

การศึกษาผลกระทบของพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย

A STUDY OF EFFECTS OF PWM INVERTERS ON POWER QUALITY OF SOURCES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 49890

วัน, เดือน, ปี 2 12 2547

Library stamp box containing fields 'b.....' and 'i.....'.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของพีดับเบิลวีเอ็มอินเวอร์เตอร์ต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย

A STUDY OF EFFECTS OF PWM INVERTERS ON POWER QUALITY OF SOURCES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย


A STUDY OF EFFECTS OF PWM INVERTERS ON POWER QUALITY OF SOURCES

คณะผู้จัดทำ

1. นายทรงพล ลิมปเจต รหัสประจำตัว 42010124
2. นายวิสุทธิ ปลอดภัย รหัสประจำตัว 42010335
3. นายสมชาย นาชัยเงิน รหัสประจำตัว 42010359
4. นายสมโชค พรหมเพรา รหัสประจำตัว 42010360




อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.อานันท์ ฐานันท์)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลกระทบของพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่าย

นาย ทรงพล ลิ้มปเจต

นาย วิศุทธิ พลอดกภัย

นาย สมชาย นาชัยเงิน

นาย สมโชค พรหมเพรา

ผศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาร่วมอนิกส์ที่ถูกสร้างโดยวงจรขับเคลื่อนพีดับบลิวเอ็ม และ ศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ อย่างเช่นค่า THD_v และ THD_i บนตัวแหล่งจ่าย ในการจำลองวงจรจะใช้ โปรแกรม ORCAD และ MATLAB / Simulink ช่วยในการศึกษา ส่วนผลของการจำลองที่ได้จะถูกนำไป เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริง และถูกนำมาใช้ในการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อที่จะนำไปปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A study of effects of PWM inverters on power quality of sources

Songphon Limpajate

Visutti Plodphai

Somchai Nachaingern

Somchok Promprao

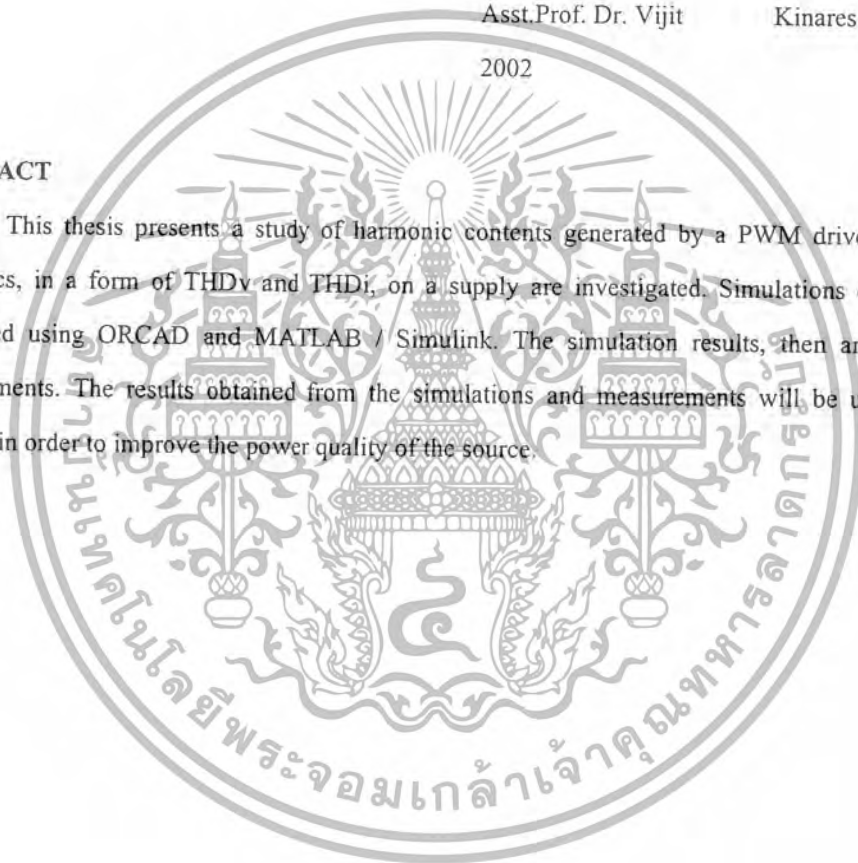
Asst.Prof. Dr. Anantawat Kunakorn Advisor

Asst.Prof. Dr. Vijit Kinarees Co-advisor

2002

ABSTRACT

This thesis presents a study of harmonic contents generated by a PWM drive. Effects of such harmonics, in a form of THDv and THDi, on a supply are investigated. Simulations of the system are performed using ORCAD and MATLAB / Simulink. The simulation results, then are compared with measurements. The results obtained from the simulations and measurements will be used to design an inductor in order to improve the power quality of the source.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกันบุคคลที่ต้องกล่าวถึงเพราะมีส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาบัตรนี้เสร็จลงได้ก็คือ ผศ.ดร.อนันต์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ผศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมปริญญาบัตร และ นายวีระ รัตนภิรักษ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้คณะผู้จัดทำวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา ของคณะผู้จัดทำทุกคน ซึ่งได้เลี้ยงดูคณะผู้จัดทำมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ พวกข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสูงสุด ประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	
สารบัญตาราง	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 ขอบเขต	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ส่วนประกอบต่างๆในวงจรทดสอบ	3
2.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (Full wave rectifier)	3
2.1.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 1 เฟส	3
2.1.2 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส	4
2.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 1 เฟสและชนิด 3 เฟส	6
2.2 ดีซีลิงค์ (DC link)	6
2.2.1 การกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor filter)	6
2.3 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)	7
2.3.1 ประเภทของอินเวอร์เตอร์	7
2.3.1.1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current-Source Inverter : CSI)	7
2.3.1.2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter : VSI)	7
2.3.2 พัลส์บลิวเอมอินเวอร์เตอร์ (PWM Inverter)	8
2.3.2.1 Pulse Width Modulation	8
2.3.2.2 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)	8
2.3.2.3 Space Vector Modulation PWM;SVM	9
2.3.3 การมอดดูเลชัน (Modulation)	12
2.3.3.1 การมอดดูเลชันเชิงเส้น	12
2.3.3.2 การมอดดูเลชันไม่เป็นเชิงเส้น	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)	13
3.1 ศัพท์และปริมาณต่างๆ	13
3.1.1 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)	13
3.1.2 กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Current)	14
3.1.3 แรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Voltage)	14
3.1.4 ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor) DF	15
3.1.5 ลำดับฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Order)	16
3.1.6 ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)	16
3.2 ประเภทของฮาร์โมนิกส์	16
3.2.1 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)	16
3.2.2 อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Inter Harmonics)	17
3.2.3 ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonics)	17
3.2.4 ฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonics)	19
3.2.5 ฮาร์โมนิกส์ที่หารสามลงตัว (Triple Harmonics)	20
3.3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Sources)	20
3.4 ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonics distortion)	20
3.5 การประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonics distortion evolution)	23
3.5.1 ขีดจำกัดกระแสเพี้ยน (Current distortion limits)	23
3.5.2 ขีดจำกัดแรงดันเพี้ยน (Voltage distortion limits)	25
บทที่ 4 การแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกส์	26
4.1 การกรองแรงดันด้วยตัวเหนี่ยวนำ (Inductor filter)	26
4.2 ผลจากการต่อใช้ค (Choke)	27
บทที่ 5 ผลการทดลอง	29
5.1 อุปกรณ์การทดลอง	29
5.2 ขั้นตอนการทดลอง (1)	29
5.3 แสดงวิธีคิดค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบมอเตอร์ 3 เฟส	29
5.4 ขั้นตอนการทดลอง (2)	33
5.5 การหาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย	34
5.6 ตารางผลการทดลอง	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.7 การจำลองวงจรใน โปรแกรม ORCAD และ MATLAB เปรียบเทียบกับค่าวัดจริง	62
บทที่ 6 บทวิจารณ์และสรุป	82
6.1 สรุปผลการทดลอง	82
6.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง	82
6.3 แนวทางในการพัฒนา	82
ภาคผนวก	83
บรรณานุกรม	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	3
2.2	4
2.3	5
2.4	9
2.5	10
2.6	11
2.7	12
3.1	13
3.2	13
3.3	14
3.4	17
3.5(a)	18
3.5(b)	18
3.5(c)	19
3.6	20
3.7	23
3.8	23
4.1	27
5.1	32
5.2	33
5.3	62
5.4	63
5.5	64
5.6	65
5.7	66
5.8	67
5.9	68
5.10	69
5.11	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.12	71
5.13	72
5.14	73
5.15	74
5.16	75
5.17	76
5.18	77
5.19	78
5.20	79
5.21	80
5.22	80
5.23	81
5.24	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	6
3.1	24
ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992	
3.2	24
ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992	
3.3	25
5.1	34
5.1.1.1	35
5.1.1.2	36
5.1.1.3	37
5.1.1.4	38
5.1.2.1	39
5.1.2.2	40
5.1.2.3	41
5.1.2.4	42
5.1.3.1	43
5.1.3.2	44
5.1.3.3	45
5.1.3.4	46
5.2.1.1	47
5.2.1.2	48
5.2.1.3	49
5.2.1.4	50
5.2.2.1	51
5.2.2.2	52
5.2.2.3	53
5.2.2.4	54
5.2.3.1	55
5.2.3.2	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
5.2.3.3	ข้อมูลเอาร์ทพุทใส่โซ้คที่ 30 Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ	57
5.2.3.4	ค่าเฉลี่ยข้อมูลเอาร์ทพุทใส่โซ้คที่ 30 Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ	58
5.3.1.1	ข้อมูลTHDi มีโซ้คภาระ 10-90 % ที่ความถี่ 50 Hz เฟส A	59
5.3.1.2	ข้อมูลTHDi มีโซ้คภาระ 10-90 % ที่ความถี่ 50 Hz เฟส B	59
5.3.1.3	ข้อมูลTHDi มีโซ้คภาระ 10-90 % ที่ความถี่ 50 Hz เฟส C	59
5.3.2.1	ข้อมูลTHDi มีโซ้คภาระ 10-90 % ที่ความถี่ 40 Hz เฟส A	60
5.3.2.2	ข้อมูลTHDi มีโซ้คภาระ 10-90 % ที่ความถี่ 40 Hz เฟส B	60
5.3.2.3	ข้อมูลTHDi มีโซ้คภาระ 10-90 % ที่ความถี่ 40 Hz เฟส C	60
5.3.3.1	ข้อมูลTHDi มีโซ้คภาระ 10-90 % ที่ความถี่ 30 Hz เฟส A	61
5.3.3.2	ข้อมูลTHDi มีโซ้คภาระ 10-90 % ที่ความถี่ 30 Hz เฟส B	61
5.3.3.3	ข้อมูลTHDi มีโซ้คภาระ 10-90 % ที่ความถี่ 30 Hz เฟส C	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

อิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังอย่างต่อเนื่องและกว้างขวางมากขึ้น นับตั้งแต่มีเทคโนโลยีที่ทันสมัยเข้ามาช่วยซึ่งเราสามารถนำมาใช้ในการควบคุมพลังงานไฟฟ้าได้ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งความก้าวหน้าในการใช้ลักษณะการควบคุมของมันเข้ากับการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของพลังงานในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้ถูกนำมาใช้งานในส่วนของ Adjustable Speed Drives (ASDs) อย่างกว้างขวางมากขึ้นในช่วงความเร็วและโหลดที่หลากหลายมากขึ้น ASDs ในปัจจุบันมีการนำ Pulse Width Modulation Voltages Source Inverter (PWM-VSI) มาประยุกต์ใช้ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทแรงม้าต่ำถึงปานกลาง เช่นเดียวกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ASDs นั้นเป็นพวกโหลดไม่เชิงเส้นของระบบกำลังไฟฟ้าซึ่งจะสร้างฮาร์มอนิกส์ (Harmonics) ออกมา รบกวนการทำงานของระบบอื่นๆ ที่ทำงานร่วมกันที่จุดต่อร่วมระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า (Point of Common Coupling :PCC)

ในขณะที่หลายๆกรวิจัยได้ทำการศึกษาทางด้านกระแสและฮาร์มอนิกส์ ซึ่งถูกสร้างโดย current source converters แต่มีการศึกษาน้อยมากในส่วนของ PWM-VSI ASDs ซึ่งมาตรฐาน IEEE 519 ที่ใช้กันอยู่แพร่หลายในขณะนี้มีการวิจัยทางด้าน current source converter อย่างกว้างขวางมากแต่กลับมีข้อสรุปทางด้าน voltage source converter ไม่มากนัก

ในทางปฏิบัติแล้วระบบกำลังไฟฟ้านั้นได้รับผลกระทบจากการรบกวนต่างๆ เช่น voltage unbalance, frequency variation, voltage fluctuation นอกจากนี้ก็ยังมี การผิดเพี้ยนของแรงดัน (voltage distortion) อีกด้วย ซึ่งจากการผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ถ้ามีสูงมาก ก็จะส่งผลกระทบต่อระบบอื่นๆ ที่ใช้แหล่งจ่ายร่วมกันที่จุด PCC ทำงานไม่เป็นปกติเช่นหม้อแปลงไฟฟ้าร้อนมากกว่าปกติ, เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานก่อนถึงพิกัด เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ถือเป็นปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งจะต้องมีการศึกษาทำความเข้าใจให้ชัดเจนถึงแหล่งกำเนิดที่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกส์ และแนวทางในการแก้ไขลดปริมาณ ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นลงเพื่อประสิทธิภาพของคุณภาพกำลังไฟฟ้า

1.1 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 ศึกษาการฉีดฮาร์มอนิกส์จากตัว Adjust Speed Drives (ASDs) – Voltage Source Inverter (VSI)
- 1.1.2 ศึกษาและออกแบบใช้ค่านำอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกส์
- 1.1.3 ศึกษาเปรียบเทียบการต่อไอซ์ต์ และไม่ต่อ ไอซ์ต์ ด้านหน้าอินเวอร์เตอร์
- 1.1.4 ศึกษาการลดฮาร์มอนิกส์ เปรียบเทียบมาตรฐาน IEEE 519

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ขอบเขต

ในปฏิญานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของเครื่องปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) ต่อกับแหล่งจ่ายอินพุทของการไฟฟ้า โดยใช้การจำลองในโปรแกรม ORCAD ในภาคการศึกษาที่ 1 และโปรแกรม MATLAB/Simulink ในภาคการศึกษาที่ 2 และทำการเปรียบเทียบกับกรณีทดลองจริง ซึ่งพิจารณาถึงการต่อไอช้ค (choke) ที่ด้านหน้าของระบบขับเคลื่อนเพื่อให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการลดปริมาณฮาร์มอนิกส์ซึ่งส่งผลกระทบต่อแหล่งจ่ายอินพุท

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกส์ราคาถูก และการใช้งานในระบบกำลังไฟฟ้าส่วนย่อย ซึ่งจะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบอุตสาหกรรมในประเทศ และทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศในอนาคตต่อไป

1.3.2 ตระหนักถึงความสำคัญของปัญหาฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าในปัจจุบัน และจะมีแนวโน้มว่าจะทวีความรุนแรงมากขึ้นในภายภาคหน้า

1.3.3 ได้ศึกษาและเรียนรู้ในการออกแบบ ไอช้คในการแก้ปัญหาการเกิดฮาร์มอนิกส์รู้จักการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นขณะทำโครงการวิศวกรรม

1.4 วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินงานในโครงการนี้เริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงการ ซึ่งเรื่องหลักๆอยู่ 3 เรื่องก็คือ ส่วนประกอบต่างๆในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ทฤษฎีพื้นฐานของฮาร์มอนิกส์ และวิธีแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกส์ ซึ่งมีรายละเอียดดังในบทที่ 2, 3 และ 4 จากนั้นก็จะนำเอาความรู้ที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดมาทำการจำลองวงจรในโปรแกรม ORCAD และ MATLAB / Simulink แล้วทำการทดลองจริงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน ในขณะมีไอช้ค และไม่มีไอช้คที่สภาวะโหลดต่างๆกัน ซึ่งมีรายละเอียดในบทที่ 5 และนำผลการทดลองทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์และสรุป ซึ่งมีรายละเอียดในบทที่ 6

บทที่ 2

ส่วนประกอบต่างๆในวงจรทดสอบ

2.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier)

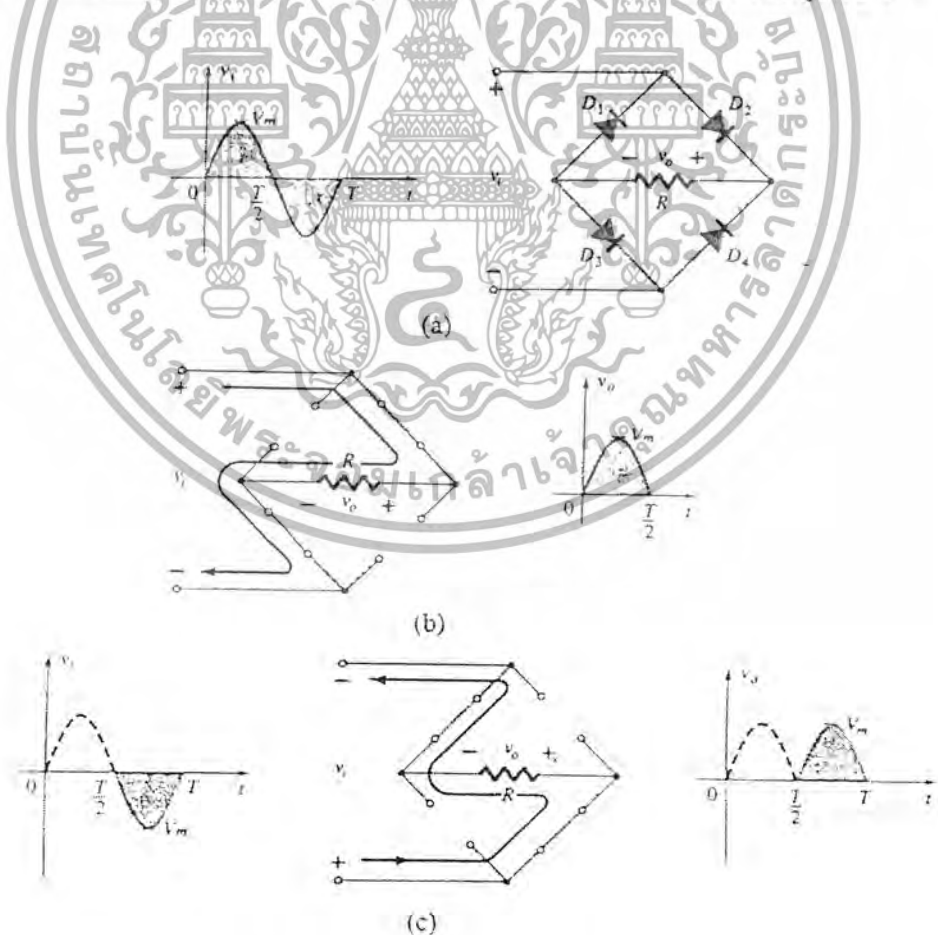
วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น หมายถึง วงจรที่ได้รับไฟ AC จำนวน 1 ไซเคิล แล้วเปลี่ยนไปเป็นรูปคลื่นเอาต์พุตที่มีค่าเฉลี่ยครบ 1 ไซเคิล แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier)
- วงจรเรียงกระแสแบบหม้อแปลงแทปกลาง (Center-tapped Transformer)

ในวงจรที่กำลังศึกษานี้จะกล่าวถึงวงจรแรกคือแบบบริดจ์

2.1.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 1 เฟส

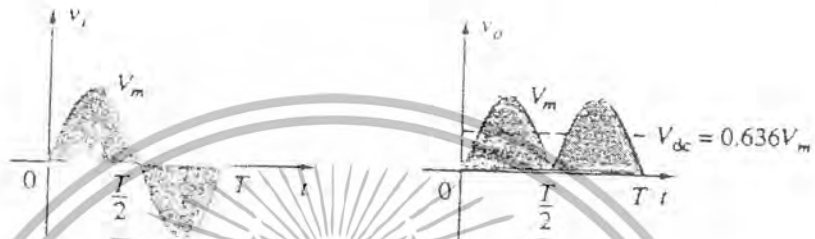
เป็นวงจรเรียงกระแสที่ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว ต่อวงจรเหมือนกับวงจรบริดจ์ดังรูปที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจ่ายสัญญาณแรงดันอินพุตให้กับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์รูป a ขณะสัญญาณบวกเข้าสู่ขั้ววงจร D2 และ D3 จะได้รับไบอัสตรง ส่วน D1 และ D4 จะได้รับไบอัสกลับ ทำให้ D2 และ D3 เปรียบเสมือนลัควงจร โดย D1 และ D4 เปิดวงจร ทำให้ได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตเป็นดังรูปที่ (1) b ในทำนองเดียวกัน ขณะสัญญาณลบเข้าสู่ขั้ววงจร D1 และ D4 จะได้รับไบอัสตรง ส่วน D2 และ D3 ได้รับไบอัสกลับ ทำให้ D1 และ D4 ลัควงจร โดย D2 และ D3 เปิดวงจร ทำให้ได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตดังรูป c

เมื่อนำสัญญาณแรงดันอินพุตและแรงดันเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกันจะได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบสัญญาณแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 1 เฟส

2.1.2 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส

เมื่อต้องการกำลังไฟตรงหลายกิโลวัตต์ เราจะนิยมใช้วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ซึ่งจะให้ค่าความพริ้ว (ripple) ตกลงและใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกรองมีค่าลดลงด้วย รูปที่ 5.7 แสดงวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ไดโอด ซึ่งมี RC เป็นโหลด ไดโอดจะนำกระแสเป็นคู่ๆ โดยมีลำดับการนำกระแสดังนี้ $D_6, D_1, D_4, D_3, D_2, D_5, D_8, D_7, D_6, \dots$ แรงดันด้านแหล่งจ่าย ซึ่งมีค่าสูงสุดในช่วงเวลานั้นๆ เช่น เมื่อแรงดันสาย v_{12} มีค่าสูงสุด ไดโอด D_6, D_1 จะนำกระแสในช่วงมุม 60 องศา ถัดไป v_{13} มีค่าสูงสุด และไดโอด D_1, D_2 จะนำกระแส รูปที่ 5.7(ข) แสดงวงจรสมมูล ซึ่งมีแหล่งแรงดัน $v_{\phi\phi}$ เป็นรูปคลื่น 6 พัลส์ ดังรูปที่ 5.7(ค) ความเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลมีค่าเท่ากับ $2L_c$ ส่วนไดโอด D ของวงจรสมมูลมีไว้เพื่อแสดงให้เห็นว่ากระแส i_d ไหลได้ทางเดียวเหมือนในวงจรเรียงกระแส

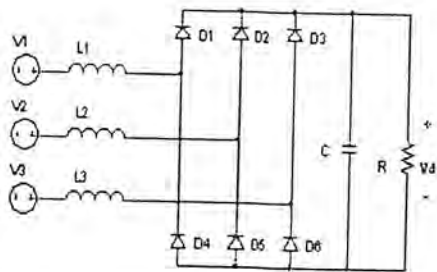
ในกรณีแรกเราอาจศึกษาวงจรโดยละเลยผลของ L_c นั่นคือคำนวณมุมที่กระแส i_d ลดค่าเป็นศูนย์ด้วยวิธีทำซ้ำ (iteration) หรือทำการคำนวณโดยใกล้เคียงคือสมมติว่าค่าความพริ้ว $\Delta V / \sqrt{3}V_m$ มีค่าน้อยมาก จนสมมติได้ว่ามุมที่ C คายประจุมีค่าเกือบเท่ากับ $\pi/3$ เราคำนวณค่า $\langle v_d \rangle$ และ ΔV ได้ ในทำนองเดียวกันกับสมการที่ (2.1) และ (2.2) ดังนี้

$$\langle v_d \rangle = \sqrt{3}V_m - \Delta V / 2 \tag{2.1}$$

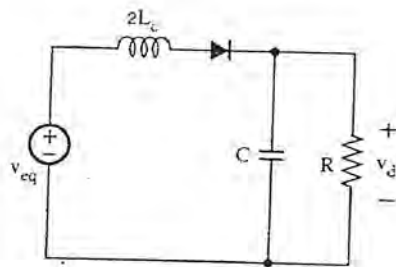
และ
$$\Delta V = \frac{\langle v_d \rangle}{6RCf} = \frac{\langle i_d \rangle}{6Cf} \tag{2.2}$$

ซึ่งให้ค่าความต้านทานภายในสมมูลเท่ากับ $1/12Cf$

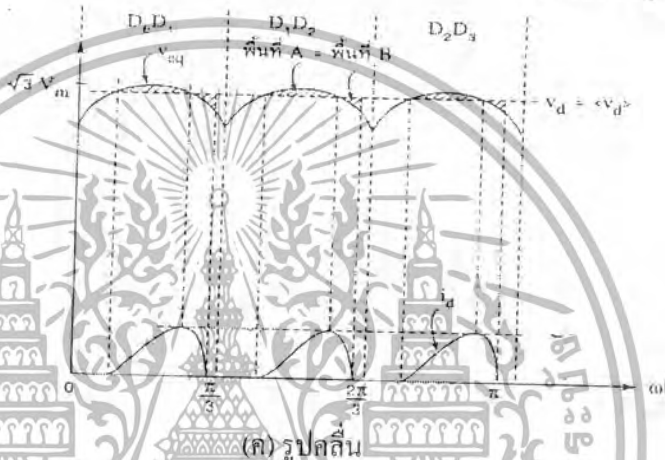
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วงจร



(ข) วงจรสมมูล



(ค) รูปคลื่น

รูปที่ 2.3 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ไดโอดกรณี RC เป็นโหลด

ในกรณีที่สอง ซึ่งเราคำนึงถึงผลของ L_c เราจะตั้งสมมติฐานว่า C มีค่าใหญ่มากจน v_d มีค่าคงตัวเท่ากับ $\langle v_d \rangle$ การวิเคราะห์ห้วงจรและรูปคลื่นของกระแสและแรงดันเป็นดังรูปที่ 2.3 (ค) เราอาจใช้วิธีทำซ้ำเพื่อคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง $\langle v_d \rangle$ กับ $\langle i_d \rangle$

รูปคลื่นของกระแสสายเช่น i_1 จะเท่ากับ i_u ในช่วงที่ D_1 นำกระแส (เป็นพัลส์บวก 2 พัลส์รูปกระแสเช่นนี้ดูได้จากรูปที่ 5.7(ค)) และเท่ากับ $-i_u$ ในช่วงที่ D_4 นำกระแส (เป็นพัลส์ลบ 2 พัลส์) รูปกระแสเช่นนี้ยังมีฮาร์มอนิกส์สูงเหมือนในกรณีวงจรเรียงกระแส 1 เฟส ดังนั้นตัวประกอบกำลังจะมีค่าต่ำระหว่าง 0.5 ถึง 0.8 โดยขึ้นอยู่กับ $L_c \omega \langle i_d \rangle$ เหมือนในกรณีวงจรเรียงกระแส 1 เฟส อย่างไรก็ตาม ค่าตัวประกอบกำลังกรณี 3 เฟสจะยังสูงกว่ากรณี 1 เฟส ความถี่ของค่าความพริ้ว ในกรณีบริดจ์ 3 เฟสมีค่าเท่ากับ 300 Hz ซึ่งสูงกว่ากรณีบริดจ์ 1 เฟสอยู่สามเท่า อีกทั้งแหล่งแรงดันสมมูล (v_{eq} ในรูปที่ 2.3 (ข)) มีองค์ประกอบไฟสลับน้อยกว่ากรณีบริดจ์ 1 เฟส ทำให้องค์ประกอบค่าความพริ้วของวงจรบริดจ์ 3 เฟสมีค่าน้อยกว่าวงจรบริดจ์ 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การเปรียบเทียบระหว่างวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 1 เฟส และชนิด 3 เฟส

จากคุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 1 เฟส และชนิด 3 เฟสที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เราอาจสรุปเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.1 นี้

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 1 เฟส และชนิด 3 เฟส

	วงจรเรียงกระแสชนิด 1 เฟส	วงจรเรียงกระแสชนิด 3 เฟส
กระแสไลน์	มีความเพี้ยนมากกว่า	มีความเพี้ยนน้อยกว่า
เพาเวอร์แฟคเตอร์	มีค่าน้อยกว่า	มีค่ามากกว่า
ค่าความพริ้ว(Ripple)	มีความพริ้วมากกว่า	มีความพริ้วน้อยกว่า
คาปาซิเตอร์	ต้องการขนาดใหญ่กว่า	ต้องการขนาดเล็กกว่า
โวลต์เทจเลกดูเรชั่น(DC)	ภาระเต็มกำลังมีค่าความเพี้ยนจากไม่มีภาระมากกว่า 5%	ภาระเต็มกำลังมีค่าความเพี้ยนจากไม่มีภาระประมาณ 5%

จากตารางที่ 2.1 เราจึงนิยมใช้วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟส ถ้าไม่คิดขั้วต่อในสถานที่บางแห่ง เช่น บ้านที่อยู่อาศัยจะมีไฟฟ้าใช้เพียง 1 เฟส และถ้าไม่คิดขั้วต่อแรงดันไฟตรงกรณีเรียงกระแสแบบบริดจ์ชนิด 3 เฟสอาจจะมีค่าสูงเกินไป (เกือบเท่ากับ $\sqrt{3}V_{\phi}$ ซึ่งก็สูงกว่ากรณี 1 เฟสประมาณ $\sqrt{3}$ เท่า)

2.2 ดีซีลิงค์ (DC Link)

DC link ในวงจรที่ศึกษาี้คือตัวเก็บประจุที่นำมาต่อขนานในวงจรหรือที่เรียกว่า Capacitor filter นั่นเอง

2.2.1 การกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ (Capacitor filter)

ความพริ้วของแรงดันมีผลเสมือนกับการจ่ายกระแสไหลกลับเป็นรูปพัลส์ ความพริ้วของแรงดันนี้สามารถทำให้ลดลงได้ถ้ามีพลังงานบางส่วนที่เอาท์พุทถูกเก็บไว้พร้อมที่จะจ่ายออก เมื่อถึงจังหวะที่ไม่มีพลังงานจ่ายออกจากตัวเรกติไฟเออร์ ซึ่งหลักการนี้เป็นหลักการเบื้องต้นของวงจรกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ

วงจรกรองแรงดันแบบนี้ประกอบด้วยตัวเก็บประจุต่อเชื่อมคร่อมเอาท์พุท ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เก็บประจุไว้ในตัวมัน ในขณะที่แรงดันเอาท์พุทเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าสูงสุดด้วย เมื่อแรงดันเอาท์พุทลดลงมาเป็นศูนย์ ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ช่วยจ่ายประจุให้ไหลลดทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งแรงดันเอาท์พุทของเรกติไฟเออร์มีค่ามากกว่าก็จะประจุเข้าไปยังตัวเก็บประจุอีกครั้งเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ดีอัตราการคายประจุจะเป็นไปอย่างช้าๆ ดังนั้นแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจึงยังไม่ลดลงมาถึงศูนย์กระแสจากรกติไฟเออร์ก็จะมาประจุให้กับตัวเก็บประจุอีกครั้ง เพื่อให้การกรองแรงดันได้เรียบยิ่งขึ้นตัวเก็บประจุจะต้องมีค่ามาก โดยทั่วไปจึงใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลติก ปกติวงจรกรองแรงดันแบบนี้ไม่สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดได้เป็นจำนวนมากทั้งนี้เพราะถูกจำกัดด้วยจำนวนประจุที่ถูกสะสมไว้ที่ตัวเก็บประจุ เมื่อตัวเก็บประจุต้องจ่ายประจุให้โหลดจะทำให้แรงดันคร่อมตัวมันลดค่าลงอย่างรวดเร็วกว่าก่อนที่จะรับประจุอีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ค่าความพั่วมีค่าสูงและแรงดันเอาต์พุตจะลดค่าลง

2.3 อินเวอร์เตอร์ (INVERTER)

วงจรอินเวอร์เตอร์ คือวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ที่ต้องการ นั่นคือแรงดันเอาต์พุตอาจคงที่ หรือแปรค่าได้ที่มีความถี่คงที่หรือความถี่แปรค่าได้

2.3.1 ประเภทของอินเวอร์เตอร์

แบ่งได้เป็นสองประเภทคือ

- อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส (Current-Source Inverter : CSI)
- อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน (Voltage-Source Inverter : VSI)

โดยอินเวอร์เตอร์ทั้งสองแบบนี้จะมีคุณสมบัติ ลักษณะรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่แตกต่างกัน และเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปด้วย

2.3.1.1 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายกระแส

มีข้อดีคือ ลักษณะของแรงดันเอาต์พุตจะมีรูปร่างเข้าใกล้รูปไซน์ แต่จะมีข้อจำกัดทางด้านช่วงความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถปรับได้ค่อนข้างต่ำ และไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะไร้โหลด นอกจากนี้ขนาดของดีซีลิงค์อินดักเตอร์ และตัวเก็บประจุจะใหญ่ทำให้อินเวอร์เตอร์แบบนี้มีขนาดใหญ่ ราคาแพง การตอบสนองของไดรฟ์ค่อนข้างช้า และมีแนวโน้มว่าจะมีเสถียรภาพที่โหลดต่ำ

2.3.1.2 อินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน

โครงสร้างดีซีลิงค์มีขนาดตัวเก็บประจุที่มีค่ามาก อาจกล่าวได้ว่าแรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ ทำให้แรงดันอินพุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ไม่ขึ้นอยู่กับโหลด และโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ 6-step อินเวอร์เตอร์ และพีดับเบิลเอ็มอินเวอร์เตอร์ (ซึ่งใช้ในโครงงานนี้) ข้อดีของอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดันคือ สามารถควบคุมความถี่และแรงดันได้ง่าย ปรับความถี่ได้ในย่านกว้าง ส่วนข้อเสียคือมักมีปัญหาในเรื่องของการลัดวงจรของอุปกรณ์สวิทซ์ในกิ่งเดียวกันของอินเวอร์เตอร์ ในทางปฏิบัติใช้วงจรล็อกเอาต์ (Lock Out Circuit) ที่มีการสร้างเดดไทม์ (Dead Time) เป็นส่วนช่วยในการ

ป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 พีดีบีบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ (PWM Inverter)

พีดีบีบลิวเอ็ม (Pulse Width Modulation : PWM) คือ สัญญาณที่มีความถี่คงที่ และสามารถเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ (Pulse) ได้ตามต้องการ ซึ่งทำให้จังหวะเปิด (on) และปิด (off) ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิตช์ (switching) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย พีดีบีบลิวเอ็มเป็นเทคนิคการแบ่งรูปคลื่นใน 1 คาบ ออกเป็นพัลส์โดยที่แต่ละพัลส์อาจมีความกว้างพัลส์ไม่เท่ากัน แบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

2.3.2.1 Pulse Width Modulation

เป็นการนำเอาเทคนิคการควบคุมความกว้างของพัลส์ นำมาเปิดปิดสวิตช์หลายๆ ครั้งในครึ่งคาบเวลา แต่จะทำให้ฮาร์มอนิกอันดับต่ำสูงขึ้นซึ่งสามารถกรองออกได้ การควบคุมระดับแรงดันเอาท์พุททำได้โดยการควบคุมความกว้างของพัลส์โดยสัญญาณที่จะนำไปควบคุมการเปิดปิดสวิตช์จะสร้างจากการเปรียบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยมกับสัญญาณไฟตรง ฮาร์มอนิกที่มีระดับต่ำกว่าจำนวนพัลส์ในครึ่งคาบจะเป็นการเพิ่มขนาดของฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ ก็ตามแต่สามารถกรองฮาร์มอนิกดังกล่าวออกได้

2.3.2.2 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

วิธีการสร้างสัญญาณควบคุมแบบพีดีบีบลิวเอ็มจะทำให้ความกว้างของพัลส์มีค่าเท่ากันซึ่งมีข้อจำกัดในการกำจัดฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่างๆ เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวจึงใช้วิธีสร้างสัญญาณให้มีความกว้างของพัลส์แต่ละพัลส์ไม่เท่ากัน เทคนิคที่เป็นที่นิยมมากได้แก่

Sinusoidal Pulse Width Modulation ซึ่งจะสร้างสัญญาณควบคุมโดยการเปรียบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยมกับสัญญาณรูปไซน์ โดยที่

$$m_a = V_{control} / V_{tri} \dots\dots\dots(2.3)$$

- m_a = amplitude modulation ratio หรือ modulation index
- $V_{control}$ = ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณควบคุม (สัญญาณไซน์)
- V_{tri} = ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยม

$$m_f = f_s / f_1 \dots\dots\dots(2.4)$$

- m_f = frequency modulation ratio
- f_s = ความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม
- f_1 = ความถี่ fundamental ของสัญญาณ ไซน์ (50 Hz)

โครงสร้างของพีดีบีบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ในส่วนของดีซีลิงค์สามารถใช้รีคตีฟายเออร์ที่เป็นไดโอดทำให้แรงดันของดีซีลิงค์มีค่าคงที่ ซึ่งไม่อาจควบคุมแรงดันดีซีได้ และลดขนาด LC ฟิเตอร์ให้เล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามความเห็นไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลง ดังนั้นความถี่และแรงดันเอาต์พุตของแรงดันมูลฐาน สามารถควบคุมได้โดยใช้เทคนิคของพีดับบลิวเอ็มซึ่งอยู่ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มนี้จะให้แรงดันเอาต์พุตที่มีองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำน้อยลง แต่จำนวนครั้งของการสวิตช์ที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีปัญหาของการสูญเสียของการสวิตช์ ซึ่ง แต่จะใช้งานได้ดีในย่านความถี่ต่ำ

2.3.2.3 Space Vector Modulation PWM;SVM

เทคนิคการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ ได้มีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับอุตสาหกรรมการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ หรือเป็นที่รู้จักกันดีในศัพท์ทางเทคนิคว่า “อินเวอร์เตอร์ไคร์ฟ” ในเทคนิคนี้ แรงดันเอาต์พุตของพีดับบลิวเอ็มที่ต้องการจะถูกแสดงในรูปของอินเวอร์เตอร์ในโพลาร์โคออดิเนต (Polar Coordinate) เวกเตอร์แรงดันนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 6 เซกเตอร์ (Sector) โดยที่ในแต่ละเซกเตอร์จะมีสถานะการทำงานของสวิตช์ในแต่ละส่วนซึ่งการทำงานนี้จะแบ่งออกเป็น 6 สถานะเช่นกัน และในแต่ละสถานะการสวิตช์จะแทนด้วย 1 เวกเตอร์แรงดัน ($V_1 - V_6$) ซึ่งความสัมพันธ์ของสถานะการสวิตช์ เวกเตอร์แรงดัน และโพลาร์โคออดิเนตสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.4 และจะเห็นว่า สถานะการสวิตช์ที่ศูนย์ทั้งสองครั้งจะมีความสัมพันธ์กับจุดกำเนิดของเวกเตอร์



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของสถานะ เวกเตอร์แรงดัน และ โพลาร์โคออดิเนต โดยที่สถานะการสวิตช์ในแต่ละกิ่งของอินเวอร์เตอร์จะถูกกำหนดเป็น 1(High) และ 0 (Low) โดยที่สถานะสวิตช์ศูนย์คือ 000 และ 111 จะอยู่ที่จุดกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการสวิตช์ของสัญญาณ SVM ที่มีความสัมพันธ์กับเซกเตอร์ที่ 1 ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นว่า ในแต่ละช่วงของคาบเวลาการสวิตช์(T) จะมีแรงดันแวกเตอร์(V_s) คงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งในแต่ละเซกเตอร์ก็จะมีคาบเวลาของการสวิตช์ที่สัมพันธ์กับแรงดัน V_s คือ

$$V_s T = V_0 t_0 + V_a t_a + V_b t_b + V_7 t_7 \tag{2.5}$$

ในขณะที่

V_a, V_b คือ องค์ประกอบของแรงดันแวกเตอร์ในขณะที่สภาวะสวิตช์นั้นถูกทำงานซึ่งถูกแทนด้วย (100) , (010) หรือ (001) และ (110) ,(011) หรือ (101)

V_0, V_7 คือ องค์ประกอบของแรงดันแวกเตอร์ศูนย์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสภาวะสวิตช์ (000) และ (111)

T คือ คาบเวลาของการสวิตช์ในหนึ่งแรงดันแวกเตอร์ ($T = t_a + t_b + t_0 + t_7$)

t_a และ t_b คือ ช่วงเวลาที่แรงดันแวกเตอร์ทำงาน

t_0 และ t_7 คือ ช่วงเวลาที่แรงดันแวกเตอร์เป็นศูนย์



รูปที่ 2.5 รูปแบบสภาวะการสวิตช์ของ SVM ในเซกเตอร์ที่ 1

จากสมการข้างต้นถ้าให้อำนาจของ แรงดันแวกเตอร์ V_a และ V_b คงที่ และ V_0 และ $V_7 = 0$ ดังนั้น เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของช่วงเวลา t_a และ t_b ได้ดังนี้

$$t_a = \frac{\sqrt{2} |v_s| T \sin (60-\gamma)}{V_{dc}} \tag{2.6}$$

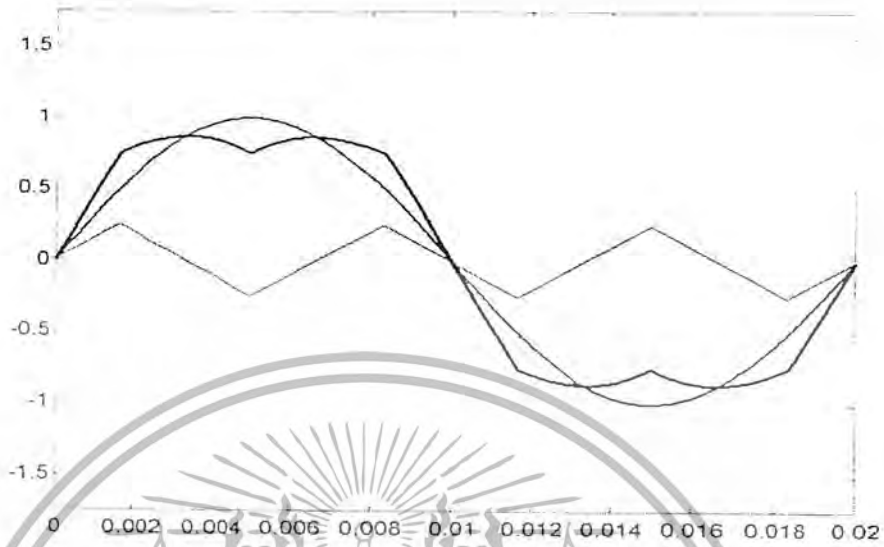
$$t_b = \frac{\sqrt{2} |v_s| T \sin \gamma}{V_{dc}} \tag{2.7}$$

เมื่อ $0 \leq \gamma \leq 60$

โดยทั่วไปแล้ว ช่วงเวลา t_0 และ t_7 จะถูกเลือกให้มีช่วงเวลาเท่ากัน ดังนั้นจากลำดับการสวิตช์ของ SVM นี้จะสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของการมีอคติ โดยเพิ่มรูปคลื่นสามเหลี่ยมซึ่งมีค่าแอมพลิจูดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.25 เท่าของรูปคลื่นไซน์เข้าไปรวมกับรูปคลื่นไซน์ค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 1 ก็จะได้รูปคลื่นแรงดัน SVM (V_{SVM}) ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.6 และสมการที่ 2.8

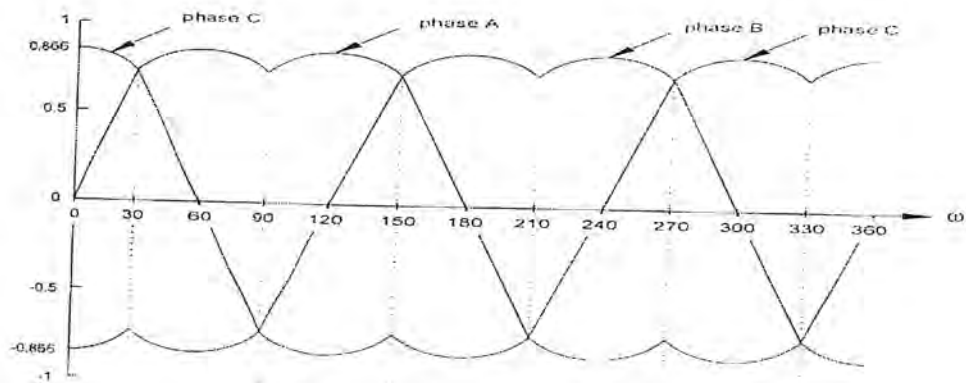


รูปที่ 2.6 แรงดันสลับเฟสเวกเตอร์ต่อเฟส

$$V_{SVM} = \begin{cases} \frac{3}{2} \sin(\omega_{mt}) & 0 \leq \omega_{mt} \leq \frac{\pi}{6} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega_{mt} + \frac{\pi}{6}) & \frac{\pi}{6} \leq \omega_{mt} \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \dots\dots\dots 2.8$$

ในรูปที่ 2.7 แสดงสัญญาณมอดดูเลทแบบสามเฟสของเทคนิคมอดดูเลทแบบ SVM ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเมื่อ จุดสูงสุดของแอมพลิจูดสำหรับยูนิตีฟีนดาเมนทอลคือ 0.866 ดังนั้นเทคนิคการ มอดดูเลทแบบ SVM สามารถมีค่าดัชนีการมอดดูเลทได้ถึง 1.15 ก่อนเกิดสภาวะโอเวอร์มอดดูเลทชั้นเมื่อเทียบกับการมอดดูเลทไซน์ ซึ่งตรงจุดนี้เป็นข้อได้เปรียบของ SVM

ในระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสมรรถนะสูงนั้นการคำนวณ จะทำการเปลี่ยนแปลงทุกๆ ช่วงเวลาของการสวิตช์ เนื่องจากต้องการความต่อเนื่องของแรงดัน และความถี่เอ๊าท์พุท ซึ่งในรายงานนี้ได้คำนึงถึงผลของการสูญเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลไฟฟ้าเมื่อนำมาใช้กับพีดีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ดังนั้นในส่วนของการ โปรแกรมในการสร้าง PWM จะใช้โปรแกรมหลักเดียวกันในทุกๆเทคนิคการมอดดูเลทซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆของ PWM ได้อีกด้วย



vector	5	6	1	2	3	4	5
S _a	001	100	100	010	010	001	001
S _b	101	101	110	110	011	011	101

รูปที่ 2.7 รูปคลื่นแรงดันสเปกตรัมของเครื่อง 3 เฟส

2.3.3 การมอดูเลชัน (Modulation)

2.3.3.1 การมอดูเลชันเชิงเส้น (m_a ≤ 1.0)

ในย่านที่เป็นเส้นตรง (m_a ≤ 1.0) แรงดันเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับ m_a (amplitude modulation ratio) ค่าของของความถี่มูลฐานที่ประกอบอยู่ในหนึ่งขาของอินเวอร์เตอร์คือ

$$V_{anl} = m_a * V_d / 2 \dots \dots \dots (2.9)$$

ดังนั้นแรงดัน line-line (rms) ที่ความถี่มูลฐาน เฟสจะเลื่อนไป 120° ระหว่างแรงดันเฟสซึ่งจะสามารถเขียน ได้ดังนี้

$$V_{LL,rms} = \sqrt{2/3} V_{anl} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$= 0.612 m_a V_d$$

องค์ประกอบฮาร์โมนิกของแรงดัน line-line สามารถที่จะคำนวณในลักษณะเดียวกันกับแบบหนึ่งเฟส บางฮาร์โมนิกถูกกำจัดออกไปจากแรงดัน line-line

2.3.3.2 การมอดูเลชันไม่เป็นเชิงเส้น (m_a ≥ 1.0)

ในพีคดับลิวเอ็มที่โอเวอร์มอดูเลชัน ค่าของของแรงดันควบคุมยอมให้เกินค่าของสัญญาณสามเหลี่ยม ในโหมดของการทำงานนี้ขนาดของแรงดันที่ความถี่มูลฐานจะไม่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับ m_a ที่ค่าแรงดัน line-line (rms) ของความถี่มูลฐาน (V_{LL}) เขียนโดยฟังก์ชันของ m_a เหมือนกันกับพีคดับลิวเอ็มหนึ่งเฟส สำหรับค่า m_a ที่มีค่ามากจะเข้าสู่รูปสัญญาณ Square-wave inverter ค่ามากที่สุดของ V_{LL} = 0.78 V_d

ในย่านโอเวอร์มอดูเลชันเปรียบเทียบกับย่าน 1.0 ≥ m_a ฮาร์โมนิกส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นรอบๆ จุดศูนย์กลางความถี่ของฮาร์โมนิก m_r และจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ฮาร์โมนิกที่สำคัญจะไม่มีแอมปริจูดมากเมื่อเทียบกับที่ 1.0 ≥ m_a ดังนั้นกำลังงานสูญเสียในโหลดระหว่างความถี่ฮาร์โมนิกส้าอาจจะไม่สูงในโอเวอร์มอดูเลชัน ดังที่แสดงค่าของไซน์แบบ (side band) ฮาร์โมนิกที่เพิ่มเติมตามที่แนะนำจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโหลดและความถี่สวิทซ์ การสูญเสียระหว่างฮาร์โมนิกส้าในโอเวอร์มอดูเลชันอาจจะน้อยกว่าในระดับเดียวกันในเชิงเส้นของ พีคดับลิวเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูเชิงช่างเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics)

3.1 ศัพท์และปริมาณต่างๆ

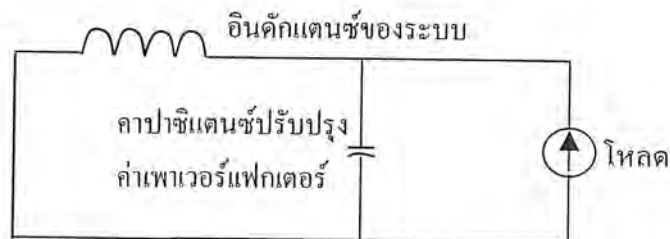
3.1.1 ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics)

ในวิชาทางไฟฟ้าแล้ว ฮาร์มอนิกส์ คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่มูลฐานคือ 50 เฮิร์ตซ์ ฮาร์มอนิกส์ คือ 100, 200 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่า ฮาร์มอนิกส์ที่ 1 ส่วนฮาร์มอนิกส์ลำดับอื่นๆ ก็หาได้จากเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน การวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ทำได้หลายวิธีแตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonics Distortion) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ต่างๆกัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดความถี่หลักมูล และเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกส์ทั้งหลายจะแสดงผลความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ และความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์แต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ได้รับแรงดันจากแหล่งจ่ายที่มีรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ ซึ่งจะมีผลทำให้รูปคลื่นของกระแสแตกต่างไปจากรูปคลื่นของแรงดันแหล่งจ่าย โดยความเพี้ยนของกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมในอิมพีแดนซ์ของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จึงทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันขึ้น ด้วยเหตุนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นหรือตัวผลิตฮาร์มอนิกส์ต่างๆ จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ประกอบไปด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่มีความถี่มูลฐาน



รูปที่ 3.2 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่มีความถี่ฮาร์มอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Current)

ฮาร์โมนิกส์ที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Device) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์โมนิกส์อย่างจริงจังนั้น เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์โมนิกส์ ต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากซึ่งเป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์อย่างมากตามมาด้วยเช่นกัน

3.1.3 แรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Voltage)

เกิดจากการที่กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) ของระบบ (รีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่ายสายส่ง หรือ รีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่อเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power factor) และแรงดันให้ดีขึ้น) ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดันอันเนื่องมาจากค่ารีแอคแตนซ์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทาน ไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

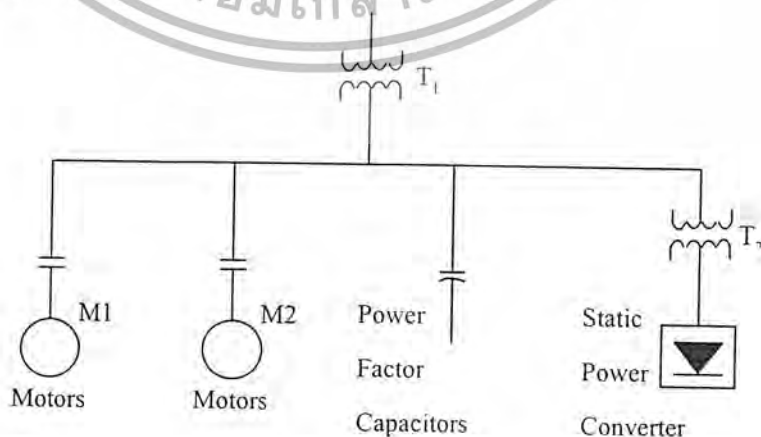
$$V_n = Z_n I_n \dots\dots\dots(3.1)$$

V_n = แรงดันฮาร์โมนิกส์

I_n = กระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบ

Z_n = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้ตัวเก็บประจุช้อนานเข้าไประบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง จะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์โมนิกส์ในระบบจำหน่าย ตัวเก็บประจุมิได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิกส์ แต่จากการต่อวงจรในระบบมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขนาน (Parallel Resonance) ระหว่างตัวเก็บประจุและรีแอคแตนซ์ของระบบดังรูปที่ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.3 การต่อตัวเก็บประจุนานเข้าไประบบให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกส์ ถ้ารีโซแนนซ์แบบขนาน เกิดที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกส์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดกระแสไหล จำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบและรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ กระแสนี้จะรวมกับ กระแสฮาร์มอนิกส์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึง ทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันมีค่ามาก (Distortion Factor)

3.1.4 ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor) DF

ตัวประกอบฮาร์มอนิกส์ (Harmonics Factor) HF

ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ทั้งหมด (Total Harmonics Distortion) THD

ความหมายทั้งสามตัวนั้นมาตรฐาน IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกันกล่าวคือ ค่าที่บ่งบอกถึง ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล

IEEE 519-1992

Harmonic Voltage และ Harmonic Current

$$DF_v = HF_v = THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

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

IEC 555-1:1992

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

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

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายทั้งสามตัวว่า มันคือความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์ (Harmonics Distortion) HD กล่าวคือ บอกปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่มีทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของ ปริมาณทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ลำดับฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Order)

ลำดับฮาร์โมนิกส์ คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกส์และความถี่หลักมูล เช่น เมื่อเอ่ยถึงลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 เฮิร์ตซ์ จะได้รับความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เป็น 150 เฮิร์ตซ์

3.1.6 ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

หมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง (W) ต่อกำลังปรากฏ (VA) อย่างไรก็ตามหากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะรูปไซน์ เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอม โคไซน์ (cosine) ของมุมเฟสระหว่างกระแสและแรงดันก็ได้

PF คือ อัตราส่วนกำลังงานจริงต่อกำลังงานปรากฏ

Displacement Power Factor (DPF) คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริงของรูปคลื่นความถี่หลักมูลต่อกำลังงานปรากฏของรูปคลื่นความถี่หลักมูล หรือ อาจกล่าวได้ว่า DPF คือ ค่าโคไซน์ของมุมเฟสแรงดันความถี่หลักมูลกับกระแสความถี่หลักมูล ดังสมการ

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

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

เมื่อ พิกัดกำลังงานจริง (Active Power) คือ ผลคูณของแรงดันอาร์เอ็มเอสกับกระแสอาร์เอ็มเอส ที่เป็นค่าจริง (watt)

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Appearance Power) คือ ผลคูณของแรงดันอาร์เอ็มเอสกับกระแสอาร์เอ็มเอส (volt-amp)

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Fund) คือ ผลคูณของแรงดันอาร์เอ็มเอสกับกระแสอาร์เอ็มเอสที่ความถี่มูลฐาน

พิกัดแรงดันที่ปรากฏ (Total) ได้จากการรวมเอาฮาร์โมนิกส์มาด้วยเช่น

$$V_i \times \sqrt{\frac{i^2}{1} + \frac{i^2}{2} + \frac{i^2}{3} + \dots}$$

3.2 ประเภทของฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้า อาจแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

3.2.1 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าตัวของความถี่หลักมูล เช่นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จะมีฮาร์โมนิกส์ปะปนอยู่มากตั้งแต่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2, 3, 4 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น มิฉะนั้น กรุณาแจ้งให้เจ้าของเอกสารทราบ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 อินเทอร์ฮาร์โมนิกส์ (Inter Harmonics)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล อินเทอร์ฮาร์โมนิกส์นี้ส่วนมากจะพบในกระแสเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะช่วงเริ่มต้นการหลอมกระแสอาร์คจะยังไม่เสถียร ทำให้คาบเวลาไม่แน่นอนกล่าวคือ ความถี่ที่ 50 เฮิร์ตซ์ คาบเวลาจะกินเวลา 30 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์คจะมีคาบไม่เป็น 20 มิลลิวินาทีทุกคาบเวลาทำให้เกิดอินเทอร์ฮาร์โมนิกส์ขึ้น

นอกจากนี้จะพบอินเทอร์ฮาร์โมนิกส์ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle Control หรือ Bust firing ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่าน ไทลด์แบบ Integral Cycle Control

ถ้าให้ N คือจำนวน Cycle และ ON และ M คือ จำนวน Cycle ที่ pattern ของรูปคลื่นกำลังมาซ้ำเดิม จะคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$I_n = -I_{max} \frac{2M \sin((N/M) n\pi)}{M^2 - N^2} \dots\dots (3.2)$$

จากกระแสฮาร์โมนิกส์ที่วิเคราะห์ออกมาจะพบว่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับเป็นเลขลงตัว ของความถี่หลักมูล 50 เฮิร์ตซ์จะเป็นศูนย์ แต่กระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่หรือลำดับเป็นเลขไม่ลงตัว ความถี่หลักมูลจะมีค่าดังเช่น ฮาร์โมนิกส์ความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ จะมีลำดับเป็น 1/5 ของความถี่หลักมูล เราจึงเรียกฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ว่า อินเทอร์ฮาร์โมนิกส์

3.2.3 ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonics)

หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ที่สร้างขึ้นโดยเครื่องแปรผันทางไฟฟ้า (แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือ สลับกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำเช่น ไดโอด, SCR เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส) ในสภาวะการทำงานปกติลำดับของฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะสามารถหาได้จาก

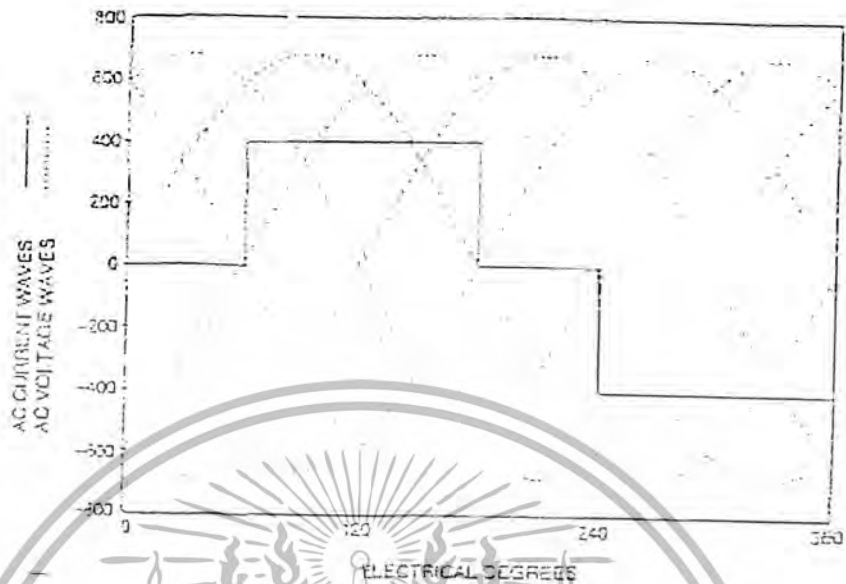
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ	n	=	$kp \pm 1$
เมื่อ	n	=	ลำดับฮาร์โมนิกส์
	k	=	เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ
	p	=	จำนวนพัลส์ (pulse number) ของเครื่องแปรผันไฟฟ้า



รูปที่ 3.5(b) รูปคลื่นของแรงดันขาออก(ในอุดมคติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5(c) รูปคลื่นของกระแสทางด้าน AC (เป็นรูปคลื่นในอุดมคติ)

รูปที่ 3.5(a) แสดงวงจรเรียงกระแสแบบบริคส์ 3 เฟส ใช้ SCR จำนวน 6 ตัวทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ตัดต่อกระแสคั่นในหนึ่งรอบ (cycle) ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดกระแสไหลผ่าน SCR ในลักษณะกระแสพัลส์ จำนวน 6 ครั้ง จึงมีค่า PL เป็น 6 ในรูปที่ 3.5(b) แสดงรูปคลื่นของแรงดันขาออกจะเป็นแรงดันตรงที่มีความพริ้ว (ripple) ชื่อว่า ความพริ้วนี้มีการเปลี่ยนแปลง 6 รอบ ใน 1 รอบของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความพริ้ว 6 รอบ จะส่งผลถึงฮาร์มอนิกส์ของกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับด้วย รูปที่ 3.5 (c) แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านกระแสสลับจากรูปคลื่นนี้เมื่อแตกออกเป็นอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$i(t) = i [\sin(\omega t) - 1/5\sin(5\omega t) - 1/7\sin(7\omega t) + 1/11\sin(11\omega t) + 1/13\sin(13\omega t) + \dots] \quad \dots\dots(3.4)$$

จะพบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์จะมีลำดับที่ $6k \pm 1$ หรือ 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... เท่านั้น เราเรียกฮาร์มอนิกส์เหล่านี้ว่า ฮาร์มอนิกส์คุณลักษณะ

3.2.4 ฮาร์มอนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonics)

หมายถึง ฮาร์มอนิกส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n = kp \pm 1$ เช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรจะมีเฉพาะฮาร์มอนิกส์คุณลักษณะที่มีลำดับ 11, 13, 23, 25, 35, 37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์มอนิกส์ที่มีลำดับเป็น 5, 7, 17, 19 ปนมาด้วยฮาร์มอนิกส์เหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์มอนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ฮาร์โมนิกส์ที่สามหารลงตัว (Triple Harmonics)

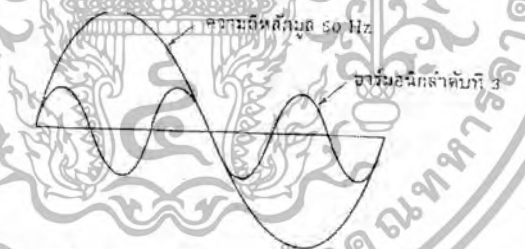
หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ที่สามหารลงตัว ได้แก่ ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3, 6, 9 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ (Sequence) เป็นศูนย์ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สายฮาร์โมนิกส์กลุ่มนี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล ทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้าได้ เช่น สายนิวทรัลร้อน ฉนวนเสียหายเกิดลัดวงจร เป็นต้น

3.3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Sources)

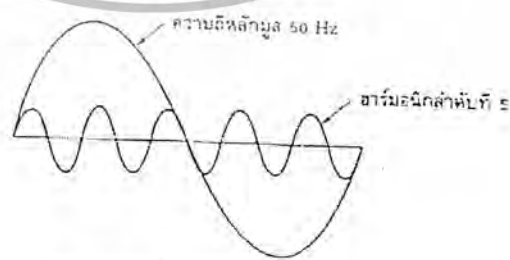
ระบบไฟฟ้ากำลังในอุดมคติจะต้องจ่ายแรงดันให้อุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันที่เป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ (pure sine) แต่ในความเป็นจริงรูปคลื่นมักมีความเพี้ยน ซึ่งการที่รูปคลื่นเบี่ยงเบนไปจากรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์นี้ ปกติจะอ้างอิงถึงเทอมความเพี้ยน (Harmonics Distortion) ของรูปคลื่นและกระแสโดยทั่วไปความเพี้ยนนี้มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งโหลดประเภทนี้มีคุณสมบัติในการทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวมันมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ และความเพี้ยนของกระแสไหลจะเป็นต้นเหตุให้เกิดความเพี้ยนที่แรงดันและไปปรากฏอยู่ในระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโหลดไม่เป็นเชิงเส้นคือแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ขึ้นมาให้กับระบบไฟฟ้า

3.4 ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonics Distortion)

ฮาร์โมนิกส์ คือ ส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มทวีคูณของความถี่หลักมูล ดังแสดงดังรูปที่ 3.6



(ก) ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 (150 Hz)



(ข) ฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 (250 Hz)

รูปที่ 3.6 รูปคลื่น ไซน์ความถี่หลักมูล 50 Hz และ ตัวอย่างฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแรงดันที่ความถี่หลักมูลมีแรงดันฮาร์มอนิกส์ผสมเข้าไป จะมีผลทำให้แรงดันที่ความถี่หลักมูลเกิดความถี่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นแรงดันความถี่หลักมูลผสมด้วยฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3

สำหรับรูปคลื่นแรงดันหรือกระแสที่เป็นคาบ (periodic) และมีความถี่สามารถแสดงได้โดยการใช้ทฤษฎีฟูรีเยร์ (Fourier Theorem) ในรูปแบบของสมการรูปคลื่นเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \dots(3.5)$$

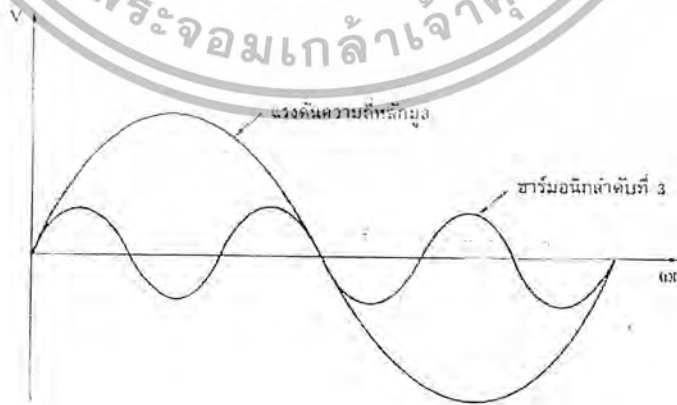
- เมื่อ a_0 คือ ขนาดของสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ศูนย์
- a_n และ b_n คือ ขนาดของสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n ซึ่งจะเป็นสัมประสิทธิ์ของเทอมโคไซน์ และไซน์ ตามลำดับ
- ω คือ ความถี่หลักมูล
- $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

โดยขนาดของสัญญาณหรือสัมประสิทธิ์ของความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆ สามารถหาได้สมการต่อไปนี้

$$a_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) \dots\dots(3.6)$$

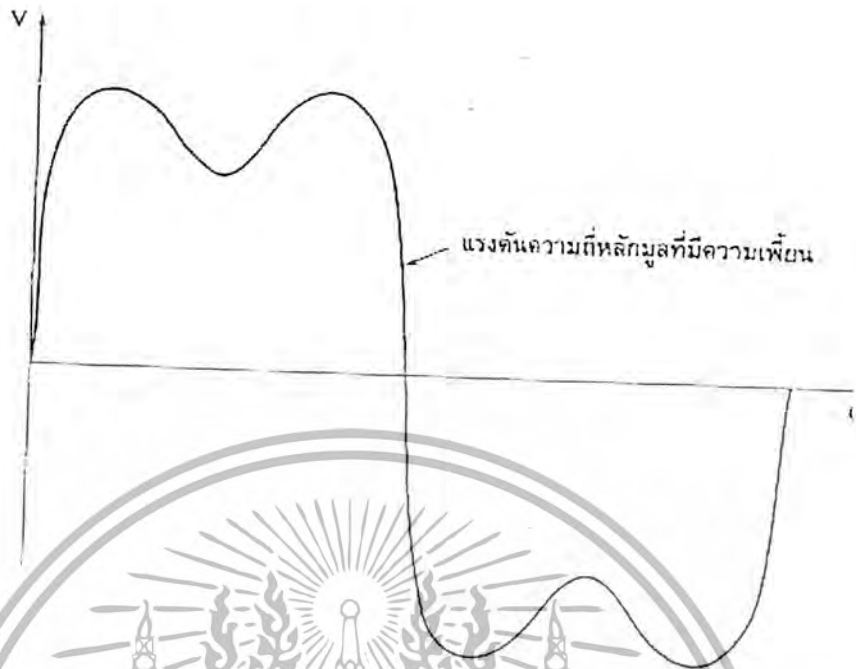
$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) \dots\dots(3.7)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) \dots\dots(3.8)$$



(ก) แรงดันที่ความถี่หลักมูลฐานผสมด้วยฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีเฟสเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

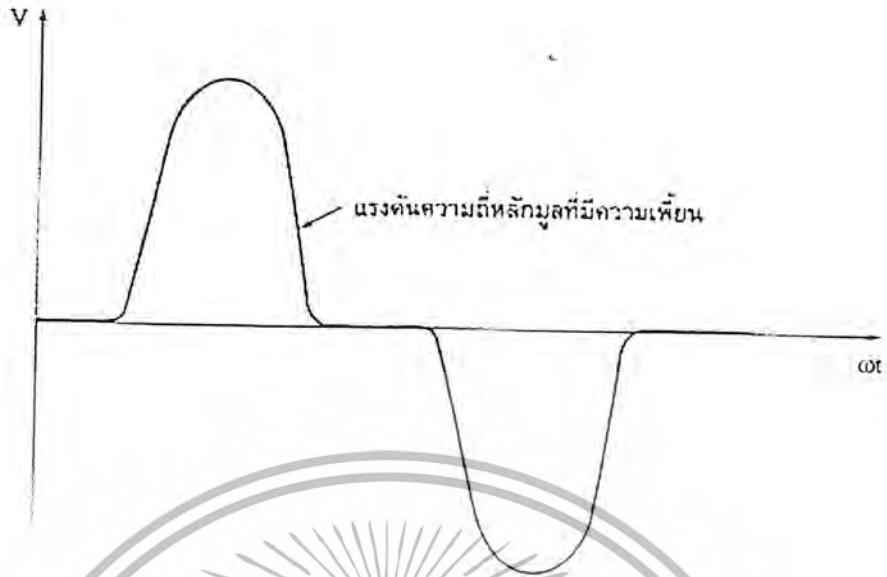


(ก) (ต่อ) แรงดันความถี่หลักมูลผสมด้วยฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ที่มีเฟสเดียวกัน



(ข) แรงดันความถี่หลักมูลผสมด้วยฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ที่มีเฟสต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

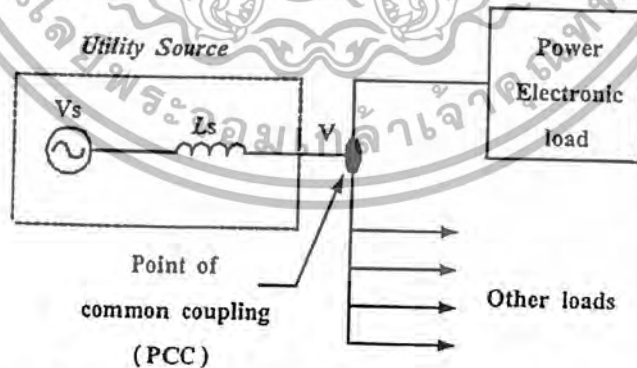


(ข) (ต่อ) แรงดันความถี่มูลฐานผสมด้วยฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ที่มีเฟสต่างกัน

รูปที่ 3.7 การเกิดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์

3.5 การประเมินค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonics distortion evaluation)

มาตรฐานที่บอกถึงขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ทั้งหมดที่ยอมรับได้ ณ จุดต่อร่วมระหว่างการไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้า (Point of common coupling : PCC) ได้แก่มาตรฐาน IEEE 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ทั้งหมด ทั้งขีดจำกัดแรงดัน และขีดจำกัดกระแสที่ยอมรับได้ที่ จุด PCC ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 รูปไปอะแกรม แสดงจุดต่อร่วม (PCC) ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

3.5.1 ขีดจำกัดกระแสเพี้ยน (Current distortion limit)

เป็นการใช้ขีดจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าได้ โดยมีดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดความเพี้ยน คือ ความต้องการความเพี้ยนรวม (Total demand distortion :TDD)

หมายถึง ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์มีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของความถี่กระแสหลักสูงสุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สัญญาที่หนึ่งจะรับประกันการดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ในช่วงเวลา 15 หรือ 30 นาที) โดยขีดจำกัดความเสียหายที่ระดับแรงดันต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 และค่าขีดจำกัดแรงดันที่แสดงไว้ในตารางเหล่านี้ควรใช้กับระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) แต่ถ้าการทำงานที่มีคาบเวลาน้อยกว่านี้ ขีดจำกัดสามารถเพิ่มได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบจำหน่าย (แรงดัน 120 ถึง 69000 V) ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

I_{sc} / I_L	กระแสฮาร์มอนิกสูงสุดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ I_L ในแต่ละลำดับ					
	$h < 11$	$11 < h < 16$	$17 < h < 22$	$23 < h < 34$	$h > 34$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

ตารางที่ 3.2 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบส่งย่อย (แรงดัน 69001 ถึง 161000 V) ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

I_{sc} / I_L	กระแสฮาร์มอนิกสูงสุดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ I_L ในแต่ละลำดับ					
	$h < 11$	$11 < h < 16$	$17 < h < 22$	$23 < h < 34$	$h > 34$	TDD
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

เมื่อ I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรที่จุดเชื่อมระบบไฟฟ้า (Point of common coupling : PCC) ระหว่างระบบของการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า

I_L คือ ความต้องการของกระแสโหลดสูงสุด (ส่วนประกอบความถี่หลักมูล) ที่ PCC

ตารางที่ 3.1 เป็นขีดจำกัดความเสียหายฮาร์มอนิกทั้งหมดของระบบ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความเสียหายฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้ที่จุด PCC จะมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับอัตราส่วน I_{sc} / I_L ของระบบว่าอยู่ที่เท่าใด ในขณะที่ I_{sc} คือค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Z_s) ตัวอย่างเช่น ระบบดังรูปที่ 3.8 เมื่อมีค่า $I_{sc} = 2500$ A ค่า $I_L = 100$ A ระบบ 24 kV เมื่อตรวจสอบตารางที่ 3.1 สามารถบอกเปอร์เซ็นต์ความเสียหายฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ ได้ดังนี้ $I_{sc} / I_L = 25$

- เปอร์เซ็นต์ความเสียหายฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 7 และ 9 จะต้องไม่เกิน 7%
- เปอร์เซ็นต์ความเสียหายฮาร์มอนิกอันดับที่ 11, 13 และ 15 จะต้องไม่เกิน 3.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการให้บริการที่ถูกต้องเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 17, 19 และ 21 จะต้องไม่เกิน 2.5%
- เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 23, 25, 27, 29, 31 และ 33 จะต้องไม่เกิน 1%
- เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 35 จะต้องไม่เกิน 0.5%
- เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกทั้งหมดจะต้องไม่เกิน 8 %

ส่วนในตารางที่ 3.2 ก็ในทำนองเดียวกันเพียงแต่เปลี่ยนระบบเป็นระบบที่มีแรงดันสูงกว่า 69 kV

3.5.2 ขีดจำกัดแรงดันเพี้ยน (Voltage distortion limits)

เป็นการเฝ้าตรวจกระแสฮาร์โมนิกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายส่งกลับเข้าระบบ เพื่อให้แน่ใจว่ากระแสเหล่านี้จะไม่เป็นต้นเหตุทำให้แรงดันมีความผิดเพี้ยนสูงเกินขีดจำกัดที่ระบุในตารางที่ 3.3 ซึ่งค่าขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดันตามตารางที่ 3.3 นี้จะต่ำเพียงพอสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้องและในทำนองเดียวกันควรใช้ระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) แต่ถ้าการทำงานที่มีคาบเวลาดำกว่านี้ขีดจำกัดสามารถเพิ่มได้ถึง 50 เปอร์เซนต์

นอกจากนี้ดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดแรงดันเพี้ยนคือ ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกทั้งหมด (Total harmonics voltage distortion : THD) มีค่าเป็นเปอร์เซนต์ของแรงดันที่ระบุตามความถี่หลักมูล หรือสามารถหาได้จากสมการที่ 3.9

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3.9)$$

ตารางที่ 3.3 ขีดจำกัดแรงดันเพี้ยนตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

แรงดันของบัสที่ PCC	ความเพี้ยนแรงดัน ในแต่ละลำดับของฮาร์โมนิก (%)	ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกทั้งหมด:THD (%)
69 kV และต่ำกว่า	3.0	5.0
69001 ถึง 161 kV	1.5	2.5
มากกว่า 161 kV	1.0	1.5

ในตารางที่ 3.3 เป็นขีดจำกัดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกทั้งหมดที่ยอมรับได้ที่จุด PCC จะพบว่าเปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกจะแบ่งตามระดับแรงดันของระบบ ซึ่งในการหาค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกจะไม่ซับซ้อนดังเช่นการหาความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิก ตัวอย่างเช่น ที่ระดับแรงดัน 120 V-69 kV เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกสูงสุดแต่ละอันดับจะต้องไม่เกิน 3 % แต่รวมทั้งหมดทุกอันดับจะต้องไม่เกิน 5 %

บทที่ 4

การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกส์

ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality ;PQ) นั้นสาเหตุมาจากการรบกวนในระบบไฟฟ้าแบบต่างๆเช่น ไฟฟ้าดับ เสิร์จ แรงดันตก แรงดันเกิน และฮาร์มอนิกส์ เป็นต้นซึ่งจะต้องปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้น ในรายงานนี้ได้พิจารณาในเรื่องการลดปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนแบบ PWM-VSI ซึ่งเป็นภาระแบบไม่เชิงเส้น โดยคุณสมบัติของภาระประเภทนี้จะผลิตฮาร์มอนิกส์ออกมารบกวนระบบอื่นๆ ซึ่งมีผลทำให้ระบบอื่นทำงานผิดพลาดไป

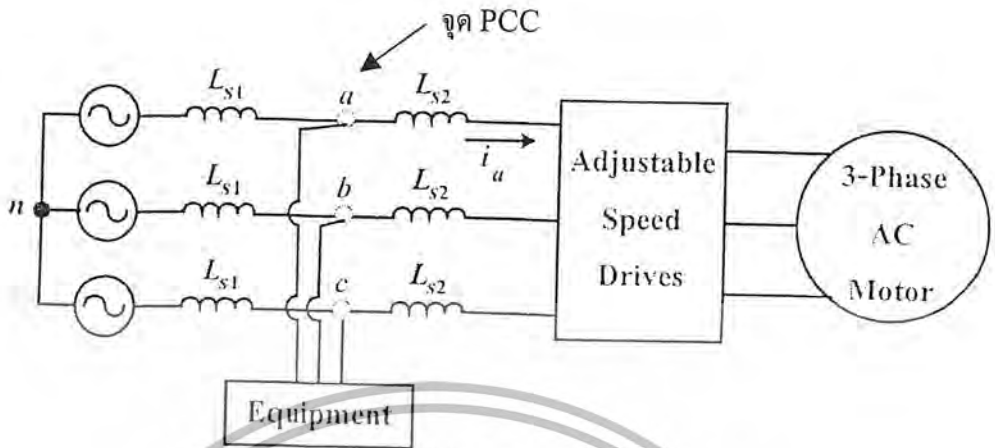
การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกส์ ในส่วนที่จะศึกษานั้นจะใช้ฟิลเตอร์เข้าไปในระบบเพื่อกำกัและลดฮาร์มอนิกส์ให้มีขนาดต่ำลง โดยทั่วไปแล้วการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะต้องใช้ฟิลเตอร์หลายชุด ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก การใช้ฟิลเตอร์เพื่อแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกส์ต้องพิจารณาถึงวัตถุประสงค์หรือขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่จะต้องจำกัดให้มีค่าลดลงมากเพียงใด จึงจะทราบว่าควรใช้ฟิลเตอร์ขนาดเท่าใด ในส่วนโครงการที่ศึกษาจะเป็นระบบไฟฟ้าส่วนย่อย ซึ่งจะนำตัวเหนี่ยวนำมาต่อด้านหน้าของระบบขับเคลื่อนเพื่อลดฮาร์มอนิกส์

4.1 การกรองแรงดันด้วยตัวเหนี่ยวนำ (inductor filter)

เราอาจใช้ตัวเหนี่ยวนำหรือขดลวด โช๊ค (choke) L เป็นวงจรกรอง โดยต่อ L อนุกรมกับ R (load) ก็ได้ ทั้งนี้ก็เพราะว่าตัวเหนี่ยวนำก็เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเก็บหรือคายพลังงานทางไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับตัวเก็บประจุ การเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในตัวเหนี่ยวนำจะเก็บสะสมพลังงานไว้ในรูปของสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่า ฟลักซ์ (flux) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในทางเพิ่มขึ้นสนามแม่เหล็กก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยแต่จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อกระแสที่ไหลในวงจรลดลงพลังงานส่วนนี้จะคายออกมาเป็นการเพิ่มกระแสไปในตัวหรือหน่วงหนี้ยการลดลงของกระแส ความสามารถของตัวเหนี่ยวนำที่จะเก็บและคายพลังงานได้เช่นนี้จึงนำมาใช้เป็นตัวกรองแรงดันได้ เพื่อให้การกรองแรงดันที่จ่ายไปยังโหลดเป็นไปได้ดี ตัวเหนี่ยวนำจะต้องต่อกับวงจรในลักษณะอนุกรม ตัวเหนี่ยวนำจะเป็นตัวควบคุมการไหลของกระแสไม่ให้เพิ่มขึ้นมากหรือลดลงในทันทีทันใดตามลักษณะของสัญญาณจากเรกติไฟเออร์ แต่จะยอมให้กระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่าเฉลี่ยหรือค่ากระแสไฟตรงอย่างช้าๆ การกรองแรงดันแบบตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวปรับการไหลของกระแสโหลด และเป็นผลทำให้แรงดันเอาท์พุทจะมีค่าไม่ถึงค่าสูงสุด ดังนั้นการใช้ตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวกรองแรงดันจะได้แรงดันเอาท์พุทมีค่าน้อยกว่าการกรองแรงดันด้วยตัวเก็บประจุ เราเรียกวงจรกรองที่ใช้ขดลวดว่า วงจรกรองแบบตัวเหนี่ยวนำ (inductor filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลจากการต่อไอซ์ก (Choke)



รูปที่ 4.1 แสดงการต่อไอซ์ก (Choke) ที่ด้านหน้าของระบบขับเคลื่อน

จากรูปที่ 4.1 L_{s1} เป็นค่าอินดักแตนซ์ของแหล่งจ่าย ในขณะที่ L_{s2} เป็นไอซ์กที่ต่อเพิ่มเข้าไปเพื่อลดผลกระทบของวงจรเรียงกระแส และแรงดันที่จุด a, b และ c เป็นจุดต่อร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ การต่อไอซ์ก (Choke, L_{s2}) เข้าไปที่ด้านหน้าของระบบขับเคลื่อนก็เพราะคุณสมบัติของอินดักเตอร์จะทำให้กระแสไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จึงทำให้รูปคลื่นกระแสมีความต่อเนื่องและเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์ (sinusoidal waveform) มากยิ่งขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นการกรองฮาร์มอนิกส์ โดยใช้ไอซ์กที่ต่อเข้าไบนั้นตามมาตรฐาน VDE ควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 5% ของ base impedance ของระบบขับเคลื่อนซึ่งสามารถคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ได้ดังสมการที่ 4.1

$$L_{s2} \geq \frac{0.05 V_{LL}}{\sqrt{3} \omega I_{ut}} \dots \dots \dots (4.1)$$

- เมื่อ V_{LL} = แรงดัน line to line (V)
- I_{ut} = กระแสอินพุทที่ความถี่หลักมูล (A)
- L_{s2} = ค่าอินดักแตนซ์ของไอซ์ก (H)

ผลจากการต่อ ไอซ์กเข้าไปนอกจากทำให้รูปคลื่นกระแสเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์แล้วยังทำให้เปอร์เซ็นต์การผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกส์ลดลง 30 - 40 % จึงส่งผลดีต่อแหล่งจ่ายอินพุทในแง่ของคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น

แต่เมื่อพิจารณาถึงกรณีที่แหล่งจ่ายมีค่าอิมพีแดนซ์อยู่ด้วยและการต่อโศกเข้าไปที่ด้านหน้าของระบบขับเคลื่อนจะต้องพิจารณาผลของการขาดหาย (notching) ของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสด้วย เนื่องจากผลของ L_s ทำให้เกิดการสับเปลี่ยนการนำกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งในวงจร converter เป็นผลทำให้รูปคลื่นแรงดันที่จุด a, b และ c ที่ต่อใช้งานร่วมกับระบบอื่นๆ (PCC) ผิดเพี้ยนไป ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันที่จุดดังกล่าวจะมีค่าสูงหรือต่ำจะเป็นไปตามแฟกเตอร์ ρ และโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 50 % และ $L_{s2} > L_{s1}$ เขียนในให้อยู่ในรูป สมการดังนี้

$$\rho = \frac{L_{s1}}{L_{s1} + L_{s2}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

จากสมการที่ 4.2 ถ้าหาก ρ มีค่าต่ำจะทำให้ค่า THD_v ของแรงดันที่จุด a, b และ c ต่ำและถ้าค่า ρ สูง ค่า THD ก็สูงตามไปด้วยหรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่า THD_v ของแรงดันที่จุด a, b และ c จะแปรผันตาม ρ ดังนั้นในการลดค่า THD_v ถ้าดูจากสมการแล้วสามารถทำได้ 2 กรณีคือ ลดค่าอินดักแตนซ์ของแหล่งจ่าย (L_{s1}) ลงซึ่งทำได้ค่อนข้างลำบากหรือเพิ่มค่าอินดักแตนซ์ (L_{s2}) ที่ต่อเพิ่มเข้าไปให้สูงยิ่งขึ้น

ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมักจะไม่ทราบค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายที่แน่นอนแต่ก็สามารถหาค่า L_{s2} ได้โดยที่เมื่อคำนวณหาค่า L_{s2} ได้มาแล้วยังคงทำให้ $L_{s2} > L_{s1}$ นั่นคือในลำดับแรกที่ยังไม่ได้ต่อ L_{s2} เข้าไปค่ากระแสที่ความถี่หลักมูลที่จ่ายเข้าวงจร converter (I_{u1}) ก็จะเป็นค่าที่ได้จากผลของอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (L_{s1}) เมื่อแทนค่า I_{u1} ลงในสมการ 4.1 ก็จะได้ค่าอินดักแตนซ์ที่ต้องต่อเข้าไปซึ่งจะเป็นไปตามมาตรฐาน VDE ที่กำหนดไว้ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่จุด a, b และ c ไม่เกินขีดจำกัดตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) Motor ขนาด 3 เฟส 2.2 kW	1	เครื่อง
2) Fluke 43B	1	เครื่อง
3) Variac	1	เครื่อง
4) Junction box	2	ชุด
5) Diode bridge rectifier	1	ชุด
6) สายไฟ	6	สาย
7) Current probe	1	ตัว
8) Oscilloscope	1	ชุด
9) วงจรควบคุม PWM Inverter	1	ชุด
10) ไข้ค (L)	3	ตัว
11) DC Siemens DC - Converter	1	ชุด
12) เครื่องวัดความเร็วรอบ Teccho Meter	1	เครื่อง

5.2 ขั้นตอนการทดลอง(1)

1. ทำการทดสอบมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ เพื่อที่จะหาค่าพารามิเตอร์ ของมอเตอร์ จากวงจร Approximated equivalent circuit โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ DC test, No load test, Locked rotor test
2. นำการทดสอบความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อมีโหลดในสภาวะมีโหลด 20% 40% 60% 80% 100% และ ไม่มีโหลด
3. นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์มาหาค่าโหลด R, L
4. ทำการจำลองวงจรดังรูปที่ 5.1 โดยกำหนดให้ L_s มีค่า 2 mH ซึ่งทำการ simulated วงจรเมื่อต่อไข้ค และไม่ต่อไข้ค ด้านหน้าวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ในสภาวะ โหลด 20% 40% 60% 80% 100% และ ไม่มีโหลด บันทึกผลการจำลอง
5. ทำการทดสอบวงจร 3 เฟส PWM-VSI Adjustable Speed Drive เมื่อไม่มีโหลด และมีโหลด 50%, 100% บันทึกค่า

5.3 แสดงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบมอเตอร์ 3 เฟส

พารามิเตอร์ที่ name plate	50 Hz	เตลต้า / สตาร์	2.2 kW	220 / 380	8.7 / 5.0	1420
	60 Hz	เตลต้า / สตาร์	2.6 kW	254 / 440	8.8 / 5.1	1725

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DC test

$$V_{DC} = 2.43 \text{ V}$$

$$I_{DC} = 5.07 \text{ A}$$

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} = \frac{2.43}{2 \times 5.07} = 0.23 \text{ } \Omega$$

Noload test

$$V_L = 380 \text{ V}$$

$$I_{ave} = 3.87 \text{ A}$$

$$P_{in} = 1.24 \text{ kW}$$

$$Z_{nl} = \frac{380}{\sqrt{3} \times 3.87} = 56.69 \text{ } \Omega = X_1 + X_m$$

Locked rotor test

$$V_L = 84.69 \text{ V}$$

$$I_{ave} = 4.37 \text{ A}$$

$$P_{in} = 420 \text{ W}$$

$$Z_{LR} = \frac{V_L}{I_{ave}} = \frac{84.69}{\sqrt{3} \times 4.37} = 11.19 \text{ } \Omega$$

$$\theta = \left[\frac{\cos^{-1} P_{in}}{\sqrt{3} I_L V_L} \right] = \cos^{-1} \left[\frac{420}{\sqrt{3} \times 4.37 \times 84.69} \right]$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.65$$

$$\theta = 49.45 \text{ } \Omega$$

$$R_{LR} = 11.19 \cos 49.45^\circ = 7.27 \text{ } \Omega = R_1 + R_2$$

$$R_2 = 7.27 - 0.23 = 7.04 \text{ } \Omega$$

$$X_{LR} = 11.19 \sin 49.45^\circ = 8.50 \text{ } \Omega$$

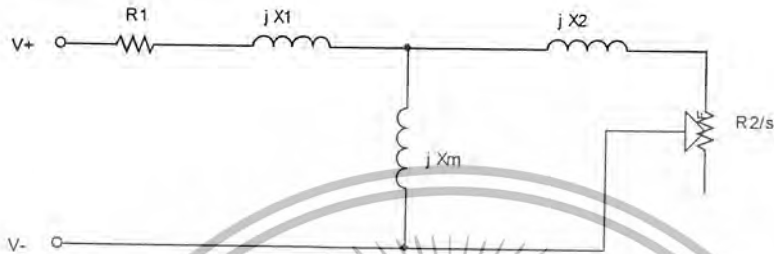
$$X_1 = X_2 = \frac{8.50}{2} = 4.25 \text{ } \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หา slip เมื่อ คัดที่ full load

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0.053$$

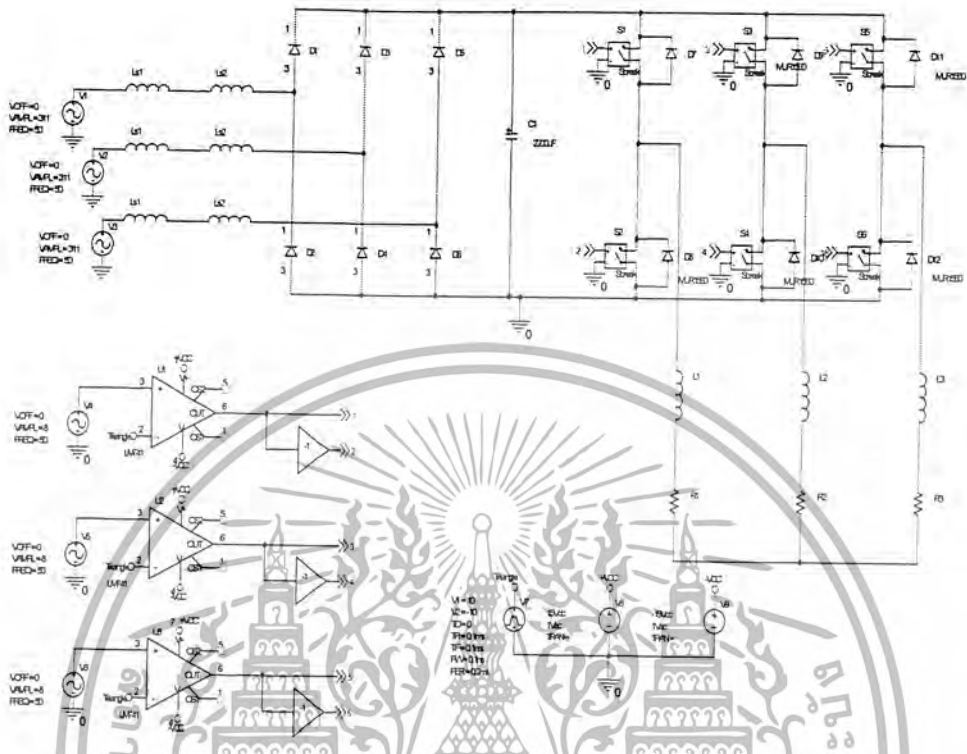
Approximate equivalent circuit



ทำการขบวงจรเพื่อหาโหลด R, L

$$\begin{aligned} Z_r &= R_r + jX_r \\ &= \frac{(R_2 + jX_2) // jX_m}{s} \\ &= \frac{(7.04 + j4.25) // j52.44}{0.053} \\ &= (132.83 + j4.25) // j52.44 \\ &= (132.90 / 1.83^\circ // 52.44 / 90^\circ) \\ &= 6.969.27 / 91.83^\circ \\ &= 144.42 / 23.11^\circ \\ &= 48.26 / 68.73^\circ \\ &= 17.51 + j44.97 \\ R_1 + jX_1 &= 0.23 + j4.25 \\ Z_{รวม} &= 17.74 + j49.22 \\ \text{ได้ค่า } R &= 17.74 \Omega \\ X_L &= 49.22 \Omega \\ X_L &= 2\pi fL \\ L &= \frac{49.22}{2\pi f} = \frac{49.19}{2\pi 50} = 0.156 \text{ H} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 วงจรจ่ายสองโดยใช้โปรแกรม ORCAD

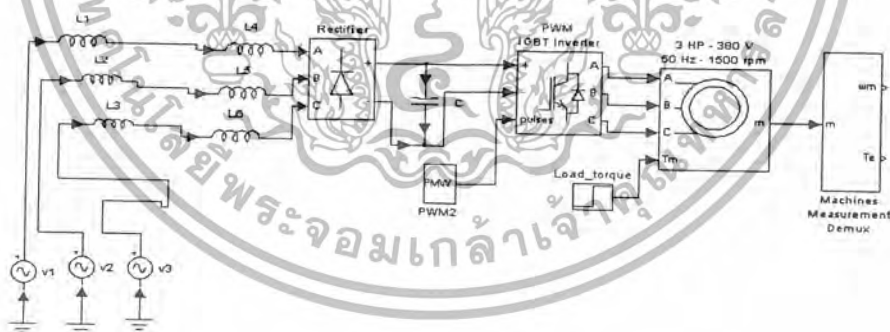
เริ่มจากไฟเข้าที่ด้านหน้าโดยผ่านคาร์แคบแคตแดนซ์ 2 ตัว คือ L_{s1} ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวนำของระบบ และ L_{s2} ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวนำที่เราใส่เข้าไปเพื่อปรับปรุงระบบไฟฟ้า โดยการลดฮาร์มอนิกส์ที่ถูกฉีดกลับเข้ามา จากนั้นจะผ่านในส่วนของวงจรบริดจ์เรกติไฟล์ ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟกระแสสลับเป็นไฟกระแสตรง นอกจากนี้จะผ่านวงจรกรองแบบคาปาซิเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ปรับไฟกระแสตรงให้มีความราบเรียบมากขึ้นก่อนที่จะเข้าวงจรพีดับบลิวเอ็ม พัลส์วิดจ์มอดูเลชัน ซึ่งจะไปควบคุมความเร็วมอเตอร์อีกต่อหนึ่ง และสุดท้ายจะขับโหลดซึ่งในที่นี้จะแทนด้วย R, L

ส่วนของวงจрд้านล่างจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ โดยการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งถูกสร้างมาจากวงจрд้านล่างขวลเล็กๆอีกทีหนึ่ง โดยพัลส์บวจะเกิดขึ้นในช่วงที่สัญญาณไซน์มีค่ามากกว่า และพัลส์ลบจะเกิดจากช่วงที่สัญญาณสามเหลี่ยมมีค่าสูงกว่า เราเรียกเทคนิคการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบนี้ว่า เทคนิคการมอดูเลชันแบบไซน์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า SPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ขั้นตอนการทดลอง(2)

1. ทำการ open circuit ที่ variac 3 phase วัดค่ากระแสและแรงดันในแต่ละเฟส
2. ทำการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์หมุนที่ความถี่ 50Hz ขณะยังไม่ต่อโหลดวัดค่ากระแสและแรงดันในแต่ละเฟส
3. ทำการจ่ายไฟให้กับโหลดที่สภาวะโหลด 10, 30 และ 50 % วัดค่ากระแสและแรงดันในแต่ละเฟส
4. ทำการ open circuit ที่ variac 3 phase หลังจากจ่ายไฟให้กับโหลด วัดค่ากระแสและแรงดันในแต่ละเฟส
5. นำค่าที่ได้จากการวัดมาหาอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย(L_s)แล้วทำการจำลองวงจรในโปรแกรม MATLAB เมื่อต่อโหลดและไม่ต่อโหลด ด้านหน้าวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ในสภาวะโหลด 10, 30, 50, 70 และ 90% ที่ความถี่ 30, 40 และ 50Hz บันทึกผลการทดลอง
6. ทำการวัดค่าจริงของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ขณะยังไม่ต่อ โหลดเพื่อที่จะออกแบบโซ่คตามมาตรฐาน VDE ในสภาวะโหลด 10, 30, 50, 70 และ 90% ที่ความถี่ 30, 40 และ 50Hz
7. นำค่าโซ่คที่ได้จากการออกแบบมาทำการพัน โซ่คแล้วต่อเข้ากับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แล้ววัดค่าจริงของวงจรที่จุดต่อรวม(จุด PCC) ในสภาวะโหลด 10, 30, 50, 70 และ 90% ที่ความถี่ 30, 40 และ 50Hz บันทึกผลการทดลอง
8. นำค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย L_s มาทำการออกแบบโซ่คและนำค่าโซ่คที่ได้จากการออกแบบต่อเข้ากับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์วัดค่าจริงของวงจรในสภาวะโหลด 10, 30, 50, 70 และ 90% ที่ความถี่ 30, 40 และ 50Hz บันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 5.2 วงจรจำลองในโปรแกรม MATLAB

วงจรทดลองในโปรแกรม MATLAB นี้กระบวนการทำงานไม่ต่างจากวงจรจำลองในโปรแกรม ORCAD มากนัก เปลี่ยนเพียงที่อินเวอร์เตอร์จะใช้การมอดดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่า และที่โหลดจะเปลี่ยนเป็นการขับ DC Machine เพื่อความสมจริงมากขึ้น

โดยการมอดดูเลชันแบบสเปซเวกเตอร์นี้ จะเกิดจากการนำสัญญาณไซน์มารวมกับสัญญาณสามเหลี่ยม ก่อนที่จะทำการมอดดูเลชันกับสัญญาณสามเหลี่ยมอีกทีหนึ่ง เทคนิคการสร้างสัญญาณพีดีบีบลิวเอ็มแบบนี้ สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “อินเวอร์เตอร์ไครฟ์”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 การหาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

เราทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเพื่อนำไปแทนค่า L_s ในวงจรจำลอง ซึ่งมีขั้นตอนการหา ดังนี้

1. ทำการ open circuit ด้านเอาต์พุทของ variac 3 phase เพื่อทำการวัดหาค่าแรงดัน (V_1)
2. ทำการต่อวงจรเพื่อจ่ายกระแสให้กับโหลด วัดหาค่าแรงดัน (V_2) และกระแส (I) ขณะสภาวะจ่าย โหลด
3. เมื่อทำการทดลองจ่ายโหลดเสร็จแล้วให้ทำการ open circuit อีกครั้งเพื่อหาค่าแรงดัน (V_1) โดยเมื่อเวลาเปลี่ยนจะมีผลต่อแรงดัน
4. นำค่าแรงดันและกระแสที่วัดได้มาหาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายตามสมการ $V = I \cdot Z$ โดยได้สมการเป็น $V_1 - V_2 = I \cdot Z$

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองหาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

สภาวะ	Va	Vb	Vc	Ia	Ib	Ic
Open circuit ก่อนจ่ายไฟให้กับมอเตอร์	219.4	219.7	224.8	0.01	0.01	0.01
จ่ายไฟให้กับมอเตอร์	219.2	219.8	224.9	0.79	0.56	0.91
โหลด10%	220.2	218.4	223.5	1.53	0.93	1.65
โหลด30%	219.2	220.1	225.3	2.78	1.54	2.92
โหลด50%	216.9	217.8	222.4	4.02	2.32	4.07
Open circuit หลังจ่ายไฟให้กับมอเตอร์	218.3	218.8	223.9	0.01	0.01	0.01

จากผลการวัดค่ากระแสและแรงดันจะสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดัน (Variac 3 phase) โดยการเลือกค่ากระแส (I) และแรงดัน (V_1) ขณะที่จ่ายไฟให้กับโหลด 50% เพราะเมื่อค่าโหลดยิ่งมากค่าอิมพีแดนซ์จะคงที่ค่ากระแสจะสูงขึ้นและแรงดันจะลดลงค่าแรงดันที่ตกลงจะเป็นแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (L_s) และเลือกค่าแรงดัน (V_2) ขณะ Open circuit หลังจากจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ โดยคิดค่า L_s ในและเฟสแล้วหาค่าเฉลี่ยจะได้ L_s ของแหล่งจ่ายแรงดัน

$$Z = \frac{(V_2 - V_1)}{I}$$

$$L_{s1} = \frac{Z}{2\pi f}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ตารางผลการทดลอง

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.1.1 ข้อมูล input ไม่นำโหลดที่ 50Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	219.6	224.1	220.1	384.1	384.4	380.3	0.88	1.55	1.43
30	220.6	224.7	220.7	385.5	385.8	380.8	1.63	2.6	2.5
50	221.7	226.1	222.1	388	388.1	383.7	2.37	3.52	3.49
70	219.8	224.3	220	384.4	384.5	380.5	3.31	4.53	4.58
90	219.6	223.9	219.8	384.5	384.5	380	4.23	5.63	5.73

Load (%)	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	120	113	131.8
30	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	107.4	103.7	112.9
50	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	98.9	96.9	100.9
70	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	92.3	89.4	92.1
90	0.6	0.6	0.7	0.5	0.6	0.6	87.5	85.1	86.4

Load (%)	DPF			PF			P (W)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	1	0.99	0.94	0.63	0.64	0.56	110	220	180
30	1	1	0.96	0.68	0.69	0.64	240	400	350
50	1	1	0.96	0.7	0.71	0.67	370	580	530
70	1	1	0.97	0.73	0.74	0.71	530	760	720
90	0.99	1	0.98	0.73	0.75	0.73	680	940	930

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.1.2 ค่าเฉลี่ยข้อมูล input ไม่ใส่โซ๊ค ที่ 50Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	221.27			382.93			1.27		
30	222			384.03			2.24		
50	223.3			386.6			3.13		
70	221.37			383.13			4.14		
90	221.1			383			5.2		

Load (%)	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.5			0.5			121.6		
30	0.5			0.5			108		
50	0.53			0.5			98.9		
70	0.53			0.5			91.27		
90	0.63			0.57			86.33		

Load (%)	DPF			PF			P (W)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	0.98			0.61			170		
30	0.99			0.67			330		
50	0.99			0.69			493.33		
70	0.99			0.73			670		
90	0.99			0.74			850		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.1.3 ข้อมูล output ไม่นำใช้ที่ 50Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vab1	Vbc1	Vca1
10	388.9	388.8	388.4	2.22	2.29	2.26	350.6	347.3	343.4
30	388.7	387.8	387.5	2.64	2.64	2.66	346.6	346.6	345.2
50	384.4	383.5	381.4	3.1	3.09	3.11	343.4	342.5	341.8
70	387.1	387.1	387.5	3.75	3.92	3.72	348.9	350.9	349.2
90	386.1	385.5	386.1	4.58	4.68	4.67	345.2	347	346.8

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	5.9	6.1	4.4	2.17	2.19	2.2
30	5.5	4.9	4.1	2.57	2.51	2.55
50	3.8	4.2	4.3	3.03	3.06	3.07
70	3.3	3.2	2.9	3.75	3.78	3.76
90	3.2	3.7	2.2	4.57	4.65	4.7

Load (%)	P (kW)	speed rpm
10	0.46	1487
30	0.97	1471
50	1.44	1453
70	1.89	1429
90	2.5	1402

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.1.4 ค่าเฉลี่ยข้อมูล output ไม่ใส่โซ่ที่ 50Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vab1	Vbc1	Vca1
10	388.7			2.26			347.1		
30	388			2.65			346.13		
50	383.1			3.1			342.57		
70	387.23			3.8			349.67		
90	385.9			4.64			346.33		

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	5.47			2.19		
30	4.83			2.54		
50	4.1			3.04		
70	3.13			3.76		
90	3.03			4.64		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.2.1 ข้อมูล input ไม่ใส่โซ่ที่ 40Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	218.9	220.1	220.2	380	381.3	379.5	0.86	1.12	1.15
30	219.3	220.4	220.3	381	377.2	376	1.55	1.85	2.06
50	218.2	218.5	219.7	381.6	387.4	386.2	2.96	2.74	2.38
70	220.3	222.1	221.6	383	383.8	381.5	3.14	3.69	3.89
90	220.3	222.1	221.5	383.7	384.5	381.6	4.02	4.61	4.83

Load (%)	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	118.8	127	126.5
30	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	107.5	111.8	112.2
50	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	103.9	104.2	102.4
70	0.4	0.4	0.6	0.4	0.4	0.5	99.2	99.6	98.7
90	0.5	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5	95.5	95.5	93.7

Load (%)	DPF			PF			P (W)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	0.99	0.99	0.99	0.63	0.61	0.61	120	160	160
30	0.99	1	0.99	0.66	0.67	0.66	230	280	300
50	0.99	1	0.99	0.69	0.69	0.68	360	420	440
70	0.99	1	0.99	0.69	0.71	0.7	490	590	610
90	0.99	1	0.99	0.71	0.72	0.72	630	740	770

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.2.2 ค่าเฉลี่ยข้อมูล input ไม่ใส่ซั๊ก ที่ 40Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	219.73			380.27			1.04		
30	220			378.07			1.82		
50	218.8			385.07			2.69		
70	221.33			382.77			3.57		
90	221.3			383.27			4.49		

Load (%)	THDv (Vphase)			THDy (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.5			0.5			124.1		
30	0.4			0.37			110.5		
50	0.4			0.37			103.5		
70	0.47			0.43			99.17		
90	0.53			0.47			94.9		

Load (%)	DPF			PF			P (W)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	0.99			0.62			150		
30	0.99			0.66			270		
50	0.99			0.69			406.67		
70	0.99			0.7			563.33		
90	0.99			0.72			713.33		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.2.3 ข้อมูล output ไม่ใส่โซ่ที่ 40Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vab1	Vbc1	Vca1
10	340.6	340.6	340.2	2.21	2.25	2.26	277.4	278.3	277.2
30	337.5	338	337.4	2.54	2.54	2.55	277.4	278	277.2
50	333.8	334.3	333.7	3.04	3.09	3.15	273	274.1	273.6
70	335.5	335.7	335.8	3.69	3.79	3.86	277.6	278.7	278.1
90	337.5	337.3	336.7	4.68	4.71	4.58	278.6	278.6	278.1

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	5.7	5.6	5.4	2.16	2.21	2.24
30	4.7	4.1	3.6	2.47	2.52	2.61
50	4.1	3.7	3	3.01	3.04	3.12
70	3.1	3.6	2.7	3.69	3.78	3.83
90	2.8	3	1.8	4.51	4.6	4.65

Load (%)	P (kW)	speed rpm
10	0.42	1187
30	0.79	1170
50	1.2	1151
70	1.62	1128
90	2.07	1106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.2.4 ค่าเฉลี่ยข้อมูล output ไม่ใส่ซั๊ก ที่ 40Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vab1	Vbc1	Vca1
10	340.47			2.24			277.63		
30	337.63			2.54			277.53		
50	333.93			3.93			273.57		
70	335.67			3.78			278.13		
90	337.17			4.66			279.3		

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	5.23			2.2		
30	4.13			2.53		
50	3.6			3.06		
70	3.13			3.77		
90	2.53			4.59		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.3.1 ข้อมูล input ไม่ใส่โซ่ที่ 30Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	218.8	220.3	219.9	380.4	381.1	378.3	0.65	1.02	0.98
30	218.2	220	219.5	380	380.1	377.1	1.1	1.79	1.7
50	217.6	220	218.7	379.6	380	376.4	1.67	2.51	2.35
70	217.9	220.2	218.7	380.1	380.3	376.2	2.22	3.31	3.15
90	217.8	220.2	218.5	380.2	380.2	376.7	2.91	4.1	3.98

Load (%)	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	119	130.2	136
30	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	114	116.9	122.6
50	0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.6	105.3	104.6	112.4
70	0.5	0.6	0.7	0.6	0.5	0.6	100.6	94.7	103.4
90	0.5	0.6	0.7	0.5	0.7	0.7	96.5	94.5	96.2

Load (%)	DPF			PF			P (W)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	1	0.99	0.97	0.63	0.59	0.56	90	130	120
30	1	0.99	0.96	0.66	0.65	0.61	160	260	220
50	1	1	0.96	0.66	0.68	0.63	240	380	330
70	1	1	0.97	0.7	0.7	0.66	340	510	460
90	1	1	0.97	0.71	0.72	0.69	450	660	590

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.3.2 ค่าเฉลี่ยข้อมูล input ไม่ใส่โซ้ค ที่ 30Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	219.67			379.93			0.88		
30	219.23			379.07			1.53		
50	218.77			378.67			2.18		
70	218.93			378.87			2.89		
90	218.83			379.03			3.93		

Load (%)	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.6			0.57			128.4		
30	0.53			0.43			117.83		
50	0.6			0.57			107.43		
70	0.6			0.57			99.57		
90	0.6			0.63			95.73		

Load (%)	DPF			PF			P (W)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	0.99			0.59			113.33		
30	0.98			0.64			213.33		
50	0.99			0.66			316.67		
70	0.99			0.69			436.67		
90	0.99			0.71			566.67		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.3.3 ข้อมูล output ไม้ใส่โซ่ ที่ 30Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vab1	Vbc1	Vca1
10	286.2	286.8	286.4	2.1	2.2	2.2	206.6	206.6	206.5
30	283.3	283.7	283.1	2.47	2.46	2.5	204.6	206.6	206.1
50	283.6	284.3	283.4	3.07	3.14	3.11	205.8	206.3	206.2
70	285.4	285.8	285.1	3.78	3.84	3.91	208.5	209	208.5
90	287.5	286.8	286.1	4.63	4.68	4.8	210.2	210.9	210.3

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	4.6	4.1	4.1	2.08	2.12	2.13
30	3.1	3.2	3.2	2.3	2.47	2.47
50	2.9	3	2.5	3.03	3.03	3.05
70	2	2.8	2.4	3.75	3.75	3.84
90	2	2.6	2.7	4.65	4.62	4.78

Load (%)	P (kW)	speed rpm
10	0.33	886.5
30	0.63	868.5
50	0.96	849.5
70	1.28	825.8
90	1.63	795.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.1.3.4 ค่าเฉลี่ยข้อมูล output ไม่ใส่โซ้ค ที่ 30Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vabl	Vbcl	Vcal
10	286.47			2.17			206.57		
30	283.37			2.48			205.77		
50	283.77			3.11			206.1		
70	285.43			3.84			208.67		
90	286.8			4.7			210.47		

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	4.27			2.11		
30	3.17			2.41		
50	2.8			3.04		
70	2.4			3.78		
90	2.43			4.68		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.1.1 ข้อมูล input ใต้โซ๊ค ที่ 50Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส			
	(%)	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10		219.5	219.2	223	378.2	383.1	384.7	0.98	1.02	0.52
30		217.3	217.4	222.1	374.4	380.5	381.5	1.66	1.63	1.7
50		218.3	217.9	223.1	377.4	383.2	382.7	2.44	2.5	2.6
70		219.6	220.2	224.4	379.5	385.1	386	3.34	3.38	3.45
90		217.2	217.8	218.7	377	381.5	378.8	4.38	4.38	4.61

Load	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi			
	(%)	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10		0.7	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	35	21.3	36.8
30		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	29.4	28.1	27.3
50		0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	29.9	27.9	26.4
70		0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	30.5	28.1	26.9
90		0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	29.1	27.9	26.1

Load	DPF			PF			P (kW)			
	(%)	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10		1	0.89	0.87	0.94	0.86	0.8	0.2	0.19	0.09
30		0.97	0.99	0.98	0.93	0.95	0.94	0.33	0.34	0.35
50		0.97	0.99	0.97	0.92	0.95	0.94	0.5	0.5	0.55
70		0.97	0.99	0.98	0.93	0.95	0.94	0.68	0.71	0.72
90		0.97	0.99	0.97	0.93	0.95	0.93	0.89	0.91	0.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.1.2 ค่าเฉลี่ย ข้อมูล input ไฟฟ้าที่ 50Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส			
	(%)	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10		220.57			382.00			0.84		
30		218.93			378.80			1.66		
50		219.77			381.10			2.51		
70		221.40			383.53			3.39		
90		217.90			379.10			4.46		

Load	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi			
	(%)	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10		0.60			0.53			31.03		
30		0.30			0.30			28.27		
50		0.53			0.57			28.07		
70		0.40			0.47			28.50		
90		0.43			0.43			27.70		

Load	DPF			PF			P (kW)			
	(%)	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10		0.92			0.87			0.16		
30		0.98			0.94			0.34		
50		0.98			0.94			0.52		
70		0.98			0.94			0.70		
90		0.98			0.94			0.91		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.1.3 ข้อมูล output ใส่ใช้ที่ 50Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vab1	Vbc1	Vca1
10	327.8	328.9	329.5	1.85	1.8	1.87	292.1	292.2	293.8
30	357.6	357	356.8	2.44	2.44	2.52	319.5	319.5	319.1
50	359	359.4	359.4	3.17	3.17	3.27	321.5	321.8	321
70	364.2	364.4	364	3.98	4.07	4.13	327.1	327.5	327.6
90	360.1	360.2	359.6	4.98	5.02	5.08	324.5	325.4	324.2

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	7.9	6.6	6.2	1.75	1.74	1.8
30	5.7	5.3	4.5	2.38	2.42	2.48
50	4.3	3.4	3.5	3.11	3.13	3.24
70	3.8	3.5	3.1	3.89	4.04	4.08
90	2.5	2.5	2.3	4.96	5	5.05

Load (%)	P (kW)	speed rpm
10	0.49	1483
30	0.93	1465
50	1.45	1440
70	1.93	1411
90	2.69	1391

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.1.4 ค่าเฉลี่ย ข้อมูล output ใต้โหลด ที่ 50Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vab1	Vbc1	Vca1
10	328.73			1.84			292.70		
30	357.13			2.47			319.37		
50	359.27			3.20			321.43		
70	364.20			4.06			327.40		
90	359.97			5.03			324.70		

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	6.90			1.76		
30	5.17			2.43		
50	3.73			3.16		
70	3.47			4.00		
90	2.43			5.00		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.2.1 ข้อมูล input ใส่อัตราที่ 40Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	219.8	219.9	225.2	380	385.7	386.1	0.68	0.78	0.56
30	219.5	219.3	223	378.8	383.2	383.7	1.4	1.41	1.43
50	220.3	220.4	225	380	386.3	385.5	2.12	2.05	2.1
70	218.5	220.5	222.9	377.2	383.6	384.5	2.75	2.65	2.82
90	219.8	218.8	220.4	379.7	379.4	379.2	3.56	3.47	3.69

Load (%)	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	19.8	15	25.4
30	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	24.7	24.5	24.4
50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	27.5	25.8	25.1
70	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	27	26.3	25.7
90	0.3	0.6	0.4	0.5	0.5	0.4	26.5	25.6	24.7

Load (%)	DPF			PF			P (kW)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	0.98	0.94	0.9	0.95	0.9	0.87	0.14	0.15	0.1
30	0.95	0.98	0.98	0.92	0.95	0.95	0.28	0.29	0.3
50	0.97	0.99	0.97	0.93	0.95	0.94	0.43	0.43	0.44
70	0.97	0.98	0.97	0.93	0.94	0.94	0.56	0.55	0.59
90	0.96	0.98	0.97	0.93	0.94	0.94	0.73	0.72	0.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.2.2 ค่าเฉลี่ย ข้อมูล input ใส่โซ่ที่ 40Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	221.63			383.93			0.67		
30	220.60			381.90			1.41		
50	221.90			383.93			2.09		
70	220.63			381.77			2.74		
90	219.67			379.43			3.57		

Load (%)	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.40			0.37			20.07		
30	0.37			0.33			24.53		
50	0.50			0.50			26.13		
70	0.43			0.40			26.33		
90	0.43			0.47			25.60		

Load (%)	DPF			PF			P (kW)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	0.94			0.91			0.13		
30	0.97			0.94			0.29		
50	0.98			0.94			0.43		
70	0.97			0.94			0.57		
90	0.97			0.94			0.75		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.2.3 ข้อมูล output ใต้อำนาจที่ 40Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vab1	Vbc1	Vca1
10	275.4	275.4	274.9	1.72	1.75	1.8	223.9	224	223.4
30	308	308.4	310.6	2.41	2.48	2.55	251.8	254.1	254.1
50	314.2	314.9	314.2	3.22	3.24	3.33	257.6	257.9	257.7
70	316.8	316.4	315.3	4.03	4.1	4.23	260.9	261	260.4
90	312.8	312.5	311.9	5.14	5.17	5.38	259	259.7	258.3

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	5.9	6.5	5.5	1.67	1.7	1.75
30	5.7	5.4	4.4	2.37	2.43	2.5
50	5	4.4	4.2	3.16	3.2	3.29
70	2.7	2.5	2.6	4	4.05	4.2
90	2.7	2.6	1.7	5.09	5.12	5.36

Load (%)	P (kW)	speed rpm
10	0.35	1181
30	0.8	1164
50	1.16	1143
70	1.72	1105
90	2.18	1086

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.2.4 ค่าเฉลี่ย ข้อมูล output ใต้อิซต์ ที่ 40Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vab1	Vbc1	Vca1
10	275.23			1.76			223.77		
30	309.00			2.48			253.33		
50	314.43			3.26			257.73		
70	316.17			4.12			260.77		
90	312.40			5.23			259.00		

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	5.97			1.71		
30	5.17			2.43		
50	4.53			3.22		
70	2.60			4.08		
90	2.33			5.19		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.3.1 ข้อมูล input ไล่ขีด ที่ 30Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	219.5	218.4	227.5	377	390	391.3	0.53	0.56	0.45
30	219.1	217.5	221.9	376.3	380.7	381	1.13	1.34	0.93
50	219.5	218.3	221.2	377.8	381.1	380.9	1.69	1.61	1.7
70	220.4	220	222.2	380.3	382.9	384.2	2.21	2.17	2.23
90	217.8	217.2	221.4	375.6	379.7	380.2	3.02	3.03	3.11

Load (%)	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.7	0.9	1.1	0.8	0.9	1.2	20.2	15.7	23.8
30	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	0.8	23.8	14.4	32.1
50	1	0.8	0.9	1	0.7	0.9	22	22.1	21.5
70	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5	0.7	22.6	22.6	22.2
90	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	23.5	22.7	21.8

Load (%)	DPF			PF			P (kW)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	0.98	0.94	0.95	0.95	0.92	0.91	0.11	0.11	0.09
30	0.98	0.9	0.85	0.95	0.93	0.91	0.24	0.26	0.16
50	0.95	0.97	0.96	0.92	0.95	0.94	0.34	0.33	0.34
70	0.95	0.98	0.96	0.92	0.95	0.94	0.45	0.45	0.46
90	0.95	0.98	0.96	0.92	0.94	0.93	0.61	0.62	0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.3.2 ค่าเฉลี่ย ข้อมูล input ใ้ใช้ที่ 30Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vphase)			แรงดัน (Vline)			กระแส		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	221.80			386.10			0.51		
30	219.50			379.33			1.13		
50	219.67			379.93			1.67		
70	220.87			382.47			2.20		
90	218.80			378.50			3.05		

Load (%)	THDv (Vphase)			THDv (Vline)			THDi		
	Van	Vbn	Vcn	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic
10	0.90			0.97			19.90		
30	0.77			0.83			23.43		
50	0.90			0.87			21.87		
70	0.63			0.63			22.47		
90	0.60			0.57			22.67		

Load (%)	DPF			PF			P (kW)		
	Line a	Line b	Line c	Line a	Line b	Line c	Pa	Pb	Pc
10	0.96			0.93			0.10		
30	0.91			0.93			0.22		
50	0.96			0.94			0.34		
70	0.96			0.94			0.45		
90	0.96			0.93			0.62		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.3.3 ข้อมูล output ใต้อำนาจที่ 30Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vabl	Vbcl	Vcal
10	241.2	237.6	236.9	1.82	1.8	1.72	172.6	171.9	171
30	231.7	231.2	230.4	2.44	2.46	2.4	167.7	166.8	167.2
50	256.1	255.7	255.1	3.35	3.32	3.24	186.7	186.4	185.7
70	263.2	263.8	263.2	4.32	4.19	4.11	192.8	193.6	192.8
90	262.1	262	261.4	5.74	5.74	5.67	193.8	193.9	193.7

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	6.4	6.4	4.5	1.74	1.74	1.68
30	3.3	4.5	3.4	2.38	2.42	2.34
50	2.5	2.3	2.8	3.32	3.3	3.19
70	2.2	2.2	2.6	4.26	4.14	4.08
90	1.8	1.5	1.5	5.71	5.71	5.64

Load (%)	P (kW)	speed rpm
10	0.29	883
30	0.58	851
50	0.92	836
70	1.27	812
90	1.79	767

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางผลการทดลองที่ 5.2.3.4 ค่าเฉลี่ย ข้อมูล output ใต้โซ่ที่ 30Hz สภาวะตามโหลดต่างๆ

Load (%)	แรงดัน (Vline)			กระแส			แรงดัน (Vline_fundamental)		
	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Vabl	Vbcl	Vcal
10	238.57			1.78			171.83		
30	231.10			2.43			167.23		
50	255.63			3.30			186.27		
70	263.40			4.21			193.07		
90	261.83			5.72			193.80		

Load (%)	THDi			กระแส(fundamental)		
	Ia	Ib	Ic	Ia1	Ib1	Ic1
10	5.77			1.72		
30	3.73			2.38		
50	2.53			3.27		
70	2.33			4.16		
90	1.60			5.69		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองที่ 5.3.1.1 ข้อมูลTHDi มีใช้การ 10-90 % ที่ความถี่ 50 Hz เฟส A

อันดับ	10%		30%		50%		70%		90%	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1	0.88	100	1.57	100	2.35	100	3.17	100	4.21	100
3	0.3	33.8	0.07	4.3	0.12	4.8	0.13	4.2	0.09	2.1
5	0.07	8	0.45	27.9	0.06	28.5	0.91	27.8	1.14	27.2
7	0.06	6.8	0.09	5.9	0.14	6	0.21	6.8	0.29	7
9	0.02	3	0.01	0.4	0.01	0.4	0.01	0.3	0.01	0.2
11	0.01	2.5	0.08	5.3	0.13	5.4	0.18	5.5	0.21	5.2

ตารางการทดลองที่ 5.3.1.2 ข้อมูลTHDi มีใช้การ 10-90 % ที่ความถี่ 50 Hz เฟส B

อันดับ	10%		30%		50%		70%		90%	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1	1	100	1.55	100	2.3	100	3.22	100	4.24	100
3	0.15	15	0.09	6.1	0.15	6.5	0.18	5.8	0.13	3.1
5	0.14	12.5	0.4	26.2	0.59	25.8	0.83	25.8	1.11	26
7	0.05	4.4	0.1	6.5	0.15	6.5	0.22	6.8	0.29	6.9
9	0.04	4.3	0.01	0.9	0.03	1.1	0.04	1.1	0.03	0.7
11	0.01	0.8	0.06	4.4	0.11	4.6	0.16	4.8	0.21	4.8

ตารางการทดลองที่ 5.3.1.3 ข้อมูลTHDi มีใช้การ 10-90 % ที่ความถี่ 50 Hz เฟส C

อันดับ	10%		30%		50%		70%		90%	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1	0.49	100	1.63	100	2.52	100	3.31	100	4.47	100
3	0.13	28.5	0.03	1.6	0.05	1.6	0.06	2	0.06	1.3
5	0.11	23.1	0.42	25.5	0.62	24.7	0.83	25.2	1.1	24.5
7	0.03	5.8	0.12	7.2	0.19	7.5	0.25	7.6	0.32	7.1
9	0.01	1.8	0.01	0.4	0.01	0.2	0.01	0.3	0.01	0.1
11	0	0.4	0.06	3.8	0.11	3.9	0.14	4.3	0.18	4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองที่ 5.3.2.1 ข้อมูลTHDi มีใช้การะ 10-90 % ที่ความถี่ 40 Hz เฟส A

อันดับ	10%		30%		50%		70%		90%	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1	0.65	100	1.3	100	2.04	100	2.73	100	3.43	100
3	0.11	17	0.04	2.6	0.06	2.9	0.06	2.1	0.66	1.9
5	0.06	9.8	0.31	23.4	0.53	26	0.69	25.4	0.86	25.1
7	0.04	5.3	0.08	5.8	0.13	6.4	0.18	6.5	0.21	6.1
9	0.01	1	0	0.2	0.01	0.2	0.01	0.2	0.01	0.1
11	0	0.3	0.05	3.5	0.9	4.6	0.12	4.3	0.13	3.8

ตารางการทดลองที่ 5.3.2.2 ข้อมูลTHDi มีใช้การะ 10-90 % ที่ความถี่ 40 Hz เฟส B

อันดับ	10%		30%		50%		70%		90%	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1	0.75	100	1.34	100	1.97	100	2.55	100	3.35	100
3	0.02	2.9	0.06	4.7	0.08	4.7	0.06	2.6	0.08	2.5
5	0.11	14	0.31	23.1	0.47	24.3	0.63	24.6	0.81	24.1
7	0.02	2.6	0.08	6.7	0.13	6.7	0.16	6.3	0.2	6
9	0.01	1.3	0.01	0.7	0.01	0.8	0.01	0.4	0.01	0.4
11	0	0.3	0.04	2.9	0.07	3.7	0.1	4	0.13	3.8

ตารางการทดลองที่ 5.3.2.3 ข้อมูลTHDi มีใช้การะ 10-90 % ที่ความถี่ 40 Hz เฟส C

อันดับ	10%		30%		50%		70%		90%	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1	0.54	100	1.38	100	2.01	100	2.73	100	3.56	100
3	0.08	16.9	0.01	0.6	0.02	1.1	0.02	0.8	0.04	0.9
5	0.1	17.6	0.31	22.7	0.47	23.6	0.66	24	0.82	23.2
7	0.02	4.1	0.09	6.7	0.15	7.1	0.18	6.9	0.23	6.6
9	0	0.4	0	0.3	0.01	0.3	0	0.1	0	0.1
11	0	0.4	0.04	2.9	0.08	3.4	0.1	3.6	0.12	3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการทดลองที่ 5.3.3.1 ข้อมูลTHDi มีใช้การระ 10-90 % ที่ความถี่ 30 Hz เฟส A

อันดับ	10%		30%		50%		70%		90%	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1	0.52	100	1.08	100	1.65	100	2.14	100	2.93	100
3	0.08	15.2	0.23	20.9	0.02	1.3	0.04	1.3	0.06	2.2
5	0.06	11.8	0.09	8.2	0.35	20.9	0.46	21.7	0.66	22.3
7	0.02	4.3	0.07	6.9	0.1	5.7	0.13	6.4	0.19	6.5
9	0.01	1.3	0.01	1	0	0.1	0	0.1	0	0.1
11	0	0.4	0.01	0.9	0.04	2.3	0.06	2.9	0.09	3.1

ตารางการทดลองที่ 5.3.3.2 ข้อมูลTHDi มีใช้การระ 10-90 % ที่ความถี่ 30 Hz เฟส B

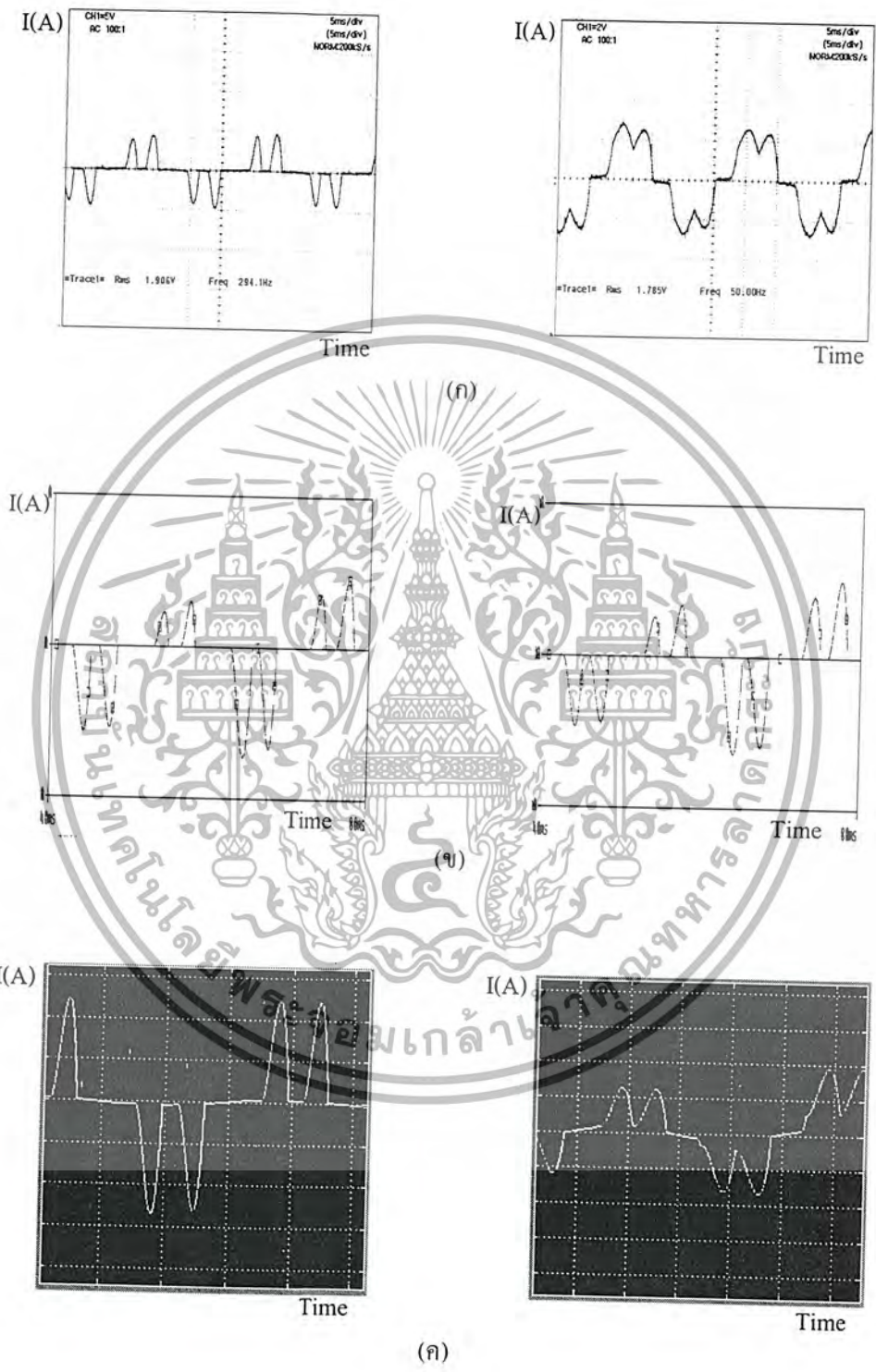
อันดับ	10%		30%		50%		70%		90%	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1	0.53	100	1.32	100	1.56	100	2.1	100	2.95	100
3	0.02	4.6	0.08	6	0.04	2.1	0.05	2.6	0.09	3.1
5	0.08	15.4	0.17	12.9	0.32	20.7	0.45	21.6	0.62	21.2
7	0.02	4.6	0.01	0.7	0.09	5.9	0.13	6.5	0.19	6.5
9	0	0.4	0.03	2.3	0.01	0.3	0.01	0.4	0.01	0.4
11	0	0.4	0.01	0.4	0.03	2	0.06	2.6	0.08	2.7

ตารางการทดลองที่ 5.4.3.3 ข้อมูลTHDi มีใช้การระ 10-90 % ที่ความถี่ 30 Hz เฟส C

อันดับ	10%		30%		50%		70%		90%	
	A	%	A	%	A	%	A	%	A	%
1	0.43	100	0.87	100	1.59	100	2.16	100	3.04	100
3	0.05	12.4	0.21	24.3	0.01	0.4	0.01	0.4	0.02	0.7
5	0.08	18.1	0.17	19.4	0.32	20.4	0.45	20.8	0.61	20.3
7	0.01	2.1	0.06	6.4	0.11	6.5	0.15	6.8	0.21	7
9	0	0.5	0.01	0.9	0	0.1	0.01	0.2	0.01	0.2
11	0	0.5	0	0.3	0.03	1.9	0.05	2.1	0.08	2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

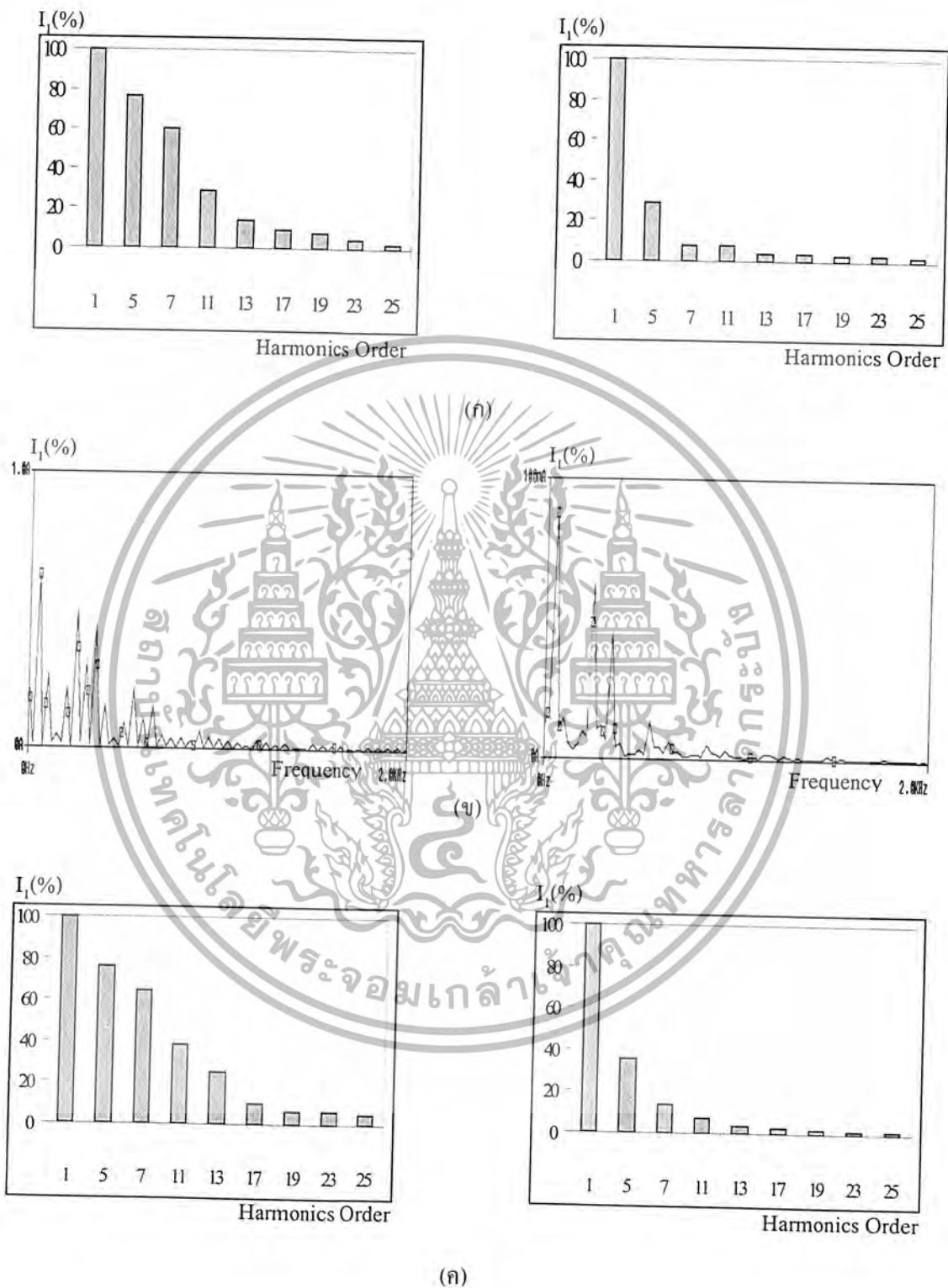
5.7 การจำลองวงจรในโปรแกรม ORCAD และMATLAB เปรียบเทียบกับค่าวัดจริง



รูปที่ 5.3 รูปคลื่นกระแสที่สถานะ load 30% ความถี่ 50 Hz ขณะยังไม่ต่อ โหลด(ซ้าย) และต่อ โหลด(ขวา)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม ORCAD (ค) ผลจากโปรแกรม MATLAB

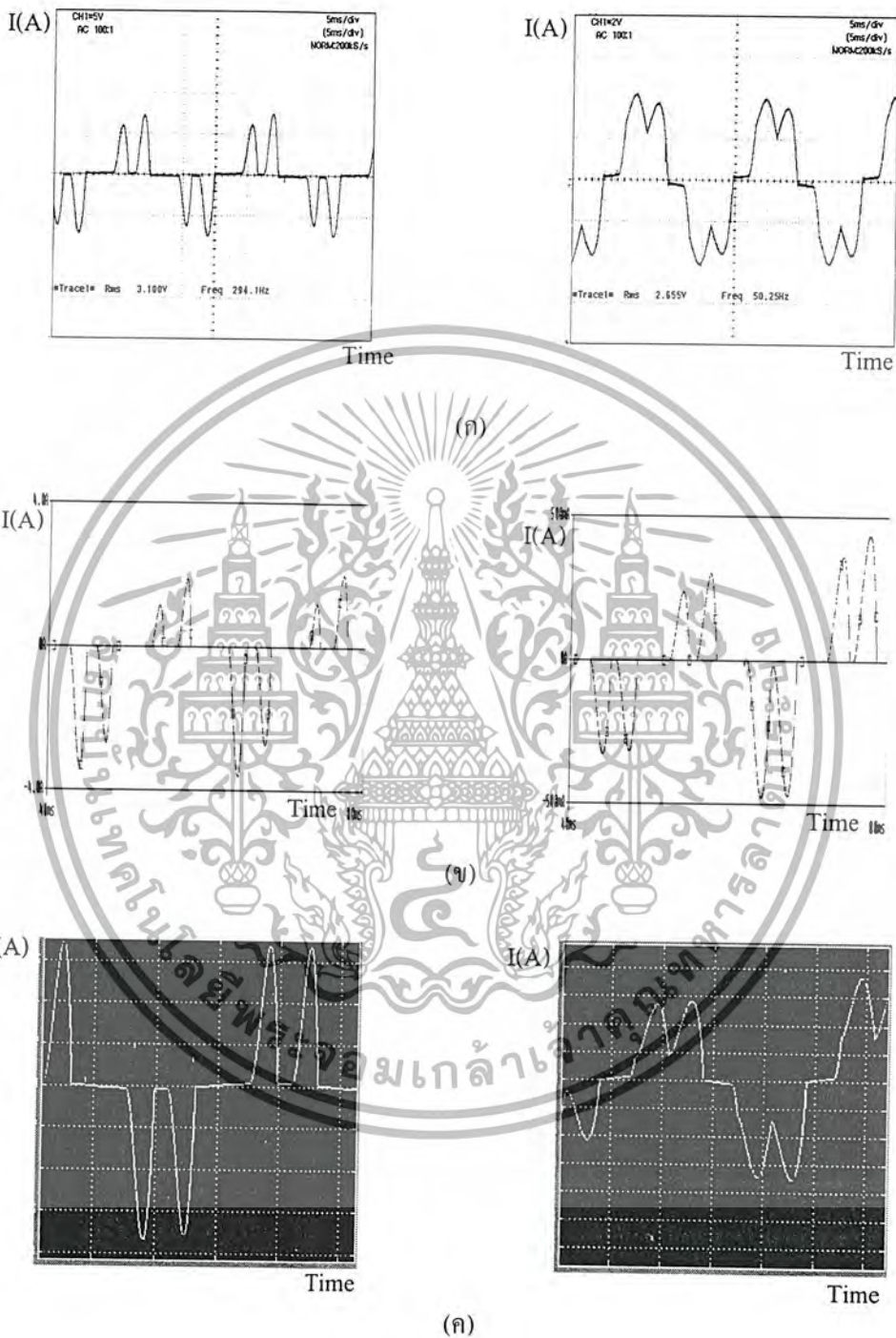
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 สเปกตรัมของกระแสที่สภาวะ load 30% ความถี่ 50 Hz ขณะยังไม่ต่อ โหลด(ซ้าย) และต่อ โหลด(ขวา)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม ORCAD (ค) ผลจากโปรแกรม MATLAB

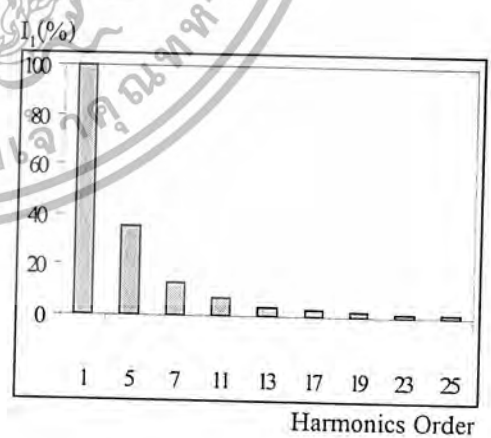
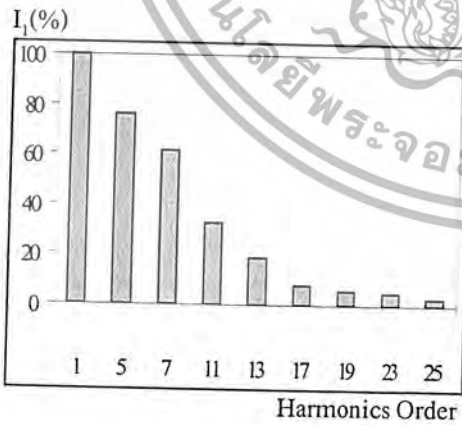
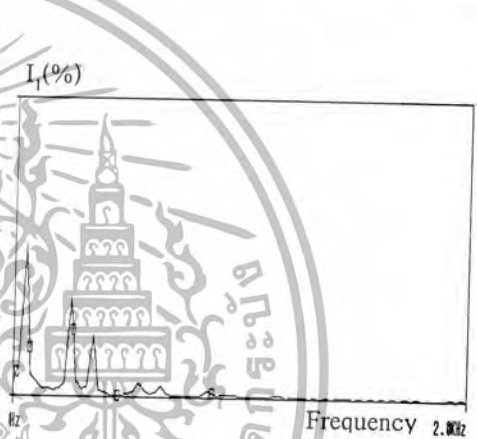
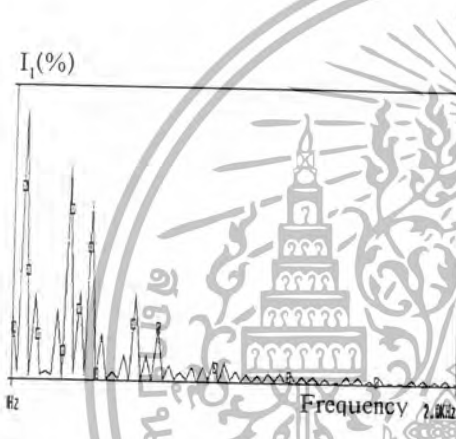
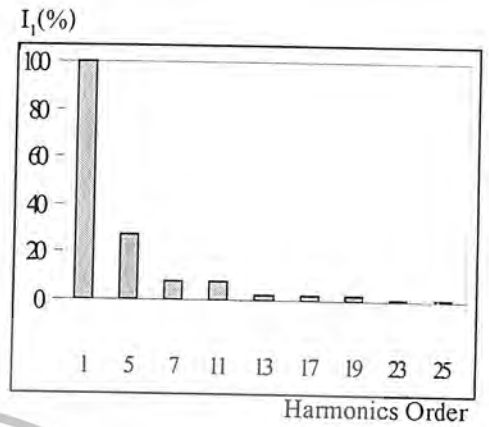
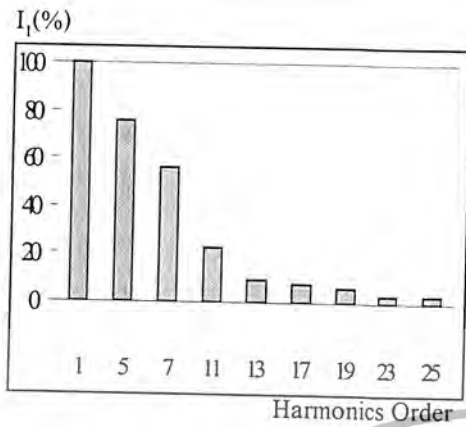
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 รูปคลื่นกระแสที่สภาวะ load 50% ความถี่ 50 Hz ขณะยังไม่ต่อโหลด(ซ้าย) และต่อโหลด(ขวา)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม ORCAD (ค) ผลจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

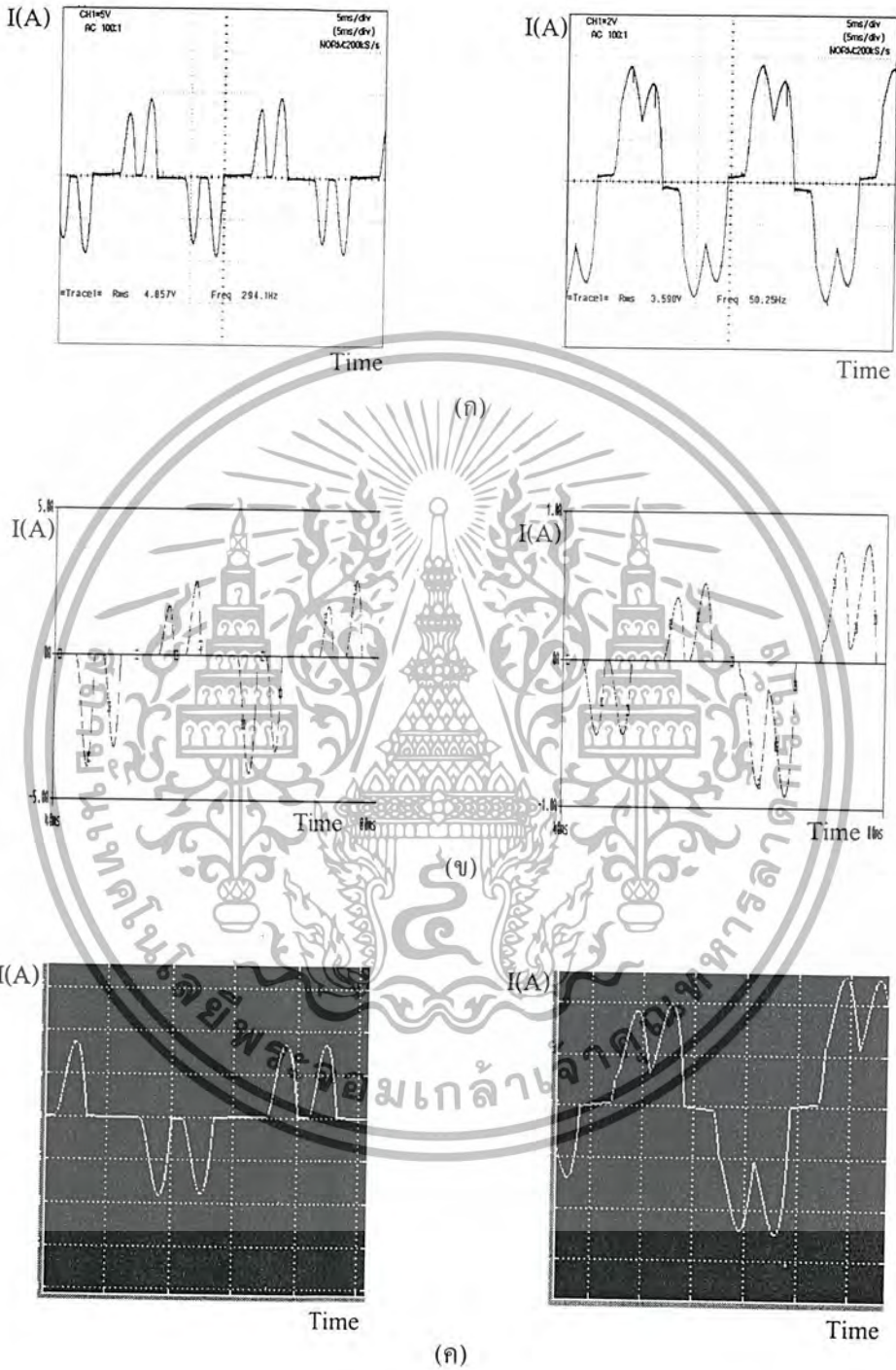


(ค)

รูปที่ 5.6 สเปกตรัมของกระแสที่สภาวะ load 50% ความถี่ 50 Hz ขณะยังไม่ต่อ โหลด(ข้าว) และต่อ โหลด(ขวา)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม ORCAD (ค) ผลจากโปรแกรม MATLAB

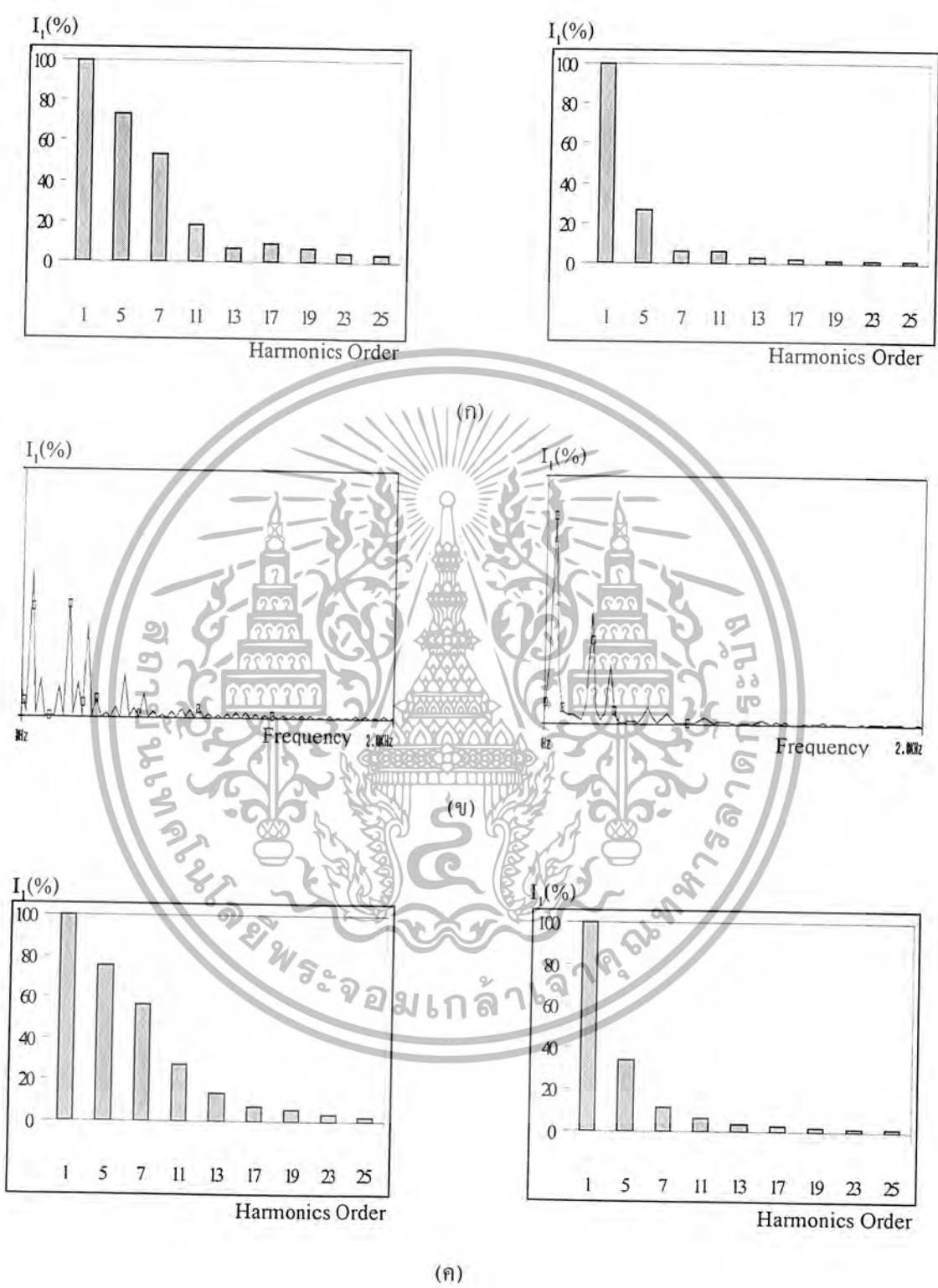
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 รูปคลื่นกระแสที่สถานะ load 70% ความถี่ 50 Hz ขณะยังไม่ต่อ โหลด(ข้าว) และต่อ โหลด(ขาว)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม ORCAD (ค) ผลจากโปรแกรม MATLAB

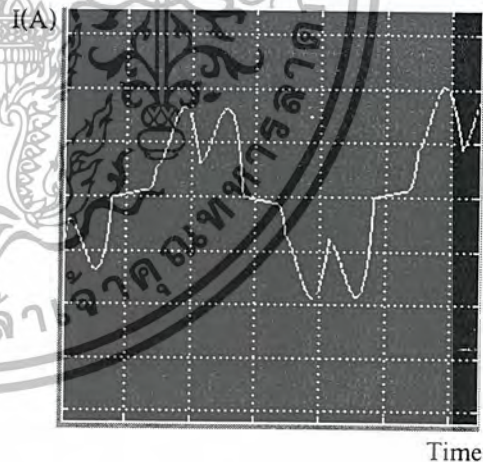
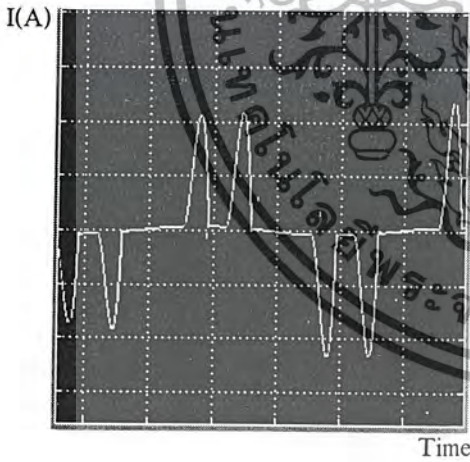
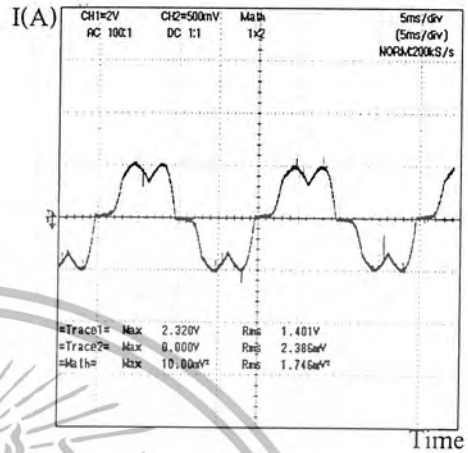
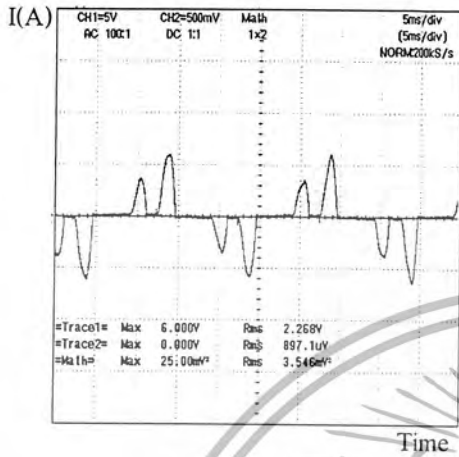
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 สเปกตรัมของกระแสที่สภาวะ load 70% ความถี่ 50 Hz ขณะยังไม่ต่อโซ๊ค(ซ้าย) และต่อ โซ๊ค(ขวา)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม ORCAD (ค) ผลจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

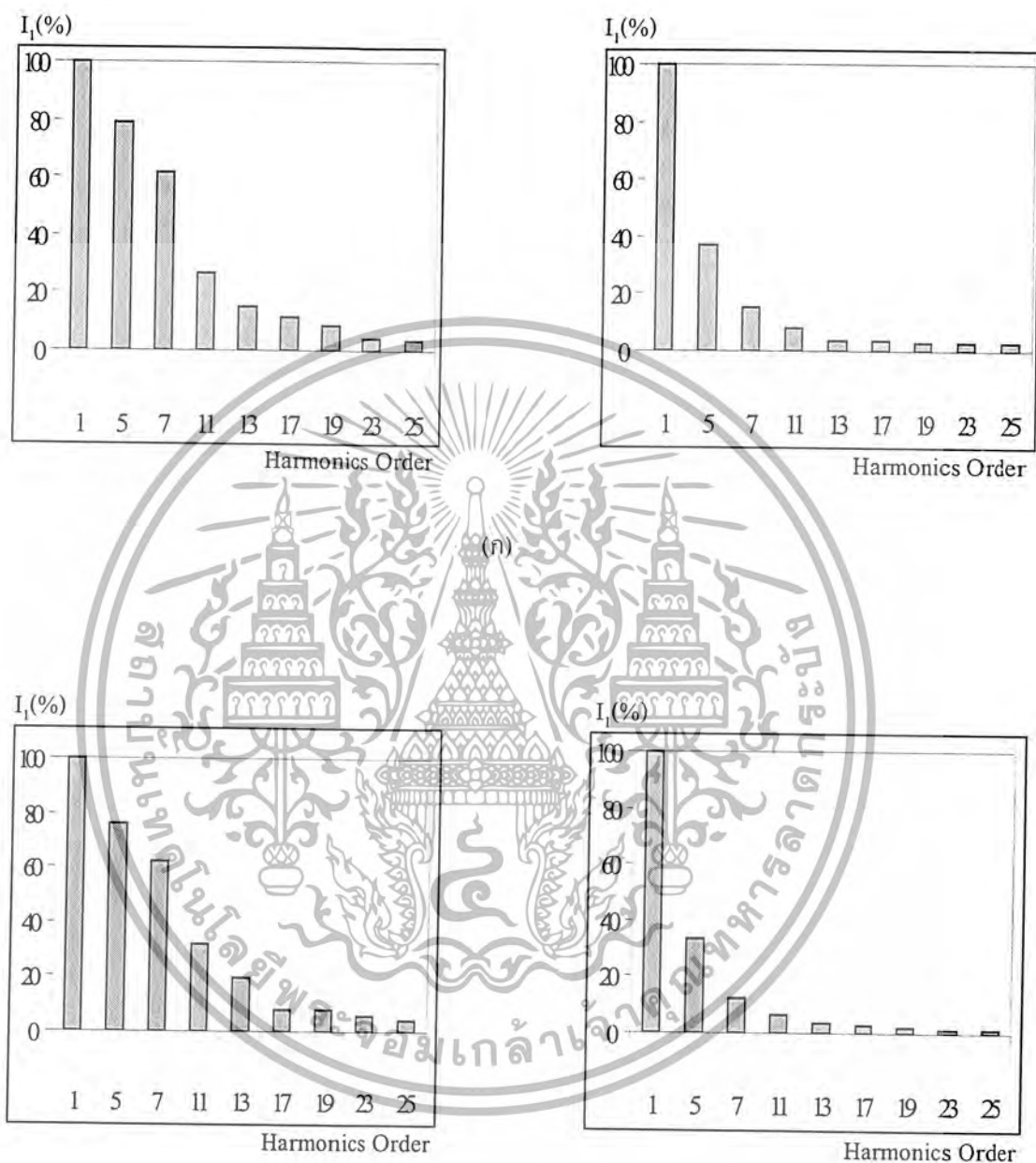


(ข)

รูปที่ 5.9 รูปคลื่นกระแสที่สภาวะ load 30% ความถี่ 40 Hz ขณะยังไม่ต่อโหลด(ซ้าย) และต่อโหลด(ขวา)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจาก โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

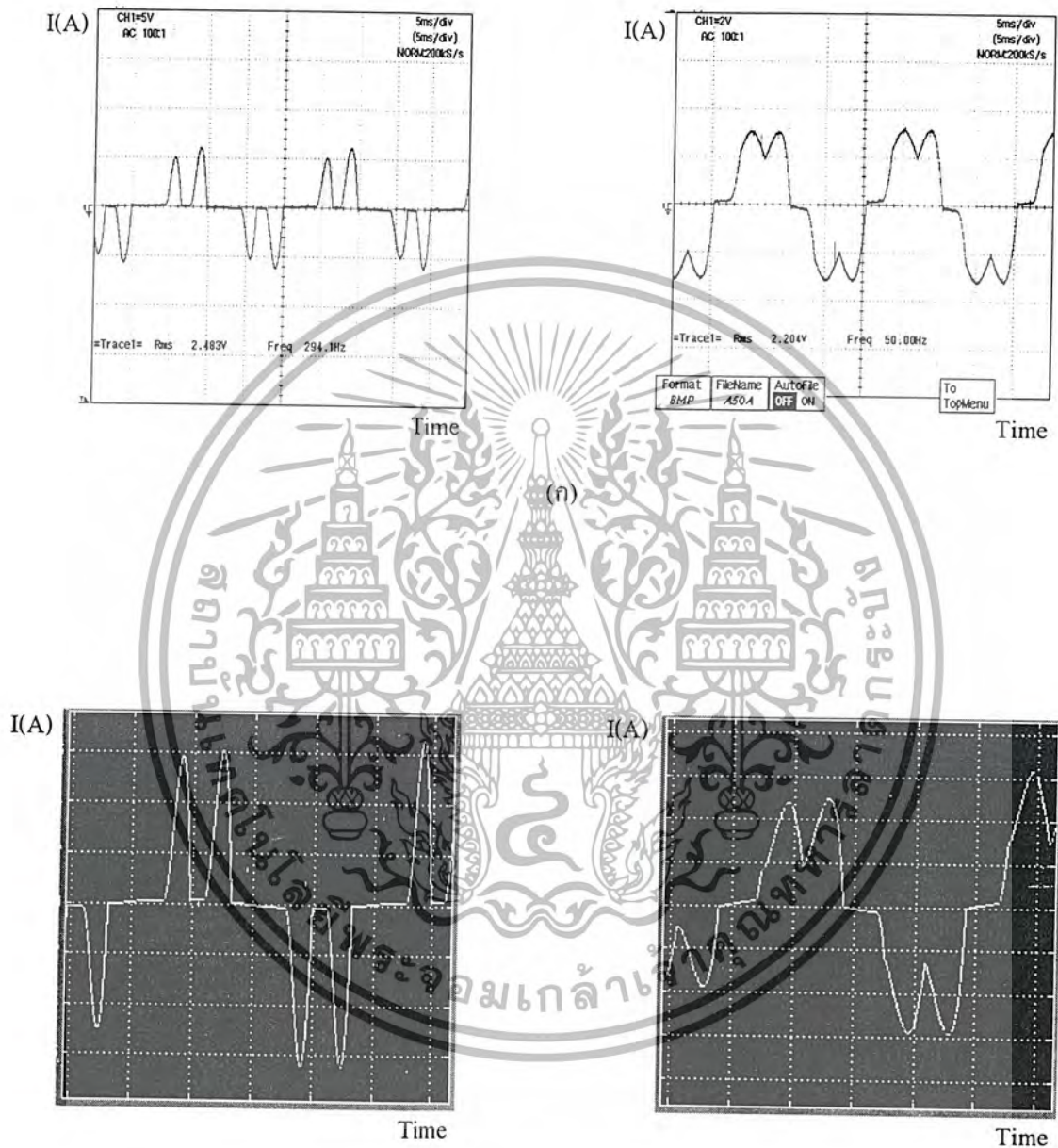


(ข)

รูปที่ 5.10 สเปกตรัมของกระแสที่สภาวะ load 30% ความถี่ 40 Hz ขณะยังไม่ต่อ โหลด(ซ้าย) และต่อ โหลด(ขวา)

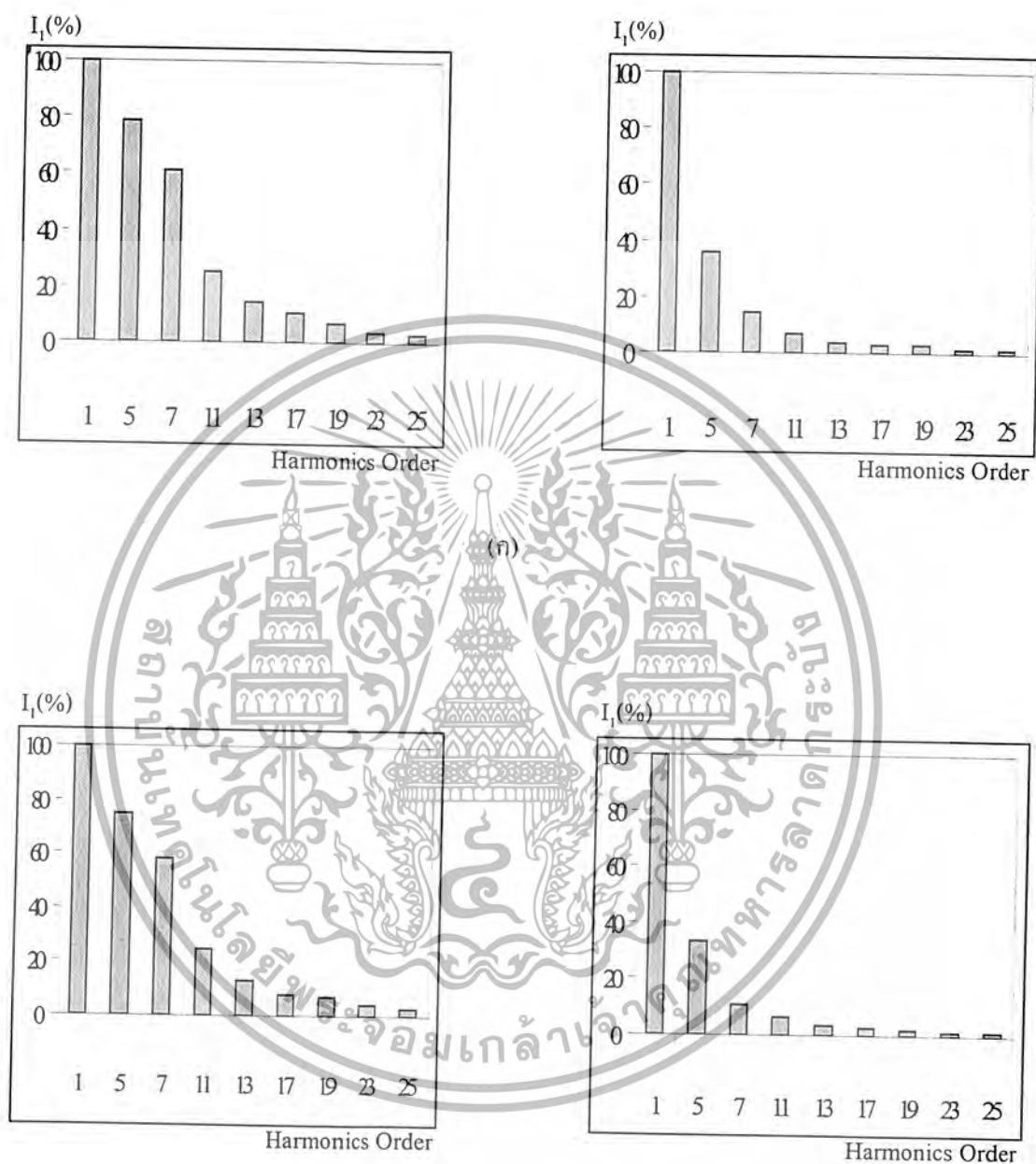
(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 รูปคลื่นกระแสที่สภาวะ load 50% ความถี่ 40 Hz ขณะยังไม่ต่อโหลด(ซ้าย) และต่อโหลด(ขวา)
(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

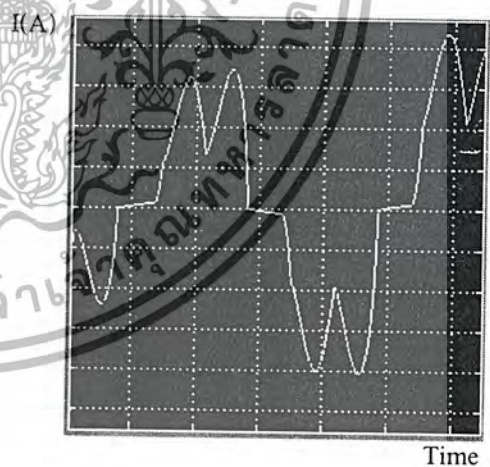
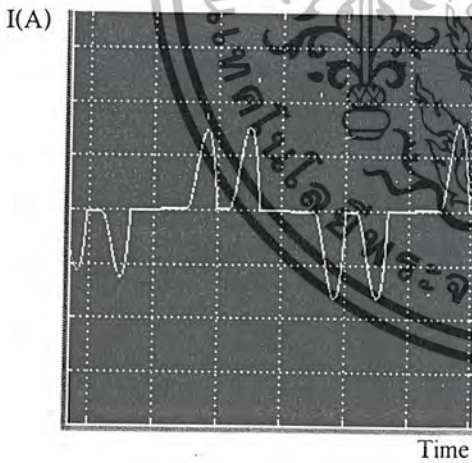
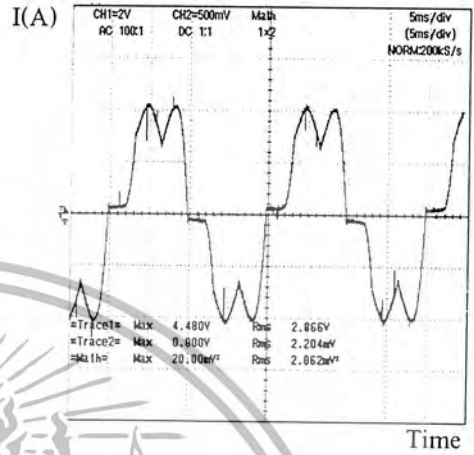
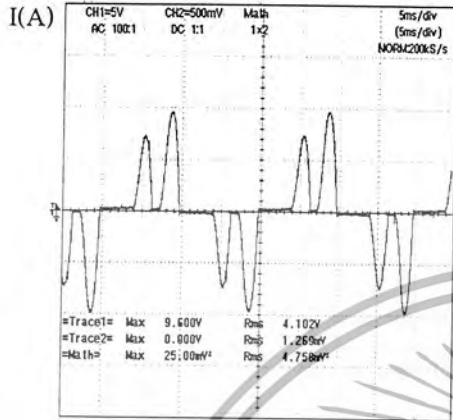
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 5.12 สเปกตรัมของกระแสที่สภาวะ load 50% ความถี่ 40 Hz ขณะยังไม่ต่อ โฉก(ซ้าย) และต่อ โฉก(ขวา)
(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

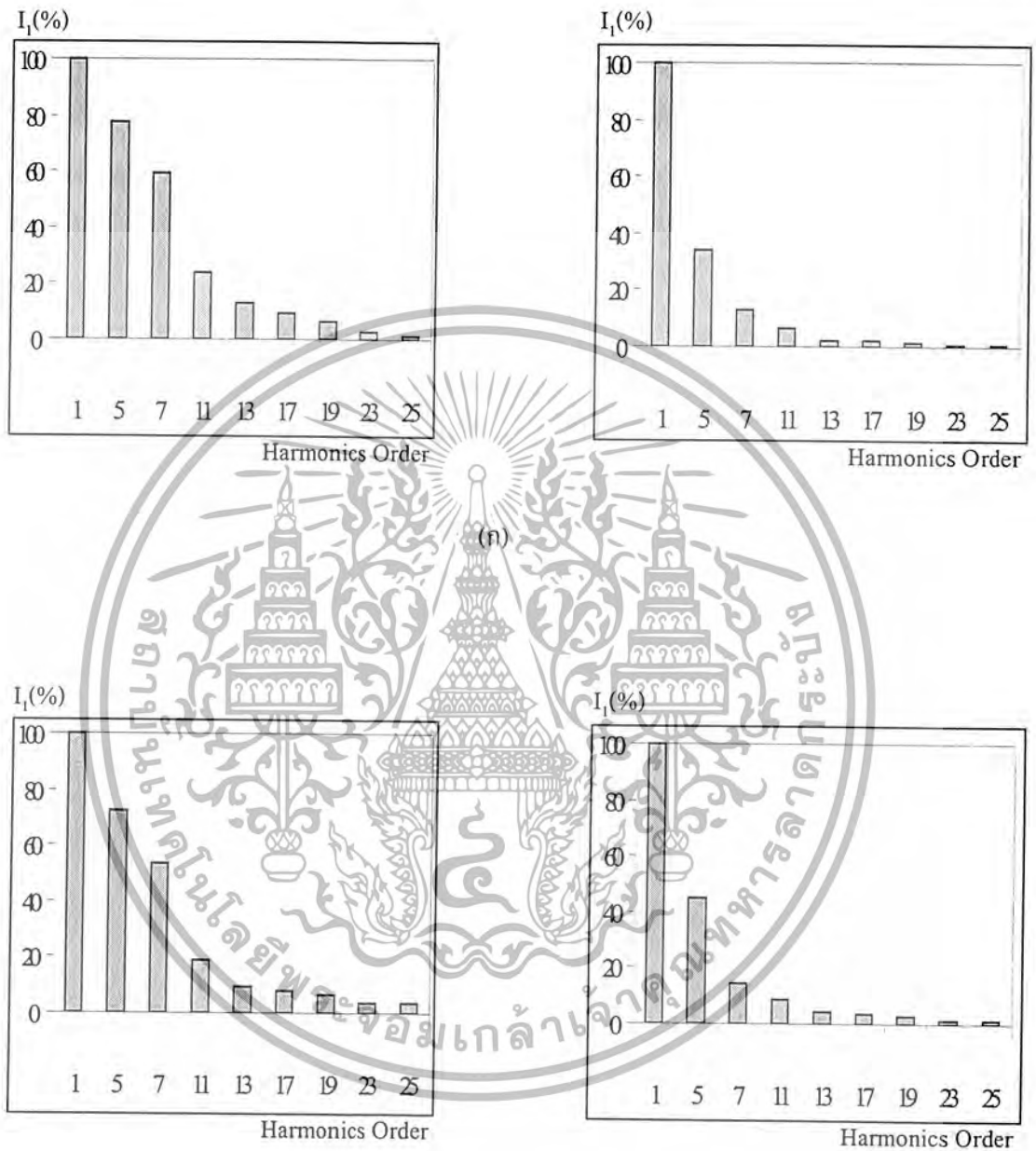


(ข)

รูปที่ 5.13 รูปคลื่นกระแสที่สภาวะ load 70% ความถี่ 40 Hz ขณะยังไม่ต่อ โฉักร(ซ้าย) และต่อ โฉักร(ขวา)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

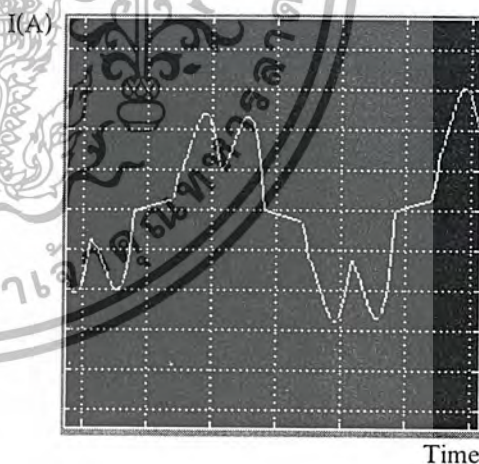
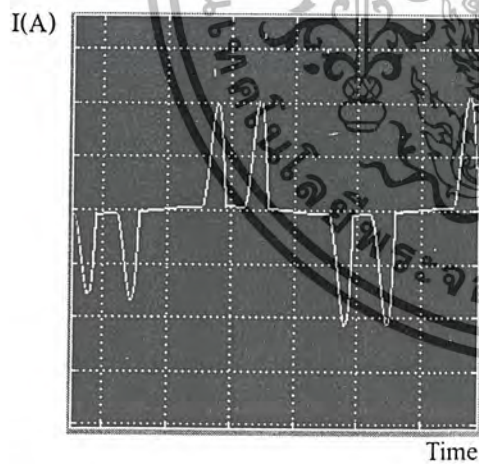
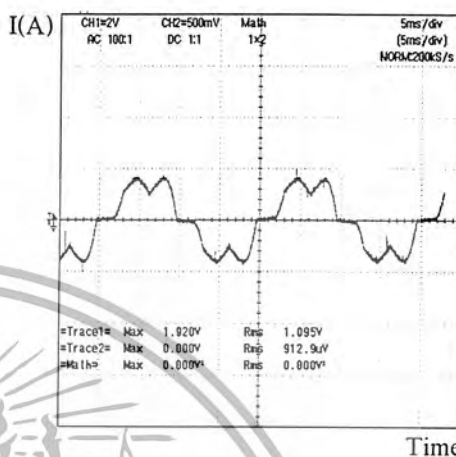
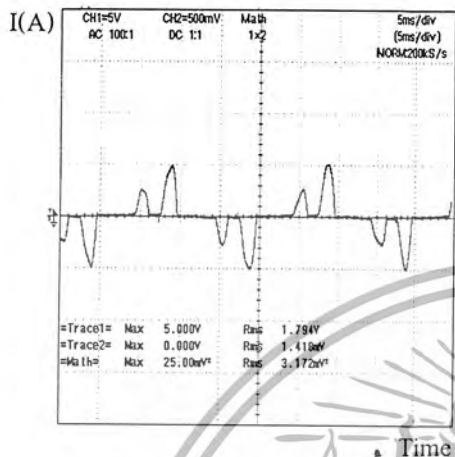
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 5.14 สเปกตรัมของกระแสที่สภาวะ load 70% ความถี่ 40 Hz ขณะยังไม่ต่อ โฉก(ซ้าย) และต่อ โฉก(ขวา)
(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

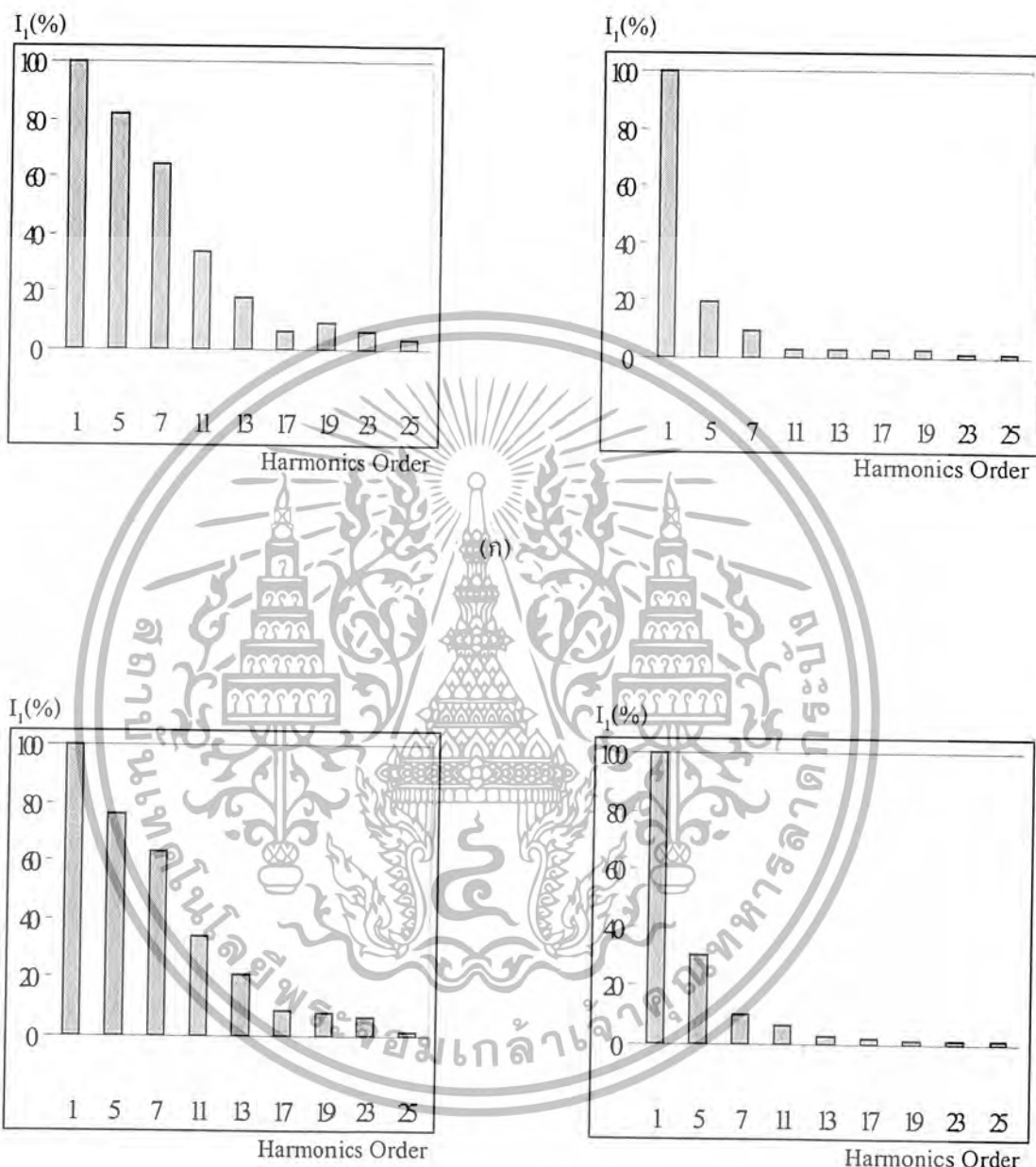


(ข)

รูปที่ 5.15 รูปคลื่นกระแสที่สภาวะ load 30% ความถี่ 30 Hz ขณะยังไม่ต่อ โฉัศ(ซ้าย) และต่อ โฉัศ(ขวา)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

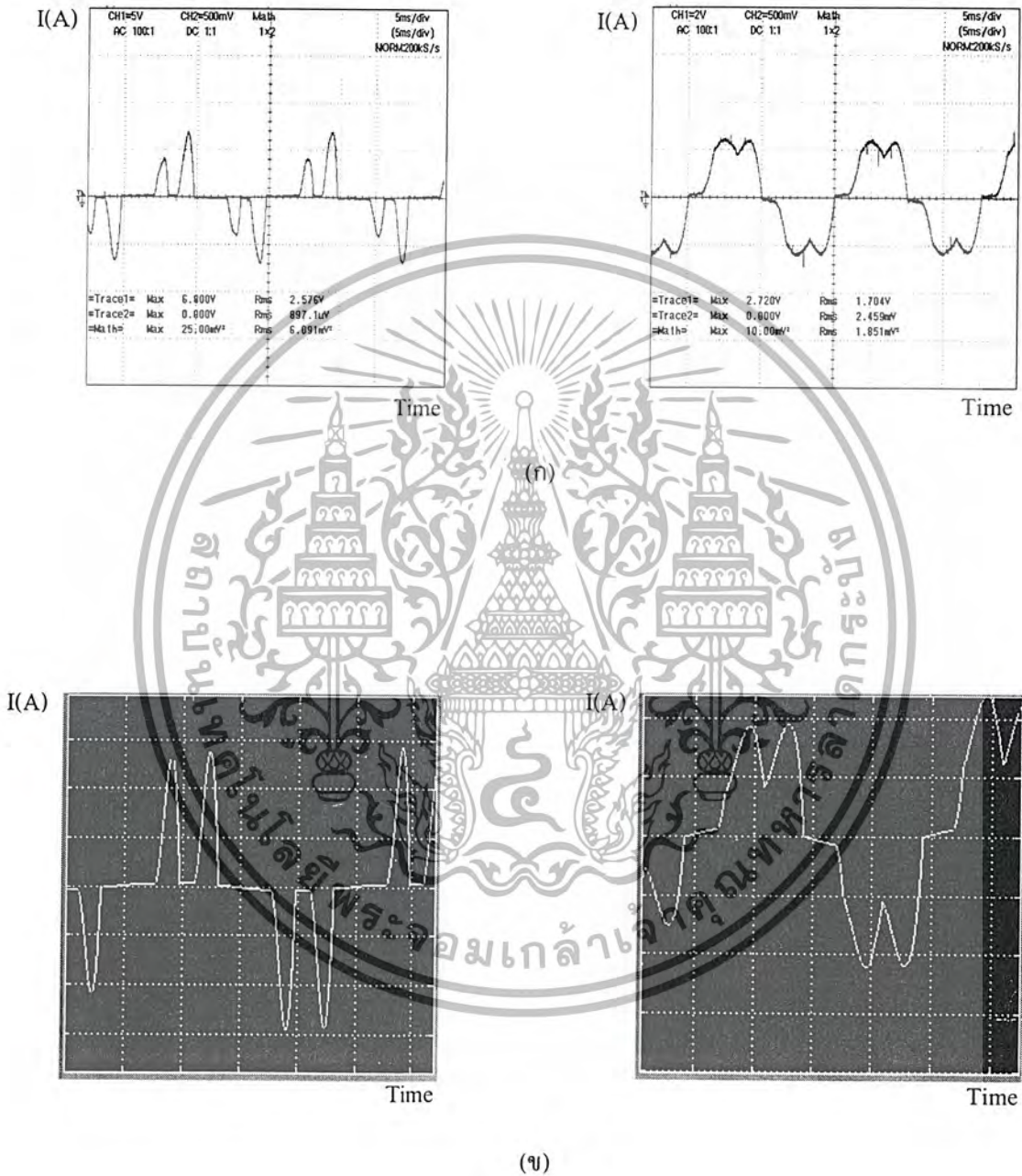
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 5.16 สเปกตรัมของกระแสที่สภาวะ load 30% ความถี่ 30 Hz ขณะยังไม่ต่อ โหลด(ข้าว) และต่อ โหลด(ข้าว)
 (ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 รูปคลื่นกระแสที่สภาวะ load 50% ความถี่ 30 Hz ขณะยังไม่ต่อโหลด(ซ้าย) และต่อโหลด(ขวา)

(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

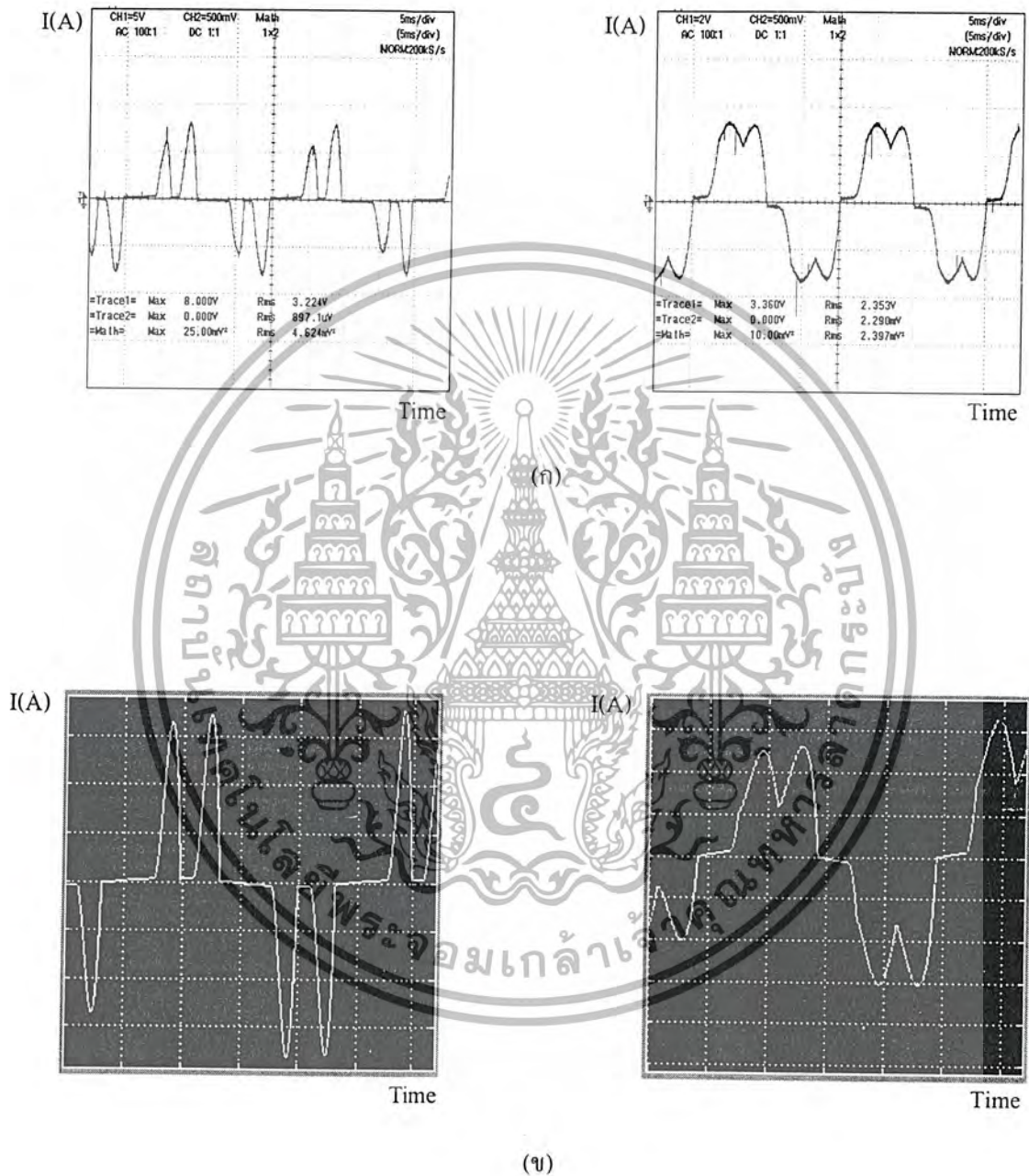
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

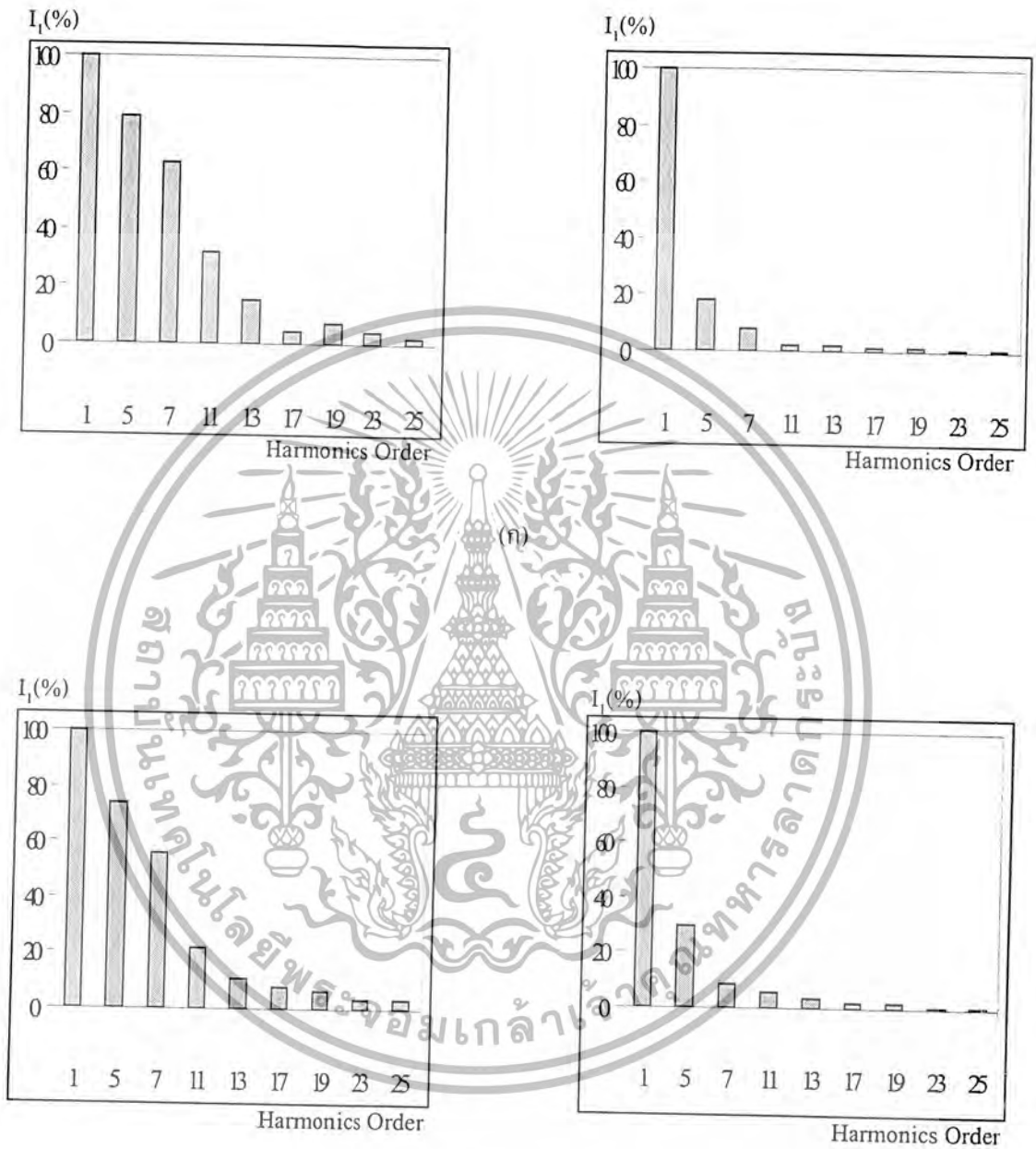
รูปที่ 5.18 สเปกตรัมของกระแสที่สภาวะ load 50% ความถี่ 30 Hz ขณะยังไม่ต่อโหลด(ซ้าย) และต่อโหลด(ขวา)
 (ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 รูปคลื่นกระแสที่สภาวะ load 70% ความถี่ 30 Hz ขณะยังไม่ต่อโหลด(ซ้าย) และต่อโหลด(ขวา)
 (ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

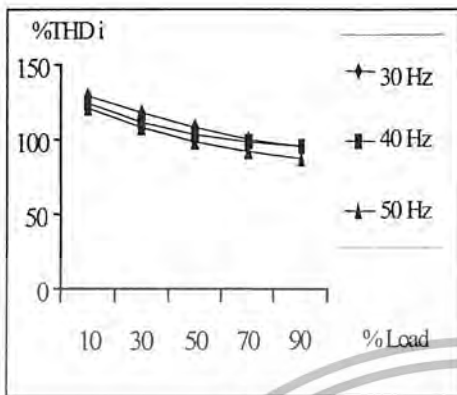
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



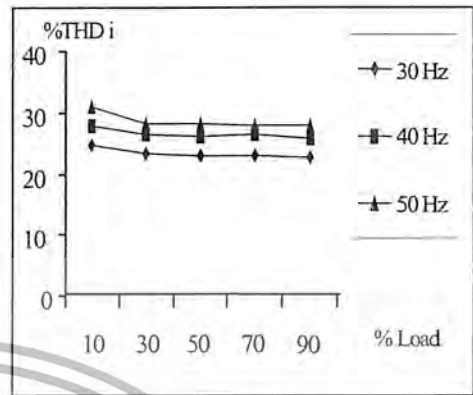
(ข)

รูปที่ 5.20 สเปกตรัมของกระแสที่สภาวะ load 70% ความถี่ 30 Hz ขณะยังไม่ต่อโฉก(ซ้าย) และต่อโฉก(ขวา)
(ก) ผลจากค่าวัดจริง (ข) ผลจากโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

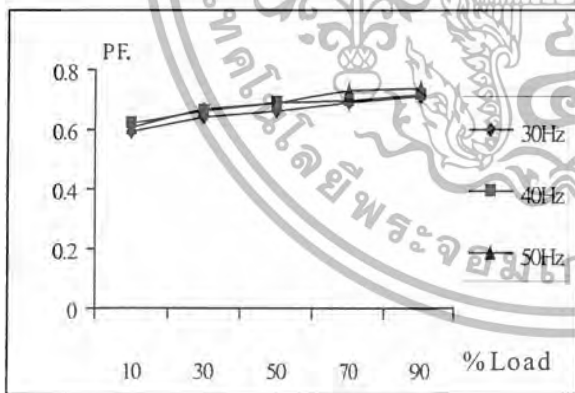


(ข)

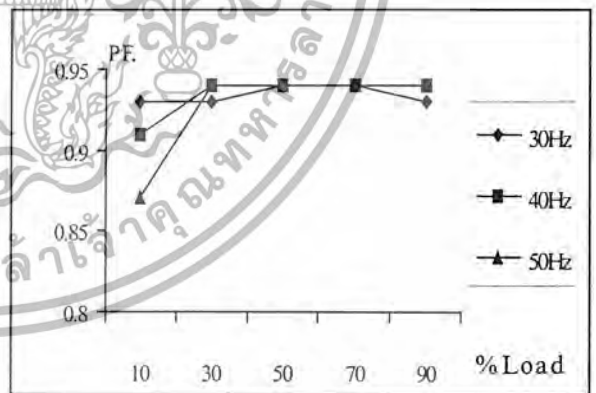
รูปที่ 5.21 การเปรียบเทียบค่าความเพี้ยนกระแสรวม(THDi)

(ก) ยังไม่ต่อใช้ค (ข) ต่อใช้ค

จากรูป (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่า THDi ในสถานะความถี่ต่างๆมีแนวโน้มลดลง และเมื่อใส่ใช้คเข้าไป (ข) จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเหมือนกับ (ก) แต่มีค่า THDi ลดลงกว่าเดิมมาก



(ก)

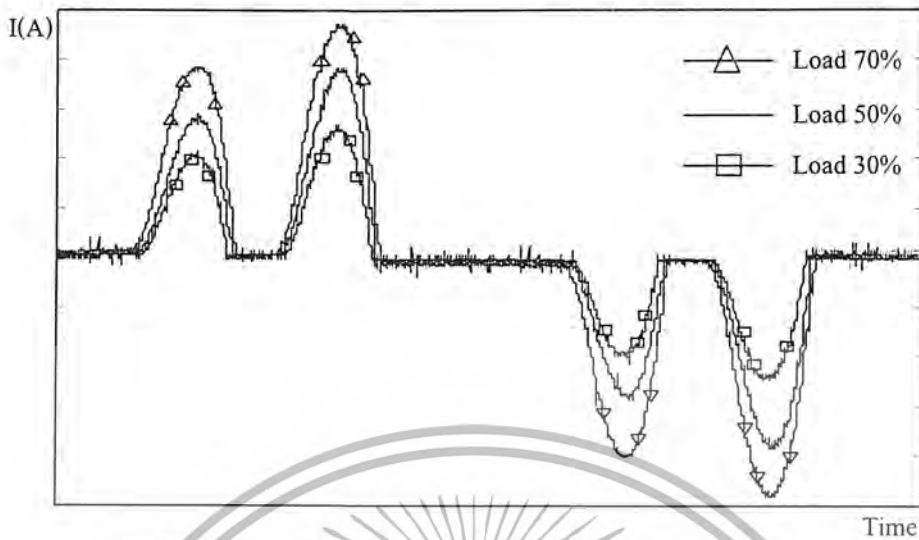


(ข)

รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์

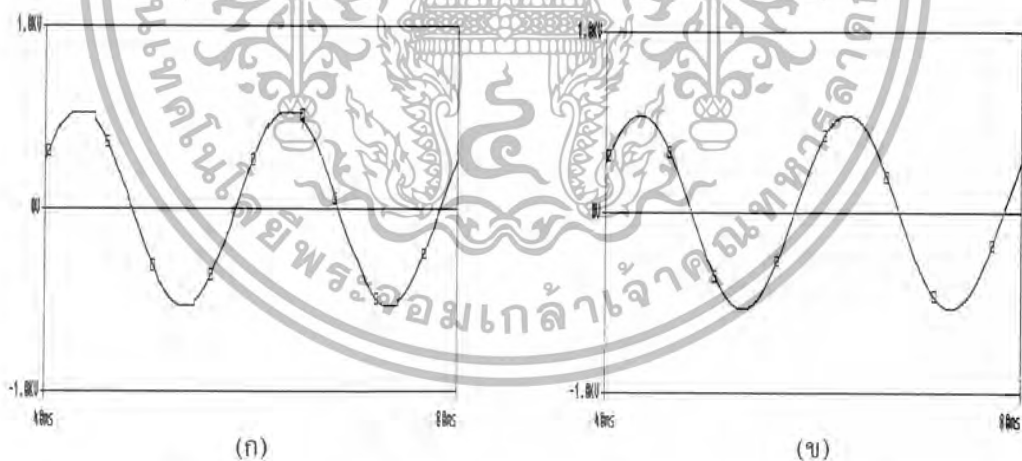
(ก) ยังไม่ต่อใช้ค (ข) ต่อใช้ค

จากรูป (ก) เมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้นจะมีผลให้ค่า PF. ในสถานะความถี่ต่างๆมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อใส่ใช้คเข้าไปแล้ว (ข) จะเห็นได้ว่าค่า PF. ก็มีแนวโน้มดีขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.23 รูปการเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสในแต่ละสถานะโหลด

จะเห็นได้ว่าเมื่อขณะโหลดต่ำ รูปคลื่นกระแสมีความต่อเนื่องน้อย และมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์มาก เมื่อโหลดเพิ่มมากขึ้น รูปคลื่นกระแสจะค่อยๆ มีความต่อเนื่องกันมากขึ้นเรื่อยๆ ค่า THDi ก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วยเช่นกัน แต่เมื่อเพิ่มโหลดถึงที่สุดแล้ว รูปคลื่นก็ยังคงมีความผิดเพี้ยนมากอยู่ดีและค่า THDi ก็ยังสูงอยู่ด้วยเหตุนี้เองเราจึงทำการลดความผิดเพี้ยนและฮาร์มอนิกส์ลง ด้วยการต่อ โฉ้ค้เข้า ใ้ไป



รูปที่ 5.24 รูปการเปรียบเทียบรูปคลื่นแรงดันที่สถานะโหลด 50% ความถี่ 50Hz

(ก) ยังไม่ต่อ โฉ้ค้ (ข) ต่อ โฉ้ค้

จากรูปคลื่นแรงดันทั้งสองรูปจะเห็นได้ว่า จะทำการต่อหรือไม่ต่อ โฉ้ค้ก็ตาม จะมีผลในการปรับปรุงรูปคลื่นแรงดันน้อยมาก เนื่องจากรูปคลื่นแรงดันนั้นมีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์น้อย ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงมุ่งแก้ผลกระทบที่มีต่อรูปคลื่นกระแสเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ดีการต่อ โฉ้ค้เข้า ใ้ไป ทำให้มีผลดีต่อรูปคลื่นของแรงดันเช่นเดียวกันคือ รูปคลื่นแรงดันจะเป็นรูปคลื่นไซน์ที่ราบเรียบมากยิ่งขึ้นดังรูป (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทวิจารณ์และสรุป

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองในการวัดค่าจริงเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม ORCAD และ MATLAB / Simulink จะเห็นได้ว่าค่า THDi และรูปคลื่นกระแสมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแต่เนื่องจากโปรแกรม ORCAD มีข้อบกพร่องในการต่อโหลดให้กับระบบจึงใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink เทียบกับค่าจริงเป็นหลัก
2. จากการทดลองที่สถานะไม่มีโหลดเมื่อนำค่า THDi มาเปรียบเทียบกับที่สถานะโหลดต่างๆจะเห็นว่าที่สถานะมีโหลดสูงจะมีผลทำให้ดึงกระแสด้านอินพุตมากขึ้น แต่จะทำให้ฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆมีค่าลดลง
3. เมื่อเราใส่โหลดเข้าไปในวงจรนำค่า THDi ที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับสถานะที่ไม่มีโหลดจะเห็นว่าค่า THDi มีค่าลดลงในขณะที่กระแสทางด้านอินพุตมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลของโหลดที่ต่อเข้าด้านหน้าวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ และเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่า THDi ก็ยังมีค่าลดลงเช่นกัน รูปคลื่นกระแสและแรงดันก็มีค่าใกล้เคียงความเป็นไซน์มากยิ่งขึ้น
4. เมื่อทำการต่อโหลดด้านหน้าระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าขณะที่ยังไม่ทำการต่อโหลด
5. ในการออกแบบใช้คตามมาตรฐาน VDE ในความเป็นจริงเราไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าใช้คตามโหลดได้ ดังนั้นจึงมีวิธีออกแบบใช้คโดยการอิงค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย เพื่อให้สะดวกในการออกแบบใช้ค แต่ค่า THDi จะสูงกว่ากรณีที่ไม่ทราบค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (VDE) ดังนั้นจึงใช้มาตรฐาน VDE เป็นหลักในการออกแบบใช้คซึ่งทำให้การลดฮาร์มอนิกส์ดีกว่า

6.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

1. เมื่อทำการต่อใช้คด้านหน้าวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ จะไม่สามารถทำการทดสอบมอเตอร์ได้ที่สถานะโหลด 100% เพราะทำให้กระแสที่เข้ามอเตอร์เกินพิกัดของมอเตอร์
2. โหลดที่นำมาต่อด้านหน้าวงจรขับเคลื่อนไม่สามารถปรับค่าใช้คได้ในบางย่าน
3. ค่าความละเอียดของสาย Prob ของ Fluke43B มีค่าละเอียดในการวัดทำให้ในการวัดที่โหลดต่างๆจะเห็นรูปคลื่นกระแสไม่ชัดเจน

6.3 แนวทางการพัฒนา

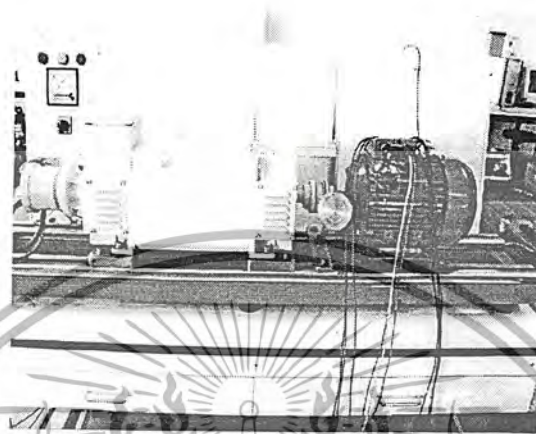
จากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ในอุตสาหกรรมที่ควบคุมระบบความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เกิดฮาร์มอนิกขึ้นต่อแหล่งจ่ายทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าบนแหล่งจ่ายลดลง โดยการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ หรือใช้คที่เหมาะสมไปต่อที่จุดต่อร่วม (PCC) ด้านหน้าของระบบขับเคลื่อน ก็จะทำให้ปัญหาของฮาร์มอนิกส์ลดน้อยลงได้ อันเป็นผลดีต่อการลดขนาดของตัว Active Filter ซึ่งใช้กรองฮาร์มอนิกส์ที่ระบบใหญ่ต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

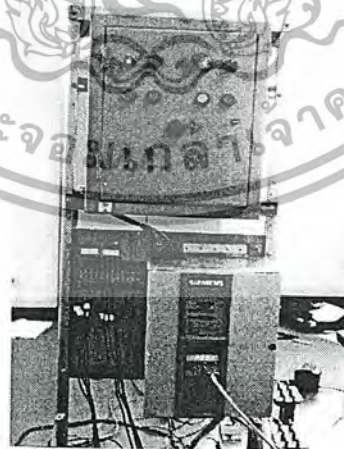


มอเตอร์ที่นำมาทดสอบ

3 phase Induction Motor

50 Hz delta/star 2.2 kw 220/380 v 8.7/50 A 1420 rpm.

60Hz delta/star 2.6 kw 254/440 v 8.8/5.1 A 1725 rpm.



ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC Siemens DC - Converter

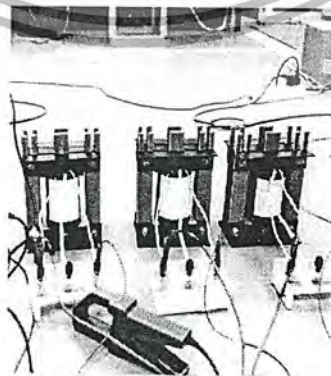
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เครื่องวัด Fluke 43B

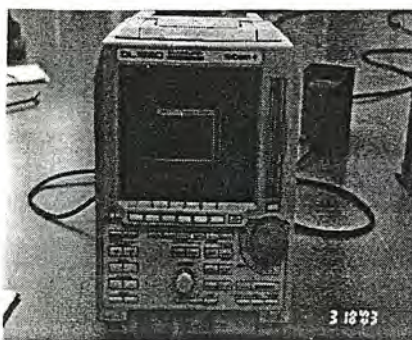


แหล่งจ่ายไฟ Variac 3 phase



โช๊ค (Choke)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Digital Storage Scope DL – 1520 YOGOGAWA



Dual Display LCR Meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ชื่น ภู่วรรณ “ทฤษฎีการใช้งาน อิเล็กทรอนิกส์ เล่ม ” ซีเอ็ดยูเคชั่น 2532
- [2] สุรินทร์ คำฝอย “การวัดและการวิเคราะห์คุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์บนพื้นฐานของการสูญเสีย ในแกนเหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อถูกจ่ายโดยพีคดับทิวเอ็มอินเวอร์เตอร์” วิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2544
- [3] ธนาวุธ สายอุดมดี, สราวุธ ชัยเรืองวิทย์, อรรถพร อสุณี, ณ อยุธยา, เอกสิทธิ์ เหลืองทองคำ “ไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับระบบไฟฟ้าแรงดันตรง” วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542
- [4] Ned Mohan, Tore M. Underland, William P. Robbins “Power Electronics” Converters, Applications, and Design, 2nd edition John Wiley and Sons, 1995
- [5] IEEE std. 519-1992 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System, 1993
- [6] S.J. Chapman “Electric Machinery Fundamentals” 2nd edition McGraw-Hill, 1991



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้