

การศึกษาการทำงานและการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์  
STUDY ON OPERATION AND CONTROL  
OF A FLYING CAPACITOR INVERTER



นายโกเมน ทพยัสโรจน์  
นายจักรพงษ์ แสงคำสุข  
นางสาวชยานันท์ เจริญกรบุรี

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...61454  
วัน,เดือน,ปี 17 ก.พ. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการทำงานและการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์  
**STUDY ON OPERATION AND CONTROL  
OF A FLYING CAPACITOR INVERTER**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการทำงานและการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

STUDY ON OPERATION AND CONTROL OF A FLYING CAPACITOR INVERTER

ผู้จัดทำ

- |                   |              |                       |
|-------------------|--------------|-----------------------|
| 1. นายโกเมน       | ทิพย์สาโรจน์ | รหัสประจำตัว 44010043 |
| 2. นายจักรพงษ์    | แสงคำสุข     | รหัสประจำตัว 44010060 |
| 3. นางสาวชยานันท์ | เจริญกรบุรี  | รหัสประจำตัว 44010090 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.อนันต์วัฒน์ कुमार)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.สมภพ ผลไม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาการทำงานและการควบคุมอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

นายโกเมน ทิพย์สารโรจน์ 44010043

นายจักรพงษ์ แสงคำสุข 44010060

นางสาวชยานันท์ เจริญกรบุรี 44010090

ผศ.ดร.อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547

### บทคัดย่อ

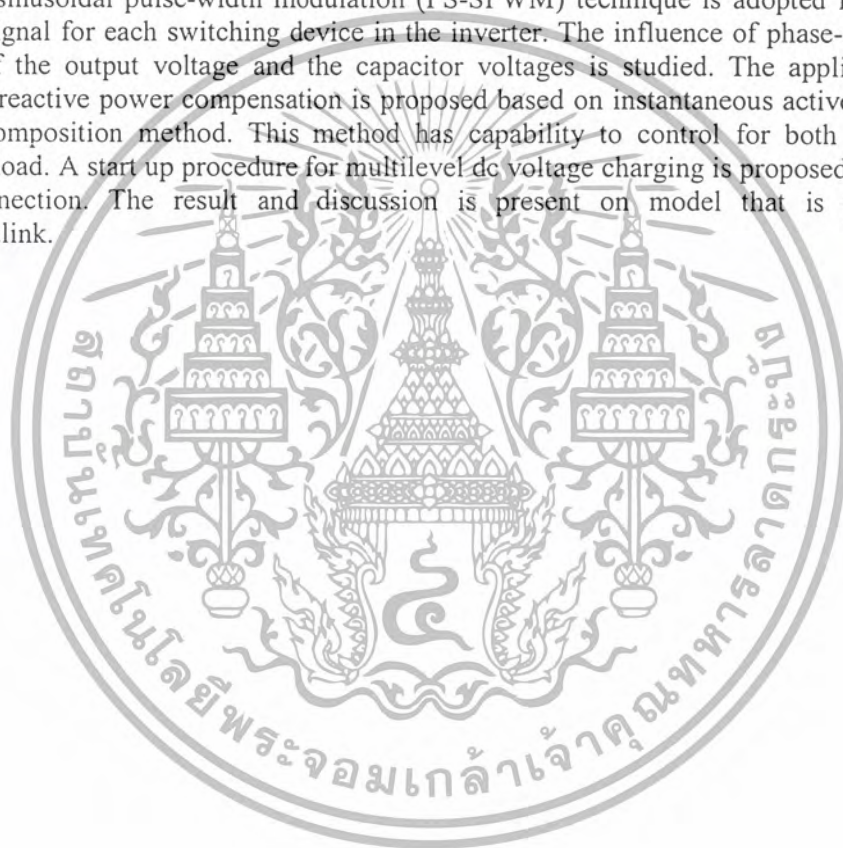
ในปริญญาโทฉบับนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างและการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยการใช้เทคนิคชาน์นูล์โซดอลพัลส์วิตช์มอดูเลชันแบบเลื่อนเฟส สำหรับสร้างสัญญาณขับขาเกทของแต่ละอุปกรณ์สวิตซ์ซิ่งของอินเวอร์เตอร์ และมีการศึกษาถึงผลของบวมเลื่อนเฟสทั้งค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันขาออกและแรงดันตัวเก็บประจุต่างๆ ในการประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์สำหรับการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะอาศัยวิธีคำนวณหากระแสแอสแอลทีฟและรีแอกทีฟชั่วขณะ ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้ควบคุมได้ทั้งแบบภาระทางไฟฟ้าคงที่และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า และได้มีการเสนอกระบวนการเริ่มต้นสำหรับอัดประจุแรงดันกระแสตรงหลายระดับในขณะที่มีการเชื่อมต่อกับระบบในครั้งแรก โดยการศึกษานี้อาศัยการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลอง คือ โปรแกรม Matlab/simulink

## Study on Operation and Control of a Flying Capacitor Inverter

Komain Thipsaroat  
 Jakrapong Saengkhumasuk  
 Chayanan Jaroenkornburi  
 Assist. Prof. Dr. Anantawat Kunakorn    Advisor  
 Dr. Sompob Polmai                              Advisor

### ABSTRACT

This thesis presents structure and operation of a flying capacitor multilevel inverter. Phase-shift sinusoidal pulse-width modulation (PS-SPWM) technique is adopted for generating gate-drive signal for each switching device in the inverter. The influence of phase-shift angle on the THD of the output voltage and the capacitor voltages is studied. The application of the inverter for reactive power compensation is proposed based on instantaneous active and reactive current decomposition method. This method has capability to control for both constant and changeable load. A start up procedure for multilevel dc voltage charging is proposed for first-time system connection. The result and discussion is present on model that is generated by Matlab/simulink.



## กิตติกรรมประกาศ

กว่าที่ปริญญาพันธบัตรฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงได้ ก็ต้องผ่านอุปสรรคมากมาย แต่อย่างไรเสียก็ไม่อาจจะสำเร็จได้ หากไม่มีบุคคลต่างๆ เหล่านี้คอยช่วยเหลือ ขอขอบคุณอาจารย์ สมภพ ผลไม้ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ แนะนำ อาจารย์ อานันท์วัฒน์ คุณากร ที่ช่วยให้มีโครงการนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้แก่พวกข้าพเจ้า

ขอขอบคุณกลุ่มเพื่อนที่ช่วยในการแลกเปลี่ยนความรู้ความเห็นต่างๆ แม้บางครั้งอาจจะขัดแย้งกันบ้างก็ตาม และ ร้าน 7-11 ที่ช่วยเป็นชุมเสียบงให้แก่พวกข้าพเจ้าในยามลำบาก

สุดท้ายที่ไม่อาจลืมได้ ขอขอบพระคุณบุญคุณอันยิ่งใหญ่ของท่านบิดามารดาของพวกข้าพเจ้า ที่มีมาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน รวมทั้งในอนาคต ขอขอบคุณที่คอยเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้โอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มที่แก่พวกข้าพเจ้า



นายโกเมน ทิพย์สาโรจน์  
นายจักรพงษ์ แสงคำสุข  
นางสาวชยานันท์ เจริญครบุรี

## สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	4
2.1 โครงสร้างพื้นฐาน	4
2.2 การสร้างแรงดันขาออก	5
2.3 การสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์	8
บทที่ 3 การประยุกต์การใช้งานอินเวอร์เตอร์	14
3.1 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	15
3.2 หลักการการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	16
3.3 การวิเคราะห์และกรควบคุม	19
3.4 วงจรเริ่มต้นการทำงาน	24
บทที่ 4 การจำลองใน Matlab/simulink	28
4.1 การจำลองเบื้องต้น	28
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับแรงดันตัวเก็บประจุคอมมอนดีซีลิงค์	37
4.3 ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของอินเวอร์เตอร์	
เมื่อเปลี่ยนจากแหล่งจ่ายกระแสตรงเป็นตัวเก็บประจุ	38
4.4 การนำอินเวอร์เตอร์มาปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	45
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	68
ภาคผนวก ก	69
ภาคผนวก ข	77
บรรณานุกรม	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2.1 แสดงการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลังและแรงดัน	5
ตารางที่ 2.2 ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ที่วิธีการควบคุมต่างๆ	10
ตารางที่ 3.1 สรุปลักษณะการทำงานของสวิตซ์ขณะเริ่มต้นการทำงาน	27
ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันขาออกและค่า % THD ที่มุมเลื่อนเฟสและค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ	29
ตารางที่ 4.2 แรงดันขาออกที่มอดูเลชันอินเด็กซ์ และ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุต่างๆ	37
ตารางที่ 4.3 ผลของแรงดันขาออกและค่า % THD ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ	38
ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขาออกกับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ	47
ตารางที่ 4.5 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการจำลอง การนำอินเวอร์เตอร์ไปเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า	47
ตารางที่ ก.1 แสดงสถานะการนำกระแสของสวิตซ์และไดโอด	76



## สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

รูปที่ 1.1 อินเวอร์เตอร์ (ก) แบบ 2 ระดับ (ข) แบบ 3 ระดับ (ค) แบบ n ระดับ	1
รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	4
รูปที่ 2.2 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	5
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น $V_{dc}$	6
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น $V_{dc}/2$	6
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น 0	7
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น $-V_{dc}/2$	7
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น $-V_{dc}$	8
รูปที่ 2.8 รูปแบบการสวิตช์ซิ่ง	9
รูปที่ 2.9 Alternative Phase Opposition Disposition (APOD)	10
รูปที่ 2.10 Phase Disposition (PD)	10
รูปที่ 2.11 Phase Opposition Disposition (POD)	11
รูปที่ 2.12 Hybrid (H)	12
รูปที่ 2.13 ภาพขยายสัญญาณ Hybrid (H)	12
รูปที่ 2.14 Phase Shifted (PS)	12
รูปที่ 3.1 การต่อ Static Var Generator เข้าสู่ระบบ	15
รูปที่ 3.2 ผลรวมของกำลังไฟฟ้า	15
รูปที่ 3.3 หลักการชดเชยกำลังไฟฟ้าย้อนกลับ	16
รูปที่ 3.4 เวกเตอร์ในกรณีที่ $V_C$ มากกว่า $V_S$	17
รูปที่ 3.5 เวกเตอร์ในกรณีที่ $V_C$ น้อยกว่า $V_S$	17
รูปที่ 3.6 ลักษณะแรงดันกับกระแสที่มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นแบบล้าหลัง	18
รูปที่ 3.7 แรงดันกับกระแส ที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะกระแสล้าหลัง	18
รูปที่ 3.8 การจ่ายกระแสจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับเข้าสู่ระบบ	18
รูปที่ 3.9 มุมระหว่างแรงดันและกระแสรอบเมื่อต่ออินเวอร์เตอร์	19
รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของระบบเมื่อต่อ Static Var Generator	19
รูปที่ 3.11 แรงดันและกระแสในระบบ stationary reference frame กับ synchronous reference frame	21
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมของ Static Var Generator	22
รูปที่ 3.13 วงจรควบคุมแบบแยกอิสระ	22
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลของการควบคุม	23
รูปที่ 3.15 การสร้างสัญญาณควบคุมขาเกของอุปกรณ์สวิตช์ซิ่งกำลัง	23

รูปที่ 3.16 วงจรแปลงกระแสตรง 3 เฟส	24
รูปที่ 3.17 วงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อพิจารณาเป็นวงจรแปลงกระแสตรง แสดงวงจรเพียง 1 เฟส	24
รูปที่ 3.18 วงจร 3 Phase Boost Rectifier	25
รูปที่ 3.19 วงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อพิจารณาเป็นวงจร 3 Phase Boost Rectifier	25
รูปที่ 4.1 วงจรหลักของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์	28
รูปที่ 4.2 วงจรการสร้างสัญญาณควบคุมขาเกทของ IGBT	29
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % THD กับมุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ	31
รูปที่ 4.4 แรงดันขาออกกับมอดูเลชันอินเด็กซ์ที่มุมเลื่อนเฟส 55 องศา	35
รูปที่ 4.5 แรงดันขาออก ที่มอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ	35
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับมอดูเลชันอินเด็กซ์	37
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า% THD กับมุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ	39
รูปที่ 4.8 ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมกับค่าแรงดันอ้างอิง	41
รูปที่ 4.9 การนำอินเวอร์เตอร์ไปเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า	46
รูปที่ 4.10 วงจรควบคุม	46
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ	48
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ เมื่ออินเวอร์เตอร์เป็นตัวเก็บประจุทั้งหมด	55
รูปที่ 4.13 วงจรเริ่มต้นการทำงาน	63
รูปที่ 4.14 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในวงจรเริ่มต้นการทำงาน	64
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองเมื่อใช้วงจรเริ่มต้นการทำงานและมีการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ	64
รูปที่ ก 1 เวกเตอร์กำลัง	69
รูปที่ ก 2 เวกเตอร์กำลังของวงจรที่มีกระแสไฟฟ้าที่ทางเข้าแบบไม่เป็นชานัน	71
รูปที่ ก 3 วงจรแปลงกระแสตรง 3 เฟส	73
รูปที่ ก 4 รูปคลื่นแรงดันและเวลาในการทำงานของไดโอด	74
รูปที่ ก 5 วงจรขยายแรงดันสามเฟส	75
รูปที่ ก 6 ลักษณะวงจรขยายแรงดันสามเฟสเมื่อสวิตช์ปิดวงจร	75
รูปที่ ก 7 การทำงานของวงจรขยายแรงดันสามเฟสเมื่อสวิตช์ปิดวงจร	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในช่วงระยะที่ผ่านมา อุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีความต้องการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าระดับแรงดันสูง ที่ระดับเมกกะวัตต์ ในการควบคุมวงจรรีบกระแสสลับ (AC Drive) ในย่านเมกกะวัตต์ ปกติแล้วจะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง ซึ่งเป็นการยากที่จะนำอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลัง (Power Semiconductor) เพียงตัวเดียวมาต่อโดยตรงกับระบบ (2.3, 3.3, หรือ 6.9 กิโลโวลต์) ด้วยเหตุผลนี้จึงเกิดอินเวอร์เตอร์หลายระดับเพื่อใช้งานในย่านแรงดันสูงนี้

อินเวอร์เตอร์หลายระดับจะประกอบด้วยชุดของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลังและตัวเก็บประจุ แรงดันที่ได้จะเป็นรูปคลื่นขั้นบันได โดยการจัดเรียงแรงดันของตัวเก็บประจุทำให้ได้แรงดันที่สูงขึ้น



รูปที่ 1.1 อินเวอร์เตอร์ (ก) แบบ 2 ระดับ (ข) แบบ 3 ระดับ (ค) แบบ  $m$  ระดับ

จากรูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีหลายระดับโดยในที่นี้ อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลัง ถูกสมมติให้เป็นสวิตซ์ในอุดมคติ อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ จะสามารถสร้างแรงดันได้ 2 ค่า เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงซึ่งในที่นี้ คือ ขาลบของตัวเก็บประจุ ขณะที่อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับก็สามารถสร้างแรงดันได้ 3 ค่า

กำหนดให้  $m$  คือ จำนวนระดับของแรงดันเมื่อเทียบกับขาลบของตัวเก็บประจุ

$k$  คือ จำนวนระดับของแรงดันระหว่างภาวะ

$$k = 2m + 1$$

$p$  คือ จำนวนระดับของแรงดันเฟสของภาวะไฟฟ้า 3 เฟส

$$p = 2k - 1$$

ในการสร้างอินเวอร์เตอร์ในครั้งแรกถูกสร้างเป็นแบบอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ต่อมามีการเพิ่มจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ แรงดันที่ได้จะมีระดับขั้นบันไดมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยลดฮาร์มอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมก็จะทำได้ยากขึ้นเช่นกัน

อินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันหลายชนิด เช่น ไดโอดแคลมป์ (Diode-Clamped), กาสเคดมัลติเซลล์ (Cascaded Multicell) และฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor) ซึ่งการควบคุมได้พัฒนาขึ้นและถูกนำมาใช้ในอินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วย มัลติเลเวลซายน์นูไซคอสพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Multilevel Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM), มัลติเลเวลซีเลกทีฟฮาร์โมนิกอีลิมีเนชัน (Multilevel Selective Harmonic Elimination) และสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (Space Vector Modulation, SVM)

คุณสมบัติที่น่าสนใจของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

- 1) แรงดันที่สร้างขึ้นมีความผิดเพี้ยนน้อยและ  $dv/dt$  ต่ำ
- 2) กระแสมีความผิดเพี้ยนน้อย
- 3) สามารถทำงานได้ด้วยสวิตซ์ซึ่งความถี่ต่ำ

การประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์มีหลากหลายรูปแบบทั้งใช้เป็นตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ แก๊ซคาร์บอนิกส์ และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า ซึ่งในปริญญานิพนธ์ได้นำเสนอถึงการนำไปใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยใช้เป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้กับภาระทางไฟฟ้า แทนระบบ โดยเลือกศึกษาอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ใช้แบบมัลติเลเวลซายน์นูไซคอสพัลส์วิดท์มอดูเลชัน ส่วนการควบคุมการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อาศัยทฤษฎีของซิงโครนัส d-q เฟรม (Synchronous d-q frame)

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์
- 2) เพื่อให้สามารถสร้างแบบจำลองอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink
- 3) ศึกษาและออกแบบอินเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้ เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

เป็นการศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ รวมทั้งสัญญาณควบคุมขาเกทของ Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT และเมื่อนำไปเชื่อมโยงกับระบบ เพื่อใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบให้ดีขึ้น โดยมีขอบเขตการชดเชยสูงสุดได้ 10 kVAR

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ว่ามีหลักการทำงานอย่างไร
- 2) ศึกษาการใช้งานโปรแกรม Matlab/simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) สร้างแบบจำลองของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการควบคุมวงจร
- 4) ศึกษาผลที่ได้จากการนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์มาเชื่อมต่อกับระบบ
- 5) นำผลที่ได้มาสรุปและวิเคราะห์

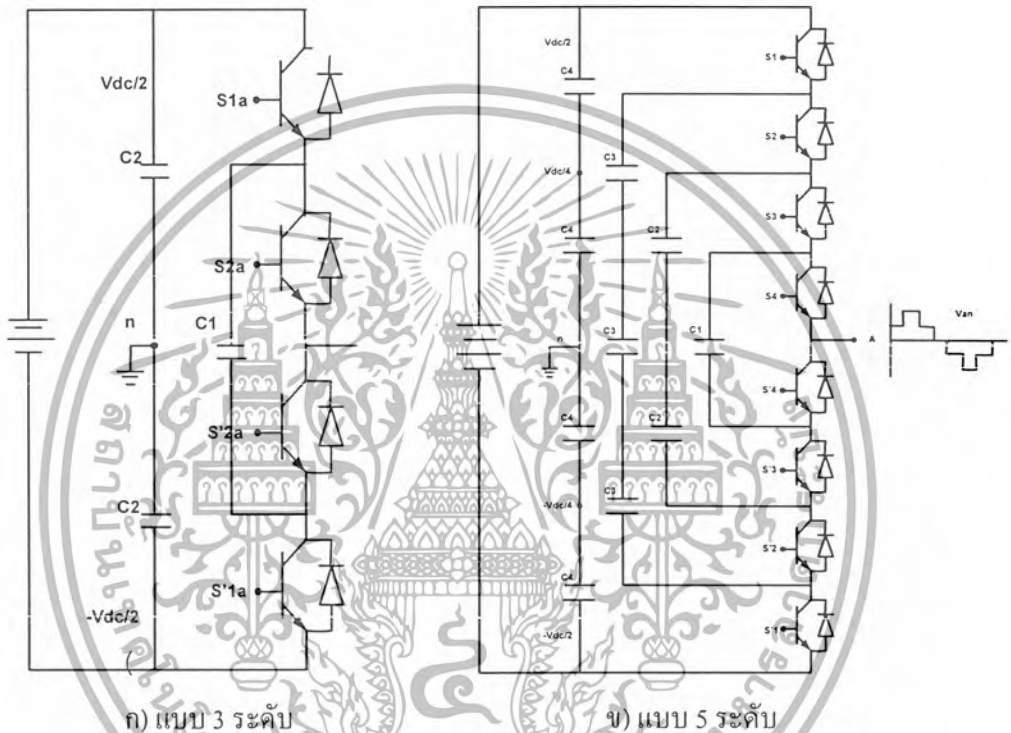


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# หลักการทํางานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

### 2.1 โครงสร้างพื้นฐาน



รูปที่ 2.1 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์หรือเรียกว่าคาปาซิเตอร์แคลมป์ (Capacitor-clamped) มีโครงสร้างหลัก คือ

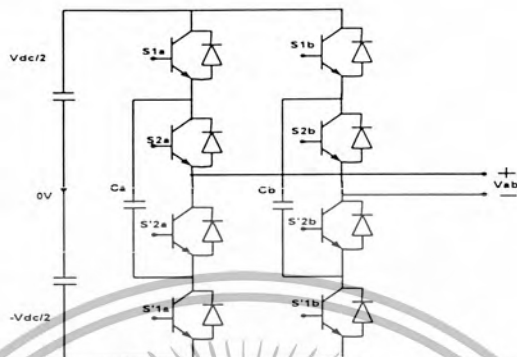
- 1) ตัวเก็บประจุ (Capacitor)
- 2) อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกําลัง (Power Semiconductor)

จากรูป 2.1 ตัวเก็บประจุนอกสุดเรียกว่า คอมมอนดีซีลิงก์ (Common DC Link) เป็นตัวสะสมพลังงาน ขณะที่ตัวเก็บประจูดังอื่น ๆ เรียกว่า ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ซึ่งจะสร้างแรงดันระดับต่างๆ จากแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุโดยให้มีแรงดันตกคร่อมเท่ากันแต่ละตัวเก็บประจุ ในรูป 2.1ก) เป็นแบบ 3 ระดับโดยแรงดันขาออก ( $V_{an}$ ) ที่ได้จะมีอยู่สามสถานะ คือ  $V_{an} = V_{dc}/2, 0, -V_{dc}/2$  หากสวิตช์ S1a และ S2a ทํางาน จะได้แรงดัน  $V_{dc}/2$  หากสวิตช์ S'1a และ S'2a ทํางานจะได้แรงดัน  $-V_{dc}/2$  และหากสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S1a และ S'2a ทำงาน หรือ S2a และ S'1a ทำงาน จะได้แรงดันเป็นศูนย์ ส่วนในรูป 2.1ข) เป็นแบบ 5 ระดับ นั้นจะมีรูปแบบการทำงานของสวิตช์เพิ่มมากขึ้น

2.2 การสร้างแรงดันขาออก



รูปที่ 2.2 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

จากรูปที่ 2.2 เป็นอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส โดยที่การทำงานของสวิตช์ที่สามารถเกิดขึ้นจะมีหลายสถานะและหลายระดับแรงดันตามตารางที่ 2.1

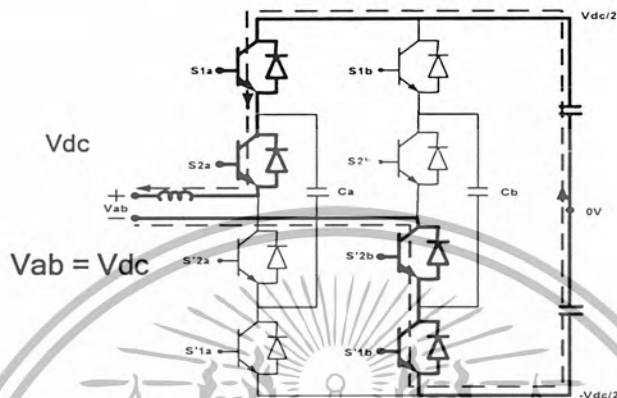
Switching States				Output Voltage related to capacitor	Output Voltage $V_{ab}$
S1a	S2a	S1b	S2b		
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	$-V_{c_b}$	$-V_{dc}/2$
0	0	1	0	$-V_{dc}+V_{c_b}$	$-V_{dc}/2$
0	0	1	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
0	1	0	0	$V_{c_a}$	$V_{dc}/2$
0	1	0	1	$V_{c_a}-V_{c_b}$	0
0	1	1	0	$V_{c_a}+V_{c_b}-V_{dc}$	0
0	1	1	1	$V_{c_a}-V_{dc}$	$-V_{dc}/2$
1	0	0	0	$-V_{c_a}+V_{dc}$	$V_{dc}/2$
1	0	0	1	$-V_{c_a}-V_{c_b}+V_{dc}$	0
1	0	1	0	$-V_{c_a}+V_{c_b}$	0
1	0	1	1	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
1	1	0	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$
1	1	0	1	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
1	1	1	0	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
1	1	1	1	0	0

ตารางที่ 2.1 แสดงการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลังและแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

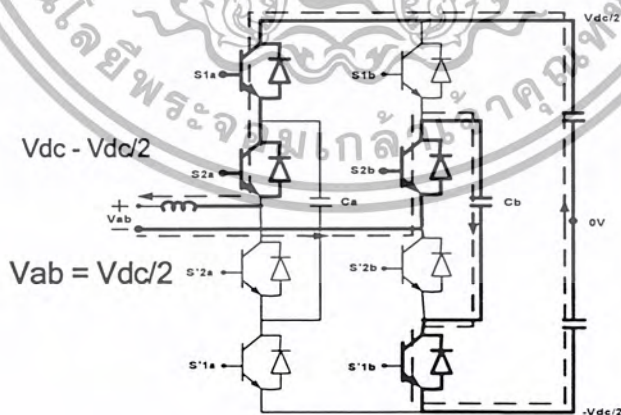
จากตารางที่ 2.1 สามารถนำค่าระดับแรงดันต่าง ๆ มาอธิบายในบางสถานะการทำงานของสวิตช์ ดังนี้

ที่ระดับแรงดันขาออกเป็น  $V_{dc}$



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น  $V_{dc}$

เมื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยที่ให้สวิตช์ S1a, S2a ปิดวงจรและ S1b, S2b เปิดวงจร เมื่อพิจารณาถึงการไหลของกำลังจะได้ดังรูปที่แสดงข้างบน คือ  $V_{ab} = V_{dc}$  ที่ระดับแรงดันขาออกเป็น  $V_{dc}/2$



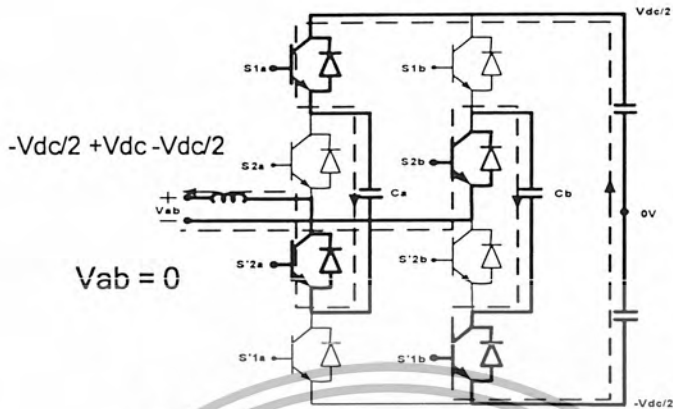
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น  $V_{dc}/2$

เมื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยที่ให้สวิตช์ S1a, S2a และ S2b ปิดวงจรและ S1b เปิดวงจร

เมื่อพิจารณาถึงการไหลของกำลังจะได้ดังรูปที่แสดงข้างบน คือ  $V_{ab} = V_{dc} - V_{dc}/2 = V_{dc}/2$

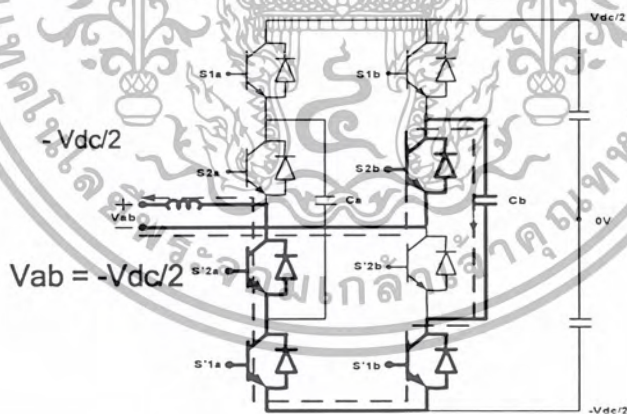
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระดับแรงดันขาออกเป็น 0



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น 0

เมื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยที่ให้สวิตช์ S1a, S2b ปิดวงจรและ S1b, S2a เปิดวงจร เมื่อพิจารณาถึงการไหลของกำลังจะได้ดังรูปที่แสดงข้างบน คือ  $V_{ab} = -V_{dc}/2 + V_{dc} - V_{dc}/2 = 0$  ที่ระดับแรงดันขาออกเป็น  $-V_{dc}/2$

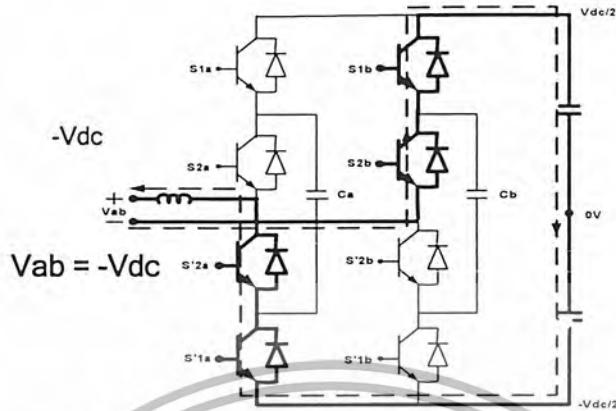


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น  $-V_{dc}/2$

เมื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยที่ให้สวิตช์ S2b ปิดวงจรและ S1a, S2a และ S1b เปิดวงจร เมื่อพิจารณาถึงการไหลของกำลังจะได้ดังรูปที่แสดงข้างบน คือ  $V_{ab} = -V_{dc}/2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ระดับแรงดันขาออกเป็น  $-V_{dc}$



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสถานะของสวิตช์ที่แรงดันขาออกเป็น  $-V_{dc}$

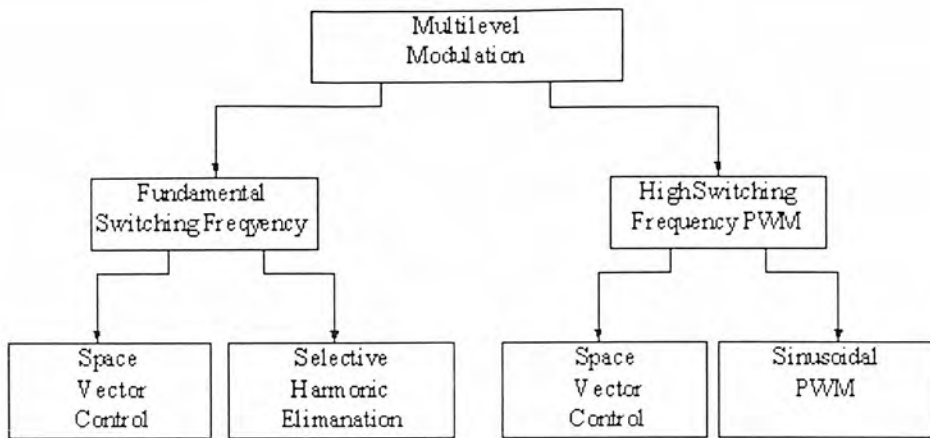
เมื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์โดยที่ให้สวิตช์ S1b, S2b ปิดวงจรและ S1a, S2a เปิดวงจร เมื่อพิจารณาถึงการไหลของกำลังจะได้ดังรูปที่แสดงข้างบน คือ  $V_{ab} = -V_{dc}$

จากการวิเคราะห์การทำงานของอินเวอร์เตอร์จะเห็นว่า เมื่อเครื่องหมายนำแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นบวก (+) แสดงว่าในขณะนั้นอยู่ในช่วงของการคายประจุ (Discharging Mode) ของตัวเก็บประจุ และถ้าเป็นลบ (-) ก็แสดงว่าอยู่ในช่วงของการอัดประจุ (Charging Mode) ของตัวเก็บประจุ

### 2.3 การสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์

ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลังในอินเวอร์เตอร์นั้นสามารถแยกตามความถี่ของการสวิตช์ซึ่งกำลังตามในรูปที่ 2.8 การทำงานแบบสวิตช์ซึ่งความถี่สูงนั้นอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลังจะมีการเปลี่ยนการทำงานที่หลากหลายในหนึ่งคาบแรงดันขาออกและที่นิยมใช้กันมากในวงการอุตสาหกรรมคือ มัลติเพลกซ์ชาน์นูล์ไฮดรอพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (SPWM) ซึ่งจะช่วยให้ลดฮาร์โมนิกส์ของแรงดันได้ และยังมีอีกวิธี คือ วิธีสเปซเวกเตอร์มอดูเลชัน (SVM) ซึ่งจะใช้ในอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

ในการสวิตช์ซึ่งที่ความถี่มูลฐานโดยทั่วไปแล้ว อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลังจะมีการเปลี่ยนการทำงานเพียงหนึ่งหรือสองครั้งในหนึ่งลูกคลื่นแรงดันขาออก ซึ่งแบ่งออกเป็นสองวิธี คือ วิธีเลือกกำจัดฮาร์โมนิกส์ (Selective Harmonic Elimination) และวิธีสเปซเวกเตอร์คอนโทรล (Space Vector Control, SVC)



รูปที่ 2.8 รูปแบบการสวิตซิ่ง

สำหรับเทคนิคมัลติเลเวลชาน์นูล์โซคอลพัลส์วิตท์มอดูเลชัน (SPWM) จะมีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบซายน์ และสัญญาณพาหะเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งสามารถแบ่งออกตามลักษณะต่างๆ ดังนี้

- วิธีการจัดเรียงสัญญาณพาหะ โดยสัญญาณพาหะจัดเรียงซ้อนต่อเนื่องกัน และมีการเลื่อนเฟสสัญญาณพาหะในลักษณะต่างๆ (APOD: รูปที่ 2.9, PD: รูปที่ 2.10, POD: รูปที่ 2.11)
- การจัดเรียงสัญญาณพาหะแบบผสม (Hybrid carrier) ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่างสองวิธีข้างต้น (H: รูปที่ 2.12)
- วิธีซบฮาร์โมนิกพัลส์วิตท์มอดูเลชัน โดยที่สัญญาณพาหะต่างๆมีการเลื่อนเฟสเป็นลำดับ (PS: รูปที่ 2.13)

ซึ่งวิธีต่างๆ ข้างต้นมีตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

- ฟรีควเ้นซิมมอดูเลชันอินเด็กซ์ ( $m_f$ )

$$m_f = \frac{f_c}{f_0}$$

เมื่อ  $f_c$  คือ ความถี่ของสัญญาณพาหะ

$f_0$  คือ ความถี่ของสัญญาณอ้างอิง

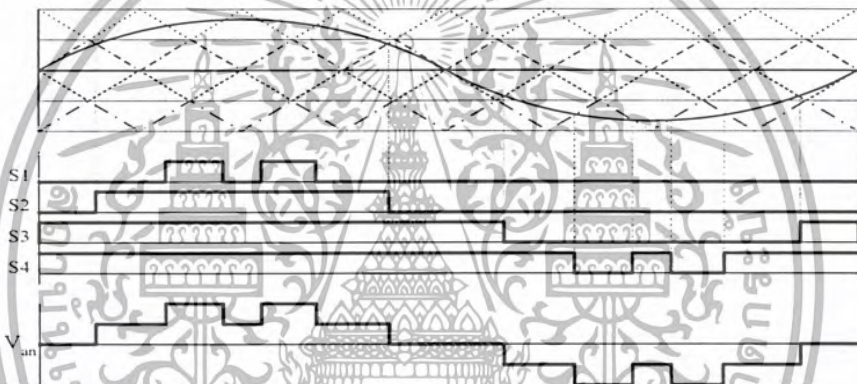
- แอมพลิจูดมอดูเลชันอินเด็กซ์ ( $m_a$ ) สามารถหาแวกคามวิธีการควบคุมได้จากตารางที่ 2.2 โดย  $A_0$  คือ แอมพลิจูดของสัญญาณอ้างอิง และ  $A_{C_{pp}}$  คือ ค่าสูงสุดถึงสูงสุดของสัญญาณพาหะ (สัญญาณสามเหลี่ยม)
- มุม  $\varphi$  มุมระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะที่เป็นสัญญาณบวกสัญญาณแรก โดยในที่นี้จะให้มีค่าเป็นศูนย์

	APOD	POD	PD	H	PS
$m_a$	$\frac{A_0}{\frac{m-1}{2} A_{CPP}}$	$\frac{A_0}{\frac{m-1}{2} A_{CPP}}$	$\frac{A_0}{\frac{m-1}{2} A_{CPP}}$	$\frac{A_0}{2}$	$\frac{A_0}{A_{CPP}}$

ตารางที่ 2.2 ค่ามอดูลชันอินเด็กซ์ที่วิธีการควบคุมต่างๆ  
เมื่อ  $m$  คือ ระดับชั้นของแรงดันขาออกต่อเฟส

#### Alternative Phase Opposition Disposition (APOD)

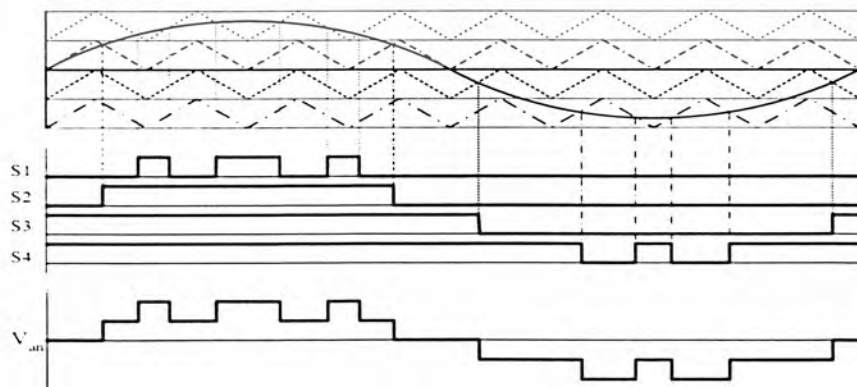
ในวิธีนี้หากต้องการรูปคลื่นแบบ  $m$  ระดับจะต้องใช้สัญญาณพาหะ  $m-1$  สัญญาณ วางเรียงซ้อนสลับกัน โดยมีการเลื่อนเฟส 180 องศาในแต่ละสัญญาณ ในรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ฟรีแควนซีมอดูลชันอินเด็กซ์  $m_f = 8$  แอมพลิจูดมอดูลชันอินเด็กซ์  $m_a = 0.8$



รูปที่ 2.9 Alternative Phase Opposition Disposition (APOD)

#### Phase Disposition (PD)

วิธีนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับวิธีแรก ยกเว้นเพียงแต่สัญญาณพาหะแต่ละสัญญาณจะอินเฟส (In phase) กันดังในรูปที่ 2.10 ฟรีแควนซีมอดูลชันอินเด็กซ์  $m_f = 8$  แอมพลิจูดมอดูลชันอินเด็กซ์  $m_a = 0.8$

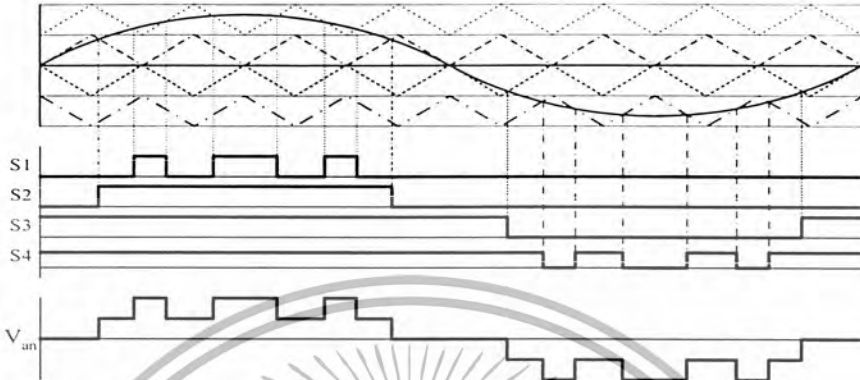


รูปที่ 2.10 Phase Disposition (PD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Phase Opposition Disposition (POD)

วิธีนี้จะแบ่งสัญญาณออกเป็นสองชุดที่ค่าอ้างอิงศูนย์ สัญญาณพาหะชุดบนและล่างจะอินเฟสกัน แต่สัญญาณชุดบนและชุดล่างจะมีการเลื่อนเฟส 180 องศา ดังในรูปที่ 2.11 เฟรีควเอนซีมอดูเลชันอินเด็กซ์  $m_f = 8$  แอมพลิจูดมอดูเลชันอินเด็กซ์  $m_a = 0.8$



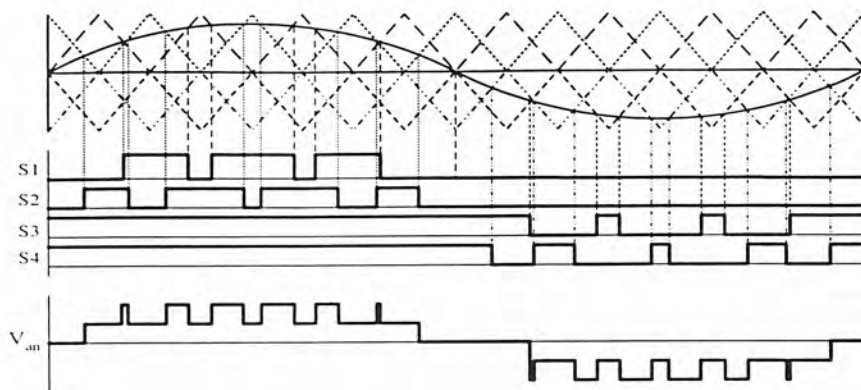
รูปที่ 2.11 Phase Opposition Disposition (POD)

วิธีการจัดเรียงทั้งสามข้างต้น นั้นสร้างแรงดันเฟสที่คล้ายกันและสัญญาณควบคุม (สัญญาณพัลส์) ของขาเกทอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งยังมีความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่สัญญาณพาหะมาก

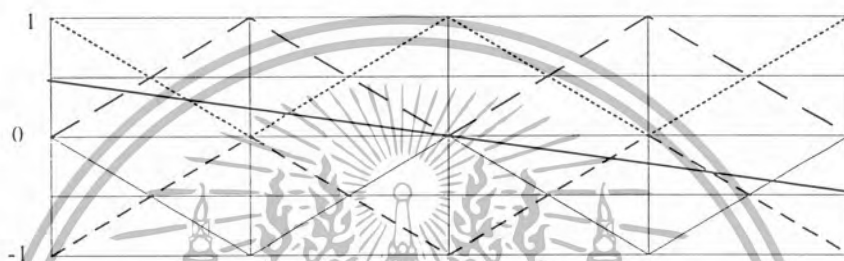
### Hybrid (H)

วิธีนี้จะเป็นการรวมกันของวิธีข้างต้นและวิธีเลื่อนเฟส (Phase shifted) แบ่งสัญญาณออกเป็นสองชุด สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ สัญญาณพาหะสองสัญญาณเหนือเส้นอ้างอิงศูนย์มีค่าสูงสุดถึงสูงสุดเท่ากันและความถี่เท่ากันด้วย โดยมีการเลื่อนเฟส 180 องศา และสัญญาณพาหะสองสัญญาณใต้เส้นอ้างอิงศูนย์ก็เป็นเช่นเดียวกับสองสัญญาณแรก ดังในรูปที่ 2.12 เฟรีควเอนซีมอดูเลชันอินเด็กซ์  $m_f = 8$  แอมพลิจูดมอดูเลชันอินเด็กซ์  $m_a = 0.8$

ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์เพิ่มระดับขึ้นมากขึ้น สัญญาณสามเหลี่ยมก็จะต้องเพิ่มขึ้นด้วยและมุมเลื่อนเฟสก็เปลี่ยนไปด้วย โดยที่ถ้าเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ 7 ระดับ มุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพาหะเป็น 120 องศา แบบ 9 ระดับ มุมเลื่อนเฟสจะเป็น 90 องศา และที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ ฮาร์โมนิกสังกะปรายกรอบ  $(m-1)/2$  เท่าของความถี่สัญญาณพาหะ ( $f_c$ ) [9]



รูปที่ 2.12 Hybrid (H)

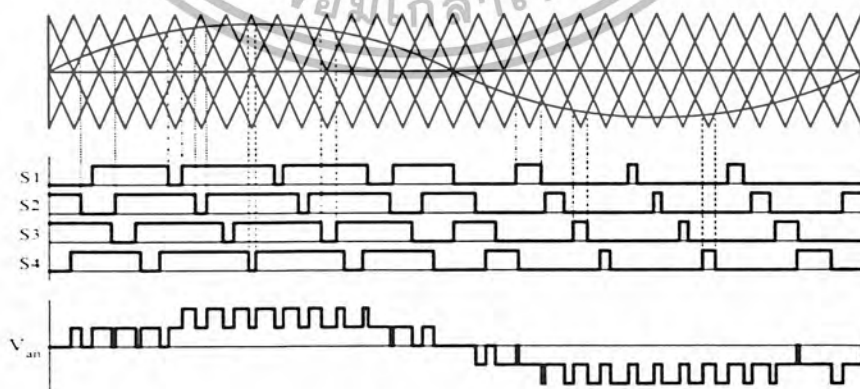


รูปที่ 2.13 ภาพขยายสัญญาณ Hybrid (H)

## Phase Shifted (PS)

วิธีการเลื่อนเฟสนี้ สัญญาณพาหะทุกสัญญาณจะมีการเลื่อนเฟสเป็นมุมเท่ากัน โดยในรูปที่ 2.14 แสดงสัญญาณของอินเวอร์เตอร์แบบ 5 ระดับ ฮาร์โมนิกจะปรากฏรอบ  $(m-1)$  เท่าของความถี่สัญญาณพาหะ ( $f_c$ ) และหากเพิ่มระดับมากขึ้นก็จะเกิดช่องว่างระหว่างแรงดันที่มูลฐานและฮาร์โมนิกสั่นนั้นมากขึ้น

ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจะเท่ากับความถี่ของสัญญาณพาหะ หากเปรียบเทียบกับแบบผสม (Hybrid) จะพบว่าการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจะเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของวิธีเลื่อนเฟส



รูปที่ 2.14 Phase Shifted (PS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เลือกใช้วิธีการเลื่อนเฟส (Phase shifted) มาควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลัง เพราะฮาร์โมนิกส์ที่ปรากฏจะอยู่ที่ความถี่สูง ( $4f_c$ ) ซึ่งสามารถกรองฮาร์โมนิกส์ลำดับเหล่านี้ได้ง่าย จากการที่อินเวอร์เตอร์เป็นแบบสามเฟส สัญญาณแบบชายน์ (สัญญาณอ้างอิง) จะใช้สามสัญญาณและมีการเลื่อนเฟสของแต่ละสัญญาณเป็นมุม 120 องศา นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (สัญญาณพาหะ) 4 สัญญาณ แล้วนำผล (สัญญาณพัลส์) ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลังในแต่ละเฟส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

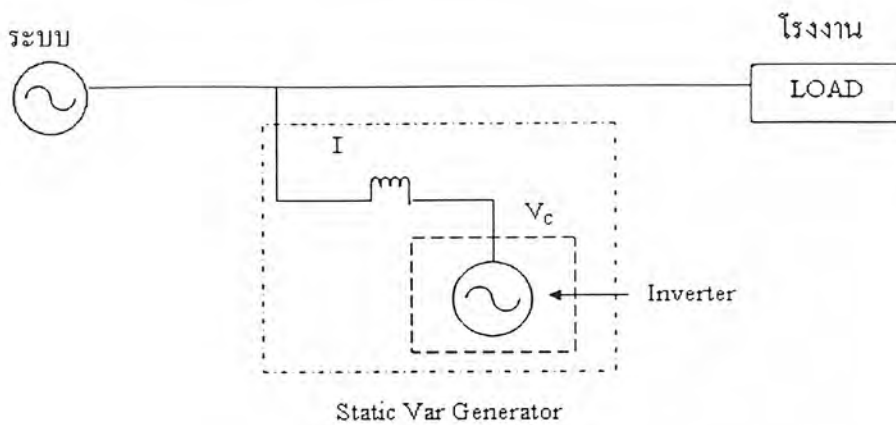
### การประยุกต์การใช้งานอินเวอร์เตอร์

ในปัจจุบันความต้องการกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยปกติแล้วจะมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ เมื่อค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโรงงานมีค่าต่ำแล้ว จะทำให้ระบบต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power, VA) มากขึ้นกว่าโรงงานที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่สูง ทำให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของระบบสูงขึ้น จึงได้มีการศึกษาถึงการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโรงงานให้มีค่าสูงขึ้น โดยหนึ่งในวิธีการนั้น คือ การต่อ Static Var Generator เข้าไปกับระบบเพื่อเป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power, VAR) ให้กับโรงงานแทนระบบ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power, VA) ที่ระบบต้องจ่ายให้กับโรงงานมีค่าต่ำลง เป็นผลให้ระบบประหยัดต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า

การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทำให้ค่าความสูญเสียรวมของระบบมีค่าลดลง เพื่อรักษาระดับแรงดันระบบและทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการชดเชยนี้เรียกว่า Static Var Generator ในอดีตจะมีอุปกรณ์หลัก คือ หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีข้อด้อย คือ

- 1) เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูงที่สุดในระบบ
  - 2) ก่อให้เกิดความสูญเสียประมาณครึ่งหนึ่งของความสูญเสียรวมของระบบ
  - 3) มีขนาดใหญ่ ทำให้เปลืองพื้นที่ในการติดตั้ง
  - 4) การควบคุมเป็นไปได้ยาก ทั้งในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการเกิดแรงดันเกินในขณะหม้อแปลงอินตัว
  - 5) การทำงานล้มเหลวง่าย การตอบสนองช้า และไม่สามารถเปลี่ยนแรงดันขาออกในทันทีทันใด
- การสร้าง Static Var Generator ในปัจจุบันมีหลักการทำงานเหมือนกับแหล่งจ่ายกระแสโดยที่สามารถควบคุมกระแสโดยการปรับค่าแรงดันขาออกที่ได้จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับ และไม่มีการใช้หม้อแปลงแล้ว

ส่วนแรกที่ทำการศึกษา คือ ส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ซึ่งก็มีด้วยกันอยู่หลายชนิด อย่างเช่น ไดโอดแคลมป์ (Diode-clamped), คาสเคดมัลติเซลล์ (Cascaded Multicell) และฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor) โดยวงจรที่ได้ทำการศึกษา คือ ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor)



รูปที่ 3.1 การต่อ Static Var Generator เข้าสู่ระบบ

### 3.2 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

กำลังงานในระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ กำลังไฟฟ้าจริง (Real Power หรือ Active Power, Watt) เป็นกำลังงานที่สามารถเปลี่ยนแปลงโดยอุปกรณ์ไฟฟ้าไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นได้ เช่น ความร้อน แสงสว่าง หรือกำลังงานกล และอีกส่วนหนึ่ง คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power, VAR) เป็นกำลังงานที่ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ แต่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็ก เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ ต้องใช้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนี้ สร้างสนามแม่เหล็ก ผลรวมของกำลังงานทั้ง 2 ส่วนนี้เรียกว่า กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power, VA) เป็นกำลังงานที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ และมีขนาดเท่ากับผลคูณของกระแส ไฟฟ้าในวงจรกับแรงดันของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อัตราส่วนของกำลังงานจริงต่อกำลังงานปรากฏ เรียกว่า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor, pf.) ดังนั้นในระบบไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงจะมีความสามารถหรือประสิทธิภาพในการทำงานดีกว่าระบบไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า

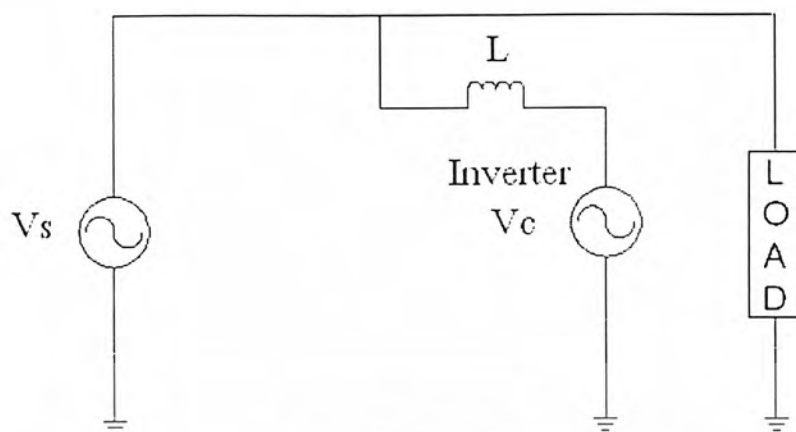


รูปที่ 3.2 ผลรวมของกำลังไฟฟ้า

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอาจจะเป็นแบบนำหน้าหรือล่าหลัง (Leading or Lagging) ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางของไหลของกำลังงานที่ทำให้เกิดงานและกำลังงานรีแอกทีฟ ถ้ากำลังงานทั้งสองส่วนนี้ไหลไปในทิศทางเดียวกัน ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จุดนั้นจะเป็นแบบล่าหลัง (Lagging) แต่ถ้าไหลไปคนละทิศทางแล้ว ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่จุดนั้นจะเป็นแบบนำหน้า (Leading)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 หลักการการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ



รูปที่ 3.3 หลักการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอาศัยหลักการการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าไปให้กับระบบ ในรูปของการจ่ายกระแสรีแอกทีฟ (Reactive Current) เข้าไปในระบบ และเมื่อไปคูณกับแรงดันที่มาจาก การไฟฟ้าก็จะได้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยที่การไฟฟ้าจ่ายเพียงแต่กำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้น

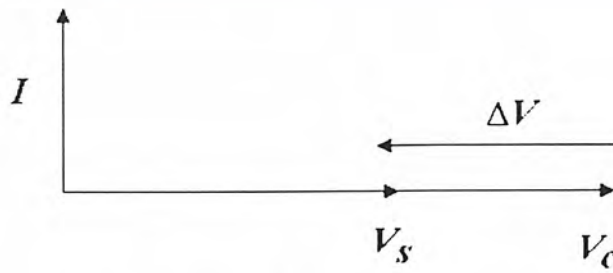
การควบคุมแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_c$ ) มีอยู่ 3 ลักษณะ คือ

- 1)  $V_c$  มากกว่า  $V_s$
- 2)  $V_c$  น้อยกว่า  $V_s$
- 3)  $V_c$  เท่ากับ  $V_s$

กำหนดให้กระแสมีทิศไหลจากระบบเข้าอินเวอร์เตอร์

$$I = \frac{V_s - V_c}{X_L} = \frac{\Delta V}{X_L} \quad (3.1)$$

ในกรณีที่  $V_C$  มากกว่า  $V_S$



รูปที่ 3.4 เวกเตอร์ในกรณีที่  $V_C$  มากกว่า  $V_S$

จากรูป  $I$  นำหน้า  $V_S$  จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์ทำตัวเสมือนภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบนำหน้า เพราะฉะนั้นจึงมีการดึงกระแสแบบนำหน้า จากภาระทางไฟฟ้าจริงของระบบที่เป็นแบบล่าหลัง จึงทำให้กระแสไฟฟ้ายรวมที่ดึงจากระบบนั้นมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้่าที่ต่ำขึ้น

ในกรณีที่  $V_C$  น้อยกว่า  $V_S$



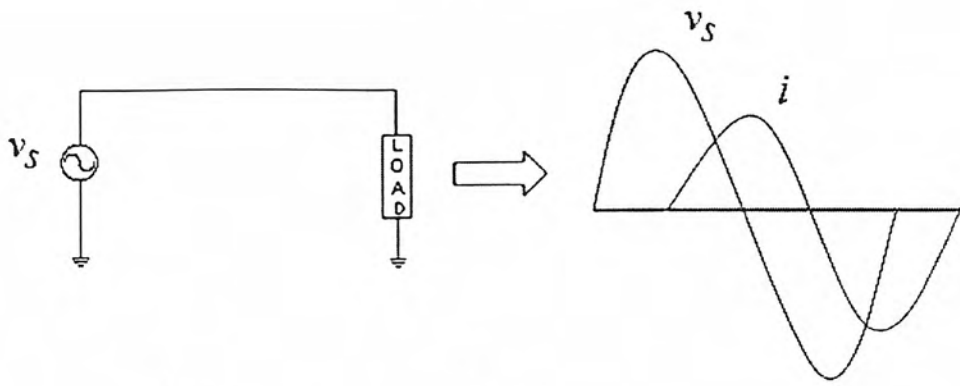
รูปที่ 3.5 เวกเตอร์ในกรณีที่  $V_C$  น้อยกว่า  $V_S$

จากรูป  $I$  ตามหลัง  $V_S$  จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์ทำตัวเสมือนภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบล่าหลัง เพราะฉะนั้นจึงมีการดึงกระแสแบบล่าหลังจากภาระทางไฟฟ้าจริงของระบบที่เป็นแบบนำหน้า จึงทำให้กระแสไฟฟ้ายรวมที่ดึงจากระบบนั้นมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้่าที่ต่ำขึ้น

ในกรณีที่  $V_C$  เท่ากับ  $V_S$

จะไม่เกิดกระแสไหลระหว่างอินเวอร์เตอร์และระบบ

ภาระทางไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันนี้ส่วนมากจะเป็นภาระทางไฟฟ้าซึ่งทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นแบบล่าหลัง จึงนำกรณีนี้มาอธิบายโดยละเอียดอีกครั้ง ดังนี้

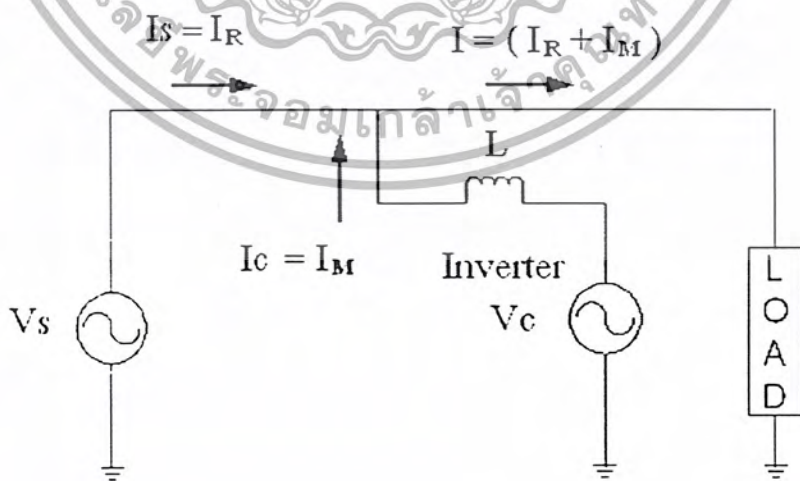


รูปที่ 3.6 ลักษณะแรงดันกับกระแสที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นแบบล้าหลัง

เมื่อมีการจ่ายกระแสแอคทีฟจากอินเวอร์เตอร์ ที่มีลักษณะแบบล้าหลังแรงดัน ก็จะทำให้ระบบจ่ายเพียงแค่กระแสจริง ให้กับระบบซึ่งจะมีผลทำให้มุมระหว่างกระแสที่จ่ายจากระบบและแรงดันนั้นมีเฟสเดียวกัน



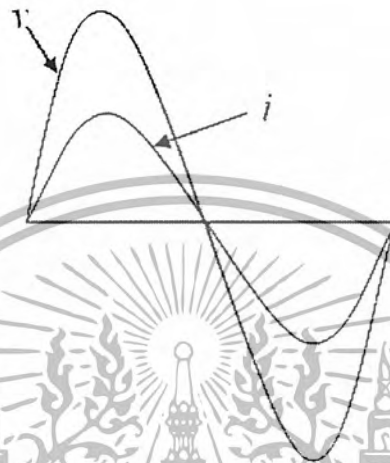
รูปที่ 3.7 แรงดันกับกระแส ที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะกระแสล้าหลัง



รูปที่ 3.8 การจ่ายกระแสจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับเข้าสู่ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

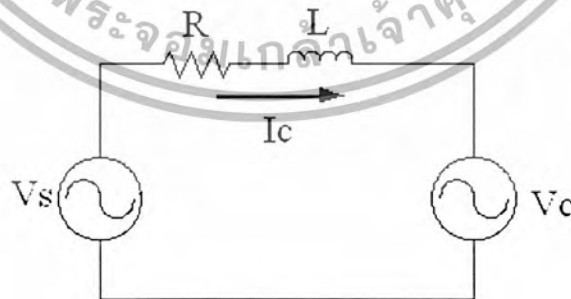
จากรูปที่ 3.8 เมื่อจ่ายกระแสจากอินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบกระแสที่ได้จากอินเวอร์เตอร์จะไปชดเชยค่ากระแสแอมเพอ์ ในระบบแทน ทำให้ไฟที่จ่ายจากระบบการไฟฟ้าจ่ายเพียงแก่กระแสแอมเพอ์เพียงอย่างเดียวเท่านั้นไม่ต้องจ่ายค่ากระแสแอมเพอ์ ค่ากระแสที่จ่ายจากอินเวอร์เตอร์ จะเป็นแบบนำหน้าหรือล้าหลังนั้นขึ้นอยู่กับว่าภาระทางไฟฟ้าเป็นชนิดนำหน้าหรือล้าหลัง โดยการปรับค่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์ให้มากหรือน้อยกว่าแรงดันของระบบตามหลักการข้างต้น



รูปที่ 3.9 มุมระหว่างแรงดันและกระแสระบบเมื่อต่ออินเวอร์เตอร์

จากรูปจะเห็นได้ว่ามุมระหว่างกระแสและแรงดันจะมีเฟสเดียวกันหลังจากชดเชยค่ากระแสเสมือนเข้าไป

### 3.3 การวิเคราะห์และการควบคุม



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของระบบเมื่อต่อ Static Var Generator  
(ไม่พิจารณาภาระทางไฟฟ้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการควบคุมจะอาศัยพื้นฐานของ Instantaneous active and reactive current  $i_d$ - $i_q$  method ซึ่งอยู่ในระบบแกน d-q จากรูปที่ 3.10  $V_s$  คือแรงดันระบบ  $V_c$  แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์  $I_c$  คือกระแสอินเวอร์เตอร์ R และ L แทนตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ (Interface Inductor) สามารถแปลงจากระบบ 3 เฟสเป็น 2 เฟสในรูปของ stationary reference frame ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{s a} \\ v_{s b} \\ v_{s c} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{c a} \\ v_{c b} \\ v_{c c} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{l a} \\ i_{l b} \\ i_{l c} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c a} \\ i_{c b} \\ i_{c c} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

จากรูปที่ 3.10 สามารถนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

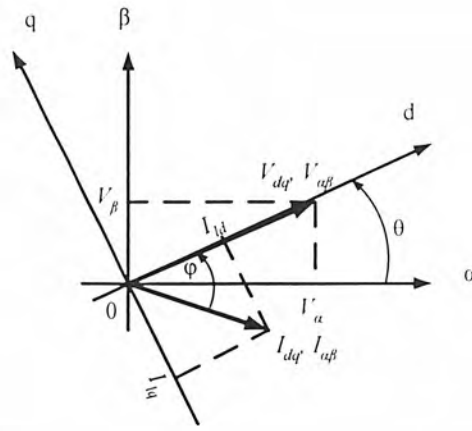
$$L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = v_s - v_c \quad (3.6)$$

สมมติให้แรงดันระบบเป็นรูปคลื่นแบบไซน์ สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$v_s = \sqrt{V_s} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $V_s$  คือ แรงดันอาร์เอ็มเอสแบบไลน์ทูไลน์

$\theta$  คือ มุมเฟส (Phase Angle)



รูปที่ 3.11 แรงดันและกระแสในระบบ stationary reference frame กับ synchronous reference frame

จากสมการที่ 3.6 สามารถแปลงจาก stationary reference frame ให้อยู่ในรูป synchronous reference frame ในรูปของ d-q โดยการใช้เมทริกซ์ [T]

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในแกน d-q ได้โดยอาศัยหลักการการแปลงของ ซิงโครนัสเฟรม ได้ดังนี้

$$L \frac{dI_c}{dt} + L\omega \times I_c + RI_c = V_s - V_c \tag{3.9}$$

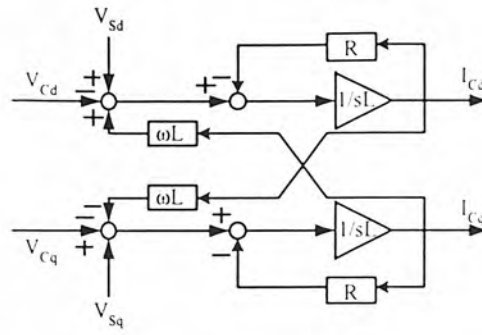
$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{cd} \\ I_{cq} \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} -I_{cq} \\ I_{cd} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} I_{cd} \\ I_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cq} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

$$p_c = V_s I_{cd} \text{ และ } q_c = V_s I_{cq} \tag{3.12}$$

เมื่อ  $I_{cd}$  ,  $I_{cq}$  คือ กระแสแอกทีฟและกระแสรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์ตามลำดับ ด้วยลักษณะนี้ สามารถแยกการควบคุมกระแสทั้งสองได้ หรือกล่าวได้ว่าสามารถแยกการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทั้ง  $I_{cd}$  ,  $I_{cq}$  นั้นสามารถเป็นไปได้ทั้งบวกและลบ คือ เมื่อ  $I_{cd}$  เป็นบวก กำลังไฟฟ้าจริงจะไหลเข้าอินเวอร์เตอร์ และเมื่อเป็นลบ กำลังไฟฟ้าจริงไหลจากอินเวอร์เตอร์เข้าระบบแทน แล้วเมื่อ  $I_{cq}$  เป็นบวก อินเวอร์เตอร์สร้างกำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบนำหน้า และเมื่อเป็นลบ อินเวอร์เตอร์สร้างกำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบล่าหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



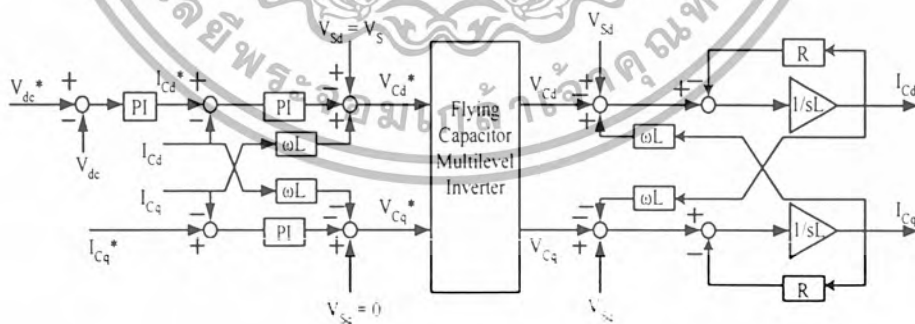
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมของ Static Var Generator

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.12 เกิดจากสมการที่ 3.9 หรือ 3.10 ซึ่งแสดงส่วนประกอบของกระแสแอกทีฟ ( $I_{Cd}$ ) และกระแสรีแอกทีฟ ( $I_{Cq}$ ) ซึ่งกระแสทั้งสองมีผลต่อเนื่องสัมพันธ์กันโดยผ่านค่าความเหนี่ยวนำ ( $\omega L$ ) และในการควบคุมต้องเป็นแบบแยกอิสระ คือ กระแสทั้งสองส่วนไม่มีผลต่อกัน

หากต้องการสร้างกระแสอินเวอร์เตอร์ตามต้องการ ควบคุมได้โดยการสร้างแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ ที่มีองค์ประกอบตามสมการที่ 3.10 หรือรูปที่ 3.12 เพราะฉะนั้นจึงสามารถเขียนได้ตามสมการนี้

$$\begin{bmatrix} V_{Cd}^* \\ V_{Cq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd} + \omega L I_{Cq}^* \\ V_{sq} + \omega L I_{Cd}^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L \frac{d}{dt} I_{Cd}^* + R I_{Cd}^* \\ L \frac{d}{dt} I_{Cq}^* + R I_{Cq}^* \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

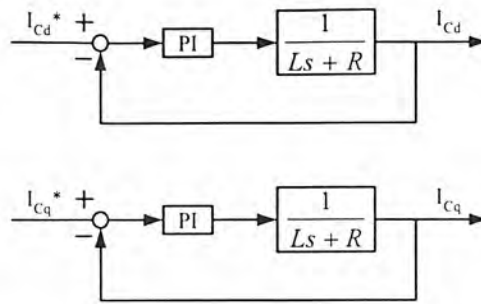
สามารถแสดงวงจรการควบคุมแบบแยกอิสระได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรควบคุมแบบแยกอิสระ

จากรูปที่ 3.13 เมื่อนำมาพิจารณาในรูปวงจรมุมแล้วจะพบว่า การควบคุมกระแสในแนวแกน d และ q สามารถควบคุมแบบแยกอิสระต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



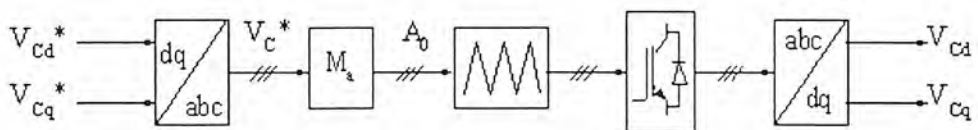
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลของการควบคุม

ในการควบคุมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และการรักษา ระดับแรงดันคอมมอนดีซีลิงค์

การชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ สามารถพิจารณาในรูปของกระแสรีแอกทีฟ ซึ่งถ้ามองในระบบ แกน d-q แล้ว คือกระแสในแนวแกน q ขั้นตอนแรกทำการส่งค่ากระแสของภาระทางไฟฟ้าให้อยู่ในรูป ของระบบแกน d-q เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการเปรียบเทียบ ( $I_{cq}^*$ ) ส่วนอีกสัญญาณเป็นค่าที่ส่งมา จากกระแสของอินเวอร์เตอร์ในระบบแกน d-q เช่นกัน ( $I_{cq}$ ) โดยในการแปลงจากระบบ 3 เฟสเป็นระบบ แกน d-q นั้นจำเป็นต้องใช้ค่ามุมเฟสของแรงดันระบบ ( $\theta$ ) ดังจะเห็นในสมการ 3.8 ซึ่งได้มาจากเฟสล็อก ลูป (Phase Locked Loop, PLL) นำค่าผลต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบส่งเข้า PI Controller ดังรูปที่ 3.13 และเมื่อรวมกับผลของค่าความเหนี่ยวนำและแรงดัน จะได้แรงดันในแนวแกน q ( $V_{cq}^*$ )

ส่วนการรักษาระดับแรงดันคอมมอนดีซีลิงค์ จะพิจารณาในรูปของกระแสรีแอกทีฟ ซึ่งถ้ามองใน ระบบแกน d-q แล้ว คือ กระแสในแนวแกน d ซึ่งเกิดจากการส่งค่าแรงดันคอมมอนดีซีลิงค์มาเปรียบเทียบ ระดับแรงดันอ้างอิงแล้วนำค่าที่ได้ส่งเข้า PI Controller ค่าที่ได้ออกมา คือ กระแสอ้างอิงในแกน d จากนั้นลักษณะการควบคุมจะคล้ายกับในแนวแกน q ค่าที่ได้ออกมาจะเป็นแรงดันในแนวแกน d ( $V_{cd}^*$ )

เมื่อได้แรงดันทั้งในแนวแกน d และ q แล้ว ทำการแปลงค่ากลับให้อยู่ในระบบ 3 เฟส ได้เป็น แรงดันขาออกที่อินเวอร์เตอร์จะต้องสร้างขึ้น จากนั้นนำไปคำนวณหาแอมพลิจูดของสัญญาณอ้างอิง (สัญญาณแบบซายน์) ทั้ง 3 เฟสแล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะ (สัญญาณสามเหลี่ยม) ซึ่งจะได้ เป็นสัญญาณควบคุมขาเกทของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลัง เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันขาออกตามที่ ต้องการ



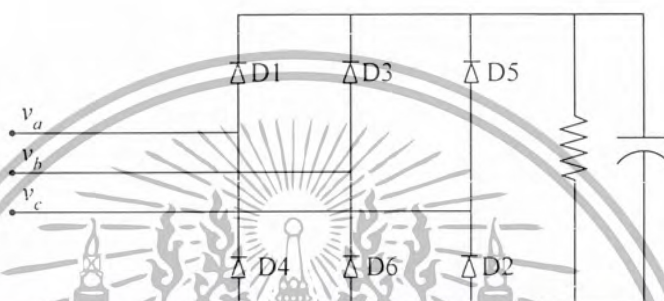
รูปที่ 3.15 การสร้างสัญญาณควบคุมขาเกทของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วงจรเริ่มต้นการทำงาน

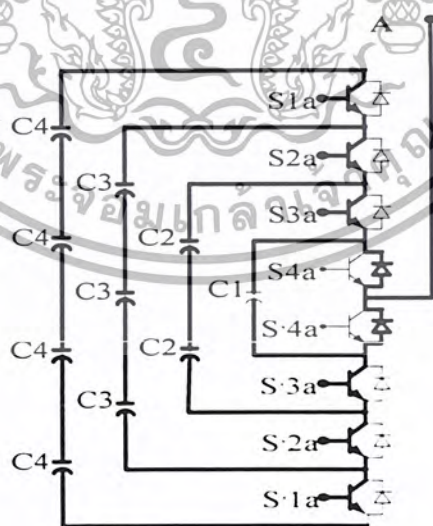
ในการเริ่มต้นการทำงานของอินเวอร์เตอร์ต้องมีการอัดประจุตัวเก็บประจุให้มีระดับแรงดันตามพิกัด ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น การใช้แหล่งจ่ายกระแสตรงจ่ายให้แก่ตัวเก็บประจุแต่ละระดับแรงดันโดยตรง โดยวิธีนี้จะทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น จากการศึกษาที่ต้องจ่ายระดับแรงดันที่แตกต่างกันให้กับตัวเก็บประจุแต่ละตัว มีขบวนการทำงานที่มีความยุ่งยาก และใช้เวลานาน จึงได้มีการสร้างวงจรเริ่มต้นการทำงานที่มีอุปกรณ์น้อยลง ซึ่งขั้นตอนการทำงานจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

ในวิธีที่นำเสนอจะแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ในช่วงแรกจะเป็นการทำงานในลักษณะของวงจรแปลงกระแสตรง (Rectifier) แบบ 3 เฟส แสดงวงจรได้ดังรูปที่ 3.16



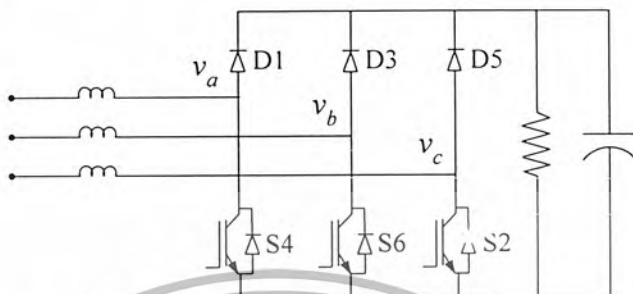
รูปที่ 3.16 วงจรแปลงกระแสตรง 3 เฟส

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์ นั้นสามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลังให้มีลักษณะวงจรเปรียบเสมือนวงจรแปลงกระแสตรง แสดงได้ดังรูปที่ 3.17



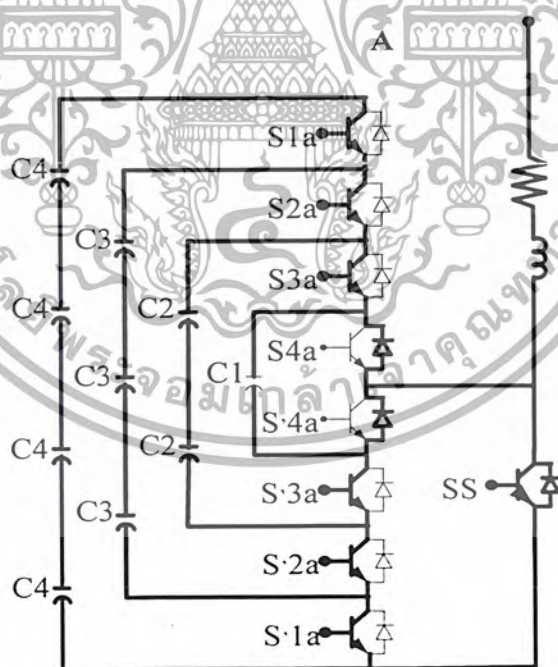
รูปที่ 3.17 วงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อพิจารณาเป็นวงจรแปลงกระแสตรง แสดงวงจรเพียง 1 เฟส

จากวงจรแปลงกระแสตรง นั้นสามารถสร้างแรงดันกระแสตรง ( $V_{dc}$ ) ได้เพียง 1.654 เท่าของแรงดันเฟสสูงสุด ในกรณีที่ต้องการค่าแรงดันคอมมอนดีซีลิ่งที่มีค่าสูงกว่าแรงดันที่ได้จากวงจรแปลงกระแสตรง จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานของวงจรเริ่มต้นการทำงานให้เป็นวงจรขยายแรงดัน 3 เฟส (3 Phase Boost Rectifier) เพิ่มอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลัง แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจร 3 Phase Boost Rectifier

ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวงจรแปลงกระแสตรงในรูปที่ 3.16 พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันเพียงแต่จะจะมีการเพิ่มอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลังในตำแหน่งของไดโอดที่ 2, 4 และ 6 ดังนั้นในวงจรอินเวอร์เตอร์จึงต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลัง 1 ตัวเข้าไปเชื่อมต่อในแต่ละเฟส ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรอินเวอร์เตอร์เมื่อพิจารณาเป็นวงจร 3 Phase Boost Rectifier แสดงวงจรเพียง 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจร 3 Phase Boost Rectifier จะมีรูปแบบการทำงานหลักอยู่ 2 รูปแบบ คือ ในช่วงที่อุปรณ์สวิตซ์ ซึ่งกำลังที่เพิ่มเติมเข้ามา (SS) เปิดและปิดวงจรในลักษณะของสวิตซ์ซึ่งความถี่สูง โดยในขณะที่เปิดวงจร จะมีลักษณะการทำงานเหมือนวงจรแปลงกระแสตรง เมื่อ SS ปิดวงจรจะเกิดการสะสมพลังงานภายในตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ เมื่อมีการเปิดวงจรอีกครั้งพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อก็จะถ่ายเทไปยังตัวเก็บประจุ ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถขยายแรงดันให้มีค่าสูงกว่าวงจรแปลงกระแสตรง

ขั้นตอนการทำงานของวงจรเริ่มต้น โดยในปริณญาณิพนธ์นี้ทำการจำลองที่แรงดันเฟส 220 โวลต์ และ แรงดันคอมมอนดีซีลิงก์ ( $V_{dc}$ ) มีค่า 740 โวลต์

1. ใส่ตัวต้านทานสามเฟสระหว่างอินเวอร์เตอร์และระบบไฟฟ้า เพื่อจำกัดกระแสและแรงดันให้ได้ตามต้องการ ค่าความต้านทานสามารถหาได้โดยการใช้วงจรจำลอง

2. สร้างสัญญาณควบคุมให้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลัง S1a, S'1a, S2a, S'2a, S3a, S'3a, S1b, S'1b, S2b, S'2b, S3b, S'3b, S1c, S'1c, S2c, S'2c, S3c, S'3c ปิดวงจร และ S4a, S'4a, S4b, S'4b, S4c, S'4c เปิดวงจรซึ่งด้วยวิธีนี้ตัวเก็บประจุวงนอก (common dc link capacitors: C4) และตัวเก็บประจุวงใน (flying capacitors: C1, C2, C3) คือแบบขนานกับอินเวอร์เตอร์ทั้งสามเฟส และอินเวอร์เตอร์ก็จะกลายเป็นวงจรแปลงกระแสสามเฟส โดยมีตัวเก็บประจุที่ต่อขนานนั้นเป็นภาระทางไฟฟ้า แล้วระบบไฟฟ้าจะอัดประจุแก่ตัวเก็บประจุเหล่านั้น

3. เมื่อระดับแรงดันของตัวเก็บประจุวงในสุด (C1) มีแรงดันตกคร่อมเท่ากับ  $1/4 V_{dc}$  แล้ว ก็ทำการควบคุมให้ เปิดวงจร S3a, S'3a, S3b, S'3b, S3c, S'3c แล้วตัวเก็บประจุ C1 ในทั้งสามเฟสก็เหมือนถูกปลดออก ขณะที่ตัวเก็บประจุอื่นๆยังต่อขนานอยู่ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุวงในสุด ก็จะคงที่อยู่ที่  $1/4 V_{dc}$  ส่วนแรงดันตกคร่อม C2 C3 C4 ยังคงเพิ่มขึ้น

4. เมื่อแรงดันตกคร่อม C2, C3, C4 มีค่าเท่ากับ  $1/2 V_{dc}$  ก็ควบคุมให้ S2a, S'2a, S2b, S'2b, S2c, S'2c ปิดวงจรแล้วตัวเก็บประจุ C2 ในทั้งสามเฟสก็เหมือนถูกปลดออก และระดับแรงดันของตัวเก็บประจุ C1 และ C2 จะคงที่อยู่ที่  $1/4 V_{dc}$  และ  $1/2 V_{dc}$  ตามลำดับ ส่วนแรงดันตกคร่อม C3 C4 ยังคงเพิ่มขึ้น

5. เมื่อแรงดันเพิ่มถึง 400 โวลต์ ก็จะเพิ่มสวิตซ์อีกเฟสละ 1 ชุด เพื่อเข้าในส่วนของการทำงานเป็นวงจร 3 Phase Boost Rectifier แรงดันในตัวเก็บประจุก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

6. เมื่อแรงดันตกคร่อม C3, C4 มีค่าเท่ากับ  $3/4 V_{dc}$  ก็ควบคุมให้ S1a, S'1a, S1b, S'1b, S1c, S'1c เปิดวงจร แล้วตัวเก็บประจุ C3 ในทั้งสามเฟสก็เหมือนถูกปลดออกเช่นกัน และแรงดันของ C4 ก็ยังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอีก

7. เมื่อแรงดันของ C4 เพิ่มขึ้นถึง  $V_{dc}$  ก็ตัดตัวต้านทานออกจากวงจร และปลดสวิตซ์ที่เพิ่มเข้ามาในขั้นตอนที่ 5 ออก จะได้ระดับแรงดันในตัวเก็บประจุต่างๆตามที่ต้องการ อินเวอร์เตอร์กลับเข้าสู่การทำงานตามปกติ

แรงดัน หรือ เวลา	$S_{1+,-}$	$S_{2+,-}$	$S_{3+,-}$	$S_{4+,-}$	SS
น้อยกว่า 185 โวลต์	1	1	1	0	off
185 – 370 โวลต์	1	1	0	0	off
370 – 400 โวลต์	1	1	0	0	off
400 – 555 โวลต์	1	0	0	0	PWM
555 – 740 โวลต์	0	0	0	0	PWM
เวลา มากกว่า Tst	NG	NG	NG	NG	off

ตารางที่ 3.1 สรุปสถานะการทำงานของสวิตช์ขณะเริ่มต้นการทำงาน

เมื่อ  $S_{1+,-}$  แทน  $S_{a1+}, S_{a1-}, S_{b1+}, S_{b1-}, S_{c1+}, S_{c1-}$   
 $S_{2+,-}$  แทน  $S_{a2+}, S_{a2-}, S_{b2+}, S_{b2-}, S_{c2+}, S_{c2-}$   
 $S_{3+,-}$  แทน  $S_{a3+}, S_{a3-}, S_{b3+}, S_{b3-}, S_{c3+}, S_{c3-}$   
 $S_{4+,-}$  แทน  $S_{a4+}, S_{a4-}, S_{b4+}, S_{b4-}, S_{c4+}, S_{c4-}$   
 SS แทน สวิตช์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนวงจร เป็นวงจรขยายแรงดัน  
 0 คือ สวิตช์เปิดวงจร (Open)  
 1 คือ สวิตช์ปิดวงจร (Close)  
 NG คือ สัญญาณควบคุมปกติ  
 Tst คือ เวลาในการเริ่มต้นการทำงาน

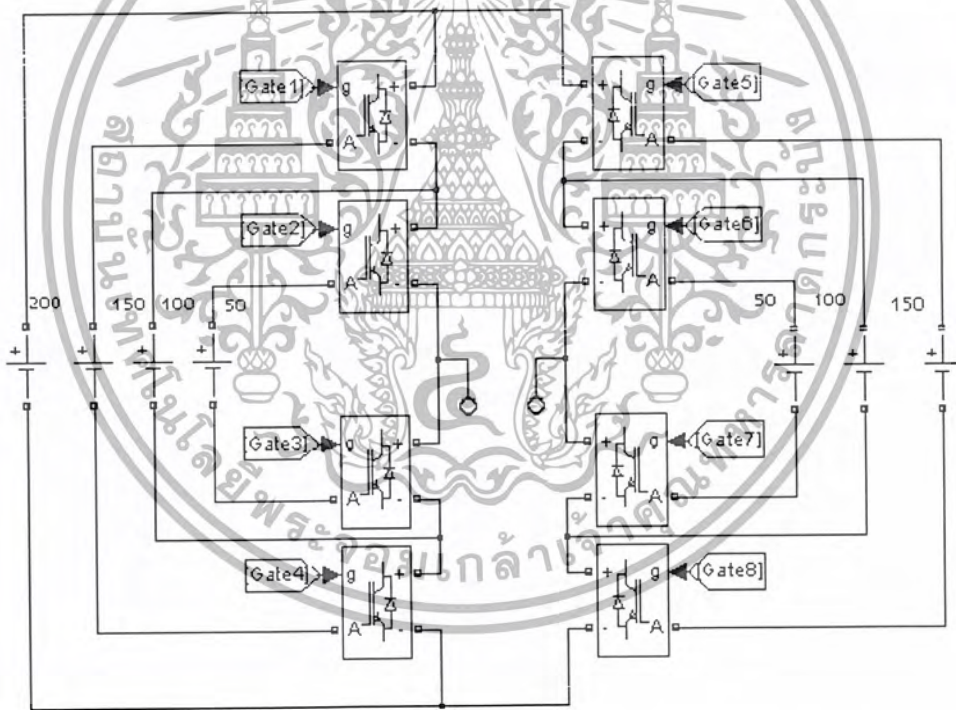
## บทที่ 4

### การจำลองใน Matlab/simulink

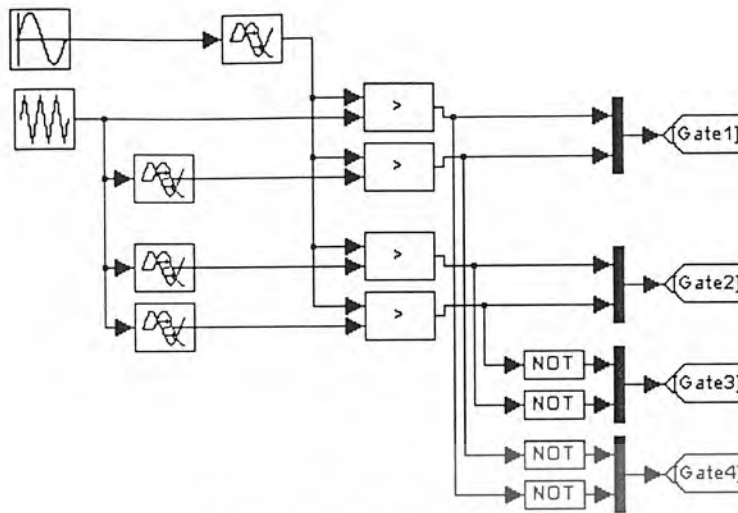
จากโครงสร้างหลักของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ คือ อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลังและตัวเก็บประจุ ในการจำลองในโปรแกรม Matlab/simulink อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งกำลังที่เลือกใช้ในการจำลอง คือ Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

#### 4.1 การจำลองเบื้องต้น

การจำลองเบื้องต้นได้ทำการจำลองโดยสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส 9 ระดับ แต่ทำการจำลองโดยสร้างเพียง 2 เฟส และจำลองโดยใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแทนตัวเก็บประจุเพื่อให้แรงดันคงที่โดยกำหนดแรงดัน ในแต่ละระดับเป็น 200,150,100 และ 50 โวลต์ ตามลำดับจากวงนอกเข้าวงในดังรูป



รูปที่ 4.1 วงจรหลักของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์



รูปที่ 4.2 วงจรการสร้างสัญญาณควบคุมขาเกทของ IGBT

ในการจำลองเบื้องต้นนี้เพื่อหาค่ามุมเลื่อนเฟสที่เหมาะสม ในการสร้างสัญญาณควบคุมขาเกทของIGBT เพื่อให้ได้ค่าของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ดีโดยพิจารณาจากค่า % THD ของแรงดันขาออก ค่าตัวแปรที่ทำการแปรค่าในการจำลองมี 2 ตัวคือ ค่ามุมที่ทำการเลื่อนเฟสและค่ามอดูเลชันอินดิเคซ์ ( $m_a$ ) ของสัญญาณควบคุมซึ่งเปลี่ยนค่าโดยการปรับค่าสูงสุดของสัญญาณแบบซายน์ โดยเปลี่ยนค่ามุมที่ทำการเลื่อนเฟสตั้งแต่ 45 องศาจนถึง 115 องศา และ ค่ามอดูเลชันอินดิเคซ์ ตั้งแต่ 0.1 – 1.4 ค่าที่แสดงจากการจำลอง คือ ค่าแรงดันขาออกอาร์เอ็มเอสไลน์ทูไลน์ ( $V_{Lrms}$ ) และ ค่า % THD ของแรงดันขาออก ได้ผลการจำลองดังนี้

มุม	45		50		55		60		65	
	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD
0.1	22.86	55.85	22.89	41.37	22.94	19.83	26.44	26.18	22.83	22
0.2	33.06	27.86	33.26	22.29	36.95	14.59	37.63	18.93	36.75	22.22
0.3	41.28	9.365	44.2	9.54	45.6	8.94	46.19	13.95	45.81	21.5
0.4	54.05	13.29	54.62	10.25	54.14	5.23	54.78	11.17	56.82	18.71
0.5	66.4	11.15	66	8.75	67.02	4.93	67.25	8.88	68.49	13.98
0.6	78.27	8.5	78.55	6.98	78.83	4.57	79.7	6.99	80.62	10.22
0.7	90.76	7.18	90.42	5.65	90.47	3.5	91.07	5.96	91.42	9.02
0.8	103.4	5.83	103	4.72	103.3	3.21	103.1	5.31	103.1	8.26
0.9	116.5	5.54	116.6	4.56	116	3.12	115.2	4.31	114.3	6.18
1	129.4	5.14	128.4	4.04	128	2.45	126.8	3.32	126.1	4.36

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันขาออกและค่า % THD ที่มุมเลื่อนเฟสและค่ามอดูเลชันอินดิเคซ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุม	45		50		55		60		65	
$m_a$	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD
1.1	137.3	5.13	136.2	4.13	135.2	3.1	134.4	4.16	133.8	5.61
1.2	141.2	5.02	140.3	4.43	139.6	3.93	139	4.89	138.5	6.27
1.3	144.9	4.57	143.9	4.26	143.2	4	142.7	4.75	142.1	6.06
1.4	147.9	4.3	147.1	4.03	146.2	3.78	145.4	4.37	144.5	5.3

มุม	70		75		80		85		90	
$m_a$	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD
0.1	22.83	19.45	22.84	20.89	23.5	20.31	26.97	42.33	29.58	57.44
0.2	33.5	24.44	33.5	23.64	38.37	19.9	41.14	24.41	41.75	29.54
0.3	46.47	26.27	47.48	25.7	49.77	20.98	50.75	13.67	51.11	10.32
0.4	58.68	23.32	59.28	23.24	58.69	17.96	58.63	13.24	58.88	12.66
0.5	69.33	17.42	68.36	17.31	67.82	13.25	66.37	10.17	65.91	10.31
0.6	80.24	12.63	79.03	12.11	77.6	9.44	76.35	7.33	75.59	7.55
0.7	91.01	11.07	91.19	10.81	90.31	8.4	89.32	6.4	88.85	6.7
0.8	103.1	9.98	103.1	9.98	102.3	7.71	102.4	5.52	101.9	5.09
0.9	114.4	7.48	114	7.43	114.1	5.8	114.8	4.95	114.5	5.16
1	125.6	5.1	125.2	5.12	125.8	4.18	126.4	4.46	126.5	5.19
1.1	133.6	6.62	133.4	6.7	133.4	5.36	133.3	4.73	133.3	4.96
1.2	138.3	7.26	138.2	7.21	138	6.01	137.6	4.91	137.4	34.63
1.3	141.6	6.73	141.2	6.62	140.7	5.55	140.6	4.56	140.5	4.22
1.4	143.9	9.95	143.4	5.93	143	5.02	142.9	4.23	142.6	4.02

มุม	95		100		105		110		115	
$m_a$	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD
0.1	26.99	42.07	23.48	18.06	22.87	17.33	22.87	15.29	23.13	21.13
0.2	41.2	23.81	38.34	14.25	33.49	12.63	33.35	10.81	35.8	15.18
0.3	50.83	11.67	49.71	12.18	46.95	10.17	45.21	9.1	45.74	11.91
0.4	58.67	11.52	57.96	9.45	58.39	9.01	57.76	8.9	57.91	11.22
0.5	66.03	8.95	67.29	7.44	69.36	8.12	71.36	9.02	72.75	10.88
0.6	76.78	6.58	78.88	6.05	80.99	7.08	83.39	8.33	85.72	9.97

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันขาออกและค่า % THD ที่มุมเลื่อนเฟสและค่ามอดูลชั้นอินเด็กซ์ต่างๆ (ต่อ)

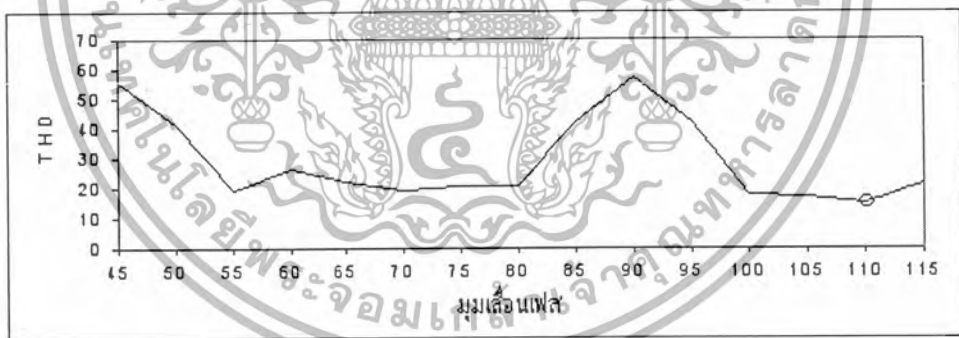
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มม	95		100		105		110		115	
	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD
0.7	89.03	6.02	90.29	5.2	91.56	6.16	94.58	7.36	96.93	8.77
0.8	102	4.98	103	4.83	104.1	5.4	105.3	6.21	106.9	7.49
0.9	114.5	4.59	115.3	4.17	115.6	4.76	116.1	5.07	117.3	5.84
1	126.3	4.2	126.4	3.17	126.3	3.7	127.1	4.14	128	4.49
1.1	133.2	4.32	133.1	3.69	133.3	3.76	133.7	3.99	134.5	4.65
1.2	137.6	4.5	137.5	4.2	137.4	4.21	137.8	4.42	138.5	4.92
1.3	140.7	4.16	140.7	4.14	140.8	4.14	141.1	4.29	141.7	4.76
1.4	143.2	3.99	143.2	3.91	143.4	3.95	143.7	4.05	144.2	4.45

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันขาออกและค่า % THD ที่มุมเลื่อนเฟสและค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ (ต่อ)

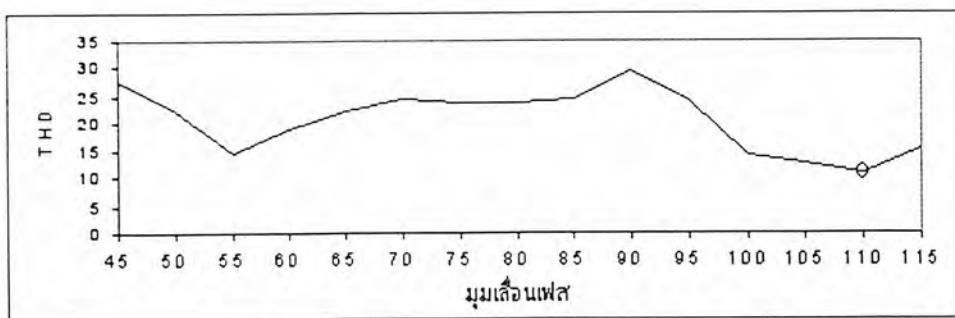
จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า ไม่ว่ามุมเลื่อนเฟสจะเป็นกี่องศา ค่าแรงดันที่ได้ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์เดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่า % THD จะต่างกัน ดังนั้นจะต้องพิจารณาต่อไปว่าที่มุมเลื่อนเฟสเท่าใดที่ให้ค่า % THD ต่ำสุด พิจารณาโดยนำค่า % THD และ มุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ มาพล็อตกราฟได้ดังนี้

มอดูเลชันอินเด็กซ์ = 0.1



(ก)

มอดูเลชันอินเด็กซ์ = 0.2

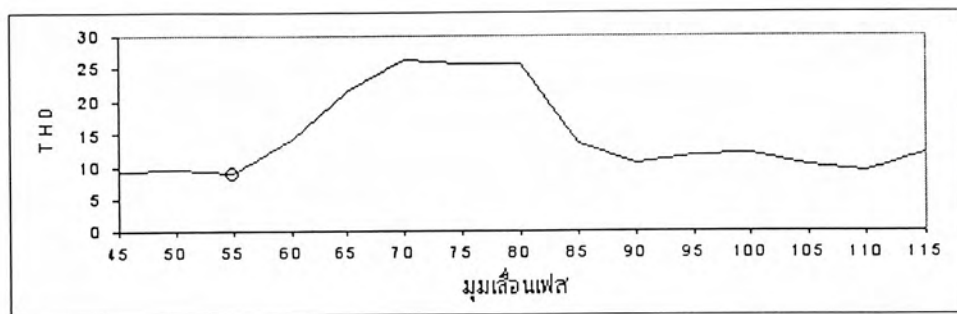


(ข)

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % THD กับมุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ

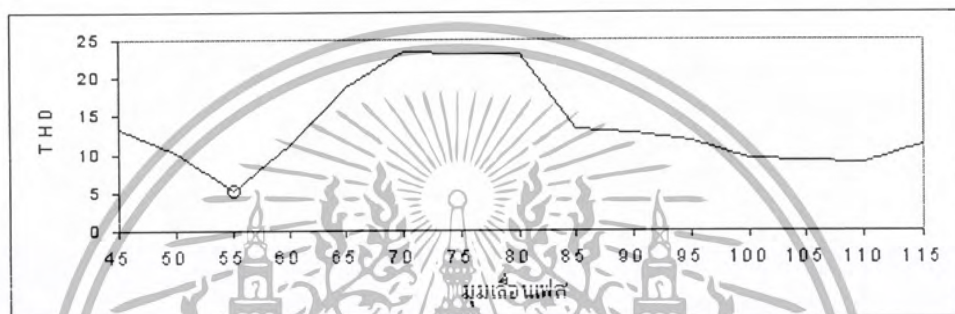
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูละชันอินเดกซ์ = 0.3



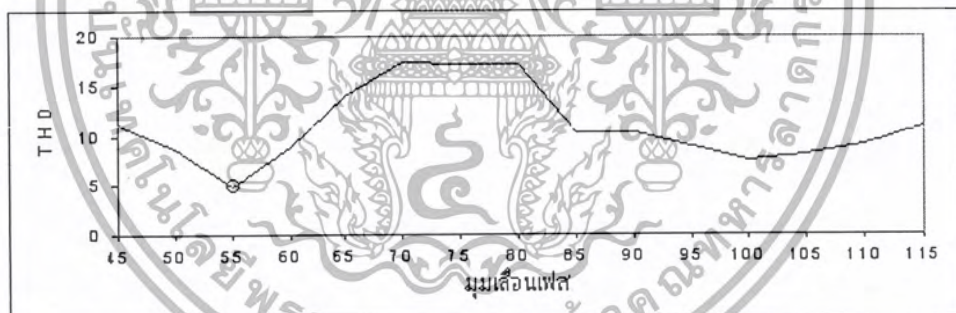
(ก)

มอดูละชันอินเดกซ์ = 0.4



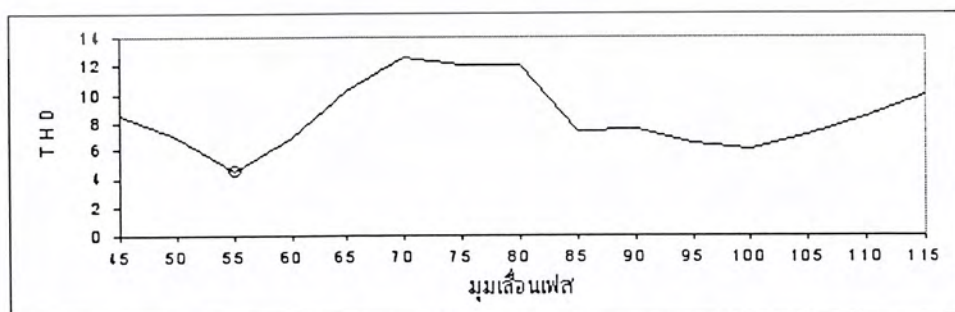
(ง)

มอดูละชันอินเดกซ์ = 0.5



(จ)

มอดูละชันอินเดกซ์ = 0.6

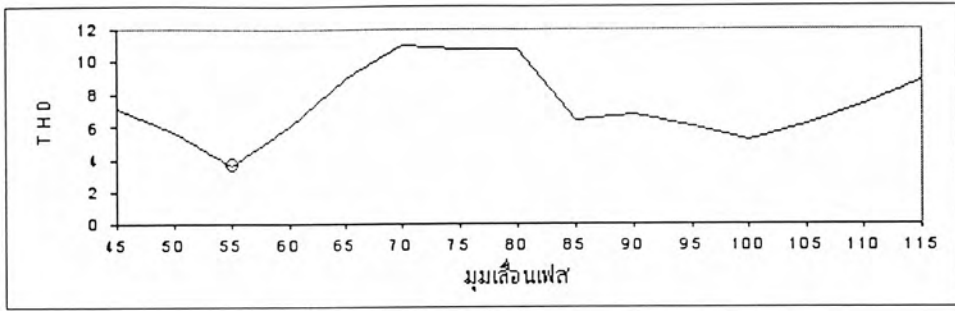


(ฉ)

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % THD กับมุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูละชันอินเดกซ์ต่างๆ (ต่อ)

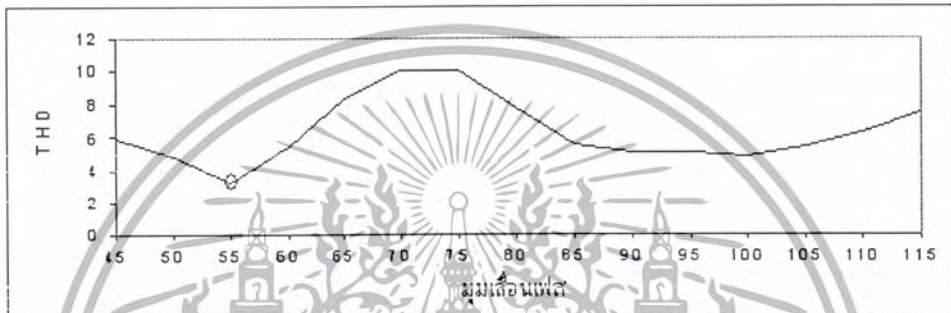
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.7



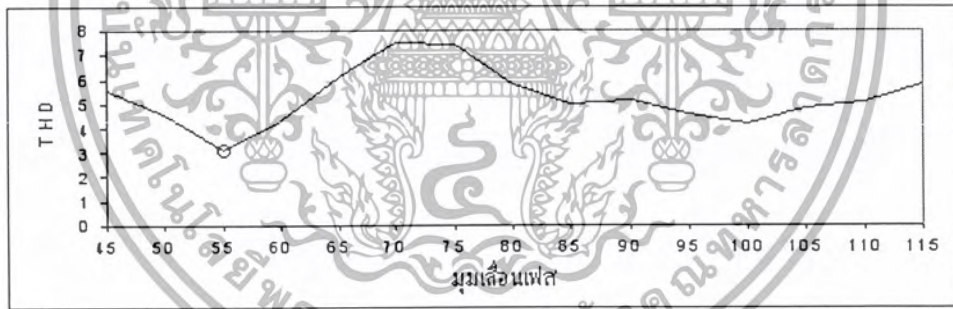
(ข)

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.8



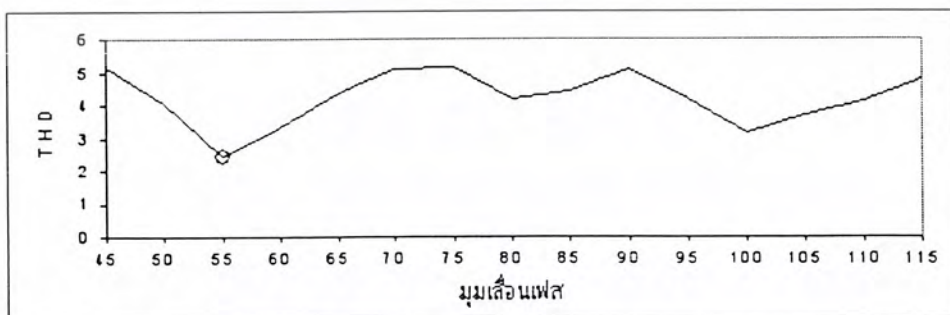
(ค)

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.9



(ด)

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 1.0

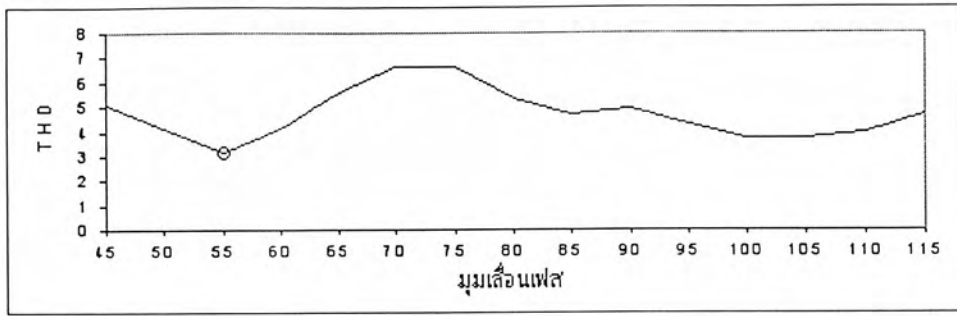


(จ)

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % THD กับมุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูลชันอินเด็กซ์ต่างๆ (ต่อ)

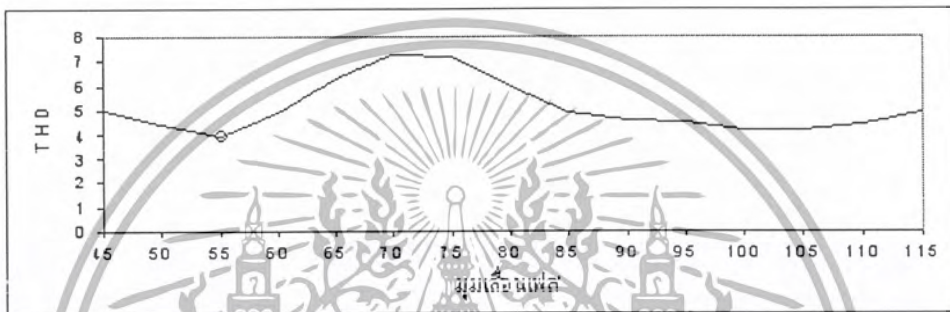
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 1.1



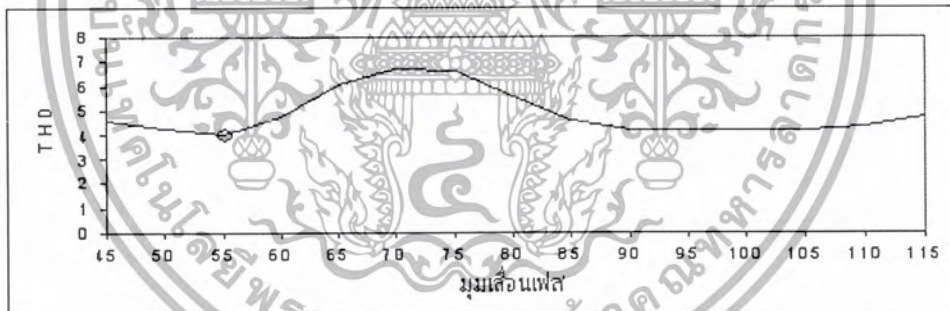
(ก)

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 1.2



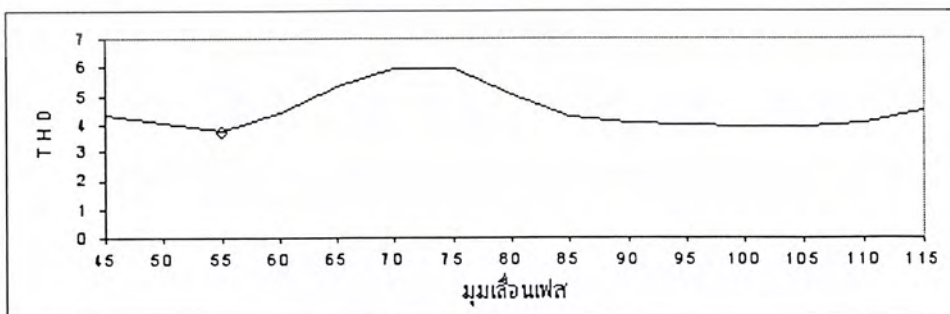
(ข)

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 1.3



(ค)

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 1.4

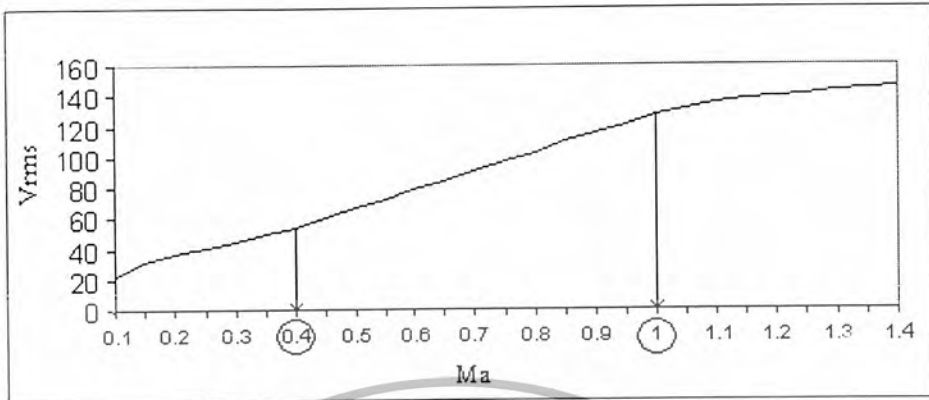


(ง)

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % THD กับมุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูลชันอินเด็กซ์ต่างๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่ามุมเลื่อนเฟสที่ทำให้ค่า % THD ต่ำสุดส่วนใหญ่ คือ มุมเลื่อนเฟส 55 องศา นำค่าแรงดันขาออกกับมอดูเลชันอินเด็กซ์ ที่มุมเลื่อนเฟส 55 องศา มาพล็อตกราฟได้ดังนี้

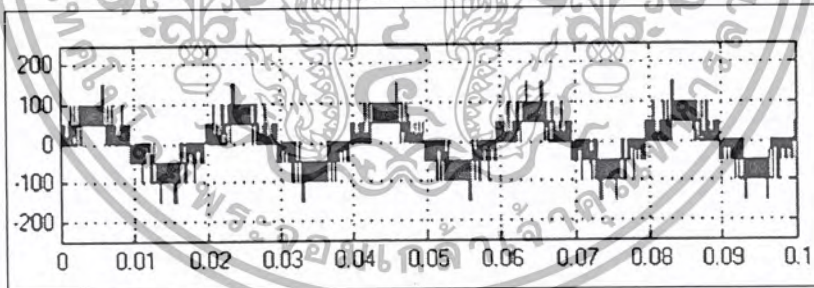


รูปที่ 4.4 แรงดันขาออกกับมอดูเลชันอินเด็กซ์ที่มุมเลื่อนเฟส 55 องศา

จะพบว่าค่าแรงดันขาออกกับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์สัมพันธ์เป็นเชิงเส้นที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ตั้งแต่ 0.4 - 1.0 ดังนั้นในการควบคุมแรงดันขาออกให้ได้ตามที่ต้องการ ควรจะปรับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ในช่วง 0.4 - 1.0

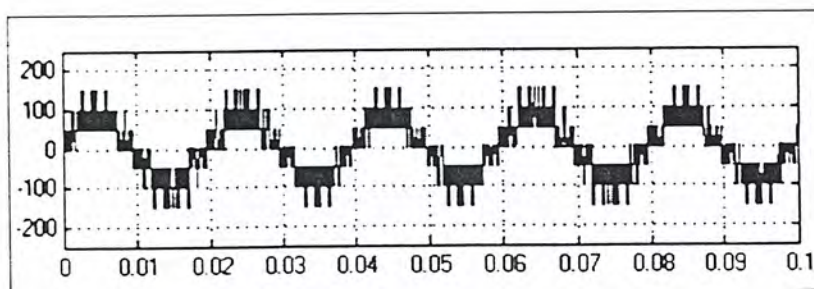
ต่อไปเป็นการแสดงค่าแรงดันขาออก ( $V_{Lrms}$ ) ที่ได้จากการจำลองใน Matlab/simulink ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ตั้งแต่ 0.4 - 1.0

มอดูเลชันอินเด็กซ์ = 0.4



(ก)

มอดูเลชันอินเด็กซ์ = 0.5

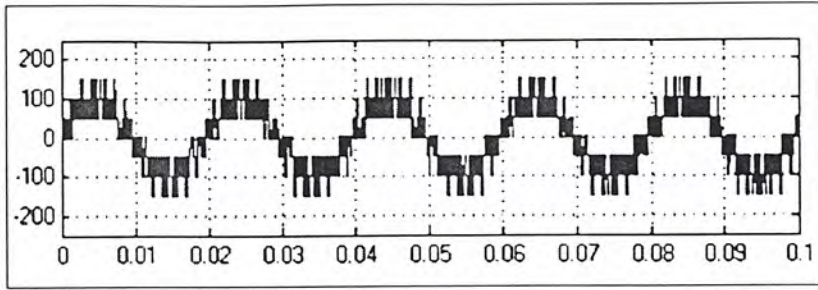


(ข)

รูปที่ 4.5 แรงดันขาออก ที่มอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ

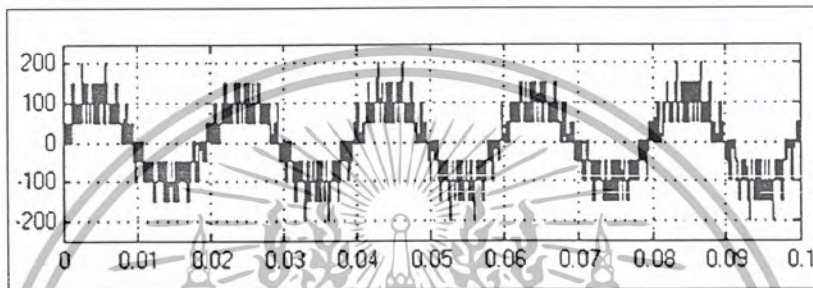
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.6



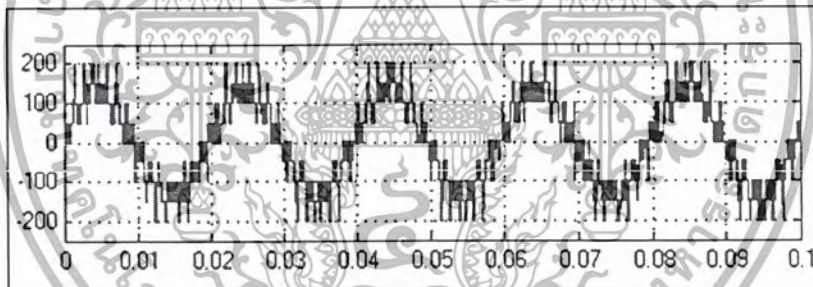
(ก)

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.7



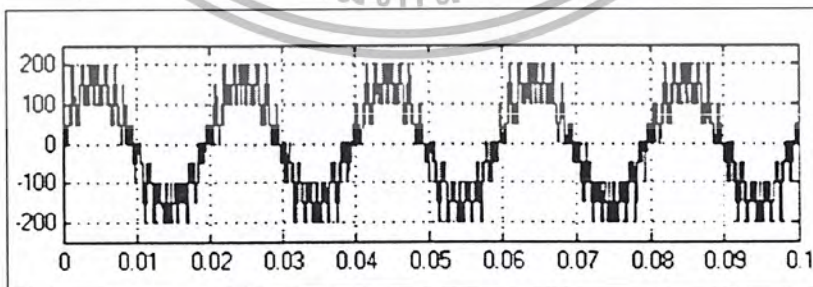
(ข)

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.8



(ค)

มอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.9

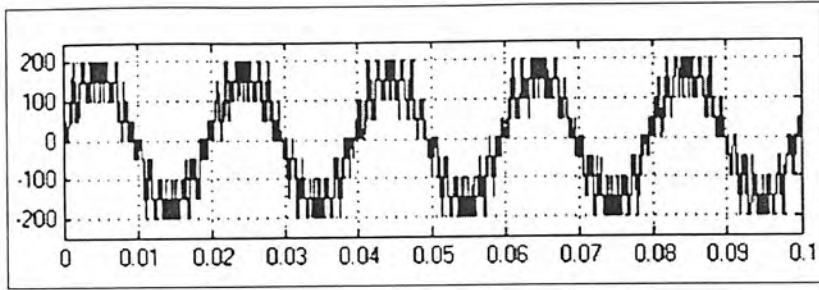


(ง)

รูปที่ 4.5 แรงดันขาออก ที่มีมอดูลชันอินเด็กซ์ต่างๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูเลชันอินเด็กซ์ = 1.0



(ช)

รูปที่ 4.5 แรงดันขาออก ที่มอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ (ต่อ)

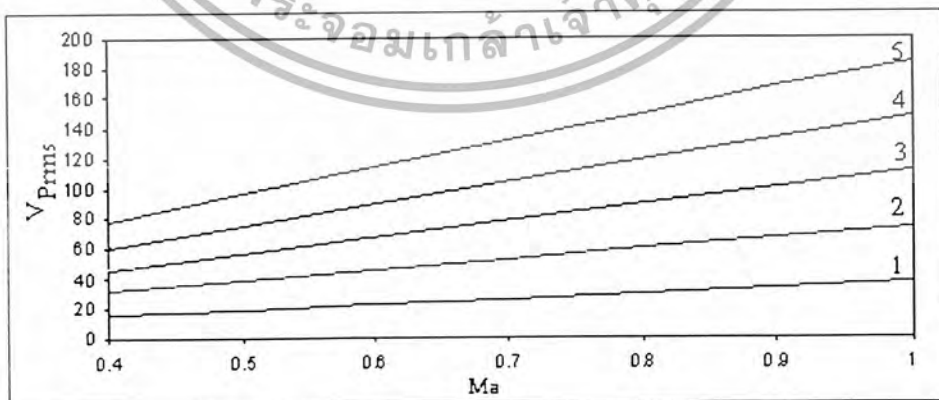
#### 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับแรงดันตัวเก็บประจุคอมมอนดีซีลิงค์

จำลองวงจรโดยเปลี่ยนค่าแหล่งจ่ายกระแสตรงวงนอกสุดตั้งแต่ 100 โวลต์ จนถึง 500 โวลต์ (แหล่งจ่ายกระแสตรงวงในลดลงเป็นสัดส่วน) ซึ่งได้ผลของแรงดันขาออกโดยทำการวัดเป็นค่าแรงดันเฟสอาร์เอ็มเอส ( $V_{Prms}$ ) ได้ผลการจำลอง ดังนี้

$M_a$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
100	15.65	19.32	22.8	26.17	29.88	33.54	36.89
200	31.29	38.64	45.59	52.32	59.76	67.09	73.78
300	46.94	57.97	68.39	78.49	89.64	100.6	110.7
400	62.58	77.29	91.19	104.6	119.5	134.2	147.8
500	78.23	96.61	114	130.8	149.4	167.7	184.5

ตารางที่ 4.2 แรงดันขาออกที่มอดูเลชันอินเด็กซ์ และ แรงดันตัวเก็บประจุต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.2 นำไปพล็อตกราฟได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกกับมอดูเลชันอินเด็กซ์

(1: ที่  $V_{dc} = 100$  V, 2: ที่  $V_{dc} = 200$  V, 3: ที่  $V_{dc} = 300$  V, 4: ที่  $V_{dc} = 400$  V, 5: ที่  $V_{dc} = 500$  V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นหาสมการของเส้นกราฟแต่ละเส้นได้ดังนี้

$$\text{ที่ } V_{dc} = 100 \text{ Volt (เส้นที่ 1) ได้สมการคือ } V_{Prms} = 35.46 m_a + 1.468 \quad (4.1)$$

$$\text{ที่ } V_{dc} = 200 \text{ Volt (เส้นที่ 2) ได้สมการคือ } V_{Prms} = 70.94 m_a + 2.9153 \quad (4.2)$$

$$\text{ที่ } V_{dc} = 300 \text{ Volt (เส้นที่ 3) ได้สมการคือ } V_{Prms} = 106.39 m_a + 4.392 \quad (4.3)$$

$$\text{ที่ } V_{dc} = 400 \text{ Volt (เส้นที่ 4) ได้สมการคือ } V_{Prms} = 142.13 m_a + 5.6873 \quad (4.4)$$

$$\text{ที่ } V_{dc} = 500 \text{ Volt (เส้นที่ 5) ได้สมการคือ } V_{Prms} = 177.36 m_a + 7.288 \quad (4.5)$$

จากทั้ง 5 สมการ หาสมการรวมได้ดังนี้

$$V_{Prms} = (0.35515 m_a + 0.0014538)V_{dc} \quad (4.6)$$

#### 4.3 ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของอินเวอร์เตอร์เมื่อเปลี่ยนจากแหล่งจ่ายกระแสตรงเป็นตัวเก็บประจุ

ทำการจำลอง โดยเปลี่ยนจากแหล่งจ่ายกระแสตรงเป็นตัวเก็บประจุโดยที่คอมมอนดีซีลิงค์ยังเป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงอยู่เพื่อให้ระดับแรงดันคงที่ และทำการอัดประจุให้ตัวเก็บประจุแต่ละตัว ให้มีแรงดันตามที่ต้องการ โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสตรงที่หาคัดแทนแรงดันที่ต้องการ จ่ายให้โดยตรงและตัดแหล่งจ่ายกระแสตรงออกหลังจากอัดประจุเสร็จ ทำการจำลองโดยพิจารณาในทำนองเดียวกับการจำลองในเบื้องต้นที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงทั้งหมด เพื่อหาค่ามอดูเลชันเฟสที่เหมาะสมในการสร้างสัญญาณควบคุมขาเกทของ IGBT เพื่อให้ได้ค่าของแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ดี โดยพิจารณาจากค่า % THD ของแรงดันขาออกและสิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มจากการจำลองในเบื้องต้นที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงทั้งหมด คือ ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัวมีอิมพีแดนซ์ทำงาน

โดยวงจรที่จำลองวางรอกำหนดค่าแหล่งจ่ายกระแสตรงที่ 800 โวลต์ ตัวเก็บประจุมีระดับแรงดัน 600 400 และ 200 โวลต์ ความถี่คัท และเปลี่ยนค่ามอดูเลชันเฟสตั้งแต่ 45 องศาจนถึง 115 องศา และ ค่านมอดูเลชันอินดิเคซ์ ตั้งแต่ 0.4-1.0 ซึ่งได้ผลการจำลองดังนี้

มอดู	45		50		55		60		65	
$m_a$	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD
0.4	217.1	5.17	217	4.13	217.6	4.24	212.4	11.62	222.9	18.4
0.5	264.6	4.65	262.5	3.83	263.8	3.94	265.2	8.54	270.1	13.68
0.6	313.1	3.88	311.8	3.37	312.5	3.75	314.9	6.81	318.1	10.16
0.7	362.6	3.4	359.7	2.98	360	3.21	362.3	5.86	363.2	8.85
0.8	413	3.02	412	2.67	412.4	2.61	411.2	5.39	410.1	8.11
0.9	466.4	2.38	467.5	2.31	464.2	2.32	460.4	4.1	457.4	6.06
1	520.6	1.97	515.2	2.08	512.9	2.09	508.1	3.26	505.4	4.03

ตารางที่ 4.3 ผลของแรงดันขาออกและค่า % THD ที่มอดูเลชันเฟสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

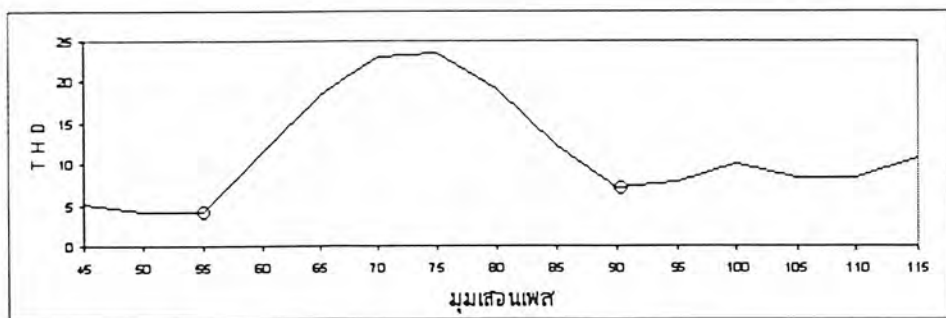
มุม	70		75		80		85		90	
$m_a$	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD
0.4	234.5	23	241.1	23.49	249.2	19.19	251.9	12.19	242.9	7.03
0.5	273	16.89	268.7	17.06	268.5	13.52	264.7	7.99	262.4	3.21
0.6	317	12.26	312	12.33	307.2	9.55	303.5	5.58	301.4	1.78
0.7	316.9	10.79	362.2	10.8	359.6	8.32	355.8	4.98	353.9	2.11
0.8	410.4	9.88	410.4	9.86	408.3	7.67	408.8	4.74	407	2.74
0.9	457.4	7.28	456	7.14	456.4	5.75	457.6	3.77	457.1	2.64
1	503.1	4.98	501.5	5.03	502.6	4.14	504.4	2.92	505.5	2.32

มุม	95		100		105		110		115	
$m_a$	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD	Vrms	%THD
0.4	254.4	7.77	248.7	10.12	238.6	8.26	232	8.33	231.8	10.84
0.5	263.2	4.62	268.6	6.11	275.4	6.99	281.8	8.4	289.6	10.91
0.6	305.5	3.22	313	5.18	321.7	6.3	331.3	7.97	344.5	10.33
0.7	345.5	3.3	359.8	4.62	366.8	5.77	376.1	7.04	386.6	8.67
0.8	407.6	3.45	410.7	4.4	414.2	4.78	419.9	5.91	427.3	7.45
0.9	457.3	3.04	460.8	3.61	461.2	4.05	463.3	4.73	469.7	5.96
1	503.8	2.52	503.7	2.97	504.8	3.5	507.3	3.68	512.5	4.85

ตารางที่ 4.3 ผลของแรงดันขาออกและค่า % THD ที่มุมเลื่อนเฟสต่างๆ (ต่อ)

จากนั้นนำค่า % THD กับมุมเลื่อนเฟส ที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ มาพล็อตกราฟได้ดังนี้

ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ = 0.4

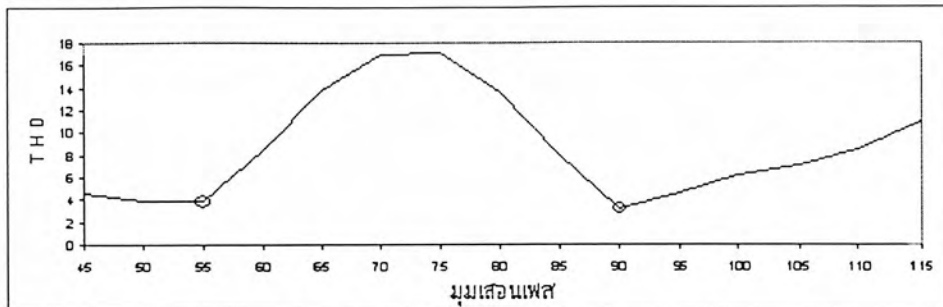


(ก)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % THD กับมุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ

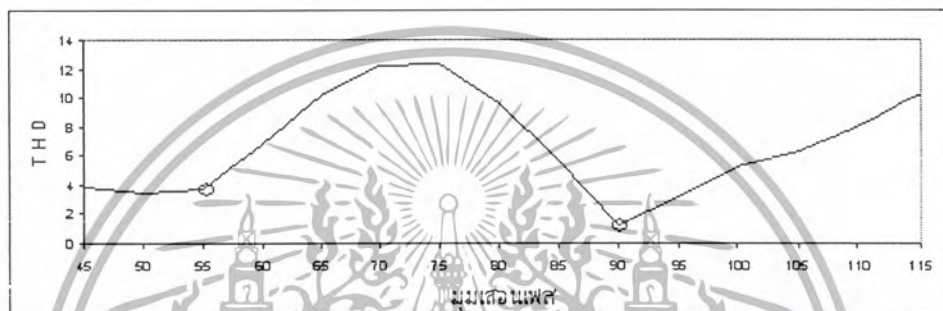
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ามอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.5



(ข)

ค่ามอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.6



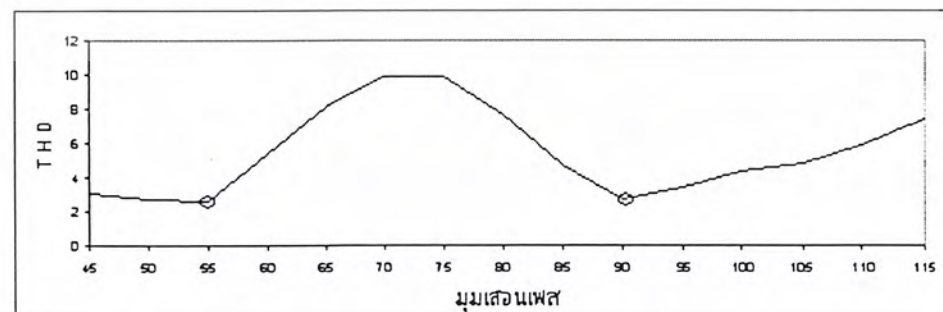
(ค)

ค่ามอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.7



(ง)

ค่ามอดูลชันอินเด็กซ์ = 0.8

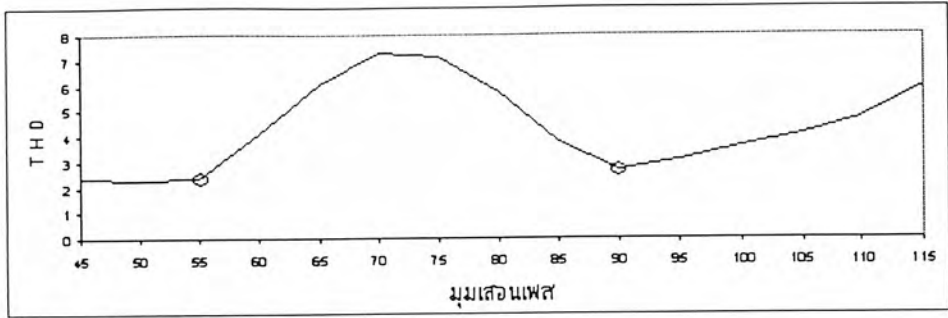


(จ)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % THD กับมุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูลชันอินเด็กซ์ต่างๆ (ต่อ)

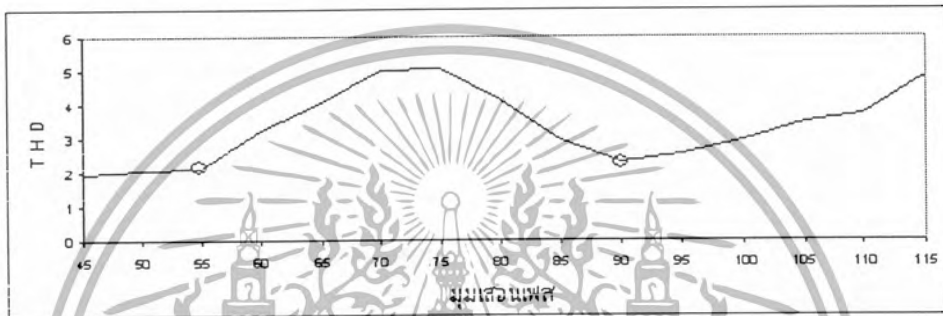
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ามอดูลเลขอินเด็กซ์ = 0.9



(ก)

ค่ามอดูลเลขอินเด็กซ์ = 1.0

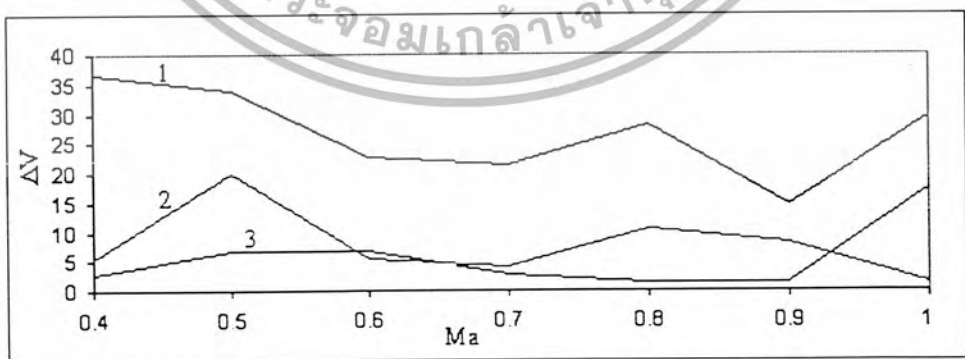


(ข)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า % THD กับมุมเลื่อนเฟสที่ค่ามอดูลเลขอินเด็กซ์ต่างๆ (ต่อ)

จะเห็นว่ามุมที่ทำให้ค่า % THD ค่า จะมีอยู่ 2 มุม คือ มุม 55 องศา และมุม 90 องศา ต่อมาพิจารณาเพิ่มค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุลงที่ ซึ่งจะเปรียบเทียบโดยมองเป็นค่าของผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมกับค่าแรงดันอ้างอิงที่ระดับนั้นๆ ได้ผลดังนี้

มุมเลื่อนเฟส 45 องศา

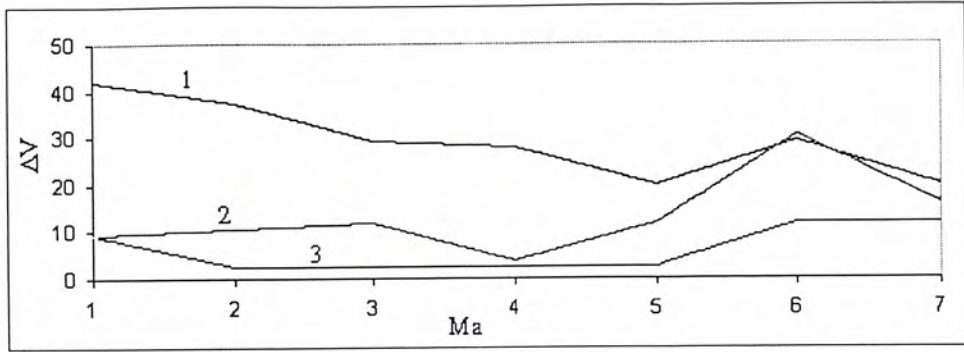


(ก)

รูปที่ 4.8 ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมกับค่าแรงดันอ้างอิง

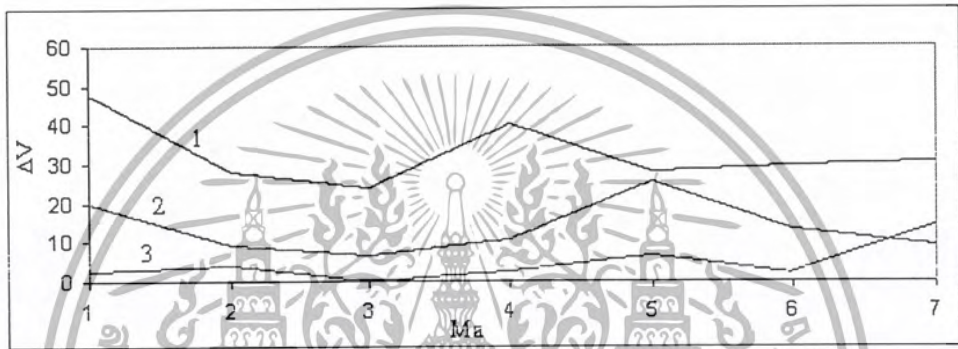
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเลื่อนเฟส 50 องศา



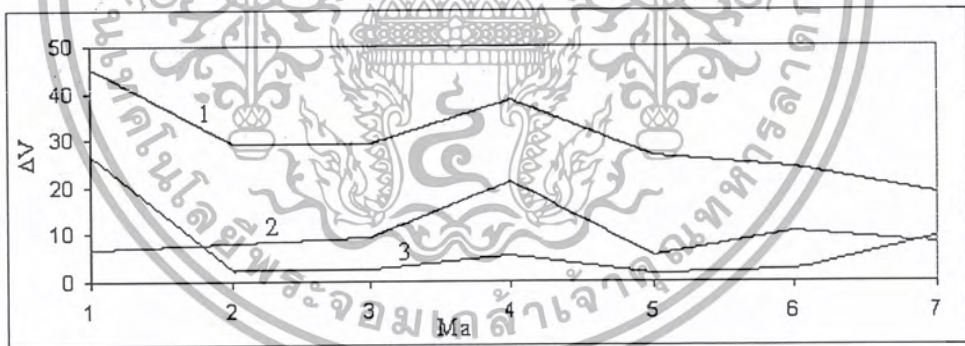
(ข)

มุมเลื่อนเฟส 55 องศา



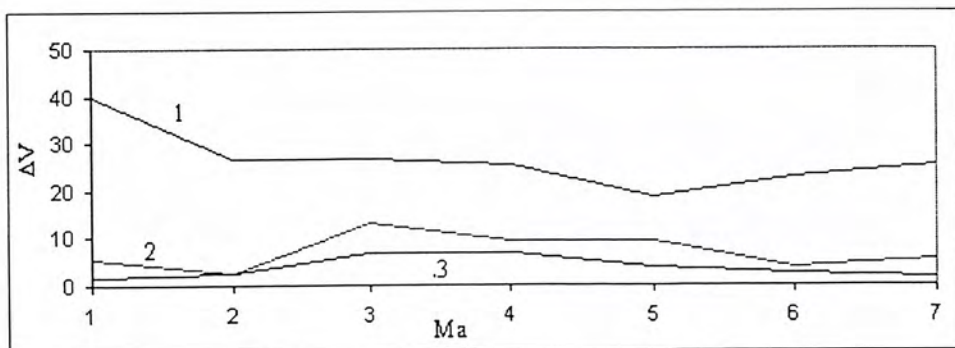
(ค)

มุมเลื่อนเฟส 60 องศา



(ง)

มุมเลื่อนเฟส 65 องศา

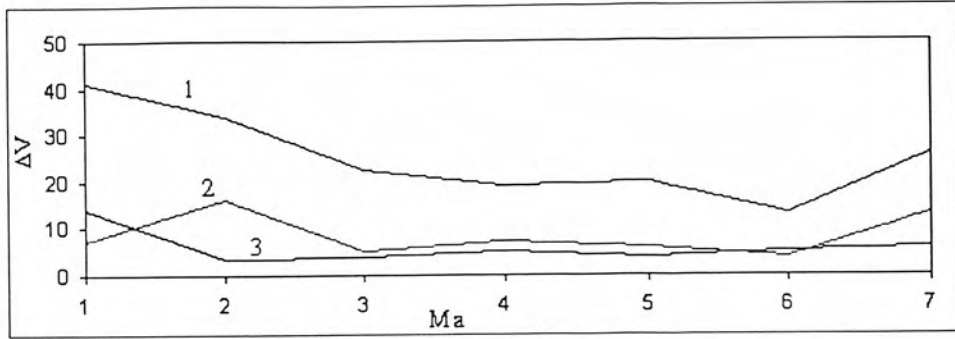


(จ)

รูปที่ 4.8 ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมกับค่าแรงดันอ้างอิง (ต่อ)

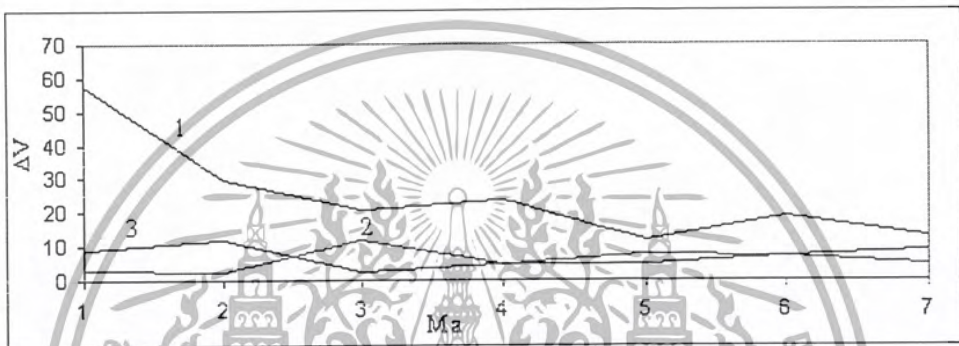
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเลื่อนเฟส 70 องศา



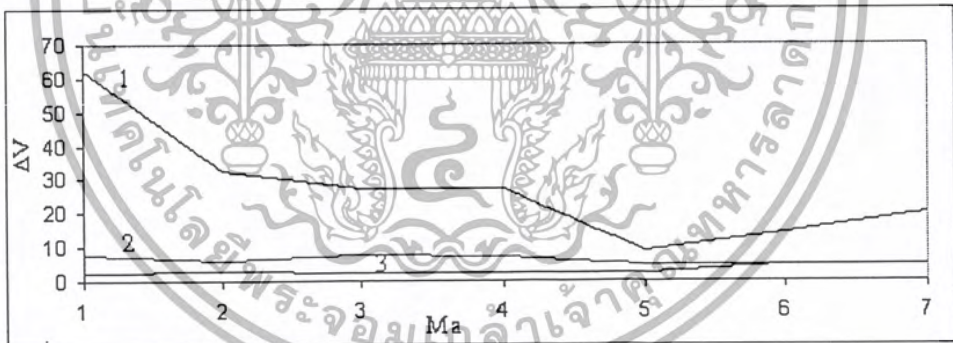
(ก)

มุมเลื่อนเฟส 75 องศา



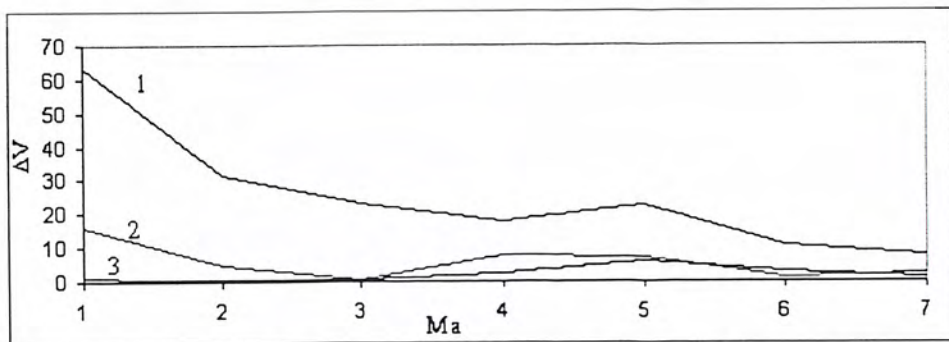
(ข)

มุมเลื่อนเฟส 80 องศา



(ค)

มุมเลื่อนเฟส 85 องศา

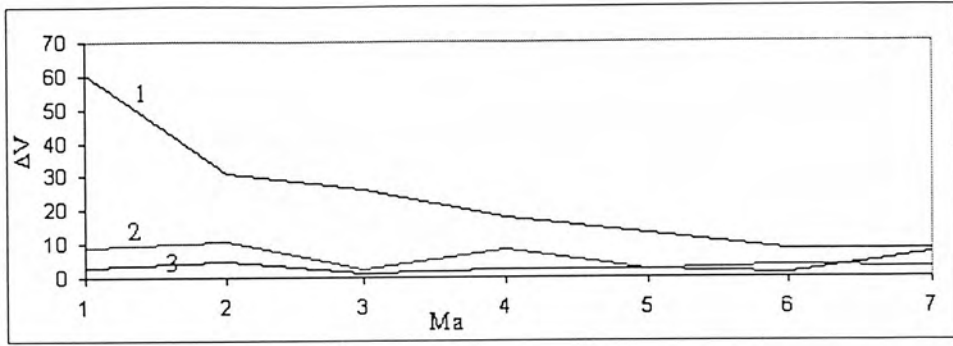


(ง)

รูปที่ 4.8 ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมกับค่าแรงดันอ้างอิง (ต่อ)

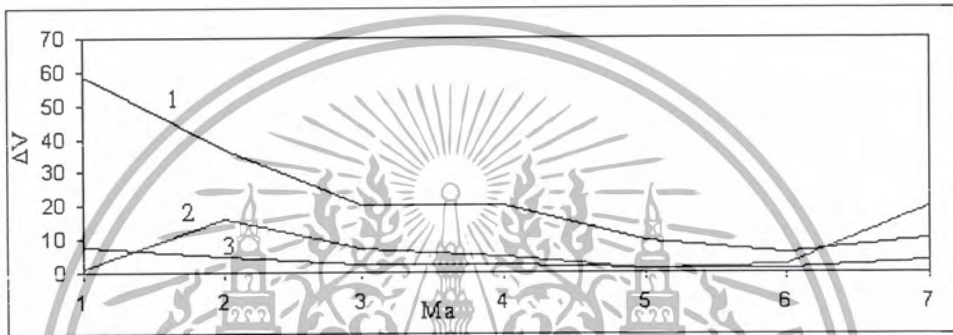
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเลื่อนเฟส 90 องศา



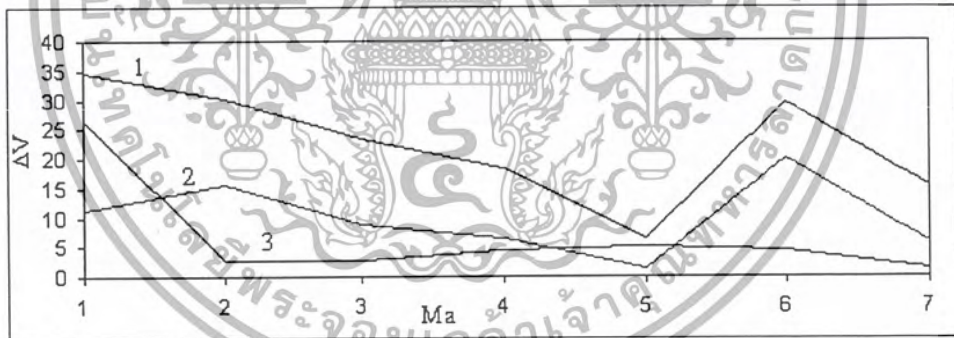
(ก)

มุมเลื่อนเฟส 95 องศา



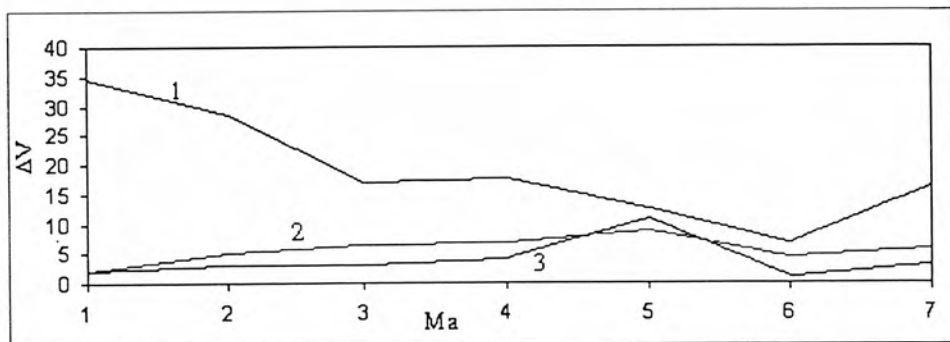
(ข)

มุมเลื่อนเฟส 100 องศา



(ค)

มุมเลื่อนเฟส 105 องศา

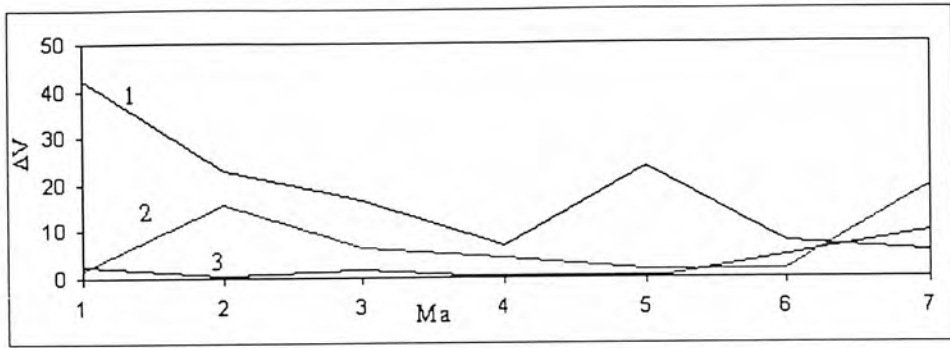


(ง)

รูปที่ 4.8 ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมกับค่าแรงดันอ้างอิง (ต่อ)

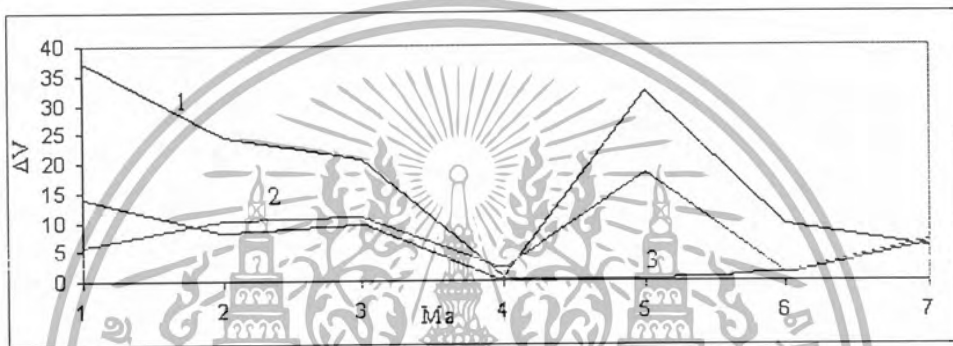
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมเลื่อนเฟส 100 องศา



(ก)

มุมเลื่อนเฟส 115 องศา



(ข)

รูปที่ 4.8 ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่มีระดับแรงดันอ้างอิง (ต่อ)

เส้นที่ 1: ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่มีระดับแรงดัน 600 โวลต์

เส้นที่ 2: ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่มีระดับแรงดัน 400 โวลต์

เส้นที่ 3: ผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่มีระดับแรงดัน 200 โวลต์

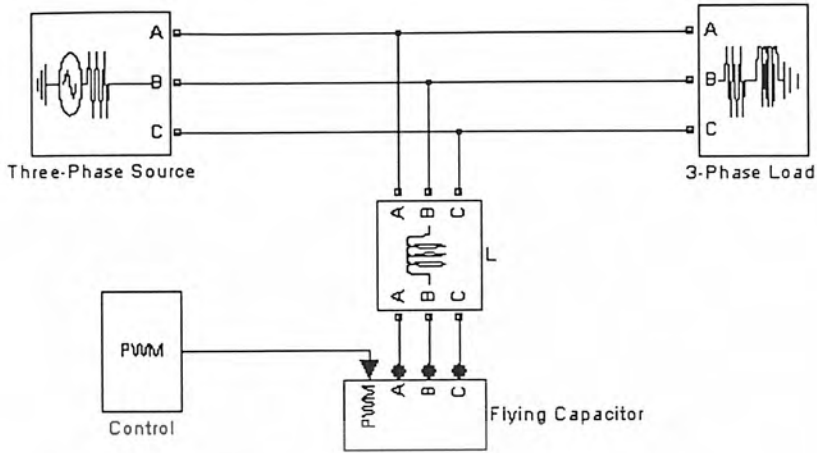
เมื่อพิจารณาผลของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุร่วมกับค่า % THD เห็นว่าควรเลือกใช้มุมเลื่อนเฟสเท่ากับ 90 องศา

#### 4.4 การนำอินเวอร์เตอร์มาปรับปรุ้งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

จากหลักการการปรับปรุ้งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้กล่าวมา คือ การควบคุมให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับภาระทางไฟฟ้าแทนระบบ โดยในการจำลองมีขอบเขตการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากที่สุด 10 kVAR

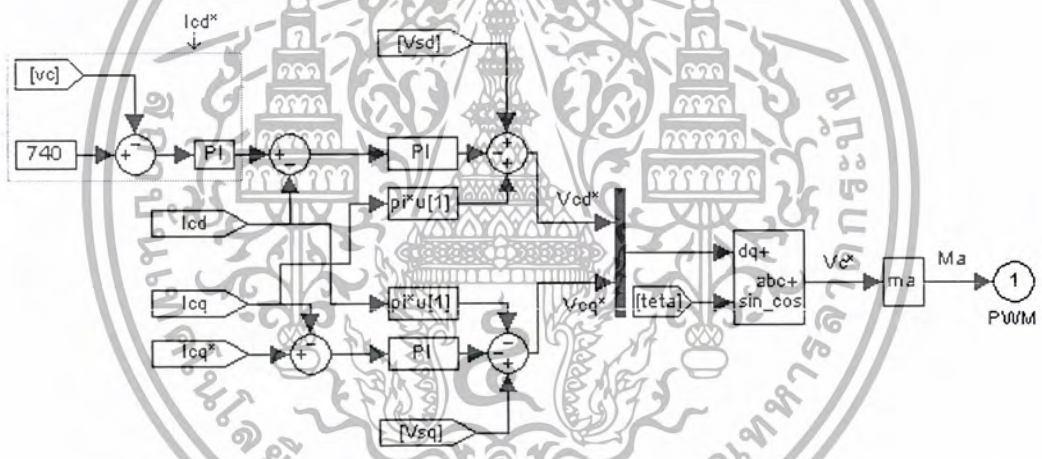
การนำอินเวอร์เตอร์ไปเชื่อมต่อกับระบบโดยทำการชดเชยแบบอัตโนมัติแสดงดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การนำอินเวอร์เตอร์ไปเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.9 วงจรที่ต้องสร้างเพิ่มเติม คือ ส่วนของวงจรควบคุม โดยแสดงรูปวงจรควบคุมดังนี้



รูปที่ 4.10 วงจรควบคุม

วงจรการควบคุมแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ควบคุมการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้ระบบ และควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุวงนอกสุดให้คงที่ โดยอธิบายหลักการควบคุมไว้ข้างต้น จากวงจรควบคุมต้องหาสมการความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดันขาออกกับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ เพื่อแปลงจากค่า  $V_c^*$  ที่ได้จากจากรูปวงจรควบคุมให้เป็นค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ที่ต้องการ เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้สร้างแรงดันขาออกตามที่ต้องการ

ทำการจำลองโดยการปรับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆและวัดค่าแรงดันขาออกเพื่อหาความสัมพันธ์

Ma	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
V <sub>c</sub>	150.4	165.6	185.8	205.7	222.8	241.1	260.9	277.4	303.9
Ma	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5
V <sub>c</sub>	315.2	332.3	352.7	368.5	383.2	392.7	402.7	408.9	415.6

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขาออกกับค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ต่างๆ

Ma คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณชายน์ (สัญญาณอ้างอิง)

V<sub>c</sub> คือ แรงดัน Fundamental ของอินเวอร์เตอร์

จากตารางนำไปหาสมการได้ดังนี้

$$Ma = \frac{V + 0.32222}{37.0888}$$

(4.7)

ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการจำลองแสดงได้ดังนี้

แรงดันระบบ	380 V <sub>L-L</sub>
พิกัดชดเชยสูงสุด	10 kVAR, 15 A
แรงดันคอมมอนดีซีลิงค์	740 V ± 10%
ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ	10 mH
ตัวเก็บประจุ	500 μF
ความถี่การสวิตชิง	750 Hz

ตารางที่ 4.5 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการจำลอง การนำอินเวอร์เตอร์ไปเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้า

โดยแบ่งการจำลองออกเป็น

1. แทนตัวเก็บประจุคอมมอนดีซีลิงค์ด้วยแหล่งจ่ายกระแสตรง และใช้แหล่งจ่ายกระแสตรงเป็นตัวอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ

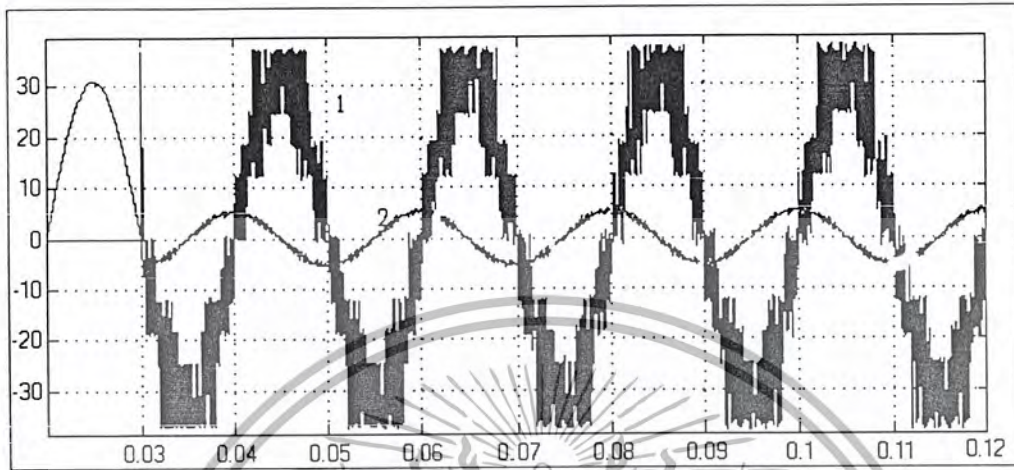
ในส่วนของวงจรควบคุมจะมีเฉพาะส่วนควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเท่านั้น เนื่องจากแรงดันคอมมอนดีซีลิงค์ เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงจึงทำให้มีแรงดันคงที่เสมอ จึงกำหนดให้ค่ากระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน d เท่ากับศูนย์ ทำการจำลองโดยเปลี่ยนค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ โดยเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของภาระทางไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบนำหน้า และ แบบล้าหลัง ในส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงจะไม่มีผลต่อการจำลอง เพราะอินเวอร์เตอร์สามารถชดเชยเฉพาะกำลังไฟฟ้าเสมือนเท่านั้น จึงกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงมีค่าคงที่ คือ 5,000 วัตต์ แสดงผลการจำลองเป็น 3 รูป คือ 1)

แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์และกระแสของอินเวอร์เตอร์ 2) แรงดันและกระแสของระบบ กระแสของ

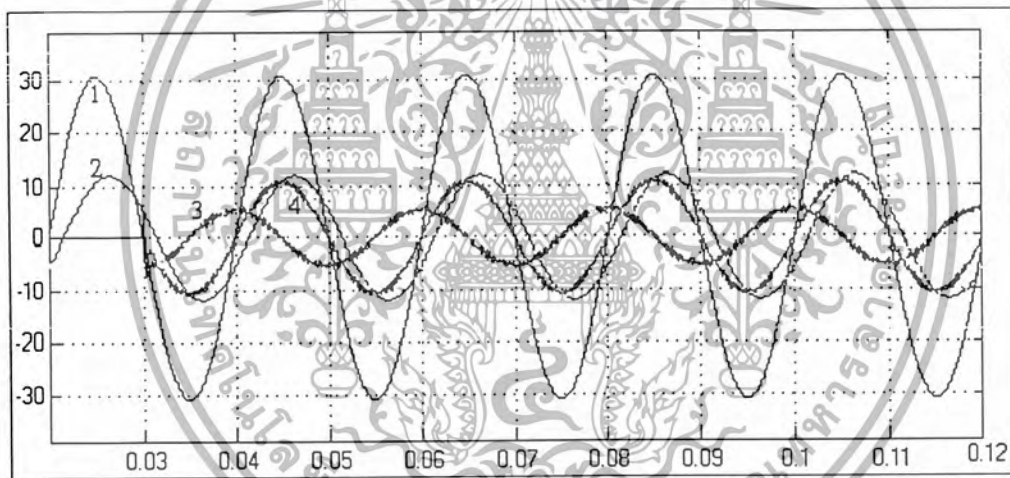
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์เตอร์ และกระแสของภาระทางไฟฟ้า 3) กระแสอ้างอิงและกระแสของอินเวอร์เตอร์ในระบบแกน d-q ดังนี้

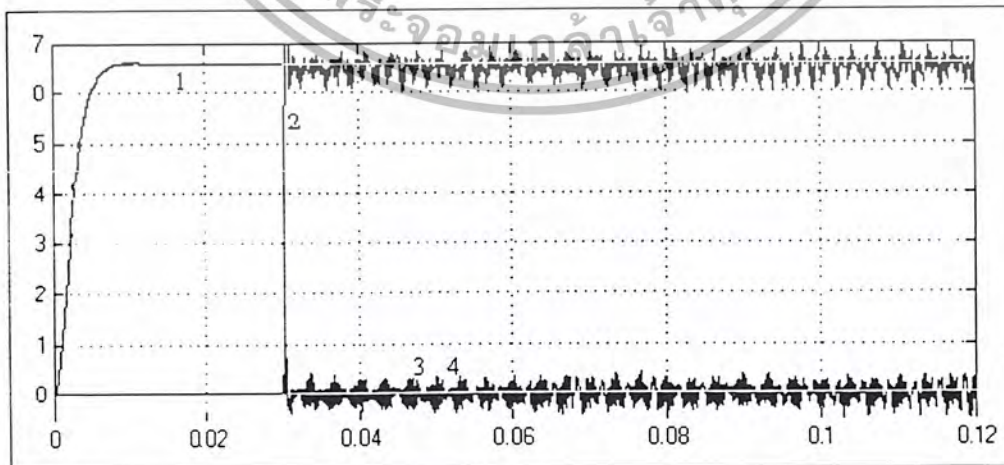
ที่ภาระทางไฟฟ้าแบบล้าหลัง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (QL) 2,500 VAR



(1 ก)



(1 ข)

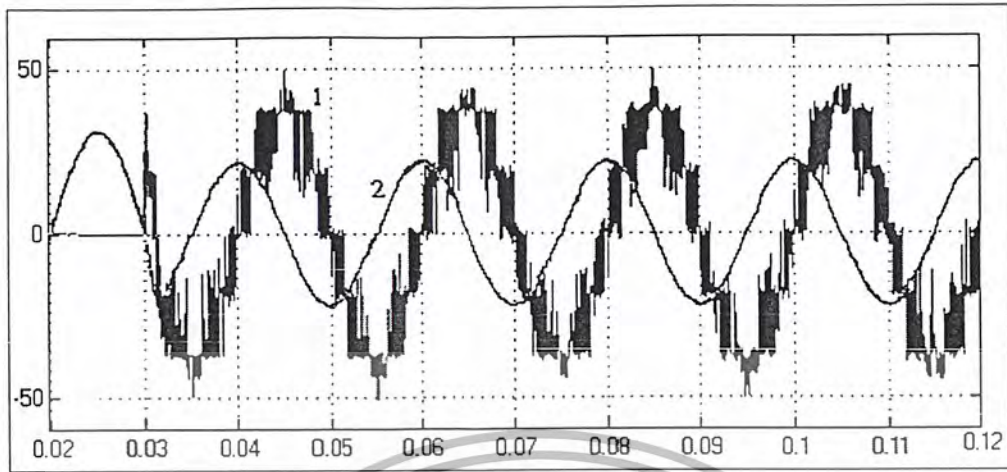


(1 ค)

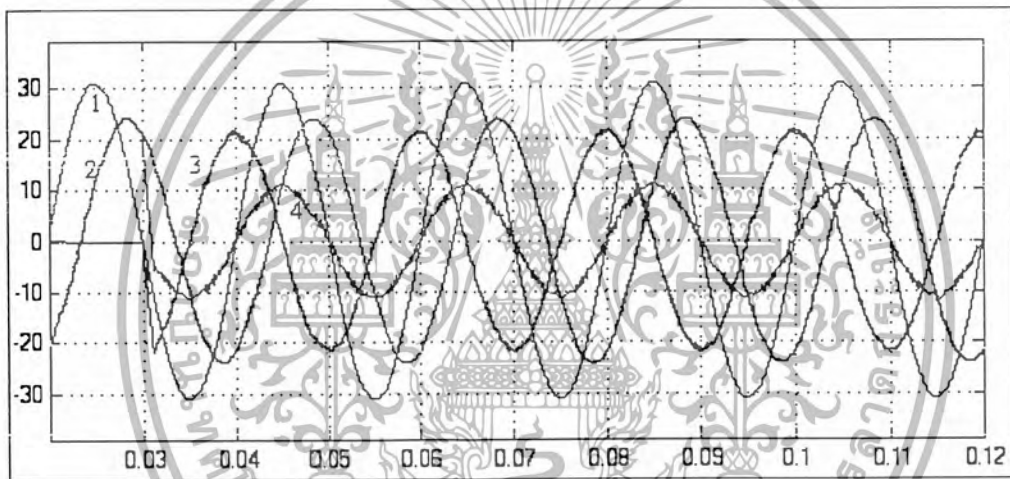
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

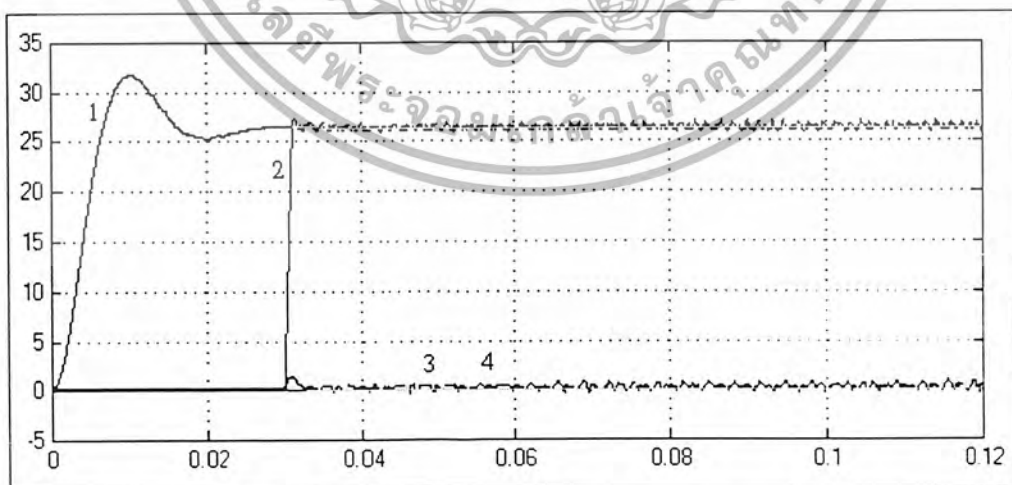
ที่ภาระทางไฟฟ้า แบบล้าหลัง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (QL) 10,000 VAR



(2 ก)



(2 ข)

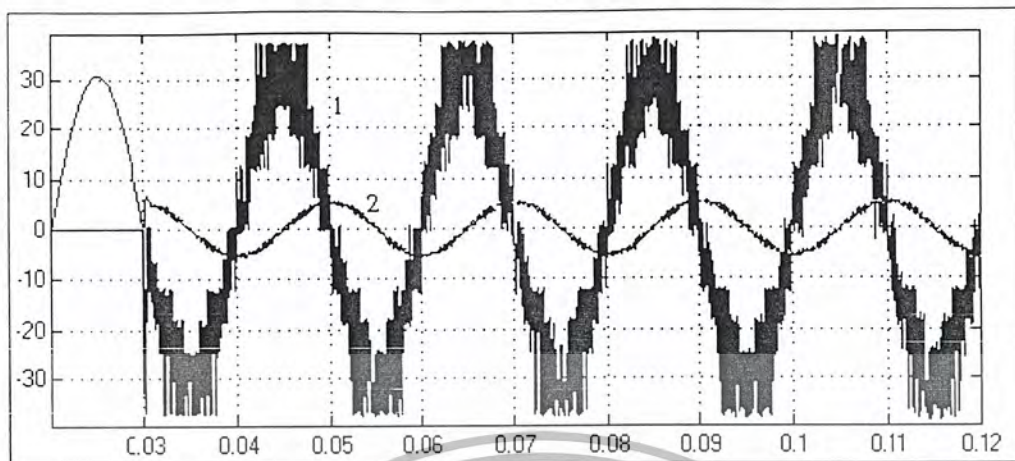


(2 ค)

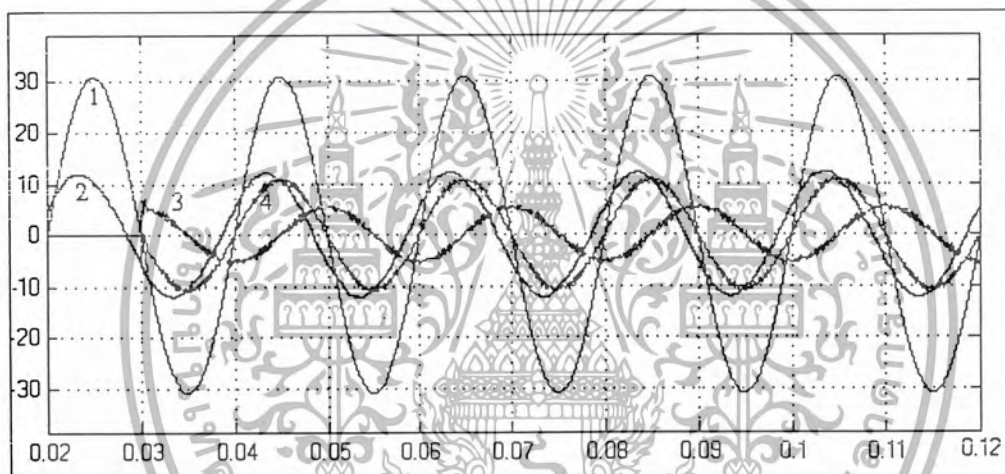
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

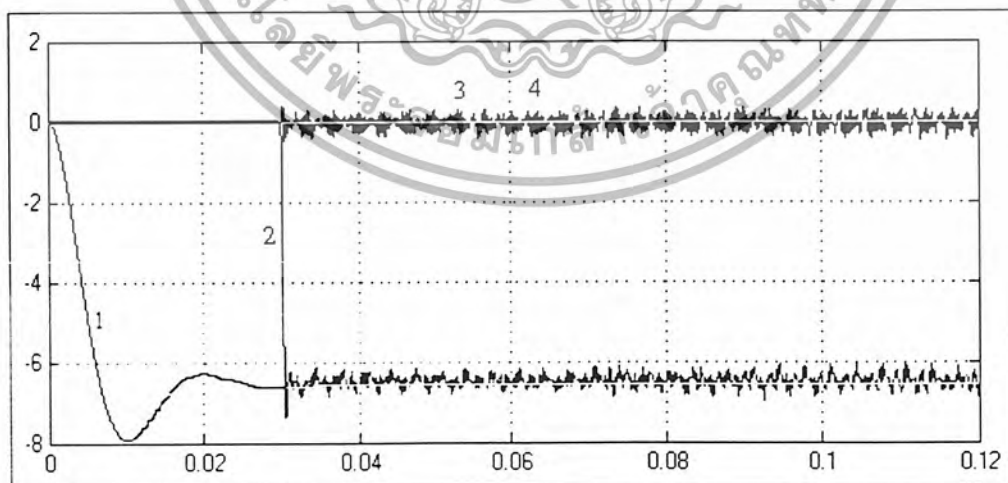
ที่ภาระทางไฟฟ้า แบบนำหน้า กำลังไฟรีแอกทีฟ (QC) 2,500 VAR



(3 ก)



(3 ข)

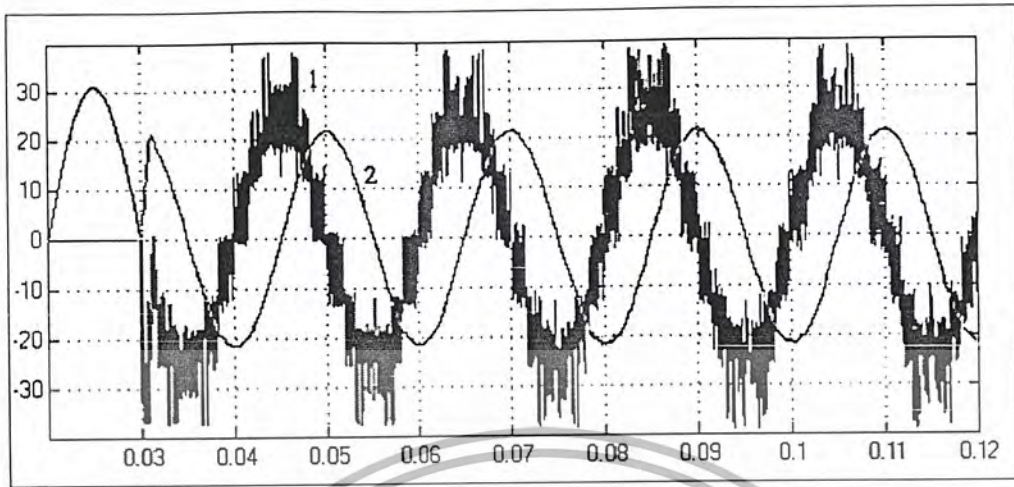


(3 ค)

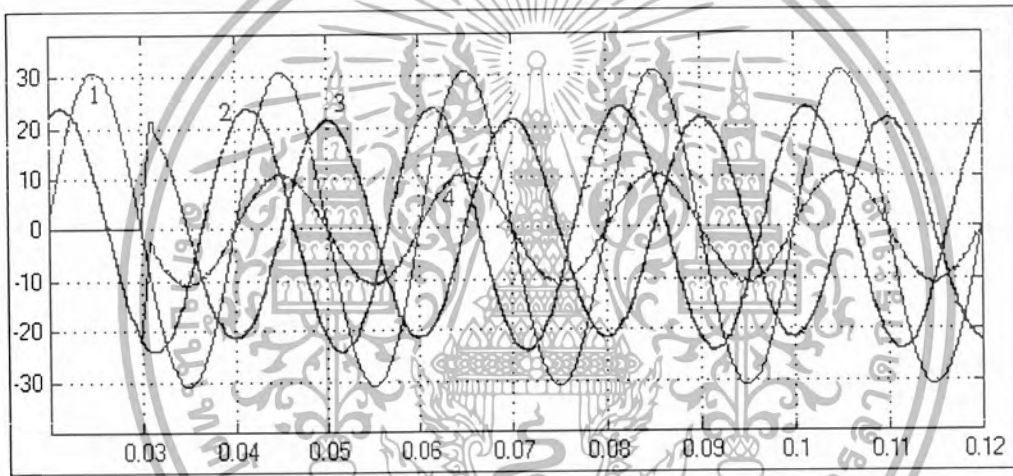
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

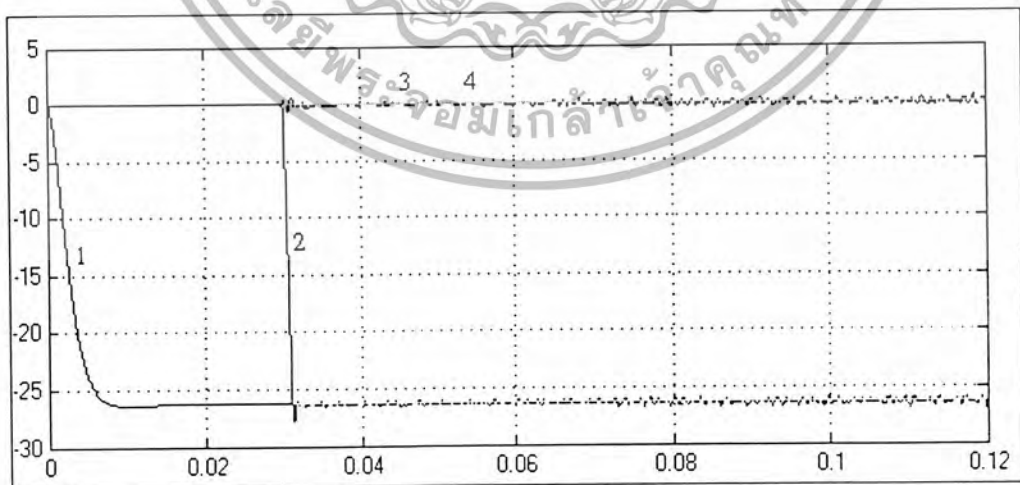
ที่ภาระทางไฟฟ้าแบบน้ำหนัก กำลังไฟรีแอกทีฟ (QC) 10,000 VAR



(4 ก)



(4 ข)



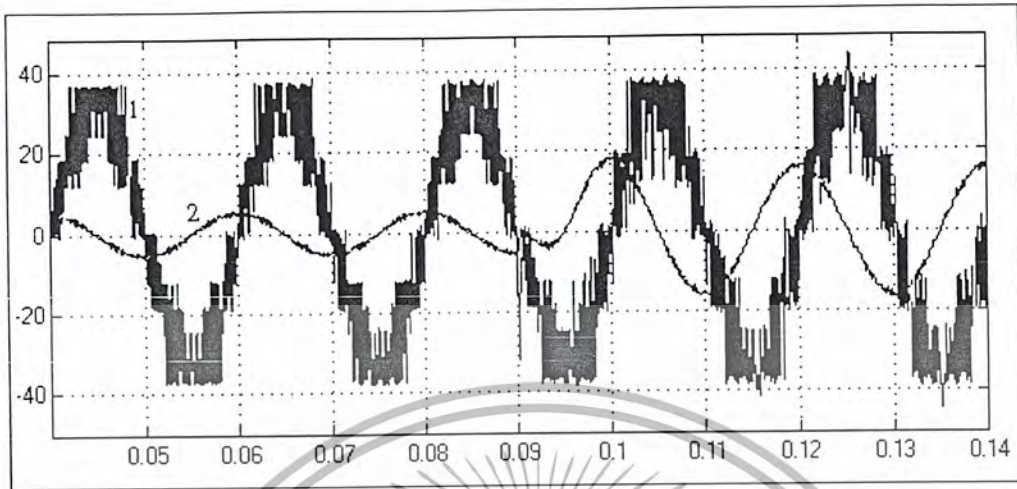
(4 ค)

รูปที่ 4.11 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ (ต่อ)

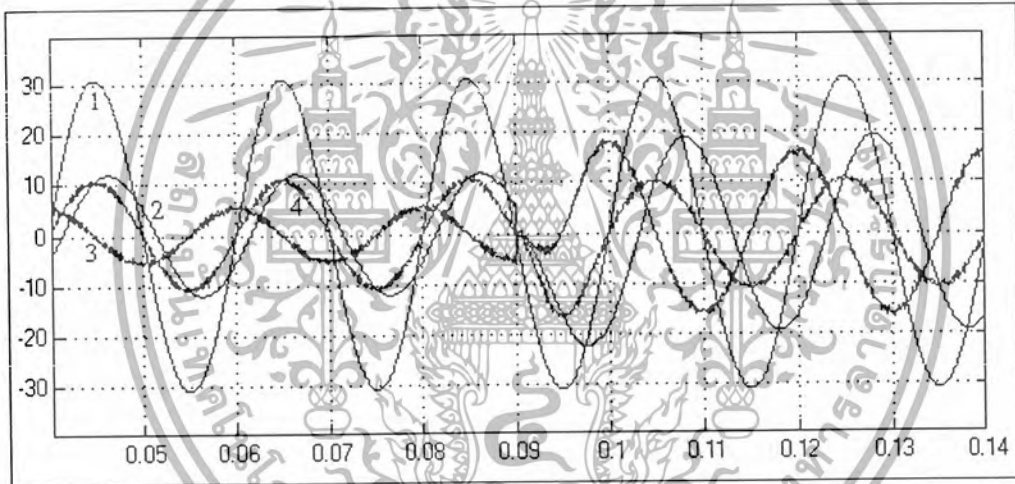
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า

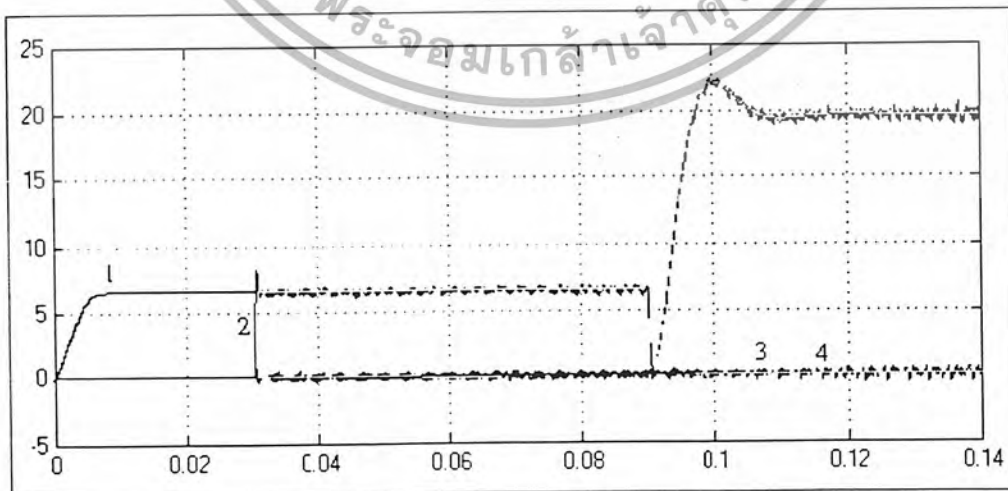
จากแบบจำลอง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (QL) 2,500 VAR เป็น (QL) 7,500VAR



(5 ก)



(5 ข)

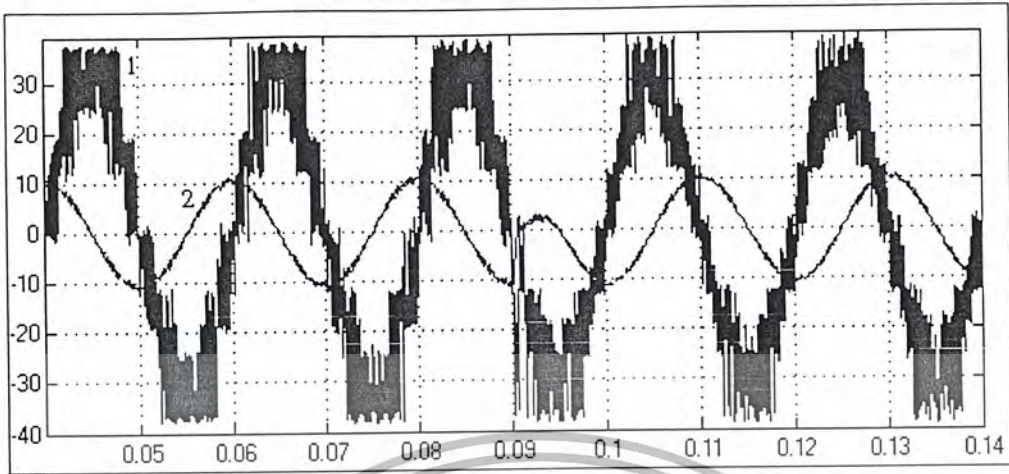


(5 ค)

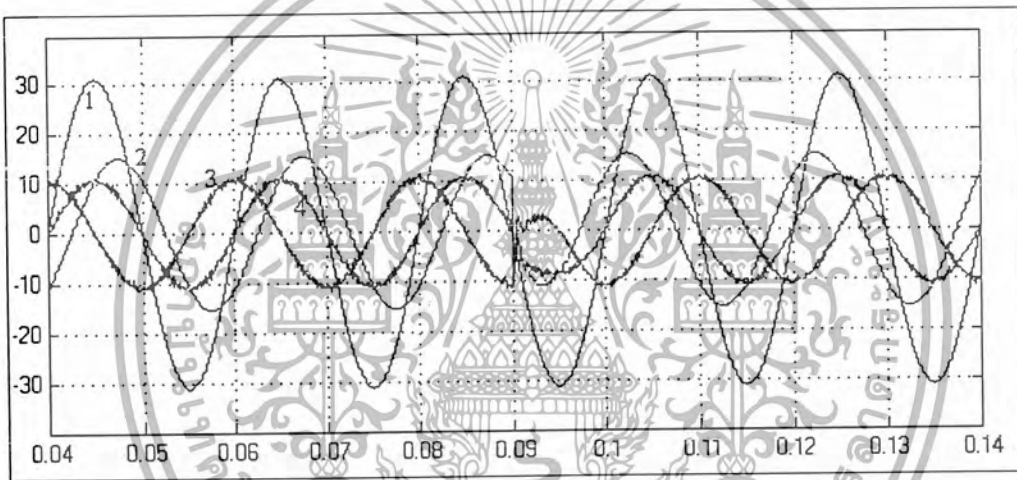
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

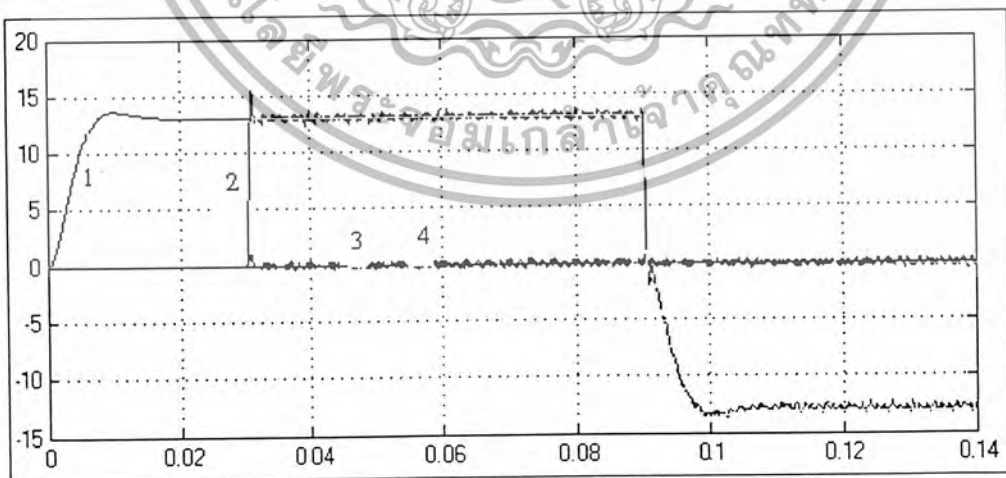
จากแบบล้าหลังเป็นแบบนำหน้ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (QL) 5,000VAR เป็น (QC) 5,000VAR



(6 ก)



(6 ข)



(6 ค)

รูปที่ 4.11 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก: เส้นที่ 1 = แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (ค่าที่แสดงผลเป็นค่าที่มีการคูณลดด้วย 0.1)  
เส้นที่ 2 = กระแสของอินเวอร์เตอร์
- ข: เส้นที่ 1 = แรงดันระบบ (ค่าที่แสดงผลเป็นค่าที่มีการคูณลดด้วย 0.1)  
เส้นที่ 2 = กระแสภาระทางไฟฟ้า  
เส้นที่ 3 = กระแสอินเวอร์เตอร์  
เส้นที่ 4 = กระแสระบบ
- ค: เส้นที่ 1 = กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน q (อ้างอิง)  
เส้นที่ 2 = กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน q  
เส้นที่ 3 = กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน d (อ้างอิง)  
เส้นที่ 4 = กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน d

จากผลการจำลองในรูปชุด ก จะแสดงให้เห็นว่า กระแสและแรงดันของอินเวอร์เตอร์จะมีมุมต่างเฟส 90 องศา ทั้งนี้จะเป็นแบบนำหน้าหรือล่าหลังขึ้นอยู่กับว่าใช้ในการชดเชยภาระไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเป็นแบบใด ถ้ามีกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบล้าหลังกระแสจะนำหน้าแรงดัน ในทางตรงข้ามถ้ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบนำหน้ากระแสจะตามหลังแรงดัน

ในรูปชุด ข ช่วงเวลาดำเนินการ 0.03 วินาที เป็นเวลาที่อินเวอร์เตอร์ยังไม่ได้ทำงานจะเห็นว่า กระแสของระบบและภาระทางไฟฟ้าเป็นเส้นเดียวกัน แต่เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานกระแสระบบจะแตกต่างจากกระแสภาระทางไฟฟ้า คือ เป็นกระแสที่ต้องควบคุมให้มีเฟสเดียวกันกับแรงดันระบบ โดยการสร้างกระแสอินเวอร์เตอร์หรือกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้ได้ตามที่ภาระต้องการ จะเห็นว่ากระแสระบบจะมีเฟสเดียวกันกับระบบเกือบทันทีทันใด

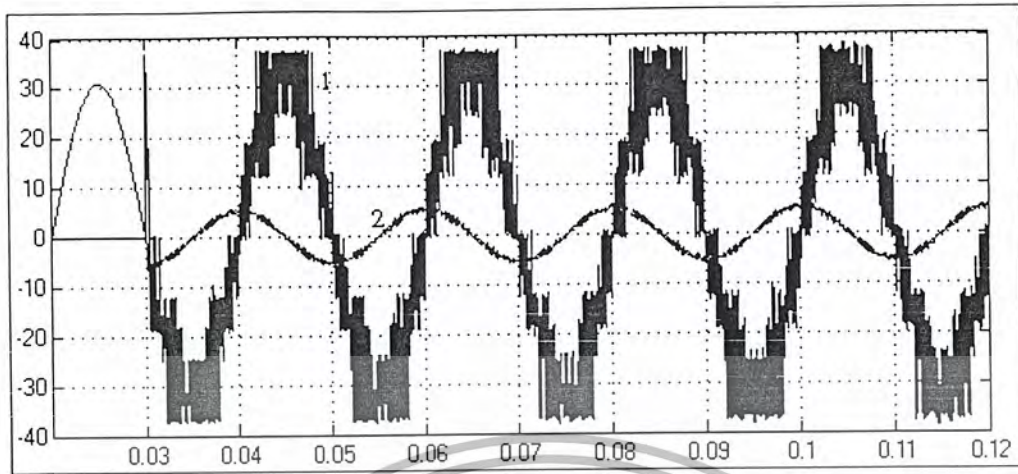
ในรูปชุด ค จะเป็นการแสดงการควบคุมในระบบแกน d-q ซึ่งจะช่วยให้สามารถพิจารณาถึงความมีประสิทธิภาพของการชดเชยกำลังไฟฟ้ ทั้งความเร็วและค่าของการชดเชย ซึ่งในส่วนนี้จะขึ้นกับการปรับค่า PI Controller ให้มีค่าที่เหมาะสม โดยค่าที่ใช้ คือ  $K_p$  เท่ากับ 60 และ  $K_i$  เท่ากับ 20 ของทั้งสองแกน ในช่วงแรกจะแสดงเฉพาะการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า จะสามารถตอบสนองต่อการเริ่มต้นวงจร โดยเฉลี่ยช่วงเวลาเกือบทันทีทันใดประมาณ 0.002 วินาที หรือประมาณ 1 ใน 10 ลูกคลื่น ต่อมาเมื่อพิจารณาพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า ก็จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าจะใช้เวลาเพิ่มขึ้น เป็น 0.02 วินาที หรือ 1 ลูกคลื่น

## 2. ใช้ตัวเก็บประจุทั้งหมด โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสตรงเป็นตัวอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ

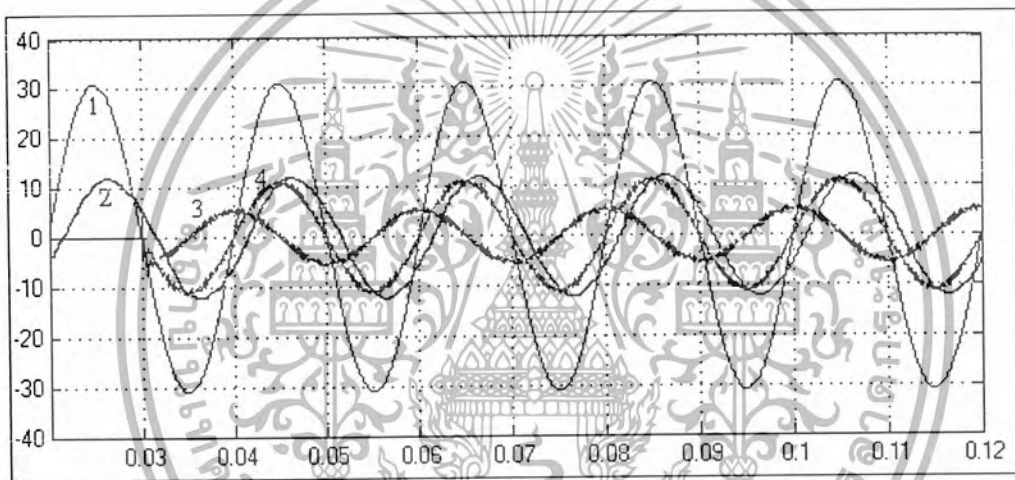
ในส่วนของการควบคุมต้องมีทั้งสองส่วน คือ ทั้งในส่วนการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และการรักษาระดับแรงดันคอมมอนดีซีลิงค์ โดยทำการจำลองในลักษณะการเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับการจำลองในข้อ 1 แต่มีการเก็บผลการจำลองเพิ่มเติมจากการจำลองข้างต้น คือ มีการแสดงค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุคอมมอนดีซีลิงค์ แสดงผลการจำลองได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

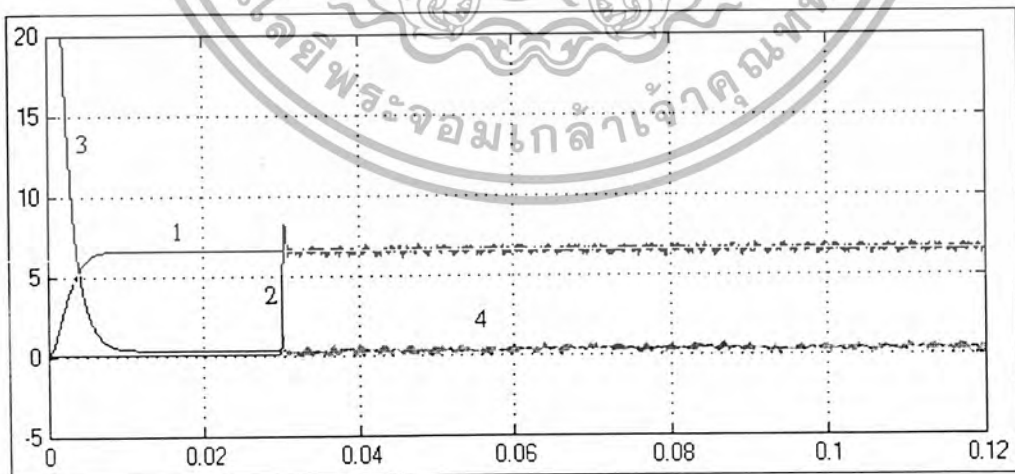
ที่ภาระทางไฟฟ้า แบบด้าหลัง กำลังไฟรีแอกทีฟ (QL) 2,500 VAR



(1 ก)



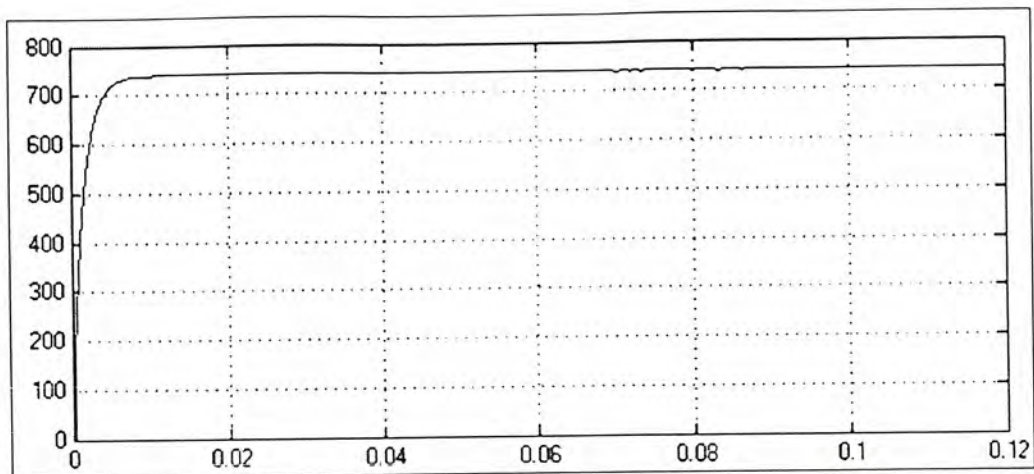
(1 ข)



(1 ค)

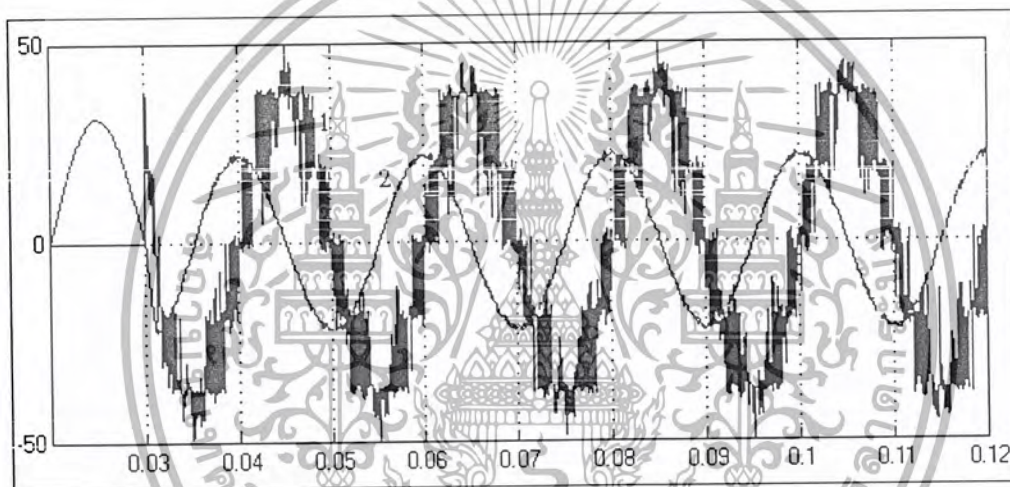
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ เมื่ออินเวอร์เตอร์เป็นตัวเก็บประจุทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

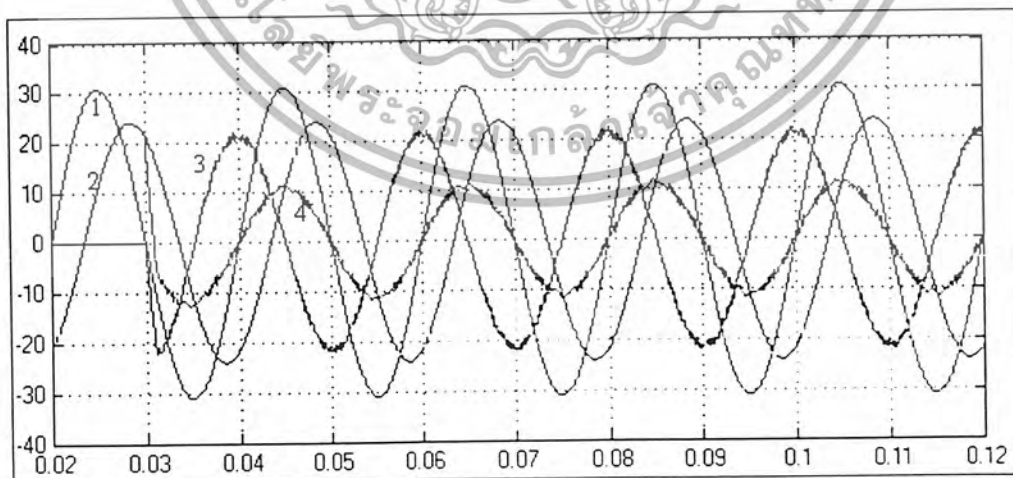


(1 ง)

ที่ภาระทางไฟฟ้า แบบล้าหลัง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (QL) 10,000 VAR



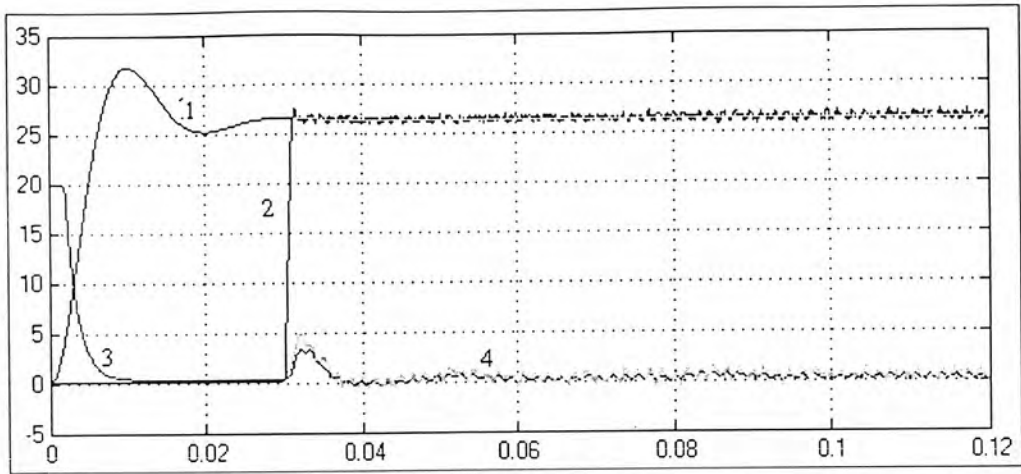
(2 ก)



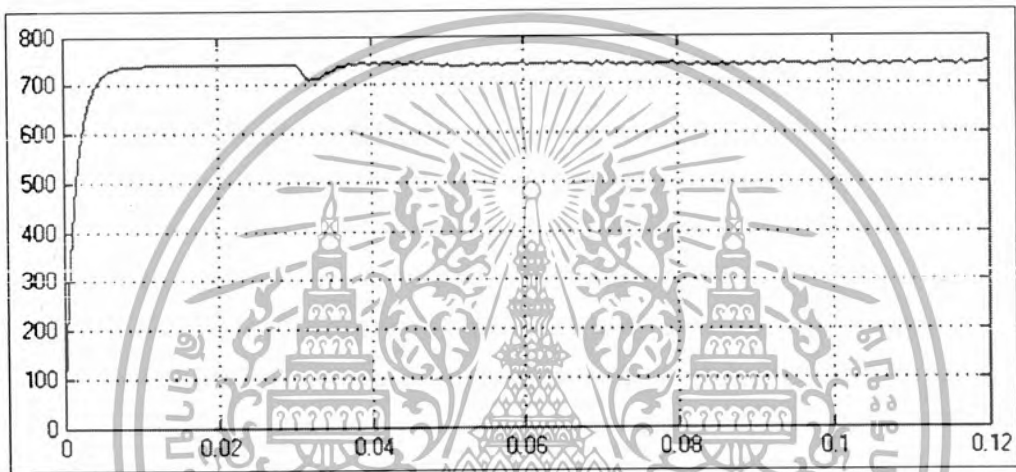
(2 ข)

รูปที่ 4.12 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ เมื่ออินเวอร์เตอร์เป็นตัวเก็บประจุทั้งหมด (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

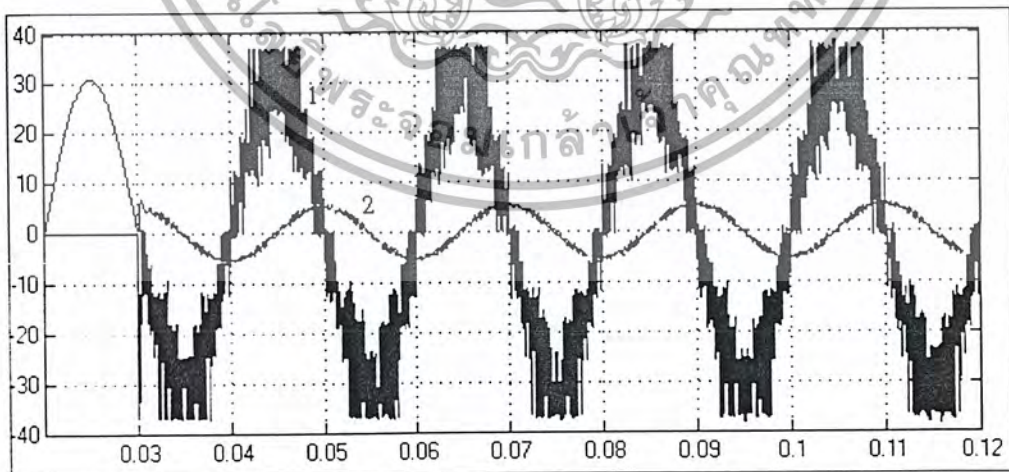


(2 ก)



(2 ง)

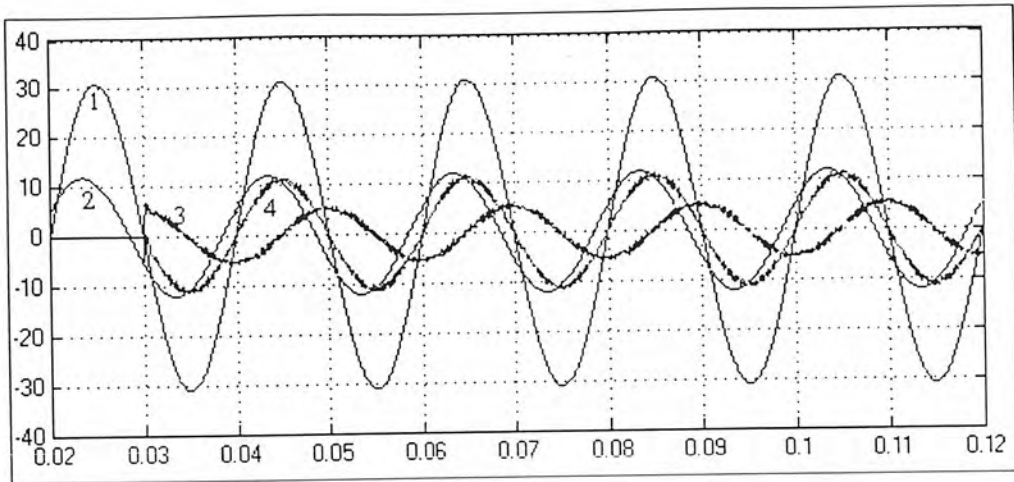
ที่ภาระทางไฟฟ้า แบบนำหน้า กำลังไฟรีแอกทีฟ (QC) 2,500 VAR



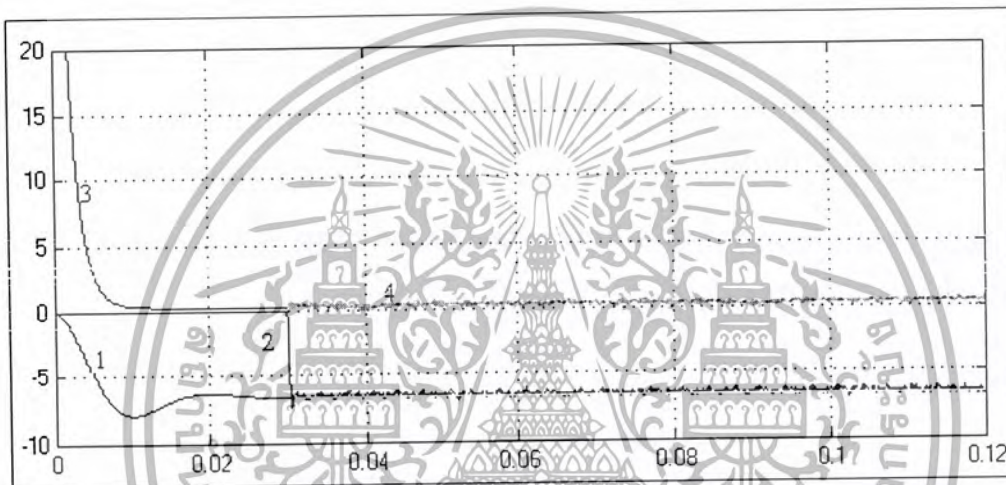
(3 ก)

รูปที่ 4.12 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ เมื่ออินเวอร์เตอร์เป็นตัวเก็บประจุทั้งหมด (ต่อ)

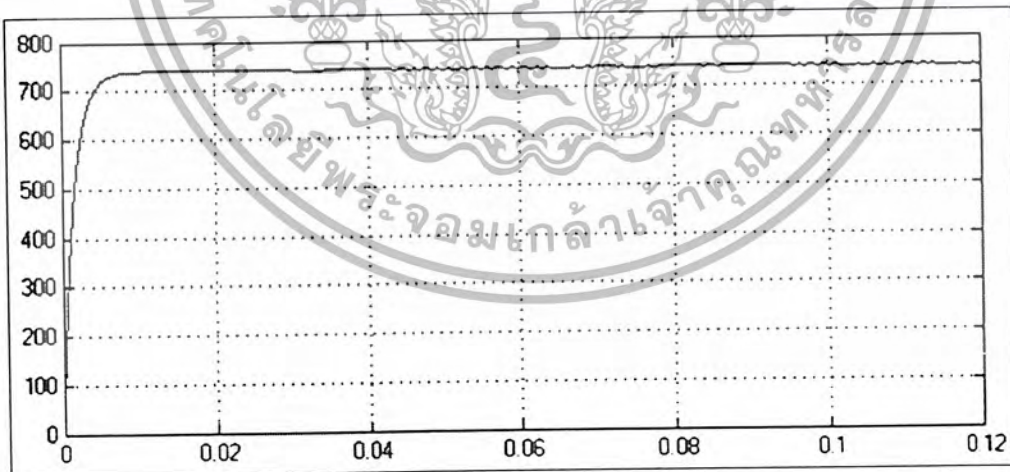
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(3 ข)



(3 ค)

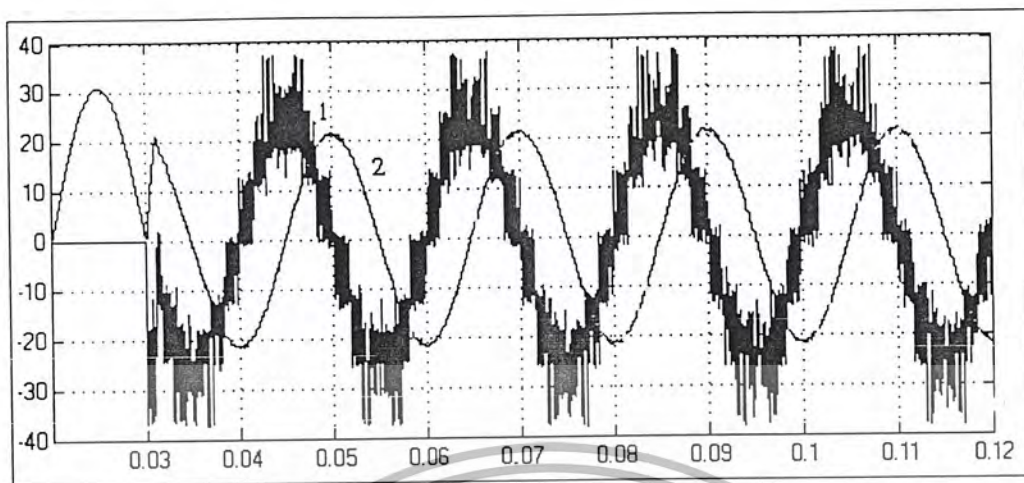


(3 ง)

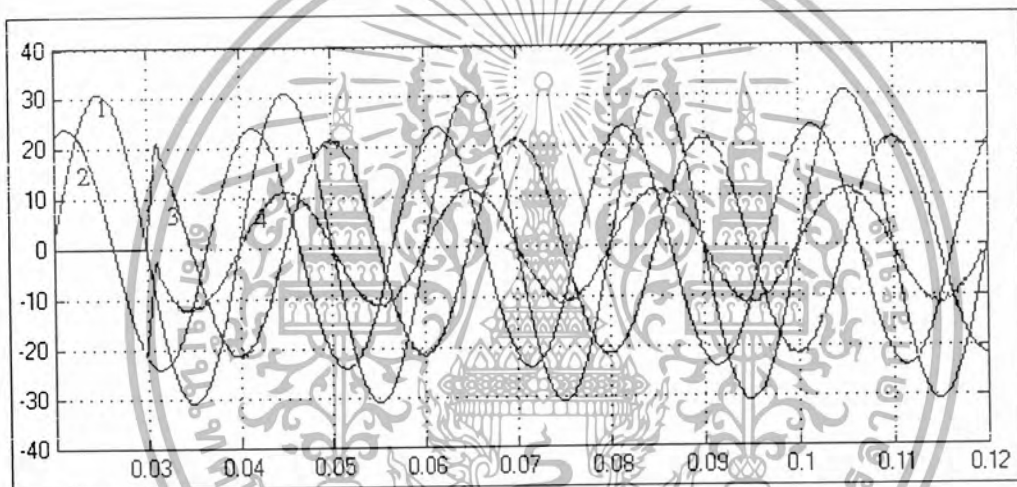
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ เมื่ออินเวอร์เตอร์เป็นตัวเก็บประจุทั้งหมด (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

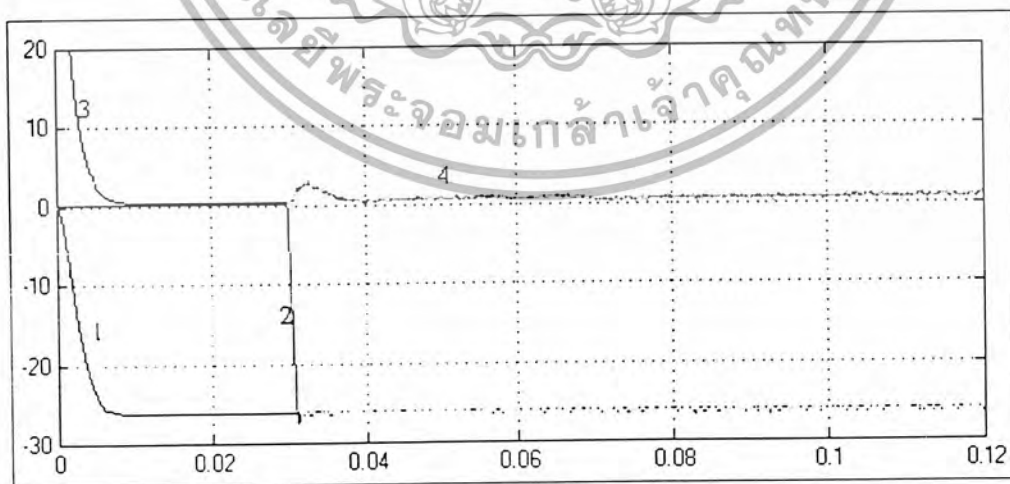
ที่ภาระทางไฟฟ้า แบบนำหน้า กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (QC) 10,000 VAR



(4 ก)



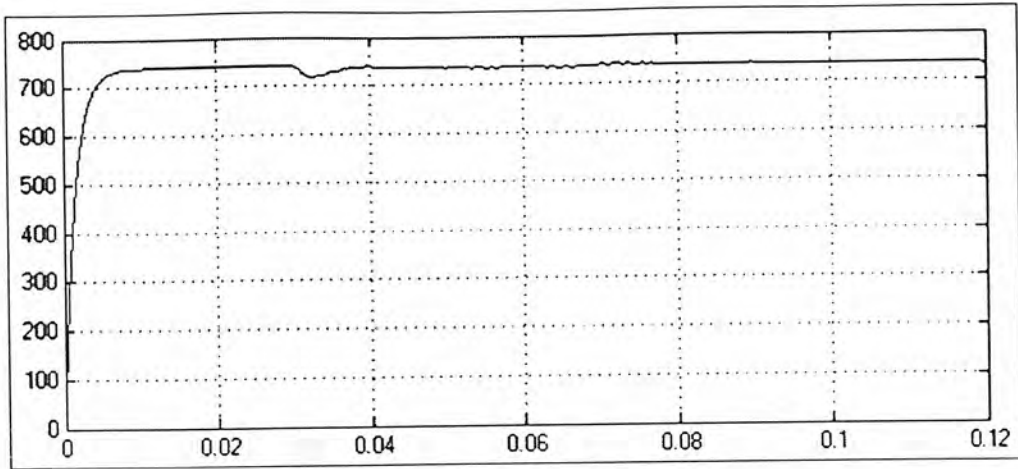
(4 ข)



(4 ค)

รูปที่ 4.12 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ เมื่ออินเวอร์เตอร์เป็นตัวเก็บประจุทั้งหมด (ต่อ)

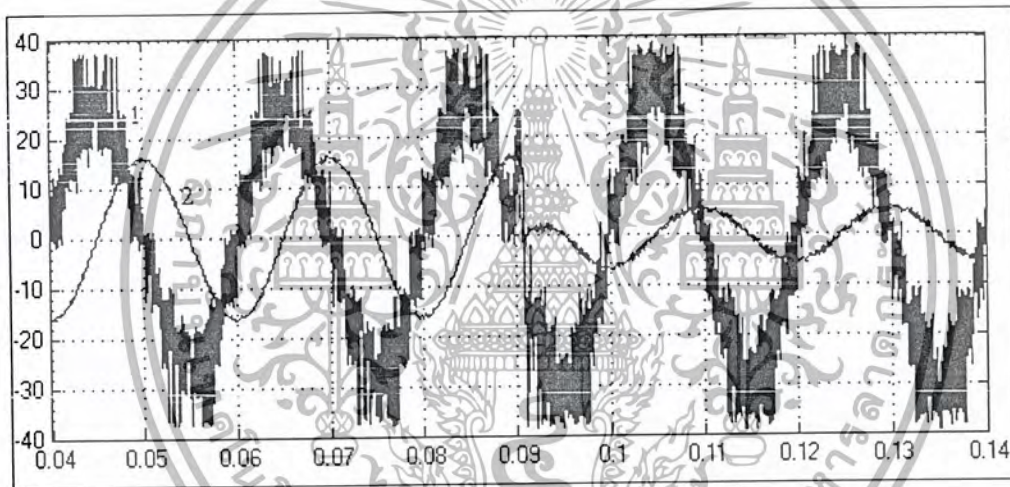
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



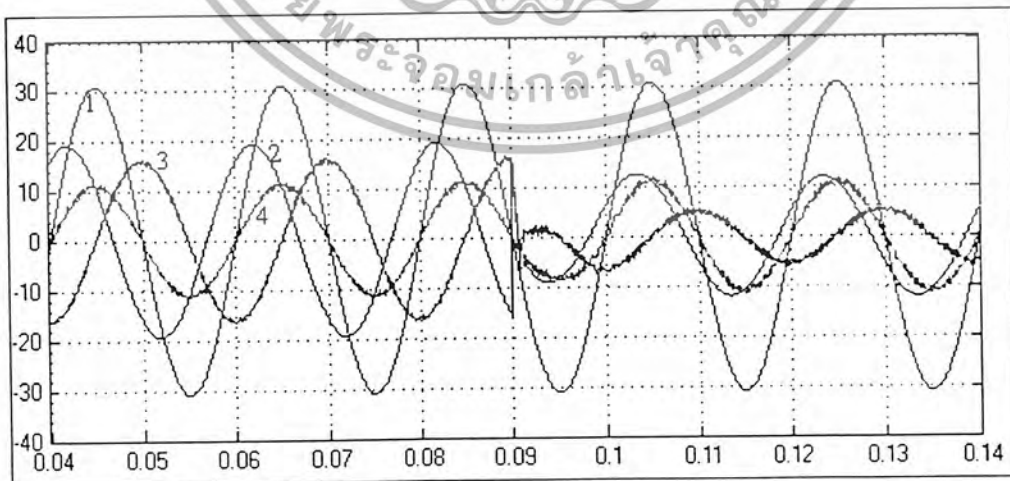
(4 ก)

การเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า

แบบล้าหลัง กำลังไฟรีแอกทีฟ (QC) 7,500 VAR เป็น (QC) 2,500VAR



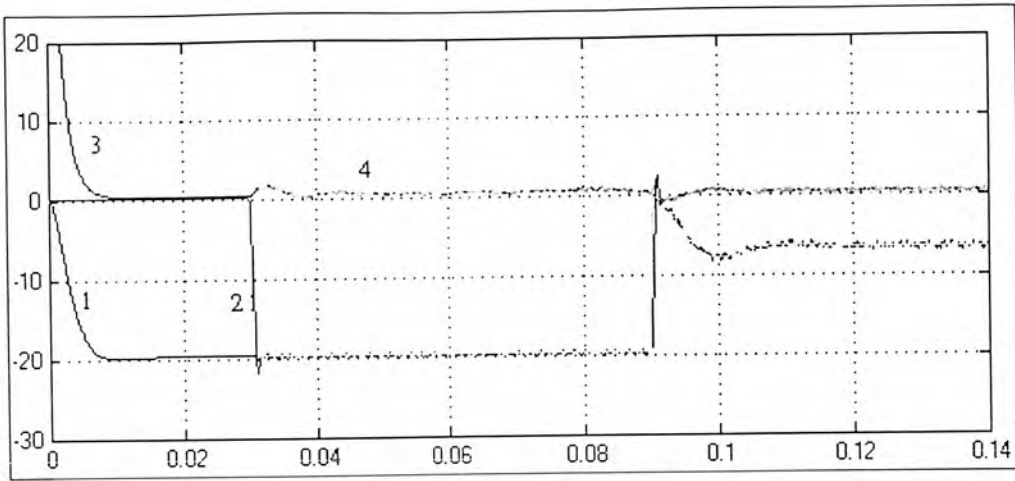
(5 ก)



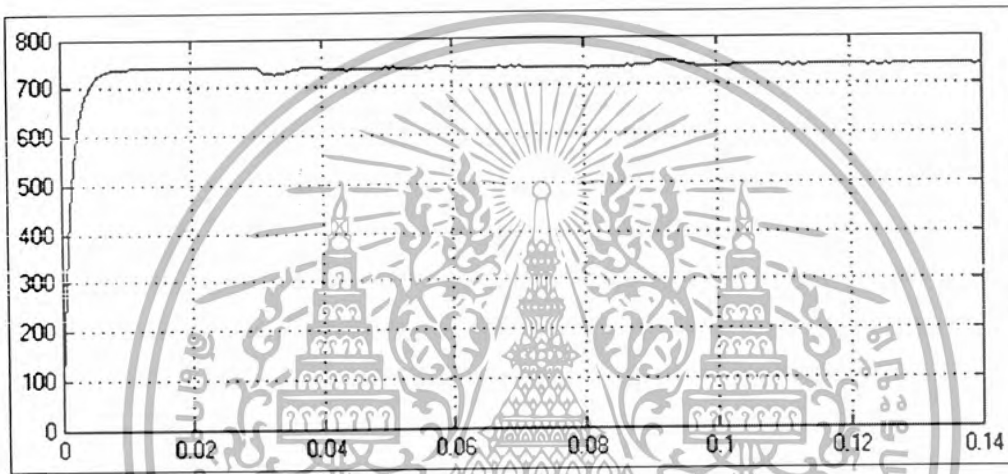
(5 ข)

รูปที่ 4.12 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ เมื่ออินเวอร์เตอร์เป็นตัวเก็บประจุทั้งหมด (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

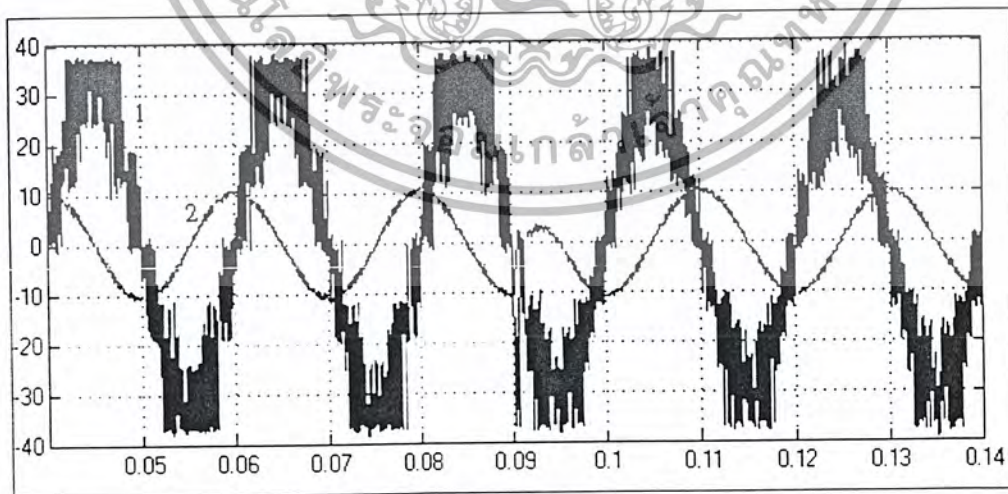


(5 ค)



(5 ง)

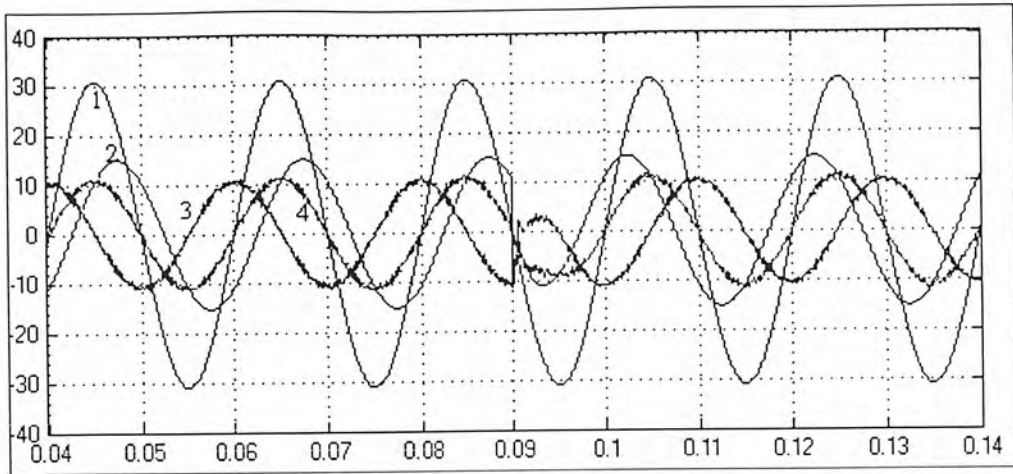
แบบล้าหลัง เป็นแบบหน้าหน้า กำลังไฟรีแอกทีฟ (QL) 5,000 VAR เป็น (QC) 5,000VAR



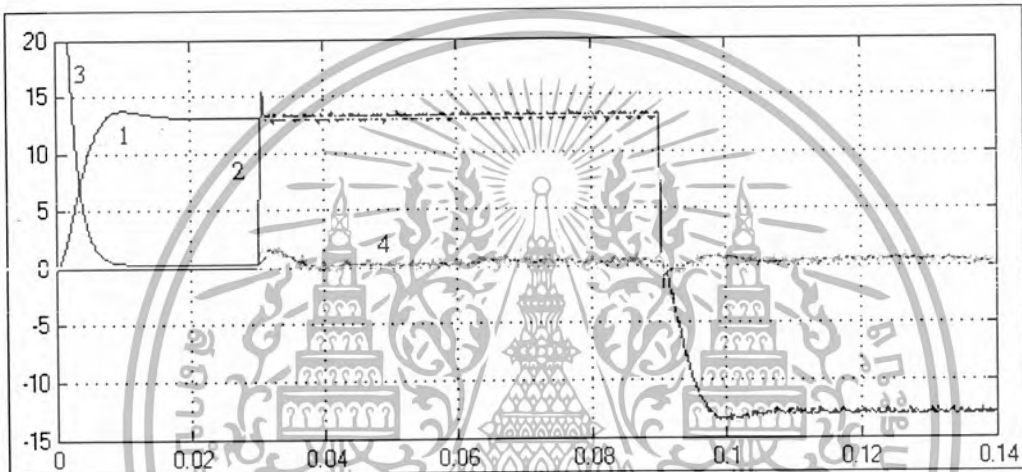
(6 ก)

รูปที่ 4.12 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ เมื่ออินเวอร์เตอร์เป็นตัวเก็บประจุทั้งหมด (ต่อ)

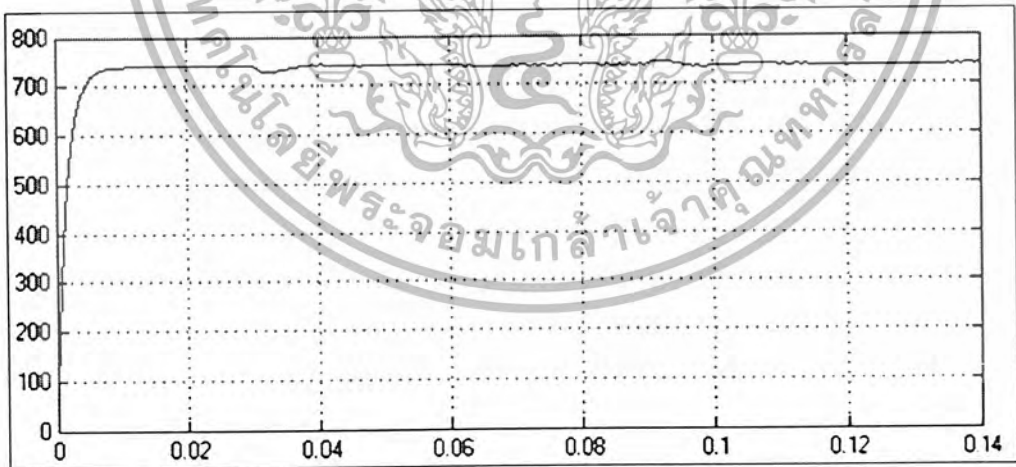
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(6 ข)



(6 ค)



(6 ง)

รูปที่ 4.12 ผลการจำลองที่ค่าภาระทางไฟฟ้าต่างๆ เมื่ออินเวอร์เตอร์เป็นตัวเก็บประจุทั้งหมด (ต่อ)

- ก : เส้นที่ 1 = แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (ค่าที่แสดงผลเป็นค่าที่มีการคูณลดด้วย 0.1)  
เส้นที่ 2 = กระแสของอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

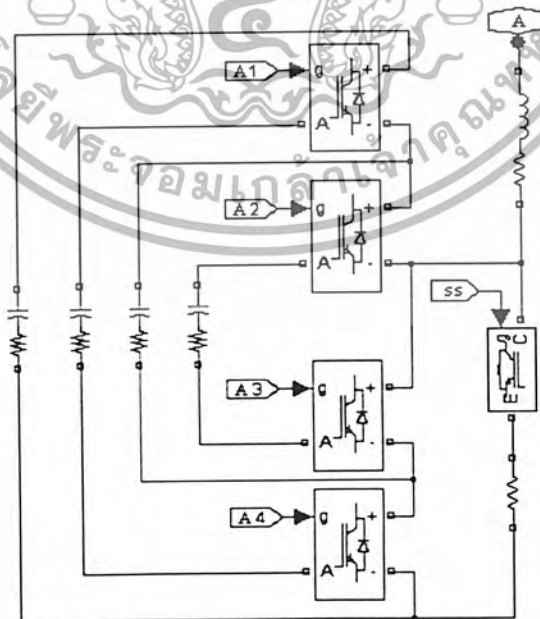
- ข : เส้นที่ 1 = แรงดันระบบ (ค่าที่แสดงผลเป็นค่าที่มีการคูณลดด้วย 0.1)  
 เส้นที่ 2 = กระแสภาระทางไฟฟ้า  
 เส้นที่ 3 = กระแสอินเวอร์เตอร์  
 เส้นที่ 4 = กระแสระบบ
- ก : เส้นที่ 1 = กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน q (อ้างอิง)  
 เส้นที่ 2 = กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน d  
 เส้นที่ 3 = กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน d (อ้างอิง)  
 เส้นที่ 4 = กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน d
- ง : แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุคอมมอนดีซีลิงค์

ผลการจำลองในรูปชุด ก ข และ ค มีลักษณะเช่นเดียวกับการจำลองในข้อ 1 ส่วนในรูปชุด ง แสดงถึงการควบคุมการรักษาระดับแรงดันของตัวเก็บประจุคอมมอนดีซีลิงค์ สามารถควบคุมได้โดยการควบคุมในแนวแกน d ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า PI Controller ให้มีค่าที่เหมาะสมโดยค่าที่ใช้ คือ  $K_p$  เท่ากับ 0.1 และ  $K_i$  เท่ากับ 0.3 ซึ่งสามารถรักษาระดับแรงดันคอมมอนดีซีลิงค์ให้คงที่ตามที่ต้องการ โดยค่ากระแสที่ดึงเข้ามาเพื่อรักษาระดับแรงดันมีค่าไม่มากนัก จะมีผลให้มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันระบบและอินเวอร์เตอร์มีค่าน้อยมาก

3. ใช้ตัวเก็บประจุทั้งหมด โดยใช้วงจรเริ่มต้นการทำงาน (Start up Procedure) เป็นตัวอัดประจุให้ตัวเก็บประจุ

### 3.1 วงจรเริ่มต้นการทำงาน

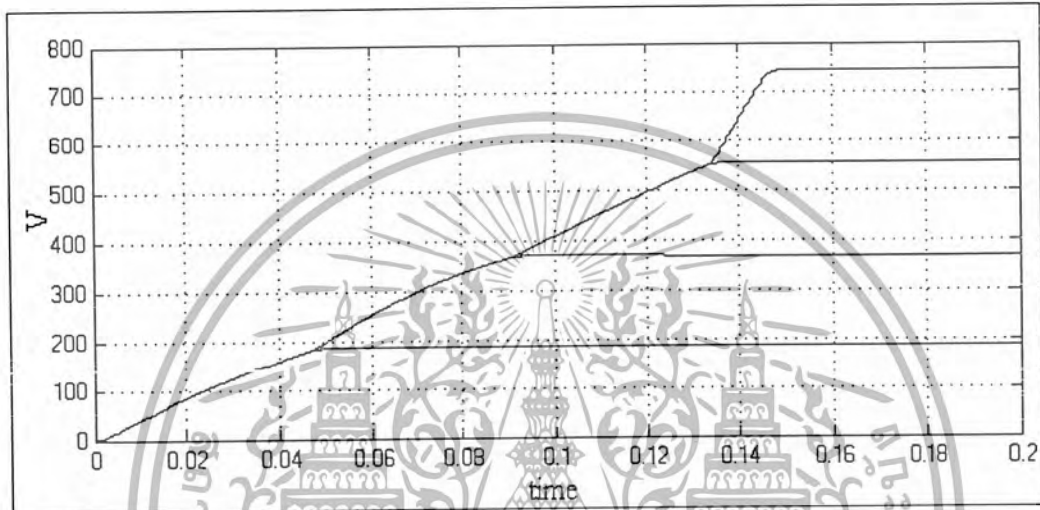
จากหลักการที่ได้อธิบายมาข้างต้นสร้างแบบจำลองได้ดังนี้



รูปที่ 4.13 วงจรเริ่มต้นการทำงาน

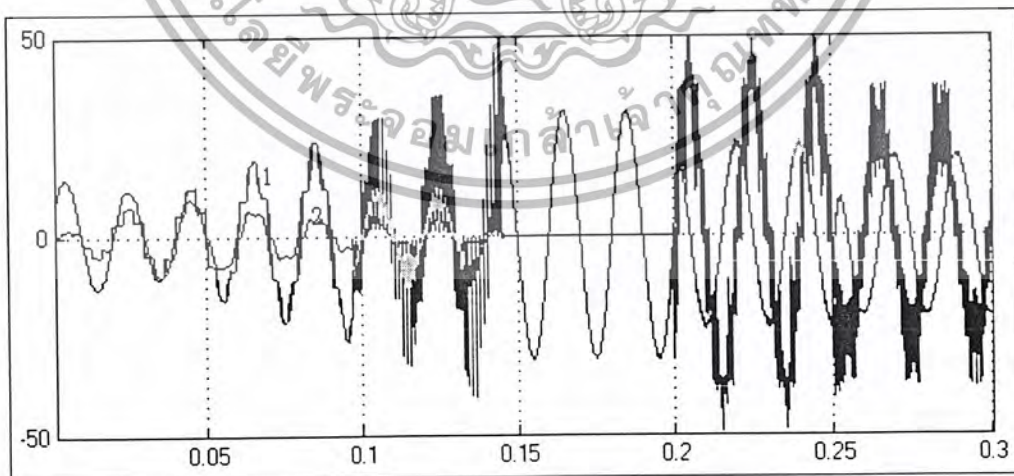
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.13 เป็นการแสดงวงจรเริ่มต้นการทำงานในเฟส A ส่วนใน 2 เฟสที่เหลือมีลักษณะวงจรเช่นเดียวกัน ส่วนที่เพิ่มเติมจากวงจรที่ผ่านมาคืออุปกรณ์สวิตซ์กำลังเพิ่มขึ้นเฟสละ 1 ตัว ในส่วนของสัญญาณควบคุมขาเกตของ IGBT ของอินเวอร์เตอร์จะแบ่งการทำงานเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงแรกจะเป็นในส่วนของวงจรเริ่มต้นการทำงาน ซึ่งมีลักษณะการทำงานของ IGBT ดังที่อธิบายมาข้างต้น ต่อมาเมื่อตัวเก็บประจุมีระดับแรงดันตามที่ต้องการแล้วก็จะตัดวงจรเริ่มต้นการทำงานออกหลังจากนั้นก็ทำงานตามปกติ จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นการทำงานจะใช้เวลาประมาณ 0.15 วินาที แสดงผลการจำลองในส่วนของวงจรเริ่มต้นการทำงานดังนี้



รูปที่ 4.14 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในวงจรเริ่มต้นการทำงาน

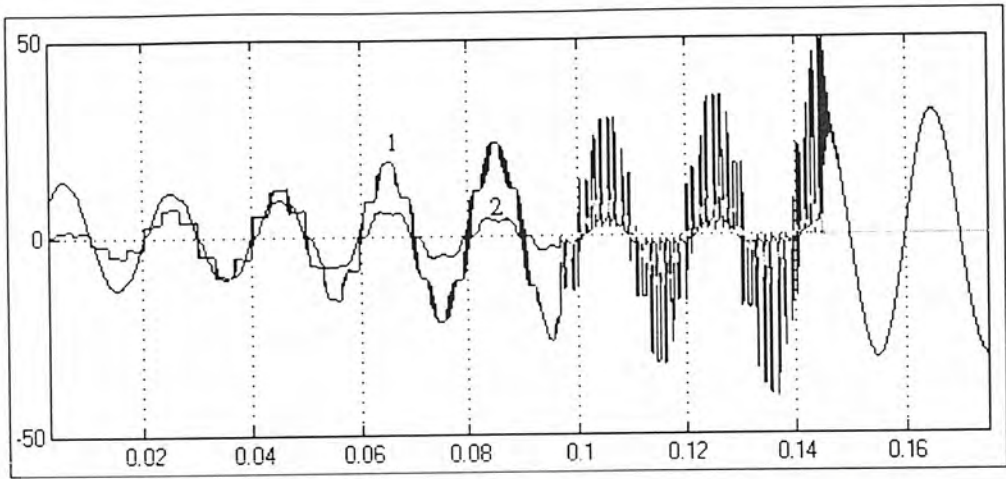
### 3.2 ผลการจำลองเมื่อนำวงจรเริ่มต้นการทำงานเข้าไปรวมกับวงจรหลักของอินเวอร์เตอร์



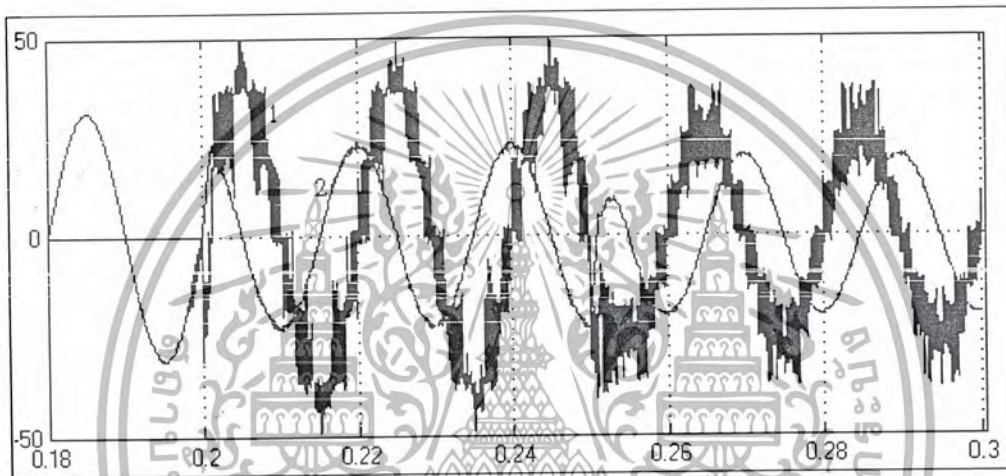
(ก)

รูปที่ 4.15 ผลการจำลองเมื่อใช้วงจรเริ่มต้นการทำงานและมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน

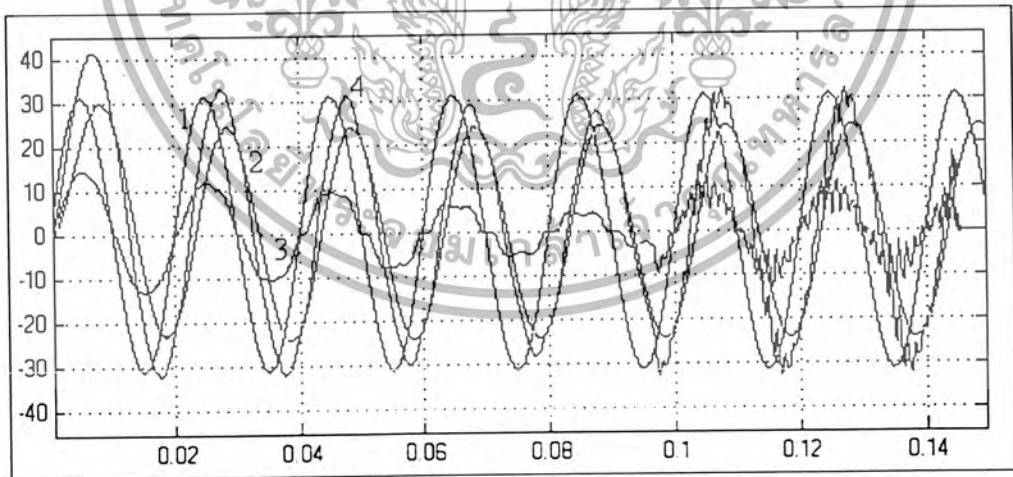
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



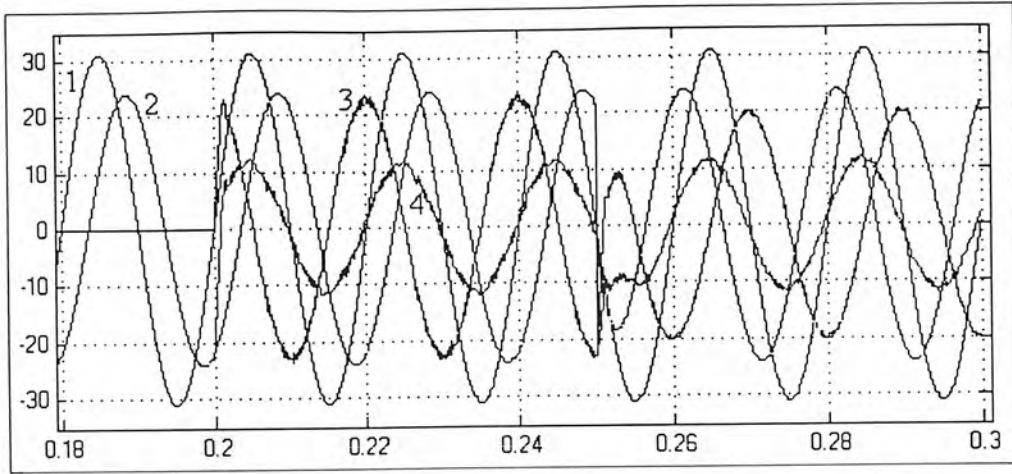
(ค)



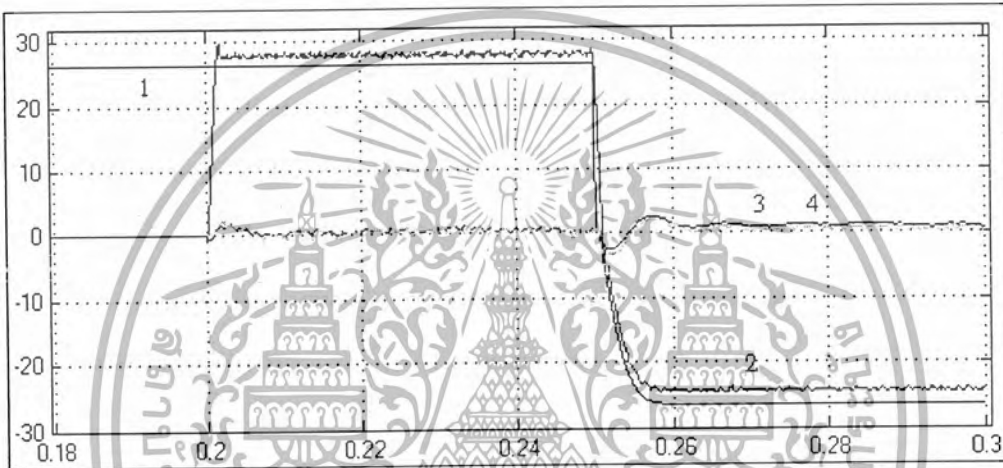
(ง)

รูปที่ 4.15 ผลการจำลองเมื่อใช้วงจรเริ่มต้นการทำงานและมีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (ต่อ)

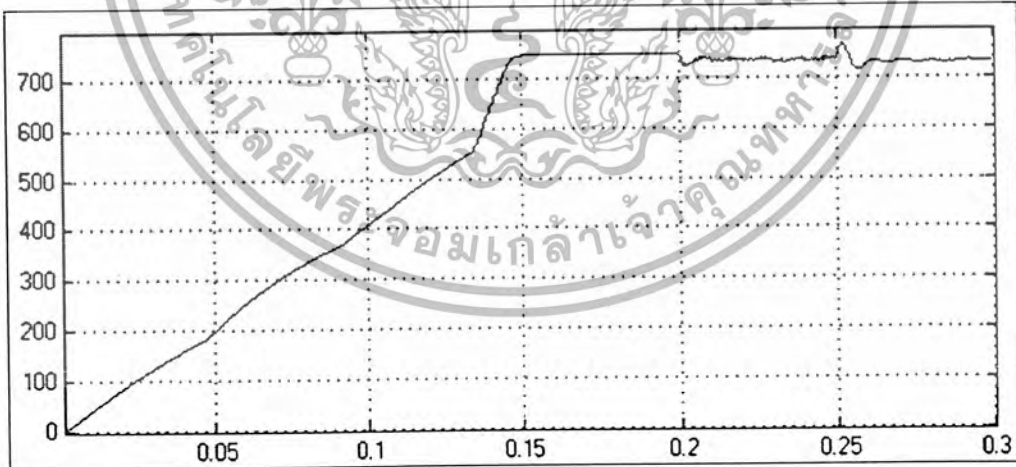
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.15 ผลการจำลองเมื่อใช้วงจรเริ่มต้นการทำงานและมีการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

ก : เส้นที่ 1 = แรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ (ค่าที่แสดงผลเป็นค่าที่มีการคูณลดด้วย 0.1)

เส้นที่ 2 = กระแสของอินเวอร์เตอร์

ข : ภาพขยายในส่วนของการเริ่มต้นการทำงานของรูป ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค : ภาพขยายในส่วนของกราฟชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนของรูป ก
- ง, จ : ภาพขยายในส่วนของกราฟเริ่มต้นการทำงาน และการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ  
 เส้นที่ 1 = แรงดันระบบ (ค่าที่แสดงผลเป็นค่าที่มีการคูณลดด้วย 0.1)  
 เส้นที่ 2 = กระแสภาระทางไฟฟ้า  
 เส้นที่ 3 = กระแสอินเวอร์เตอร์  
 เส้นที่ 4 = กระแสระบบ

เมื่อทำการจำลองโดยวงจรที่สมบูรณ์ จะเห็นว่าผลการจำลองนั้นจะไม่แตกต่างจากการจำลองใน 2 ขั้นตอนแรก โดยในช่วงการเริ่มต้นการทำงานจะเห็นว่ามิลักษณะของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ 2 ช่วง คือ ในช่วงที่วงจรทำงานเป็นวงจรแปลงกระแสตรง จะเห็นว่าแรงดันมีลักษณะเป็นซิกซ์พัลส์ (six-pulse) จนถึงเวลา 0.097 วินาที หรือ ที่ระดับแรงดัน 400 โวลต์ หลังจากนั้นวงจรก็จะทำงานเป็นวงจรขยายแรงดัน จนได้แรงดันตามที่ต้องการ ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 และในรูปที่ 4.15 ข และ ช ก็จะต้องวงจรเริ่มต้นการทำงานออกที่เวลา 0.15 วินาที และควบคุมให้อินเวอร์เตอร์เริ่มชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่เวลา 0.20 วินาที ในระหว่างช่วงเวลา 0.15 - 0.20 วินาที อินเวอร์เตอร์จะยังไม่จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ กระแสอินเวอร์เตอร์จึงเป็นศูนย์



# บทที่ 5

## บทวิจารณ์และสรุป

จากการศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ จะสร้างแรงดันขาออกเป็นแบบขั้นบันได ตามจำนวนของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลัง โดยระดับแรงดันในแต่ละขั้นจะสัมพันธ์กับแรงดันตัวเก็บประจุในแต่ละชั้น เมื่อสร้างแบบจำลองของอินเวอร์เตอร์ขึ้นใน Matlab/simulink แล้วจะเห็นว่าลักษณะของแรงดันขาออกที่จำลองได้มีลักษณะเป็นขั้นบันไดเช่นเดียวกับในทฤษฎี การสร้างสัญญาณควบคุมขาเกทของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งกำลังอาศัยเทคนิคของชานันูไซดอลพัลส์วidthมอดูเลชัน (Sinusoidal pulse width modulation, SPWM) ซึ่งแต่ละมุมเลื่อนเฟสของสัญญาณพาหะจะสร้างแรงดันขาออกเป็นแบบขั้นบันไดลักษณะเช่นเดียวกัน แต่มีค่า % THD ที่แตกต่างกัน ในการนำไปใช้งานอินเวอร์เตอร์ จะต้องไม่ไปทำให้ค่าฮาร์โมนิกส์ของระบบสูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกค่ามุมเลื่อนเฟสที่มีค่า % THD ของแรงดันขาออกต่ำ จากการจำลองมุมเลื่อนเฟสที่เหมาะสม คือ 90 องศา

การประยุกต์การนำอินเวอร์เตอร์ไปเชื่อมต่อกับระบบ เพื่อใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการของการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ได้ศึกษาถึงการควบคุมแบบอัตโนมัติในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยการควบคุมจะอาศัยพื้นฐานของ Instantaneous active and reactive current  $i_{a_i}$  method ความรวดเร็วในการตอบสนองขึ้นอยู่กับการใช้ค่า PI Controller ให้เหมาะสมโดยค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ที่เลือกใช้ คือ 60 และ 20 ตามลำดับ สำหรับควบคุมกระแสทั้งในแกน  $d$  และ  $q$  และ 0.1 และ 0.3 ตามลำดับ สำหรับควรรักษาระดับแรงดันคอมมอนดีซีลิงค์ เวลาในการตอบสนองต่อการสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ต้องชดเชยประมาณ 1/10 cycle แต่เมื่อมีการเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าจะใช้เวลาเป็น 1 cycle เนื่องจากต้องมีการส่งค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ต้องการชดเชยใหม่ โดยส่งในรูปของกระแสที่ต้องการผ่านวงจรกรองกระแส ซึ่งจะทำให้เกิดการล่าช้าในการชดเชยเพื่อให้ได้ ยูนิตีพาวเวอร์แฟกเตอร์

สำหรับวงจรเริ่มต้นการทำงานใช้เพื่ออัดประจุให้ตัวเก็บประจุ ให้มีแรงดันตามที่ต้องการ โดยอาศัยหลักการของวงจรแปลงกระแสตรงและวงจรขยายแรงดันแบบสามเฟส ซึ่งใช้เวลาในการเริ่มต้นการทำงานประมาณ 0.15 วินาที

อินเวอร์เตอร์ที่จำลองสามารถใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ตามทฤษฎี ซึ่งอินเวอร์เตอร์สามารถชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุดที่ 10 kVAR, 15 A

แนวทางการพัฒนาต่อ

1. พัฒนาค่าเพื่อให้สามารถชดเชยในกรณีที่ภาระทางไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้น หรือสร้างเป็นแอลทีฟิเตอร์
2. ปรับปรุงเพื่อให้สามารถรักษาแรงดันตัวเก็บประจุแต่ละตัวสมดุลกัน
3. ศึกษาการจำลองในโปรแกรมอื่นๆ เพื่อยืนยันและเปรียบเทียบผลกับการจำลองใน Matlab/simulink
4. นำผลที่ได้จากการจำลองไปสร้างเป็นอุปกรณ์จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### 1. นิยามของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

$$PF = \frac{\text{Real Power}}{\text{Total Apparent Power}} \quad (\text{ก 1})$$

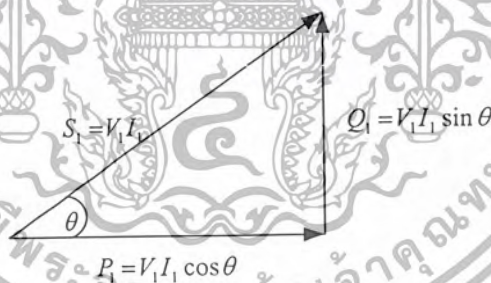
จากนิยามของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ายกตัวอย่างสามารถกล่าวได้ว่า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุดเกิดขึ้นเมื่อวงจรนั้นใช้กำลังไฟฟ้าได้คุ้มค่าที่สุด คือ กำลังที่เตรียมให้กับวงจรถูกวงจรนั้นนำไปใช้ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าจริง (Real Power, W) ได้ทั้งหมด คือ

$$\text{กำลังไฟฟ้าปรากฏ} = \text{กำลังไฟฟ้าจริง}$$

เมื่อเงื่อนไขดังกล่าวเป็นจริงผลค่านวนค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าตามสมการจะได้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 (Unity Power Factor)

#### 1.1 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเมื่อสัญญาณกระแสไฟฟ้าเป็นชนิดแบบซายน์

เมื่อสัญญาณของศักดาไฟฟ้าที่ทางเข้า ( $v_1$ ) และสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ทางเข้า ( $i_1$ ) เป็นชนิดแบบซายน์และมีมุมทางไฟฟ้าระหว่าง ( $v_1$ ) และ ( $i_1$ ) เป็น  $\theta$  สัญญาณทั้งสองดังกล่าวสามารถเขียนแทนด้วยเวกเตอร์กำลัง คือ



รูปที่ ก 1 เวกเตอร์กำลัง

ค่านวนค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ คือ

$$PF = \frac{P_1}{S_1} = \frac{V_1 I_1 \cos \theta}{V_1 I_1} = \cos \theta \quad (\text{ก 2})$$

## 1.2 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเมื่อสัญญาณกระแสไฟฟ้าแบบไม่เป็นชายน

เมื่อสัญญาณของศักดาไฟฟ้าที่ทางเข้า ( $v_1$ ) เป็นชนิดแบบชายน แต่สัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่ทางเข้า ( $i_1$ ) ไม่เป็นแบบไซน์ ค่าแอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้า ( $i_1$ ) นี้ สามารถเขียนกระจายได้ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier) คือ

$$I_1 = \sqrt{I_{11}^2} + \sum_{n=2}^{\infty} I_{1n}^2 \quad (\text{ก } 3)$$

เมื่อ  $I_{11}$  : เป็นค่าแอมพลิจูดของ Fundamental ของ  $i_1$

$I_{1n}$  : เป็นค่าแอมพลิจูดของ Harmonic ที่  $n$  ของ  $i_1$

$I_{11}$  สามารถเขียนกระจายได้เป็นสองส่วนคือ In-Phase Component ( $I_{11p}$ ) และ Quadrature Component ( $I_{11q}$ ) ดังนั้นสมการ 3 สามารถจัดใหม่ได้คือ

$$\bar{I}_1 = \sqrt{I_{11p}^2 + I_{11q}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{1n}^2} \quad (\text{ก } 4)$$

คำนวณกำลังงานไฟฟ้าปรากฏ คือ

$$S_1 = V_1 I_1 = \sqrt{V_1^2 I_{11p}^2 + V_1^2 I_{11q}^2 + V_1^2 \sum_{n=1}^{\infty} I_{1n}^2} \quad (\text{ก } 5)$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D_1^2} \quad (\text{ก } 6)$$

$$S_1 = \sqrt{S_{11}^2 + D_1^2} \quad (\text{ก } 7)$$

$$P_1 = V_1 I_{11p} = V_1 I_{11} \cos \varphi_1 \quad (\text{ก } 8)$$

$$Q_1 = V_1 I_{11q} = V_1 I_{11} \sin \varphi_1 \quad (\text{ก } 9)$$

$$D_1 = V_1 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{1n}^2} \quad (\text{ก } 10)$$

เมื่อ  $\varphi_1$  : มุมทางไฟฟ้าระหว่างศักดาไฟฟ้าที่ทางเข้ากับกระแสไฟฟ้า Fundamental ที่ทางเข้า

$Q_1$  : กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

$S_{11}$  : กำลังไฟฟ้าปรากฏของ Fundamental

$P_1$  : กำลังไฟฟ้าจริง

$D_1$  : พลังงานไฟฟ้าดิสทอร์ชัน (Distortion Power)

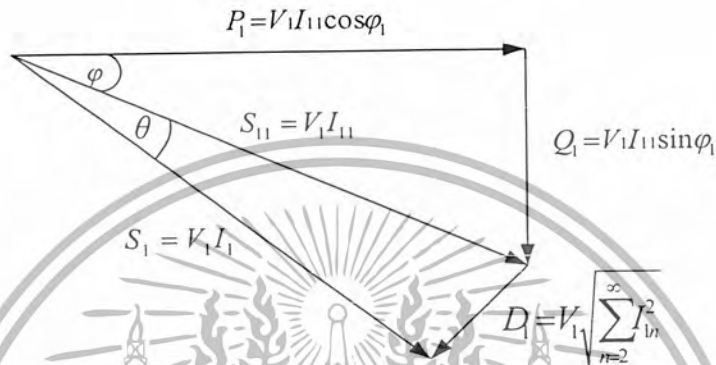
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้คือ  $PF = \frac{P_1}{S_1} = \frac{V_1 I_{11} \cos \varphi_1}{V_1 I_1} = \frac{I_{11}}{I_1} \cos \varphi_1$  (ก 11)

$$\frac{I_{11}}{I_1} = \cos \theta \quad (\text{ก 12})$$

ดังนั้น

$$PF = \cos \theta \cos \varphi_1 \quad (\text{ก 13})$$



รูปที่ 2 เวกเตอร์กำลังของวงจรที่มีกระแสไฟฟ้าที่ทางเข้าแบบไม่เป็นชานซ์

## 2. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์

### 2.1 การเกิดฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ คือ องค์ประกอบในรูปสัญญาณแบบชานซ์ ของรูปคลื่นรายคาบโดยมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของค่าความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) เช่น ถ้าความถี่มูลฐานเป็น 50 Hz ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ 3 จะเป็น  $3 \times 50$  เป็นต้น ฮาร์โมนิกส์เป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันและกระแสในรูปแบบชานซ์มาตรฐานเกิดการเบี่ยงเบน (distortion)

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเฟสเดียว เช่น คอมพิวเตอร์, อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ ชาร์จเจอร์ เป็นต้น จะมีลักษณะเป็น triplen harmonic คือ ฮาร์โมนิกส์ที่ 3, 9, 15.... นอกจาก triplen harmonic แล้วยังมีฮาร์โมนิกส์ที่ 5, 7, 11, 13, 15.....

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบสามเฟส เช่น วงจรแปลงกระแสตรง อินเวอร์เตอร์ อุปกรณ์ปรับความเร็วของมอเตอร์จะสร้างฮาร์โมนิกส์ ที่ 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 โดยที่ ฮาร์โมนิกส์อันดับสูงขึ้นไปจะมีปริมาณลดลง ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากภาระทางไฟฟ้าแบบเครื่องเชื่อมไฟฟ้า นอกจากจะสร้างฮาร์โมนิกส์ที่เป็นจำนวนเต็มของค่าความถี่พื้นฐานแล้ว ยังมีอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ปะปนมาด้วย โดยอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ จะมีความถี่ไม่เป็นจำนวนเต็ม เช่น 5.2, 7.4 เป็นต้น

การวัดความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์สามารถทำได้โดยการหาค่า ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion, THD) ความหมายตามมาตรฐานของ IEEE คือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่าอาร์เอ็มเอสของส่วนประกอบความถี่มูลฐาน โดยแบ่งเป็นแรงดันฮาร์โมนิกส์ และกระแสฮาร์โมนิกส์ แสดงการหาค่า %THD ดังสมการ

$$\% THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (ก 14)$$

$$\% THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (ก 15)$$

## 2.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์

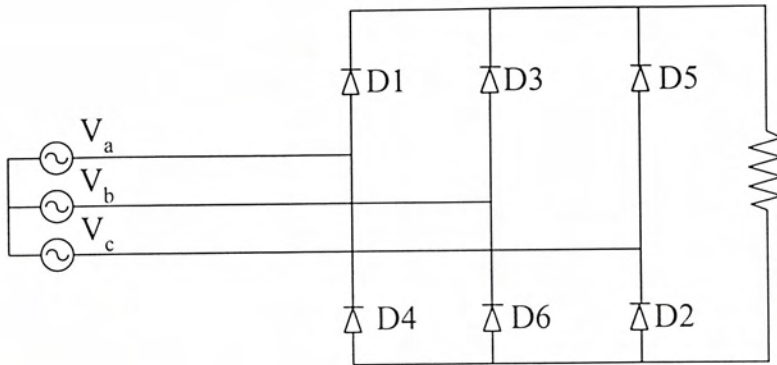
1. ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์โมนิกส์ เนื่องจากผลของรีโซแนนซ์อนุกรมและขนาน
2. ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้า การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และการใช้กำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพลดลง
3. ทำให้ฉนวนของอุปกรณ์เสื่อมสภาพ เป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง
4. ทำให้โรงจักรทำงานผิดปกติ (Plant Maloperation)

## 3. วงจรแปลงกระแสตรงสามเฟส

วงจรแปลงกระแสตรงสามเฟส ปกติจะใช้ในด้านการจ่ายกำลังสูง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก 3 โดยแรงดันขาออกที่ได้อาจเป็นรูปคลื่นต่อเนื่อง 6 รูปคลื่นดังรูปที่ ก 4 ไดโอดจะทำงานตามลำดับซึ่งไดโอดแต่ละตัวจะนำกระแสอยู่ในช่วงมุม 120 องศา โดยไดโอดจะทำงานตามลำดับเป็นคู่ๆ ดังนี้ D1-D2, D3-D2, D3-D4, D5-D4, D5-D6 และ D1-D6 ไดโอดแต่ละคู่จะเชื่อมต่อกันโดยมีคู่เส้นแรงดันจากแหล่งจ่ายอยู่ตรงกลางไดโอดทั้งสอง ซึ่งจะให้ค่าแรงดันชั่วขณะสูงสุด คือ ค่า  $\sqrt{3}$  คูณกับแรงดันเฟสของแหล่งจ่าย 3 เฟส แบบสตาร์ รูปคลื่นแรงดันและเวลาในการทำงานของไดโอดอยู่ในรูปที่ 1.2

ถ้า  $V_m$  คือ ค่าแรงดันเฟสสูงสุดแล้ว แรงดันเฟสชั่วขณะจะอธิบายได้จาก

$$\begin{aligned} v_{an} &= V_m \sin(\omega t) \\ v_{bn} &= V_m \sin(\omega t - 120) \\ v_{cn} &= V_m \sin(\omega t - 240) \end{aligned} \quad (ก 16)$$



รูปที่ 3 วงจรแปลงกระแสตรง 3 เฟส

เนื่องจากแรงดันไลน์ทูไลน์ จะนำหน้าแรงดันเฟสอยู่ 30 องศา ทำให้แรงดันชั่วขณะที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

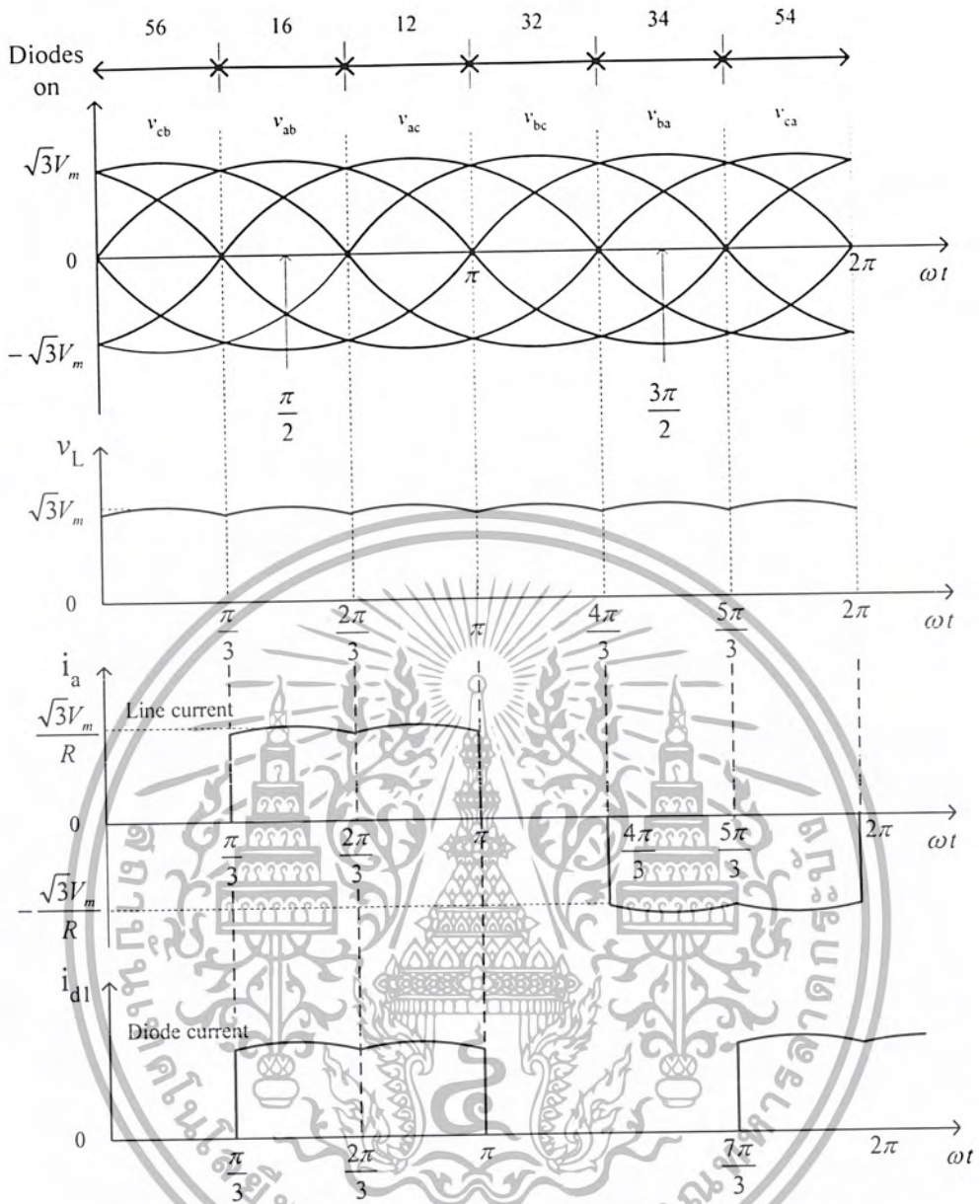
$$\begin{aligned}v_{ab} &= \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30) \\v_{bc} &= \sqrt{3}V_m \sin(\omega t - 90) \\v_{ca} &= \sqrt{3}V_m \sin(\omega t - 210)\end{aligned}$$

(ก 17)

แรงดันขาออกเฉลี่ย จะหาได้จาก

$$\begin{aligned}V_{dc} &= \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m \cos \omega t d(\omega t) \\&= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \\&= 1.654 V_m\end{aligned}$$

(ก 18)

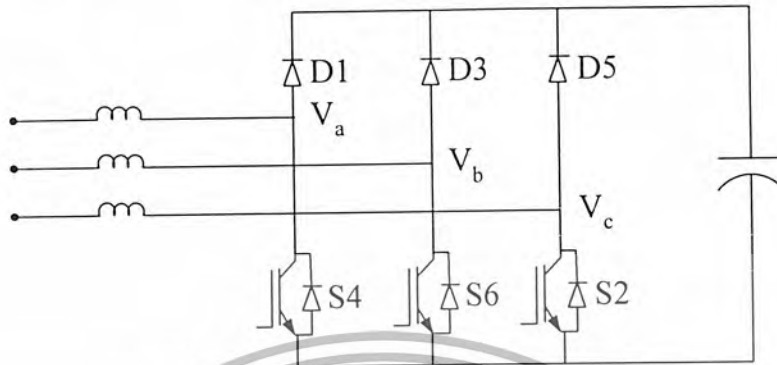


รูปที่ ก 4 รูปคลื่นแรงดันและเวลาในการทำงานของไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. วงจรขยายแรงดันสามเฟส (Three phase boost rectifier)

วงจรนี้มีลักษณะการทำงานที่สำคัญ คือ แปลงไฟกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง และขยายระดับแรงดัน แสดวงจรถูกได้ดังรูป

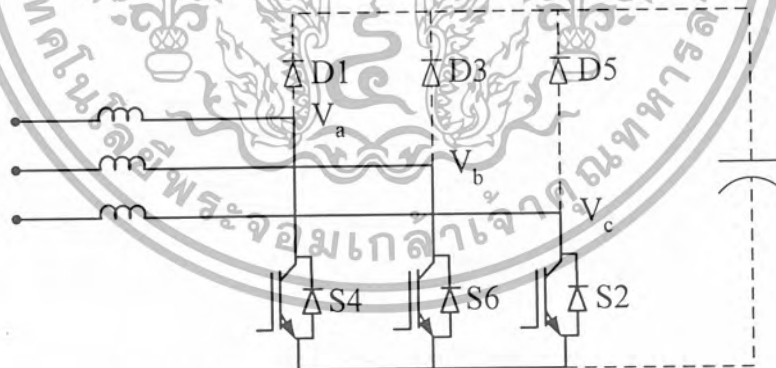


รูปที่ ก 5 วงจรขยายแรงดันสามเฟส

ในที่นี้จะไม่พิจารณาถึงผลของความถี่สวิตซ์ซิ่ง แต่จะมองเป็นสถานะการทำงานของสวิตซ์ คือ เมื่อสวิตซ์เปิดและปิดวงจร

เมื่อสวิตซ์เปิดวงจรจะมีลักษณะการทำงานเหมือนวงจรแปลงกระแสตรงสามเฟสดังในข้างต้น พลังงานจะถ่ายเทไปยังตัวเก็บประจุ

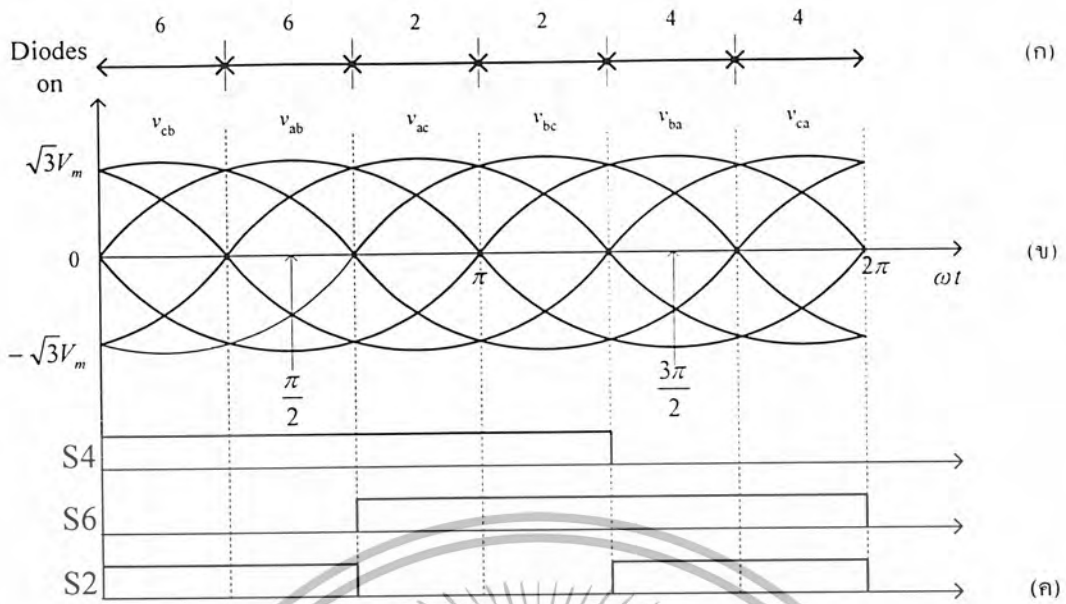
เมื่อสวิตซ์ปิดวงจรจะเกิดการสะสมพลังงานขึ้นภายในตัวเหนี่ยวนำทั้งสามเฟส ซึ่งจะสามารถพิจารณาถึงเส้นทางการไหลของกระแส หรือการทำงานของสวิตซ์ทั้งสามตัว โดยอาศัยรูปวงจรในรูป ก 6



รูปที่ ก 6 ลักษณะวงจรขยายแรงดันสามเฟสเมื่อสวิตซ์ปิดวงจร

ในขั้นแรกจะต้องหาช่วงเวลาที่สวิตซ์สามารถนำกระแสได้ คือ ค่าแรงดันตกคร่อมสวิตซ์มีค่ามากกว่าแรงดันตกคร่อมขาคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์ และสัญญาณควบคุมขาเกตเป็นหนึ่ง โดยในขณะนี้ได้ควบคุมให้สัญญาณควบคุมขาเกตเป็นหนึ่งเสมอ ส่วนแรงดันตกคร่อมสวิตซ์ สามารถพิจารณาได้จากแรงดันตกคร่อมไดโอดของสวิตซ์แต่ละตัว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 การทำงานของวงจรขยายแรงดันสามเฟสเมื่อสวิตช์ปิดวงจร

ในรูป ก 7 (ค) แสดงถึงช่วงเวลาที่สวิตช์แต่ละตัวสามารถนำกระแสได้ แต่เห็นว่าจะมีช่วงเวลาที่นำกระแสคาบเกี่ยวกันอยู่ โดยในหลักของความเป็นจริงแล้วสวิตช์แต่ละตัวไม่สามารถนำกระแสพร้อมกันได้ จึงต้องพิจารณาว่าในช่วงเวลานั้นๆ สวิตช์ตัวใดนำกระแส สามารถอธิบายเพื่อความเข้าใจโดยยกตัวอย่างการพิจารณาในช่วง  $0 - 2\pi/3$  จะเห็นว่าในช่วงเวลานี้สวิตช์ที่พร้อมจะนำกระแสมีสองตัว คือ S2 และ S4 จะทำงานคู่กับไดโอดของ S6 จากนั้นพิจารณาจุดแรงดันตกคร่อมว่าแรงดันในเฟส A กับ C เฟสใดที่มีค่ามากกว่าสวิตช์ในเฟสนั้นก็จะนำกระแส ในช่วงเวลา  $0 - \pi/3$  แรงดันในเฟส C มากกว่า A ดังนั้น S2 ก็จะนำกระแสคู่กับไดโอดของ S6 แต่เมื่อถึงช่วงเวลา  $\pi/3 - 2\pi/3$  แรงดันในเฟส A มากกว่า C ดังนั้น S4 ก็จะนำกระแสคู่กับไดโอดของ S6 ในช่วงเวลาอื่นๆ ก็พิจารณาได้ในลักษณะเช่นเดียวกันนี้

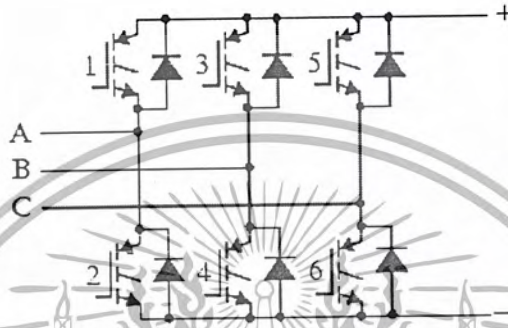
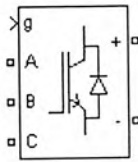
ช่วงเวลา	$0 - \pi/3$	$\pi/3 - 2\pi/3$	$2\pi/3 - \pi$	$\pi - 4\pi/3$	$4\pi/3 - 5\pi/3$	$5\pi/3 - 2\pi$
สวิตช์	S2	S4	S4	S6	S6	S2
ไดโอด	D6	D6	D2	D2	D4	D4

ตารางที่ 1 แสดงสถานะการนำกระแสของสวิตช์และไดโอด

# ภาคผนวก ข

## Simulink/Matlab

### 1. Universal Bridge (IGBT)



**Block Parameters: Universal Bridge**

Universal Bridge (mask)  
This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. For most applications the internal inductance should be set to zero.

Parameters

Number of bridge arms: 3

Snubber resistance  $R_s$  (Ohms)  
1e5

Snubber capacitance  $C_s$  (F)  
inf

Power Electronic device: Thyristors

$R_{on}$  (Ohms)  
1e-3

$L_{on}$  (H)  
0

Forward voltage  $V_f$  (V)  
0

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรต่างๆ

Number of bridge arms	: สามารถตั้งค่าให้เป็น 1 หรือ 2 เป็นแบบคอนเวอร์เตอร์ 1 เฟส (อุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง 2 หรือ 4 ตัว) ตั้งค่าให้เป็น 3 เป็นแบบ คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส (อุปกรณ์สวิตซ์ซิ่ง 6 ตัว)
Snubber resistance Rs	: ค่าความต้านทานวงจร snubber มีหน่วยเป็นโอห์ม สามารถตั้งค่าเป็นอินฟินิตี้ (inf) เพื่อตัดตัวต้านทานนี้ออกจากวงจร snubber
Snubber capacitance Cs	: ค่าความเก็บประจุวงจร snubber มีหน่วยเป็นฟารัด สามารถตั้งค่าเป็นศูนย์ เพื่อตัดตัวนี้ออกจากวงจร snubber
Power electronic device	: สามารถเลือกชนิดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในวงจรบริดจ์
Ron	: ตัวต้านทานภายในของอุปกรณ์ที่เลือก มีหน่วยเป็นโอห์ม
Lon	: ตัวเหนี่ยวนำภายใน มีหน่วยเป็นเฮนรี่ สำหรับไดโอดหรือไทรสเตอร์ จะตั้งค่าเป็นศูนย์เมื่อบริดจ์เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง
Forward voltage Vf	: แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ที่เลือกในขณะที่ทำงาน มีหน่วยเป็นโวลต์
Measurement	: สามารถเลือกวัด แรงดัน กระแสของอุปกรณ์ แรงดันเทอร์มินอลของทั้ง AC และ DC หรือเลือกวัดทั้งแรงดันและกระแสทั้งหมด
Input and Outputs	
A B C + -	: จุดต่อของด้านไฟกระแสสลับและกระแสตรงของวงจรบริดจ์
g	: สัญลักษณ์ควบคุมขงกาท

## 2. Repeating table



**Block Parameters: Triangle** ✖

- Repeating table (mask) (link)

Output a repeating sequence of numbers specified in a table of time-value pairs. Values of time should be monotonically increasing.

---

- Parameters

Time values:

[0 0.000325 0.00065 0.000975 0.0013]

Output values:

[0 10 0 -10 0]

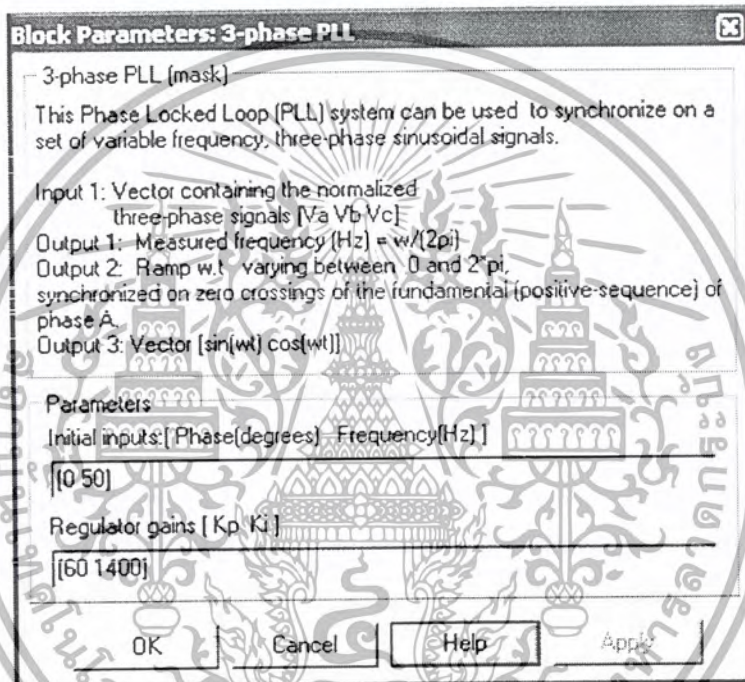
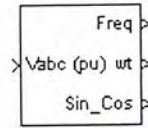
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรต่างๆ

Time values : ค่าเวลาที่มีการกำหนดค่าสัญญาณ

Output values : ค่าสัญญาณที่เวลาต่างๆ ตามค่าเวลา

### 3. 3-phase PLL



เฟสบล็อกนี้ จะใช้ในการซิงโครไนซ์กับความถี่ และสัญญาณแบบชานซ์ของระบบ

ค่าตัวแปรต่างๆ

Initial input : ค่าเริ่มต้นในการคำนวณ มีมุมเฟสอ้างอิง ซึ่งส่วนมากจะคิดของเฟส A ความถี่มูลฐานของสัญญาณแบบชานซ์ทั้งสามเฟส

Regulator gains : เป็นการปรับค่า PI Controller

Input : เวกเตอร์สัญญาณแรงดันปกติของทั้งสามเฟส [Va Vb Vc]

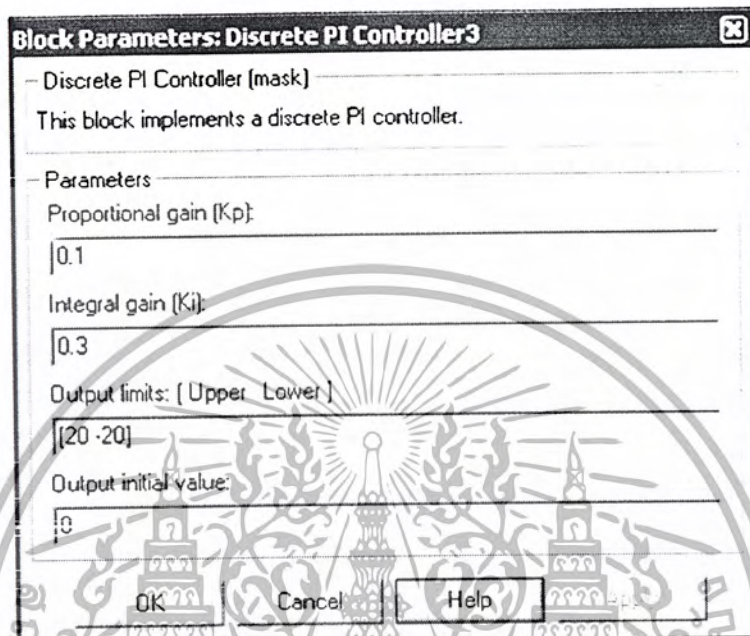
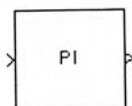
Output 1 : ความถี่ที่นำไปใช้

Output 2 : ค่า  $\omega t$  ที่แปรค่าระหว่าง 0 ถึง  $2\pi$  โดยการซิงโครไนซ์กับเฟส A (positive sequence)

Output 3 : เวกเตอร์  $[\sin(\omega t) \cos(\omega t)]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. PI controller



ค่าตัวแปรต่างๆ

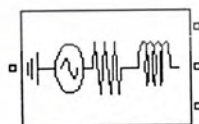
Proportional gain (Kp) : อัตราขยายแบบพรอพโทรชันแนล

Integral gain (Ki) : อัตราขยายแบบอินทิกรัล

Output limits : ค่าสูงสุดของเอาต์พุท

Output initial value : ค่าเริ่มต้นของเอาต์พุท

#### 5. Three-Phase Series RLC Branch



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Block Parameters: Lint**

Three-Phase Series RLC Branch (mask) (link)

This block implements a three-phase series RLC branch.

Parameters

Resistance R (Ohms):

0.05

Inductance L (H):

10e-3

Capacitance C (F):

inf

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

ค่าตัวแปรต่างๆ

Resistance R : ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

Inductance L : ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี)

Capacitance C : ค่าความเก็บประจุ (ฟารัด)

Measurement : สามารถเลือกวัด แรงดัน กระแสของอุปกรณ์ แรงดันเทอร์มินอลของทั้ง AC และ DC หรือเลือกวัดทั้งแรงดันและกระแสทั้งหมด

## 6. Sum



**Block Parameters: Sum**

Sum

Add or subtract inputs. Specify one of the following:

a) string containing + or - for each input port, | for spacer between ports (e.g. +++|++)

b) scalar >= 1. A value > 1 sums all inputs; 1 sums elements of a single input vector

Parameters

Icon shape: rectangular

List of signs:

| -+

Show additional parameters

OK Cancel Help Apply

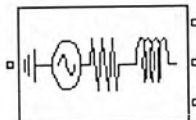
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรต่างๆ

Icon shape : ลักษณะของอุปกรณ์

List of signs : การกระทำทางคณิตศาสตร์

## 7. Three-Phase Source



**Block Parameters: Three-Phase Source**

Three-Phase Source (mask) (link)  
Three-phase voltage source in series with RL branch.

Parameters:

Phase-to-phase rms voltage (V):  
380

Phase angle of phase A (degrees):  
0

Frequency (Hz):  
50

Internal connection: Yg

Specify impedance using short-circuit level

Source resistance [Ohms]:  
0.1e-6

Source inductance [H]:  
0

OK Cancel Help Apply

ค่าตัวแปรต่างๆ

Phase-to-phase rms voltage : ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (โวลต์)

Phase angle of phase A : ค่ามุมเฟสเริ่มต้นของเฟส A (องศา) แรงดัน 3 เฟสที่สร้าง  
ขึ้นจะเป็นแบบ โพลซิทีฟซีแควนซ์ ซึ่งเฟส B และ C จะมีมุมตามหลัง  
120 และ 240 องศา ตามลำดับ

Frequency : ความถี่ (เฮิรต์)

Internal connection : ลักษณะการเชื่อมต่อภายใน

Y : การเชื่อมต่อแบบสตาร์ที่นิวทรัลลอย

Yn : การเชื่อมต่อแบบสตาร์ที่มีจุดต่อนิวทรัล ทำให้มี 4 จุดเชื่อมต่อ

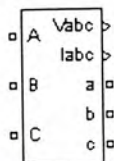
Yg : การเชื่อมต่อแบบสตาร์ที่มีกราวด์

Source resistance : ค่าความต้านทานภายในของแหล่งจ่าย (โอห์ม)

Source inductance : ค่าความเหนี่ยวนำภายในของแหล่งจ่าย (เฮนรี่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8. Three-Phase VI Measurement



**Block Parameters: load current**

Three-Phase VI Measurement (mask)

This block is used to measure three-phase voltages and currents in a circuit. When connected in series with a three-phase element, it return the three phase-to-ground voltages and line currents.

The block can output the voltages and currents in per unit values or in volts and amperes. Check the appropriate boxes if you want to output the voltages and currents in pu

Parameters

Voltage measurement

Use a label  
Signal label (use a From block to collect signal)

Voltage in pu  
Base voltage (Vrms phase-phase):

Current measurement

Use a label  
Signal label (use a From block to collect signal)

Currents in pu  
Base power (VA 3 phase)

Output signal:

OK Cancel Help Apply

ค่าตัวแปรต่างๆ

Voltage measurement : เครื่องมือในการวัดแรงดัน มีรูปแบบการวัด

No : เมื่อไม่ต้องการวัดแรงดัน

Phase-to-ground : วัดแรงดันเฟส

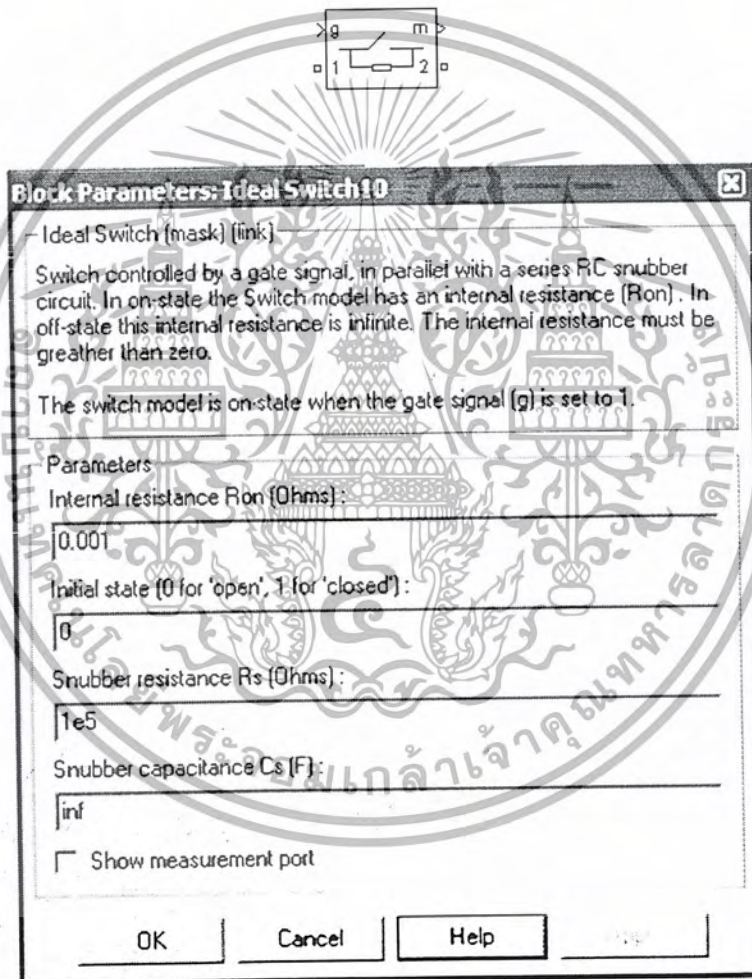
Phase-to-phase : วัดแรงดันไลน์

Signal label : เลือกเพื่อส่งค่าแรงดันไปยัง From ที่ระบุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Base voltage	: ใช้ในการคำนวณเพื่อแสดงค่าแรงดันแบบเปอร์เซ็นต์
Current measurement	: เครื่องมือในการวัดกระแส
Signal label	: เลือกเพื่อส่งค่ากระแสไปยัง From ที่ระบุ
Base power	: ใช้ในการคำนวณเพื่อแสดงค่ากระแสแบบเปอร์เซ็นต์
Inputs and Outputs	
A, B, C, a, b, c	: อินพุตและเอาต์พุต ตามลำดับ
Vabc	: แสดงค่าแรงดันของทั้ง 3 เฟส
Iabc	: แสดงค่ากระแสของทั้ง 3 เฟส

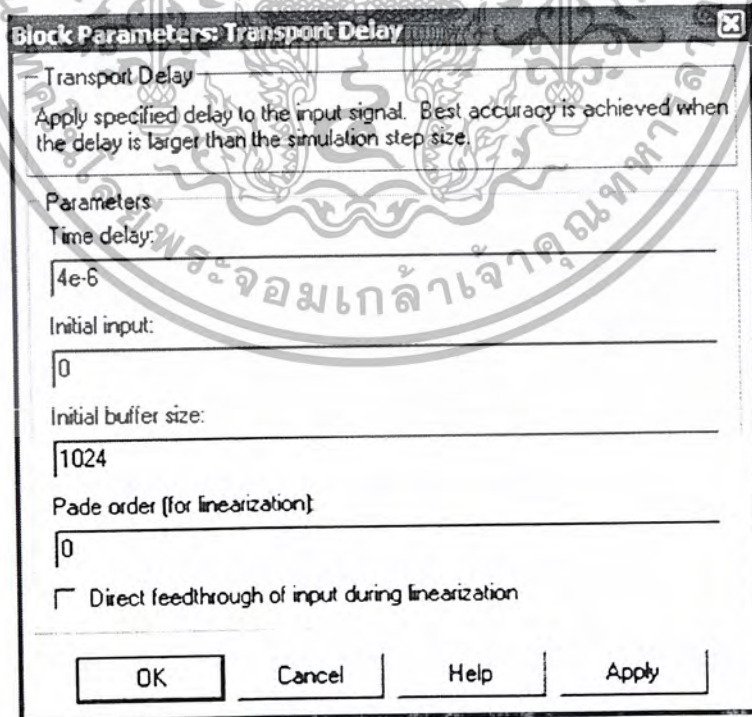
## 9. Ideal Switch



ค่าตัวแปรต่างๆ

Internal Resistance Ron	: ค่าความต้านทานภายในของสวิตช์ มีหน่วยเป็นโอห์ม ไม่สามารถกำหนดค่าเป็นศูนย์
Initial state	: สถานะเริ่มต้นของสวิตช์
0	: สวิตช์เปิด
1	: สวิตช์ปิด
Snubber resistance Rs	: ค่าความต้านทานวงจร snubber มีหน่วยเป็นโอห์ม สามารถตั้งค่าเป็นอินฟินิตี้ (inf) เพื่อตัดตัวต้านทานนี้ออกจากวงจร snubber
Snubber capacitance Cs	: ค่าความเก็บประจุวงจร snubber มีหน่วยเป็นฟารัด สามารถตั้งค่าเป็นศูนย์ เพื่อตัดตัวนี้ออกจากวงจร snubber
Show measurement port	: เลือกเพื่อเพิ่มเอาต์พุต เพื่อแสดงค่าแรงดันและกระแสของสวิตช์
Inputs and Outputs	
อินพุต (g)	: ควบคุมการเปิดปิดของสวิตช์
เอาต์พุต (m)	: แสดงค่าแรงดันและกระแสของสวิตช์

## 10. Transport Delay



**Block Parameters: Transport Delay**

Apply specified delay to the input signal. Best accuracy is achieved when the delay is larger than the simulation step size.

Parameters:

Time delay:

Initial input:

Initial buffer size:

Pade order (for linearization):

Direct feedthrough of input during linearization

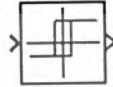
OK Cancel Help Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรต่างๆ

- Time delay : ค่าเวลาการจำลองที่หน่วงไว้ ก่อนเริ่มแสดงสัญญาณ ค่าที่ใช้ห้ามเป็นลบ
- Initial input : ค่าที่แสดงออกในช่วงที่มีการหน่วงเวลา
- Initial buffer side : ค่าหน่วยความจำภายในสำหรับค่าที่รวบรวม
- Pad order : กำหนดค่าเป็นศูนย์สำหรับอัตราขยายเป็น 1 ถ้าเป็นจำนวนเต็มบวก n แบบจำลองจะมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น

## 11. Relay



**Block Parameters: Relay**

Relay  
Output the specified 'on' or 'off' value by comparing the input to the specified thresholds. The on/off state of the relay is not affected by input between the upper and lower limits.

Parameters

Switch on point: 0

Switch off point: 0

Output when on: 1

Output when off: 0

Show additional parameters

Output data type mode: All ports same datatype

Enable zero crossing detection

Sample time (-1 for inherited): -1

OK Cancel Help Apply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวแปรต่างๆ

Switch on point

: ค่าเทรสโวลต์ที่ทำให้รีเลย์ทำงาน

Switch off point

: ค่าเทรสโวลต์ที่ทำให้รีเลย์ไม่ทำงาน

Output when on

: ค่าที่ได้เมื่อรีเลย์ทำงาน

Output when off

: ค่าที่ได้เมื่อรีเลย์ไม่ทำงาน

Show additional parameters

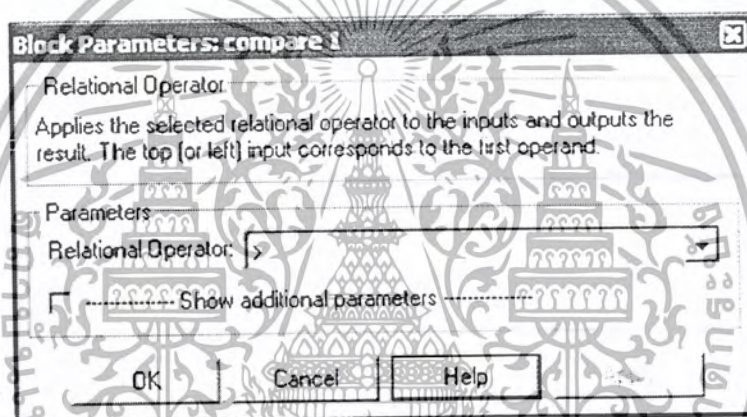
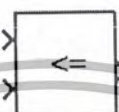
Output data type mode

: กำหนดชนิดและขนาดของค่าที่ได้

Enable zero crossing detection

: เลือกเพื่อที่จะทำให้สามารถตรวจจับจุดที่สวิทช์เปิดและปิด

## 12. Relational Operator

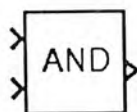


ค่าตัวแปรต่างๆ

Relational Operator:

- $==$  : เป็นจริงเมื่อสัญญาณแรกเท่ากับสัญญาณที่สอง
- $\sim =$  : เป็นจริงเมื่อสัญญาณแรกไม่เท่ากับสัญญาณที่สอง
- $<$  : เป็นจริงเมื่อสัญญาณแรกน้อยกว่าสัญญาณที่สอง
- $< =$  : เป็นจริงเมื่อสัญญาณแรกน้อยกว่าหรือเท่ากับสัญญาณที่สอง
- $> =$  : เป็นจริงเมื่อสัญญาณแรกมากกว่าหรือเท่ากับสัญญาณที่สอง
- $>$  : เป็นจริงเมื่อสัญญาณแรกมากกว่าสัญญาณที่สอง

## 13. Logical Operator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Block Parameters: Logical Operator**

Logical Operator

Logical operators. For a single input, operators are applied across the input vector. For multiple inputs, operators are applied across the inputs.

Parameters

Operator:

Number of input ports:

..... Show additional parameters .....

OK Cancel Help Apply

ค่าตัวแปรต่างๆ

Operator

- AND : เป็นจริงเมื่อสัญญาณทั้งหมดเป็นจริง
- OR : เป็นจริงเมื่อมีสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งเป็นจริง
- NAND : เป็นจริงเมื่อมีสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งเป็นเท็จ
- NOR : เป็นจริงเมื่อมีสัญญาณทั้งหมดเป็นเท็จ
- XOR : เป็นจริงเมื่อสัญญาณจริงเป็นจำนวนคี่
- NOT : เป็นจริงเมื่อสัญญาณเป็นเท็จ

Number of input ports : จำนวนสัญญาณป้อนเข้า

บรรณานุกรม

- [1] F. Z. Peng, J. Lai. (1997): "Dynamic Performance and Control of a Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverter", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 33, No. 3, May/June 1997.
- [2] G. Carrara, S. Gardella, M Marchesoni, (1992): "A New Multilevel PWM Method: A Theoretical Analysis", IEEE Trans. Power Electronics., vol. 7, No. 3, July 1992
- [3] H. Mori, K. Matsui, (2003): "Parallel-Connected Five-Level PWM Inverters", IEEE Trans. Power Electronic., vol 18, No. 1, January 2003.
- [4] J. Kikuchi, M. D. Manjrekar, T. A. Lipo, : "Performance Improvement of Half Controlled Three Phase PWM Boost Rectifier", University of Wisconsin-Madison
- [5] J. Rodriguze, (2002): "Multilevel Inverter: A Survey of Topologies, Control, and Application", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 49, No. 4, August 2002.
- [6] M. F. Escalante, J.-C. Vannier, A Arzande. (2002): "Flying Capacitor Multilevel Inverters and DTC Motor Drive Application" IEEE Trans. Ind. Electronics., vol. 49, No. 4, August 2002.
- [7] M. H. Rashid, (2004): "Power Electronics Circuits, and Applications" Pearson Education, Inc., 2004.
- [8] S. J. Watkins, L. Zhang, (2002): "Influence of Multilevel Sinusoidal PWM Schemes on The Performance of a Flying-Capacitor Inverter", in Proc. IEE Conf., No. 478, April 2002.
- [9] V. G. Agelidis, M Calais, (1998): "Application Specific Harmonic Performance Evaluation of Multicarrier PWM Technique.", IEEE 1998.
- [10] V. Soares, P. Verdelho. (2000): "An Instantaneous Active and Reactive Current Component Method for Active Filters" IEEE Trans. Power Electronic., vol. 15 No. 4, July 2000.
- [11] Y. Liang, (2000): "A Power-Line Conditioner Based on Flying-Capacitor Multilevel Voltage-Source Converter with Phase-Shift SPWM", IEEE Trans. Ind. Applicat., vo; . 36, No. 4, July/August 2000.