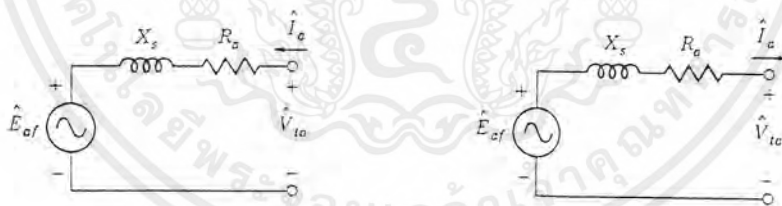
โดยที่ Φ_{af} = ฟลักซ์/ขั้ว ที่เกิดจากขดลวดสนาม

ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นไซน์ ในช่วงเวลาที่คงที่ทำได้สะดวก โดยการใช้สัญลักษณ์ทางเฟส ดังนั้นเมื่อเขียนสมการ 2.63 ในรูปของค่าอิมพีแดนซ์แบบเชิงซ้อน (Complex impedance) โดยสัญลักษณ์ทางเฟส

$$\hat{V}_{ta} = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad (2.64)$$

โดยที่ $X_s = \omega L_s$ ซึ่งเรียกว่าเป็นค่าขง โครนัสรีนแอกแตนซ์

วงจรสมมูลในรูปค่าอิมพีแดนซ์แบบเชิงซ้อน แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.7 ก. แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ซิงโครนัส

ข. แสดงวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

โดยการกำหนดให้ มีทิศทางบวก (ลบ) เมื่อไหลเข้า (ออก) ที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ดังนั้น มีค่าบวก (ลบ) ในกรณีของมอเตอร์ซิงโครนัส (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส)

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแสดงสมการ ได้ดังนี้

$$\hat{V}_{ta} = -R_a \hat{I}_a - jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af} \quad (2.65)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการ 2.58 จะได้

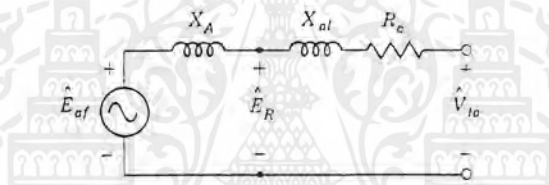
$$X_s = \omega L_s = \omega L_{al} + \omega \left(\frac{3}{2} L_{aao} \right) = X_{al} + X_A \quad (2.66)$$

โดยที่ $X_{al} = \omega L_{al}$ คือ ค่าอาร์เมเจอร์ลิกเกจรีแอกแตนซ์

$X_A = \omega \left(\frac{3}{2} L_{aao} \right)$ คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่สัมพันธ์กับส่วนความถี่มูลฐานของ ฟลักซ์ ซึ่งหมุนภายในช่องอากาศ เกิดจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้ง 3 เฟส

แรงดันเหนี่ยวนำ E_R เป็นแรงดันที่เกิดจากฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งปกติจะเรียกว่าเป็น Air-gap voltage ในทางเฟส E_R จะนำ Φ_R เป็นมุม 90°

เมื่อนำสมการ 2.65 และ 2.66 มาเขียนวงจรสมมูลจะได้ดังรูปที่ 2.8



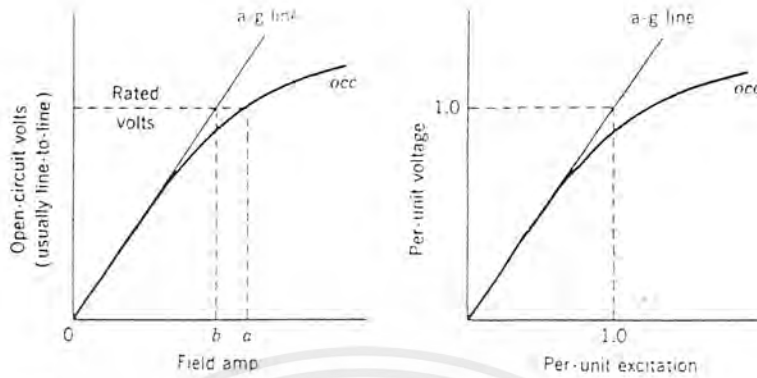
รูปที่ 2.8 แสดงวงจรสมมูลของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสซึ่งอยู่ในรูปของลิกเกจรีแอกแตนซ์

2.7 การทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร (Open- and Short-Circuit Test)

2.7.1 การทดสอบเปิดวงจร (Open-Circuit Test)

เมื่อวัดค่าแรงดัน $V_{to} (= E_{af})$ ที่กระแส I_f ค่าต่าง ๆ และแสดงได้ด้วยกราฟดังรูปที่ 2.9

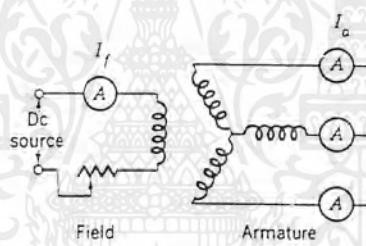
ในขณะที่กระแส I_f เพิ่มถึงค่าหนึ่ง ซึ่งเกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก ทำให้ลักษณะของกราฟเป็นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟการทดสอบเปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

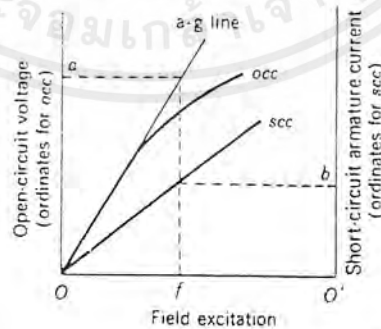
2.7.2 การทดสอบลัดวงจร (Short-Circuit Test)

วงจรที่ใช้ทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรที่ใช้ในการทดสอบลัดวงจร

เมื่อวัดค่ากระแส I_a ที่กระแส I_f ค่าต่าง ๆ และแสดงด้วยกราฟ จะได้ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.11 กราฟการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร

จากการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร ทำให้สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

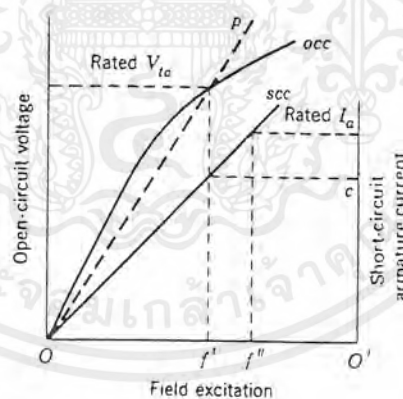
$$X_{s,ag} = \frac{E_{af,ag}}{I_{a,sc}} = \frac{V_{ta}}{I_{a,sc}} \quad (2.67)$$

เนื่องจากการทดสอบโดยการเปิดวงจร จะเกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็กขึ้นในขณะที่กระแส สูงถึงค่าหนึ่ง แต่การทดสอบโดยลัดวงจร จะไม่เกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็กในขณะที่กระแส เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ค่าของซิงโครไนส์รีแอกแตนซ์ ที่คำนวณจากสมการ 2.67 จะถูกต้อง เฉพาะในช่วงที่ไม่เกิดการอิ่มตัวทางแม่เหล็ก

2.7.3 อัตราส่วนการลัดวงจร (Short-Circuit Ratio)

อัตราส่วนลัดวงจรคือ อัตราส่วนของกระแส I_f ที่ทำให้เกิดแรงดัน V_{ta} ที่ค่าพิกัดในขณะที่ทดสอบโดยเปิดวงจรต่อกระแส I_f ที่ทำให้เกิดกระแส I_a ที่ค่าพิกัดในขณะที่ทดสอบลัดวงจร ดังรูปที่ 2.11

$$SCR = \frac{Of'}{Of''} \quad (2.68)$$



รูปที่ 2.12 กราฟการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ

3.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และหลักการทำงาน

เราสามารถแบ่งส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสสลับ ได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. สเตเตอร์ หรือ เฟรม (stator or frame)

มีหน้าที่ยึดขดลวดสเตเตอร์ ที่บรรจุในช่องสลิต ทำด้วยแผ่นลามิเนตบางๆ เมื่อเราป้อนแรงดัน 3 เฟสให้แก่ขดลวดสเตเตอร์ ก็จะสร้างสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่หรือ Rotating field ด้วยความเร็วเชิงโคจร N_s โดย

$$N_s = 120f/p \tag{3.1}$$

2. โรเตอร์ หรือ ตัวหมุน (rotor)

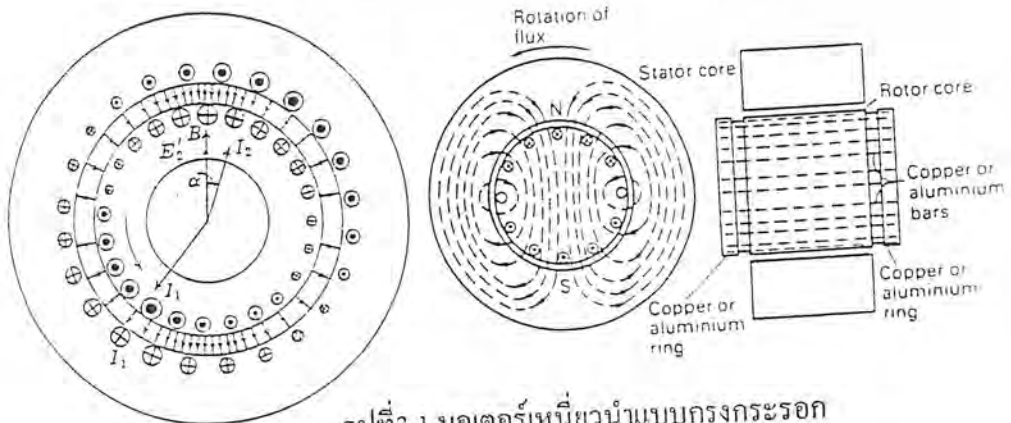
โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. แบบ กรงกระรอก (squirrel cage) มีแท่งตัวนำ (rotor bar) คล้ายกรงกระรอกฝังอยู่ในโรเตอร์ ที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งตัวนำถูกตัดวงจรด้วยตัวนำรูปวงแหวน

2. แบบ ขดลวดพันรอบโรเตอร์ (wound rotor) โรเตอร์แบบนี้จะต่างจากแบบกรงกระรอกคือ มีขดลวดทองแดงพันรอบตัวโรเตอร์ ส่วนปลายของขดลวดนี้จะต่อกับวงแหวนสลิป (slip ring) ซึ่งมีแปรงถ่านติดตั้งอยู่และมีข้อจำกัดคือ โรเตอร์ต้องมีจำนวนขั้วเท่ากับจำนวนขั้วที่เกิดจากสเตเตอร์

หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เมื่อเราพิจารณามอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสที่ โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก



รูปที่ 3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเมื่อมอเตอร์อยู่ในลักษณะหยุดนิ่ง เมื่อเราจ่ายแรงเครื่องไฟฟ้า 3 เฟสเข้าที่ขดลวดสเตเตอร์ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (rotating field) ด้วยความเร็วเชิงโคโรนัสปีด

$$N_s = 120f / p \quad (3.2)$$

เมื่อ N_s = ความเร็วที่เชิงโคโรนัสปีด หน่วย รอบ/ นาที
 f = ความถี่ของไฟที่จ่ายให้ สเตเตอร์ หน่วย Hz
 p = จำนวนขั้วของแม่เหล็ก

เมื่อโรเตอร์คอนดักเตอร์อยู่กับที่ สนามแม่เหล็กหมุนก็จะส่งเส้นแม่เหล็กมาตัดกับขดลวดตัวนำบนโรเตอร์ด้วยความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Speed) เท่ากับเชิงโคโรนัสปีด ตัวนำบนโรเตอร์ก็จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced emf) ขึ้น ตามกฎของฟาราเดย์ทำให้ได้สมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$e = Nd\phi / dt \quad (3.3)$$

แต่เนื่องจากตัวนำโรเตอร์ถูกลัดวงจรจึงทำให้เกิดกระแสไหลเราเรียกกระแสนี้ว่ากระแสของโรเตอร์ (I_r) กระแสนี้จะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับฟลักซ์ที่สเตเตอร์ตามกฎของเลนซ์ (Lenz's Law) ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุน

ขณะที่มอเตอร์เริ่มสตาร์ทตัวของมันเองได้ โรเตอร์จะเริ่มหมุนด้วยความเร็วเข้าใกล้เชิงโคโรนัสปีดซึ่งในขณะนั้น ตัวนำโรเตอร์จะทำให้เกิด Induced emf น้อยลงตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากอัตราการตัดกันของเส้นแรงแม่เหล็ก (Change of flux) ลดลงเนื่องจากตัวนำบนโรเตอร์มีความเร็ว (Nr) การตัดกันของเส้นแรงแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กหมุนจึงเกิดขึ้นจากความเร็วสัมพัทธ์ทั้งสอง

ถ้าหากตัวนำโรเตอร์มีความเร็วเท่าเชิงโคโรนัสปีด แล้วค่าของความเร็วมอเตอร์ จะเท่ากับ 0 อัตราการตัดของเส้นแรงแม่เหล็กที่จะไปตัดตัวนำบนโรเตอร์ก็ไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Induced emf) เกิดขึ้นแรงบิดที่จะไปขับโรเตอร์ก็จะไม่มีจึงทำให้ความเร็วจะไม่ถึงเชิงโคโรนัสปีดความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะต่างจากค่าของเชิงโคโรนัสปีด ด้วยค่าของสลลิป (Slip(s))

Slip คือ ผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่าง โรเตอร์สปีด กับ ซิงโครนัสสปีด เราสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

ความเร็วสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้น

$$\begin{aligned} N_s - N_r &= SN_s \\ \text{ดังนั้น } S &= (N_s - N_r) / N_s \end{aligned} \quad (3.4)$$

หรือ Percentage Slip of Motor

$$\% S = (N_s - N_r) / N_s * 100 \quad (3.5)$$

3.2 ความถี่ที่เกิดขึ้นภายในตัวหมุน (Rotor Frequency)

พิจารณาตัวนำโรเตอร์ขณะหยุดนิ่งค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะการเกิดเหมือนกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดในหม้อแปลง คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่าย

$$N_s = 120f_1 / P$$

เมื่อโรเตอร์หมุนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นด้วยความถี่ใหม่ ซึ่งเป็นผลของ Relative speed คือ

$$N_s - N_r = 120f_2 / P$$

$$SN_s = 120f_2 / P$$

$$N_s / SN_s = (120f_1 / P) * (P / 120f_2)$$

$$1/S = f_1 / f_2$$

$$f_2 = S f_1 \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ตัวหมุน

เมื่อเราต่อไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสเข้าขดลวดของสเตเตอร์ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วของซิงโครนัสสปีด และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะไปตัดกับขดลวดด้านโรเตอร์ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดของโรเตอร์ หากเรากลับมาพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของหม้อแปลงจากสมการ

$$E = 4.44 f N \Phi_m$$

ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดของโรเตอร์ ขณะมอเตอร์หยุดนิ่งได้จาก

$$E_2 = 4.44 f_1 N \Phi_m \quad (3.7)$$

แต่ในความเป็นจริงแล้ว โรเตอร์จะหยุดนิ่งไม่ได้มันจะต้องหมุนอยู่ตลอดเวลาทำให้ความเร็วของโรเตอร์ที่ตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กช้าลงเท่ากับความเร็วสัมพัทธ์ คือความเร็ว $(N_s - N_r)$ นั่นเองซึ่งทำให้ค่าของความถี่ของโรเตอร์เปลี่ยนไปเราสามารถหาค่าของ E_2 ได้จาก

$$\begin{aligned} E_2 &= 4.44 f_2 N \Phi_m \\ f_2 &= S f_1 \\ E_2 &= 4.44 S f_1 N \Phi_m \end{aligned} \quad (3.8)$$

แต่ถ้าหากที่โรเตอร์ถูกพันด้วยขดลวดที่มีจำนวนของ Slot/Pole/Phase เหมือนกับขดลวดที่อยู่กับที่ทุกประการ และเป็นการพันแบบ A.C. Distribution Fractional pitch ซึ่งจะทำให้ค่าของ E_r น้อยลงด้วยค่าของ kW

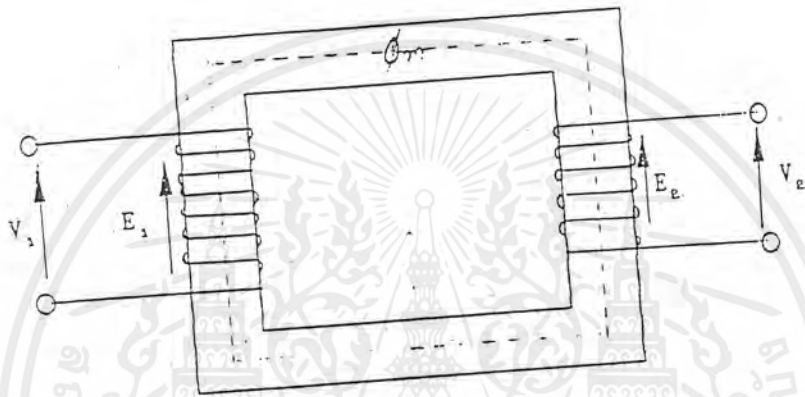
$$E_2 = 4.44 S f_1 N \Phi_m \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } kW &= K_b \cdot K_c \\ K_b &= \text{Breath Factor} \end{aligned}$$

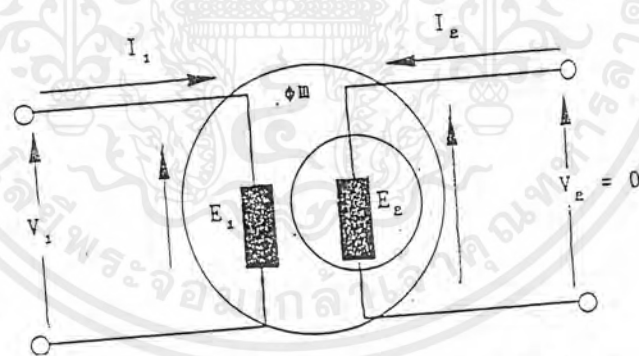
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_c = \text{Pitch Factor}$
 $= \cos \gamma / 2$

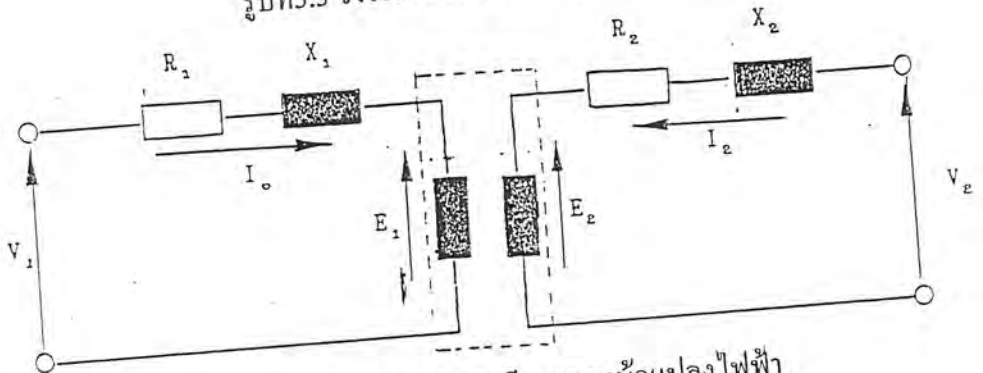
3.4 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Equivalent Circuit of Induction Motor)
 เรากลับมาพิจารณา วงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้า (Circuit of Transformer) และ
 วงจรเทียบเคียงของอินดัคชั่นมอเตอร์ นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจ



รูปที่ 3.2 วงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้า



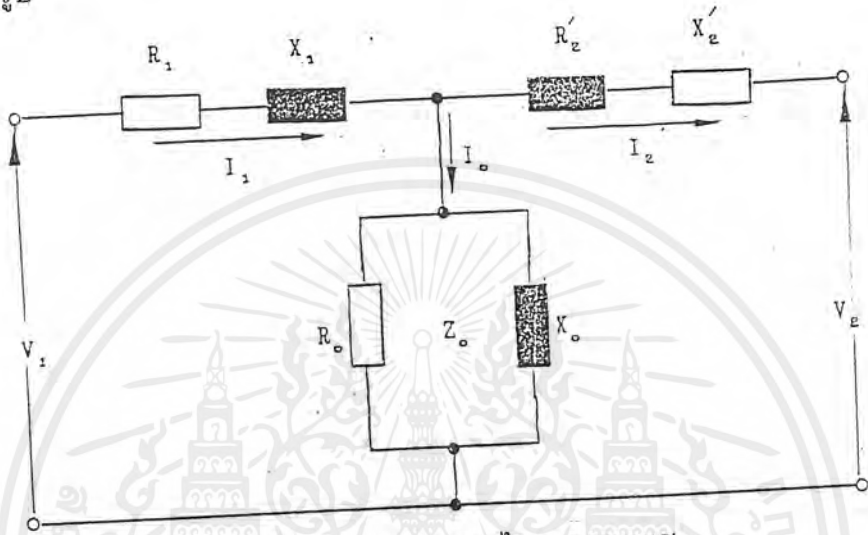
รูปที่ 3.3 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.4 วงจรเทียบเคียงของหม้อแปลงไฟฟ้า

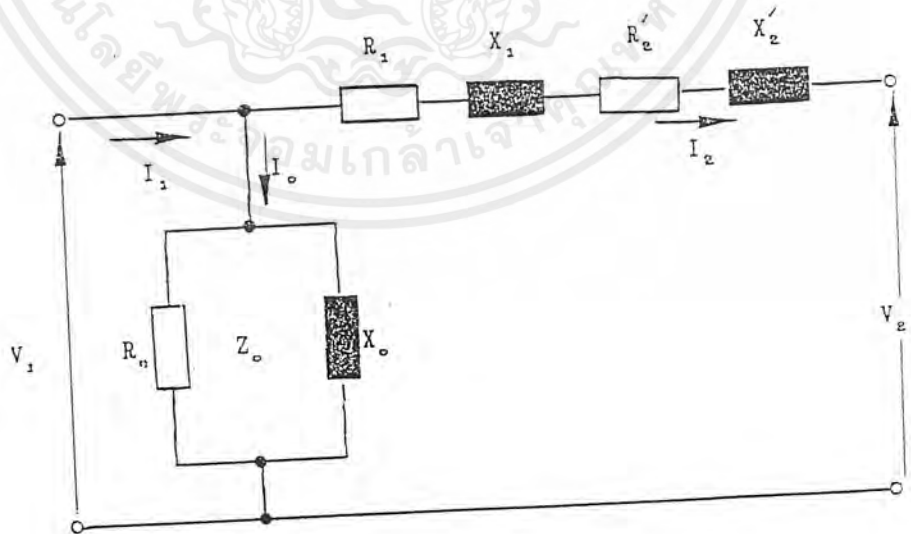
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อหม้อแปลงต่อโหลดทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าไหลทางด้านขดลวด Secondary ทำให้ขดลวดสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้น เป็นผลทำให้กระแสไหลในขดลวดทางด้าน Primary Coil เพิ่มขึ้น หรือ ขดลวด Primary และ Secondary ถูกต่อถึงกันด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก วงจรของหม้อแปลงจะเขียนได้ดังรูป



รูปที่ 3.5 วงจรและการไหลของกระแส

แต่เนื่องจากกระแสไฟฟ้าในขณะไม่มีโหลดของหม้อแปลงมีค่าน้อยมาก เกือบจะไม่มีผลในวงจร ดังนั้นเราจึงสามารถ ย้ายค่าของ Z_0 ออกไปไว้ด้านหน้าของวงจรได้



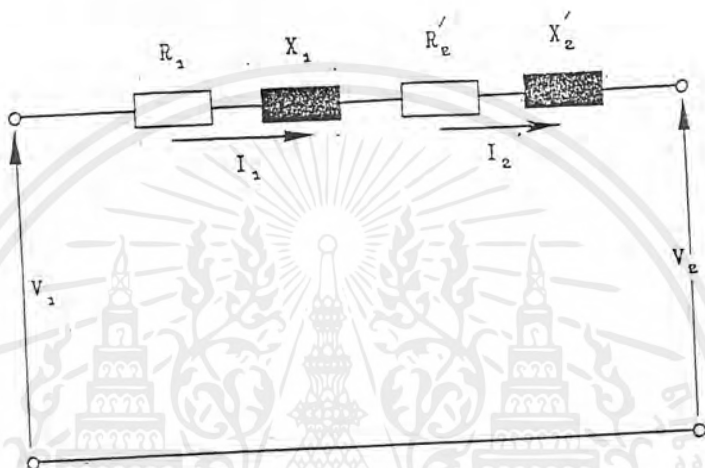
รูปที่ 3.6 วงจรและการไหลของกระแสขณะไม่มีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรเทียบเท่าของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถหากระแสไฟฟ้าได้จากสมการ

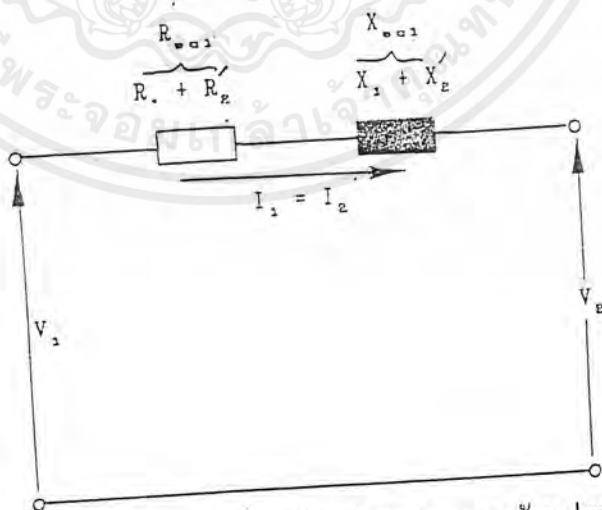
$$I_1 = I_0 + I_2 \quad (3.10)$$

แต่กระแส I_0 มีค่าน้อยมาก (1-3%) บางครั้ง เราสามารถตัดทิ้งไปได้หมายความว่าค่าความต้านทาน Z_0 มีค่าสูงมากๆ ลักษณะ เหมือนกับวงจรเปิด (Open Circuit) คือไม่มี ความต้านทานอยู่เลยจะเหลือวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูป



รูปที่ 3.7 วงจรขณะวงจรเปิด

จากวงจรจะเห็นว่าค่าความต้านทานทางด้าน Primary และ Secondary ต่ออนุกรมกันจึงเหลือเพียงวงจรเทียบเท่าตามรูป

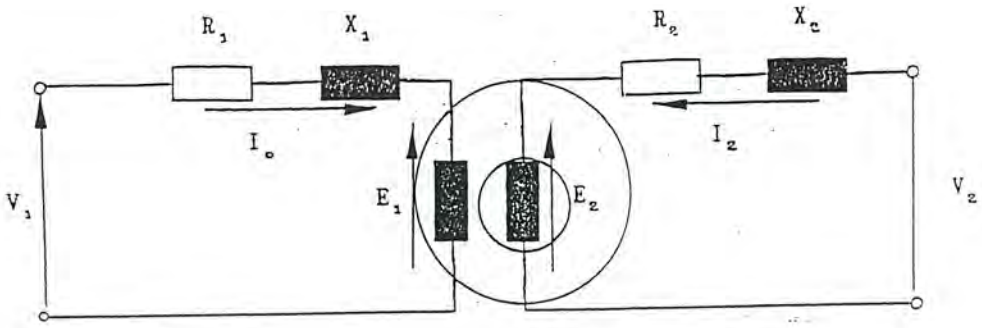


รูปที่ 3.8 แสดงวงจรเทียบเท่าที่ย้ายค่าทุกค่ามาทางด้านปฐมภูมิ

กลับมาพิจารณาวงจรเทียบเท่าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อให้เราเปรียบเทียบกับหม้อแปลง

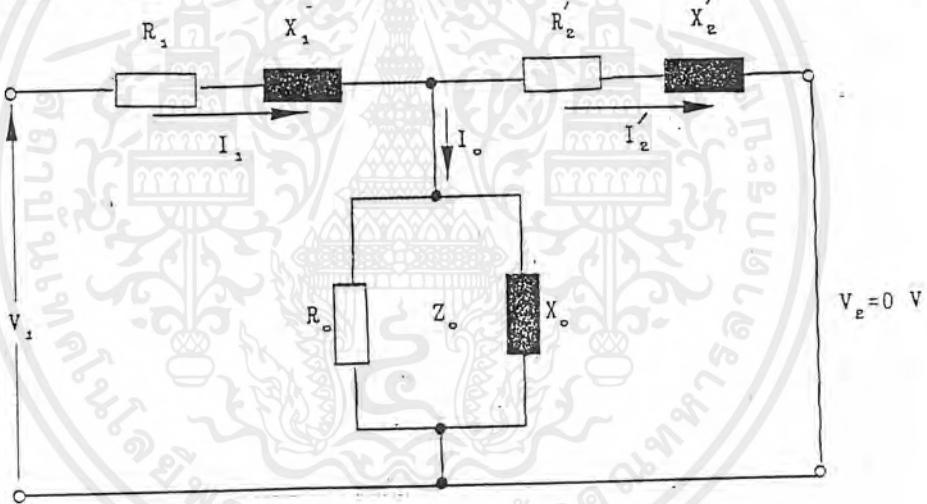
ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

แต่ขดลวดที่พันอยู่ใน สเตเตอร์ และ ขดลวดที่พันอยู่บน โรเตอร์ จะต่อถึงกันด้วยวงจรแม่เหล็ก หรือที่เรียกว่า Magnetic Coupling เราจึงสามารถเขียนวงจรของมอเตอร์ใหม่ได้ตามรูป

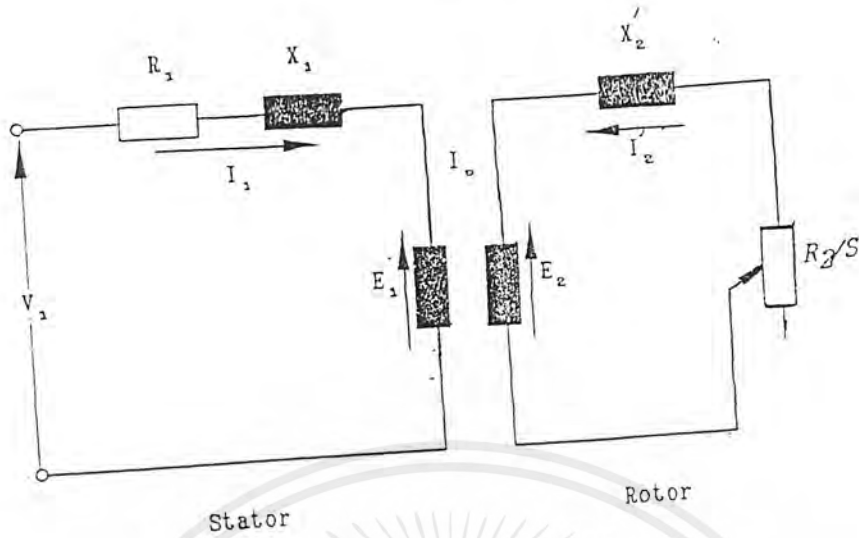


รูปที่ 3.10 วงจรแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

สมการของกระแสไฟฟ้า จะได้เป็น

$$I_1 = I_0 + I_2 \tag{3.11}$$

ถ้าหากเราต้องการที่จะควบคุม ค่าของแรงบิดเริ่มหมุน (starting Torque) เราสามารถเขียนวงจรของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ใหม่ได้ตามรูป



รูปที่3.11 วงจรเทียบเคียงใหม่

จากวงจรเทียบเคียง ของอินคักซ์นอมอเตอร์ ถ้าเราจะหาค่าของสมการแรงเคลื่อน ทั้งด้านสเตเตอร์ และโรเตอร์ จะได้สมการตามนี้

1. Stator Side

$$\begin{aligned} V_1 &= I_1 R_1 + j I_1 X_1 + E_1 \\ &= E_1 + I_1 (R_1 + j X_1) \end{aligned} \tag{3.12}$$

2. Rotor Side

กรณี1 Fix R_2 (Squierel Cage Rotor)

$$\begin{aligned} S E_2 &= I_2 (R_2) + j I_2 S X_2 \\ &= I_2 (R_2 + j S X_2) \end{aligned} \tag{3.13}$$

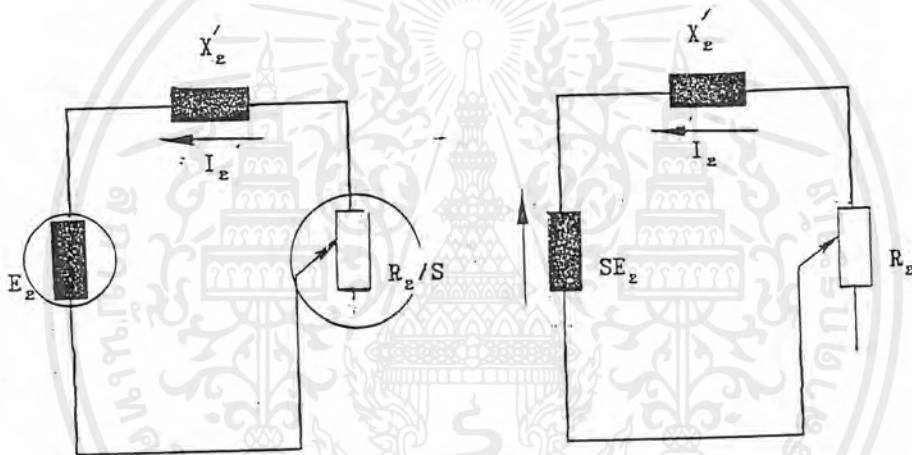
กรณี2 Varry R_2 (Wound Rotor Motor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E_2 &= I_2(R_2) + jI_2X_2 \\
 &= I_2(R_2 + jX_2)
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

3.5 วงจรสมมูลของตัวหมุน (Equivalent Circuit of Rotor)

จากการพิจารณาวงจรเทียบเคียงของอินดักชันมอเตอร์ ทั้งหมด แต่เวลาทำงานจริงๆ แล้ว เราจะควบคุมการทำงานของ มอเตอร์เหนี่ยวนำได้ที่วงจรของของ โรเตอร์ เท่านั้น ดังนั้นเราจะมาพิจารณาวงจรของ โรเตอร์ อีกครั้งหนึ่ง



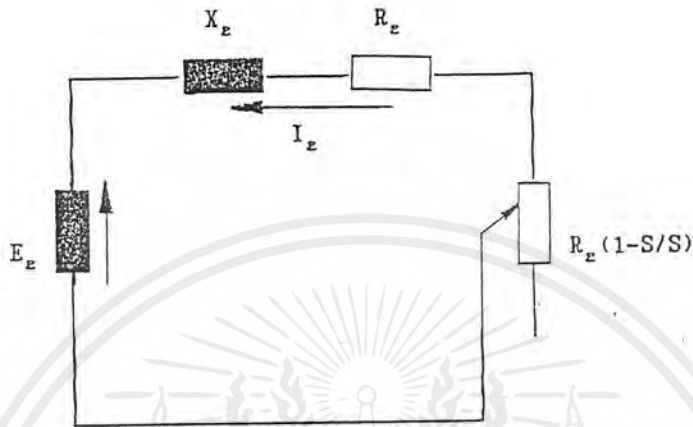
รูปที่ 3.12 วงจรของโรเตอร์

เวลาเราจะควบคุมแรงบิดเริ่มหมุน (Starting torque) ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ เราจะควบคุมที่ R_2 เท่านั้น

$$\begin{aligned}
 R_2/S &= R_2/S + R_2 - R_2 \\
 &= R_2 + (R_2/S - R_2) \\
 &= R_2 + R_2(1/S - 1) \\
 &= R_2 + R_2(1-S)/S
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

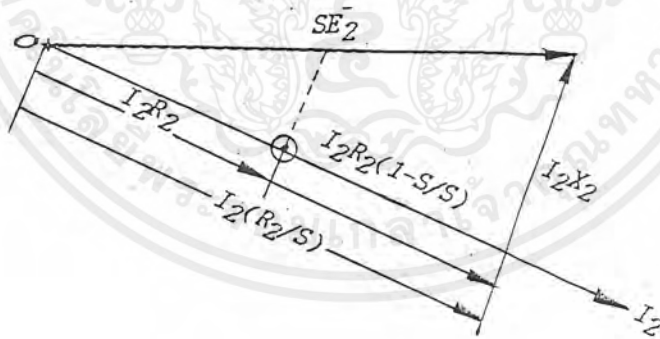
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนเป็นวงจรของโรเตอร์ที่สมบูรณ์ได้



รูปที่ 3.13 วงจรของโรเตอร์ที่สมบูรณ์

จากวงจรเราสามารถเขียนเวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดันของโรเตอร์ได้



รูปที่ 3.14 เวกเตอร์ไดอะแกรมของแรงดัน

เราสามารถบอกได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์มีค่า

$$P_R = (I_2)^2 R_e / S \tag{3.16}$$

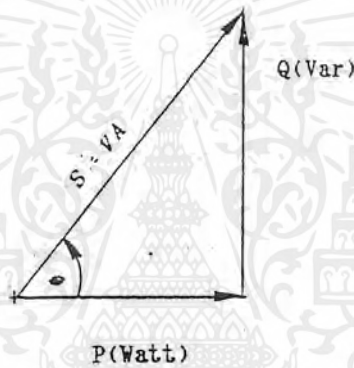
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_R จะประกอบด้วยค่าของกำลังการสูญเสีย และกำลังงานที่ออกมาจริงๆ (P_2)

$$\begin{aligned} P_R &= \text{Copper Loss} + \text{Out Put} \\ &= (I_2)^2 R_2 + (I_2)^2 R_2 (1 - S / S) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} P_0 &= P_R - \text{Copper Loss} \\ &= (I_2)^2 R_2 / S - (I_2)^2 R_2 \\ &= (I_2)^2 R_2 (1 - S / S) \end{aligned} \quad (3.18)$$

พิจารณาสามเหลี่ยมของกำลังไฟฟ้า (Power)



รูปที่ 3.15 สามเหลี่ยมของกำลังไฟฟ้า

แต่กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับแสงสว่างหรือกับ Motor, Transformer คือกำลังไฟฟ้าส่วนที่เป็น Watt เท่านั้น

$$\begin{aligned} P &= I^2 R \\ P &= EI \cos \phi \end{aligned} \quad (3.19)$$

แต่กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจริงๆ นั้นเป็นค่าของกำลังงานทางกล หรือ เราเรียกว่าแรงบิด ซึ่งเราสามารถหาค่าของแรงบิดจริงๆ ส่งผ่านช่องว่างของอากาศ (Air Gap) มอเตอร์ ได้

จากค่ากำลังม้า (Horse Power)

$$\begin{aligned} \text{Hp} &= 746 \\ \text{Hp} &= 2\pi TN / 33000 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 T &= \text{Develop Torque ที่ เกิดขึ้นที่ Rotor} \\
 N &= \text{Rotor Speed} \\
 T &= 33000 \text{ Hp} / 2\pi N
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

จากกำลังงานที่ออกมาที่ โรเตอร์ ซึ่งมีหน่วยเป็น Watt

$$P_2 = (I_2)^2 R_2 (1 - S / S) \tag{3.21}$$

พิจารณากำลังงานที่ออกมาที่ โรเตอร์ ซึ่งมีหน่วยเป็นกำลังม้า

$$\begin{aligned}
 \text{HP} &= P_2 / 746 \\
 \text{HP} &= (I_2)^2 / R_2 (1 - S / S) / 746
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

แทนค่ากำลังงานที่ออกมา(P_2)ในค่าของ Torque

$$\begin{aligned}
 T &= 33000 / 2\pi N_R [(I_2)^2 R_2 (1 - S / S) / S] \\
 &= (I_2)^2 R_2 (1 - S / S) * 7.04 / N_R
 \end{aligned}
 \tag{3.23}$$

จาก

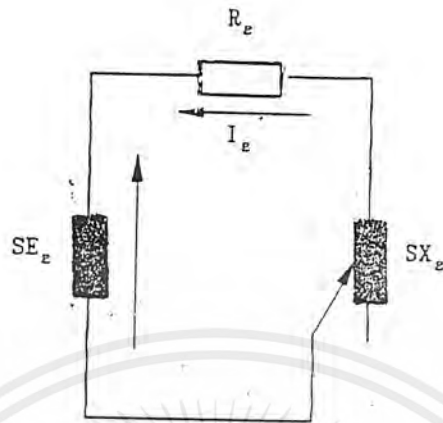
$$\begin{aligned}
 N_S - N_R &= N_S \\
 N_S - S N_S &= N_R \\
 N_S (1 - S) &= N_R \\
 N_S &= N_R / (1 - S) \\
 T &= (I_2)^2 R_2 / S * 1 / 2\pi N_S
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

หรือถ้าเราพิจารณาค่าของ Torque อยู่ในหน่วยของ SI Unit

$$T = (I_2)^2 R_2 / S * 7.04 / 2 \pi N_S \tag{3.25}$$

เรามาย้อนดูวงจรเทียบเคียง(Equivalent Circuit) ของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 วงจรเทียบเคียงของมอเตอร์

$$\begin{aligned} I_2 &= SE_R / Z_R \\ I_2 &= SE_R / [(R_2)^2 + (SX_2)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (3.26)$$

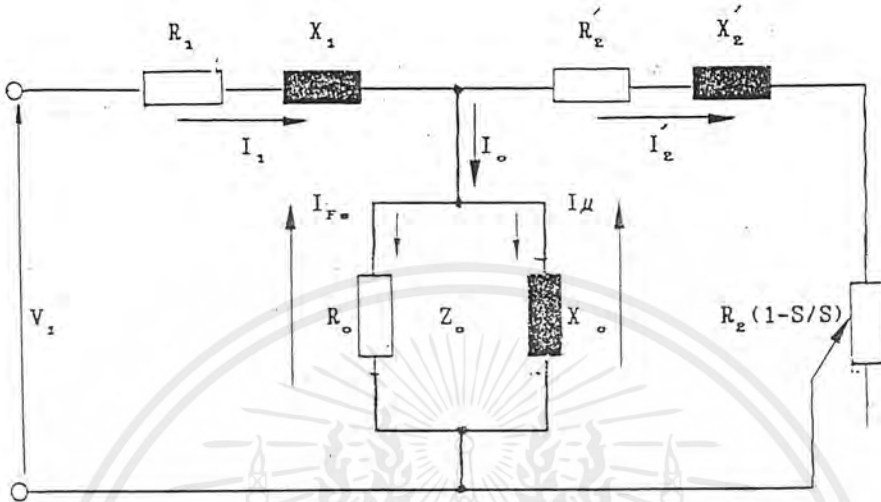
แทนค่าของ I_2 ในสมการของ T

$$\begin{aligned} T &= [SE_R / (R_2^2 + (SX_2)^2)]^2 * R_2 / S * 1/2\pi N_s \\ T &= [S^2 (E_R)^2 / (R_2^2 + (SX_2)^2) * R_2 / S * 1/2\pi N_s \\ T &= S(E_2)^2 R_2 / (Z_R)^2 \pi N_s \end{aligned} \quad (3.27)$$

จากสมการของแรงบิด เราจะเห็นว่าค่าของแรงบิด จะขึ้นอยู่กับค่าของ Slip และแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ โรเตอร์ เท่านั้น แต่ E_2 คือค่าที่ในขณะที่ หยุดหนึ่ง ซึ่งจะมีลักษณะการเกิดเหมือนในหม้อแปลง โดย T จะแปรผันตามค่าของ S

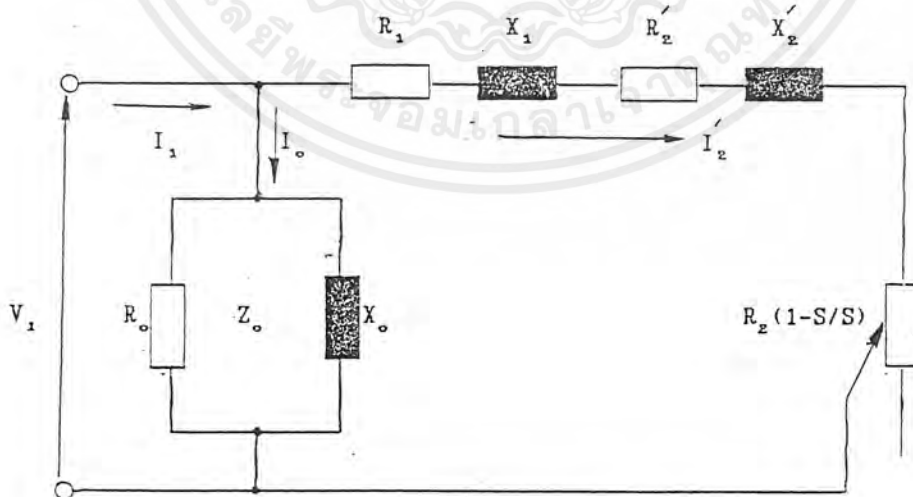
สรุป เราจะสามารถเขียนวงจรเทียบเคียง ที่สมบูรณ์ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตามรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 วงจรเทียบเคียงที่สมบูรณ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หรือเราสามารถเขียน วงจรเทียบเคียง ที่ใกล้ความเป็นจริงมากที่สุด (Approximated Equivalent Circuit) ของ มอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้ตามรูป

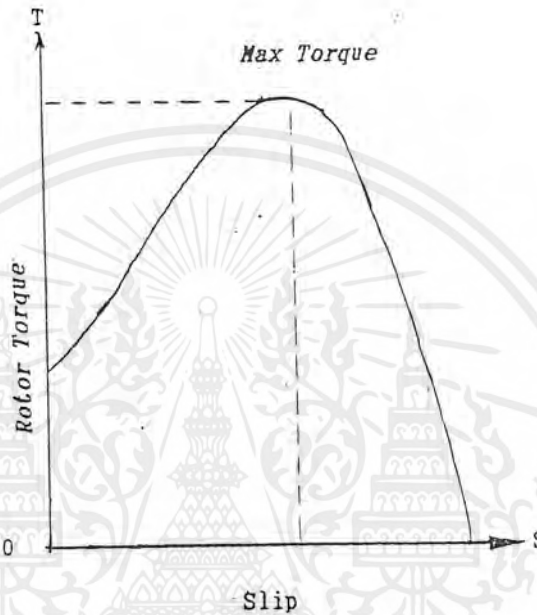


รูปที่ 3.18 วงจรเทียบเคียงที่ใกล้ความเป็นจริงมากที่สุดของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ (Maximum Torque of Motor)

ถ้าเราต้องการทราบค่าของแรงบิดที่เกิดขึ้นสูงสุด(Maximum Torque) ของ Motor ที่ Slip ใดๆ เราก็ทำการ Derivative Torque เทียบกับ Slip แล้วให้เท่ากับศูนย์ ($dT / dS = 0$)



รูปที่ 3.19 ค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ที่สลิปใดๆ

Derived

$$d[S(E_2)^2 R_2 / [(R_2)^2 + (SX_2)^2] * 1 / 2\pi N_s] / dS = 0$$

$$d[S / \{ (R_2)^2 + (SX_2)^2 \}] * (E_2)^2 R_2 / 2\pi N_s / dS = 0$$

$$(E_2)^2 R_2 / 2\pi N_s * d[S / \{ (R_2)^2 + (SX_2)^2 \}] / dS = 0$$

$$\therefore d[S / \{ (R_2)^2 + (SX_2)^2 \}] / dS = 0$$

$$\text{จาก } d(U/V) = 1/V^2 * [V dU - U dV]$$

$$1 / [(R_2)^2 + (SX_2)^2] * [(R_2)^2 + (SX_2)^2 dS / dS - S d\{ (R_2)^2 + (SX_2)^2 \}] = 0$$

$$(R_2)^2 + (SX_2)^2 - S [d(R_2)^2 / dS + d(SX_2)^2 / dS] = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(R_2)^2 + (SX_2)^2 - S [0 + (X_2)^2 2 S] = 0$$

$$(R_2)^2 + (SX_2)^2 - 2 (S)^2 (X_2)^2 = 0$$

$$S^2 = (R_2)^2 + (X_2)^2$$

$$\text{At Max Torque} \quad S = R_2 / X_2 \quad (3.28)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ฮาร์โมนิกส์

4.1 สาเหตุของฮาร์โมนิกส์

ในระบบไฟฟ้าสามเฟส 50 Hz ที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าแรงดันและกระแสที่ได้ในสถานะปกติเกือบจะเป็นคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz บริสุทธิ์ อะไรก็ตามที่เปลี่ยนรูปคลื่นนี้ไปจากเดิมจะก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะกินกระแส ไม่เป็นสัดส่วนกับ แรงดัน ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของกระแสขึ้นในระบบไฟฟ้า ความผิดเพี้ยนนี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เทียบกับขนาดของระบบไฟฟ้า ณ สถานที่นั้น ค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำจะทำให้กระแสและแรงดัน มีเฟสไม่ตรงกัน แต่คลื่นไซน์ จะยังคงบริสุทธิ์อยู่ トラバドที่ ไม่มีฮาร์โมนิกส์อยู่ในระบบ แหล่งที่มาที่สำคัญของฮาร์โมนิกส์คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น รวมไปถึงอุปกรณ์ เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์

4.2 ฮาร์โมนิกส์และผลกระทบต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ในการศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยทั่วไป ซึ่งพื้นฐานของการศึกษา จะสมมติฐานว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานสถานะ แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์(Sinusoidal Supply Waveforms) แต่ในการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ไม่ถูกใช้งานในสถานะแหล่งจ่าย เป็นคลื่นไซน์ แต่ถูกใช้งานในสถานะแหล่งจ่ายไม่เป็นคลื่นไซน์(Non-sinusoidal Supply Waveforms) เนื่องจากในการควบคุม ความเร็วของมอเตอร์ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม มักจะควบคุมจากอินเวอร์เตอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วเนื่องจาก $n = 120f/p$ ซึ่งในการใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็ว ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานภายใน สถานะไม่ใช้คลื่นไซน์ ซึ่งจะประกอบด้วยส่วน พื้นดาเมนทอล(fundamental) และฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ ซึ่งจะต้องศึกษาผลกระทบต่อ ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆในเครื่องจักร

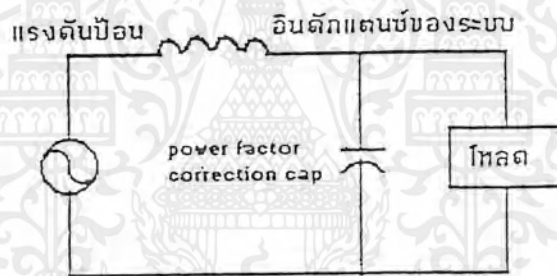
4.3 ศัพท์และปริมาณต่างๆ

1. ฮาร์โมนิกส์(Harmonics)

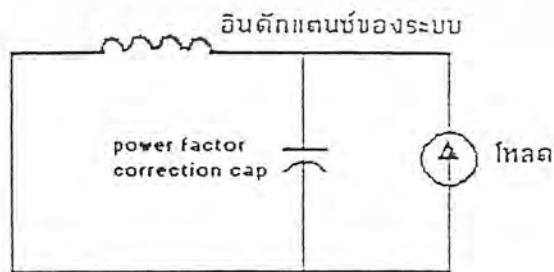
วิชาทางไฟฟ้า ฮาร์โมนิกส์ คือ สัญญาณ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่มูลฐาน คือ 50 Hz ฮาร์โมนิกส์ คือ 100 ,200 Hz เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่า ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 ส่วนฮาร์โมนิกส์ลำดับอื่นๆ ก็หาได้จากการเอาเลขจำนวนเต็มบวก คูณกับความถี่หลักมูล การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์สามารถทำได้หลายวิธีแตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม(Total harmonic distortion) ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆกัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลและเครื่องมื่อวัดฮาร์โมนิกส์ทั้งหลาย จะแสดงผลของความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมและความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์แต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ถูกป้อนด้วยแรงดันหลักมูลบริสุทธิ์ โดยแหล่งจ่ายซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ จะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อนให้ ความเพี้ยนของกระแสนี้จะมีผลทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอิมพีแดนซ์นี้จะมีผลทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันแสดงดังรูป 4.1 ด้วยเหตุนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นหรือตัวผลิต ฮาร์โมนิกส์จะถูกแทน ด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์ ด้วยอิมพีแดนซ์ ของระบบที่เหมาะสมดังในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและ โหลดที่ความถี่หลักมูล



รูปที่ 4.2 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและ โหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระแสฮาร์โมนิก(Harmonic current)

ฮาร์โมนิกที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น(Non-Linear Devices) ซึ่งอาจเป็น โหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์โมนิกอย่างจริงจัง เนื่องจาก อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์โมนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน(Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากเป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกขึ้นอย่างมากมาย

3. แรงดันฮาร์โมนิก(Harmonic Voltage)

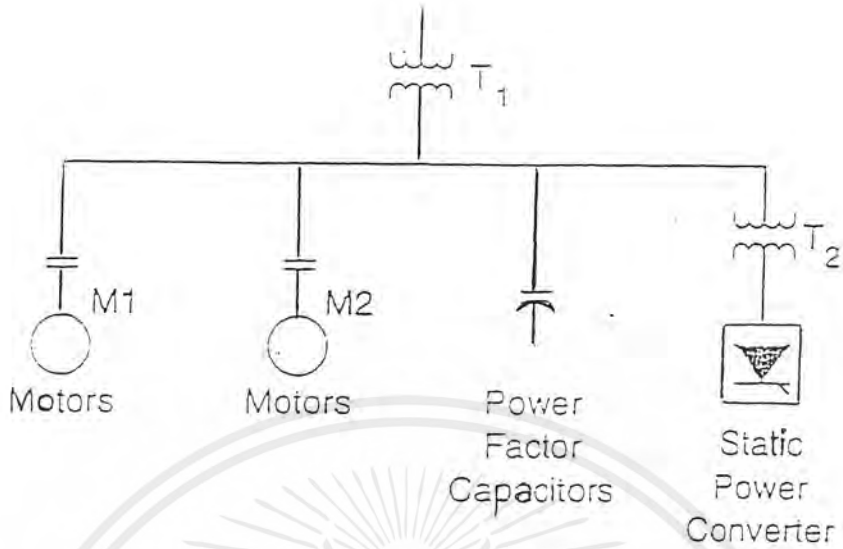
เกิดจากการที่กระแสฮาร์โมนิกไหลผ่านค่ารีแอกแตนซ์(Reactance) ของระบบ(รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง(Power Factor) และแรงดันให้ดีขึ้นด้วย ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดัน อันเนื่องจากรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง กระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก(Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = Z_n I_n \quad (4.1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} V_n &= \text{แรงดันฮาร์โมนิก} \\ I_n &= \text{กระแสฮาร์โมนิกในระบบ} \\ Z_n &= \text{ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ} \end{aligned}$$

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุง ตัวประกอบกำลัง จะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์โมนิกในระบบจำหน่าย คาปาซิเตอร์มิได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิก แต่จากการต่อวงจรในระบบมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขรีโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance) ระหว่างคาปาซิเตอร์ และ รีแอกแตนซ์ ของระบบ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์ ถ้ารีโชนนซ์แบบขนานเกิดที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันมีค่ามาก(Distortion Factor)

4. ตัวประกอบความเพี้ยน(Distortion Factor) DF

ตัวประกอบฮาร์โมนิกส์(Harmonic Factor) HF

ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ทั้งหมด(Total Harmonic Distortion) THD

ความหมายทั้งสามตัวนั้นมาตรฐานของ IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกัน กล่าวคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล

$$DF_i = HF_i = THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \times 100\%$$

$$= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

IEC 555-1 : 1992

$$HD_v = THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}} \times 100\%$$

$$HD_i = THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \times 100\%$$

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายทั้งสามตัวว่า มันคือความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส (Harmonic Distortion) HD กล่าวคือ บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของปริมาณทั้งหมด

5. ลำดับฮาร์โมนิกส (Harmonic order)

ลำดับฮาร์โมนิกส คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกสและความถี่หลักมูลเช่น เมื่อเอ่ยถึงฮาร์โมนิกสลำดับที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 Hz จะได้ความถี่ของฮาร์โมนิกสที่ 3 เป็น 150Hz

6. ตัวประกอบกำลัง (Power factor)

หมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง (W หรือ kW) ต่อกำลังงานปรากฏ (V หรือ kVA) อย่างไรก็ตามหากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะรูปคลื่นไซน์ เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอมของค่า (cosine) ของมุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสก็ได้

Power Factor (PF) คือ อัตราส่วนกำลังงานจริงต่อกำลังงานปรากฏ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Displacement Power Factor (DPF) คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริงของรูปคลื่นความถี่หลักมูลต่อกำลังงานปรากฏของรูปคลื่นความถี่หลักมูล หรืออาจกล่าวได้ว่า DPF คือ ค่าของโคไซน์ของมุมเฟสของแรงดันความถี่หลักมูลกับกระแสความถี่หลักมูล

$$\text{DPF} = \frac{\text{Active Power}}{\text{Apparent Power (Fund)}}$$

$$\text{Total PF} = \frac{\text{Active Power}}{\text{Apparent Power (Total)}}$$

เมื่อ

พิกัดกำลังงานจริง(Active Power) = ผลคูณของ RMS แรงดันกับ RMS กระแสที่ Inphase กัน (watt)

พิกัดกำลังงานที่ปรากฏ (Apparent Power) = ผลคูณของ RMS แรงดันกับ RMS กระแส (volt-amp)

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Fund) ได้จาก rms ของแรงดันคูณกับ rms ของกระแสของ Fundamental

พิกัดกำลังที่ปรากฏ(Total) ได้จากการรวมเอาฮาร์โมนิกส์มาด้วย

4.4 ประเภทของฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าอาจจะแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังต่อไปนี้

1. ฮาร์โมนิกส์(Harmonics)

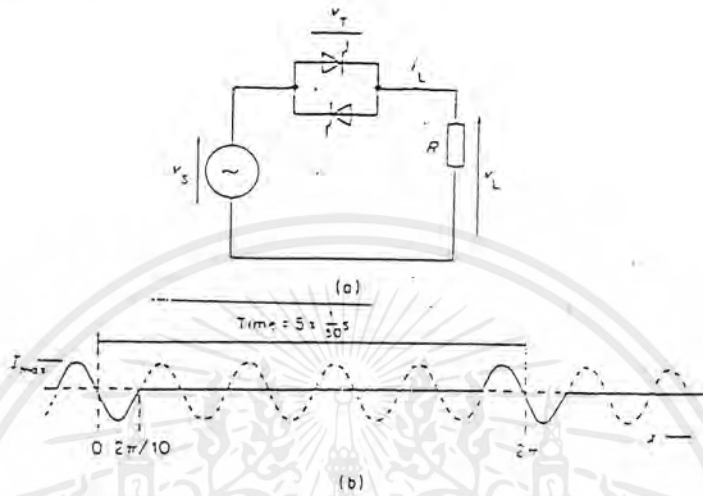
หมายถึง ส่วนประกอบรูปไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล

2. อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์(Interharmonics)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์นี้ ส่วนมากจะพบในกระแสเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอม กระแสอาร์คจะไม่เสถียร ทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50 Hz คาบจะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่

กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาทีทุกคาบ ทำให้เกิดอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ขึ้นนอกจากนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็จะพบอินเทอร์ฮาร์โมนิกส์ ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle Control หรือ Burst firing ดังรูป



รูปที่ 4.4 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่าน โหลดแบบ Integral Cycle Control

3. ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ที่สร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า (แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือกลับกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไคโอด , SCR เป็นสวิตช์ ตัดต่อกระแส) ในสถานะการทำงานปกติลำดับของฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ สามารถหาได้จาก

$$n = kp \pm 1$$

เมื่อ

$$n = \text{ลำดับของฮาร์โมนิกส์}$$

$$k = \text{เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ}$$

$$p = \text{จำนวนพัลส์ (pulse number) ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า}$$

4. ฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonics)

หมายถึงฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n = kp \pm 1$ เช่นเครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรจะมีเฉพาะฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะที่มีลำดับ 11,13,23,25,35,37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเป็น 5,7,17,19 ปนมาด้วย ฮาร์โมนิกส์ เหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ฮาร์โมนิกส์ที่สามหารลงตัว(Tripplen Harmonics)

หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่สามหารลงตัว ได้แก่ ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3,6,9 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ (sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิกส์กลุ่มนี้จะไหลอยู่ในสายนิวตรอน ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าขึ้นเช่น สายนิวตรอนร้อน ฉนวนเสียหาย เกิดตัวจร เป็นต้น

4.5 แหล่งกำเนิดและผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

4.5.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่มากมาย อุปกรณ์ที่ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์มีดังต่อไปนี้

1. หม้อแปลง(Transformer)

ในสถานะอยู่ตัวปกติ(Normal Steady State) หม้อแปลงไม่ทำให้เกิดการเพี้ยน(Distortion) แก้วจรเครือข่าย แต่ขณะสถานะชั่วคราว (Transient) หรือขณะหม้อแปลงทำงานเกินขอบเขตปกติ จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น กรณีหม้อแปลง ไม่มีโหลด แรงดันปฐมภูมิรูปคลื่นไซน์ ของหม้อแปลง จะสร้างฟลักซ์รูปคลื่นไซน์ แต่กระแสปฐมภูมิจะไม่เป็นรูปไซน์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะฟลักซ์ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็ก (Magnetizing current)

2. เครื่องจักร ไฟฟ้า(Electrical Machinery)

เครื่องจักร ไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายหม้อแปลง นั่นคือในสถานะอยู่ตัวมันไม่ทำให้เกิดการเพี้ยนแก่ข่ายวงจร แต่ในสถานะชั่วคราวหรือเครื่องจักรทำงานเกินขอบเขตจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น เครื่องจักรไฟฟ้าจะผลิตกระแสฮาร์โมนิกส์ในฟังก์ชันของความถี่ กับจำนวนร่องของอาร์เมเจอร์ การออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้าที่ดีต้องทำให้ระดับกระแสฮาร์โมนิกส์มีค่าน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับสามจะได้รับการสกัดกั้น(Block) โดยการต่อกับหม้อแปลงแบบเดลต้า

3. อุปกรณ์อาร์ก(Arc Equipment)

อุปกรณ์อาร์กมีมากมายหลายชนิดซึ่งรวมถึงเตาอาร์กขนาดใหญ่และเครื่องเชื่อม อุปกรณ์ทั้งสองนี้ทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์และไฟกระพริบ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อาร์กอื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์ ได้แก่ แสงสว่างอาร์กมีขนาดเท่ากับ 10% ของกระแสฟลักซ์ ในอุปกรณ์บางชนิด อาจมีค่าถึง 30% ถ้าวัดแรงดันขาออก(Output Voltage) ของเตาอาร์กจะพบว่าแรงดันฮาร์โมนิกส์เปลี่ยนแปลงอย่างมากและมีค่าไม่แน่นอน ตัวอย่างเช่น

- ขณะเริ่มหลอม(Meltdown) แรงดันฮาร์โมนิกส์อันดับ 5 มีขนาด 8% เมื่อเทียบกับแรงดัน

หัตถมูล (Fundamental Voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-เมื่อสิ้นสุดการหลอม (End of Meltdown) แรงดันอาร์โมนิกส์อันดับมีขนาด 6 %

-ขณะถลุงแร่(Refining) แรงดันอาร์โมนิกส์อันดับ5มีขนาด 2.5%

4. หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent)

หลอดฟลูออเรสเซนต์นิยมใช้อย่างมากในบ้านเรือนและในอุตสาหกรรมบางชนิดจึงถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์สำคัญ การปล่อยประจุ(Discharge) ในหลอดฟลูออเรสเซนต์ถือว่าเป็นแบบไม่เชิงเส้นอย่างมาก(Highly Non-Linear) ซึ่งทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับคี่(Odd-Ordered Harmonic Current)

5. เครื่องแปลงผัน (Converter)

เครื่องแปลงผันใช้กันอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่ในบ้านจนถึงในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การที่เครื่องอุปกรณ์นี้ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากว่ามันมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

4.5.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์

แรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าดังนี้

- ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์โมนิกส์ เนื่องจากผลของรีโซแนนซ์อนุกรมและขนาน
- ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้า การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และการใช้กำลังไฟฟ้า มีประสิทธิภาพลดลง
- ทำให้จำนวนของอุปกรณ์เสื่อมสภาพ เป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง
- ทำให้โรตจักรทำงานผิดพลาด (Plant Maloperation)

สำหรับผลกระทบที่มีต่อเครื่องจักร ไฟฟ้า ทำให้เกิดความสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์โมนิกส์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรด้วย

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปไซน์(Nonsinusoidal Supply) จะสร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์(Flux Density Wave) รบกวนอย่างมาก เมื่อเทียบกับกรณีมีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Supply) ฮาร์โมนิกส์จะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพท์กระจายในช่องอากาศ(Air Gap)และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า คอกกิง(Cogging) คือการที่ไม่สามารถเดินเครื่องได้ หรือปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ครอลิง(Crawling) คือการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งยังไม่มีความมาตรฐานกำหนดแรงดัน และกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับมอเตอร์

4.6 การแก้ไขปัญหาระบบฮาร์โมนิกส์

ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์โมนิกส์ถ้าไม่จำกัดฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวก็ทำให้เอกสาร อุปกรณ์ต่างๆ ได้รับความเสียหายได้ ระบบที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์โมนิกส์มักมีเพาเวอร์แฟกเตอร์ต่ำ ค่าไม่เท่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงมีคาปาซิเตอร์ช่วยแก้เพนเวอร์แฟลคเตอร์ด้วย ถ้าหากขนาดคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ไปใกล้เคียงกับฮาร์โมนิกส์ใดจากอุปกรณ์ดังกล่าวทำให้เกิดศักค่าไฟฟ้าและกระแสสูงในระบบยังมีโอกาสทำให้อุปกรณ์เสียหายได้มากขึ้น

การแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกส์ สามารถทำได้หลายประการดังนี้

- เปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งหรือเปลี่ยนขนาดคาปาซิเตอร์
- ใส่ฟิลเตอร์ที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์
- ใส่รีแอกเตอร์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์เพื่อทำให้เป็นฟิลเตอร์

สรุป

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมทำให้อุปกรณ์ต่างๆในระบบอาจได้รับความเสียหายหรือทำให้ระบบการจ่ายไฟฟ้าหยุดชะงักได้ การกำจัดหรือจำกัดขนาดของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องได้รับการพิจารณาอย่างรอบคอบเพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการแก้ไขน้อยที่สุด และให้ผลการแก้ไขอยู่ในเกณฑ์ที่จะยอมรับได้ สำหรับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมที่ได้ติดตั้งไปแล้วและมีอาการที่สอดคล้องของการมีฮาร์โมนิกส์ในระบบควรได้รับการตรวจสอบ ซึ่งอาจใช้เครื่องวิเคราะห์ฮาร์โมนิก เพื่อหาฮาร์โมนิกส์ที่ทำให้เกิดผลเสียหายเพื่อหาทางแก้ไขต่อไป ส่วนระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมที่เริ่มติดตั้งใหม่ๆ ควรได้รับการพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นเสียก่อนเพื่อไม่ให้ฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นหรือถ้าหากมีก็ให้มีขนาดระดับต่ำ โดยเฉพาะกับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงหรือมีเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่มีการปรับความเร็วโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความถี่เป็นต้น

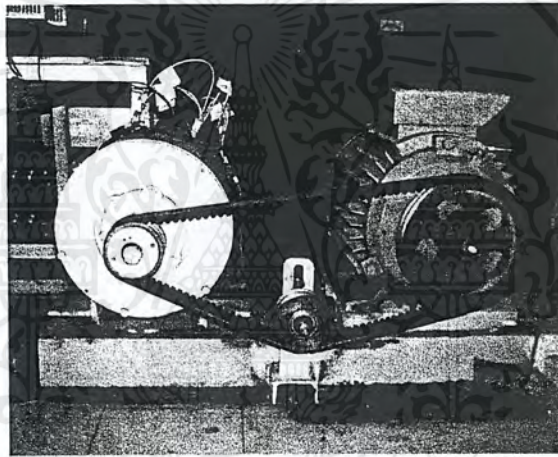
การกำหนดมาตรฐานเพื่อจำกัดขนาดของฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมให้อยู่ในขอบเขตหรือระดับที่ไม่ทำให้เกิดมลภาวะ ในระบบไฟฟ้าและไปกระทบกระเทือนต่อระบบไฟฟ้าอื่นๆควรได้รับการพิจารณาเพื่อให้ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าปราศจากมลภาวะดังกล่าวอันเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ไฟทั้งหมดร่วมกันคิดว่าที่จะปล่อยให้ฮาร์โมนิกส์เข้าไปในสายของการไฟฟ้าและไปแก้ไขที่ปลายเหตุคือระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมทุกระบบต้องมาแก้ไขกันเองหรือป้องกันกันเองโดยที่ระบบไฟฟ้าเหล่านั้น ไม่ได้เป็นผู้สร้างฮาร์โมนิกส์เข้าไปในระบบของการไฟฟ้าทำให้ค่าใช้จ่ายเพื่อการป้องกันดังกล่าวสูงมหาศาลเมื่อมองภาพรวมทั้งหมด

บทที่ 5

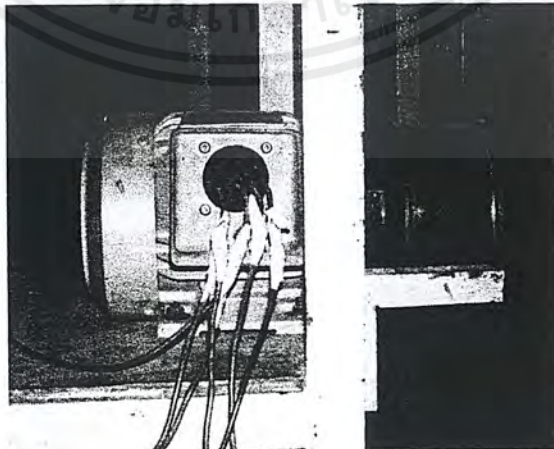
เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองในโครงงานนี้ประกอบด้วย

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส ทำหน้าที่เป็น แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์
 2. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 11 KW ทำหน้าที่เป็น เครื่องต้นกำลัง
 3. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า ทำหน้าที่ โหลดในการทดลอง
- ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2



รูปที่ 5.1 แสดงรูปเครื่องจักรเชิงโครนัสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ 11 KW



รูปที่ 5.2 แสดงรูปมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส มีลักษณะดังนี้

- โรเตอร์แบบขั้วขาลียน
- จำนวนขั้ว 16 ขั้ว
- พิกัดของขดลวดสนาม 10 A

5.2 เครื่องต้นกำลัง

คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ (MEZ) 4 โพล ซึ่งมีพิกัดดังนี้

- พิกัดกำลัง 11 KW
- พิกัดความเร็ว 1455 RPM
- พิกัดแรงดัน 380Δ 660 Y
- พิกัดกระแส 23.2 / 13.3 A
- ความถี่ 50 Hz
- จำนวนเฟส 3 เฟส
- Insulation Class F

5.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่เป็นโหลดในการทดลอง

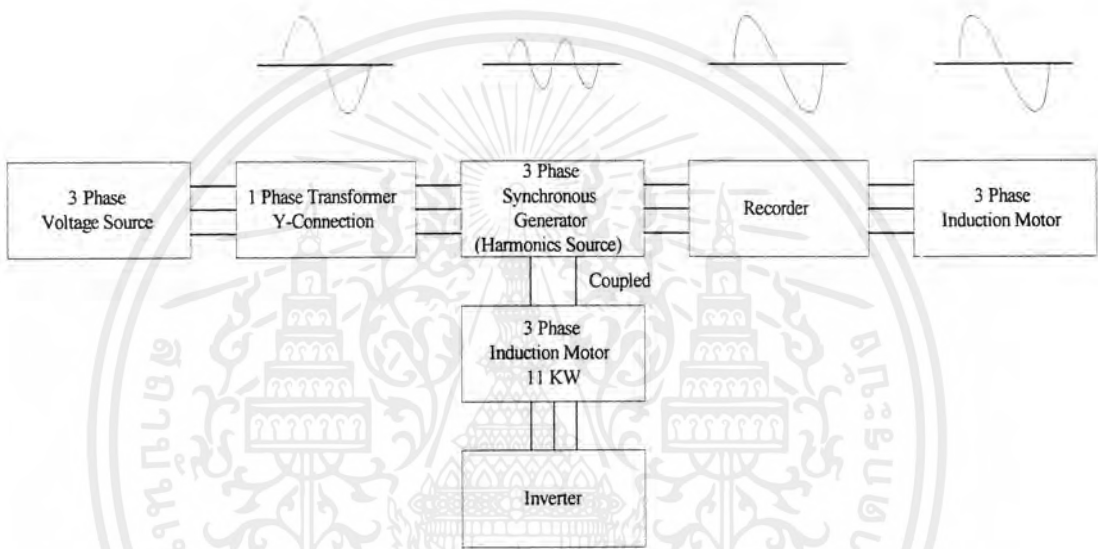
เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ Mitsubishi 4 โพล มีพิกัดดังนี้

- พิกัดกำลัง 1 Hp
- Type SF-J
- ความถี่ 50 Hz
- Frame 80
- พิกัดแรงดัน 220Δ 380 Y
- Rating CONT
- พิกัดกระแส 3.5 2 A
- Insulation class E
- พิกัดความเร็ว 1410 RPM
- Ambient Temp. 40°C

บทที่ 6

ขั้นตอนในการทดลอง

- 6.1 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
จะแสดงได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส

ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับระบบ

2. หม้อแปลง 1 เฟสต่อแบบวาย

ทำหน้าที่จำกัดแรงดันให้เท่ากับ 220V ทั้ง 3 เฟส

3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิกให้กับระบบ ซึ่งจะกำเนิดฮาร์โมนิกที่มีความถี่ 100-500 Hz

4. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 11 KW

ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

5. อินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 11 KW เพื่อใช้ในการกำเนิดฮาร์โมนิกส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัส

6. เครื่องบันทึกสัญญาณ

จะบันทึกค่าและรูปสัญญาณของทั้งแรงดันและกระแส เพื่อใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

7. มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 1 Hp

ซึ่งการทดลองในขั้นแรกจะใช้โหลดเป็นความต้านทาน ในขั้นตอนที่สองเปลี่ยนโหลดเป็นความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ และในขั้นตอนสุดท้ายจะใช้โหลดเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ

โดยในโครงการจะศึกษาถึงผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อฮาร์โมนิกส์ในแอมมของประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

6.2 ลำดับขั้นตอนในการทดลอง

สำหรับขั้นตอนการทดลองในโครงการนี้จะทำการทดลองทั้งหมด 3 ขั้นตอนคือ

1. ทดสอบหาค่าแรงกเทอริสติกของเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส

1. โหลดเป็นความต้านทาน
2. โหลดเป็นความต้านทานและความเหนี่ยวนำ
3. โหลดเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ

6.2.1 การทดสอบหาค่าแรงกเทอริสติกของเครื่องกำเนิดเชิงโรนัส

1. การทดสอบเปิดวงจร (Open-Circuit) ที่ความถี่ตั้งแต่ 50 – 500 Hz
2. ทำการพล็อตกราฟระหว่าง ค่า V_o กับ I_f ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ
3. การทดสอบลัดวงจร (Short-Circuit) ที่ความถี่ตั้งแต่ 50 – 500 Hz
4. ทำการพล็อตกราฟระหว่าง ค่า I_{sc} กับ I_f ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ
5. จากกราฟเปิดวงจรและลัดวงจร คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสได้

6.2.2 กรณีที่โหลดเป็นความต้านทาน

1. ใช้โหลดไฟ 100W จำนวน 12 หลอดเป็น โหลดที่ใช้ในการทดลอง
2. ปรับค่าแรงดันของแหล่งจ่ายให้เท่ากับ 220V เท่ากันทั้ง 3 เฟส
3. ทำการรวมฮาร์โมนิกส์ลำดับต่าง ๆ ที่กำเนิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสที่ 5% .

10% , 15% และ 20% เทียบกับค่าที่ความถี่มาตรฐานเข้าไปในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการบันทึกค่าและสัญญาณของแรงดันและกระแส โดยใช้เครื่องบันทึกสัญญาณ (Recorder) ในการบันทึก
5. ทำการสังเกตผลกระทบต่อโหลด
6. ทำการวิเคราะห์ค่าแรงดัน และกระแส ที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่าง ๆ

6.2.3 กรณีที่โหลดเป็นความต้านทานและความเหนี่ยวนำ

โหลดเหมือนกับขั้นตอนแรกและใส่บัลลาสต์เพื่อเป็นอุปกรณ์ให้ผลของความเหนี่ยวนำ ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับขั้นตอนแรก

6.2.4 กรณีที่โหลดเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1. ปรับค่าแรงดันของแหล่งจ่ายให้เท่ากับ 220V เท่ากันทั้ง 3 เฟส
2. ทำการรวมฮาร์โมนิกส์ลำดับต่าง ๆ ที่กำเนิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสที่ 5% , 10% , 15% และ 20% เทียบกับค่าที่ความถี่มูลฐานเข้าไปในระบบ
3. ทำการใส่โหลด (ตุ้มน้ำหนัก) ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ
4. บันทึกค่าและสัญญาณของแรงดันและกระแส โดยใช้เครื่องบันทึกสัญญาณและค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
5. สังเกตผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ลำดับต่าง ๆ ที่มีผลต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ
6. ทำการวิเคราะห์ค่าแรงดัน และกระแส ที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่าง ๆ
7. ทำการวิเคราะห์ถึงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่าง ๆ

สำหรับในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการทดลองของโครงการ และเป็นจุดมุ่งหมายของการศึกษาในโครงการนี้

6.3 ข้อควรระวังในการทดลอง

1. การปรับแรงดันต้องปรับค่าแรงดันทั้ง 3 เฟสให้เท่ากัน เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาจากแรงดันที่ไม่สมดุล (Unbalance Voltage)
2. สำหรับการทดลองในขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่ 2 ต้องทำให้โหลดที่ใช้ในการทดลองเท่ากันทั้ง 3 เฟส

3. การปรับค่าของฮาร์โมนิกส์ที่กำเนิดจากเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีส ควรจะค่อย ๆ ปรับค่า เพราะที่ฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับสูง ๆ ในการปรับค่าแต่ละครั้งจะทำให้ค่าของแรงดันเหนี่ยวนำของเครื่องกำเนิดเชิงโรตารีสเพิ่มขึ้นสูงมาก ซึ่งจะทำให้โหลดที่ใช้ในการทดลองเสียหายได้



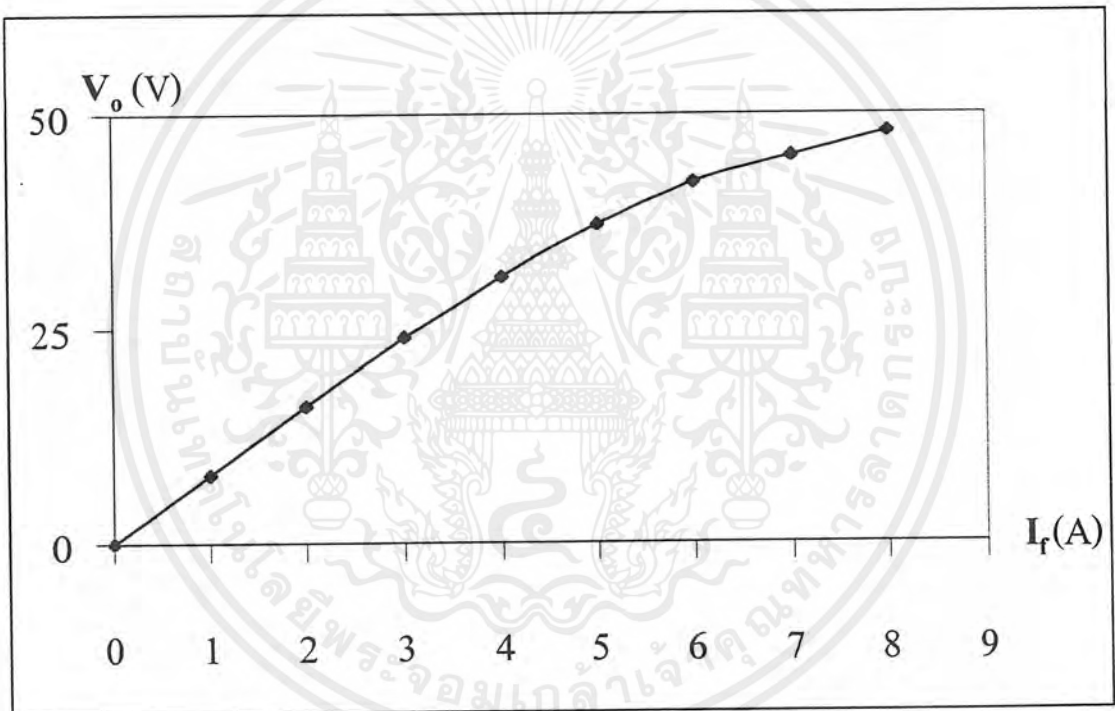
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การทดลองหาค่าแรงแทกเทอริสติกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

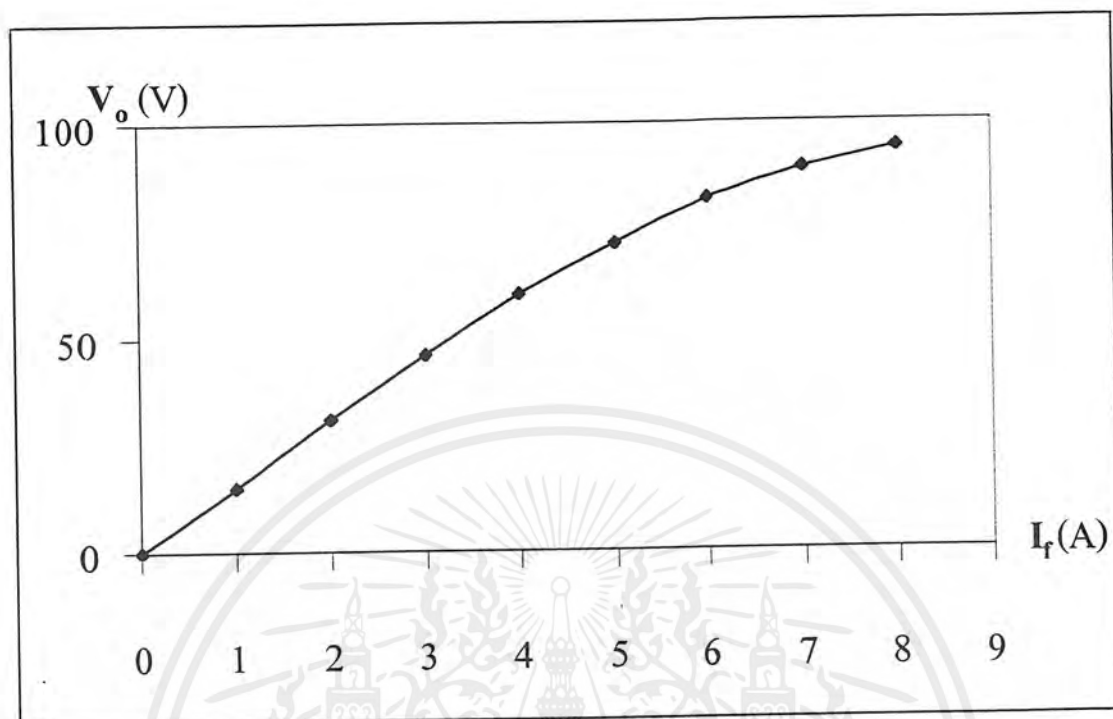
ในขั้นตอนการทดลองในบทนี้ จะทำการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร (Open- and Short-Circuit Test)

7.1 การทดสอบเปิดวงจร (Open-Circuit Test)

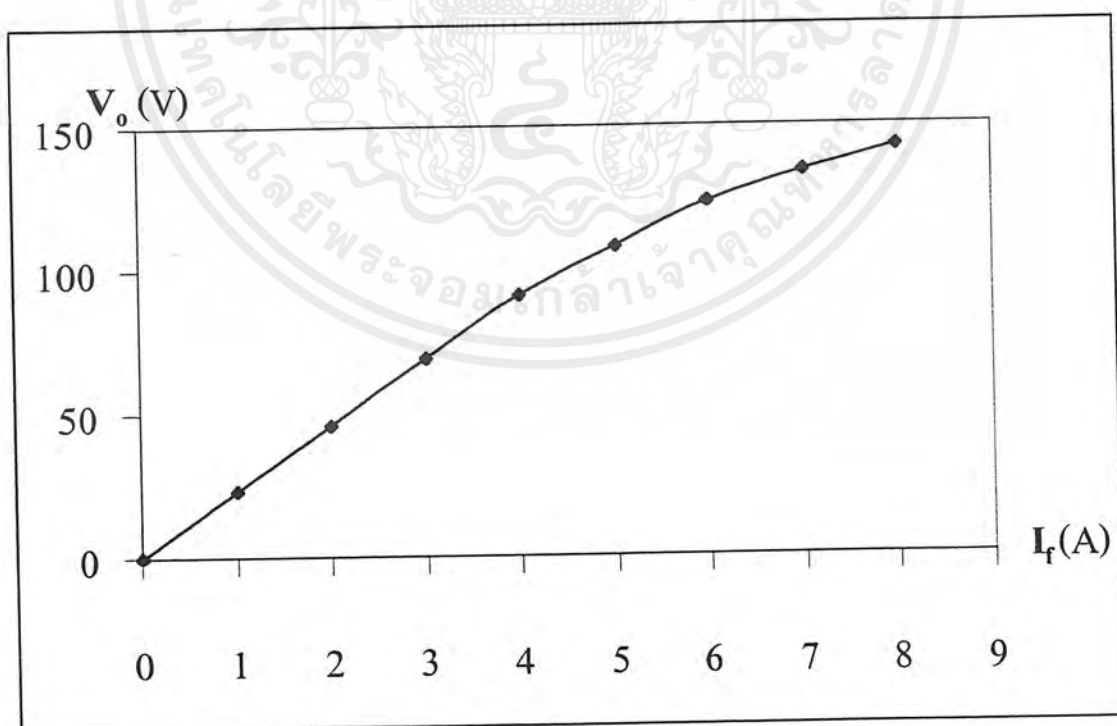


รูปที่ 7.1 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 50 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

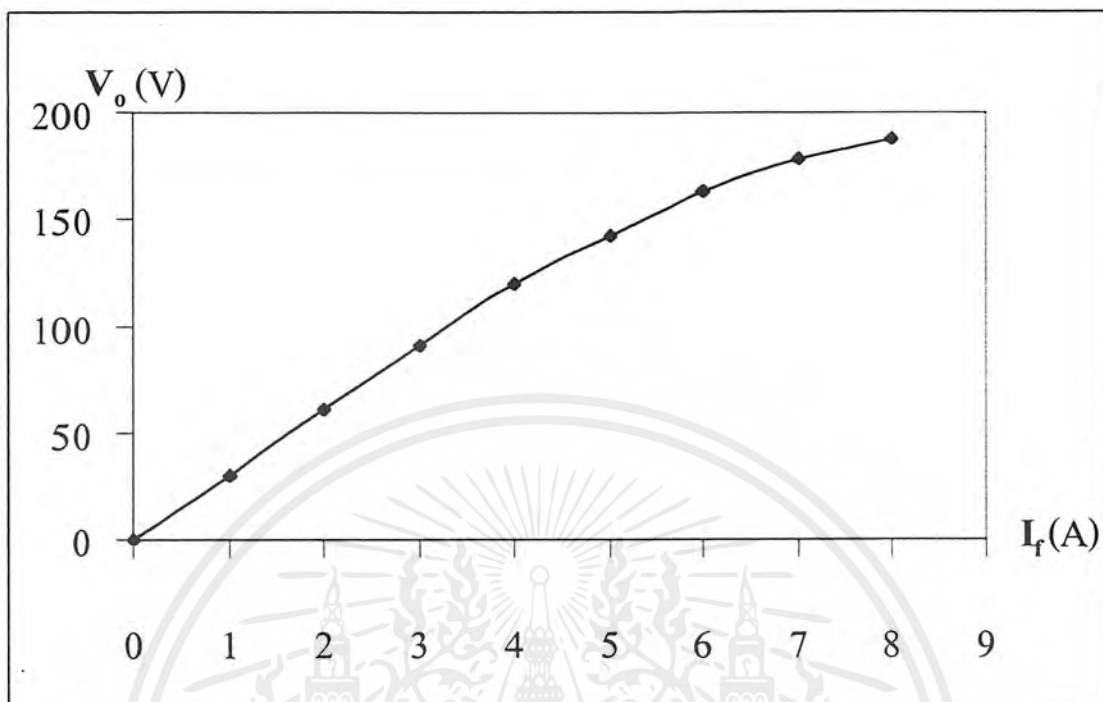


รูปที่ 7.2 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 100 Hz

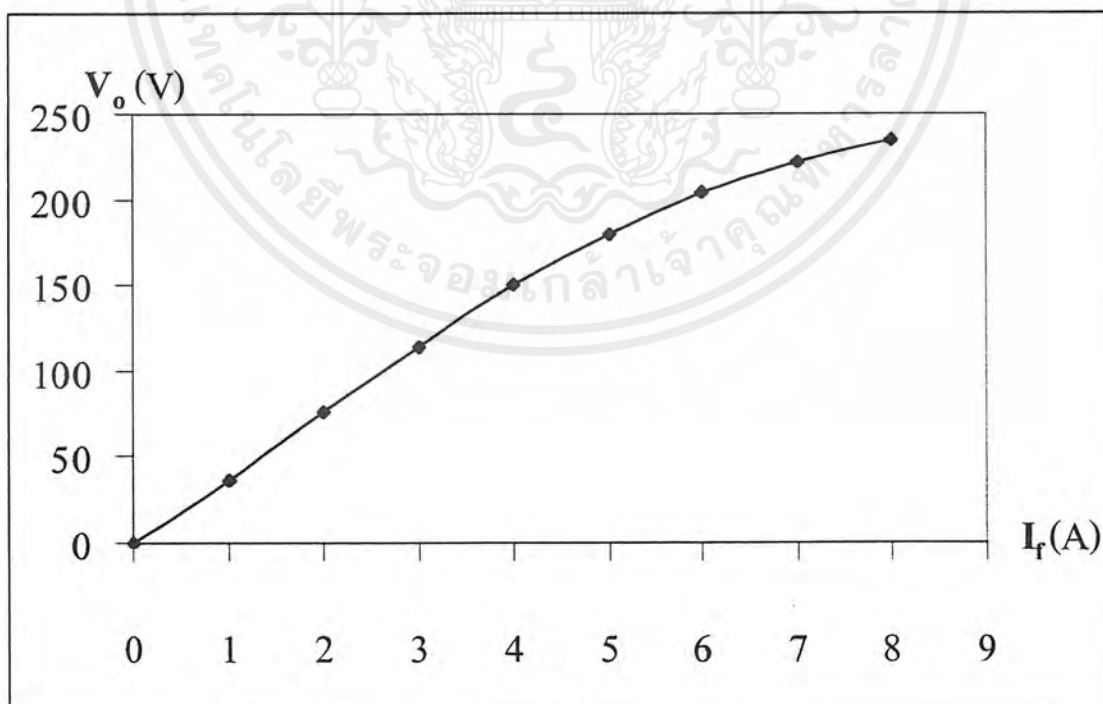


รูปที่ 7.3 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 150 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

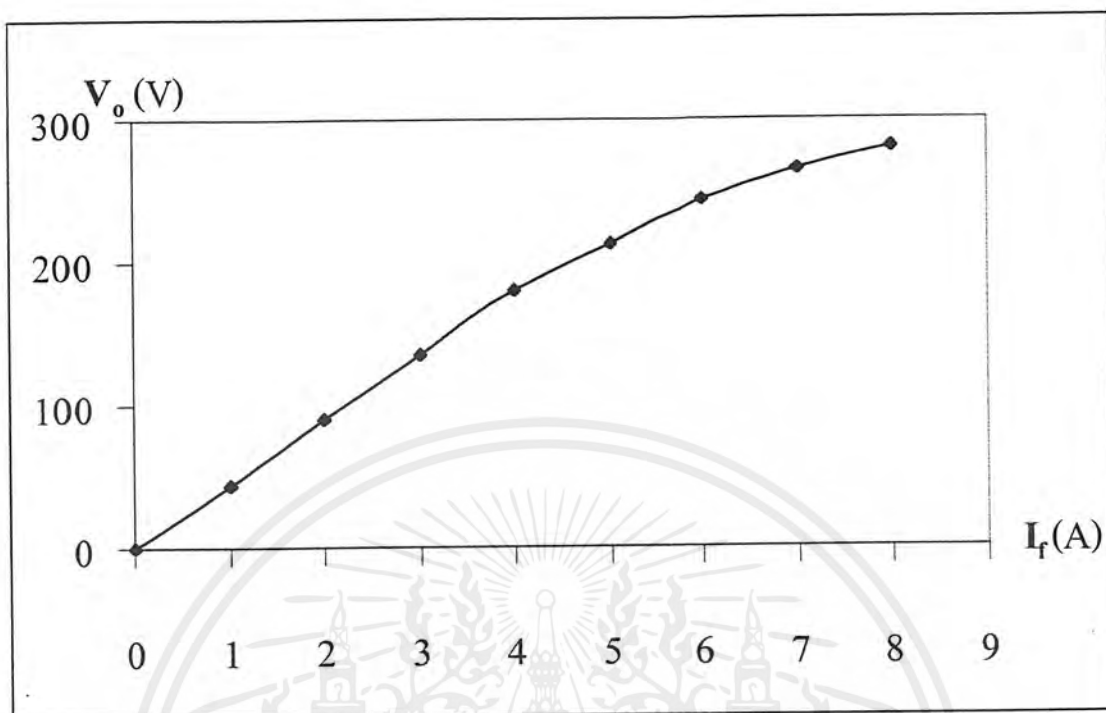


รูปที่ 7.4 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 200 Hz

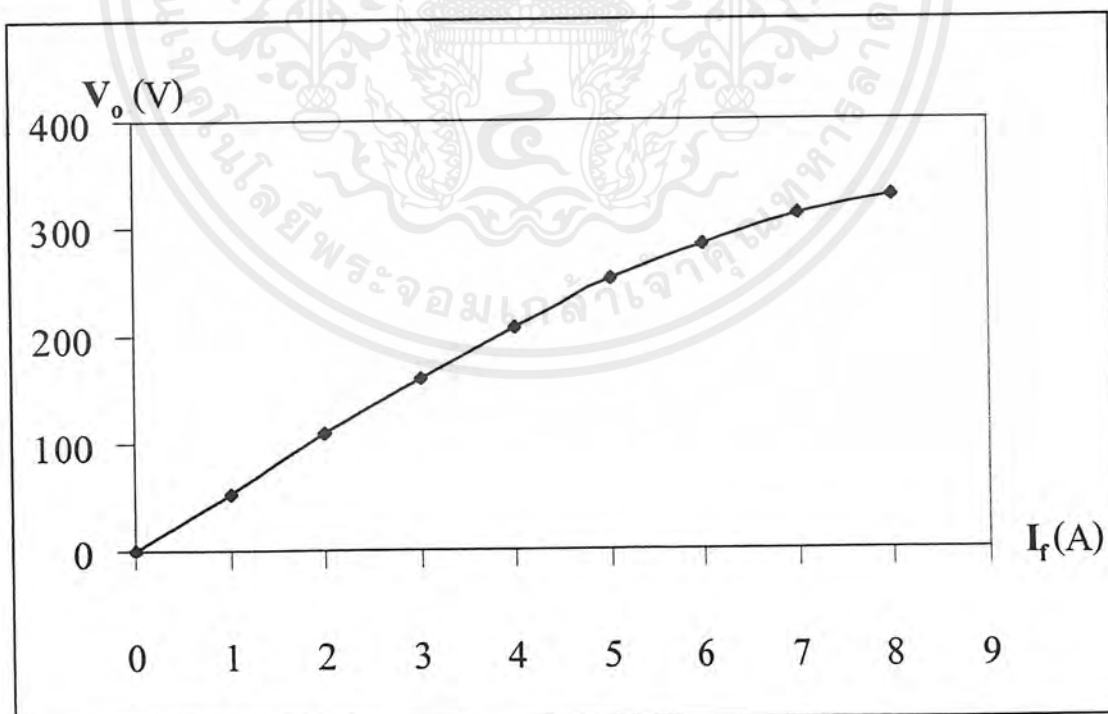


รูปที่ 7.5 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 250 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

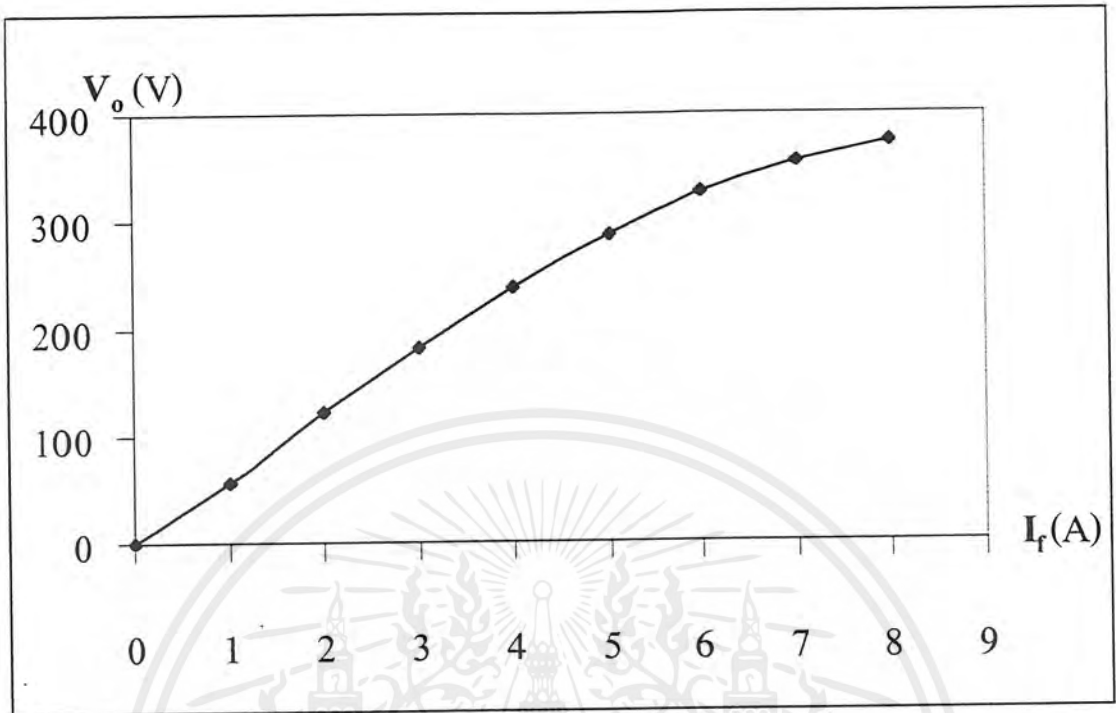


รูปที่ 7.6 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 300 Hz

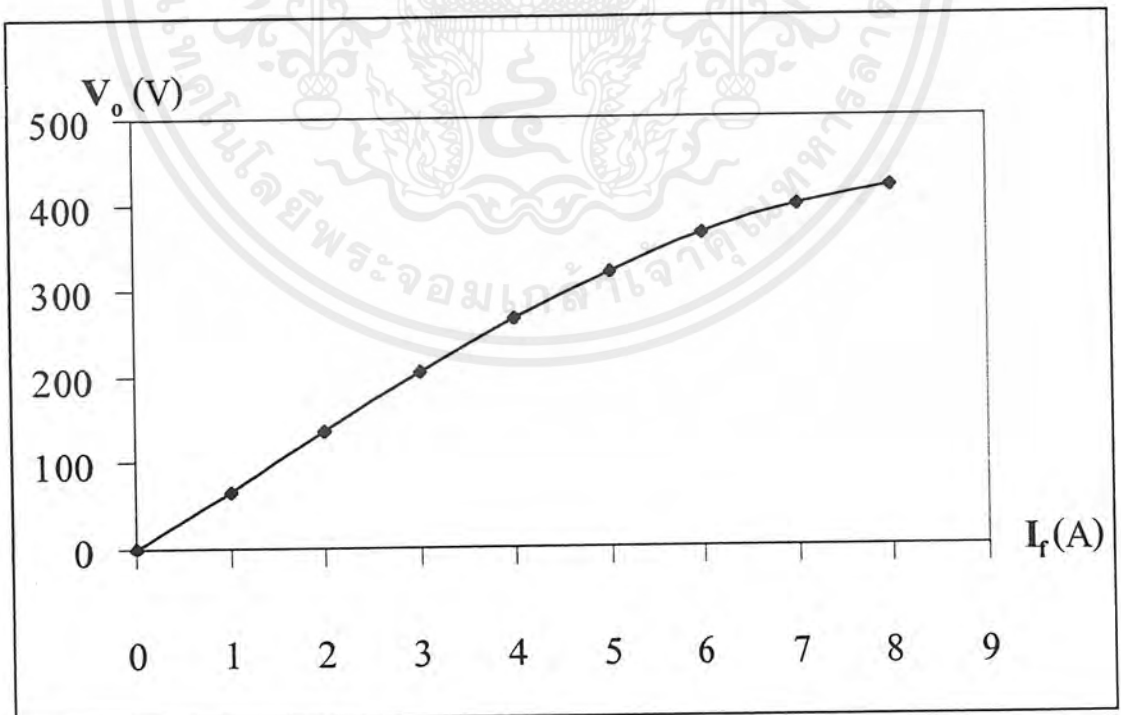


รูปที่ 7.7 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 350 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

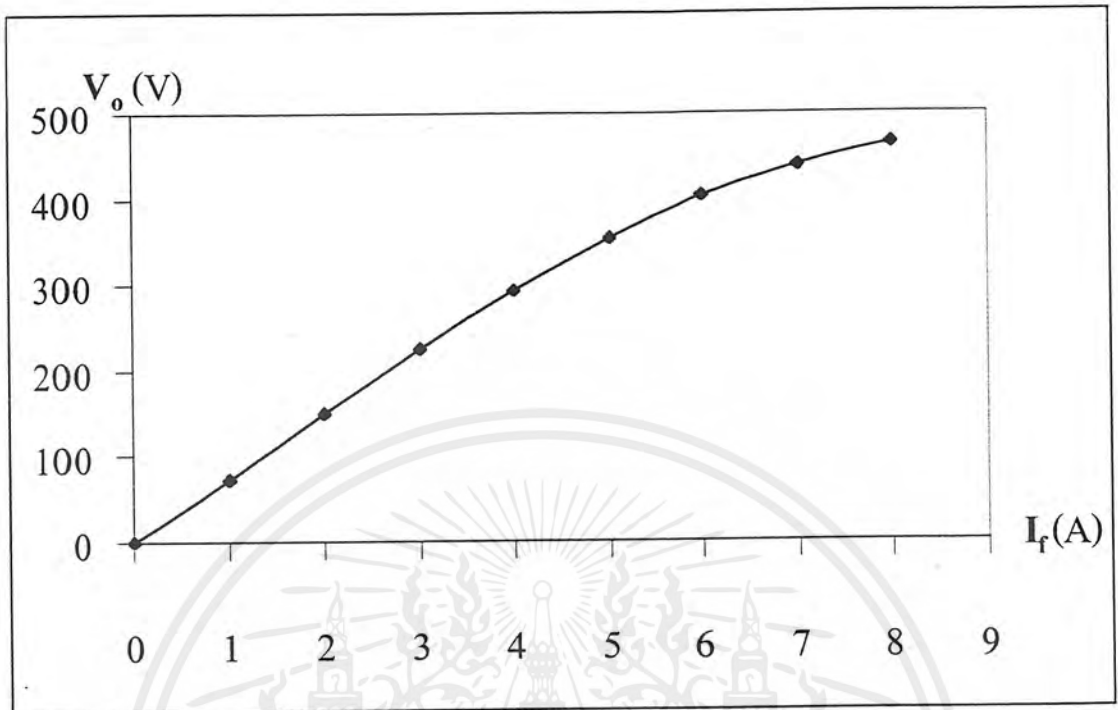


รูปที่ 7.8 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 400 Hz



รูปที่ 7.9 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 450 Hz

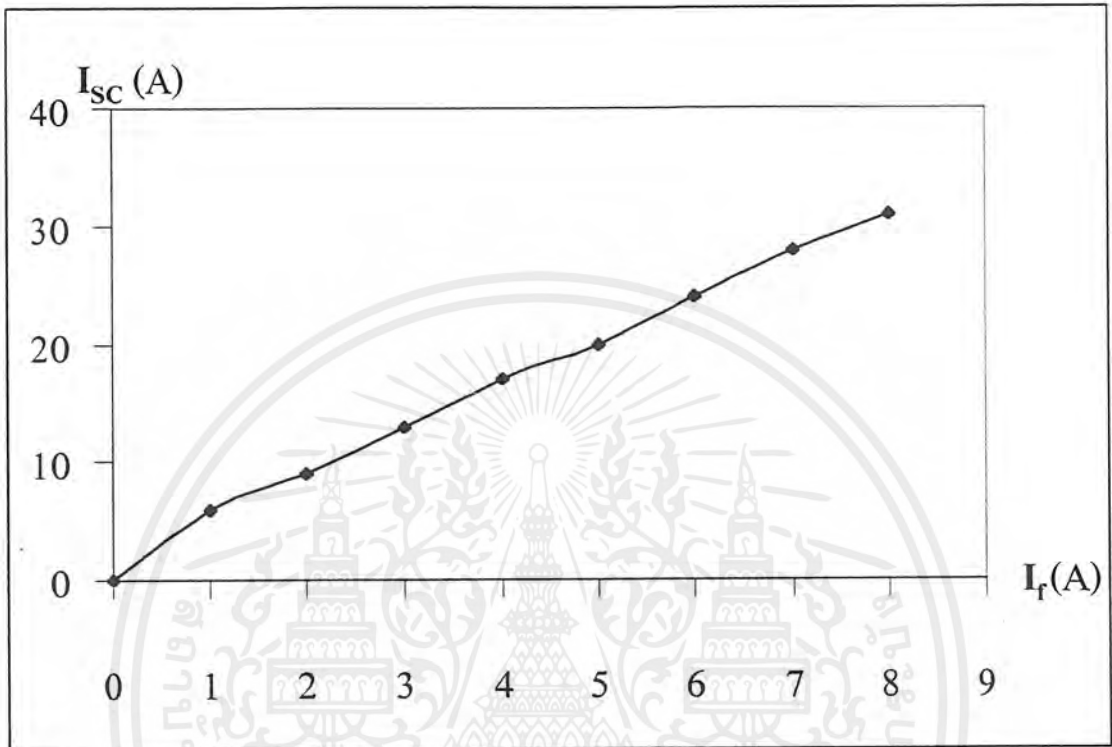
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.10 กราฟการเปิดวงจรที่ความถี่ 500 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 การทดสอบลัดวงจร (Short-Circuit Test)



รูปที่ 7.11 กราฟการลัดวงจรที่ความถี่ 50 – 500 Hz

7.3 ค่าอิมพีแดนซ์

จากการทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจร สามารถทำให้ทราบถึงค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสได้ดังนี้

ความถี่ (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
ค่าอิมพีแดนซ์	1.75	3.42	5.13	6.79	8.50	10.13	11.79	13.58	15.25	16.79

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดเชิงโรนัสที่ความถี่ 50-500 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของเครื่องกำเนิดเชิงโรตอร์ คือ การทดสอบเปิดวงจร และลัดวงจร จากนั้นทำการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ จะพบว่า ความถี่ที่เพิ่มขึ้น (ลำดับของฮาร์โมนิกที่สูงขึ้น) จะทำให้ค่าของอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อโหลดความต้านทาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของแรงดันและกระแส ในขณะที่มีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ถึง 10 เข้าไปในระบบ โดยที่โหลดของระบบคือ หลอดไฟ 100W

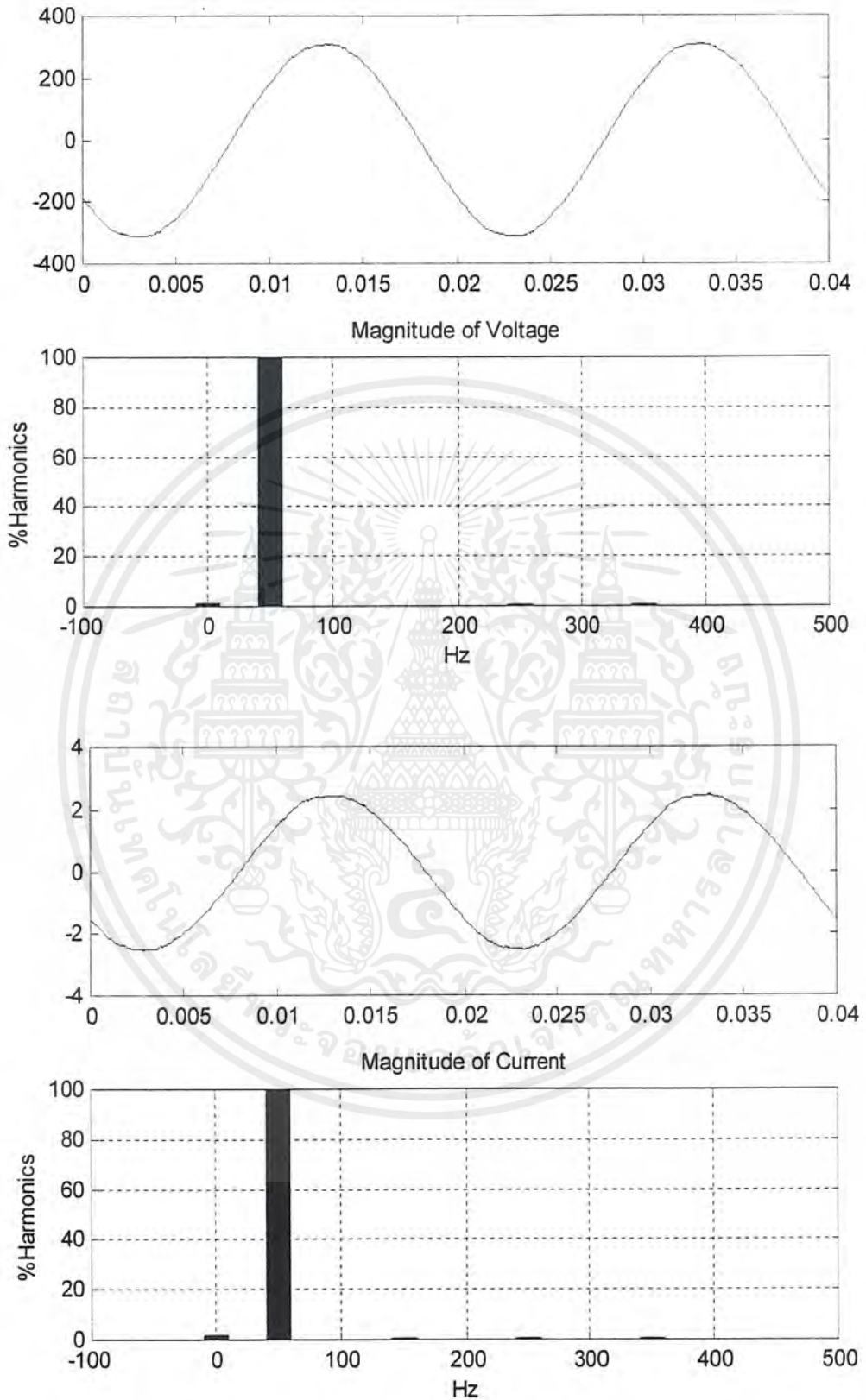
8.1 การแสดงผลของสัญญาณของแรงดันและกระแส

รูปที่ 8.1 แสดงผลขณะที่ไม่มีฮาร์โมนิกส์เข้าไปในระบบ

รูปที่ 8.2 ถึง 8.5 แสดงผล ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5% ถึง 20% ตามลำดับ

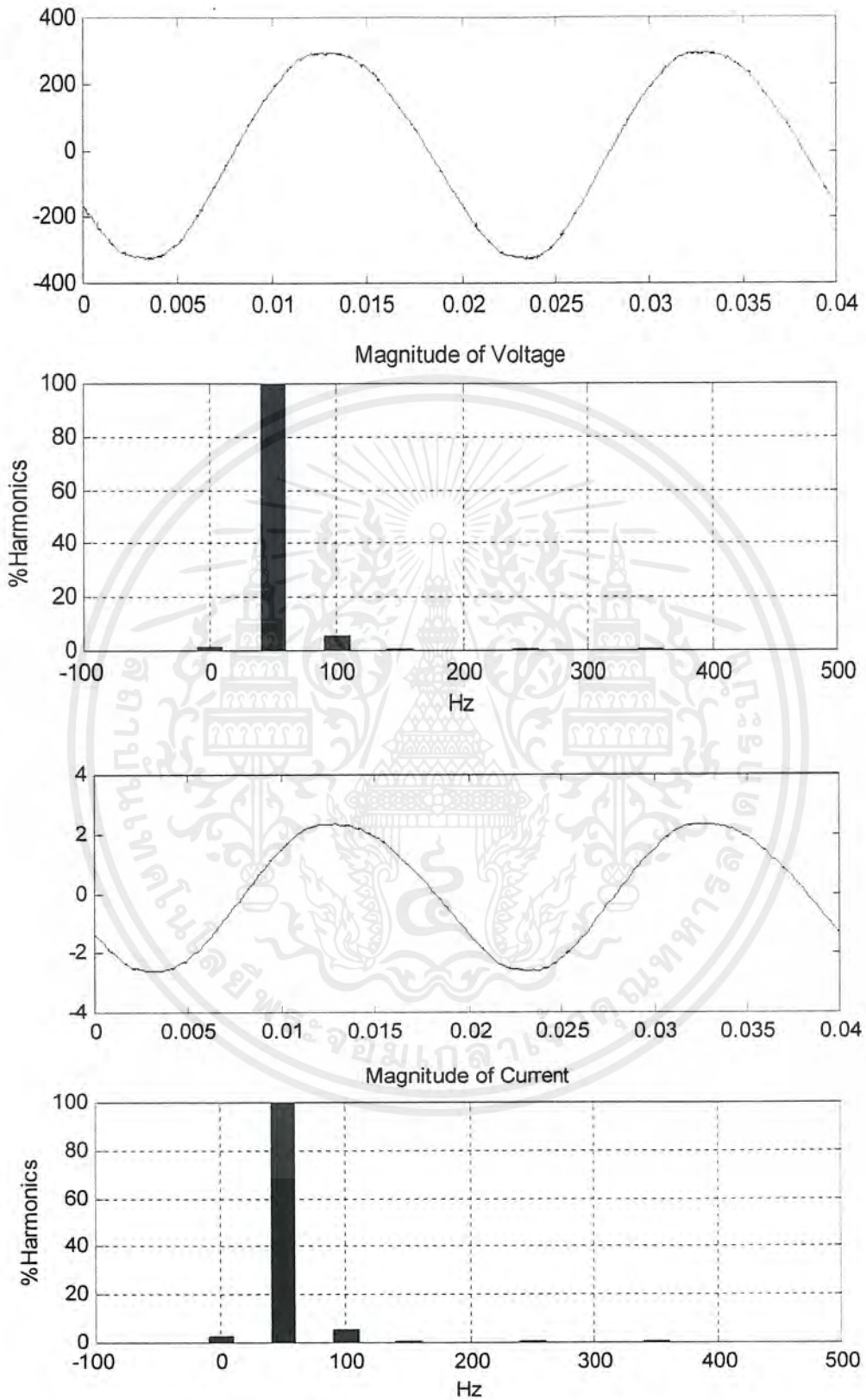
รูปที่ 8.6 ถึง 8.13 แสดงผล ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ถึง 10 ที่ 20% ตามลำดับ

สำหรับผลของแรงดันและกระแส ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ถึง 10 ที่ 5% ถึง 15% จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลของแรงดันและกระแส ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5% ถึง 15%



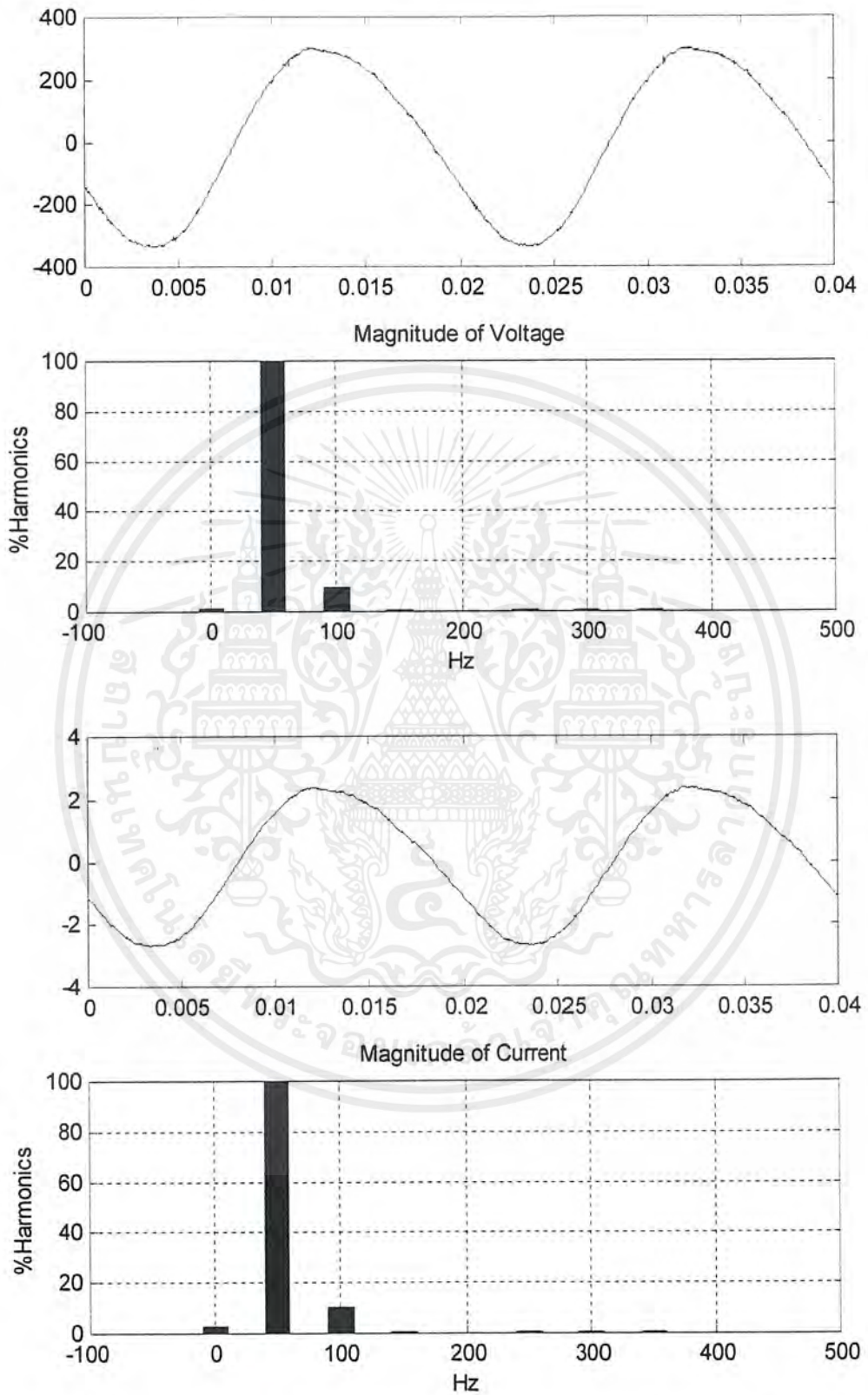
รูปที่ 8.1 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน ที่ความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



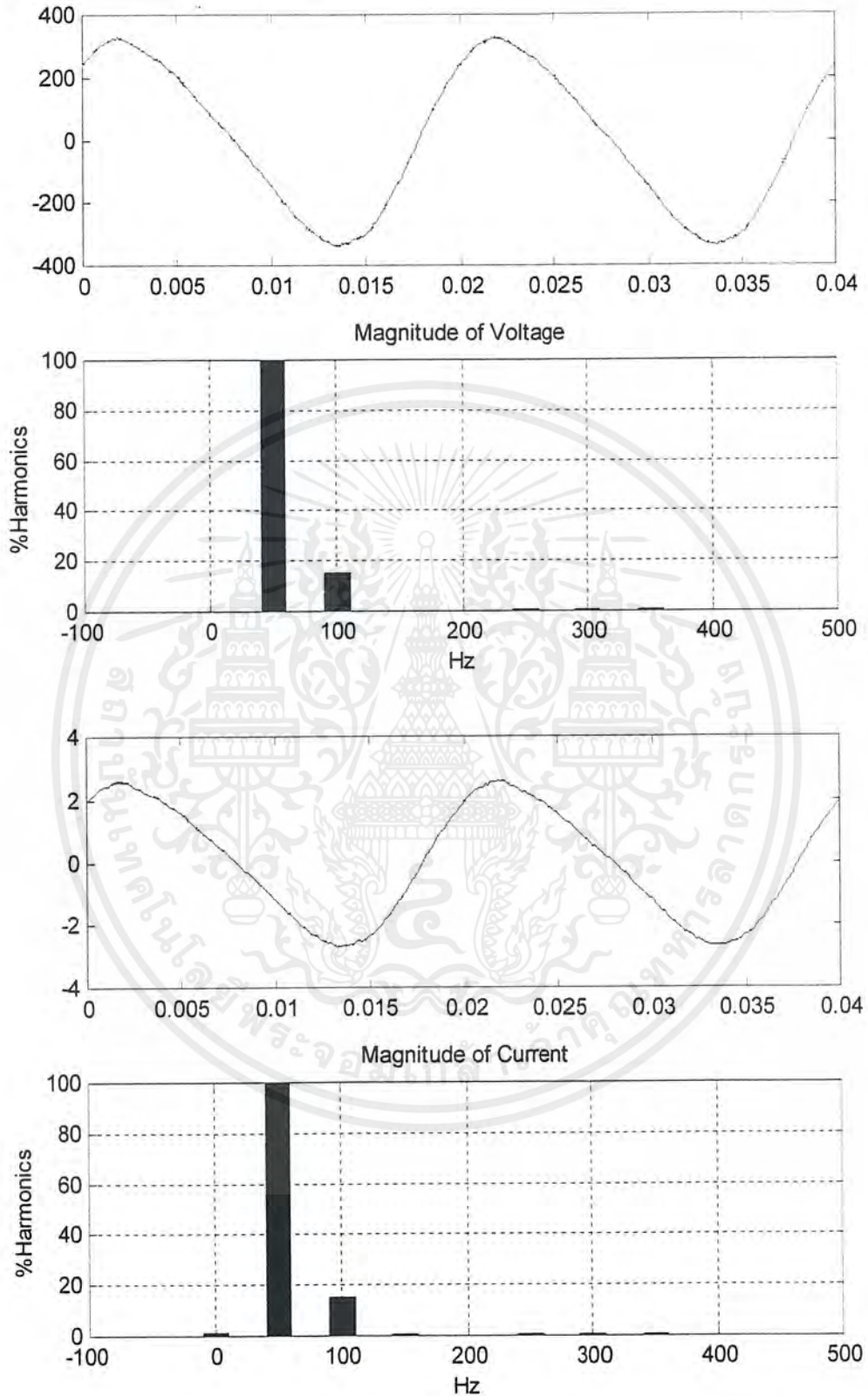
รูปที่ 8.2 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
 ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



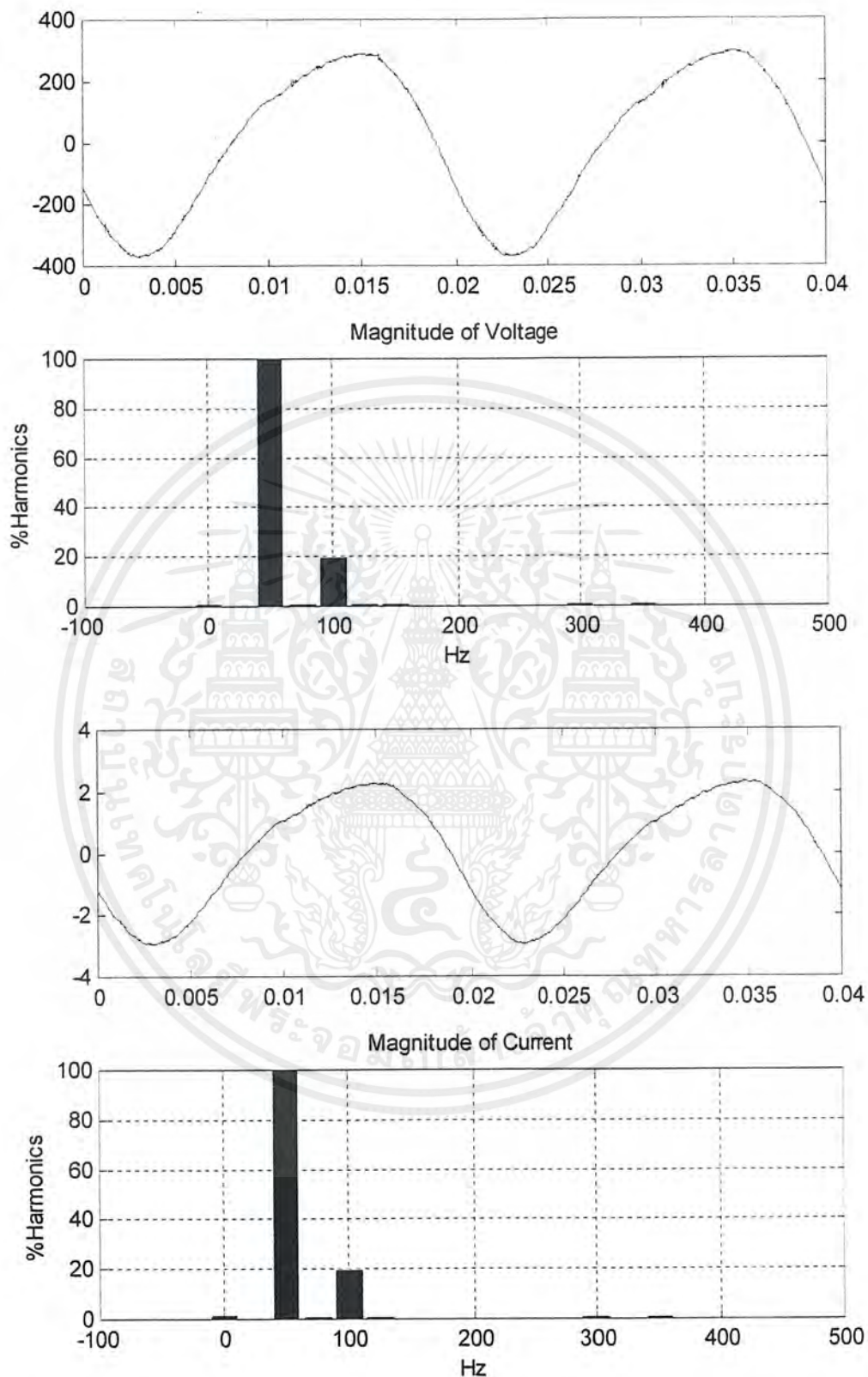
รูปที่ 8.3 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



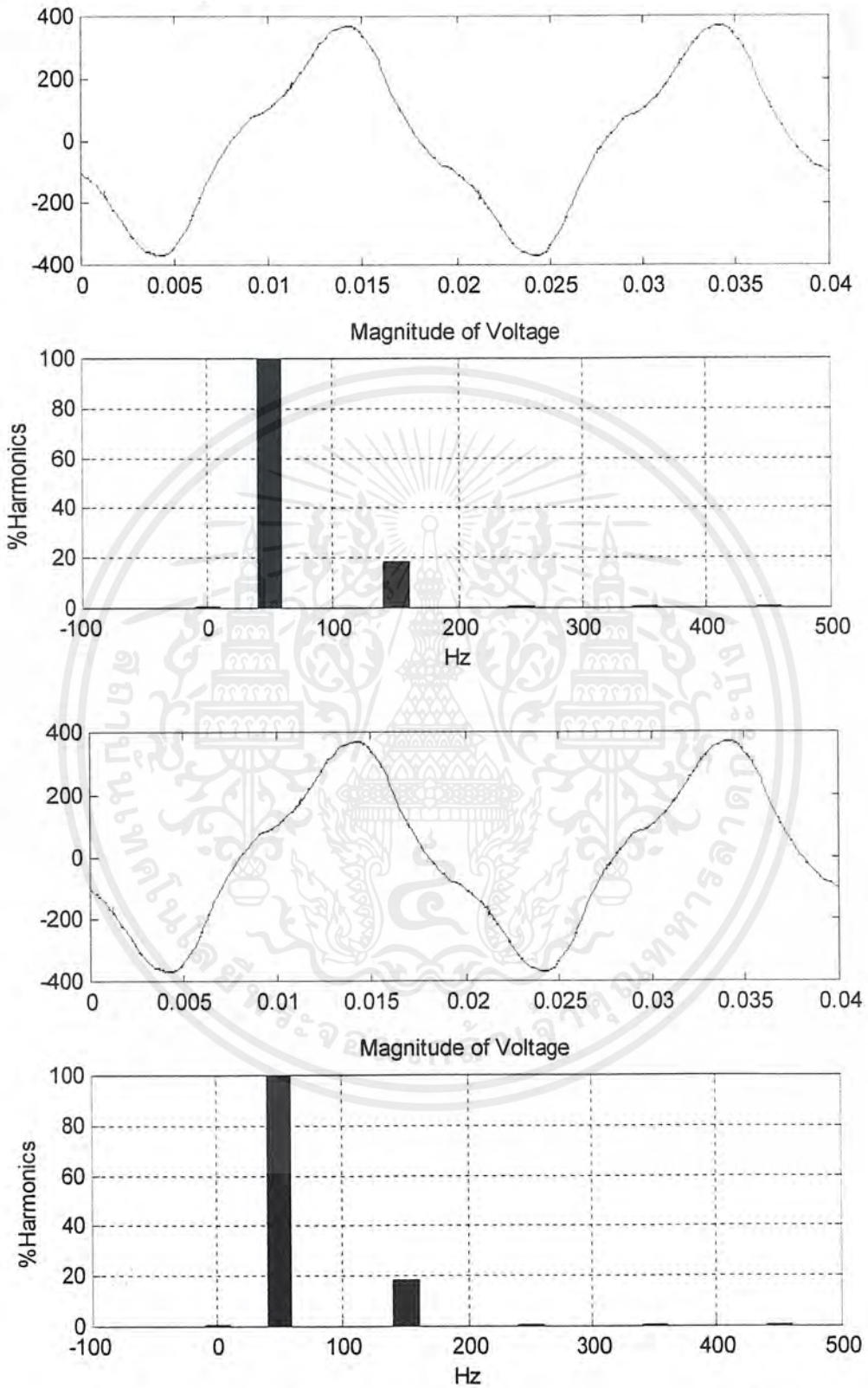
รูปที่ 8.4 สัญญาณและฮาร์โมนิกซ์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกซ์ลำดับที่ 2 ที่ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



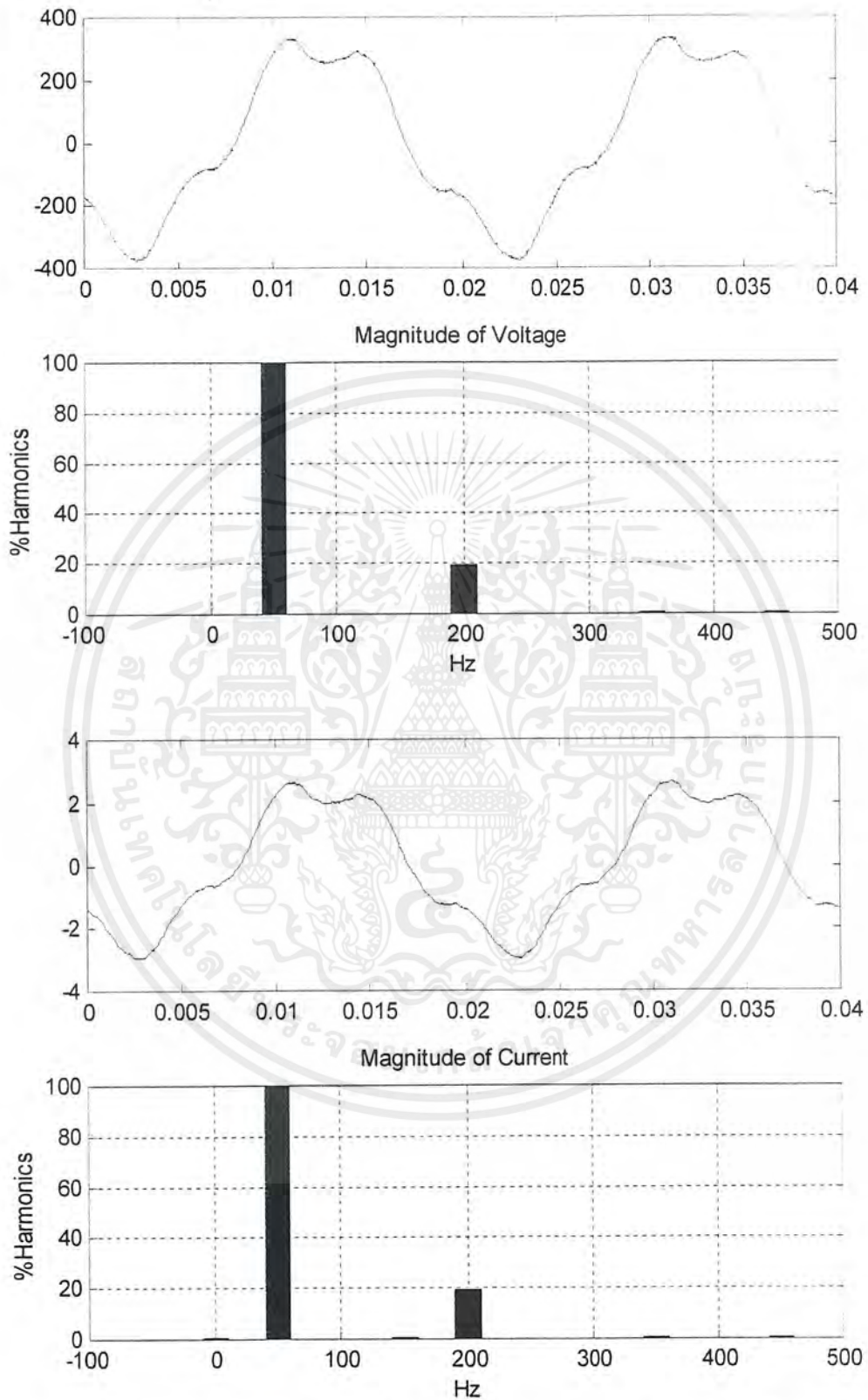
รูปที่ 8.5 สัญญาณและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกลำดับที่ 2 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



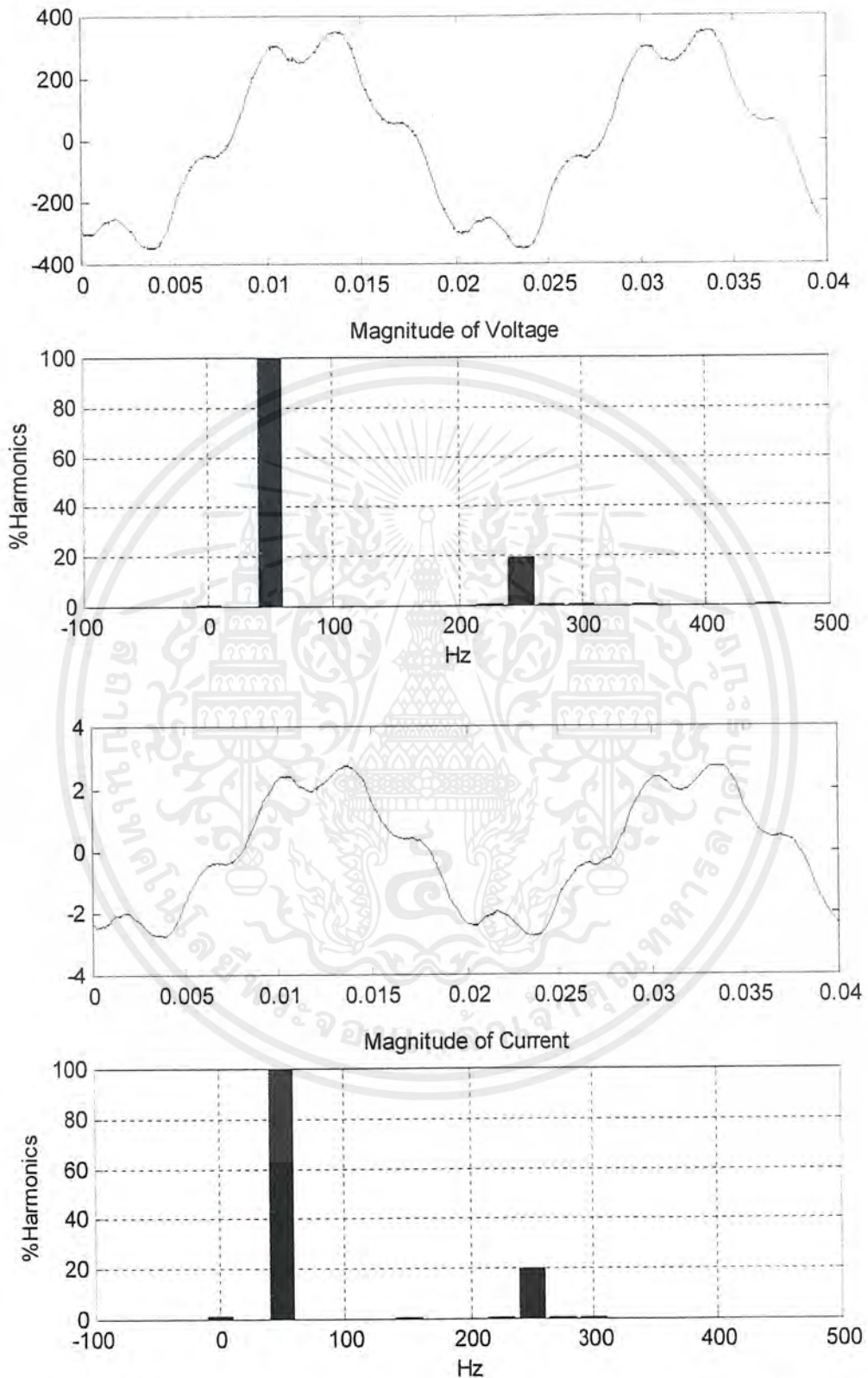
รูปที่ 8.6 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



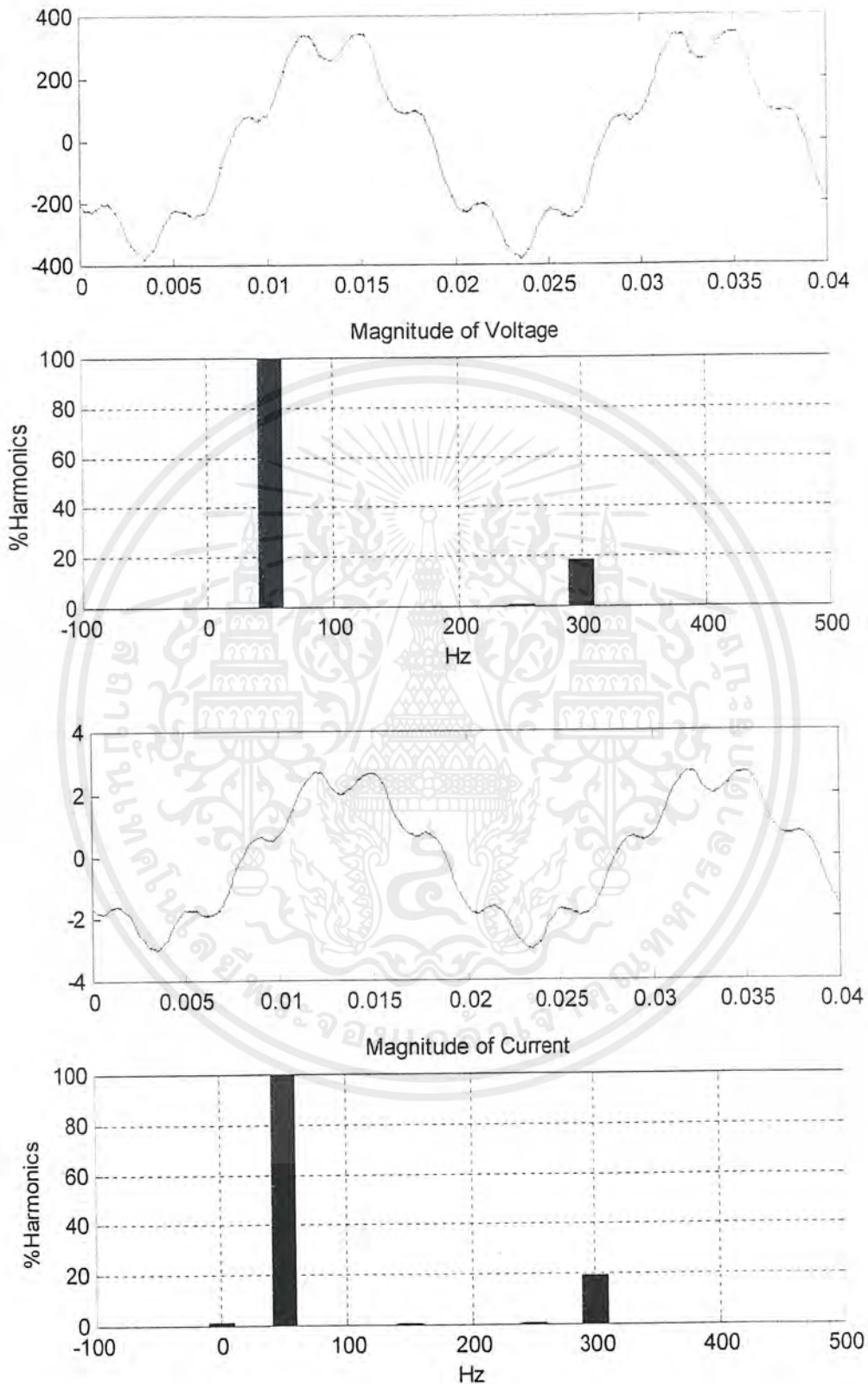
รูปที่ 8.7 สัญญาณและฮาร์โมนิกซ์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกซ์ลำดับที่ 4 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



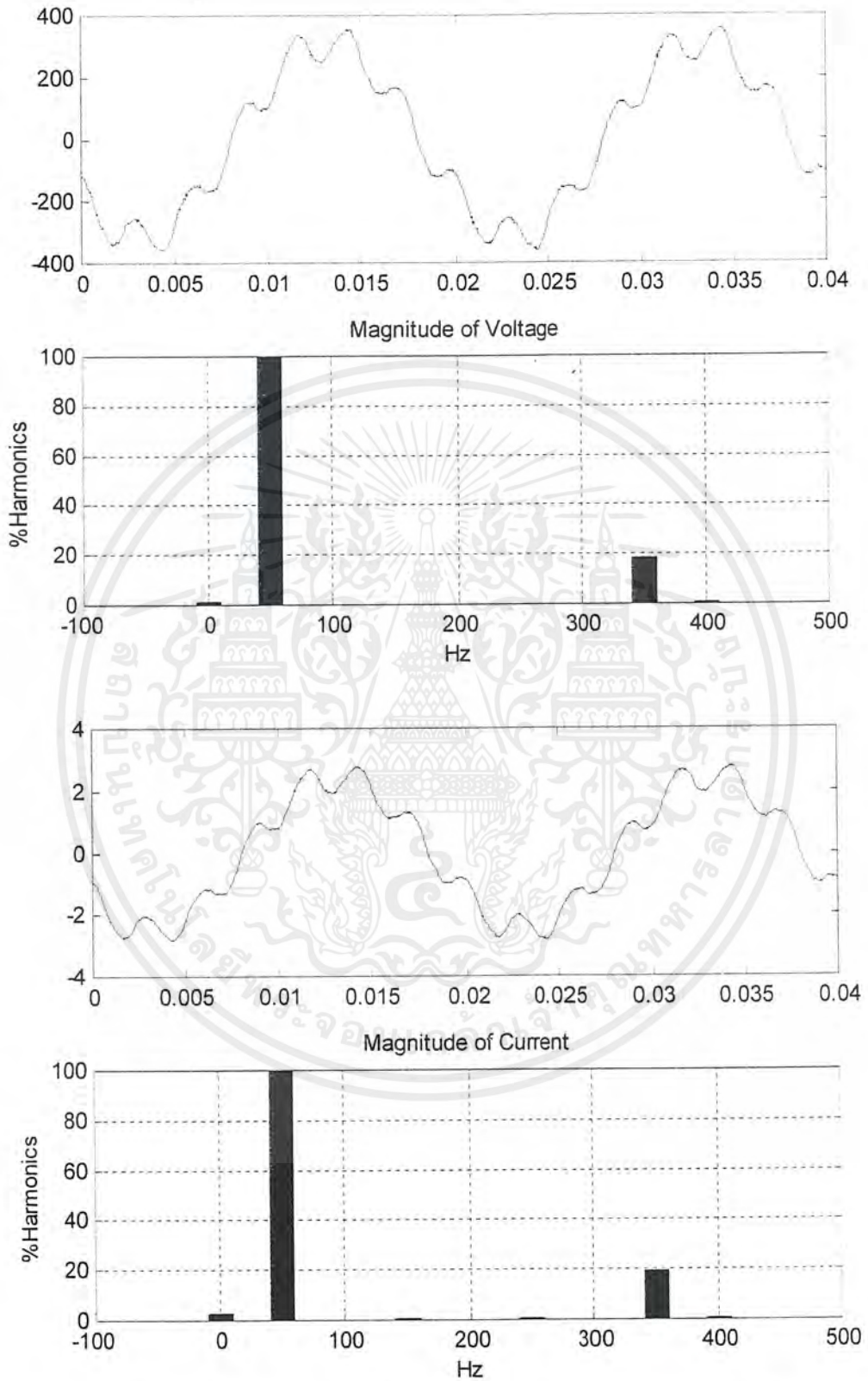
รูปที่ 8.8 สัญญาณและฮาร์โมนิกซ์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกซ์ลำดับที่ 5 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



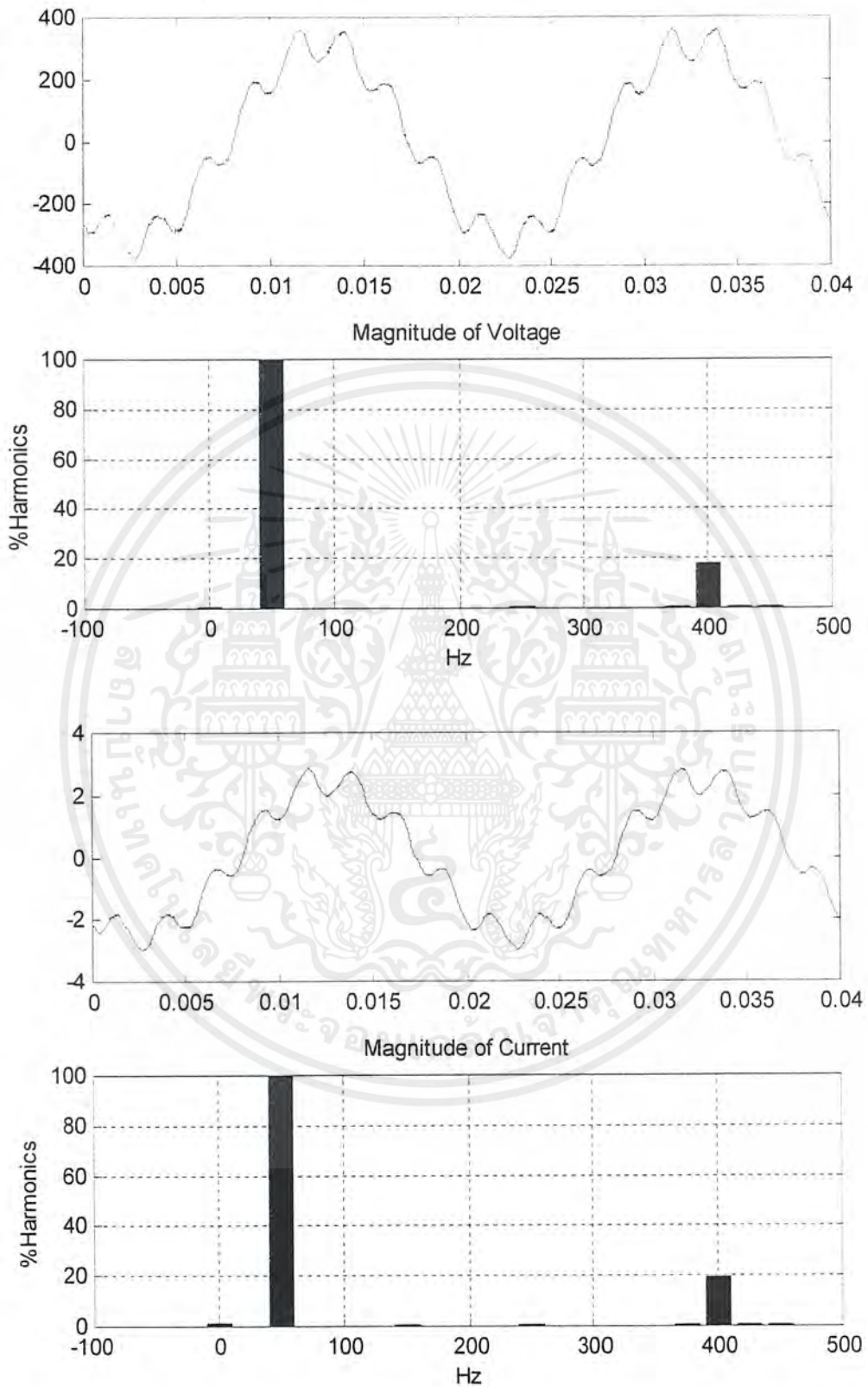
รูปที่ 8.9 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
 ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 6 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



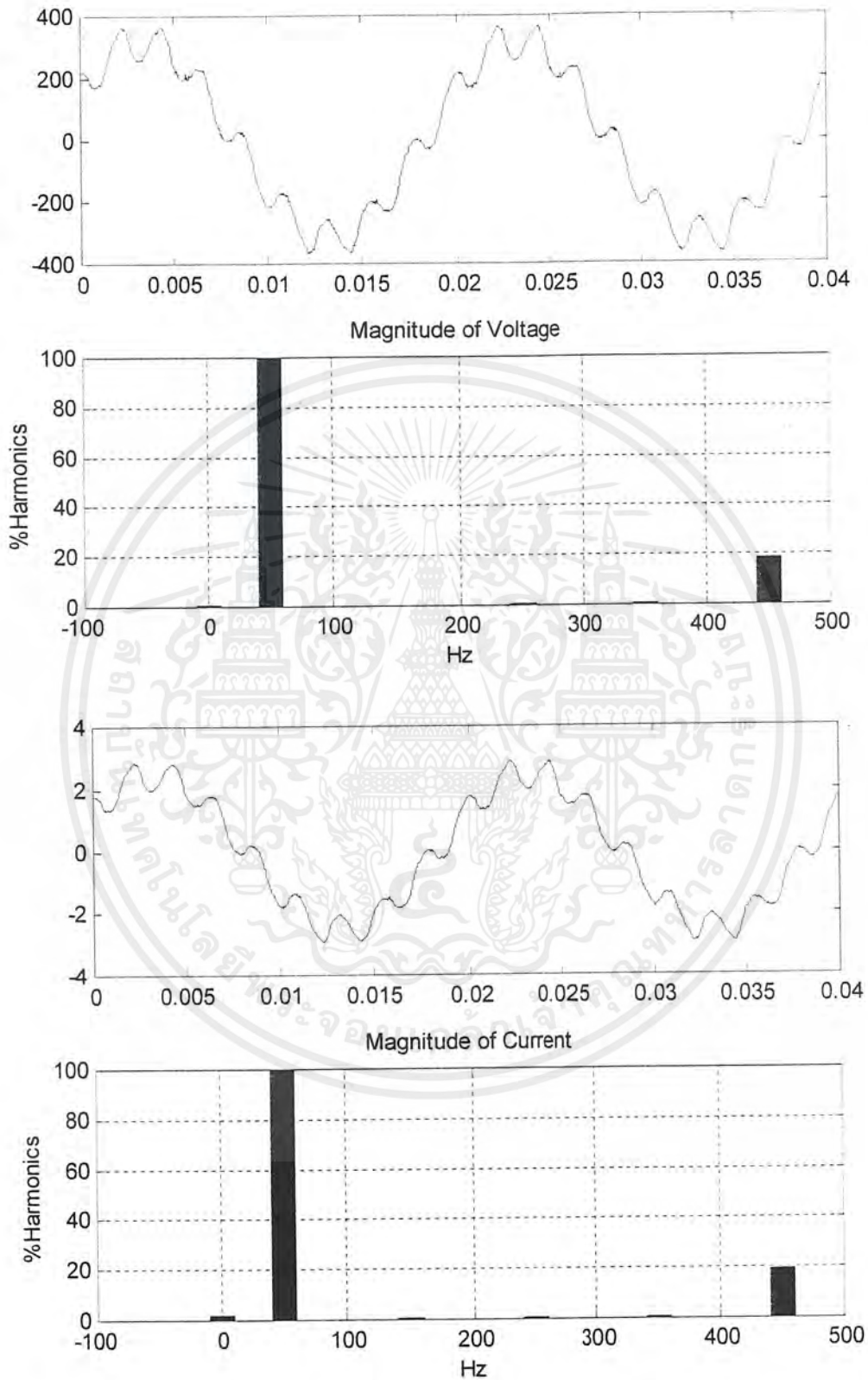
รูปที่ 8.10 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
 ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 7 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



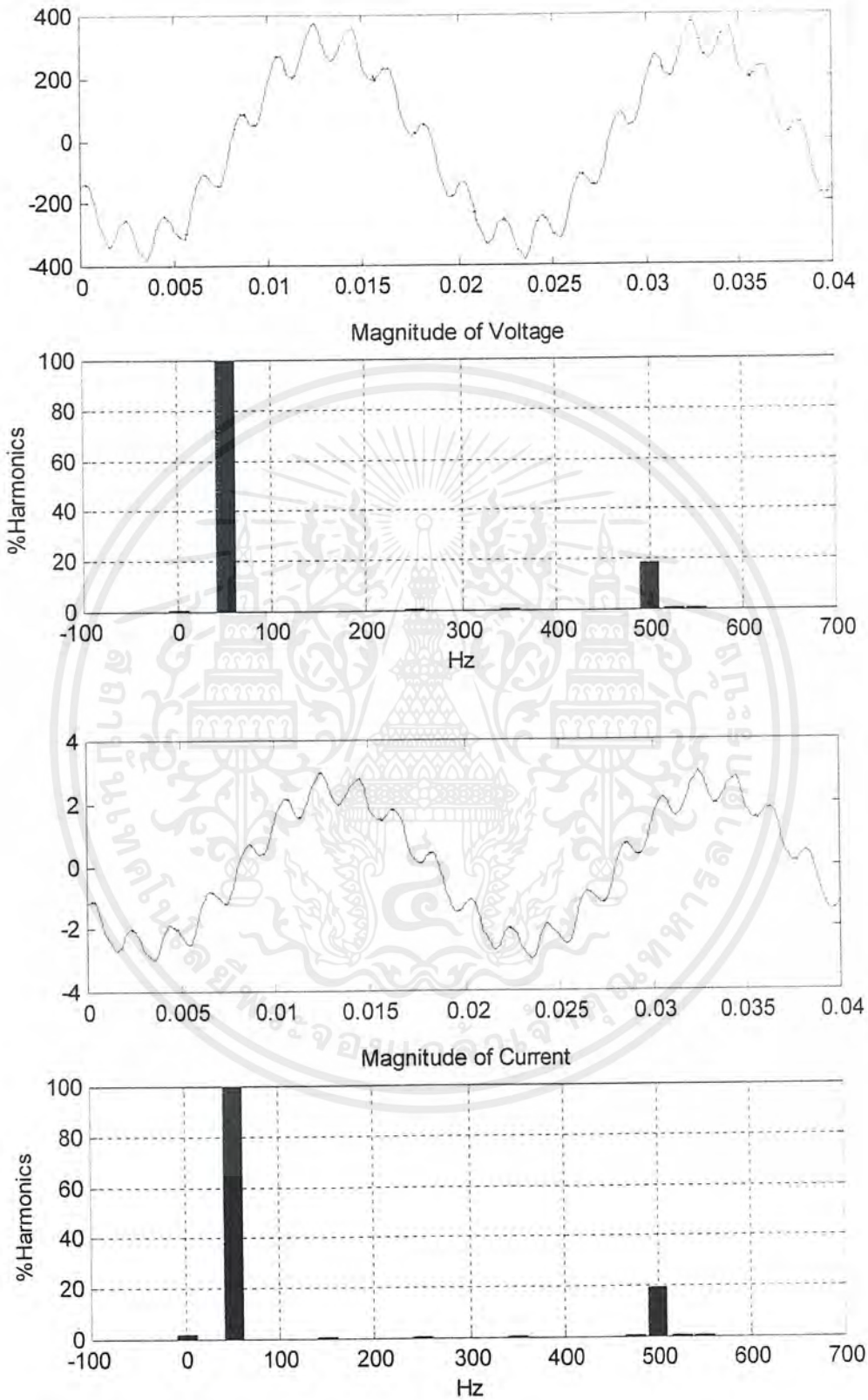
รูปที่ 8.11 สัญญาณและฮาร์โมนิกของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
ขณะมีการบิดฮาร์โมนิกลำดับที่ 8 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.12 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 9 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.13 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน
 ขณะมีการบิดฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 10 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 สรุปผลการทดลอง

ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานจะพบว่า

1. เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์เพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันและกระแสจะเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน อาทิเช่น รูปที่ 8-5 มีฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 20% ในระบบ แรงดันและกระแสที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 มีค่าเป็น 20% ของแรงดันและกระแสที่ความถี่มูลฐาน

2. ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันลำดับต่าง ๆ จะมีผลต่อฮาร์โมนิกส์ของกระแสเฉพาะที่ลำดับนั้น อาทิเช่น รูปที่ 8-6 มีฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่ 20% ในระบบ ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ของกระแสลำดับที่ 3 ปริมาณ 20% เช่นกัน



บทที่ 9

ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อโหลดความต้านทานและความเหนี่ยวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของแรงดันและกระแส ในขณะที่มีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2-10 เข้าไปในระบบ โดยที่โหลดของระบบคือ หลอดไฟ 100W และ บัลลาสต์ ต่อขนานกันทั้ง 3 เฟส

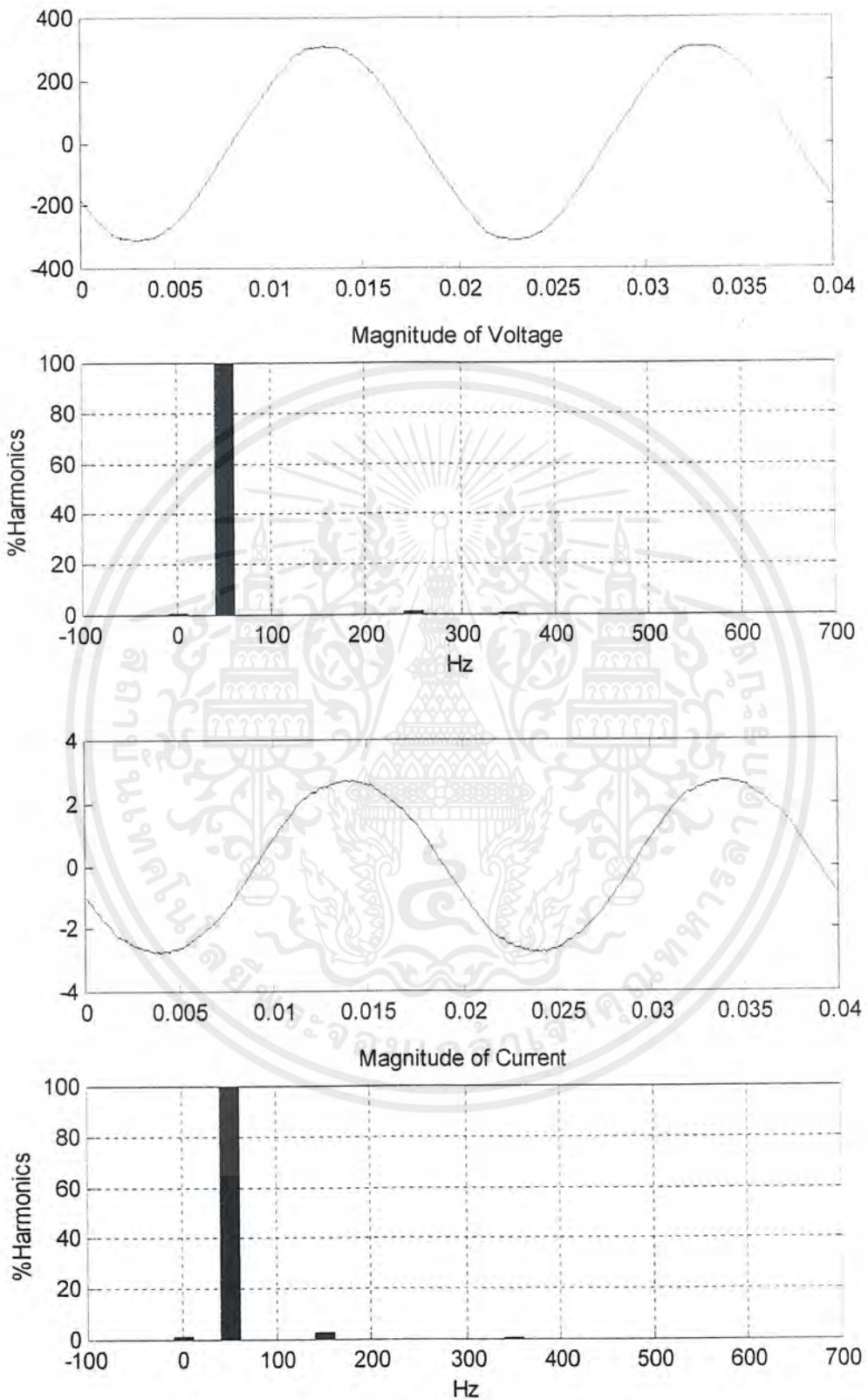
9.1 การแสดงผลสัญญาณของแรงดันและกระแส

รูปที่ 9.1 แสดงผลขณะที่ไม่มีการป้อนฮาร์โมนิกส์เข้าไปในระบบ

รูปที่ 9.2 ถึง 9.5 แสดงผลขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5% ถึง 20% ตามลำดับ

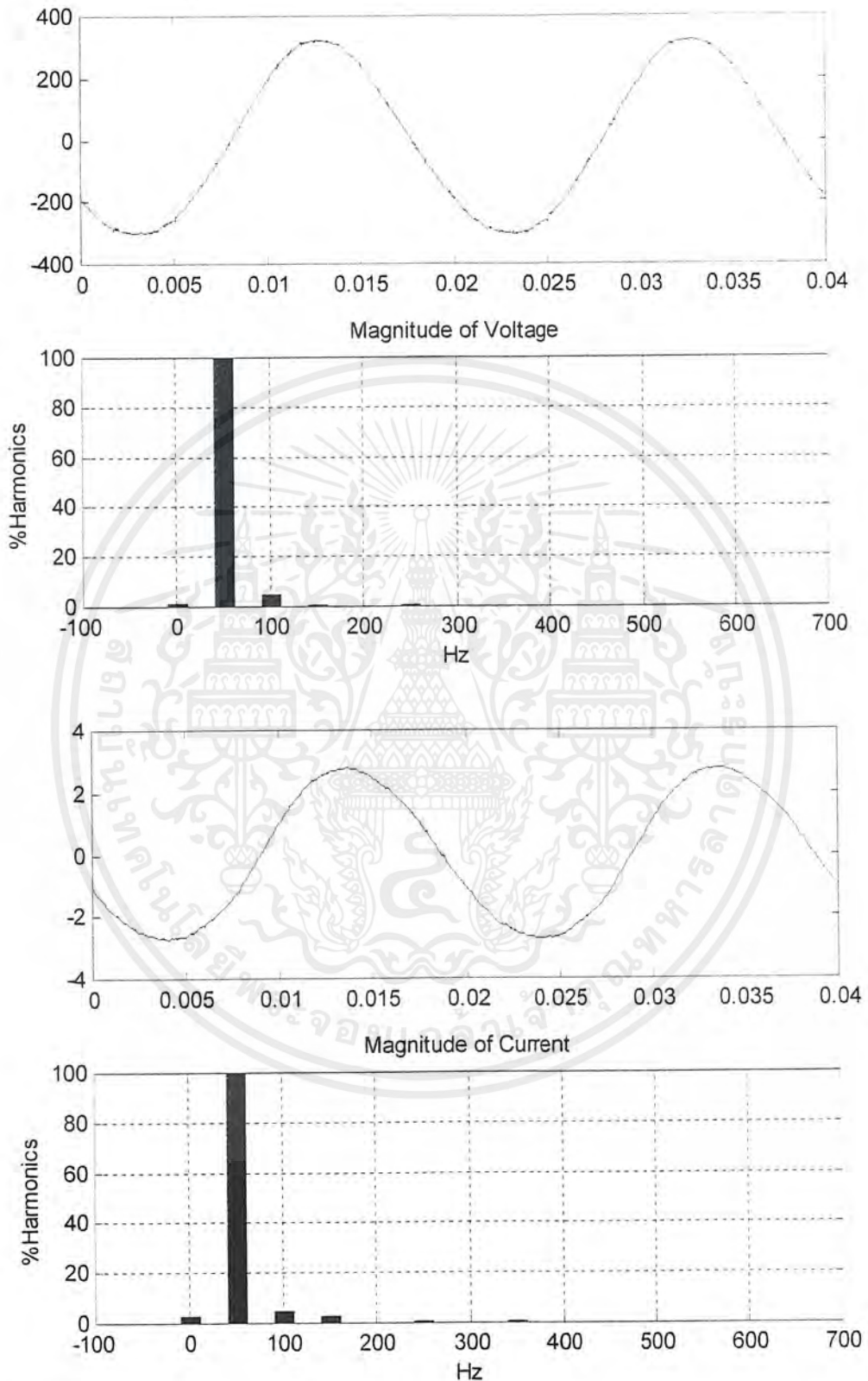
รูปที่ 9.6 ถึง 9.13 แสดงผลขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ถึง 10 ที่ 20% ตามลำดับ

สำหรับผลของแรงดันและกระแสขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ถึง 10 ที่ 5% ถึง 15% จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกับผลของแรงดันและกระแสขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5% ถึง 15%



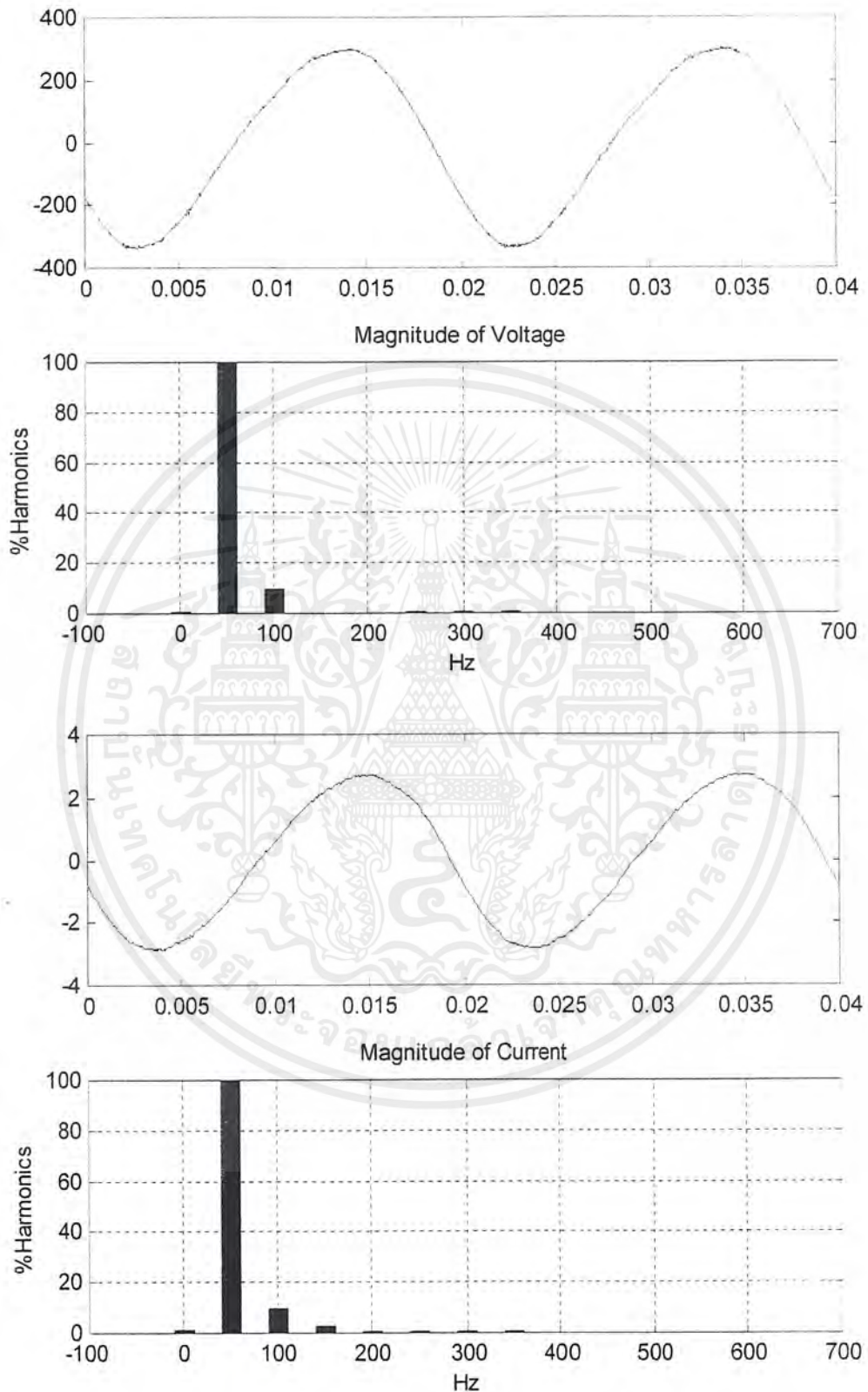
รูปที่ 9.1 สัญญาณและฮาร์โมนิกซ์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำที่ความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



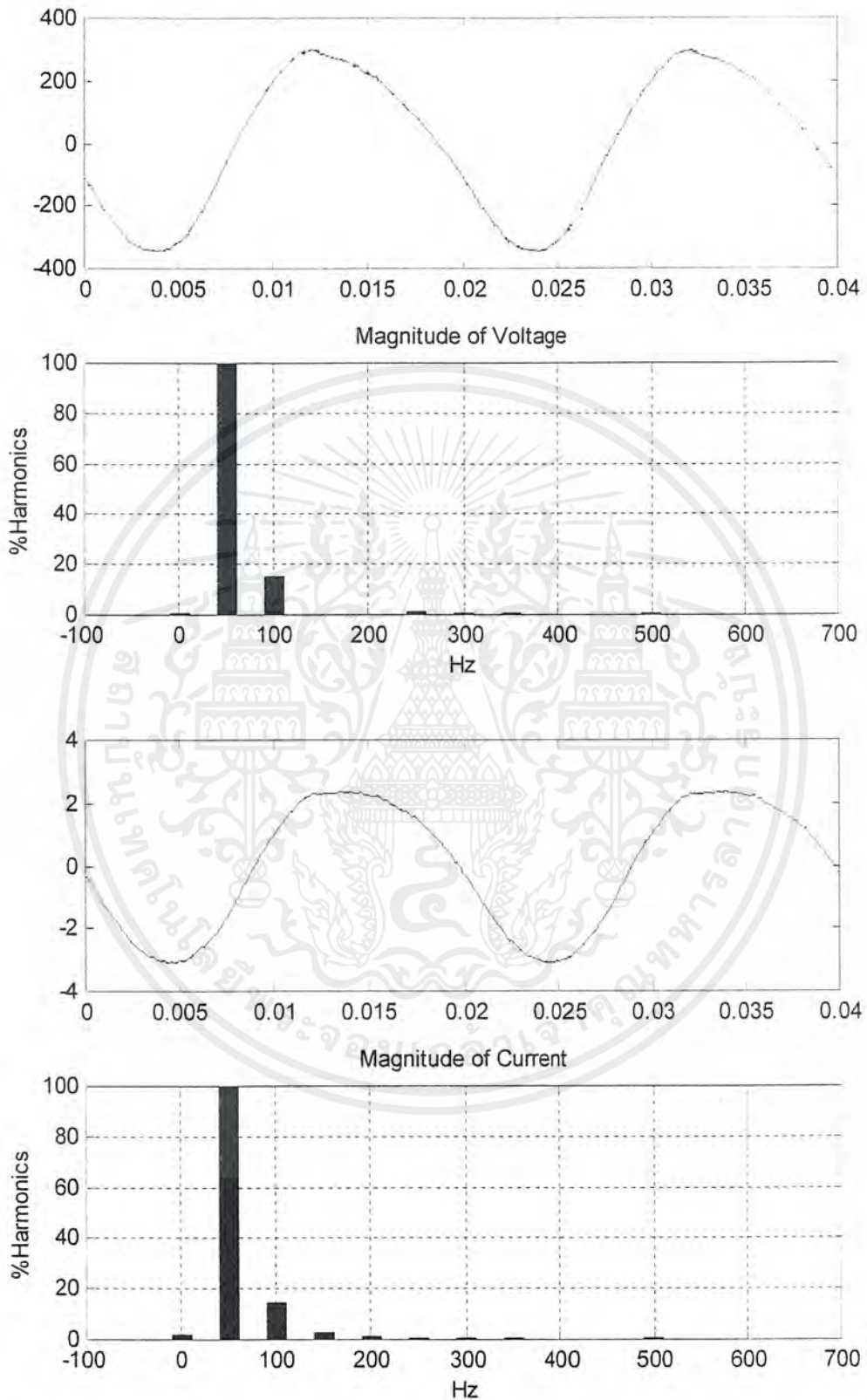
รูปที่ 9.2 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



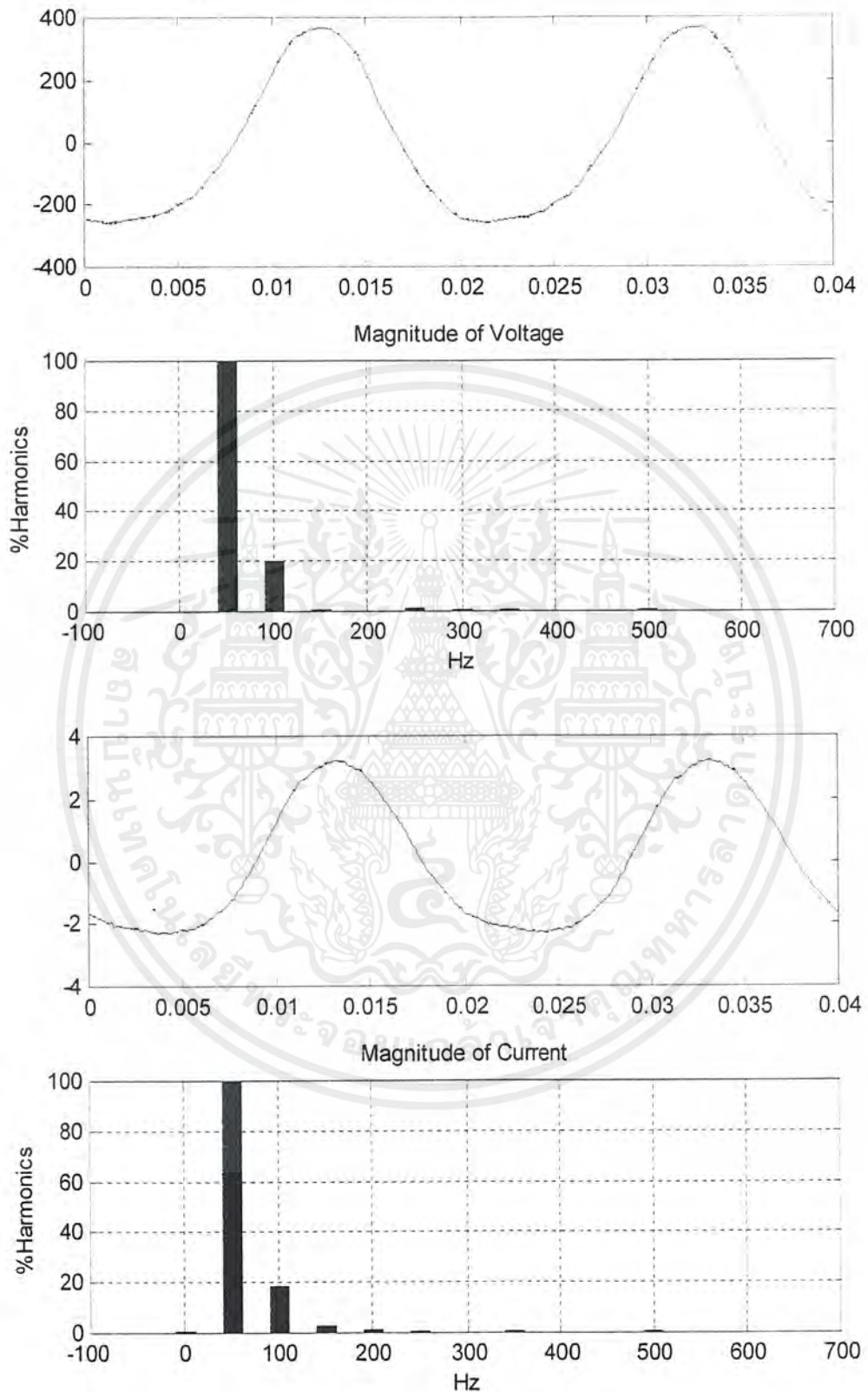
รูปที่ 9.3 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



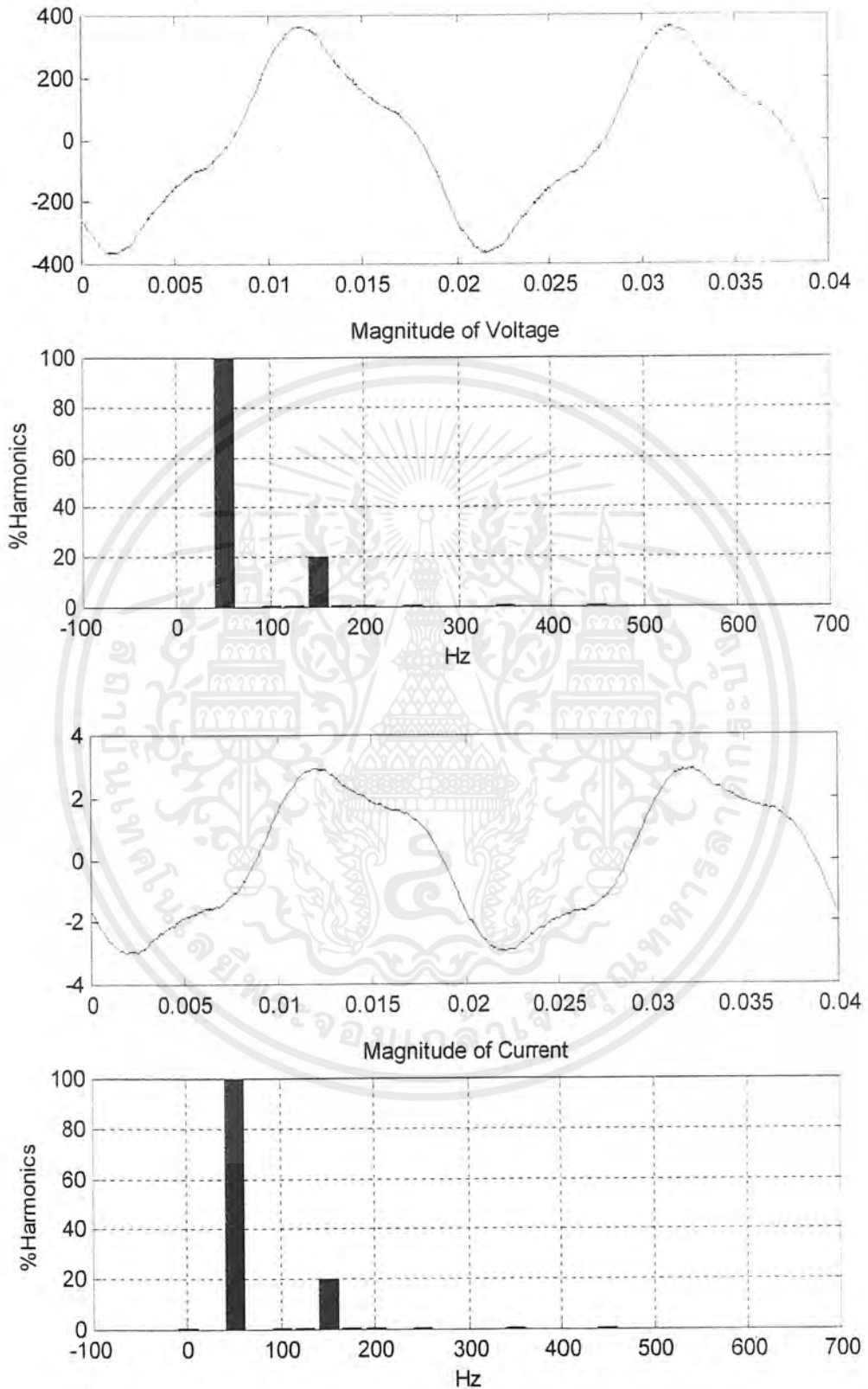
รูปที่ 9.4 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



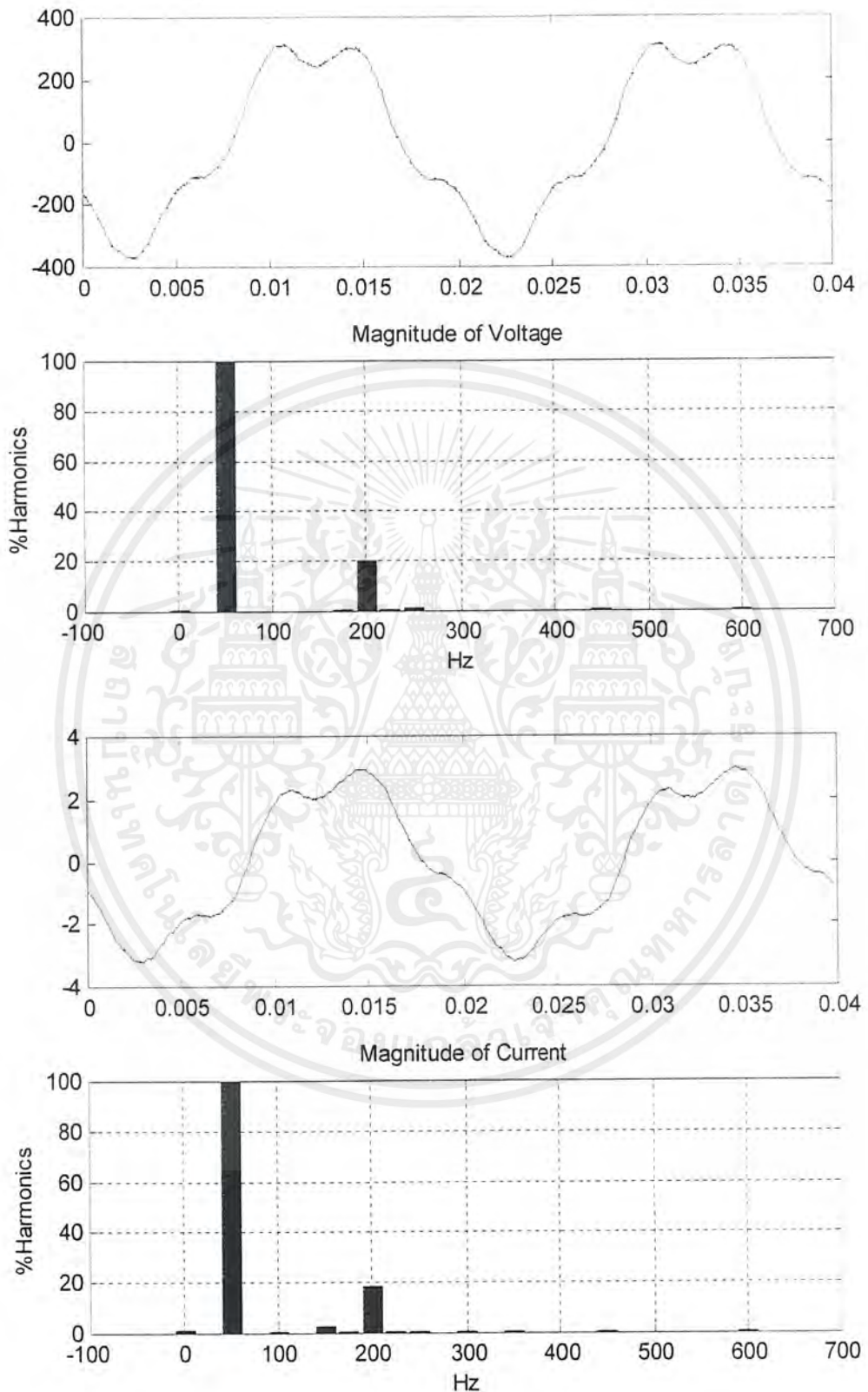
รูปที่ 9.5 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



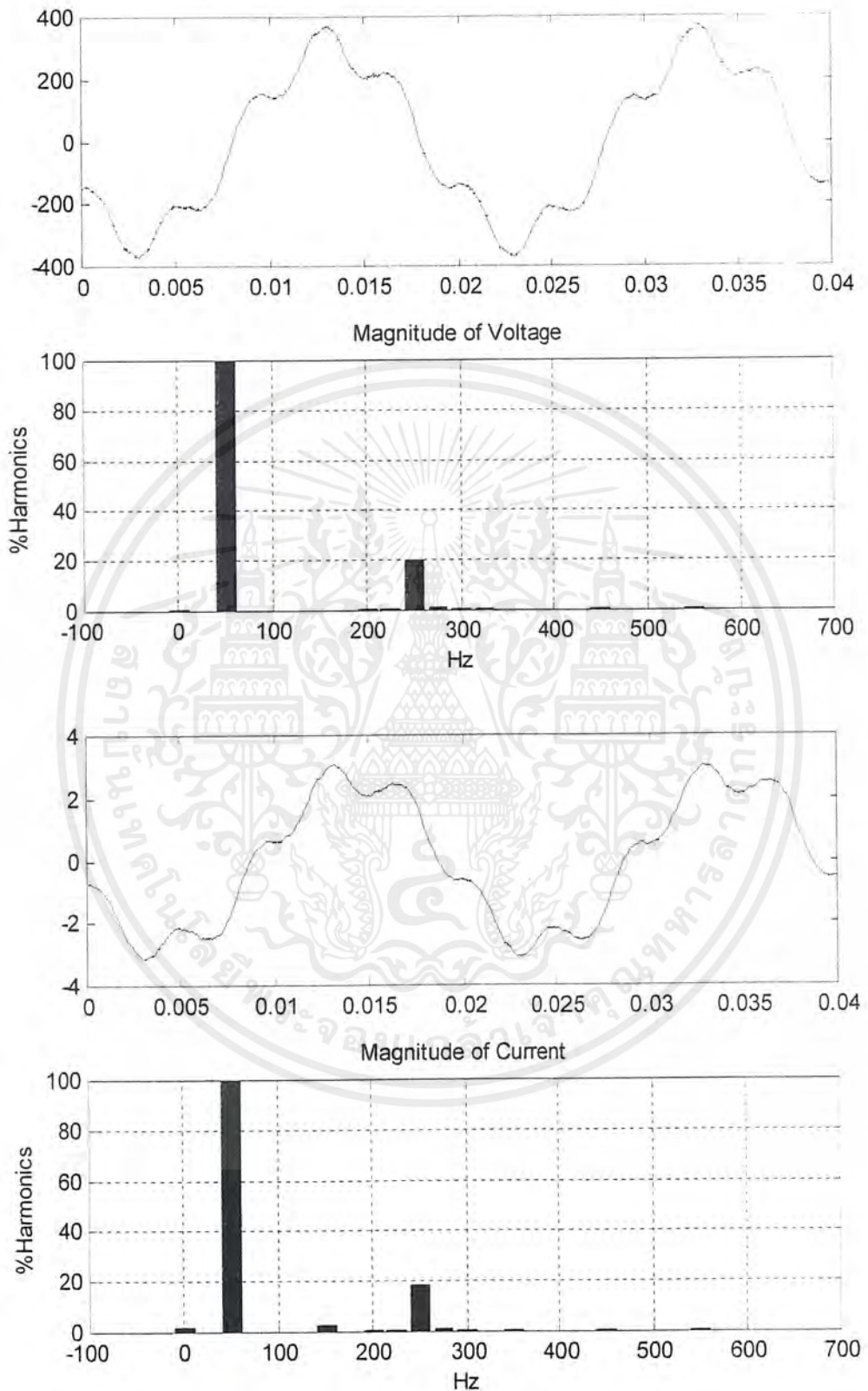
รูปที่ 9.6 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



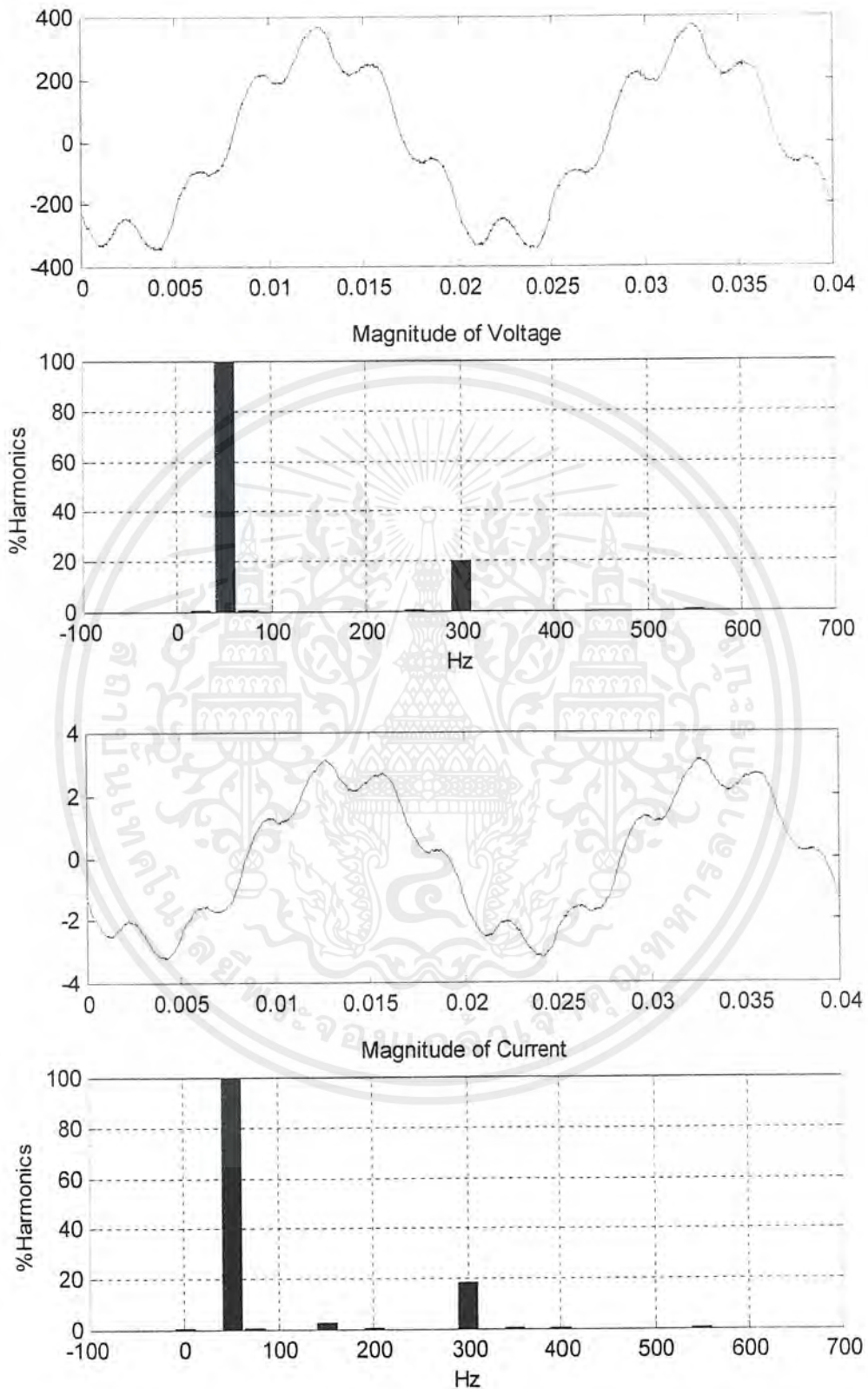
รูปที่ 9.7 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 4 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



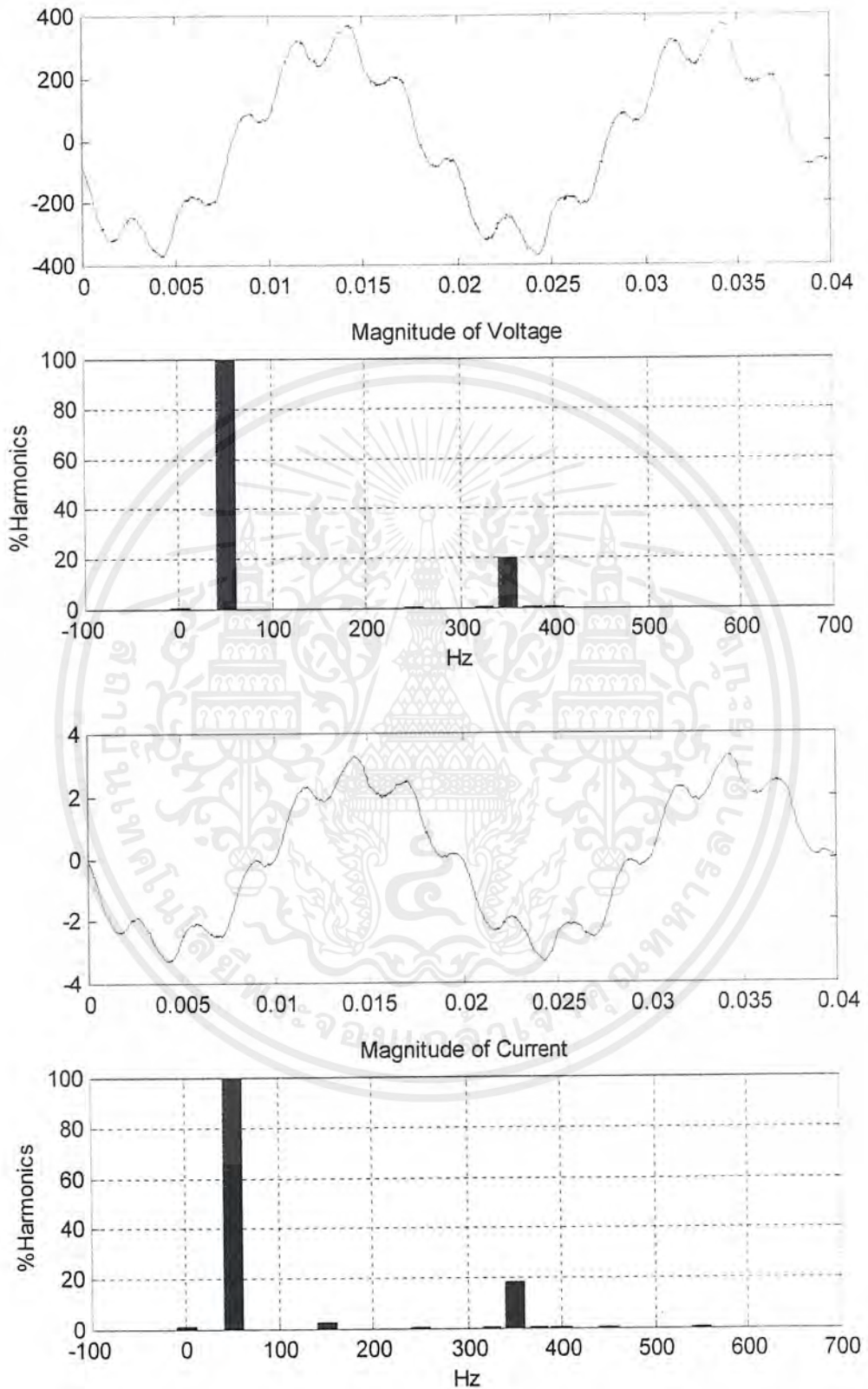
รูปที่ 9.8 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



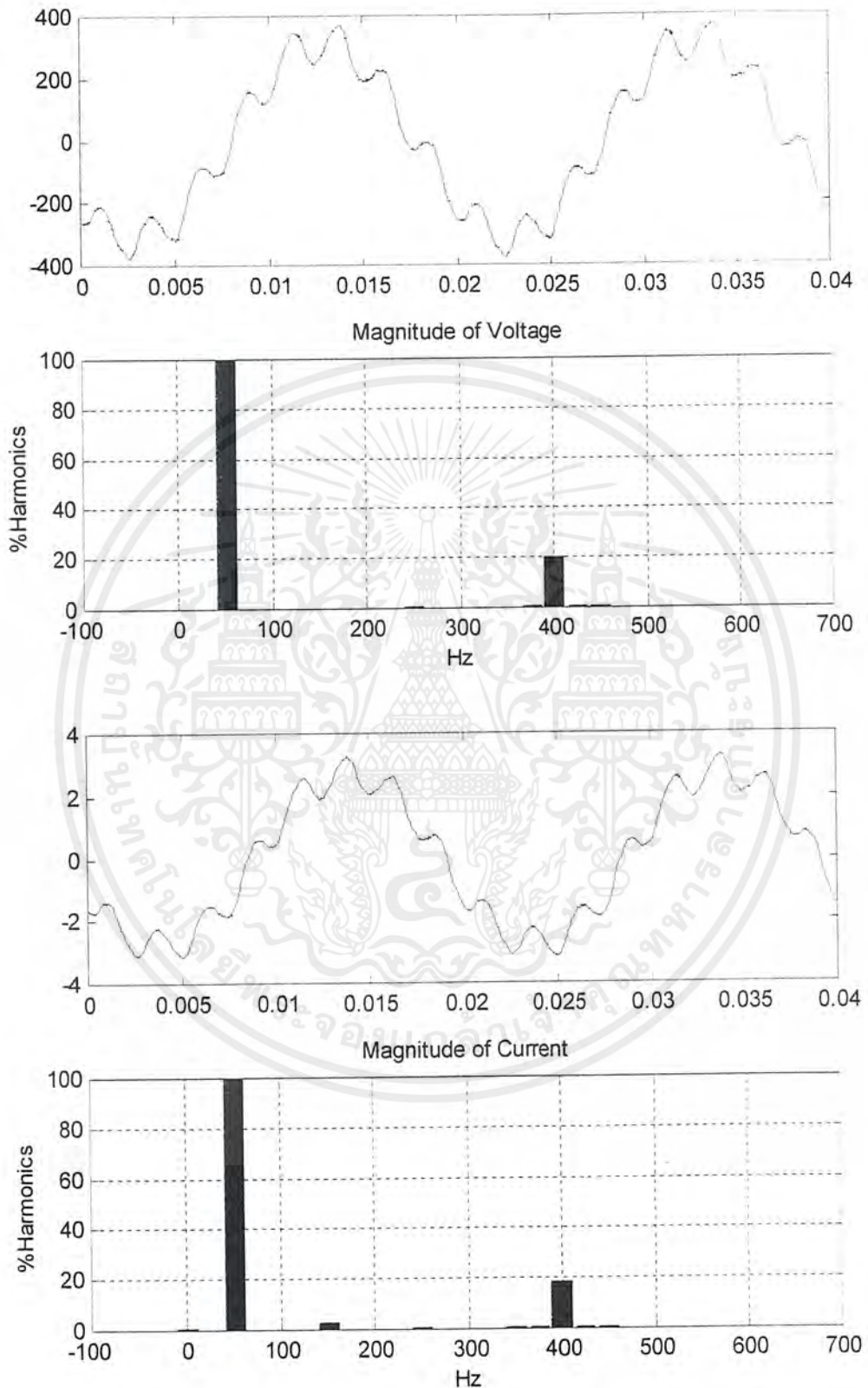
รูปที่ 9.9 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 6 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



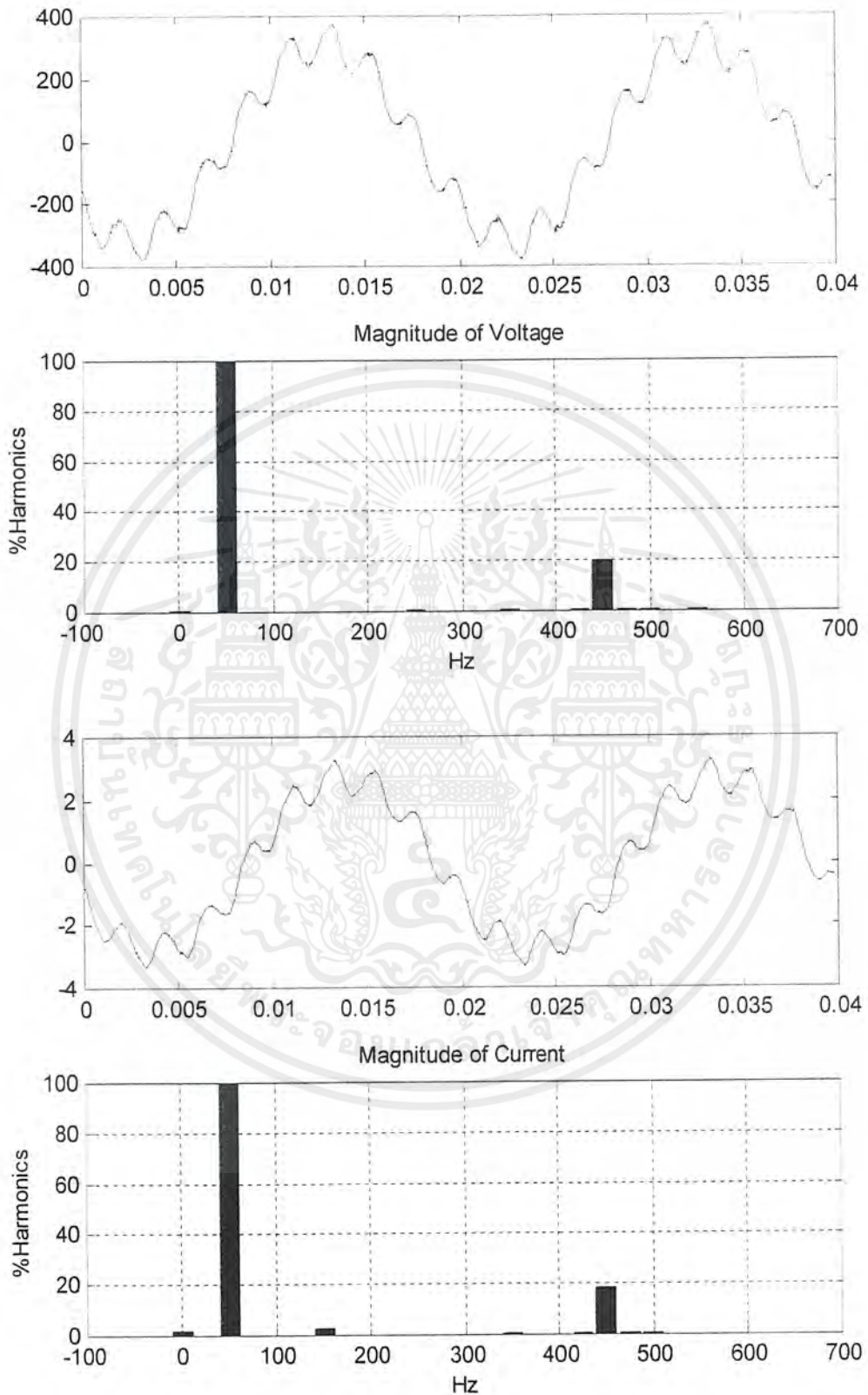
รูปที่ 9.10 สัญญาณและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนสเปกตรัมฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



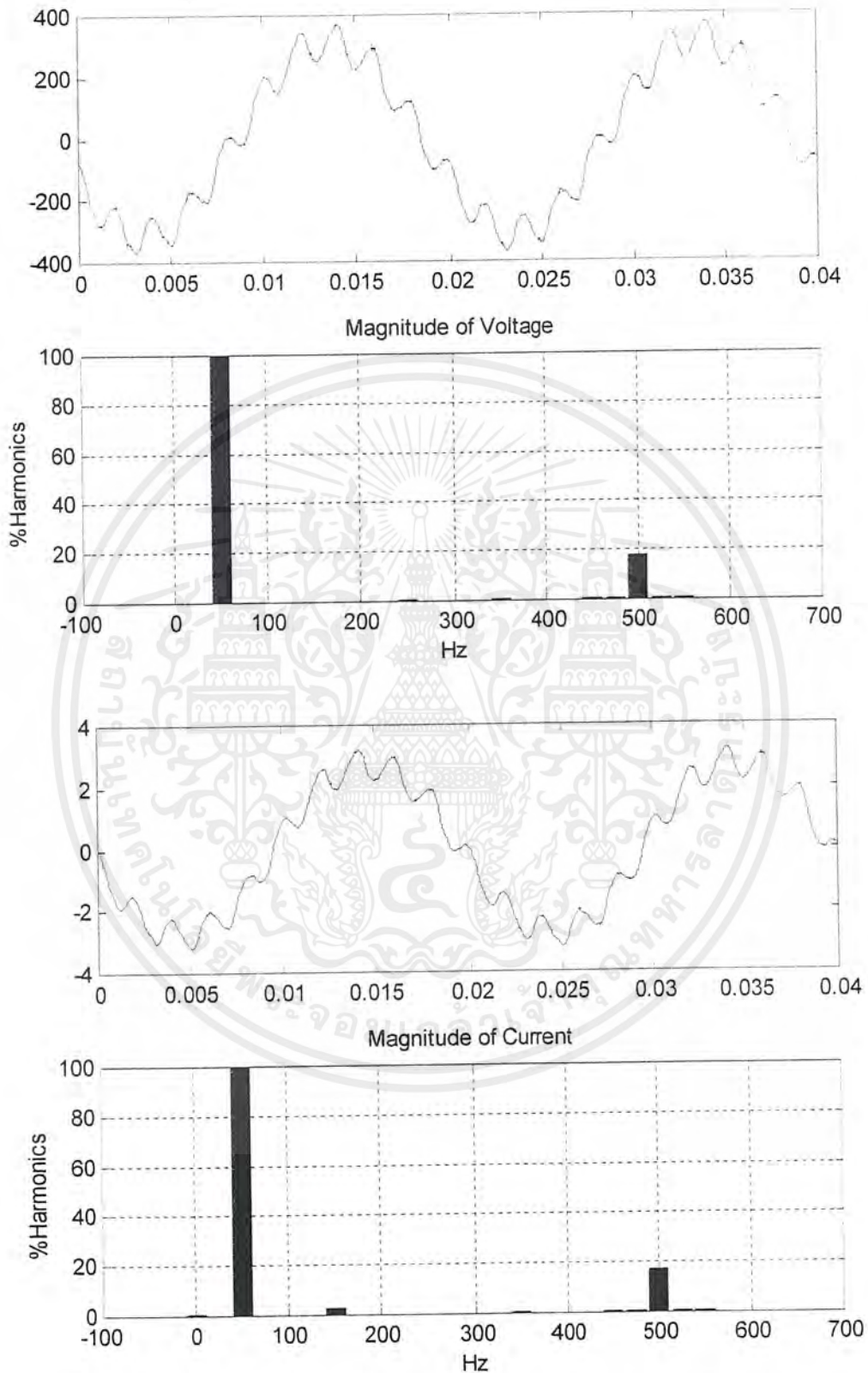
รูปที่ 9.11 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 7 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.12 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 8 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.13 สัญญาณและฮาร์โมนิกซ์ของแรงดันและกระแสของโหลดความต้านทาน และความเหนี่ยวนำขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 10 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2 สรุปผลการทดลอง

ในกรณีที่โหลดเป็นความต้านทานและความเหนียวน่าจะพบว่า

1. เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์เพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันและกระแสจะเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน อาทิเช่น รูปที่ 9.5 มีฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 20% ในระบบ แรงดันและกระแสที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 มีค่าเป็น 20% ของแรงดันและกระแสที่ความถี่มูลฐาน
2. ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันลำดับต่าง ๆ จะมีผลต่อฮาร์โมนิกส์ของกระแสเฉพาะที่ลำดับนั้น อาทิเช่น รูปที่ 9.6 มีฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่ 20% ในระบบ ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ของกระแสลำดับที่ 3 ปริมาณ 20% เช่นกัน
3. จากทุกรูปของกระแสที่มีฮาร์โมนิกส์ลำดับต่าง ๆ จะพบว่า จะมีผลของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ซึ่งเป็นผลของความเหนียว



บทที่ 10

ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ

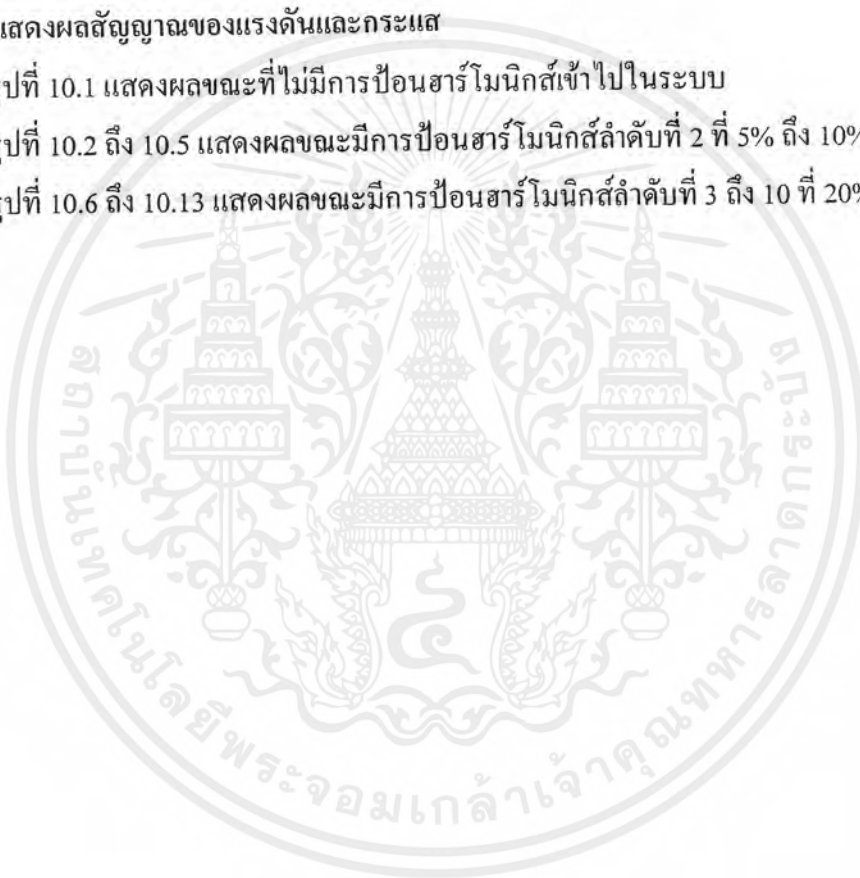
ผลการทดลองของบทนี้ จะเป็นผลของสัญญาณของแรงดันและกระแส และประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับต่าง ๆ เข้าสู่ระบบ

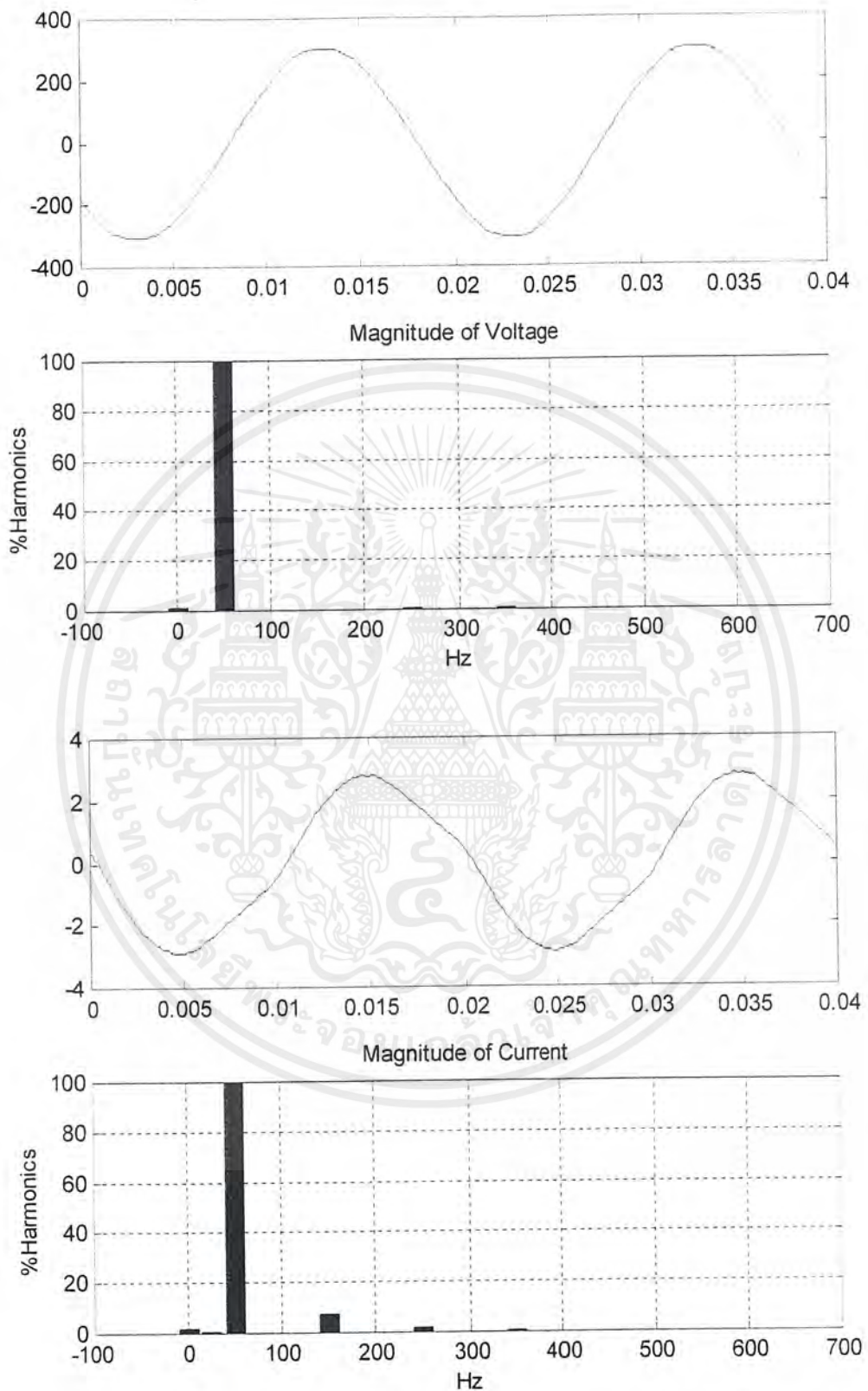
10.1 การแสดงผลสัญญาณของแรงดันและกระแส

รูปที่ 10.1 แสดงผลขณะที่ไม่มีฮาร์โมนิกส์เข้าไปในระบบ

รูปที่ 10.2 ถึง 10.5 แสดงผลขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5% ถึง 10% ตามลำดับ

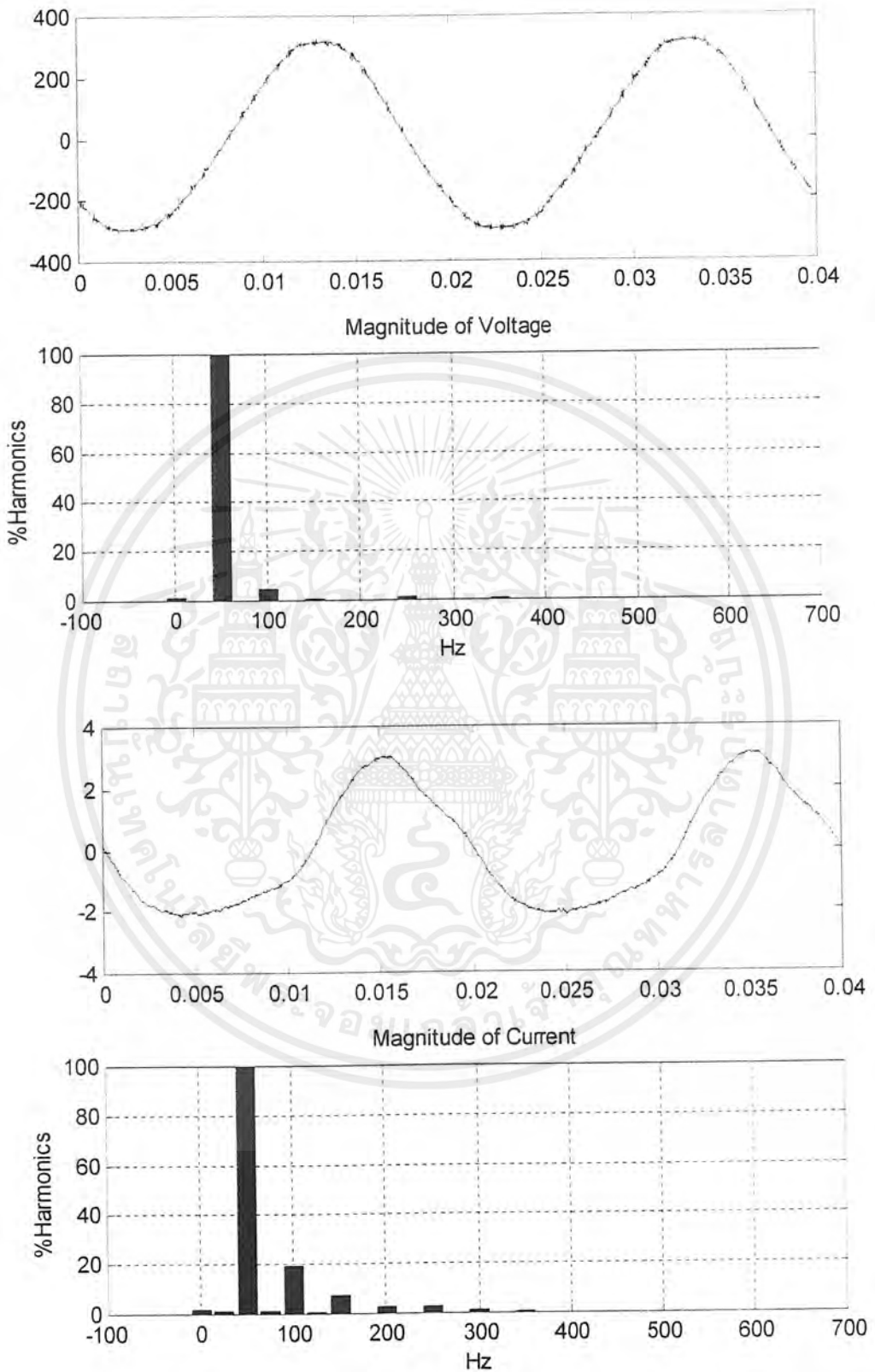
รูปที่ 10.6 ถึง 10.13 แสดงผลขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ถึง 10 ที่ 20% ตามลำดับ





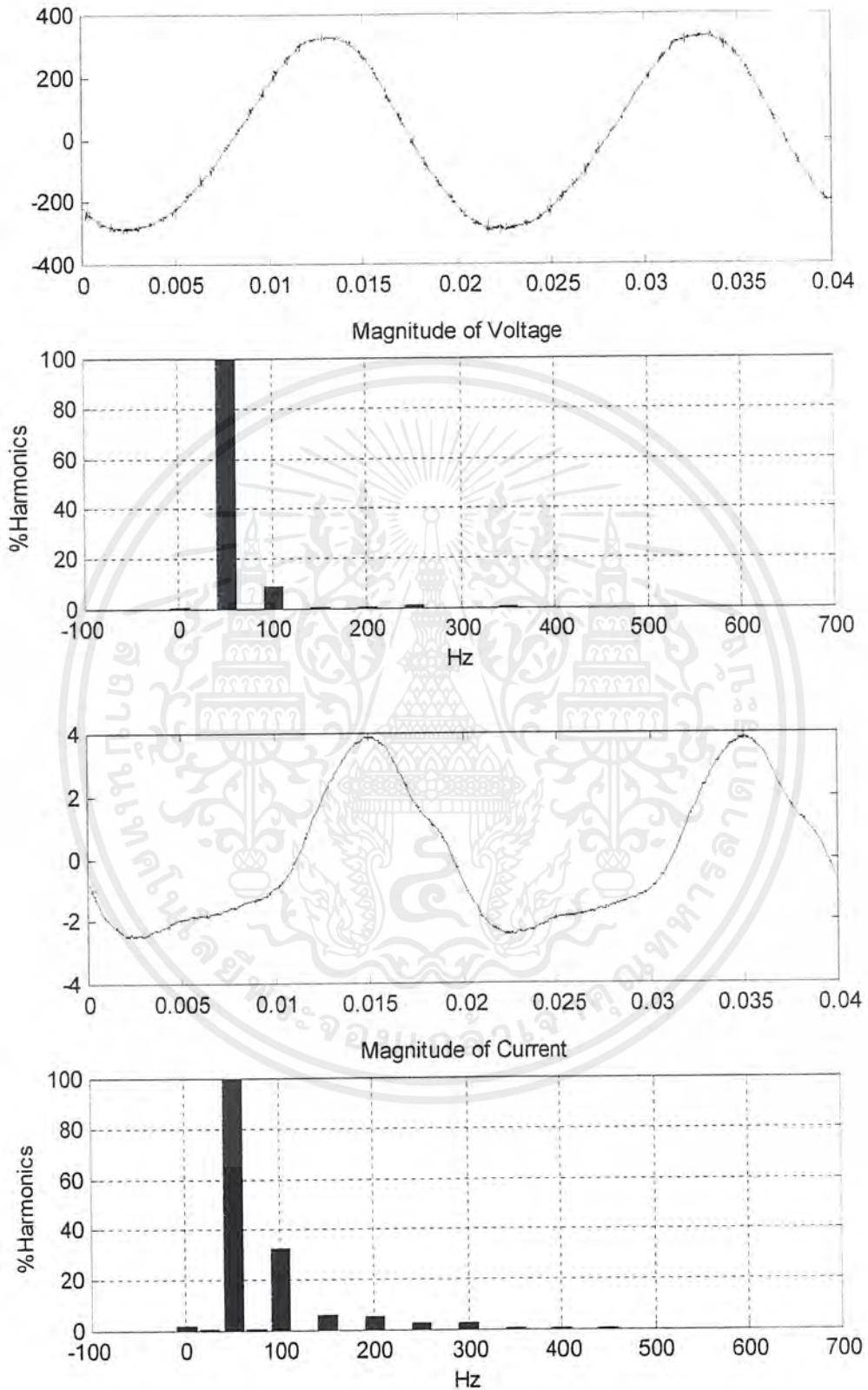
รูปที่ 10.1 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ความถี่มูลฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



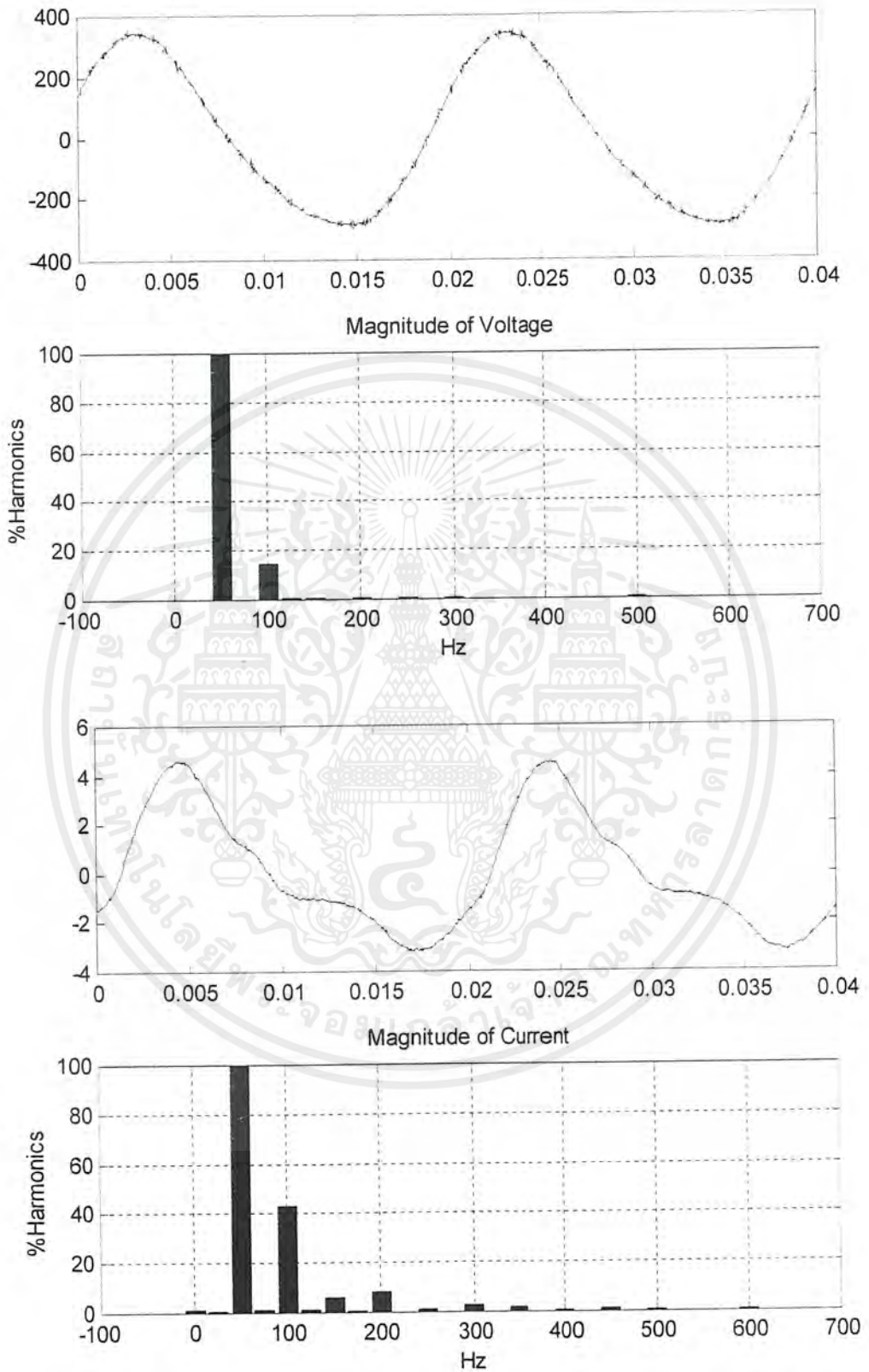
รูปที่ 10.2 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



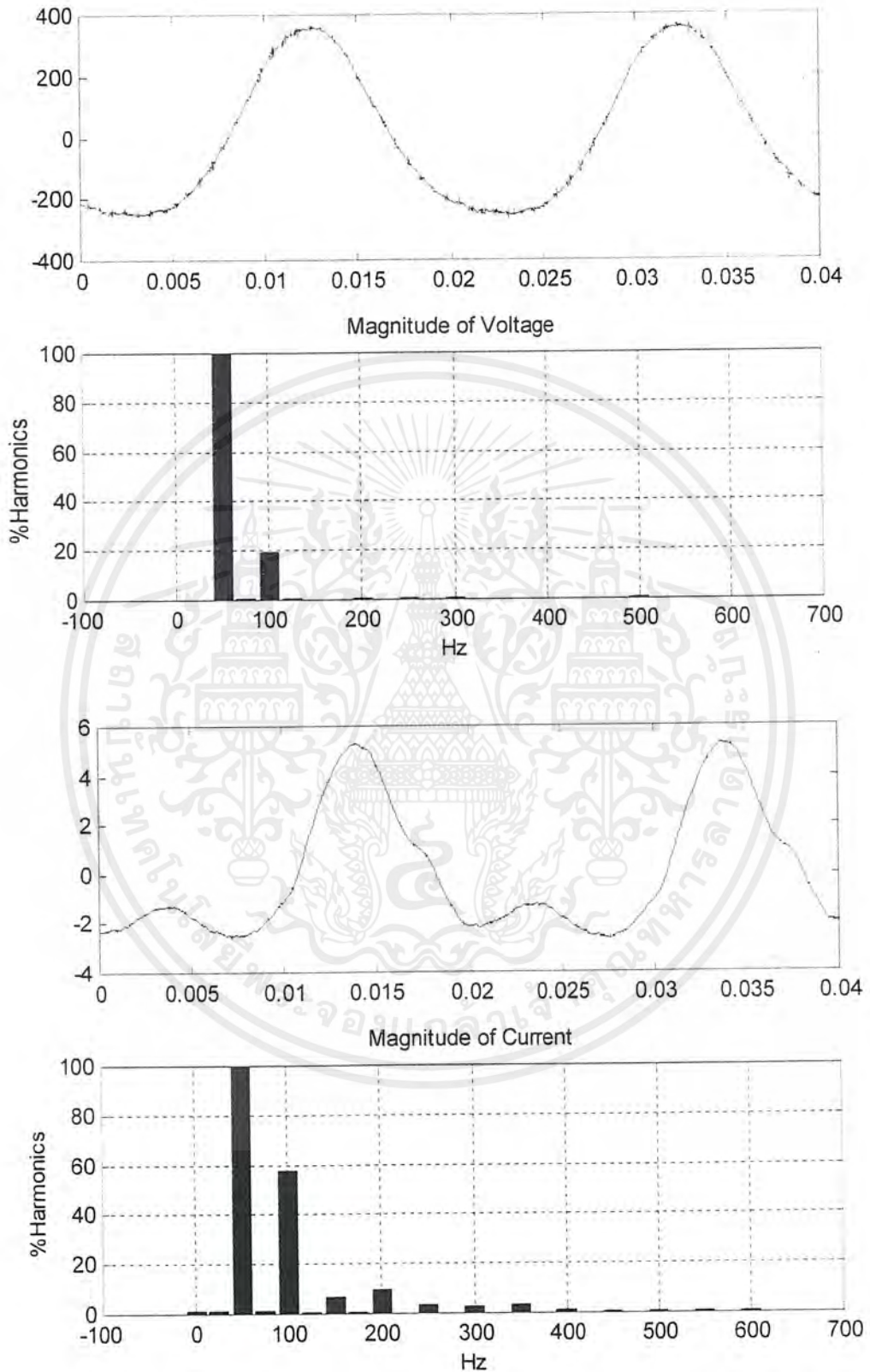
รูปที่ 10.3 สัญญาณและสเปกตรัมของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ขณะมีการป้อนสาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



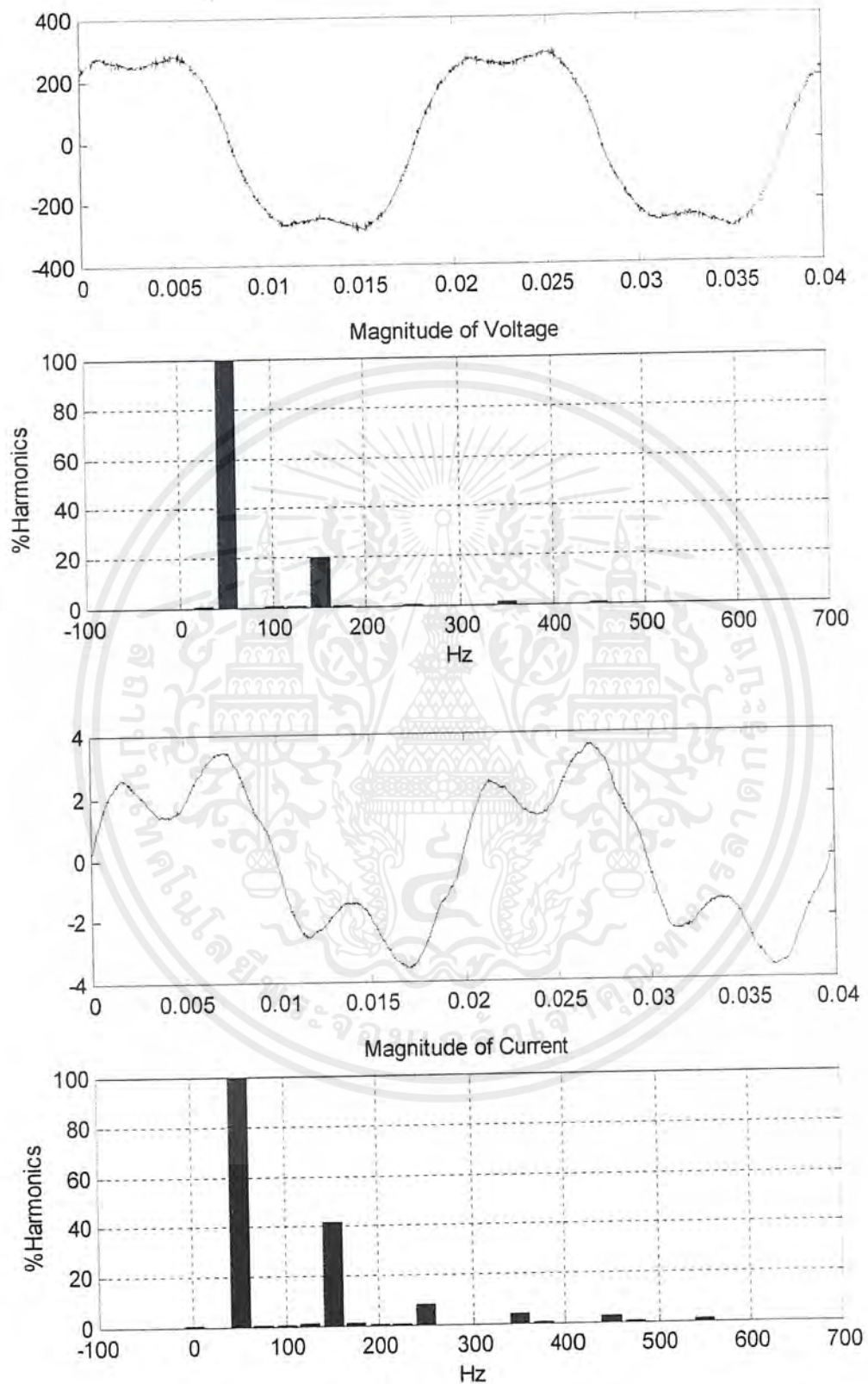
รูปที่ 10.4 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



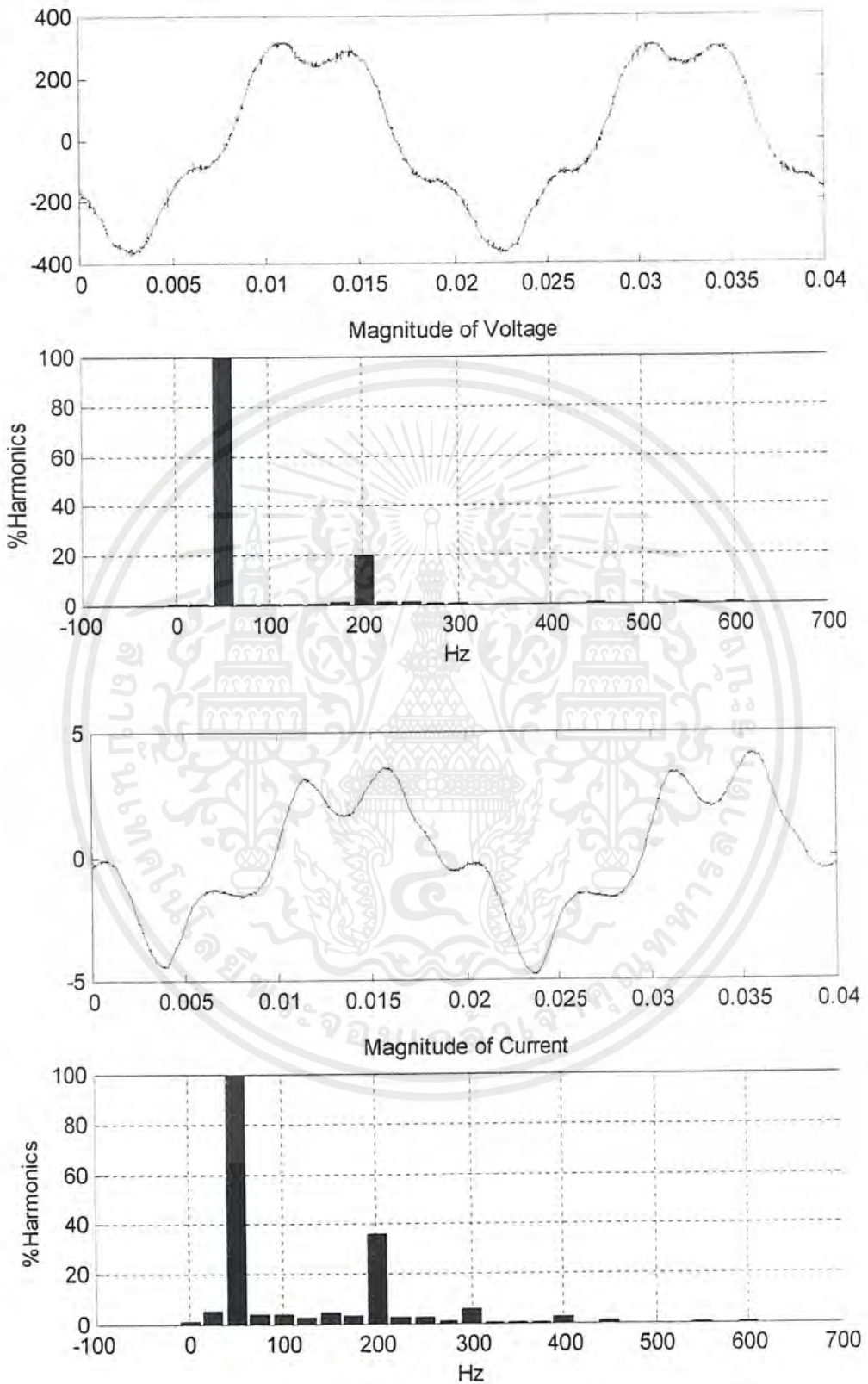
รูปที่ 10.5 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



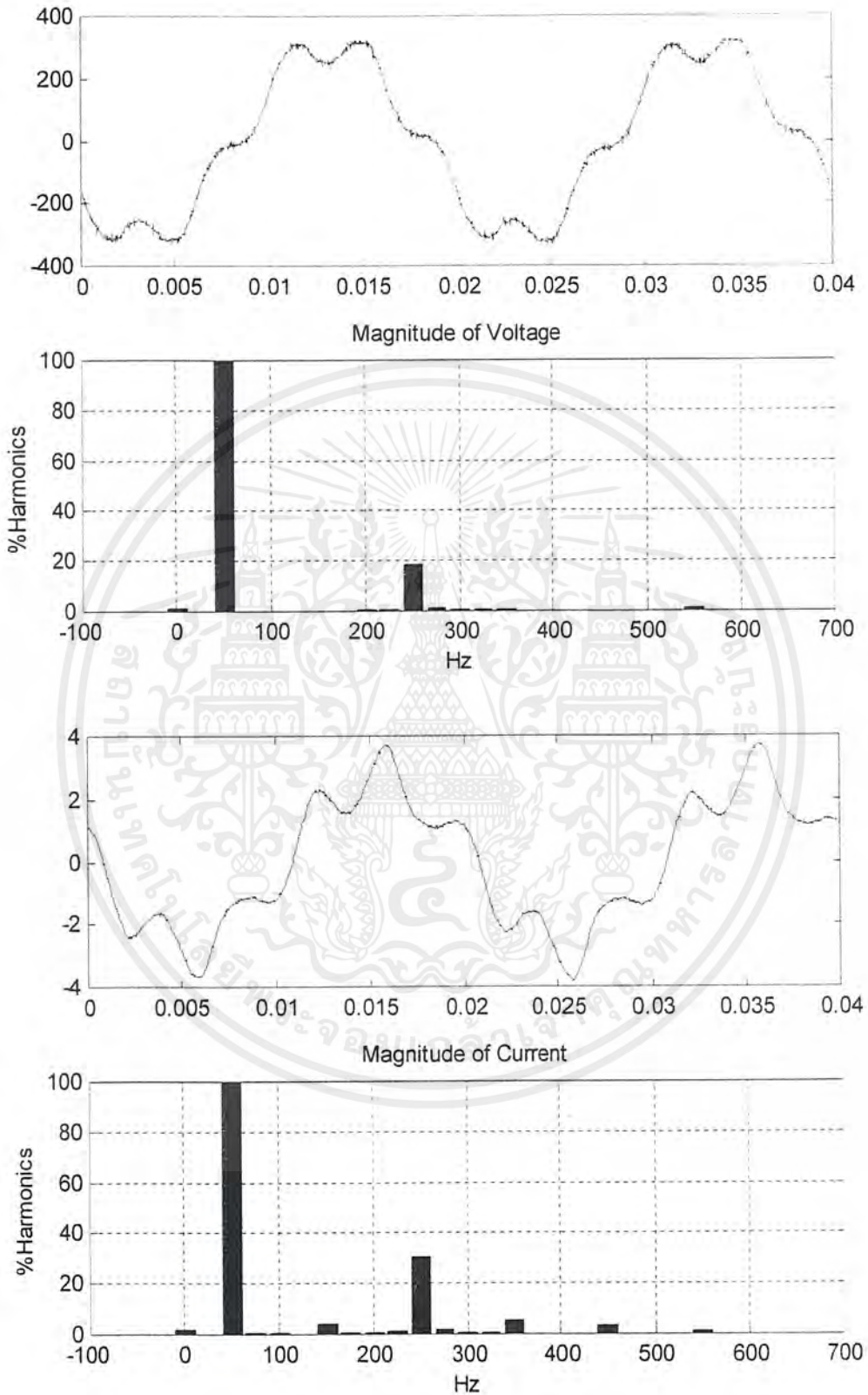
รูปที่ 10.6 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



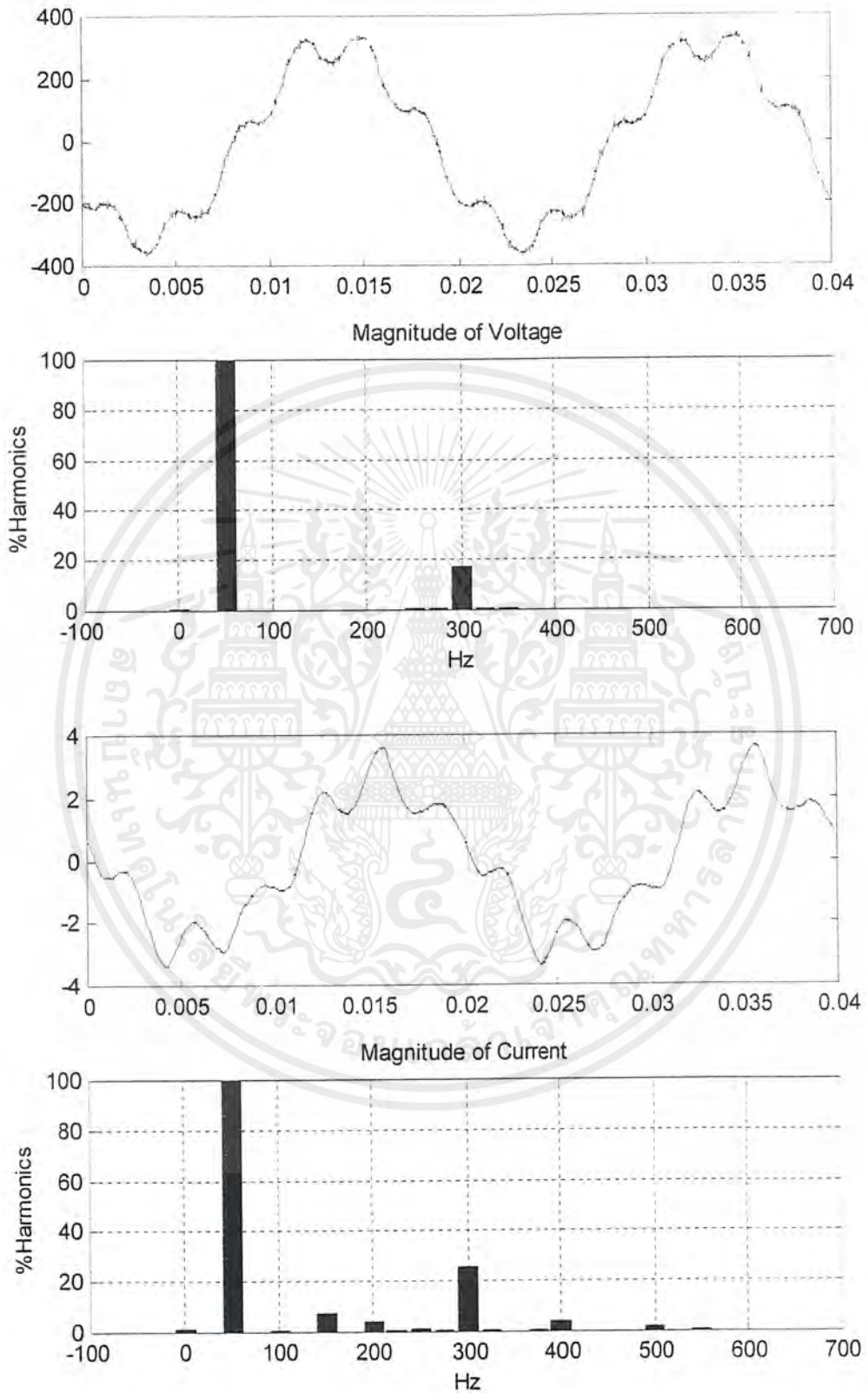
รูปที่ 10.7 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 4 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



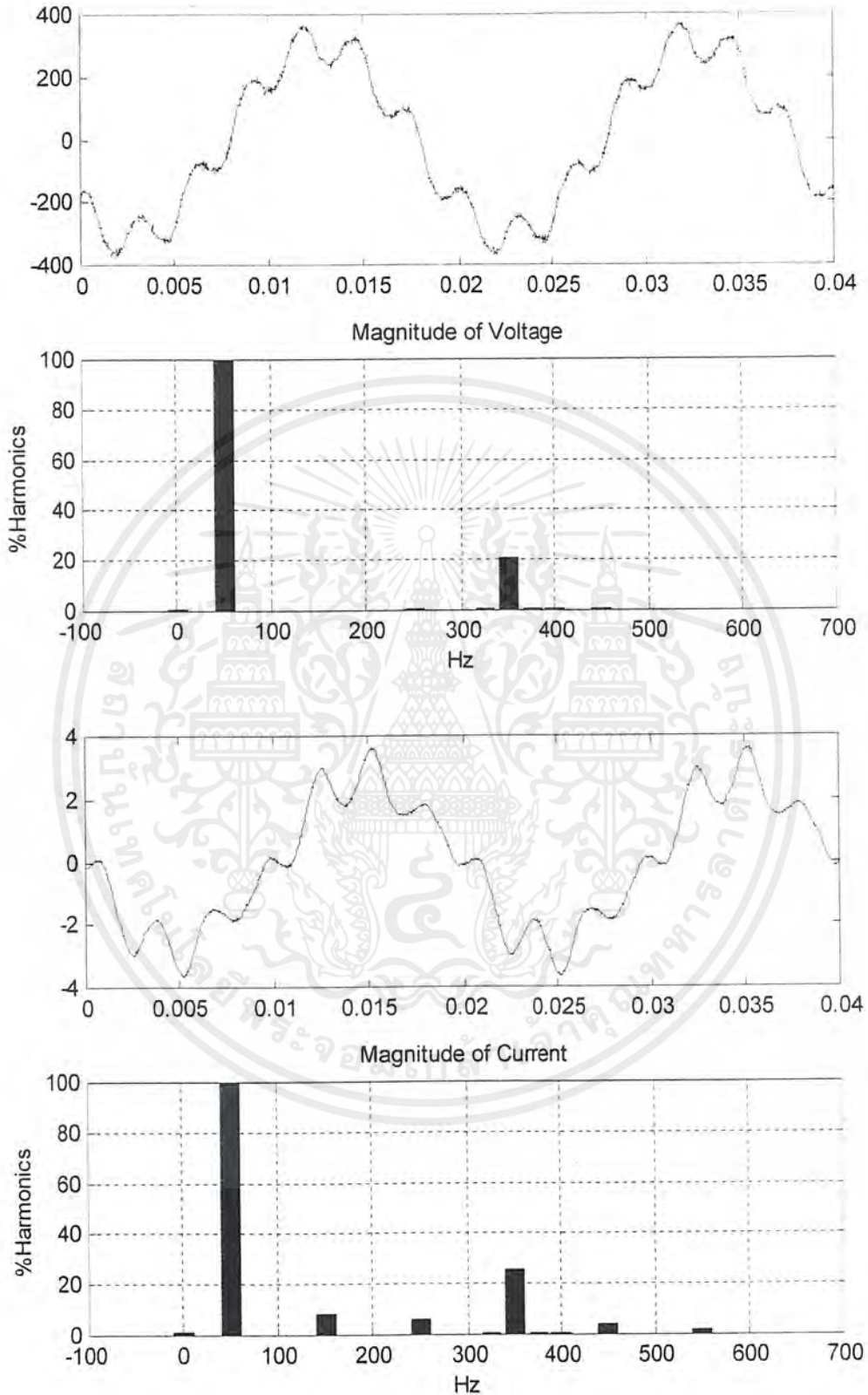
รูปที่ 10.8 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



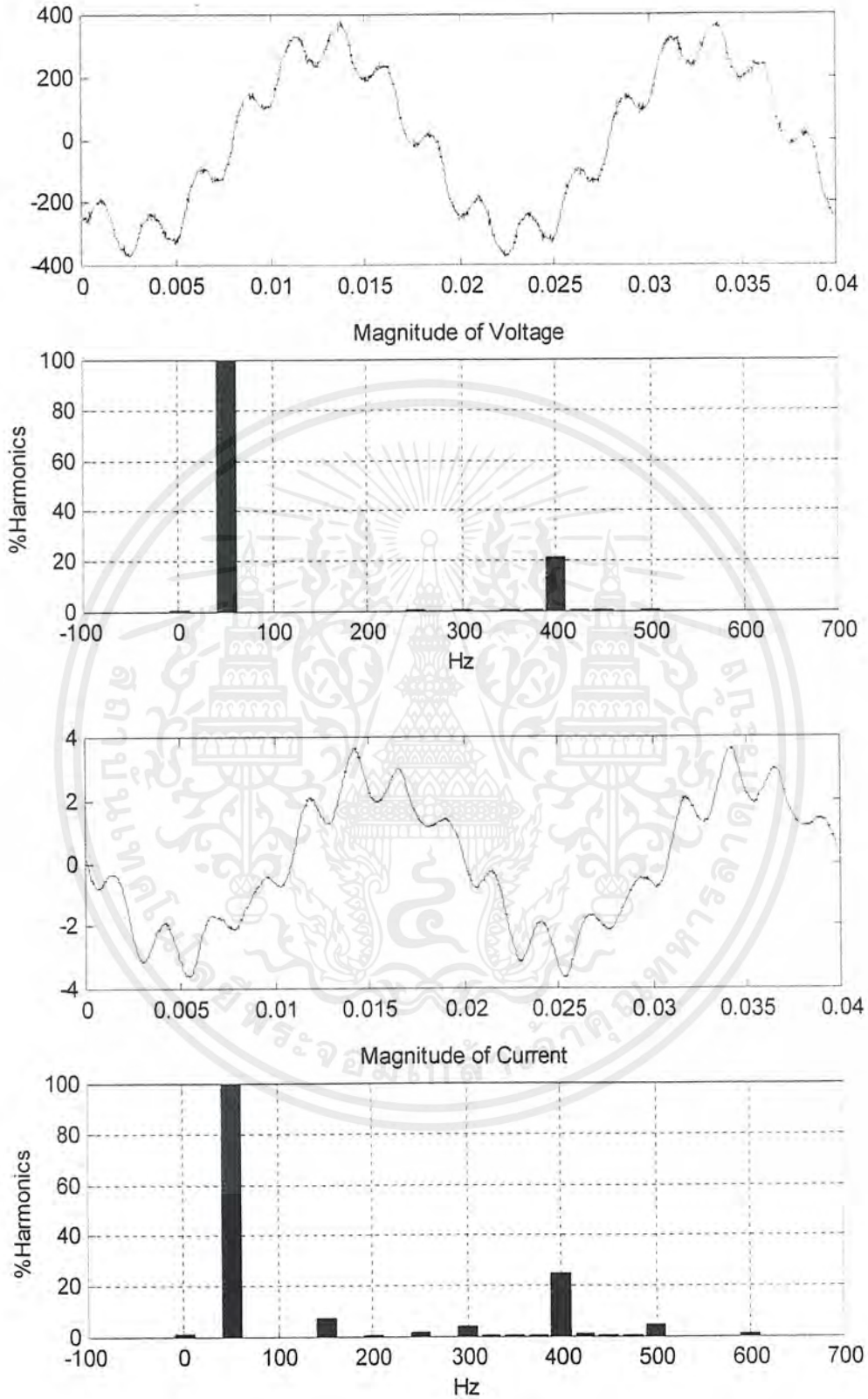
รูปที่ 10.9 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 6 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



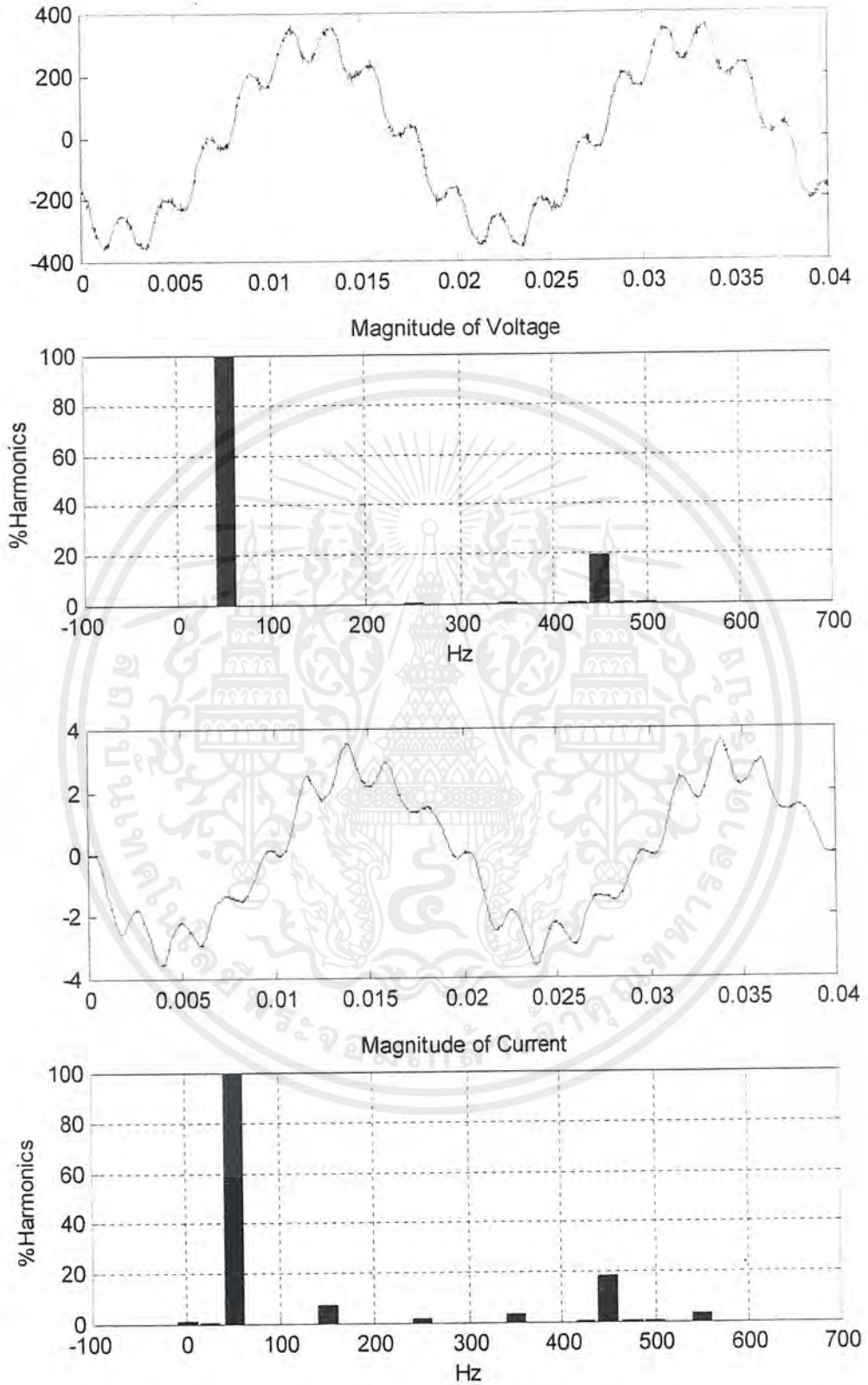
รูปที่ 10.10 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 7 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



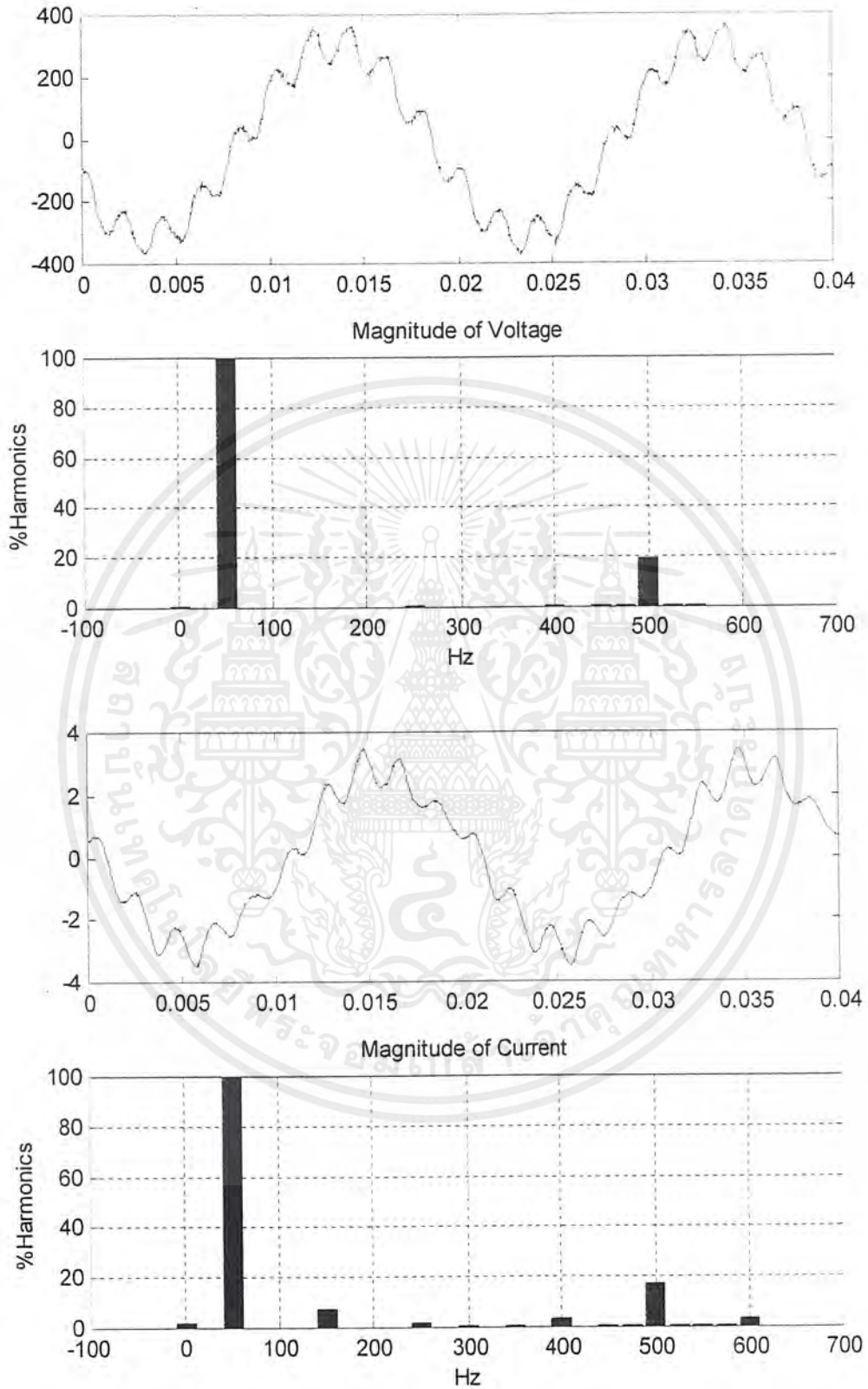
รูปที่ 10.11 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
 ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 8 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.12 สัญญาณและฮาร์โมนิกซ์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกซ์ลำดับที่ 9 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.13 สัญญาณและฮาร์โมนิกส์ของแรงดันและกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ขณะมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 10 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.2 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในการทดลองจะทำการป้อนฮาร์โมนิกส์ 2 แบบ คือ

1. ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบโพสิทีฟซีแคว้น (Positive Sequence Voltage Harmonics)
2. ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีแคว้น (Negative Sequence Voltage Harmonics)

10.2.1 ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบโพสิทีฟซีแคว้น

สำหรับฮาร์โมนิกส์แบบโพสิทีฟซีแคว้น เป็นฮาร์โมนิกส์ที่มีเฟสซีแคว้นเดียวกันกับเฟสซีแคว้นของแหล่งจ่าย จะแสดงค่ากระแส , ความเร็ว และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังในตารางที่ 10.1 ถึง 10.4

ลำดับของฮาร์โมนิกส์	ค่ากระแส (แอมป์)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ค่าประสิทธิภาพ
1	1.96	1417	68.77%
1+2	1.93	1424	68.24%
1+3	1.95	1409	69.76%
1+4	2.04	1407	68.46%
1+5	1.94	1413	68.46%
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-

ตารางที่ 10.1 แสดงผลของค่ากระแส แรงดัน และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบโพสิทีฟซีแคว้นที่เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ 5%

ลำดับของฮาร์โมนิกส์	ค่ากระแส (แอมป์)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ค่าประสิทธิภาพ
1	1.96	1417	68.77%
1+2	2.06	1395	66.49%
1+3	2.02	1407	68.06%
1+4	2.13	1395	68.40%
1+5	2.03	1412	68.69%
1+6	1.96	1414	68.41%
1+7	1.96	1412	68.59%
1+8	1.96	1415	68.78%
1+9	1.94	1413	68.23%
1+10	2.03	1411	69.02%

ตารางที่ 10.2 แสดงผลของค่ากระแส แรงดัน และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบ โพลซิทีฟซีเควินที่เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ 10%

ลำดับของฮาร์โมนิกส์	ค่ากระแส (แอมป์)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ค่าประสิทธิภาพ
1	1.96	1417	68.77%
1+2	2.34	1394	66.41%
1+3	2.20	1400	67.49%
1+4	2.29	1383	68.03%
1+5	2.05	1410	68.31%
1+6	1.96	1412	67.88%
1+7	1.96	1414	68.05%
1+8	1.95	1414	68.07%
1+9	1.93	1414	68.14%
1+10	1.97	1413	68.66%

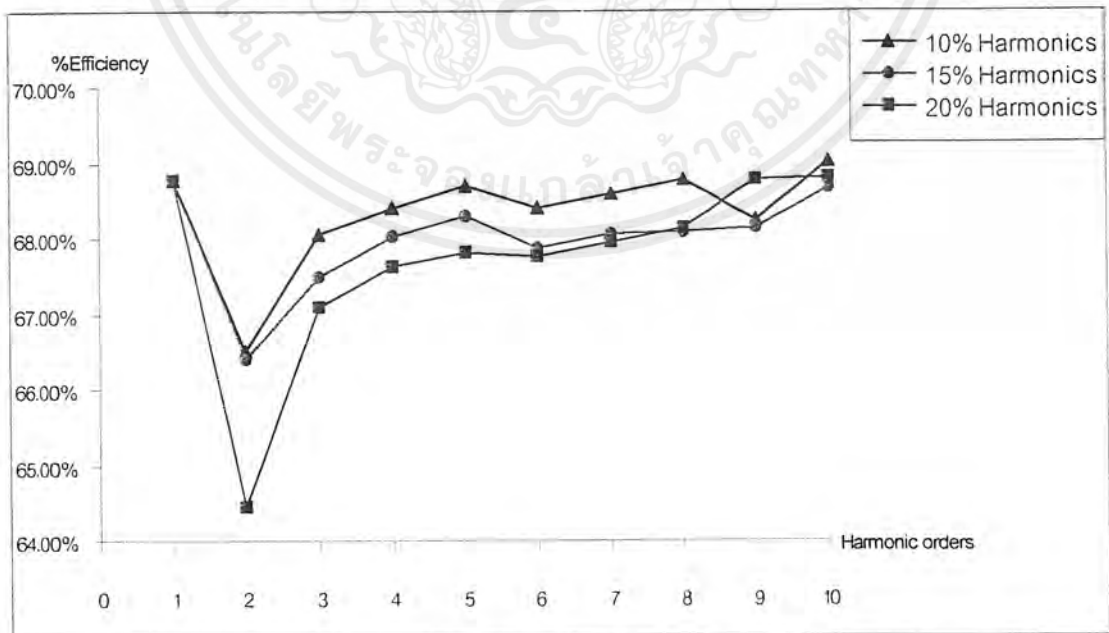
ตารางที่ 10.3 แสดงผลของค่ากระแส แรงดัน และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบ โพลซิทีฟซีเควินที่เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับของฮาร์โมนิกส์	ค่ากระแส (แอมป์)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ค่าประสิทธิภาพ
1	1.96	1417	68.77%
1+2	2.54	1384	64.46%
1+3	2.34	1407	67.10%
1+4	2.36	1380	67.62%
1+5	2.06	1409	67.83%
1+6	1.97	1414	67.76%
1+7	2.00	1413	67.94%
1+8	2.02	1411	68.12%
1+9	2.03	1414	68.76%
1+10	2.02	1411	66.79%

ตารางที่ 10.4 แสดงผลของค่ากระแส แรงดัน และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบ โพลซิทีฟซีเควินที่เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ 20%

ซึ่งจากค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในตารางที่ 10.1 ถึง 10.4 จะแสดงกราฟของค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 10.14



รูปที่ 10.14 แสดงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบ โพลซิทีฟซีเควิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.2.2 ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควิน

สำหรับฮาร์โมนิกส์แบบเนกาทีฟซีเควิน เป็นฮาร์โมนิกส์ที่มีเฟสซีเควินตรงข้ามกับเฟสซีเควินของแหล่งจ่าย จะแสดงค่ากระแส , ความเร็ว และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ดังในตารางที่ 10.5 ถึง 10.8

ลำดับของฮาร์โมนิกส์	ค่ากระแส (แอมป์)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ค่าประสิทธิภาพ
1	1.96	1417	68.77%
1+2	1.93	1424	68.20%
1+3	1.95	1409	68.25%
1+4	2.04	1407	69.03%
1+5	1.94	1413	68.61%
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-

ตารางที่ 10.5 แสดงผลของค่ากระแส แรงดัน และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควินที่เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ 5%

ลำดับของฮาร์โมนิกส์	ค่ากระแส (แอมป์)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ค่าประสิทธิภาพ
1	1.96	1417	68.77%
1+2	2.04	1420	67.79%
1+3	2.02	1412	67.94%
1+4	2.07	1405	68.57%
1+5	1.99	1413	68.54%
1+6	1.96	1413	68.46%
1+7	1.94	1415	68.45%
1+8	1.93	1414	68.18%
1+9	1.94	1415	68.47%
1+10	1.94	1414	68.46%

ตารางที่ 10.6 แสดงผลของค่ากระแส แรงดัน และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควินที่เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ 10%

ลำดับของฮาร์โมนิกส์	ค่ากระแส (แอมป์)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ค่าประสิทธิภาพ
1	1.96	1417	68.77%
1+2	2.1	1418	66.83%
1+3	2.11	1410	67.55%
1+4	2.05	1410	67.83%
1+5	2.00	1414	67.94%
1+6	1.96	1409	68.01%
1+7	1.96	1415	68.18%
1+8	1.97	1418	68.35%
1+9	1.99	1414	68.75%
1+10	1.95	1412	68.24%

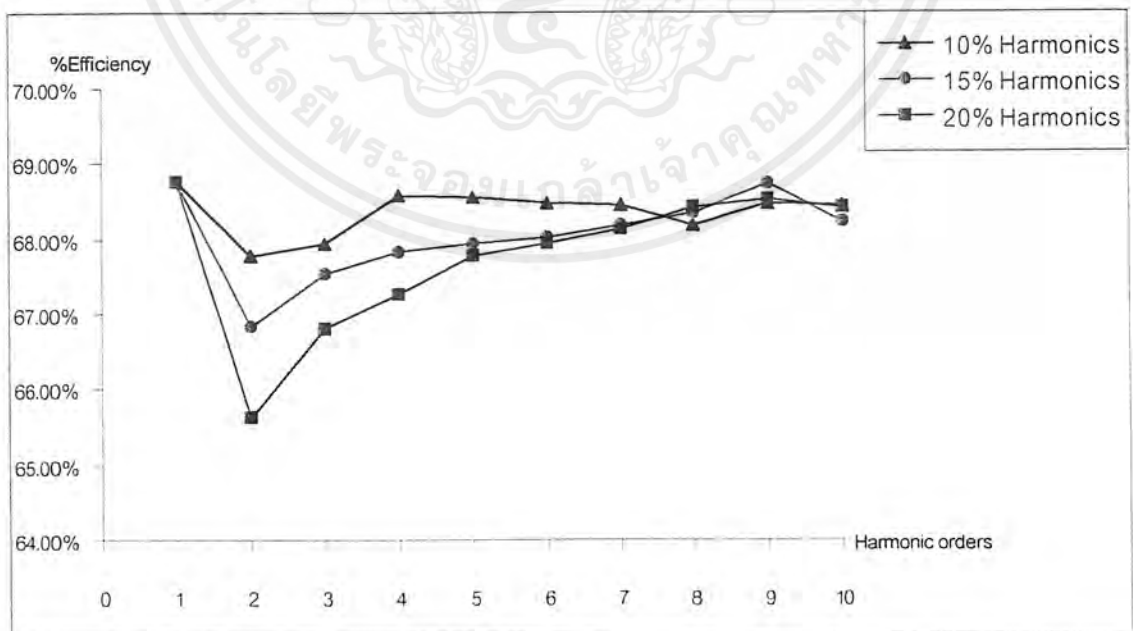
ตารางที่ 10.7 แสดงผลของค่ากระแส แรงดัน และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควินที่เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ 15%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับของฮาร์โมนิกส์	ค่ากระแส (แอมป์)	ความเร็ว (รอบต่อนาที)	ค่าประสิทธิภาพ
1	1.96	1417	68.77%
1+2	2.20	1418	65.52%
1+3	2.16	1407	66.82%
1+4	2.11	1410	67.27%
1+5	2.04	1411	67.77%
1+6	2.01	1411	67.94%
1+7	1.99	1415	68.12%
1+8	2.01	1416	68.41%
1+9	2.02	1413	68.53%
1+10	1.97	1412	68.41%

ตารางที่ 10.8 แสดงผลของค่ากระแส แรงดัน และค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควันที่เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ 20%

ซึ่งจากค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในตารางที่ 10.5 ถึง 10.9 จะแสดงกราฟของค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 10.15



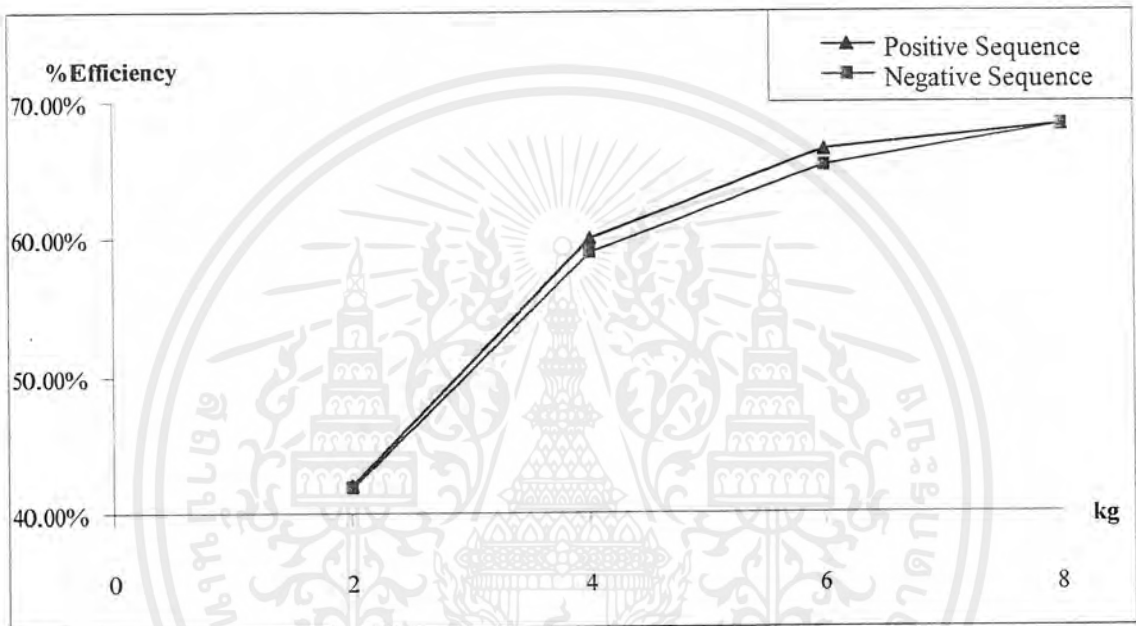
รูปที่ 10.15 แสดงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

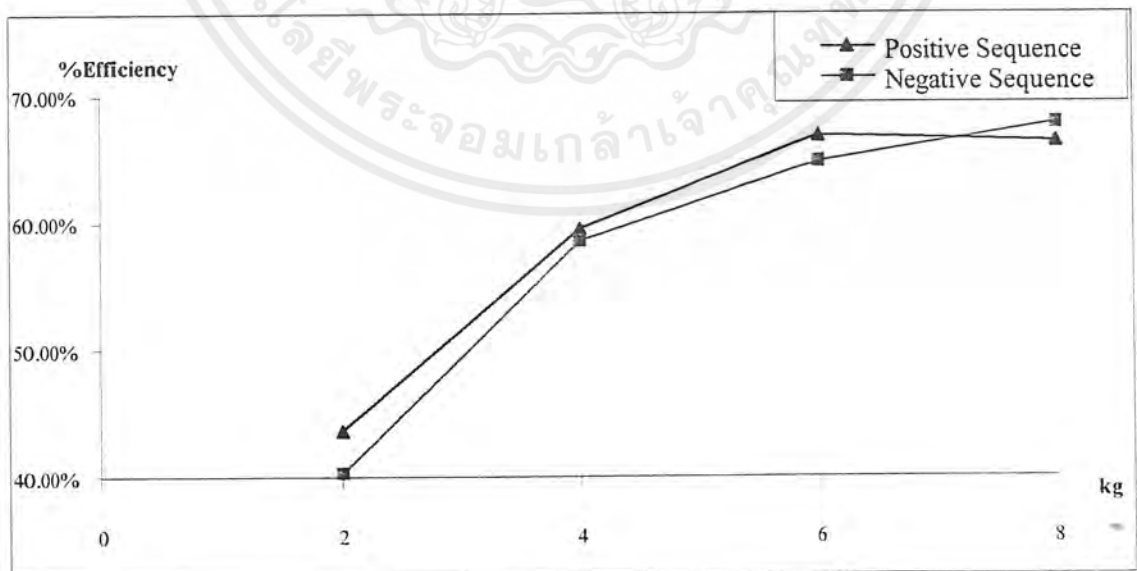
10.2.3 ค่าประสิทธิภาพที่ค่าโหลดต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจนถึงพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เมื่อมีการป้อนฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ถึง 4

ทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำระหว่างฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบโพสิทีฟซีแคว้น กับ ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีแคว้น ได้ดังต่อไปนี้

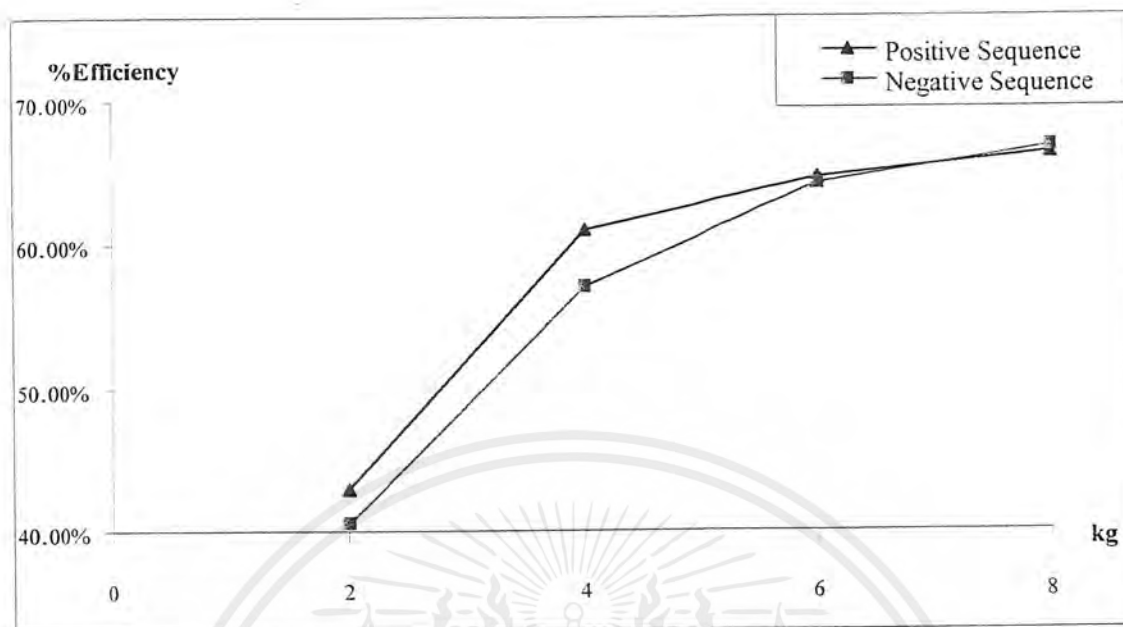


(ก)

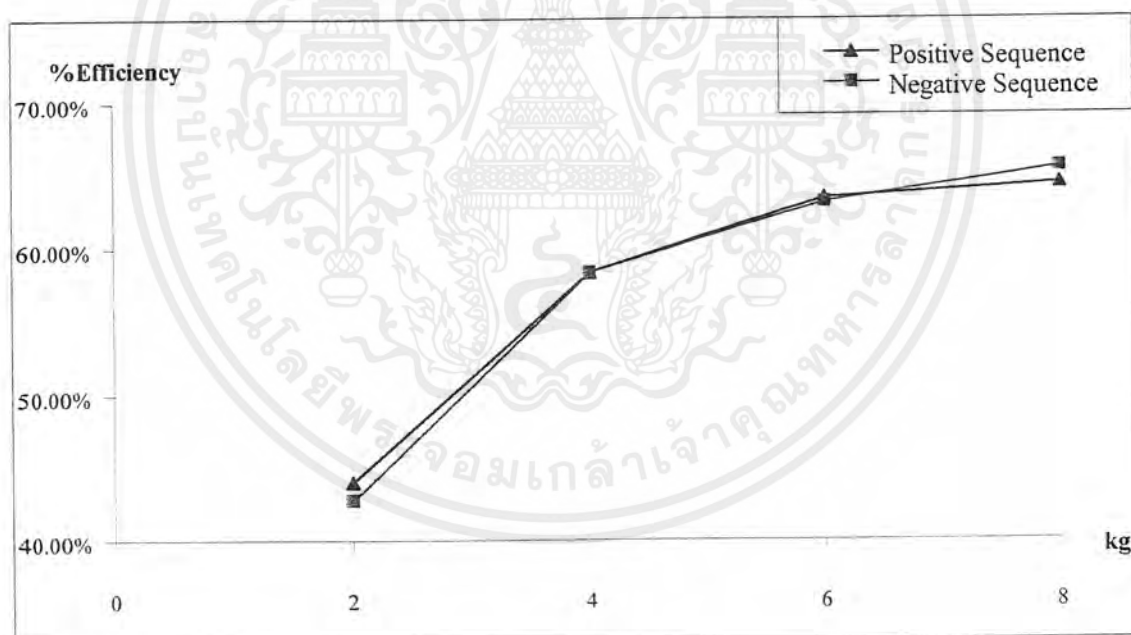


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ง)

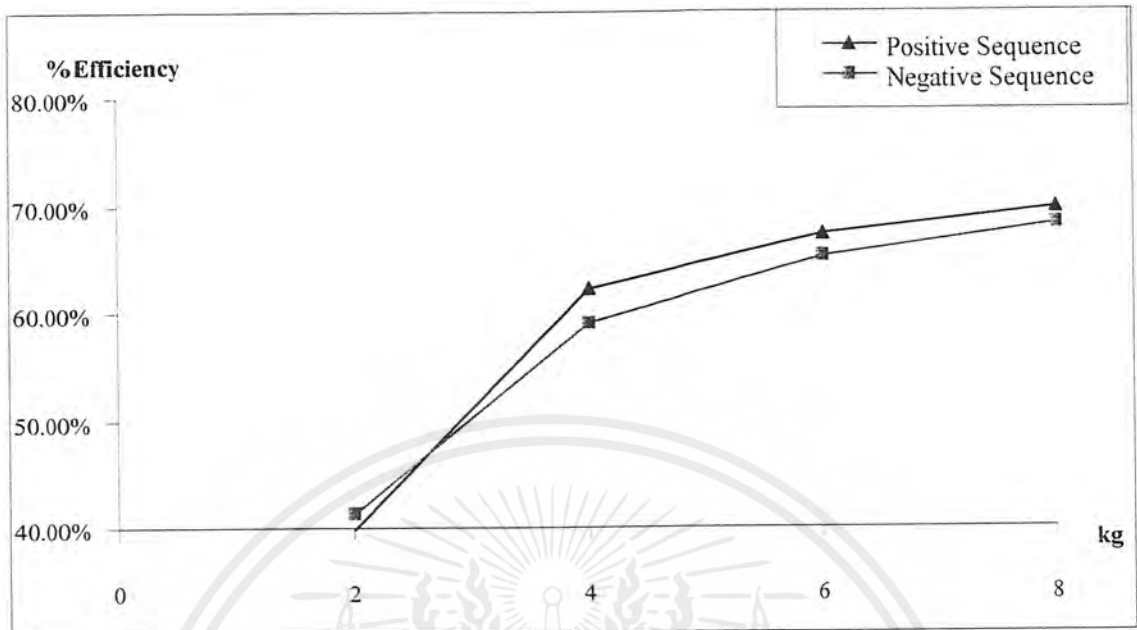
รูปที่ 10.16 (ก) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 5%

(ข) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 10%

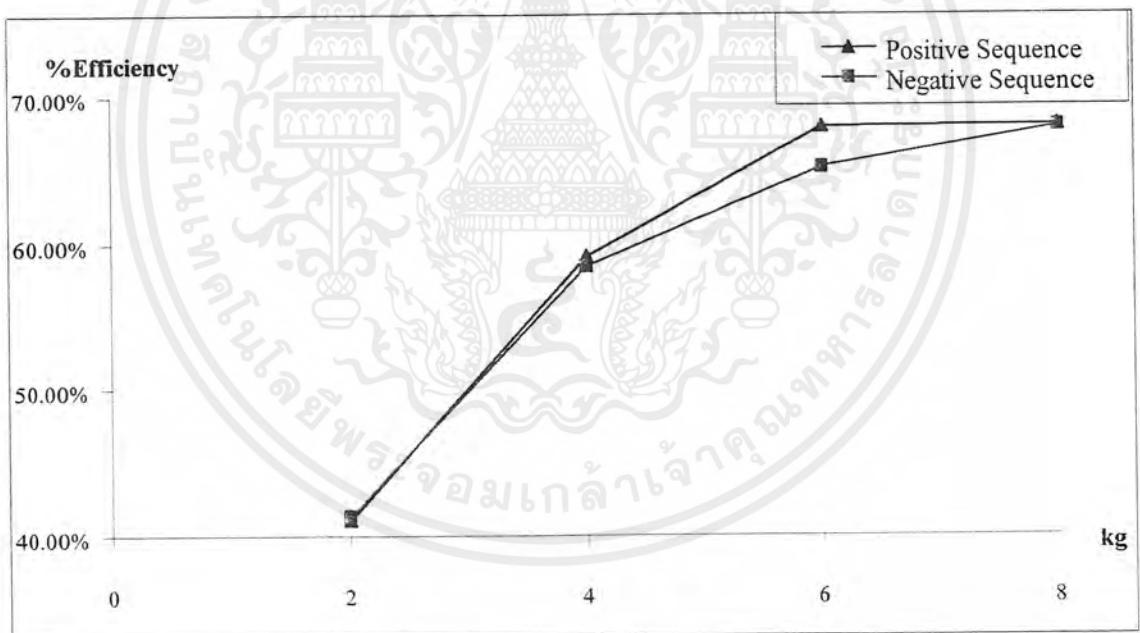
(ค) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 15%

(ง) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

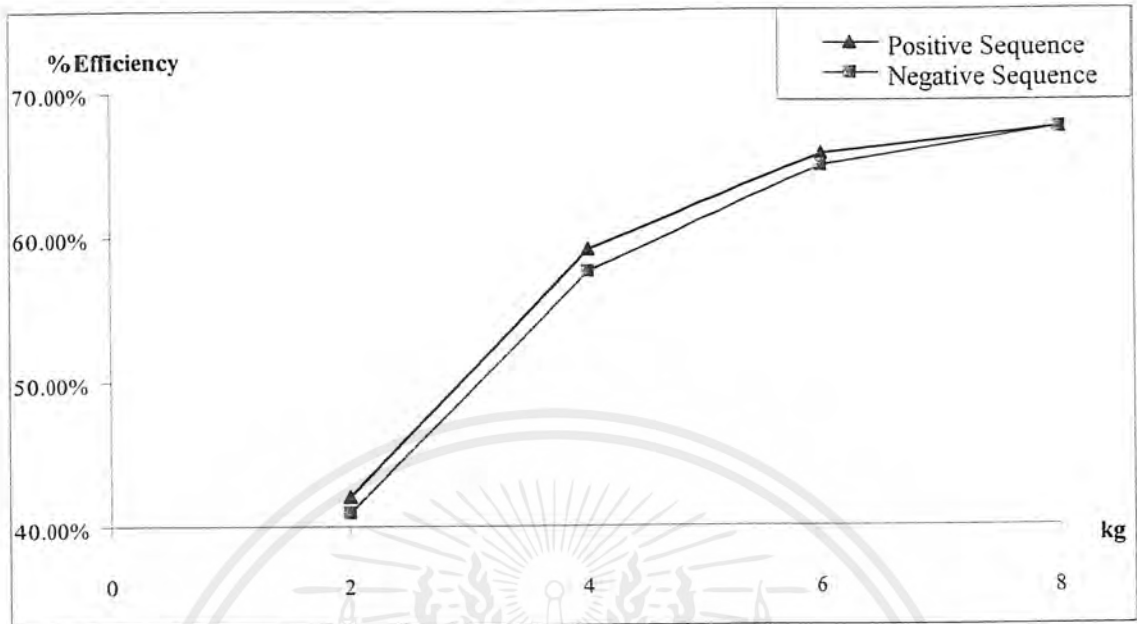


(ก)

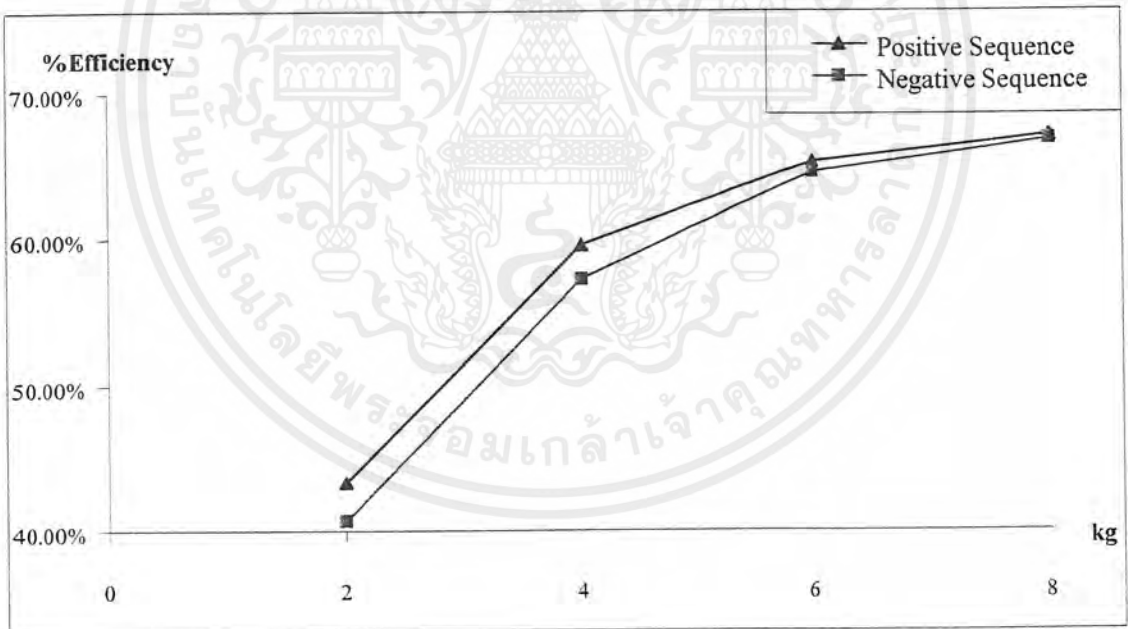


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ง)

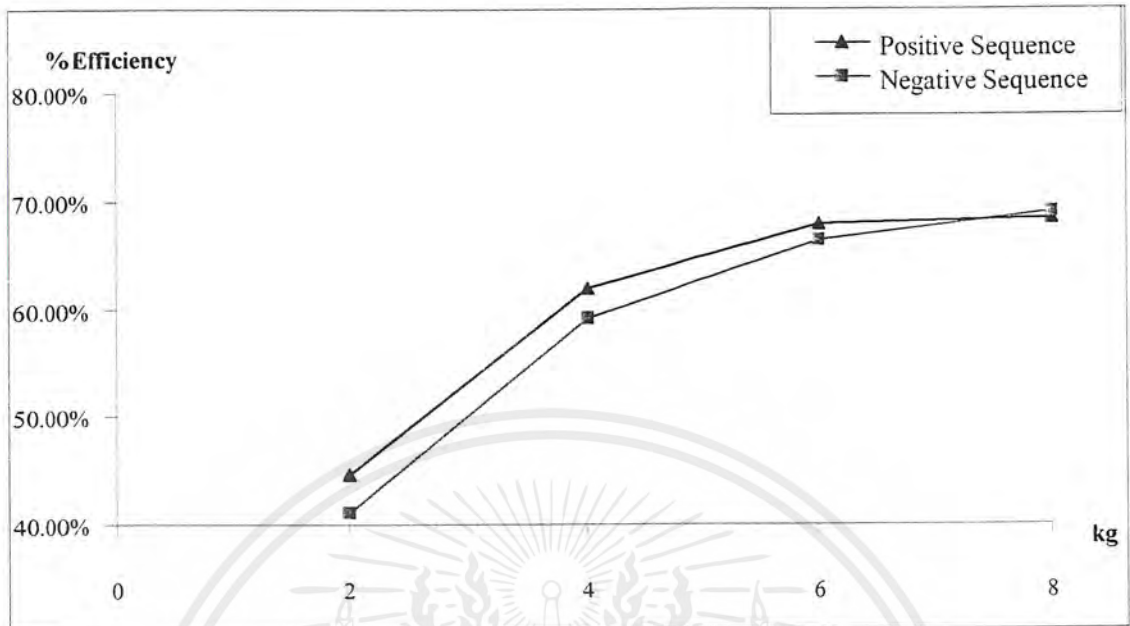
รูปที่ 10.17 (ก) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ที่ 5%

(ข) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ที่ 10%

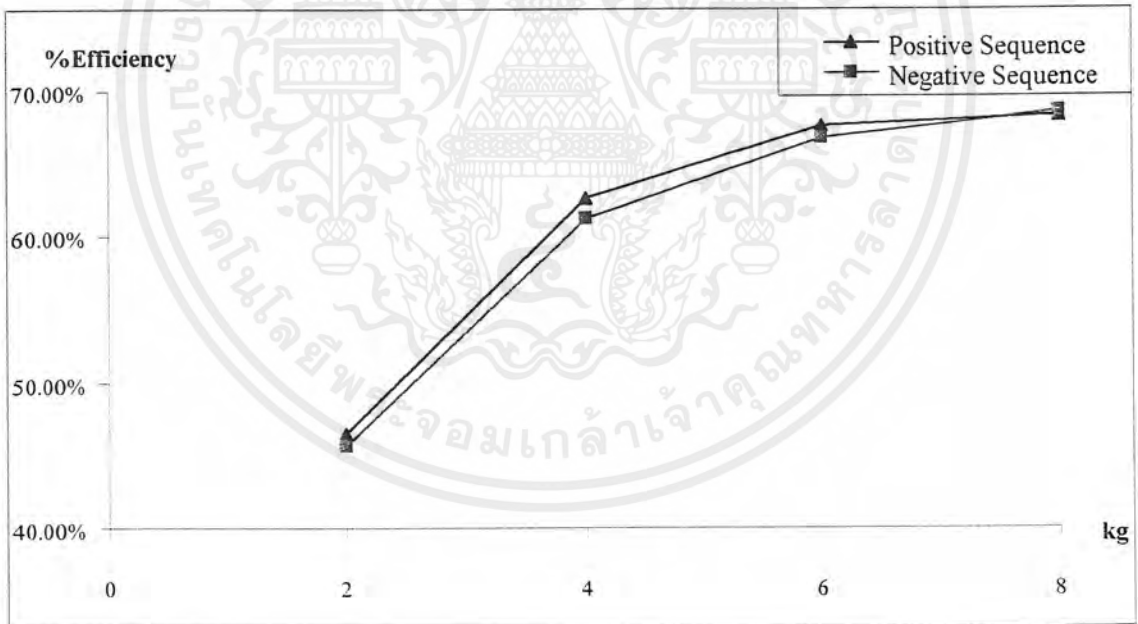
(ค) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ที่ 15%

(ง) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

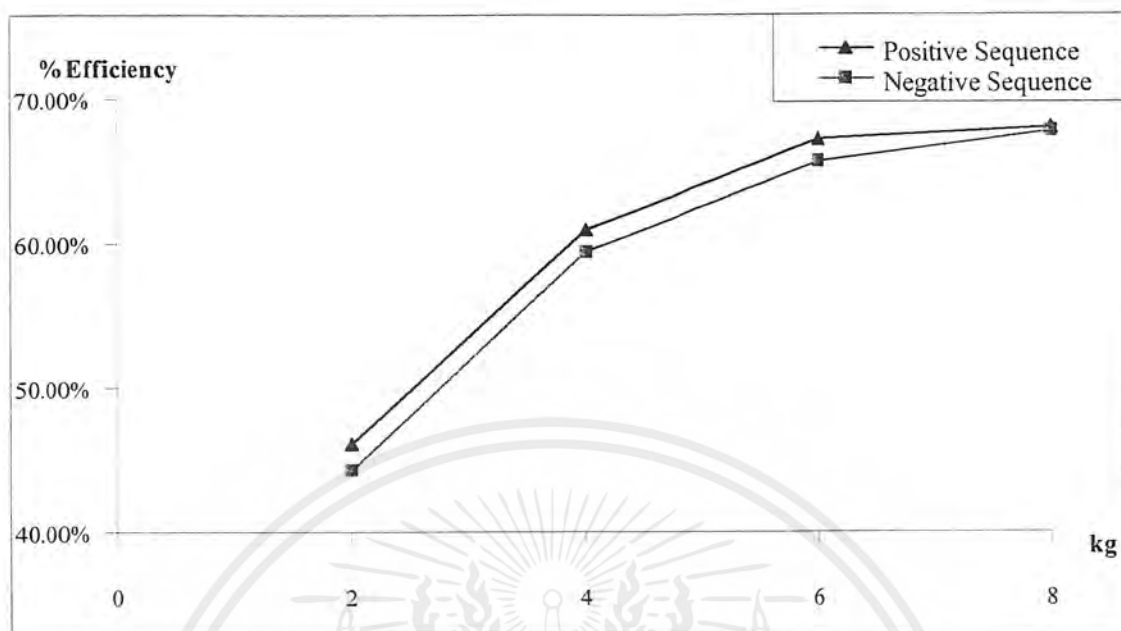


(ก)

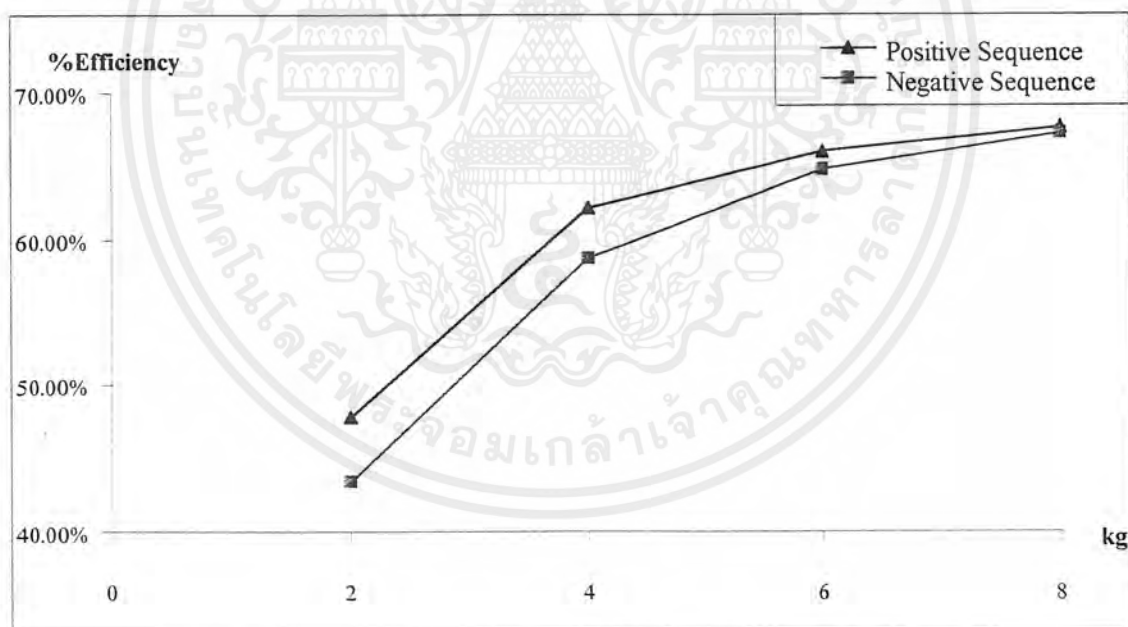


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ง)

รูปที่ 10.18 (ก) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 ที่ 5%

(ข) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 ที่ 10%

(ค) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 ที่ 15%

(ง) แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 ที่ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในข้างต้นของบทนี้ ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำจะพบว่า

1. ฮาร์โมนิกส์ลำดับแรก ๆ จะมีผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำมากกว่าฮาร์โมนิกส์ลำดับหลัง ๆ โดยเฉพาะที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 พบว่า จะมีฮาร์โมนิกส์ของกระแสลำดับที่ 2 เพิ่มขึ้นสูงมากกว่าที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับอื่น ๆ
2. ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำพบว่า ที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับแรก ๆ จะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำมากกว่าฮาร์โมนิกส์ลำดับหลัง ๆ โดยจากผลการทดลองพบว่า ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 จะมีค่าประสิทธิภาพต่ำที่สุด
3. ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีเควันมีแนวโน้มที่จะมีผลกระทบมากกว่าฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบโพสิทีฟซีเควัน สำหรับในการทดลองของบทนี้ จะมุ่งเน้นในแง่มุมของค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
4. ผลกระทบอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมาในข้างต้น ซึ่งพบเห็นในการทดลองได้แก่ การสั่นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยเฉพาะที่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 จะเกิดการสั่นอย่างเห็นได้ชัด

บทที่ 11

บทสรุปและวิจารณ์

11.1 บทสรุปของการทดลอง

ผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อโหลดความต้านทานหรือทั้งความต้านทานและความเหนี่ยวนำเป็นดังนี้

1. ฮาร์โมนิกส์ของกระแสจะมีค่าตามฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน
2. ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่ลำดับต่าง ๆ จะมีผลต่อฮาร์โมนิกส์ของกระแสเฉพาะที่ลำดับนั้น
3. สำหรับโหลดที่มีความเหนี่ยวนำจะมีผลของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 อยู่สำหรับผลกระทบฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเป็นดังนี้
 1. เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ของกระแสเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะฮาร์โมนิกส์ลำดับต้น ๆ
 2. ฮาร์โมนิกส์ลำดับต้น ๆ จะมีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำมากกว่าฮาร์โมนิกส์ลำดับที่สูงขึ้น
 3. ฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบเนกาทีฟซีแคว้นมีแนวโน้มว่า จะมีผลกระทบต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำมากกว่าฮาร์โมนิกส์แรงดันแบบโพสิทีฟซีแคว้น ในแง่ของประสิทธิภาพ
 4. ผลกระทบในด้านอื่น ๆ ได้แก่ การสั่นของมอเตอร์ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น

11.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

ได้แก่ เครื่องมือวัด เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้วัดในการทดลองจะใช้ได้ดีที่ความถี่ 50 Hz แต่ถ้ามีฮาร์โมนิกส์จะทำให้ค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อน เครื่องมือที่ใช้ควรจะต้องถูกออกแบบมาเพื่อใช้วัดค่าความถี่ที่สูง ๆ ได้ หรือ ใช้วัดฮาร์โมนิกส์ได้ เพื่อให้ค่าที่ทำการวัดได้ มีค่าถูกต้องและแม่นยำ

นอกจากนั้นการปรับค่าของฮาร์โมนิกส์แรงดันจะต้องทำอย่างระมัดระวัง มิฉะนั้นอาจจะเกิดความเสียหายต่อโหลดที่ใช้ทำการทดลอง และเป็นอันตรายแก่ผู้ทดลองได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์พิชิต ล้ำของ ที่ให้คำปรึกษา และความรู้ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์แก่
กลุ่มของข้าพเจ้าอย่างมากมาย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำที่ดี

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี(พี่ตัวเล็ก) และ คุณสมลักษณ์ มาฟัก(พี่เอ) เจ้าหน้าที่ภาค
วิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือที่ใช้ในการ
ทดลอง ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

และขอขอบคุณบุคคลอื่น ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด อาทิ

คุณ พงศิพงษ์ เลิศชัยมงคล ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำแนะนำทางด้าน
โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์

คุณวรชาติ แซ่ก๊ก นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และ คุณเฉลิมชัย เจ้าหน้าที่
ศูนย์พัฒนาและวิจัยทางวิศวกรรม ที่ให้คำแนะนำที่ดี และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

คุณลี ปีกเกโส และกลุ่มโปรเจค ที่ให้ความช่วยเหลือในการวัดค่าจนเสร็จสมบูรณ์

รวมทั้งเพื่อนภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกคน ที่ช่วยในการเคลื่อนย้ายเครื่องจักรกลไฟฟ้า ที่
ใช้การทำโปรเจคในครั้งนี้

กลุ่มของข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณ และรู้สึกซาบซึ้งใจเป็นอย่างยิ่ง

หนังสืออ้างอิง

- [1] A.E. Fitzgerald , Charles Kingsley Jr, Stephen D. Uman. “ Electrical Machinery” , Fifth Edition , McGraw-Hill , 1992
- [2] มงคล ทองสงคราม . “เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ” , พิมพ์ครั้งที่ 2
- [3] ไพศาล จิระเรืองวงศ์ , นิตพันธ์ คุณประเสริฐ , อนันต์ เล่นทัศน์ , “การศึกษาผลกระทบในการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ” , ปรินูญานิพนธ์ปีการศึกษา 2542 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] พิชิต ถ้ายอง “เครื่องจักรกลไฟฟ้า 2” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

