

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์สำหรับประยุกต์  
ในงานคุณภาพไฟฟ้า

FLYING CAPACITOR MULTILEVEL INVERTER FOR  
POWER QUALITY APPLICATIONS



T119437

โดย

นาย พศวัต

รักษัพิทยานนท์

นาย มหัส

วารุทัย

นาย รัสสะ

โพธิ์อยู่

นาย วรพงศ์

วงศ์ลิมอมรเลิศ

มย  
พ.ค. 2554

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

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 119437  
วัน,เดือน,ปี..... = 7 ส.ค. 2554

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์สำหรับประยุกต์  
ในงานคุณภาพไฟฟ้า

FLYING CAPACITOR MULTILEVEL INVERTER FOR  
POWER QUALITY APPLICATIONS



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สมภาพ ผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดหลายอิงคาปาซิเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้ในงาน  
คุณภาพไฟฟ้า

ผู้จัดทำ



นาย พศวัต      รัชฎ์พิทยานนท์  
นาย มนัส      วารุทัย  
นาย รัสสะ      โพรธิ์อยู่  
นาย วรพงศ์      วงศ์ลิ้มอมรเลิศ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. สมภาพ ผลไม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์สำหรับประยุกต์ในงานคุณภาพไฟฟ้า

นาย พศวัต      รักรักษ์พิทยานนท์  
นาย มนัส      วารุทัย  
นาย รัชสะ      โพธิ์อยู่  
นาย วรพงศ์      วงศ์ลิ้มอมรเลิศ  
ดร. สมภพ      ผลไม้      อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2553

## บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ สำหรับใช้เป็นเครื่องชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่าย โดยการสร้างเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ห้าระดับ ควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยเทคนิคพีดีบีบลิวเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟส ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาระบบควบคุมแบบป้อนกลับ รวมถึงออกแบบและจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากผลจำลองพบว่า D-STATCOM นั้นสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดได้ด้วยผลตอบสนองชั่วครู่ที่ดี ในส่วนการทดลองชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบ ต้องอาศัยการควบคุมแบบวงเปิดเท่านั้น ด้วยการปรับค่ามอดดูเลชันอินดิเคกซ์ (เนื่องด้วยข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากรที่มี) ผลของแรงดันเอาต์พุตจากการทดลองเกิดความไม่สมดุลของขนาดแรงดันเล็กน้อยเนื่องจากความแตกต่างเล็กน้อยของวงจรกำลังในแต่ละกิ่งเฟสของอินเวอร์เตอร์ จึงใช้การปรับค่ามอดดูเลชันอินดิเคกซ์ของแต่ละเฟสแยกเป็นอิสระจากกัน เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาและสามารถทำให้แรงดันเอาต์พุตสมดุลได้ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดได้และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้เท่ากับหนึ่ง

# FLYING CAPACITOR MULTILEVEL INVERTER FOR POWER QUALITY APPLICATIONS

Podsawat Rakpithayanon  
Manas Warutai  
Rassa Phoyoo  
Worrapong Wonglimamornlert  
Dr.Sompob Polmai Supervisor  
2010

## ABSTRACT

This thesis presents application of a flying-capacitor inverter as a distributed static var compensator (D-STATCOM). A five-level prototype inverter is constructed and the phase-shift pulse-width modulation technique is adopted for output voltage control. The close-loop control system is studied, designed and simulated. The simulation results show the proposed D-STATCOM is able to compensate for load reactive power with good transient response. In the experiment setup, only open-loop control of the system is implemented by manually adjust the modulation index (due to time and resource limitation). A small unbalance of output voltage is observed in the experimental results due to deviation in circuit parameters of each branch of the inverter. To compensate for this unbalance, each phase modulation index is independently adjusted so that the output voltage becomes balance. Under this condition the load reactive power compensation is carried out and the experimental results show that unity power factor can be obtained.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำ และการให้คำปรึกษาจาก ดร.สมภพ ผลไม้ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณและความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์เป็นอย่างมาก จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ นายสถิตย์พร เกตุสกุล อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยปทุมธานี, นายไพบูลย์ แก้ววรสูตร พี่บัณฑิตปริญญาโท, นายปฐมพงศ์ วิจิตร นักศึกษาปริญญาโท และพี่บัณฑิตปริญญาตรี กลุ่มโปรเจกอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ที่คอยช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทำให้งานของเราลุล่วงไปได้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องวิจัย Power Applications and Energy Conversion Research Laboratory (PEARL LAB) ห้อง ECC-407 ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่คอยร่วมทุกข์ร่วมสุข ให้กำลังใจและช่วยเหลือกัน ในตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ตลอดการศึกษาในระดับปริญญาตรี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และเป็นกำลังใจให้เราเสมอมา

สุดท้ายนี้กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติมิตรของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจจากครอบครัวในการให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้กลุ่มผู้จัดทำได้ทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้จัดทำขอมอบคุณงามความดีและประโยชน์จากปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ ให้แก่ผู้มีพระคุณของกลุ่มผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป .....	VII
สารบัญตาราง .....	XI
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย .....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	5
1.6 โครงสร้างปฏิญญาพันธ .....	5
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
บทที่ 2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับและ D-STATCOM.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	7
2.2.1 ตัวแปรที่สำคัญในการวิจัย.....	10
2.2.2 โครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์.....	10
2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ .....	15
2.3 เทคนิคการมอดดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ.....	15
2.3.1 เทคนิคการมอดดูเลตแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM).....	16
2.3.2 เทคนิคการมอดดูเลตแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (IPDPWM).....	17
2.4 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของ D-STATCOM .....	19
2.4.1 หลักการทำงานของ D-STATCOM .....	20

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุม D-STATCOM และการจำลอง การทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSCAD/EMTDC.....	22
3.1 บทนำ .....	22
3.2 ระบบควบคุมสำหรับ D-STATCOM .....	22
3.3 วิเคราะห์ระบบควบคุมสำหรับ D-STATCOM.....	26
3.3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบรวม.....	27
3.3.2 วิเคราะห์ระบบควบคุมโดยใช้กราฟเส้นทางเดินของราก .....	28
3.3.2.1 เมื่อซีโรมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง -183 .....	29
3.3.2.2 เมื่อซีโรมีค่าน้อยกว่า -183.....	30
3.4 การจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 3 เฟส.....	31
3.5 การจำลองการใช้งานอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์เป็น D-STATCOM .....	33
3.6 ผลการจำลองการชดเชยกำลังไฟฟ้าย้อนที่ฟอง D-STATCOM .....	36
3.6.1 ผลการจำลองที่ค่าซีโรเท่ากับ -100.....	36
3.6.2 ผลการจำลองที่ค่าซีโรเท่ากับ -1000.....	38
3.6.3 ผลการจำลองที่ค่าซีโรเท่ากับ -5000.....	41
3.7 สรุปผลการจำลองการชดเชยกำลังไฟฟ้าย้อนที่ฟอง D-STATCOM.....	44
บทที่ 4 เครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลองและผลการทดลอง.....	45
4.1 บทนำ .....	45
4.2 โครงสร้างเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง.....	45
4.2.1 วงจรกำลังของเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง .....	45
4.2.2 วงจรควบคุมของเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง.....	47
4.3 วงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์.....	48
4.4 วงจรดิจิทัลเฟสล็อกกลุ๊ป .....	51
4.5 วงจรตรวจจับแรงดันและกระแส .....	53
4.5.1 วงจรขยายผลต่าง .....	55
4.5.2 วงจรขยายกลับเฟส .....	56
4.5.3 วงจรตามแรงดัน หรือวงจรบัฟเฟอร์ .....	57
4.6 การสร้างสัญญาณเกิดจาก FPGA.....	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 การสร้างสัญญาณแชนเปลิ่งไซน์จาก dsPIC.....	62
4.8 การทดลองและผลการทดลองสร้างแรงดันต้านขาออกของ อินเวอร์เตอร์.....	64
4.9 การทดลองและผลการทดลองในส่วนของ D-STATCOM.....	65
บทที่ 5สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 บทนำ.....	75
5.2 อุปสรรคและข้อเสนอแนะ.....	76
5.2.1 อุปสรรค.....	76
5.2.2 แนวทางแก้ไข.....	76
บรรณานุกรม.....	77
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	82
ภาคผนวก ค.....	85
ภาคผนวก ง.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	95

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การทำงานพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ .....	1
1.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ประเภทอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ .....	2
1.3 ผังงาน (Flow chart) ขั้นตอนการศึกษาปริญญาโท .....	6
2.1 แผนภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ .....	8
2.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ประเภทของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ .....	9
2.3 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 1 เฟส .....	11
2.4 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 3 เฟส .....	12
2.5 ตัวอย่างการสร้างระดับแรงดันด้านขาออกบางสถานะ .....	14
2.6 รูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์ .....	15
2.7 ตัวอย่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ .....	16
2.8 ตัวอย่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ .....	18
2.9 ไดอะแกรมของ D-STATCOM 3 เฟส .....	19
2.10 วงจรสมมูลย์ของ D-STATCOM .....	20
2.11 โหมดการทำงานของ D-STATCOM .....	21
3.1 โครงสร้าง D-STATCOM .....	22
3.2 แกนอ้างอิง D-STATCOM .....	23
3.3 บล็อกไดอะแกรมสำหรับระบบควบคุม D-STATCOM .....	25
3.4 บล็อกไดอะแกรมของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ .....	28
3.5 กราฟเส้นทางเดินของรากเมื่อซีโรมีค่าเท่ากับ -100 ( $K_p = 100, K_f = 10000$ ) .....	29
3.6 กราฟเส้นทางเดินของรากเมื่อซีโรมีค่าเท่ากับ -1000 ( $K_p = 100, K_f = 100000$ ) .....	30
3.7 แบบจำลองทางไฟฟ้าของวงจรฟลายอิงคาปาซิเตอร์ แบบ 5 ระดับแรงดัน .....	32
3.8 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิค PSPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส .....	32
3.9 ผลการจำลองแรงดันของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟสโดยใช้เทคนิคการมอดดูเลตแบบ PSPWM .....	33
3.10 แบบจำลองทางไฟฟ้าของ D-STATCOM .....	34

## สารบัญญรูป (ต่อ)

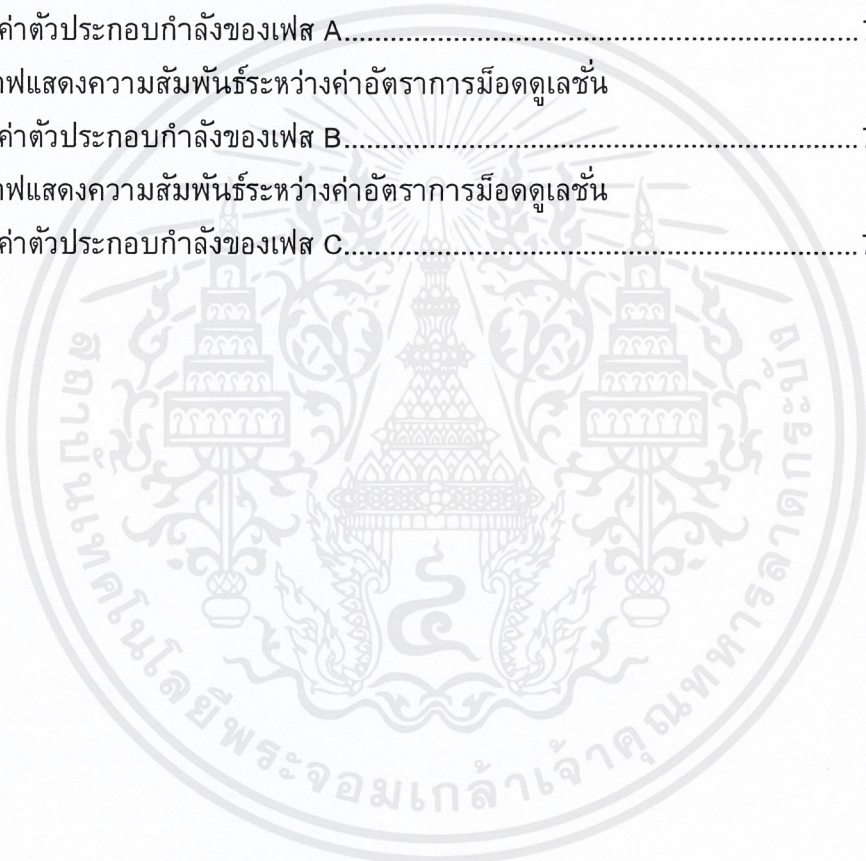
รูปที่	หน้า
3.11 แบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมการสร้างแรงดัน FCI .....	35
3.12 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์และสัญญาณเลือกแคเรียร์ของ เทคนิค PSPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ .....	35
3.13 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ -100 .....	36
3.14 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่ $K_p = 100$ และ $K_i = 10000$ .....	37
3.15 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่ $K_p = 500$ และ $K_i = 50000$ .....	38
3.16 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ -1000 และ $K_p = 100$ .....	38
3.17 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่ $K_p = 100$ และ $K_i = 100000$ .....	39
3.18 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ -1000 และ $K_p = 500$ .....	40
3.19 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่ $K_p = 500$ และ $K_i = 500000$ .....	41
3.20 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ -5000 และ $K_p = 100$ .....	41
3.21 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่ $K_p = 100$ และ $K_i = 500000$ .....	42
3.22 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ 5000 และ $K_p = 500$ .....	43
3.23 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่ $K_p = 500$ และ $K_i = 2500000$ .....	43
4.1 วงจรกำลังพื้นฐานของเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลองแบบ 3 เฟส .....	46
4.2 วงจรกำลังเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง .....	46
4.3 ของวงจรควบคุมเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง .....	47
4.4 บล็อกไดอะแกรมการทำงานโดยรวมของเครื่องต้นแบบ FCI .....	48
4.5 วงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ และดิจิตอลเฟสล็อกกรุป .....	48
4.6 วงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ .....	49
4.7 สัญญาณด้านขาออกของวงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ .....	49
4.8 แผนภาพเฟสเซอร์การเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณไซน์เฟส B กับสัญญาณไซน์เฟส C .....	50
4.9 วงจรดิจิตอลเฟสล็อกกรุป .....	51
4.10 แสดงความถี่ด้านขาเข้าและด้านขาออกของดิจิตอลเฟสล็อกกรุป โดยการต่อวงจรแบบ EXOR .....	51
4.11 วงจรยกระดับแรงดัน .....	53
4.12 ACS712ELCTR-30A-T Hall Effect Current Sensor .....	54
4.13 วงจรยกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดกระแส .....	54
4.14 วงจรยกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดแรงดัน .....	54
4.15 วงจรขยายผลต่าง .....	55
4.16 วงจรขยายกลับเฟส .....	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 วงจรตามแรงดัน หรือวงจรบัฟเฟอร์.....	57
4.18 วงจรตรวจวัดแรงดันระบบ กระแสระบบ และกระแสอินเวอร์เตอร์.....	57
4.19 แรงดันเฟสทั้งสามเฟสเมื่อลดแรงดันเหลือ $800\text{mV}_{\text{rms}}$ .....	58
4.20 สัญญาณอนาล็อกขาออกจากวงจรจับแรงดัน.....	58
4.21 สัญญาณสามเฟสจาก Hall Effect Current Sensor ที่กระแส $2\text{ A}_{\text{rms}}$ .....	59
4.22 สัญญาณอนาล็อกขาออกจากวงจรจับกระแส.....	59
4.23 แสดงการสร้างสัญญาณแคเรียร์แบบ PSPWM ของวงจรรนับ (Counter) ทั้ง 4 ตัว .....	60
4.24 บล็อกไดอะแกรมวงจรมอดูเลตใน 1 เฟสด้วย FPGA ที่ใช้เทคนิค PSPWM ...	61
4.25 สัญญาณเกตที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่ $m_a = 1.0$ .....	62
4.26 ผังงาน (Flow chart) การคำนวณค่าการมอดูเลตและส่งข้อมูล สัญญาณควบคุมต่างๆของ dsPIC .....	63
4.27 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกรูปคลื่น $v_{A0}$ (เส้นบน) และ $v_{AB}$ (เส้นล่าง) จาก FCI ที่ใช้เทคนิค PSPWM ที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.8$ ที่สภาวะ No-load.....	65
4.28 ไดอะแกรมการทำงานโดยรวมของการทำงานของ D-STATCOM.....	66
4.29 แรงดันเฟสของ FCI หลังจากผ่าน Low pass filter ก่อนเชื่อมต่อ อินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบ ที่ $m_a = 0.73$ (เฟส a), $0.75$ (เฟส b), $0.79$ (เฟส c) (แต่ละเฟสไม่เท่ากัน).....	66
4.30 แรงดันที่ตัวเก็บประจุปลายอิ่งและแรงดัน DC-link ขณะ Start up เครื่อง FCI... 67	67
4.31 รูปคลื่นของแรงดันระบบ $V_{S,AN}$ , กระแสระบบ $I_{S,A}$ (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์ $I_{INV,A}$ (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.73$ .....	68
4.32 รูปคลื่นของแรงดันระบบ $V_{S,BN}$ , กระแสระบบ $I_{S,B}$ (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์ $I_{INV,B}$ (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่ $m_b = 0.75$ .....	68
4.33 รูปคลื่นของแรงดันระบบ $V_{S,CN}$ , กระแสระบบ $I_{S,C}$ (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์ $I_{INV,C}$ (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่ $m_c = 0.79$ .....	69
4.34 รูปคลื่นของแรงดันระบบ $V_{S,AN}$ , กระแสระบบ $I_{S,A}$ (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์ $I_{INV,A}$ (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่ $m_a = 0.80$ .....	70

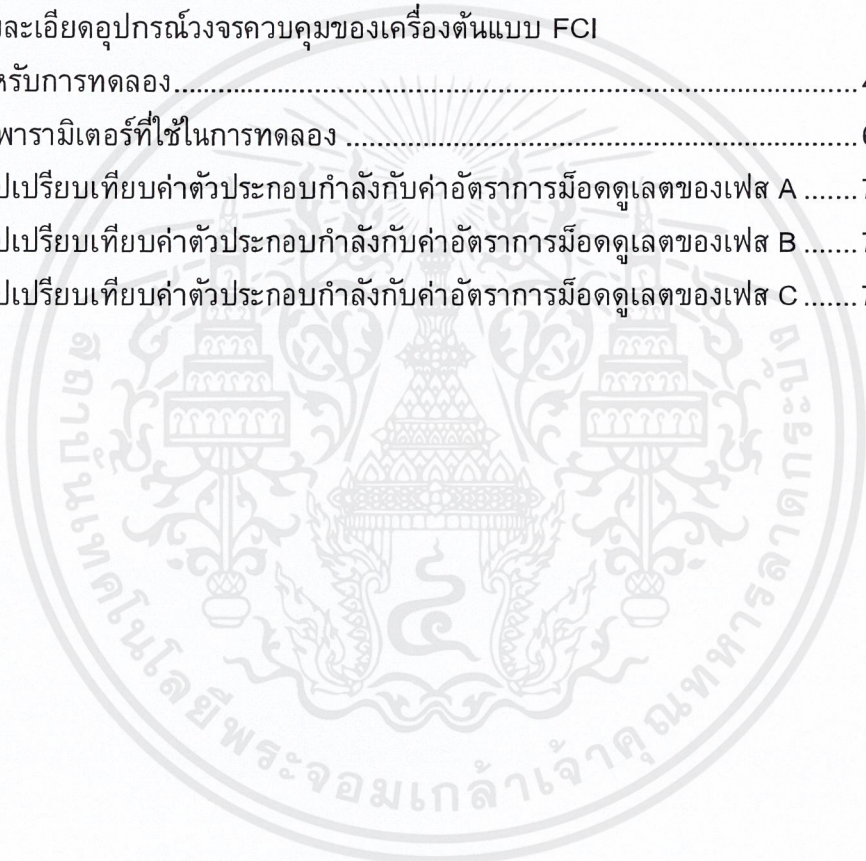
## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 รูปคลื่นของแรงดันระบบ $V_{S,BN}$ , กระแสระบบ $I_{S,B}$ (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์ $I_{INV,B}$ (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่ $m_b = 0.82$ .....	70
4.36 รูปคลื่นของแรงดันระบบ $V_{S,CN}$ , กระแสระบบ $I_{S,C}$ (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์ $I_{INV,C}$ (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่ $m_c = 0.86$ .....	71
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการมอดดูเลชันกับค่าตัวประกอบกำลังของเฟส A.....	73
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการมอดดูเลชันกับค่าตัวประกอบกำลังของเฟส B.....	73
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการมอดดูเลชันกับค่าตัวประกอบกำลังของเฟส C.....	74



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การทำงานของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (1 เฟส).....	13
2.2 การหาค่ามอดดูเลตโดยวิธีการควบคุมต่างๆ [5].....	19
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ D-STATCOM .....	28
3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของ FCI ด้วยเทคนิค PSPWM.....	31
3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของ D-STATCOM.....	34
4.1 รายละเอียดอุปกรณ์วงจรควบคุมของเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง.....	45
4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....	64
4.3 สรุปเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังกับค่าอัตราการมอดดูเลตของเฟส A .....	71
4.4 สรุปเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังกับค่าอัตราการมอดดูเลตของเฟส B .....	72
4.5 สรุปเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังกับค่าอัตราการมอดดูเลตของเฟส C .....	72

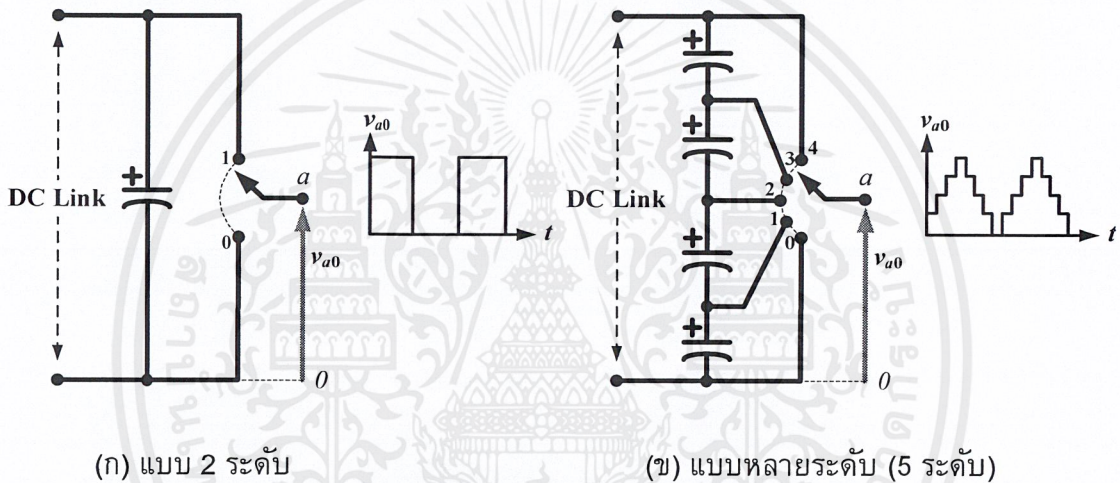


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ เริ่มมีความต้องการใช้อุปกรณ์กำลังสูงซึ่งต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง โดยแรงดันไฟฟ้าที่สูงเป็นระดับกิโลโวลต์ จึงเป็นการยากที่จะนำอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Power semiconductor) เพียงตัวเดียวมาต่อโดยตรงกับระบบ (22, 33 หรือ 69 kV) ดังนั้นจึงได้นำวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel inverter) เข้ามาแทนวงจรอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ (Two-level inverter) [1] และวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับนี้ยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าได้ เช่น D-STATCOM เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การทำงานพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

ในอินเวอร์เตอร์แบบ 2 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.1(ก) เมื่อนำมาใช้ที่ระดับแรงดันสูงทำให้ต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ

1. ในด้านของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับจะให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเป็นสี่เหลี่ยม

2. เกิดการสูญเสียที่สวิตช์กำลัง (Switching loss) มาก

3. แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมีความผิดเพี้ยนมาก และ  $dv/dt$  สูง

4. กระแสด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนมาก

5. ต้องนำสวิตช์กำลังมาอนุกรมกันเพื่อเพิ่มอัตราการทนแรงดันให้เพิ่มขึ้น ทำให้

การควบคุมการขับนำสวิตช์กำลังให้ทำงานพร้อมกันทำได้ยากที่ความถี่สูง เนื่องจากคุณสมบัติของอุปกรณ์สวิตช์กำลังในแต่ละตัวจะมีคุณสมบัติ (Turn on-off characteristic) ที่ต่างกันเล็กน้อยจากกระบวนการผลิตจากโรงงาน

ดังนั้นเมื่อนำอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.1(ข) มาใช้ที่ระดับแรงดันสูงทำให้มีข้อได้เปรียบ คือ

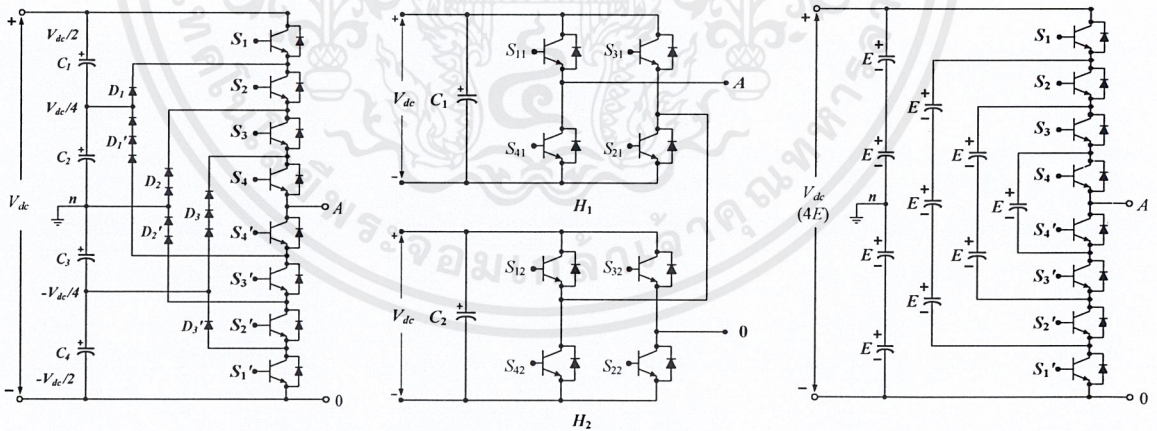
1. ในด้านของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จะให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงไซน์
2. แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมีความผิดเพี้ยนน้อย และ  $dv/dt$  ต่ำ
3. กระแสด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนน้อย
4. สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานที่สวิตซ์ซึ่งความถี่ต่ำ

อย่างไรก็ตาม การใช้งานอินเวอร์เตอร์หลายระดับก็มีข้อจำกัดบางประการ คือ

1. มีแหล่งจ่าย หรือตัวเก็บประจุจำนวนมาก
  - ส่งผลให้ต้องจัดหาแหล่งกำเนิดแรงดันจำนวนมาก
  - การรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุทำได้ยาก
2. เนื่องจากมีสวิตช์กำลังจำนวนมากทำให้ต้องใช้สัญญาณเกตจำนวนมาก

อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ได้รับการวิจัยและศึกษาเป็นอย่างมากในขณะนี้ มี 3 ชนิด คือ

- อินเวอร์เตอร์ไดโอด-แคลมป์ (Diode-clamped inverter, DCI)
- อินเวอร์เตอร์คาสเคดมัลติเซลล์ (Cascaded multi-cell inverter, CMI)
- อินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor inverter, FCI)



(ก) ไดโอด-แคลมป์ (DCI)

(ข) คาสเคดมัลติเซลล์ (CMI)

(ค) ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FCI)

รูปที่ 1.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ประเภทอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.2 เป็นลักษณะการต่อใช้งานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับซึ่งการต่อวงจรแต่ละรูปแบบมีข้อจำกัดและข้อเด่น-ข้อด้อย ต่างกัน คือ

1. อินเวอร์เตอร์ชนิดไดโอด-แคลมป์ (DCI) ในรูปที่ 1.2 (ก)
  - ไม่สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้
  - มีคอมมอนดีซีลิงค์
  - การสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุที่ดีซีลิงค์ทำได้ยาก (รูปแบบการสวิตช์มีจำกัด)
2. อินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคดมัลติเซลล์ (CMI) ในรูปที่ 1.2 (ข)
  - สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้
  - ไม่มีคอมมอนดีซีลิงค์
  - มีตัวเก็บประจุแยกอิสระในแต่ละเซลล์ จึงสิ้นเปลืองแหล่งจ่ายอิสระหลายแหล่ง
3. อินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FCI) ในรูปที่ 1.2 (ค)
  - สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้
  - มีคอมมอนดีซีลิงค์
  - สิ้นเปลืองตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาดใหญ่

หากมองในแง่ของการนำไปใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับอินเวอร์เตอร์แบบ FCI มีข้อได้เปรียบ กล่าวคือ มีแหล่งจ่าย DC link เพียงแหล่งจ่ายเดียว อีกทั้งสามารถรักษาแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้เองโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะเพิ่มขึ้น[3]

จากข้อจำกัดด้านจำนวนของตัวเก็บประจุที่มีจำนวนมากและความกังวลเรื่องการรักษาสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุ ทำให้อินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมน้อยกว่าอินเวอร์เตอร์แบบอื่นๆ อย่างไรก็ตามหากสามารถแก้ปัญหาเรื่องการรักษาสมดุลพลังงานของตัวเก็บประจุได้ โดยไม่ต้องมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้น อินเวอร์เตอร์นี้ก็อาจจะได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในอนาคต

ในการศึกษาเทคนิคการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ที่ผ่านมา ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่าง 2 เทคนิคด้วยกันคือ เทคนิคพีดับเบิลเอ็มแบบ เลื่อนเฟสแคเรียร์ (Phase-shift Pulse Width Modulation, PSPWM) และเทคนิคพีดับเบิลเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (Level-shift Pulse Width Modulation, IPDPWM) ซึ่งผลของการศึกษาดังกล่าว ทำให้ได้ข้อสรุปว่า เทคนิค PSPWM มีความสามารถในการรักษาสมดุลแรงดันของพลังงานที่จ่ายเข้าและออก ที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ได้ เนื่องจากการเลื่อนเฟสของสัญญาณแคเรียร์ ทำให้สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานด้วยวัฏจักรการทำงานเท่าๆกัน ในขณะที่เทคนิค IPDPWM อาศัยการเลื่อนระดับของแคเรียร์ทำให้วัฏจักรการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวไม่เท่ากัน จึงไม่สามารถรักษาสมดุลของพลังงานที่จ่ายเข้าและออกที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์ไว้ได้ในงานคุณภาพของแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ พบว่าเทคนิคมอดูเลตแบบ IPDPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะให้แรงดันด้านขาออกที่มีค่า THD<sub>v</sub> ต่ำกว่าเทคนิค PSPWM ในทุกๆย่านของการมอดดูเลต โดยเฉพาะในย่านมอดดูเลตต่ำ พบว่าเทคนิค IPDPWM ให้แรงดันด้านขาออกที่มีค่า THD<sub>v</sub> ที่ต่ำกว่าเทคนิค PSPWM อย่างมาก แต่ที่ย่านมอดดูเลตสูงกว่า 0.6 เทคนิค PSPWM จะให้แรงดันด้านขาออกที่มี THD<sub>v</sub> ต่ำใกล้เคียงกับเทคนิค IPDPWM มากขึ้น[3]

เนื่องจากกิจกรรมการผลิตในอุตสาหกรรมหนักอาจสร้างปัญหาทางไฟฟ้า เช่น ปัญหาแรงดันไม่สมดุล ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า และแรงดันกระพริบ (Flicker) ในระบบไฟฟ้ากำลังผู้ให้บริการไฟฟ้าอาจต้องรับมือกับปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ ตัวประกอบกำลังต่ำ หรือแรงดันไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพ การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Reactive Power) สามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ [8]

ดังนั้นในปฏิญญาพันธันี่จึงเป็นการนำอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ มาประยุกต์ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับ D-STATCOM โดยได้เลือกใช้เทคนิค PSPWM เป็นเทคนิคการมอดดูเลต เพราะเทคนิคนี้สามารถรักษาแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้ อีกทั้งแรงดันด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนจากรูปไซน์น้อยในย่านการใช้งาน

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมการทำงาน D-STATCOM โดยใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า

## 1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ปฏิญญาพันธันี่นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมการทำงาน ของ D-STATCOM โดยเสนอทฤษฎีการวิเคราะห์ระบบควบคุมโดยใช้กราฟเส้นทางเดินของราก เพื่อออกแบบพารามิเตอร์ในระบบควบคุม นำผลการศึกษามาจำลองการทำงานในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นแนวทางที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ใช้งานเป็น D-STATCOM เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมการทำงานของ D-STATCOM

1.4.2 จำลองการทำงานของ D-STATCOM ในโปรแกรม PSCAD/EMTDC

1.4.3 ศึกษาและจัดทำวงจรตรวจจับกระแสและแรงดัน เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของ D-STATCOM

1.4.4 ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างระบบควบคุมการทำงานของ D-STATCOM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.5 ประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ มาใช้งานเป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับ D-STATCOM เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า

1.4.6 พัฒนาราร์ดแวร์เดิมให้ดียิ่งขึ้น

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

เพื่อหาเทคนิคการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานใน D-STATCOM และนำระบบนี้ไปใช้ปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้น

## 1.6 โครงสร้างปฏิญานิพนธ์

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟสและเลื่อนระดับสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เพื่อที่จะหาเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานใน D-STATCOM โดยรายละเอียดที่จะกล่าวถึงในปฏิญานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็น 6 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

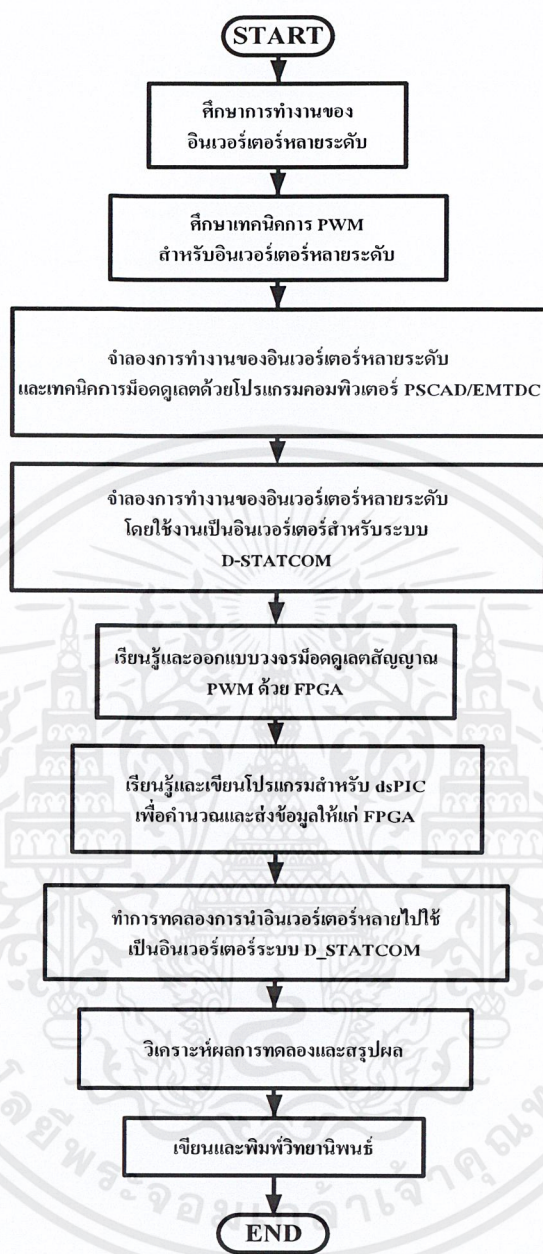
บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบต่างๆ และเทคนิคการมอดูเลตพีดับบลิวเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับและทฤษฎีเบื้องต้นของ D-STATCOM

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีของระบบควบคุมของ D-STATCOM การวิเคราะห์ระบบควบคุมเพื่อออกแบบพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุม และผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์

บทที่ 4 กล่าวถึงโครงสร้างของเครื่องต้นแบบ อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ และผลการทดลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์และ D-STATCOM

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา



รูปที่ 1.3 ผังงาน (Flow chart) ขั้นตอนการศึกษาปริญญาโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### อินเวอร์เตอร์หลายระดับและ D-STATCOM

#### 2.1 บทนำ

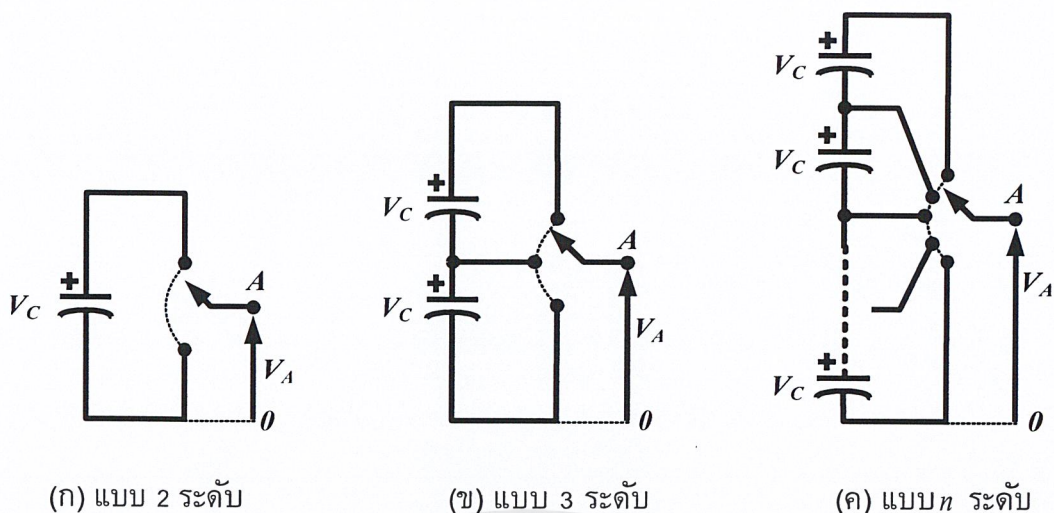
ในปริณิญาฉบับนี้ในบทนี้นำเสนอทฤษฎีเบื้องต้นและหลักทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบต่างๆ เช่นอินเวอร์เตอร์ไดโอด-แคลมป์ (Diode-clamped inverter, DCI) อินเวอร์เตอร์คาสเคดมัลติเซลล์ (Cascaded multicell inverter, CMI) อินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor inverter, FCI) เป็นต้น [1-2] อีกทั้งยังได้นำเสนอเทคนิคการมอดดูเลตแบบต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมสวิตช์กำลังสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ [2]

ทฤษฎีเบื้องต้นและหลักการทำงานของ D-STATCOM เพื่อการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อลดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จ่ายโดยแหล่งจ่าย

#### 2.2 อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

อินเวอร์เตอร์หลายระดับจะอาศัยการต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง เพื่อใช้ในการแบ่งแรงดันและเพิ่มจำนวนระดับของสัญญาณด้านขาออกระหว่างสายมีลักษณะเข้าใกล้เคียงไซน์มากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ การอนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตช์กำลังดังกล่าว ทำให้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีความสามารถในการทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

ในการสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับในครั้งแรกถูกสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์แบบ 3 ระดับ ต่อมามีการเพิ่มจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์ ทำให้แรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่ได้มีระดับเป็นขั้นบันไดมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยลดฮาร์มอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมก็ทำได้ยากขึ้นเช่นเดียวกันเนื่องจากสวิตช์กำลังที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์หลายระดับมีจำนวนมาก



รูปที่ 2.1 แผนภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

จากรูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยในที่นี้อุปกรณ์สวิตช์กำลังถูกสมมุติให้เป็นสวิตช์ในอุดมคติ อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) จะสามารถสร้างแรงดันได้ 2 ค่า เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง ซึ่งจุดอ้างอิงในที่นี้คือ ขาลบของตัวเก็บประจุ (Negative DC-link) ขณะที่อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) จะสามารถสร้างแรงดันได้ 3 ค่า เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงขณะที่อินเวอร์เตอร์  $n$  ระดับ ดังรูปที่ 2.1 (ค) จะสามารถสร้างแรงดันได้  $n$  ค่าเช่นเดียวกัน

คุณสมบัติที่น่าสนใจของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

1. ในด้านของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์จะให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงไซน์

2. แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมีความผิดเพี้ยนน้อย และ  $dv/dt$  ต่ำ

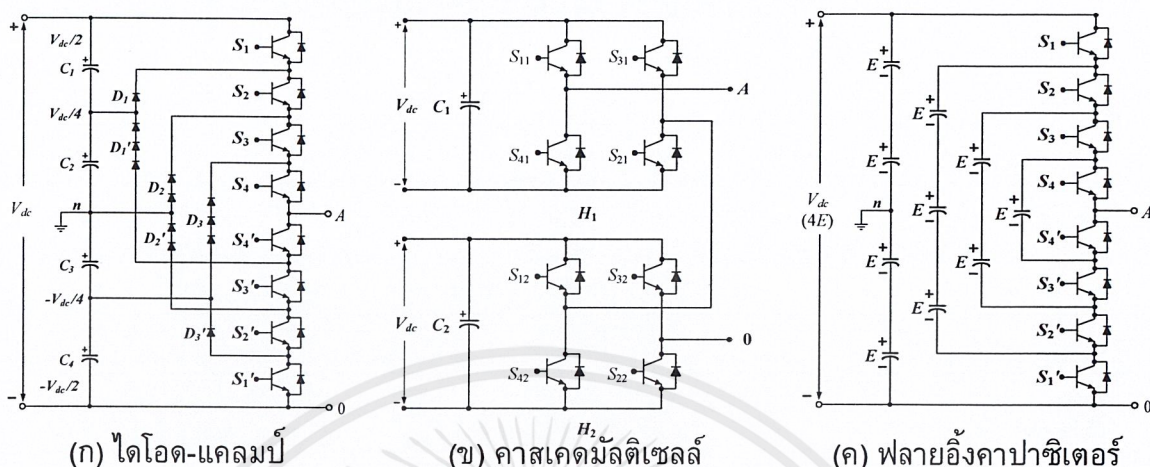
3. กระแสด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนน้อย

4. สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานที่สวิตซ์ซึ่งความถี่ต่ำ

ในการประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับมีหลากหลายรูปแบบทั้งใช้เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ แก๊ซคาร์บอนิกส์ และปรับปรุณค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า หรือใช้เป็นตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าแอคทีฟและรีแอคทีฟให้กับภาระทางไฟฟ้าแทนระบบเป็นต้น

อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ได้รับการวิจัยและศึกษากันโดยทั่วไป ในขณะนี้มี 3 ชนิด คืออินเวอร์เตอร์ไดโอด-แคลมป์ (Diode-clamped inverter, DCI) อินเวอร์เตอร์คาสเคดมัลติเซลล์ (Cascaded multicell inverter, CMI) อินเวอร์เตอร์ฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor inverter, FCI) โดยวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีส่วนประกอบหลัก คือ อุปกรณ์สวิตช์กำลังจำนวนมากและมีตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายอิสระจำนวนมาก เพื่อที่จะทำการสร้าง

ระดับแรงดันเป็นรูปคลื่นขั้นบันไดโดยค่าแรงดันที่ได้นั้นเกิดจากการจัดเรียงระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายอิสระ ทำให้ได้ค่าระดับแรงดันมีค่าที่สูงขึ้น[2-3]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ประเภทของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ

จากรูปที่ 2.2 เมื่อพิจารณาอินเวอร์เตอร์หลายระดับในแต่ละประเภทจากลักษณะการต่อวงจร ทำให้สามารถเห็นข้อจำกัด และข้อเด่น-ข้อด้อย แตกต่างกันได้

1. อินเวอร์เตอร์ชนิดไดโอด-แคลมป์ (DCI) ในรูปที่ 1.2 (ก)

- ไม่สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้
- มีคอมมอนดีซีลิงค์
- การสมมูลพลังงานที่ตัวเก็บประจุที่ดีซีลิงค์ทำได้ยาก (รูปแบบการสวิตช์มีจำกัด)

2. อินเวอร์เตอร์ชนิดคาสเคดมีลติเซิลล์ (CMI) ในรูปที่ 1.2 (ข)

- สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้
- ไม่มีคอมมอนดีซีลิงค์
- มีตัวเก็บประจุแยกอิสระในแต่ละเซลล์ จึงสิ้นเปลืองแหล่งจ่ายอิสระหลายแหล่งเช่นกัน

3. อินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (FCI) ในรูปที่ 1.2 (ค)

- สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์กำลังได้
- มีคอมมอนดีซีลิงค์
- สิ้นเปลืองตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาดใหญ่

หากมองในแง่ของการนำไปใช้งานกับอินเวอร์เตอร์เพื่อไปต่อเป็น D-STATCOM อินเวอร์เตอร์แบบ FCI มีข้อได้เปรียบ กล่าวคือ ใช้แหล่งจ่าย DC link เพียงแหล่งจ่ายเดียว อีกทั้งยังสามารถรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้เองโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะเพิ่มขึ้น จากข้อได้เปรียบที่กล่าวไว้ข้างต้นของ FCI ในปริญญาานิพนธ์นี้จึงได้เลือกวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor inverter, FCI) มาทำการศึกษาและวิจัย

### 2.2.1 ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิจัย

$m$	คือ จำนวนระดับของแรงดันเมื่อเทียบกับขั้วลบของดีซีลิงค์ (Voltage level)
$SW$	คือ จำนวนสวิตช์กำลัง(Power semi-conductor)
$C$	คือ จำนวนตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์ (Flying capacitor)
$k$	คือ จำนวนระดับของแรงดันระหว่างสาย(Line voltage)
$p$	คือ จำนวนระดับของแรงดันเฟสของภาวะไฟฟ้า 3 เฟส(Phase voltage)
$f_m$	คือ ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency)
$f_{cr}$	คือ ความถี่แคเรียร์ (Carrier frequency)
$f_{sw,dev}$	คือ ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ซิ่ง (Frequency switching device)
$f_{sw,inv}$	คือ ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching frequency of inverter)
$m_f$	คือ อัตราส่วนระหว่าง $f_{cr}/f_m$ (Frequency modulation index)
$m_a$	คือ อัตราการมอดูเลตระหว่างสัญญาณมูลฐานและสัญญาณแคเรียร์
$v_{cr}$	คือ แรงดันสัญญาณแคเรียร์ หรือแรงดันสัญญาณแคเรียร์
$v_m$	คือ แรงดันสัญญาณมูลฐาน หรือแรงดันสัญญาณไซน์
$\hat{V}_{cr}$	คือ แรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณแคเรียร์ หรือแรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณแคเรียร์
$\hat{V}_m$	คือ แรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณมูลฐาน หรือแรงดันแอมพลิจูดของสัญญาณไซน์

### 2.2.2 โครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์หรือเรียกว่าคาปาซิเตอร์แคลมป์ (Capacitor-clamped) แสดงดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 2 ส่วน คือตัวเก็บประจุ (Capacitor) และอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Power Semi-conductor) โดยตัวเก็บประจุนอกสุดเรียกว่า คอมมอนดีซีลิงค์ (Common DC link) เป็นตัวสะสมพลังงาน ขณะที่ตัวเก็บประจุก่อตัวอื่นๆ เรียกว่า ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์ (Flying capacitor) เป็นตัวสร้างแรงดันระดับต่างๆ โดยแรงดันที่ได้ในแต่ละระดับ เกิดจากผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์แต่ละตัว ที่ต่ออนุกรมกันในวงนั้น ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์ในแต่ละตัว คือ  $1E$  โดยอินเวอร์เตอร์ที่ศึกษาในปริญญาานิพนธ์นี้เป็นอินเวอร์เตอร์ประเภท 5 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งสมการพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์สามารถสรุปเป็นสมการ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพิจารณาองค์ประกอบของวงจรใน 1 leg ดังแสดงในรูปที่ 2.3

$$SW = (m-1) \times 2 \quad (2.1)$$

$$C = \frac{(m-1) \times (m-2)}{2} \quad (2.2)$$

$$m = \frac{SW}{2} + 1 \quad (2.3)$$

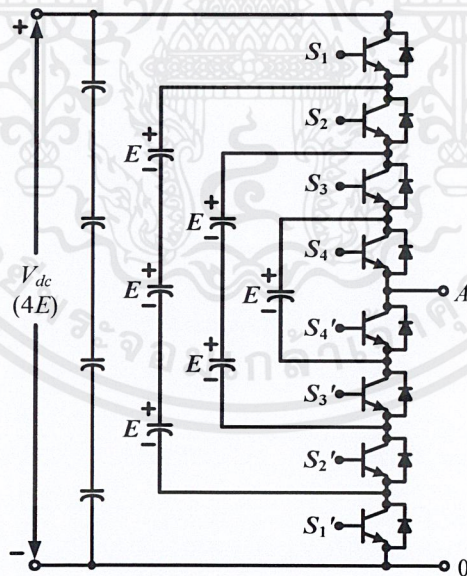
เมื่อทำการพิจารณาองค์ประกอบของวงจรในแบบ 3 เฟสดังแสดงในรูปที่ 2.4

$$SW = ((m-1) \times 2) \times 3 \quad (2.4)$$

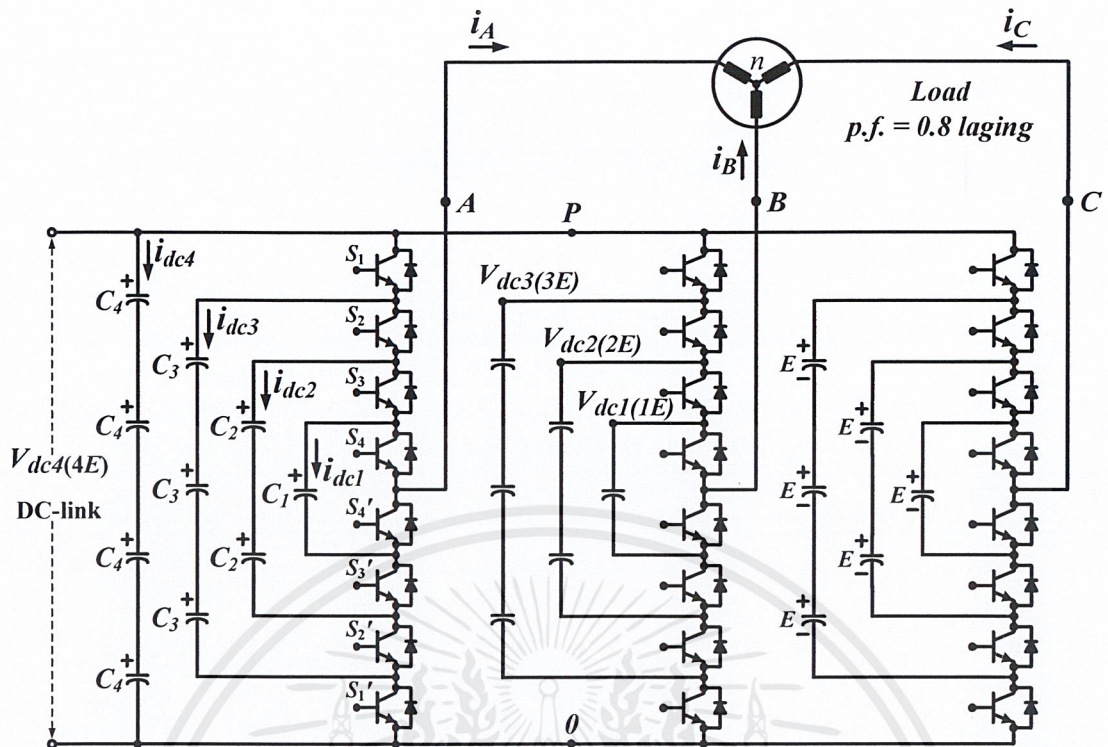
$$C = \left( \frac{(m-1) \times (m-2)}{2} \right) \times 3 \quad (2.5)$$

$$k = 2m - 1 \quad (2.6)$$

$$p = 2k - 1 \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.3 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 1 เฟส



รูปที่ 2.4 วงจรพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 3 เฟส

จากรูปที่ 2.4 เมื่อทำการกำหนดแหล่งจ่ายไฟ DC ให้มีค่าเท่ากับ  $V_{dc}$  โดยที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงคี่ในแต่ละตัวจะมีแรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุเท่ากัน คือ  $1E$  ดังนั้นแรงดันของตัวเก็บประจุนอกสุดจะมีระดับแรงดันเป็น  $4E$ ,  $3E$ ,  $2E$  และวงในสุดมีระดับแรงดัน  $1E$  ตามลำดับโดยจะขึ้นอยู่กับ การ “ON” และ “OFF” ของสวิตช์กำลังแต่ละตัว นอกจากนั้นระดับแรงดันด้านขาออกเดียวกันยังสามารถสร้างได้หลายวิธี แต่มีผลการประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุแต่ละวงที่แตกต่างกัน โดยที่สามารถนำข้อมูลมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ของระดับแรงดันด้านขาออกได้ดังตารางที่ 2.1

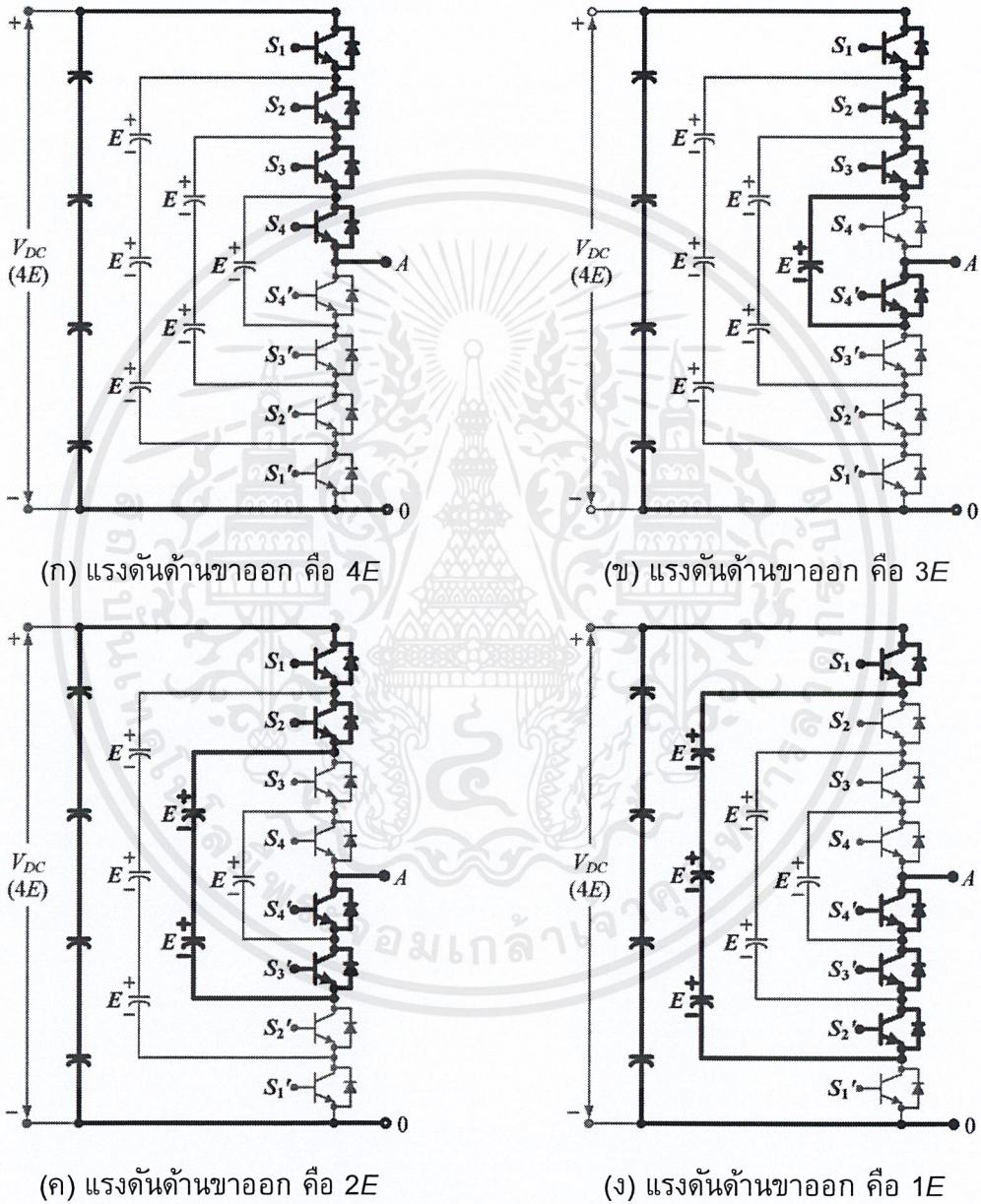
ตารางที่ 2.1 การทำงานของสวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (1 เฟส)

Switching states				Output voltage related of capacitor	Output phase voltage $V_{A0}$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$					
1	1	1	1	$4E$	$V_{dc} (4E)$	N	N	N
1	1	1	0	$4E - 1E$	$3E$	N	N	+
1	1	0	1	$4E - 2E + 1E$		N	+	-
1	0	1	1	$4E - 3E + 2E$		+	-	N
0	1	1	1	$3E$		-	N	N
1	1	0	0	$4E - 2E$		N	+	N
1	0	1	0	$4E - 3E + 2E - 1E$	$2E$	+	-	+
0	1	1	0	$3E - 1E$		-	N	+
1	0	0	1	$4E - 3E + 1E$		+	N	-
0	1	0	1	$3E - 2E + 1E$		-	+	-
0	0	1	1	$2E$		N	-	N
1	0	0	0	$4E - 3E$		$1E$	+	N
0	1	0	0	$3E - 2E$	-		+	N
0	0	1	0	$2E - 1E$	N		-	+
0	0	0	1	$1E$	N		N	-
0	0	0	0	0	0		N	N

- กำหนดให้
- 1 คือ สถานะ SW-On
  - 0 คือ สถานะ SW-Off
  - N คือ ไม่ใช้งาน
  - +
  - คือ สถานะ การอัดประจุ (Charging mode)
  - คือ สถานะ การคายประจุ (Discharge mode)

ข้อสังเกตการทำงานของสวิตช์กำลัง โดยพิจารณาที่ระดับแรงดันทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ คือ หากต้องการระดับแรงดัน  $4E$  ก็ให้เลือกสวิตช์กำลังทำงาน 4 ตัว หรือถ้าต้องการระดับแรงดัน  $3E$  ก็เลือกสวิตช์กำลัง 3 ใน 4 ตัวทำงาน หรือถ้าต้องการระดับแรงดัน  $2E$  ก็เลือกสวิตช์กำลัง 2 ใน 4 ตัวทำงาน และหากต้องการระดับแรงดัน  $1E$  ก็เลือกสวิตช์กำลัง 1 ใน 4 ตัวทำงาน จะเห็นได้ว่าลักษณะการทำงานของสวิตช์กำลังสามารถเลือกทำงานได้หลายแบบตามระดับแรงดันที่ต้องการ ซึ่งการควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลังจะเกิดจากการนำค่าสัญญาณมูลฐานกับสัญญาณแคเรียร์มาทำการเปรียบเทียบกัน ทำให้ได้เป็นสัญญาณขับเกต เพื่อนำไปขับสวิตช์กำลัง ซึ่งเรียกว่าวิธีมัลติเลเวลไซนูซอยดอลพัลส์วิตมอดดูเลตชัน ซึ่งมีด้วยกันหลายเทคนิค โดยแบ่งตามลักษณะการจัดรูปแบบของสัญญาณแคเรียร์ สัญญาณขับเกตที่ได้จากการมอดดูเลตในช่วง 1 cycle จึงมีโอกาที่จะทำให้สวิตช์กำลังทำงานไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลทำ

ให้เกิดกำลังสูญเสียที่สวิตช์กำลังมีค่าไม่เท่ากันทำให้อัตราของกระแสการอัดประจุและคายประจุไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดระดับของแรงดันที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์ ในการใช้งานอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ จึงต้องคำนึงถึงการทำงานของสวิตช์กำลังเฉลี่ยเป็นหลัก ในรูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการสร้างระดับแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ในบางสถานะ [1-3]



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการสร้างระดับแรงดันด้านขาออกบางสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

#### ข้อดี

- แรงดันตกคร่อมสวิตช์กำลังแต่ละตัวมีขนาดต่ำ จึงสามารถนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทนแรงดันต่ำมาสร้างแรงดันด้านขาออกที่สูงขึ้นได้
- ให้คุณภาพของรูปคลื่นของแรงดันด้านขาออกที่มีคุณภาพสูงมีความใกล้เคียงไซน์ โดยที่สวิตช์กำลังแต่ละตัวทำงานที่สวิตช์ความถี่ต่ำ
- ด้านแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก จะมีค่าความผิดพลาดต่ำ และมีผลของ  $dv/dt$  ต่ำ ซึ่งจะลดปัญหาเกี่ยวกับ EMC
- มีแรงดันโหมดผลร่วมต่ำ (Common mode voltage) จะช่วยลดผลสัญญาณรบกวน

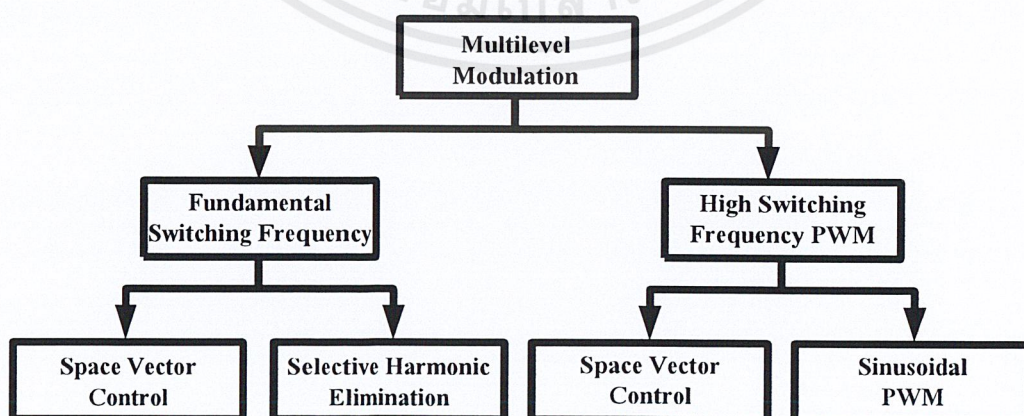
รบกวน

#### ข้อเสีย

- ต้องใช้ตัวเก็บประจุในวงจรจำนวนมาก
- เนื่องจากใช้อุปกรณ์สวิตช์กำลังจำนวนมากทำให้ต้องใช้สัญญาณเกตจำนวนมากตามไปด้วย (ความน่าเชื่อถือของวงจรลดลง)

### 2.3 เทคนิคการพิถีบลิ่วเอ็มสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

ในการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับนั้น สามารถใช้ได้กับเทคนิคการมอดดูเลตแบบต่างๆ ซึ่งเทคนิคที่ได้รับการพัฒนาและนำมาใช้ในอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไป มีด้วยกันหลายแบบ ซึ่งสามารถแบ่งตามความถี่ของการสวิตช์กำลังได้ดังในรูปที่ 2.6 เช่น มัลติเลเวลไซน์ซอชอยดอลพัลส์วิดมอดดูเลชัน (Multilevel sinusoidal pulse width modulation, SPWM) สเปซเวกเตอร์คอนโทรล (Space vector control, SVC) และมัลติเลเวลซีเลคทีฟฮาร์โมนิกส์อีลิมีเนชัน (Multilevel selective harmonic elimination) เป็นต้น [1]



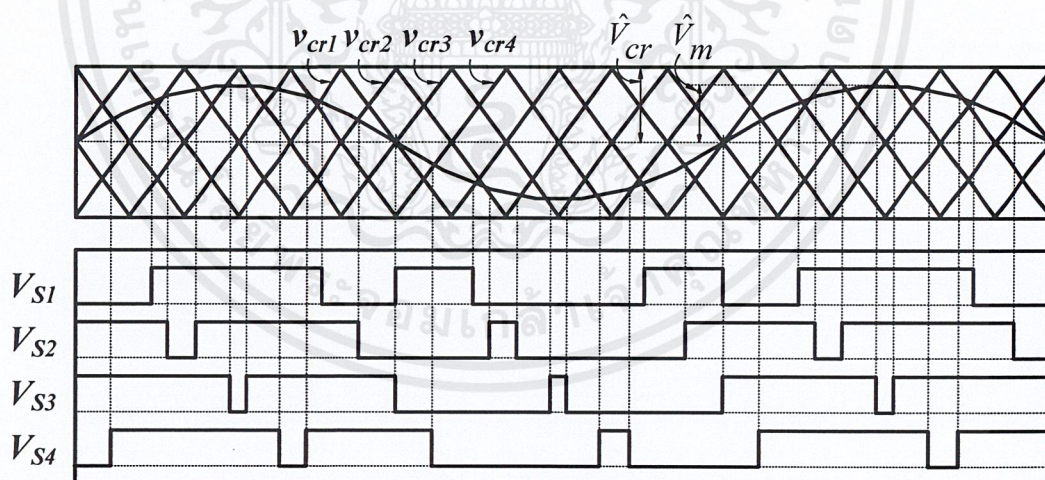
รูปที่ 2.6 รูปแบบการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้างต้นเทคนิคการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์กำลัง ที่นำมาใช้ในการสร้างแรงดันไฟฟ้าต้านขาออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ สามารถใช้ได้กับเทคนิคการมอดูเลตแบบต่างๆ แต่เทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณขับเคลื่อนมากที่สุดคือ วิธีการมัลติเลเวลไซน์ซออยดอลพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน (Multilevel Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) [1] ซึ่งมีด้วยกัน 2 แบบ คือ เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์ (Phase-shifted Pulse Width Modulation) หรือเรียกว่า PSPWM และเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ (Level-shifted Pulse Width Modulation) หรือเรียกว่า IPDPWM [1-3]

### 2.3.1 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟส (Phase-shifted multi-carrier PWM scheme)

เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟส (Phase-shifted multi-carrier PWM scheme) ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่า PSPWM มีลักษณะของการจัดเรียงสัญญาณพาหะแบบเลื่อนเฟสเป็นมุมเท่าๆ กันตามจำนวนของสัญญาณพาหะที่ใช้ โดยในรูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างของเทคนิค PSPWM ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์แบบ 5 ระดับ ( $m=5$ ) ดังนั้นจำนวนของสัญญาณพาหะที่ใช้จึงเท่ากับ  $(m-1) = 4$  สัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จากการนำเทคนิค PSPWM ไปใช้งาน มีผลทำให้ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Device switching frequency,  $f_{sw,dev}$ ) มีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณพาหะ (Carrier frequency,  $f_{cr}$ )



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนเฟสแคเรียร์

คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากเทคนิค PSPWM [2]

- อัตราการมอดดูเลตชัน

$$m_a = \hat{V}_m / \hat{V}_{cr} \quad \text{เมื่อ } 0 \leq m_a \leq 1 \quad (2.8)$$

- อัตราส่วนจำนวนเท้าระหว่างความถี่สัญญาณพาหะและความถี่สัญญาณมอดดูเลตชัน

ฐาน

$$m_f = f_{cr} / f_m \quad (2.9)$$

- ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Frequency Switching

Device)

$$f_{sw,dev} = f_{cr} \quad (2.10)$$

- ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching Frequency of Inverter)

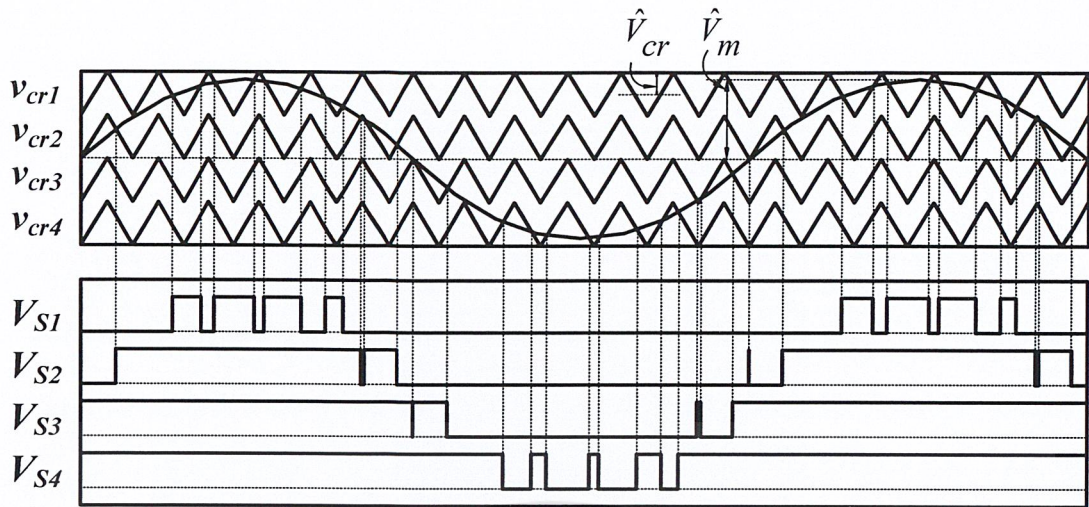
$$f_{sw,inv} = (m-1)f_{sw,dev} \quad (2.11)$$

ซึ่งแรงดันด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์ FCI จะมีฮาร์มอนิกส์ปรากฏที่อันดับสูงคือ ปรากฏขึ้นบริเวณรอบๆ ฮาร์มอนิกส์อันดับที่  $(m-1)m_f = 4m_f$  จึงทำให้สามารถกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำได้ง่าย โดยที่อินเวอร์เตอร์เป็นแบบสามเฟส มีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบไซน์ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งก็คือสัญญาณพาหะแบบเลื่อนเฟสจำนวน 4 สัญญาณ แล้วนำผลของสัญญาณพัลส์ ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลังในแต่ละเฟส โดยเลือกใช้สัญญาณพาหะจำนวน  $(m-1) = 4$  สัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณมีมุมเลื่อนเฟสกัน  $\phi_{cr} = 360^\circ / (m-1) = 90^\circ$  [3,7]

### 2.3.2 เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนระดับ (Level-shifted multi-carrier PWM scheme)

เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบเลื่อนระดับแคเรียร์ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่า IPDPWM มีลักษณะของการจัดเรียงมุมเฟสระหว่างสัญญาณแคเรียร์  $v_{cr1} - v_{cr4}$  เป็นแบบอินเฟสกัน (in-phase) โดยในรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของเทคนิค IPDPWM ที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์แบบ 5 ระดับ ( $m=5$ ) ดังนั้นจำนวนของสัญญาณแคเรียร์ที่ใช้จึงเท่ากับ  $(m-1) = 4$  ด้วยคุณสมบัติของเทคนิค IPDPWM จากการนำไปใช้งาน มีผลทำให้ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching frequency of inverter,  $f_{sw,inv}$ ) จะเท่ากับความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ (Carrier frequency,  $f_{cr}$ )

119437



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างเทคนิคพีดีบีบลิแวมแบบเลื่อนระดับแคเรียร์

คุณสมบัติต่างๆ ของรูปแบบ PWM ด้วยวิธีวิธีเลื่อนระดับ (Level-shifted multi-carrier PWM scheme) สามารถสรุปได้ดังนี้ [2]

- อัตราการมอดดูเลตชัน

$$m_a = \hat{V}_m / \hat{V}_{cr} (m-1) \quad \text{เมื่อ } 0 \leq m_a \leq 1 \quad (2.12)$$

- อัตราส่วนจำนวนเท่าระหว่างความถี่สัญญาณพาหะและความถี่สัญญาณมอด

ฐาน

$$m_f = f_{cr} / f_m \quad (2.13)$$

- ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ (Switching frequency of inverter)

$$f_{sw,inv} = f_{cr} \quad (2.14)$$

- ความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Frequency Switching

Device)

$$f_{sw,dev} = f_{cr} / (m-1) \quad (2.15)$$

ซึ่งแรงดันด้านขาออกที่ได้ของอินเวอร์เตอร์ FCI จะมีฮาร์มอนิกส์ปรากฏที่อันดับสูงคือ ปรากฏขึ้นบริเวณรอบๆ ฮาร์มอนิกส์อันดับที่  $m_f$  จึงทำให้สามารถกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำได้ง่าย โดยที่อินเวอร์เตอร์เป็นแบบสามเฟส มีสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบไซน์ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมซึ่งก็คือสัญญาณพาหะแบบเลื่อนระดับจำนวน 4 สัญญาณ แล้วนำผลของสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลังในแต่ละเฟส โดยจำนวนระดับสัญญาณแคเรียร์หาได้จากจำนวนระดับของแรงดันที่ได้ของอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ จึงเป็น  $(m-1) = 4$  ระดับ [3,7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

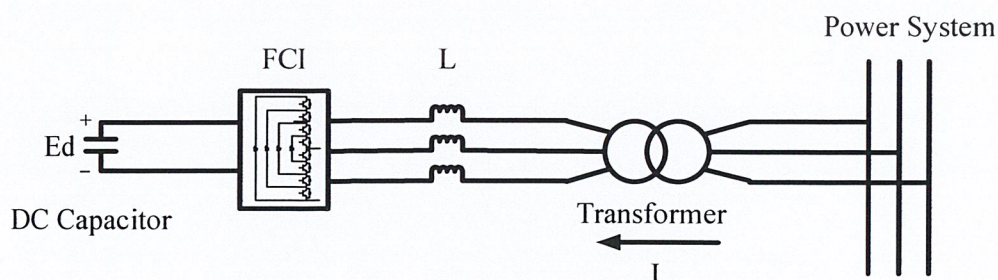
ตารางที่ 2.2 การหาค่ามอดดูเลตโดยวิธีการควบคุมต่างๆ [5]

วิธี	IPDPWM	PSPWM
$m_a$	$\frac{\hat{V}_m}{m-1} \hat{V}_{cr}$	$\frac{\hat{V}_m}{\hat{V}_{cr}}$

โดยในปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคพีดับบลิวเอ็มทั้ง 2 แบบ เพื่อหาเทคนิคการสร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ เพื่อหาเทคนิคการพีดับบลิวเอ็มที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบ D-STATCOM ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า โดยเทคนิคพีดับบลิวเอ็มทั้ง 2 ชนิดจะสร้างบน FPGA และสามารถรับข้อมูลสัญญาณควบคุมต่างๆ จาก dsPIC ได้

#### 2.4 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของ D-STATCOM

D-STATCOM (Distribution Static Compensation) ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ต่อขนานกับระบบไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ (Interfacing Reactor) ทำหน้าที่สร้างกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจ่ายเข้าระบบไฟฟ้าเช่นเดียวกับการกำเนิดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากคาปาซิเตอร์และมอเตอร์ซิงโครนัส แต่เนื่องจาก D-STATCOM มีข้อดีกว่าคือสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้ต่อเนื่อง มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ไม่มีส่วนเคลื่อนที่ได้ จึงสามารถนำ D-STATCOM ไปใช้เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้หลากหลาย ทั้งการควบคุมตัวประกอบกำลัง การแก้ปัญหาสมดุลโหลด การแก้ปัญหาฮาร์มอนิก การรักษาระดับแรงดัน เป็นต้น [6,8]

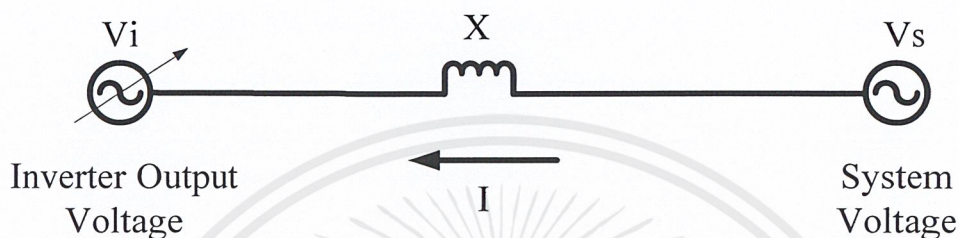


รูปที่ 2.9 ไตอะแกรมของ D-STATCOM 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

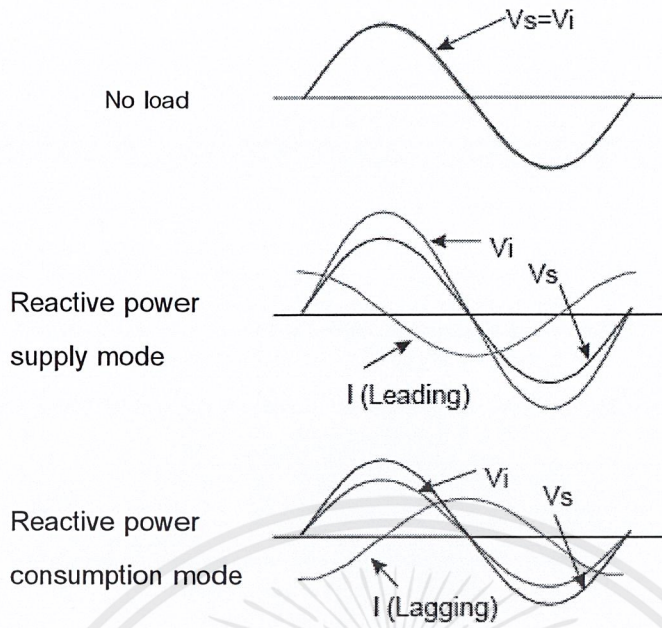
จากรูปที่ 2.9 แสดงวงจรโครงสร้างของ D-STATCOM ซึ่งประกอบด้วย อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying capacitor inverter, FCI) ที่สามารถปรับแรงดันขาออกได้ ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อและถูกเพิ่มระดับแรงดันด้วย หม้อแปลง เพื่อเพิ่มระดับแรงดันให้เท่ากับแรงดันของระบบไฟฟ้า

#### 2.4.1 หลักการทำงานของ D-STATCOM



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของ D-STATCOM

จากรูปที่ 2.10 แรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) เป็นตัวควบคุมกระแสของ D-STATCOM ( $I$ ) ถ้าแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) มีค่าเท่ากับแรงดันของระบบไฟฟ้า ( $V_s$ ) เป็นผลให้ไม่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไปยังระบบ ถ้าแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) มีค่าสูงกว่าแรงดันของระบบไฟฟ้า ( $V_s$ ) จะทำให้กระแสของ D-STATCOM ( $I$ ) นำหน้าแรงดันของไฟฟ้า ( $V_s$ ) อยู่  $90^\circ$  เป็นผลให้กำลังรีแอกทีฟนำหน้า (leading reactive power) ไหลจาก D-STATCOM ไปยังระบบไฟฟ้า เรียก โหมดการทำงานนี้ว่า “Reactive power supply mode” ส่วนถ้าแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) ต่ำกว่าแรงดันของระบบไฟฟ้า ( $V_s$ ) จะทำให้กระแสของ D-STATCOM ( $I$ ) ตามหลังแรงดันไฟฟ้าของระบบ ( $V_s$ ) อยู่  $90^\circ$  เป็นผลทำให้กำลังรีแอกทีฟล่าหลัง (lagging reactive power) ไหลเข้ามาที่ D-STATCOM เรียก โหมดการทำงานนี้ว่า “Reactive power consumption mode” ซึ่งกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นสัดส่วนของความแตกต่างระหว่างแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) และแรงดันของระบบไฟฟ้า ( $V_s$ ) ซึ่งหลักการทำงานพื้นฐานของ D-STATCOM เหมือนกับ Synchronous condenser [8]



รูปที่ 2.11 โหมดการทำงานของ D-STATCOM

### บทที่ 3

## การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุม D-STATCOM และ การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSCAD/EMTDC

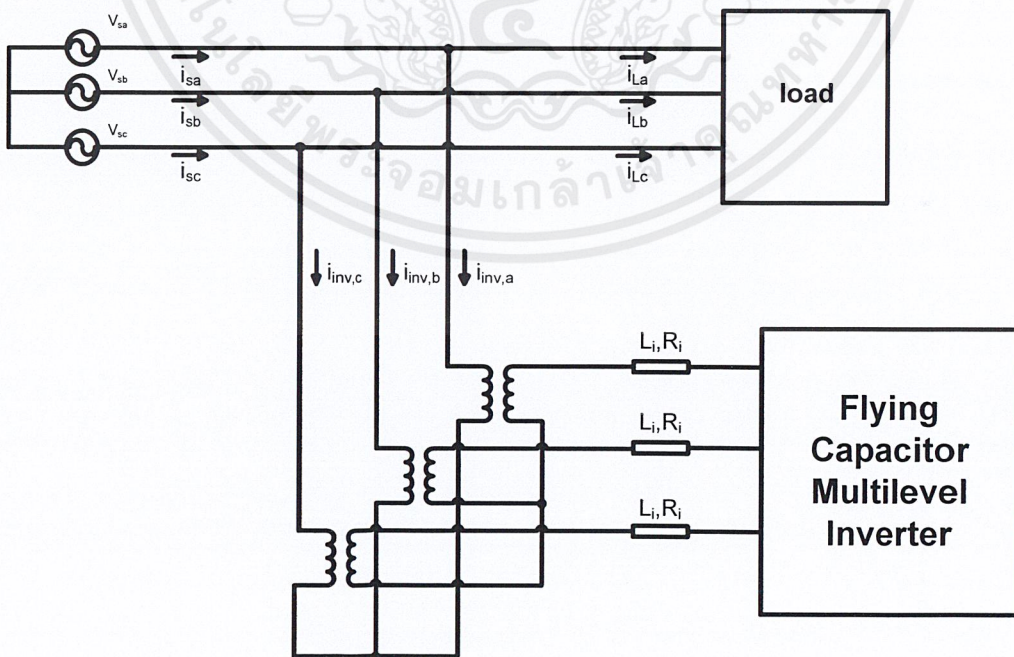
### 3.1 บทนำ

ในปฏิญญาพนธ์ในบทนี้นำเสนอทฤษฎีในการวิเคราะห์ระบบควบคุมโดยมีทฤษฎีหลักๆ คือ การวิเคราะห์ระบบโดยใช้กราฟเส้นทางเดินของราก (Root-Locus) เพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปพิจารณาออกแบบระบบควบคุม D-STATCOM อีกทั้งยังได้มีการนำเสนอเทคนิคการควบคุมการทำงานของ D-STATCOM เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า

นอกจากนี้ยังนำเสนอการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของ D-STATCOM โดยวัตถุประสงค์เพื่อชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบ และการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยพิจารณาถึงการออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมกับการทำงานของ D-STATCOM

### 3.2 ระบบควบคุมสำหรับ D-STATCOM

จากทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของ D-STATCOM ระบบควบคุมจะสร้างแรงดันที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับ เพื่อให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสเข้าไปชดเชยกำลังรีแอกทีฟของระบบ หรือทำงานในโหมด Reactive power supply mode



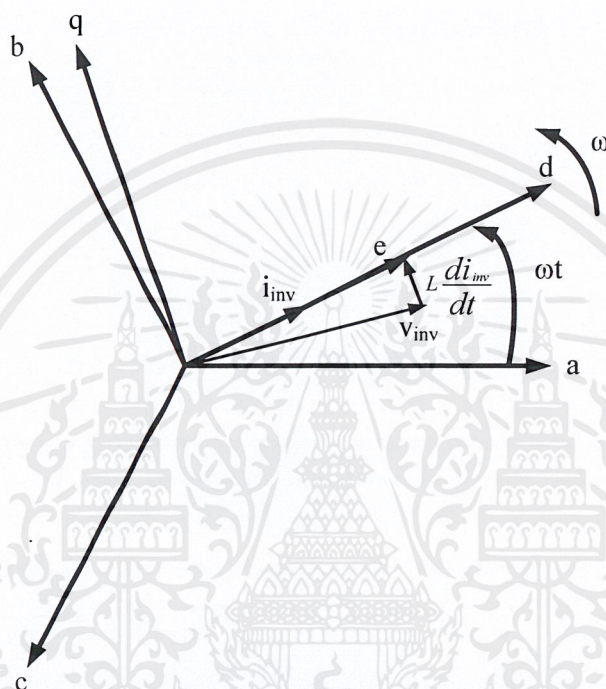
รูปที่ 3.1 โครงสร้าง D-STATCOM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1

$$i_{inv} = i_s - i_L \quad (3.1)$$

เมื่อ  $i_{inv}$  คือ กระแสอินเวอร์เตอร์  
 $i_s$  คือ กระแสระบบ  
 $i_L$  คือ กระแสโหลด



รูปที่ 3.2 แกนอ้างอิง D-STATCOM

สมการแรงดันสามเฟสของแหล่งจ่ายในกรอบอ้างอิง  $a-b-c$

$$\begin{aligned} V_{sa} &= E \cos(\omega t) \\ V_{sb} &= E \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\right) \\ V_{sc} &= E \cos\left(\omega t - \frac{4}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $E$  คือ ค่าแรงดันสูงสุด  
 $\omega$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่าย

$$\begin{aligned}
 V_{sa} &= L \frac{di_{inv,a}}{dt} + v_{inv,a} \\
 V_{sb} &= L \frac{di_{inv,b}}{dt} + v_{inv,b} \\
 V_{sc} &= L \frac{di_{inv,c}}{dt} + v_{inv,c}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

เมื่อ  $i_{inv,a}$ ,  $i_{inv,b}$  และ  $i_{inv,c}$  คือ กระแสของอินเวอร์เตอร์  
 $V_{inv,a}$ ,  $V_{inv,b}$  และ  $V_{inv,c}$  คือ แรงดันเฟสที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์

จากสมการที่ (3.3) ทำการแปลงกรอบอ้างอิงจากกรอบอ้างอิง  $a-b-c$  ไปเป็นกรอบอ้างอิงซิงโครนัส  $d-q$

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= L \frac{di_{inv,d}}{dt} - \omega L i_{inv,q} + v_{inv,d} \\
 V_{sq} &= L \frac{di_{inv,q}}{dt} + \omega L i_{inv,d} + v_{inv,q}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

เนื่องจากฟังก์ชันของแรงดันเป็นฟังก์ชัน Cosine ทำให้แรงดันในแนวแกน  $q$  ( $V_q$ ) มีค่าเป็นศูนย์

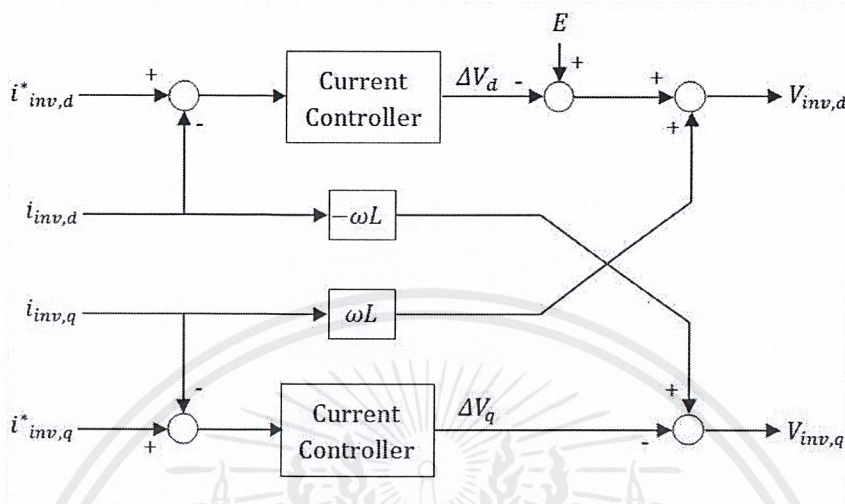
$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= E \\
 V_{sq} &= 0
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
 E &= L \frac{di_{inv,d}}{dt} - \omega L i_{inv,q} + v_{inv,d} \\
 0 &= L \frac{di_{inv,q}}{dt} + \omega L i_{inv,d} + v_{inv,q}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

การควบคุมกระแสอินเวอร์เตอร์ให้เป็นไปตามกระแสอ้างอิง โดยเลือกใช้การควบคุมแบบ PI เป็นตัวควบคุม อย่างไรก็ตามสมการที่ (3.6) เป็นสมการ coupled dynamic system ซึ่งหากต้องการผลตอบสนองที่รวดเร็วการควบคุมกระแสแบบ PI จะทำงานได้ไม่ดีนักเพื่อหลีกเลี่ยงการเกินปัญหาดังกล่าว จึงทำการแปลงเป็นสมการ first-order decoupled linear dynamic systems เพื่อประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดีขึ้น

$$\begin{aligned}
 v_{inv,d} &= \omega L i_{inv,q} + E - \Delta v_d \\
 v_{inv,q} &= -\omega L i_{inv,d} - \Delta v_q
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

จากสมการที่ (3.7) จะเป็นสมการที่จะนำมาใช้ในการควบคุมการสร้างแรงดันที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยนำสมการมาเขียนให้อยู่ในรูปบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมสำหรับระบบควบคุม D-STATCOM

จากสมการที่ (3.7)  $\Delta v_{dq}$  ที่เกิดขึ้นคือผลตอบสนองจากชุดควบคุมกระแสหรือชุดควบคุม PI

$$\begin{aligned}\Delta v_d &= K_p(i^*_{inv,d} - i_{inv,d}) + K_i \int (i^*_{inv,d} - i_{inv,d}) dt \\ \Delta v_q &= K_p(i^*_{inv,q} - i_{inv,q}) + K_i \int (i^*_{inv,q} - i_{inv,q}) dt\end{aligned}\quad (3.8)$$

จากการเพิ่มผลตอบสนองของตัวควบคุมกระแส  $\Delta v_{dq}$  ในสมการที่ (3.7) และแทนค่า  $v_{inv,dq}$  ในสมการที่ (3.6) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตกับเอาต์พุตจะเปลี่ยนเป็นสมการ first-order decoupled linear dynamic systems เพื่อง่ายในการควบคุม

$$\begin{aligned}0 &= L \frac{di_{inv,d}}{dt} - \Delta v_d \\ 0 &= L \frac{di_{inv,q}}{dt} - \Delta v_q\end{aligned}\quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.1) จะได้สมการกระแสในกรอบอ้างอิง a-b-c

$$\begin{aligned}i_{sa} &= i_{La} + i_{inv,a} \\ i_{sb} &= i_{Lb} + i_{inv,b} \\ i_{sc} &= i_{ca} + i_{inv,c}\end{aligned}\quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.11) ทำการแปลงกรอบอ้างอิงจากกรอบอ้างอิง  $a-b-c$  เป็นกรอบอ้างอิงซึ่งโครน์ส  $d-q$

$$\begin{aligned} i_{sd} &= i_{inv,d} + i_{L,d} \\ i_{sq} &= i_{inv,q} + i_{L,q} \end{aligned} \quad (3.11)$$

พิจารณากระแสในแนวแกน  $q$  เนื่องจากต้องการควบคุมตัวประกอบกำลังให้มีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์จะต้องจ่ายกระแสอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน  $q$  ( $i_{inv,q}$ ) ชดเชยกระแสของระบบในแนวแกน  $q$  ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $i_{sq} = 0$ ) โดยค่ากระแสอ้างอิงอินเวอร์เตอร์ ( $i_{inv,q}^*$ ) มีค่าเท่ากับกระแสโหลด ( $i_{Lq}$ ) ในทิศตรงกันข้าม

$$\begin{aligned} i_{sq} &= 0 = i_{inv,q} + i_{L,q} \\ i_{inv,q}^* &= -i_{L,q} \end{aligned} \quad (3.12)$$

พิจารณากระแสในแนวแกน  $d$  เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ต้องการชดเชยเพียงกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ จึงไม่จำเป็นต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบ ดังนั้นกระแสอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน  $d$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $i_{inv,d} = 0$ ) กระแสอ้างอิงอินเวอร์เตอร์จึงต้องกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ ( $i_{inv,d}^* = 0$ )

$$\begin{aligned} i_{sd} &= i_{L,d} \\ i_{inv,d}^* &= 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

การควบคุมการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ จากชุดควบคุมจะได้ค่าแรงดันในกรอบอ้างอิงซึ่งโครน์ส  $d-q$  จากนั้นทำการแปลงกรอบอ้างอิงจากกรอบอ้างอิงซึ่งโครน์สเป็นกรอบอ้างอิง  $a-b-c$  เพื่อเป็นแรงดันอ้างอิงในการนำไปสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

### 3.3 วิเคราะห์ระบบควบคุมสำหรับ D-STATCOM

จุดประสงค์ในการวิเคราะห์ระบบควบคุม เพื่อศึกษาผลตอบสนองของระบบควบคุมให้เป็นไปตามความต้องการใช้งาน โดยการวิเคราะห์จะใช้กราฟเส้นทางเดินของรามาช่วยในการวิเคราะห์ ผลที่ได้จะนำมาใช้ในการออกแบบพารามิเตอร์ในระบบควบคุม D-STATCOM

### 3.3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบรวม

จากสมการ (3.8) และ (3.9) แปลงลาปลาซสมการระบบควบคุมให้อยู่ในรูปโดเมน  $s$  ดังนี้

$$\begin{aligned} 0 &= LsI_{inv,d}(s) - \Delta V_d(s) \\ 0 &= LsI_{inv,q}(s) - \Delta V_q(s) \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_d(s) &= \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot (I^*_{inv,d}(s) - I_{inv,d}(s)) \\ \Delta V_q(s) &= \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot (I^*_{inv,q}(s) - I_{inv,q}(s)) \end{aligned} \quad (3.15)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.15) มาแทนค่าในสมการที่ (3.14) แล้วเขียนสมการใหม่ให้อยู่ในรูปอัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตและอินพุต เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่ออินพุตของระบบควบคุมคือ ผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิงกับกระแสอินเวอร์เตอร์ และเอาต์พุตของระบบคือ กระแสอินเวอร์เตอร์

$$0 = LsI_{inv,dq}(s) - \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot (I^*_{inv,dq}(s) - I_{inv,dq}(s)) \quad (3.16)$$

$$\frac{I_{inv,dq}(s)}{(I^*_{inv,dq}(s) - I_{inv,dq}(s))} = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \left(\frac{1}{Ls}\right) \quad (3.17)$$

$$\text{transfer function} = \frac{K_p \cdot \left(s + \frac{K_i}{K_p}\right)}{Ls^2} \quad (3.18)$$

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอน (3.18) จะสามารถหาค่าซีโรและโพลของระบบได้

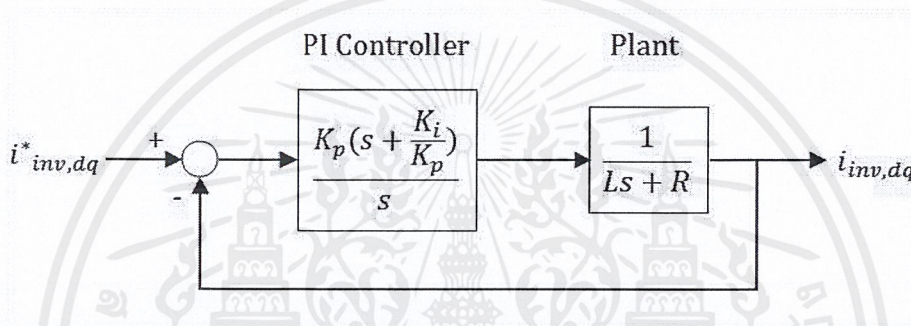
$$\begin{aligned} z &= -\frac{K_i}{K_p} \\ p &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

เนื่องจากเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ที่นำมาใช้งานเป็น D-STATCOM จะผ่านหม้อแปลงเพื่อแปลงแรงดันอินเวอร์เตอร์ให้เท่ากับแรงดันระบบไฟฟ้า จึงมีผลจากความต้านทานแฝงของหม้อแปลง เสมือนมีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาผลของตัวต้านทานในฟังก์ชันถ่ายโอนด้วย

$$\begin{aligned} \text{transfer function} &= \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \left(\frac{1}{Ls + R}\right) \\ &= \frac{K_p \cdot \left(s + \frac{K_i}{K_p}\right)}{Ls^2 + Rs} \end{aligned} \quad (3.20)$$

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนใหม่ (3.20) จะหาค่าซีโรและโพลของระบบใหม่ได้

$$\begin{aligned} z &= -\frac{K_i}{K_p} \\ p &= 0, -\frac{R}{L} \end{aligned} \quad (3.21)$$



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

### 3.3.2 วิเคราะห์ระบบควบคุมโดยใช้กราฟเส้นทางเดินขอราก

กราฟเส้นทางเดินขอรากคือ ทางเดินขอรากของสมการคุณลักษณะ หรือ โพลของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดบนระนาบเอส เมื่อค่าของอัตราขยาย (Gain) แปรค่าจากศูนย์ คือตำแหน่งที่รากจะเริ่มออกจากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิด ไปสู่ค่าอนันต์คือตำแหน่งของ ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิด [12]

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ D-STATCOM

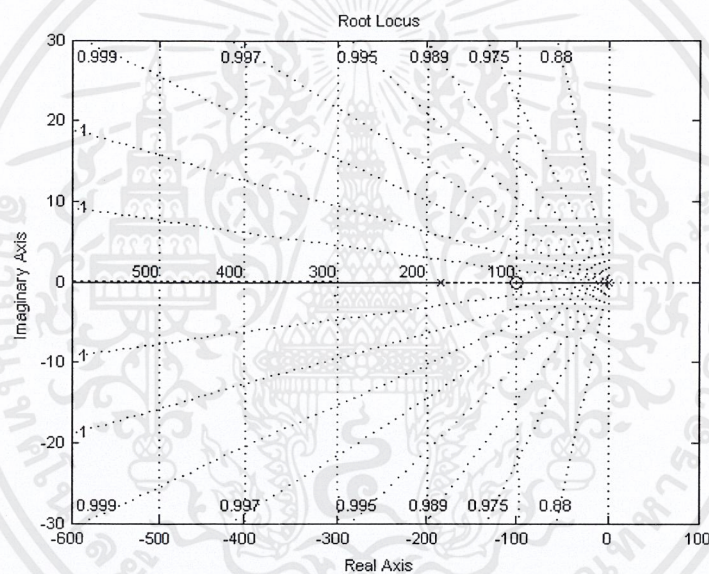
พารามิเตอร์ของระบบ D-STATCOM	
ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ	43.5 mH
ความเหนี่ยวนำแฝงในหม้อแปลง	4.5 mH
ความต้านทานแฝงในหม้อแปลง	8.8Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากพารามิเตอร์ของระบบ D-STATCOM ค่า  $R$  และ  $L$  เป็นค่าคงที่ จากค่าโพลและซีโรของระบบในสมการที่ (3.21) โพลของระบบจึงเป็นคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระบบควบคุมคือซีโร ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ของระบบควบคุมเท่านั้น ถ้าดูจากโพลของระบบจะมีค่าประมาณ 0 และ -183 ดังนั้นจะแบ่งการวิเคราะห์ระบบโดยพิจารณาค่าซีโรเป็นสองลักษณะคือ เมื่อซีโรมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง -183 และเมื่อซีโรมีค่าน้อยกว่า -183

### 3.3.2.1 เมื่อซีโรมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง -183

เมื่อซีโรมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง -183 โดยกำหนดให้ซีโรมีค่าเท่ากับ -100 ( $K_p = 100$ ,  $K_i = 10000$ ) แล้วนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ครบถ้วนแล้ว มาเขียนกราฟเส้นทางเดินของรากได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟเส้นทางเดินของรากเมื่อซีโรมีค่าเท่ากับ -100 ( $K_p = 100$ ,  $K_i = 10000$ )

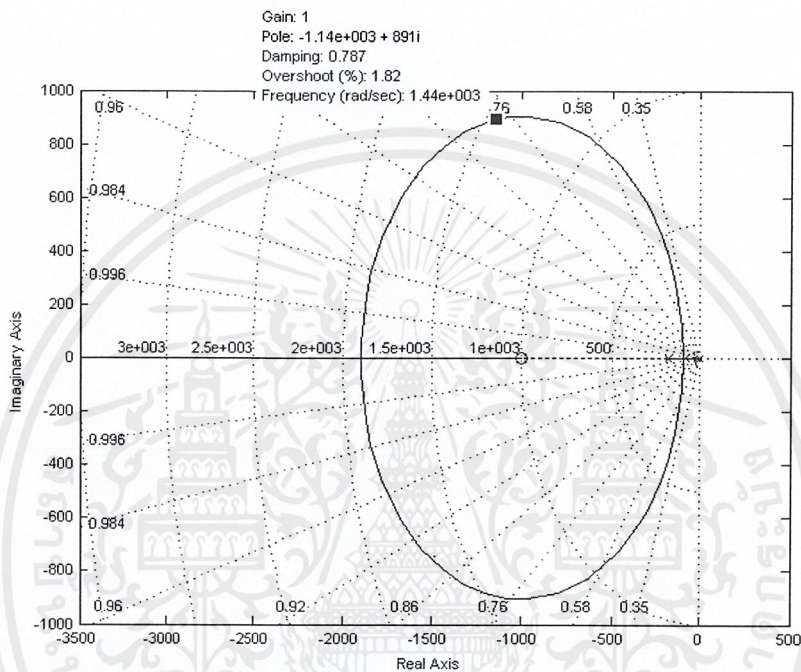
จากกราฟเส้นทางเดินของรากในรูปที่ 3.5 จะเห็นว่าเส้นทางเดินของรากอยู่ในซีกซ้ายของค่า 0 หรือฝั่งลบทั้งหมดซึ่งบ่งบอกว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมนี้จะสามารถปรับเข้าสู่สถานะเสถียรภาพได้ทั้งหมด หากมีเส้นทางเดินของรากผ่านไปยังซีกขวาหรือฝั่งบวกบางส่วนนั้นคือระบบควบคุมนั้นจะมีโอกาสที่ผลตอบสนองของระบบจะไม่สามารถควบคุมได้หรือไม่ปรับเข้าสู่เสถียรภาพนั่นเอง

ส่วนทางเดินรากที่อยู่ในแนวแกนจริงทั้งหมดนั้นบ่งบอกว่าระบบควบคุมนี้เป็นระบบควบคุมอันดับหนึ่งคือไม่มีค่าโพลที่เป็นค่าเชิงซ้อนในระนาบเอส ผลตอบสนองจะไม่เกิดการแกว่งหากว่าเส้นทางเดินของรากมีบางส่วนที่มีตำแหน่งอยู่บนระนาบเอส ที่ไม่ใช่แกนจริง นั่นคือระบบควบคุมนี้เป็นระบบควบคุมอันดับสอง คือมีค่าโพลที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนเกิดขึ้น ผลตอบสนองจะเกิดการแกว่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากรูปที่ 3.5 จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบนี้จะสามารถควบคุมให้เข้าสู่สภาวะเสถียรภาพได้ โดยไม่เกิดการแกว่ง ระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพนั้นขึ้นอยู่กับ การอัตราส่วนขยาย (Gain) ซึ่งยิ่งอัตราส่วนขยายมากก็จะเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพได้เร็วมากขึ้นตามไปด้วย

### 3.3.2.2 เมื่อซีโรมีค่าน้อยกว่า -183



รูปที่ 3.6 กราฟเส้นทางเดินของรากเมื่อซีโรมีค่าเท่ากับ -1000 ( $K_p = 100$ ,  $K_i = 100000$ )

กำหนดให้ซีโรมีค่าเท่ากับ -1000 ( $K_p = 100$ ,  $K_i = 100000$ ) ซีโรจะมีค่าน้อยกว่า -183 เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ให้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนแล้วนำมาเขียนกราฟเส้นทางเดินของรากดังรูปที่ 3.6

จากกราฟเส้นทางเดินของรากในรูปที่ 3.6 จะพบว่าเส้นทางเดินของรากต่างจากลักษณะเดิมในรูปที่ 3.5 นั่นคือมีส่วนโค้งของรากที่ไม่อยู่บนแกนจริง นั่นคือระบบควบคุมนี้เป็นระบบควบคุมอันดับสอง จะมีโอกาสที่ผลตอบสนองจะเกิดการแกว่งก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพ จากรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าที่ อัตราขยายเท่ากับ 1 มีค่าอัตราส่วนการหน่วง (Damping) เท่ากับ 0.787 และมีเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) เท่ากับ 1.82% บ่งชี้ว่าผลตอบสนองของระบบจะยังมีการแกว่งและการพุ่งเกินอยู่เล็กน้อย หากเพิ่มอัตราขยายให้มากขึ้น รากจะวิ่งไปตามเส้นทางด้านซ้าย ค่าอัตราส่วนการหน่วงจะเพิ่มขึ้น การแกว่งของผลตอบสนองจะลดลง ค่าอัตราส่วนการหน่วงจะเพิ่มจนมีค่ามากที่สุดคือ 1 นั่นคือเส้นทางเดินของรากในบริเวณที่อยู่บนแกนจริงนั่นเอง ผลตอบสนองของระบบจะไม่มีการแกว่งเหมือนระบบควบคุมอันดับหนึ่ง

ในทางกลับกัน หากลดอัตราขยายให้น้อยกว่า 1 รากจะวิ่งไปตามเส้นทางด้านขวา ค่าอัตราส่วนการหน่วงจะลดลง การแกว่งของผลตอบสนองมากขึ้น ค่าพุงเกินของสัญญาณจะมากขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อลดอัตราขยายจนกระทั่งอัตราขยายมีค่าใกล้เคียง 0 ค่ารากจะอยู่ใกล้โพลของระบบ ซึ่งบริเวณนั้นมีค่าอัตราส่วนการหน่วงมาก ผลตอบสนองจะมีการแกว่งน้อยหรือไม่เกิดการแกว่งเลยก็ได้

อย่างไรก็ตามแม้ว่าระบบควบคุมนี้จะส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่ง แต่เส้นทางเดินของรากของระบบนี้อยู่ในซีกลบทั้งหมด นั่นคือระบบจะสามารถควบคุมให้ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพได้ ไม่มีโอกาสเกิดสภาวะไม่เสถียรภาพ

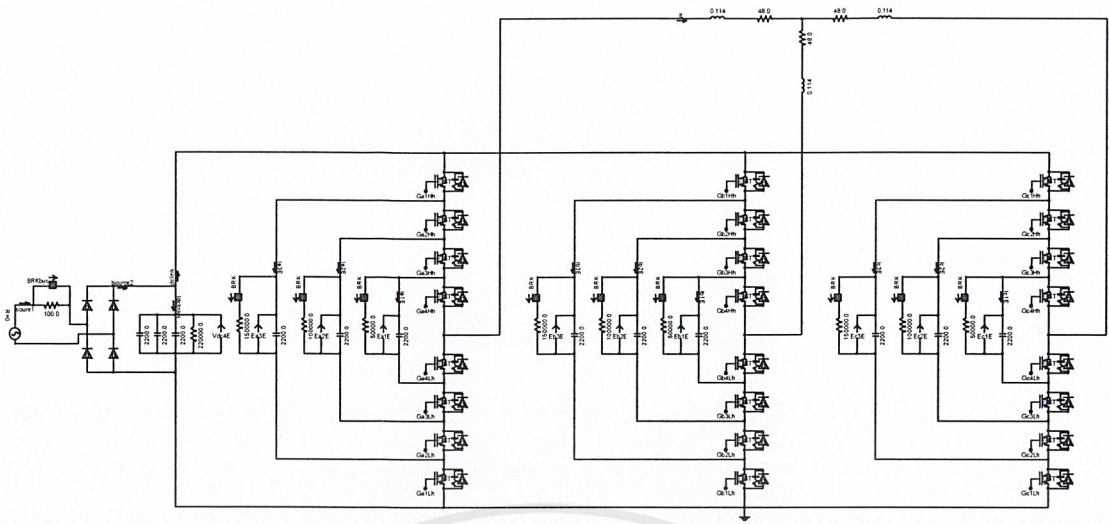
### 3.4 การจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 3 เฟส

จากรูปที่ 3.7 เป็นการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ในการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าได้ทำการจำลองเป็นแบบ 3 เฟส ในการศึกษาการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม D-STATCOM นั้นจะพิจารณาที่ผลตอบสนองของกระแสและแรงดันของระบบ และกระแสของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยในการจำลองจะใช้แรงดัน DC แทนที่แรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงในแต่ละระดับชั้น เพื่อสร้างแรงดันทางด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

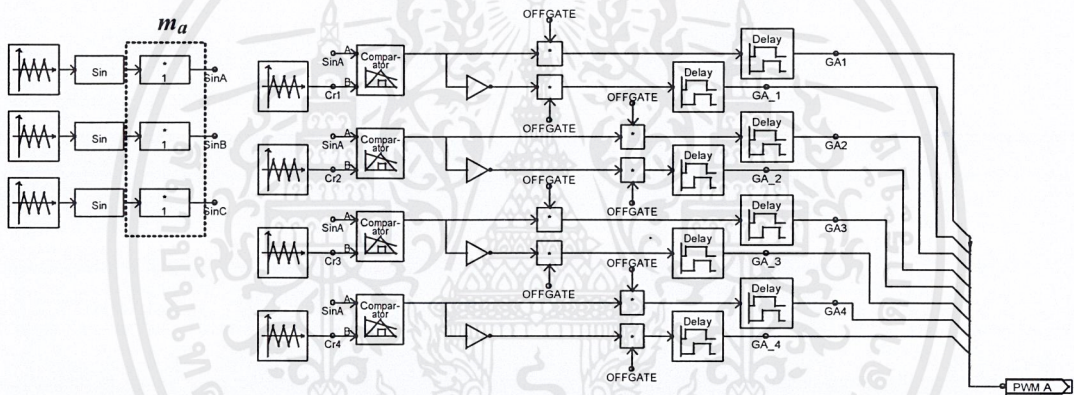
ในการจำลองนั้นได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองและเปรียบเทียบการทำงานของ PWM ทั้ง 2 แบบ ของอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยกำหนดให้ค่าความถี่การทำงานของสวิตช์กำลังเฉลี่ยเท่ากับเป็น 750 Hz และความถี่ของแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 3,000 Hz แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของ FCI ด้วยเทคนิค PSPWM

Parameter operating	Phase-shifted PWM (PSPWM)
$f_m$	50 Hz
$f_{cr}$	750 Hz
$m_f$	15
$f_{sw,dev}$	750 Hz
$f_{sw,inv}$	3000 Hz

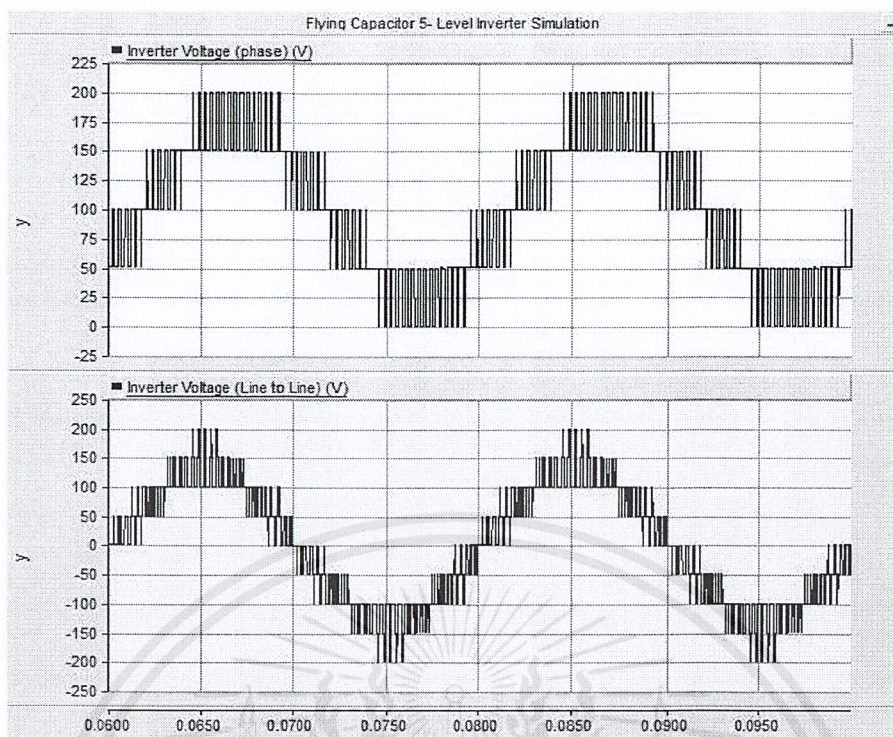


รูปที่ 3.7 แบบจำลองทางไฟฟ้าของวงจรฟลายอิงคาปาซิเตอร์ แบบ 5 ระดับแรงดัน



รูปที่ 3.8 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิค PSPWM สำหรับอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



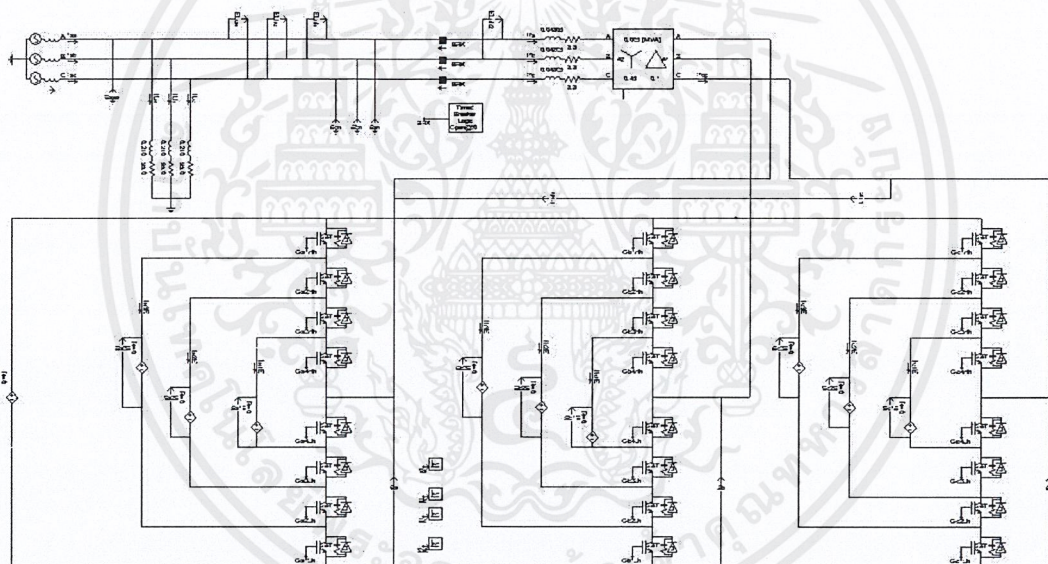
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแรงดันของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ใน 1 เฟส โดยใช้เทคนิคการมอดดูเลตแบบ PSPWM

### 3.5 การจำลองการใช้งานอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์เป็น D-STATCOM

การสร้างแบบจำลอง D-STATCOM โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC ดังรูปที่ 3.10 การจำลองทำการสร้างอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 3 เฟสอนุกรมเข้ากับตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ ทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟ โดยในการเชื่อมต่อจะใช้อุปกรณ์ช่วยในโปรแกรมคือ ไทเมอร์เบรกเกอร์ลอจิก (Timer breaker logic) ทำการตั้งเวลาการปิดวงจร (close circuit) หลังจากผ่านการจำลองไปช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อพิจารณาผลของกระแสและแรงดันของระบบทั้งก่อนและหลังเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบ นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงกระแสอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายเข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟ ในการจำลองจะแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักคือ การจำลองทางไฟฟ้าของ D-STATCOM (รูปที่ 3.10) การจำลองระบบควบคุมสำหรับ D-STATCOM (รูปที่ 3.11) และการจำลองสร้างสัญญาณเกต โดยใช้เทคนิค PSPWM (รูปที่ 3.12) กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองดังตารางที่ 3.3

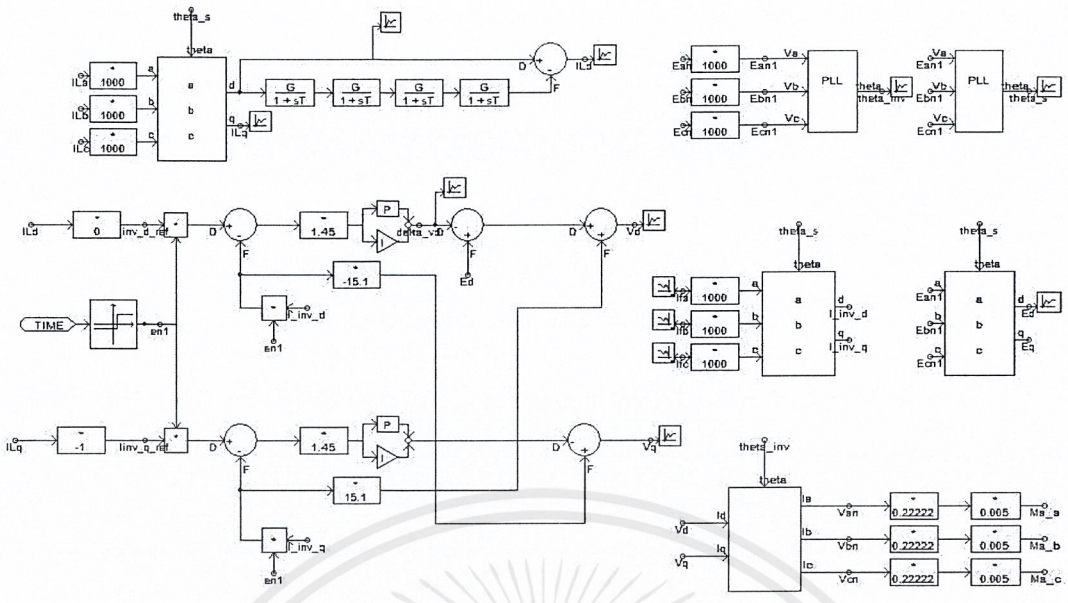
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของ D-STATCOM

พารามิเตอร์ในการจำลอง	
แรงดันดีซีลิงค์	200 V
ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ	43.5 mH
โพลดความต้านทาน (R)	95 $\Omega$
โพลดความเหนี่ยวนำ (L)	0.216 mH
ตัวประกอบกำลัง (PF)	0.8 lagging
หม้อแปลงแรงดัน	100/450 V <sub>L-L</sub>

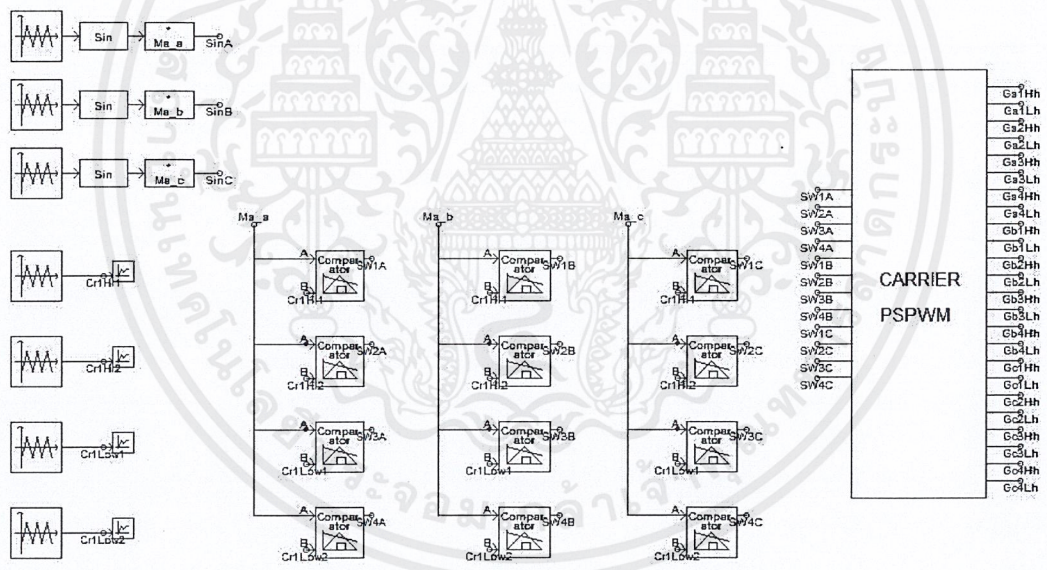


รูปที่ 3.10 แบบจำลองทางไฟฟ้าของ D-STATCOM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมการสร้างแรงดัน FCI



รูปที่ 3.12 แบบจำลองวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไซน์และสัญญาณเลือกแคเรียร์ของเทคนิค PSpwm สำหรับอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

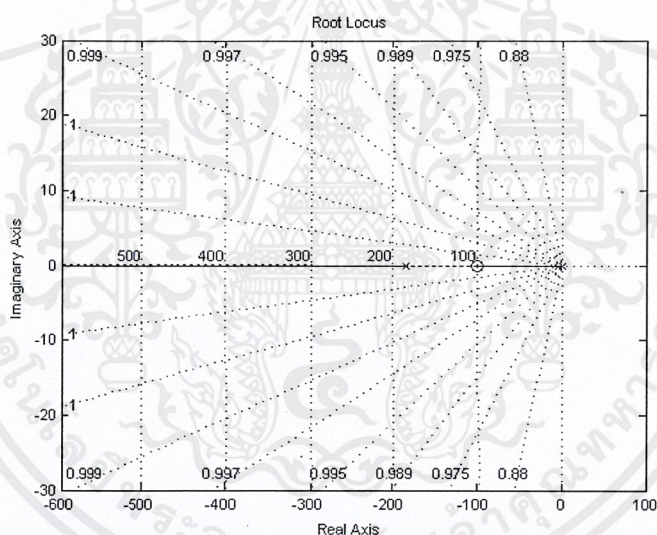
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ผลการจำลองการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ D-STATCOM

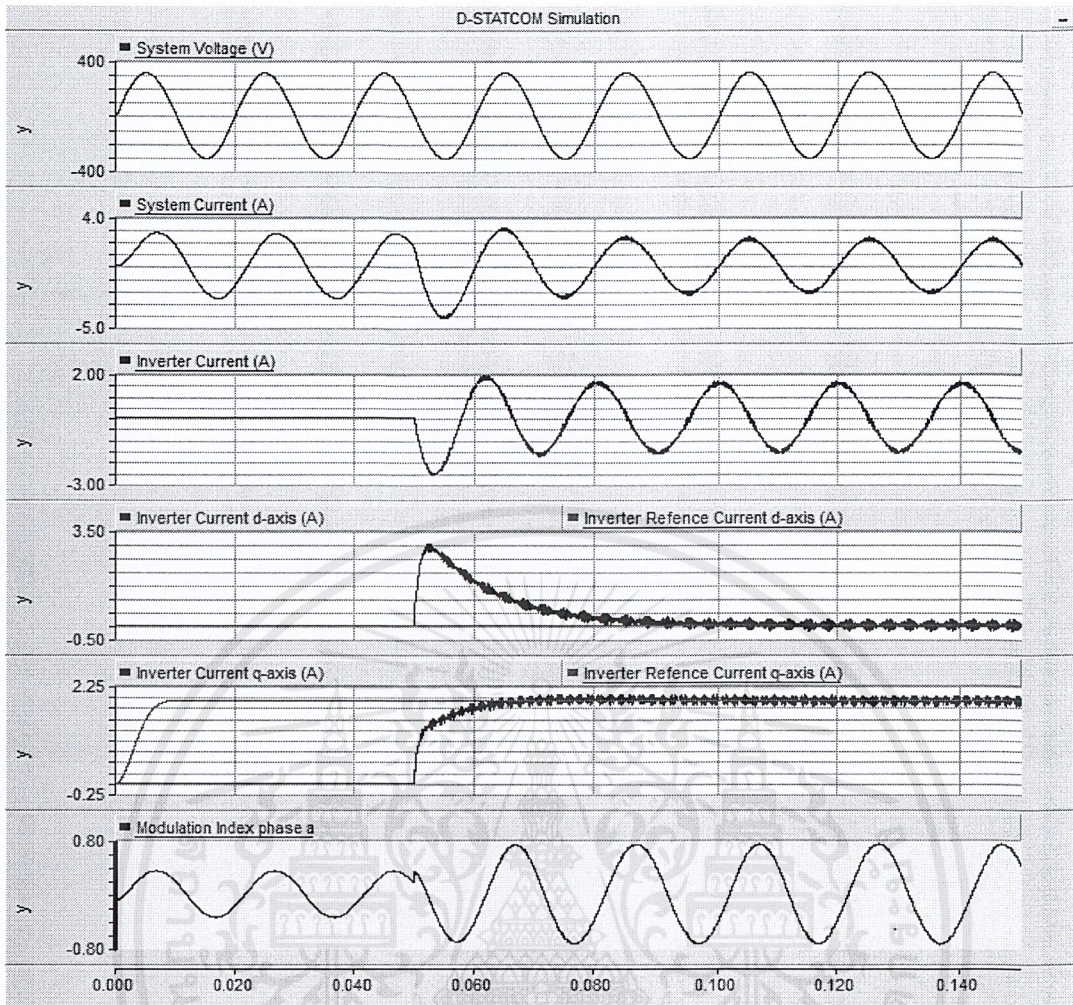
การจำลองชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบที่ต่ออยู่กับโหลดที่มีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 โดยระบบควบคุมการสร้างแรงดันอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ต้องตรวจจับกระแสโหลด กระแสอินเวอร์เตอร์ และแรงดันของระบบมาใช้ในการควบคุม เพื่อทำการสร้างแรงดันอ้างอิงให้กับอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยในการเชื่อมต่อเข้ากับระบบใช้อุปกรณ์ช่วยในโปรแกรม คือ ไทเมอร์เบรกเกอร์ลอจิก (Timer breaker logic) ทำการตั้งเวลาการปิดวงจร (close circuit) ที่เวลา 0.05 วินาที เพื่อทำการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบ

จากวิเคราะห์ระบบควบคุมในหัวข้อที่ 3.3 เนื่องจากโพลของระบบเป็นค่าคงที่ แต่ค่าซีโรจะเปลี่ยนแปลงไปตามพารามิเตอร์ของระบบควบคุมคือ  $K_p$  และ  $K_i$  ดังนั้นผลการจำลองจึงจะพิจารณาที่ค่าซีโรต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้ของระบบ

#### 3.6.1 ผลการจำลองที่ค่าซีโรเท่ากับ -100

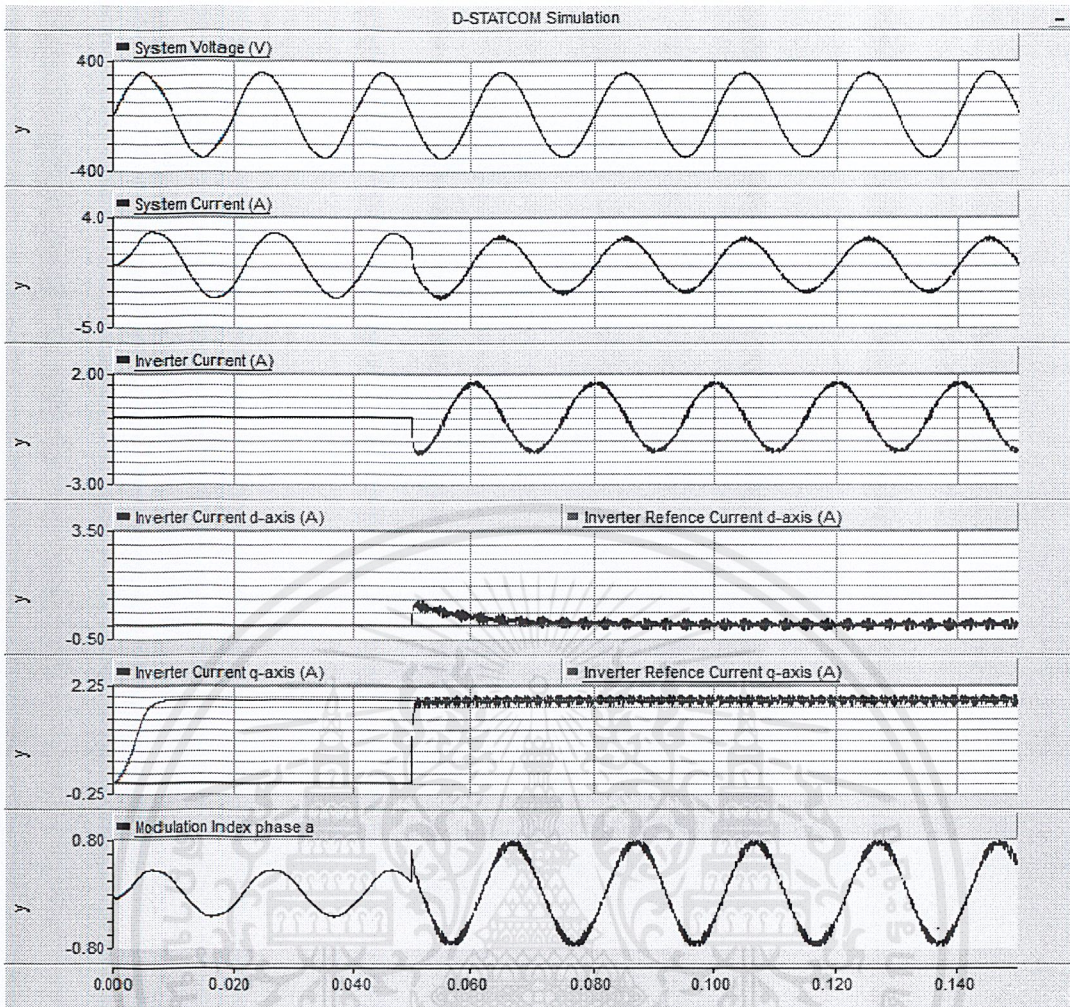


รูปที่ 3.13 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ -100



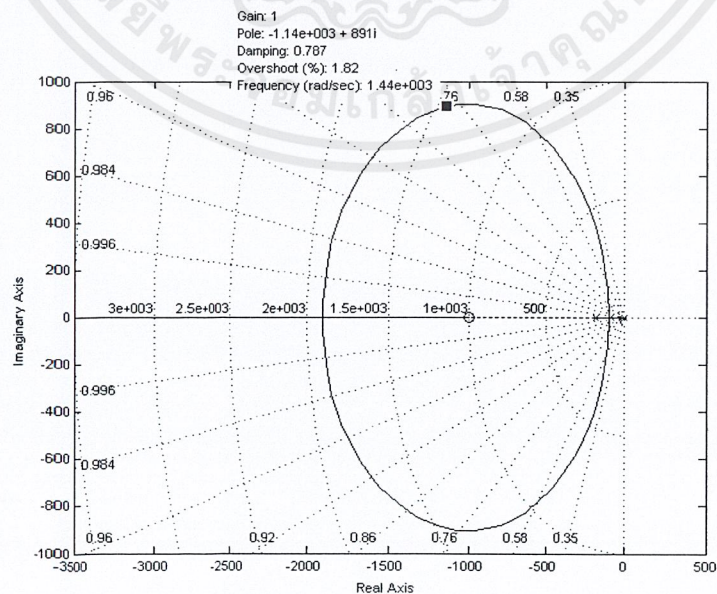
รูปที่ 3.14 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่  $K_p = 100$  และ  $K_i = 10000$

จากรูปที่ 3.14 และ 3.15 จะพบว่า ผลตอบสนองของกระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $d$  และ  $q$  จะปรับเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพโดยไม่เกิดการแกว่ง เนื่องจากระบบควบคุมที่ซีโโรมีค่าเท่ากับ  $-100$  เป็นระบบควบคุมอันดับหนึ่งจากกราฟเส้นทางเดินของรากในรูปที่ 3.13 อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่า  $K_p$  และ  $K_i$  แล้วผลตอบสนองของกระแสในแกน  $d$  และ  $q$  จะเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพได้เร็วขึ้น แต่ส่งผลให้สัญญาณ Modulation index มีสัญญาณความถี่สูงปะปนมาในรูปคลื่นด้วย



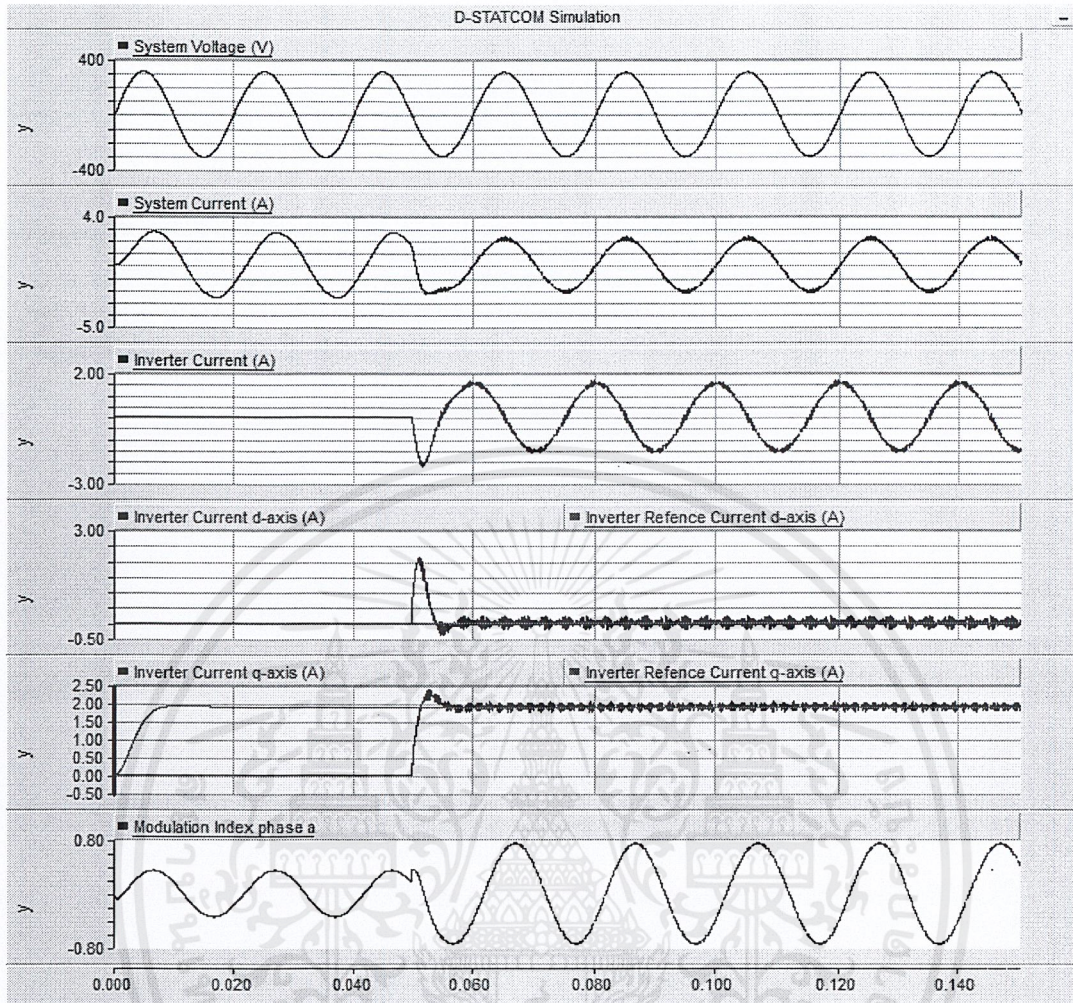
รูปที่ 3.15 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่  $K_p = 500$  และ  $K_i = 50000$

### 3.6.2 ผลการจำลองที่ค่าซีโรเท่ากับ -1000



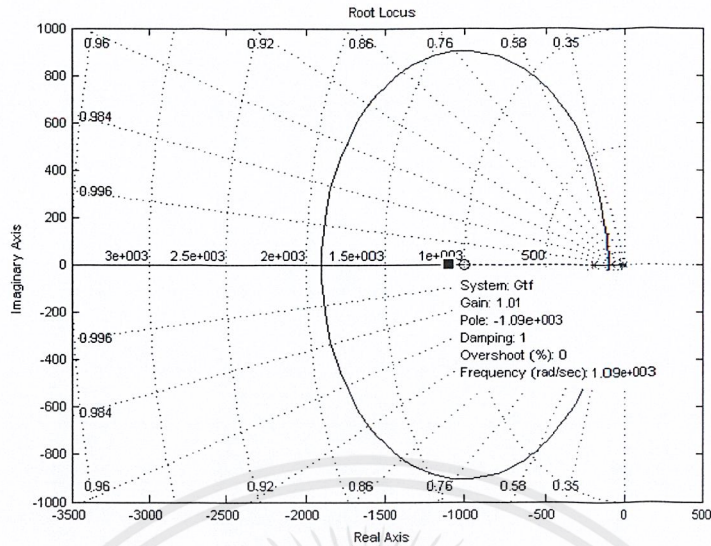
รูปที่ 3.16 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ -1000 และ  $K_p = 100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่  $K_p = 100$  และ  $K_i = 100000$

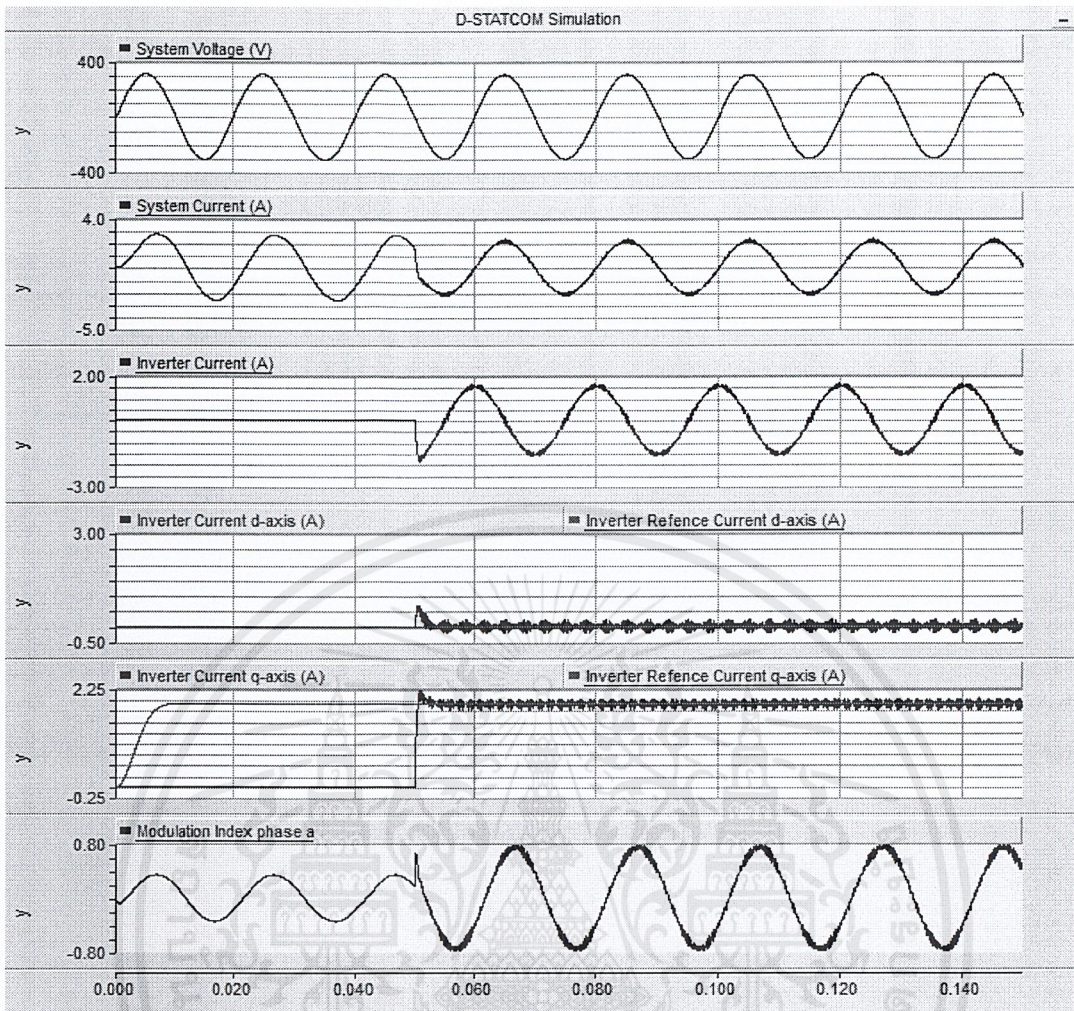
จากกราฟเส้นทางเดินของรากรูปที่ 3.16 พบว่าที่ค่าซีโร -1000 ระบบควบคุมจะเป็นระบบอันดับสอง นั่นคือผลตอบสนองของระบบจะเกิดการแกว่ง จะเห็นได้จากผลการจำลองรูปที่ 3.17 กระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $d$  และ  $q$  จะเกิดการแกว่งเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพซึ่งสอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) ในรูป 3.16



รูปที่ 3.18 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ  $-1000$  และ  $K_p = 500$

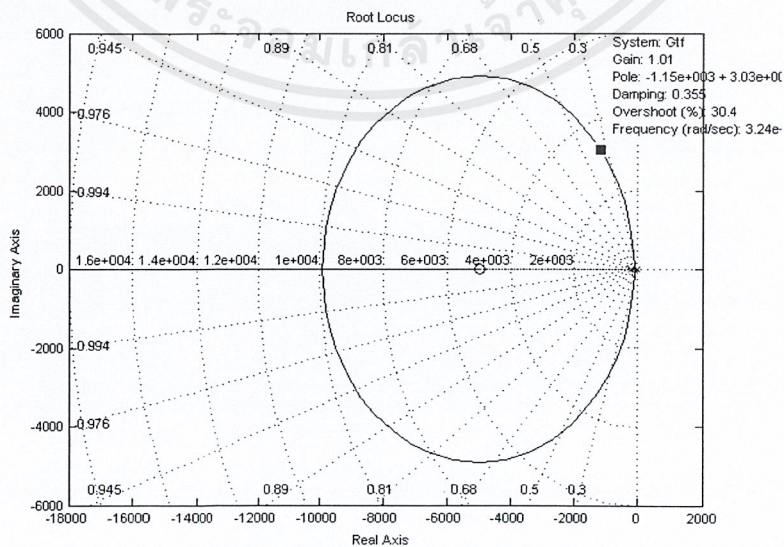
จากกราฟเส้นทางเดินของรากรูปที่ 3.18 พบว่าเมื่อเพิ่มค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ผลตอบสนองของระบบจะมีการแกว่งลดลงจนแทบไม่มีการแกว่ง เนื่องจากค่าเปอเซนต์การพุ่งเกินมีค่าลดลง

จากผลการจำลองรูปที่ 3.19 จะเห็นว่าผลตอบสนองของกระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $d$  และ  $q$  ปรึบเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพโดยมีการแกว่งของสัญญาณน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับกราฟเส้นทางเดินของรากในรูปที่ 3.18 แต่จากการเพิ่มค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ก็ส่งผลให้ค่ามอดดูเลขชั้นอินเด็กซ์ที่ได้มีสัญญาณความถี่สูงเกิดขึ้นตามมา



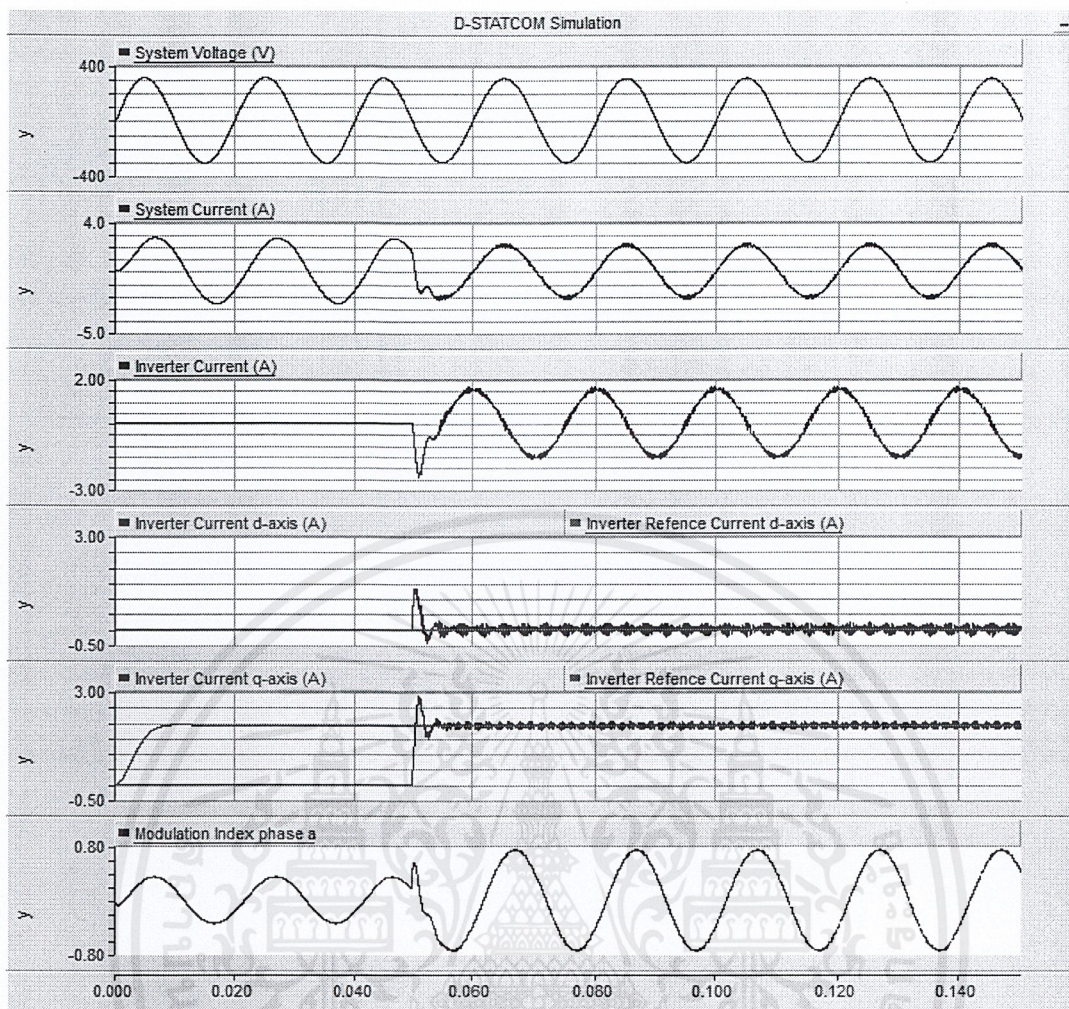
รูปที่ 3.19 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่  $K_p = 500$  และ  $K_i = 500000$

### 3.6.3 ผลการจำลองที่ค่าซีโรเท่ากับ -5000



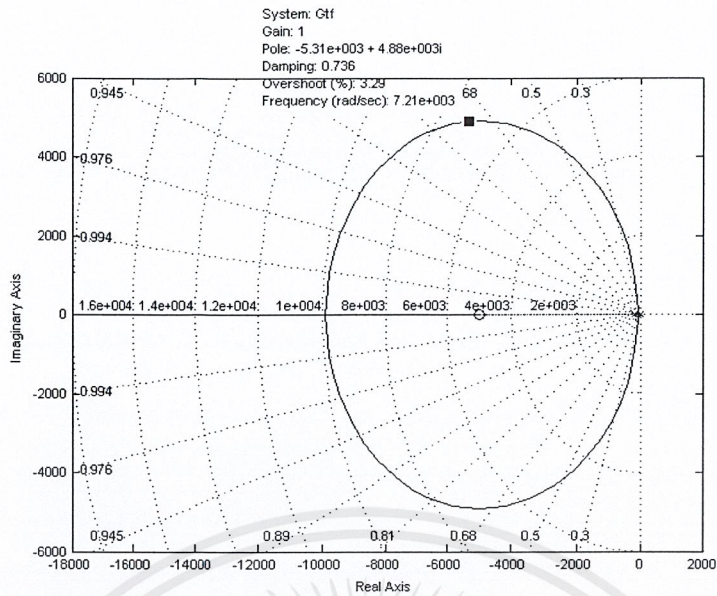
รูปที่ 3.20 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ -5000 และ  $K_p = 100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

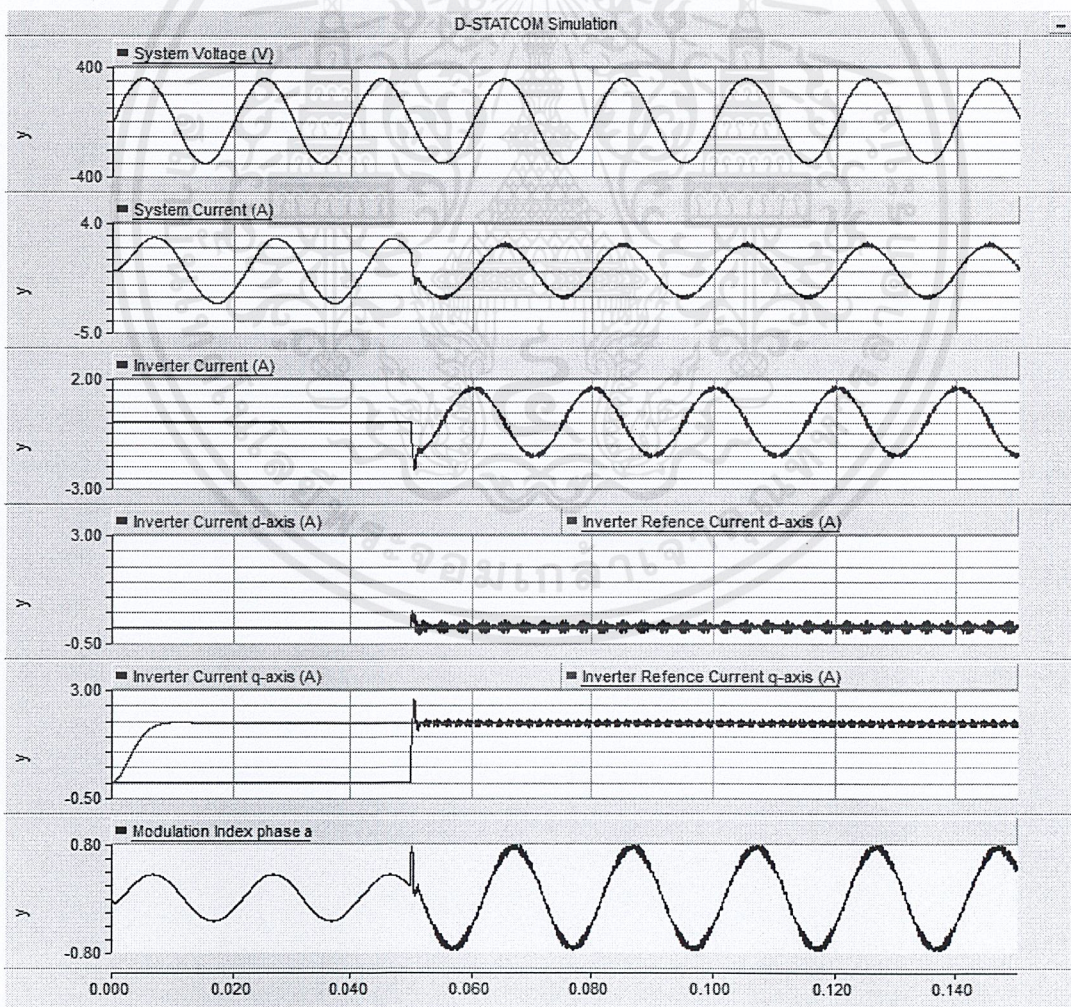


รูปที่ 3.21 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่  $K_p = 100$  และ  $K_i = 500000$

จากกราฟเส้นทางเดินของรากรูปที่ 3.20 พบว่าผลตอบสนองของระบบจะมีการแกว่งค่อนข้างสูงจากเปอเซนต์การพุ่งเกินประมาณ 30% เมื่อสังเกตจากผลการทดลองรูปที่ 3.21 จะเห็นว่ากระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $d$  และ  $q$  มีการแกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพค่อนข้างมากจริงตามกราฟเส้นทางเดินของรากร



รูปที่ 3.22 กราฟเส้นทางเดินของรากที่ค่าซีโรเท่ากับ 5000 และ  $K_p = 500$



รูปที่ 3.23 ผลการจำลอง D-STATCOM ที่  $K_p = 500$  และ  $K_i = 2500000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเพิ่มค่า  $K_p$  และ  $K_i$  จากกราฟเส้นทางเดินของรากรูปที่ 3.22 จะพบว่ามีความเป๋โอเซ็นต์การพุ่งเกินลดลง การแกว่งควรจะลดลงตามไปด้วย

จากผลการจำลองรูปที่ 3.23 พบว่ากระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $d$  และ  $q$  มีการแกว่งที่ลดลง และยังมีกระแสพุ่งเกินอยู่บ้างเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ก็ยังคงส่งผลให้ค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ที่ได้มีสัญญาณความถี่สูงเกิดขึ้นตามมา

### 3.7 สรุปผลการจำลองการชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟของ D-STATCOM

จากผลการจำลองพบว่าก่อนเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบมุมเฟสของกระแสจะตามหลังมุมเฟสแรงดันของระบบอยู่ที่  $36.86^\circ$  หรือมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ต่อมาเมื่อเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบแล้ว กระแสของระบบจะมีมุมเฟสที่ตรงกันกับแรงดันระบบ หรือมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1.0 เนื่องจากกระแสอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายเข้าสู่ระบบนั้นมีมุมเฟสที่นำแรงดันของระบบอยู่  $90^\circ$

ในการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม D-STATCOM นั้นควรเลือกค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ที่ส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบมีการแกว่งน้อยและค่าสัญญาณพุ่งเกินน้อยที่สุด และนอกจากนั้นยังพิจารณาถึงกระแสอินเวอร์เตอร์ในแกน  $d$  ที่อินเวอร์เตอร์ไม่ควรจ่ายเข้าสู่ระบบซึ่งเป็นกระแสที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริง จึงต้องควบคุมให้ค่าสัญญาณปรับเข้าสู่ค่าอ้างอิง 0 ให้เร็วที่สุดและไม่เกิดค่าพุ่งเกินขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่า  $K_p$  และ  $K_i$  มากๆ อาจส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบดีขึ้นจริงแต่กลับส่งผลให้ค่าสัญญาณค่ามอดดูเลชันอินเด็กซ์ที่ได้มีความถี่สูงเกิดขึ้นในสัญญาณไซน์ อาจส่งผลต่อการ มอดดูเลชันระหว่างสัญญาณไซน์กับสัญญาณแคเรียร์ได้

## บทที่ 4

### เครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงโครงสร้างของเครื่องต้นแบบ FCI ที่ใช้ในการทดลอง และกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานโดยรวมของเครื่องต้นแบบ FCI และวิธีการสร้างสัญญาณเกตของเทคนิค PSPWM โดยใช้ dsPIC และ FPGA จากนั้นเป็นขั้นตอนการทดลองและนำผลของสัญญาณเกตของเทคนิค PSPWM มาทดลองกับเครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์โดยแบ่งหัวข้อการทดลองดังนี้ การสร้างแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์และประยุกต์ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับ D-STATCOM เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า

#### 4.2 โครงสร้างเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง

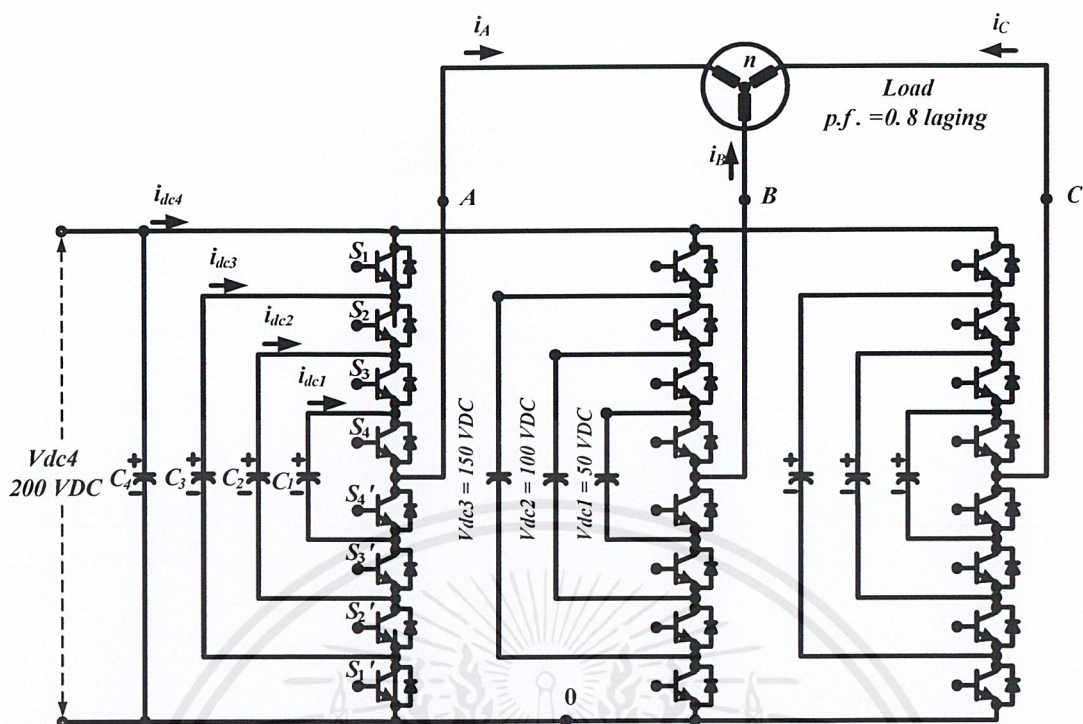
เครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลองในปฏิญานิพนธ์นี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนหลักคือ ส่วนของวงจรกำลังและส่วนของวงจรควบคุมดังที่จะแสดงต่อไปนี้

##### 4.2.1 วงจรกำลังของเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง

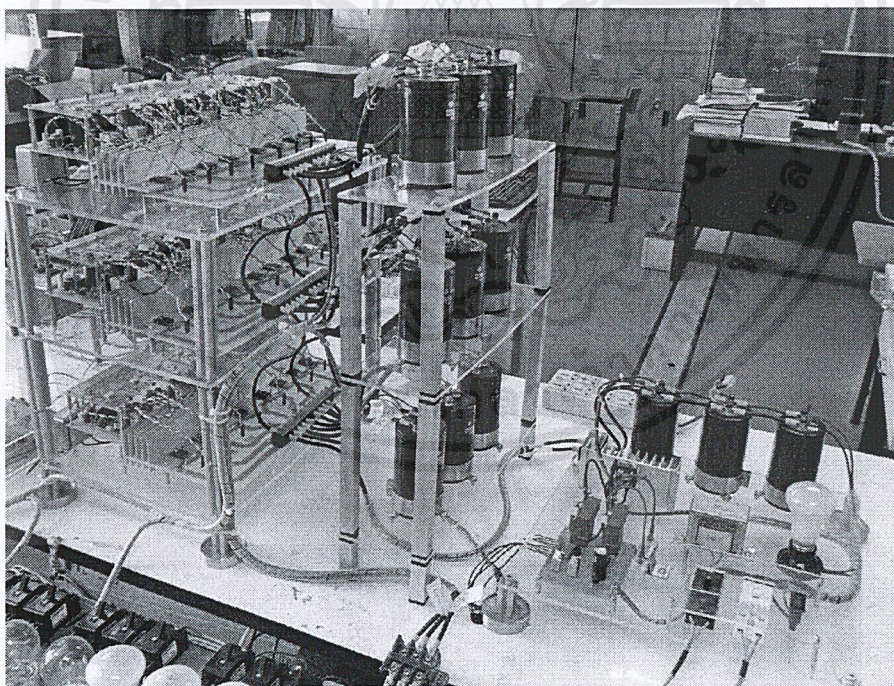
โครงสร้างวงจรกำลังของเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 มีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 2 ส่วน คือ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Power semi-conductor) โดยตัวเก็บประจุนอกสุดเรียกว่า คอมมอนดีซีลิงก์ (Common DC-link) เป็นตัวสะสมพลังงาน ขณะที่ตัวเก็บประจุก่อตัวอื่นๆ เรียกว่า ตัวเก็บประจุฟลายอิง (Flying capacitor) เป็นตัวสร้างแรงดันระดับต่างๆ โดยในปฏิญานิพนธ์นี้มีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของวงจรกำลังเครื่องต้นแบบ FCI ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดอุปกรณ์วงจรควบคุมของเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง

สวิตช์กำลัง	● IGBT : G2BN60B3D (1200V,40 A)
ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์	● 2200 $\mu$ F 450 VDC 9 ตัว
ตัวเก็บประจุดีซีลิงค์	● 2200 $\mu$ F 450 VDC 3 ตัว
แรงดันดีซีลิงค์	● 200 VDC



รูปที่ 4.1 วงจรกำลังพื้นฐานของเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลองแบบ 3 เฟส



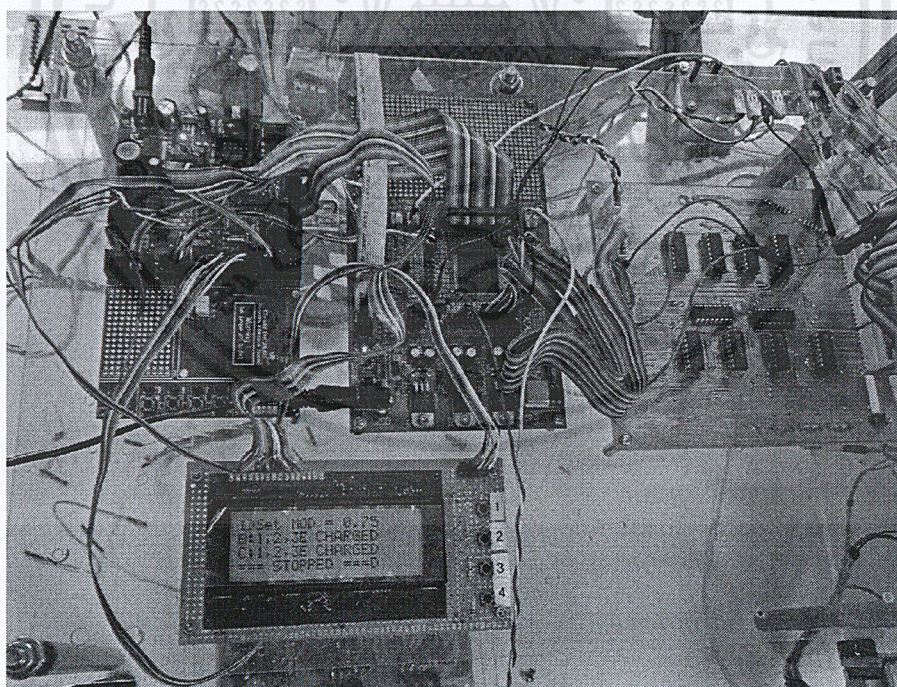
รูปที่ 4.2 วงจรกำลังเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เมื่อทำการกำหนดแหล่งจ่ายไฟ DC ให้มีค่าเท่ากับ 200 VDC โดยที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงค์ในแต่ละระดับจะมีแรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุมีค่า  $50V_{dc}$ ,  $100V_{dc}$  และวงนอกสุด  $150V_{dc}$  ตามลำดับ และแรงดันที่ตีซีลิ่งค์  $200V_{dc}$  โดยจะขึ้นอยู่กับ การ “ON” และ “OFF” ของสวิตช์กำลังแต่ละตัว นอกจากนั้นระดับแรงดันด้านขาออกเดียวกันยังสามารถสร้างได้หลายวิธี แต่มีผลการประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุแต่ละวงแตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2

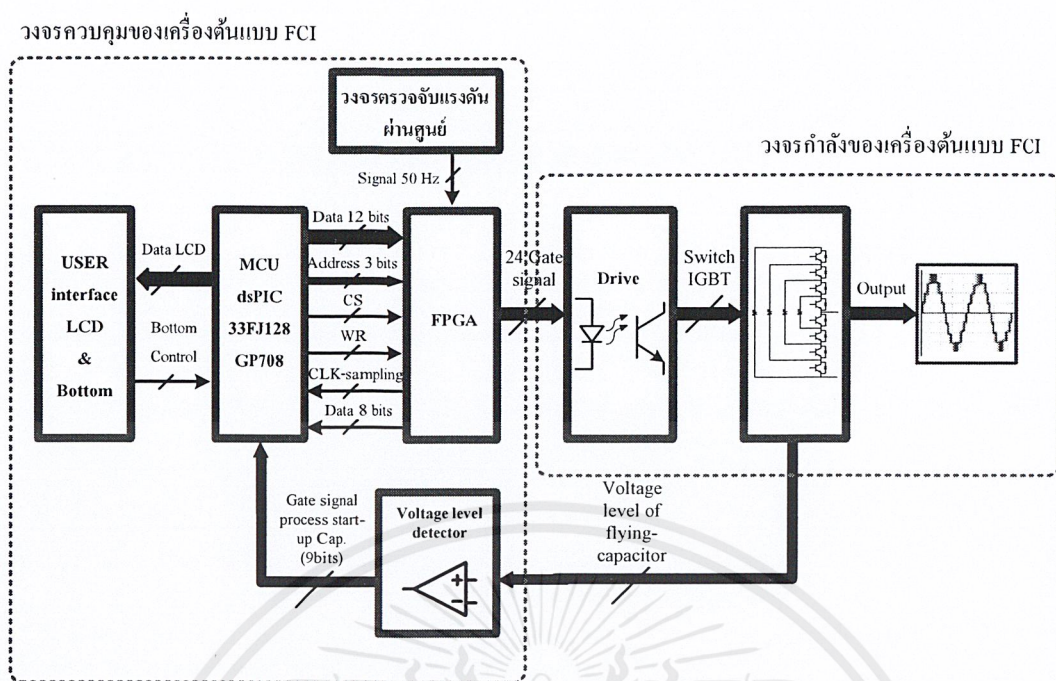
#### 4.2.2 วงจรควบคุมของเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง

โครงสร้างวงจรควบคุมของเครื่องต้นแบบ FCI แสดงดังรูปที่ 4.3 มีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 2 ส่วนคือ บอร์ด ET-dsPIC33WEB V1.0 (dsPIC33FJ128GP708) และ FPGA รุ่น Altera: ACEX1K EP1K30TC144-3 โดย dsPIC จะมีหน้าที่คำนวณอัตราการมีอดดูลิตแซมปลิงไซน์ และสัญญาณควบคุมต่างๆ และ FPGA นั้นจะมีหน้าที่ สร้างสัญญาณเกตเพื่อไปควบคุมการทำงานของสวิตช์กำลัง ส่วนชุดวงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์มีหน้าที่รับสัญญาณจากการไฟฟ้าและส่งสัญญาณความถี่ 50Hz ต่อไปให้ FPGA และวงจร Voltage level Detector จะมีหน้าที่ตรวจจับแรงดันที่ตัวเก็บประจุเพื่อใช้ในระหว่างการ Start Up ของเครื่องต้นแบบ FCI [3] โดยการทำงานที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงเป็นบล็อกไว้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ของวงจรควบคุมเครื่องต้นแบบ FCI สำหรับการทดลอง

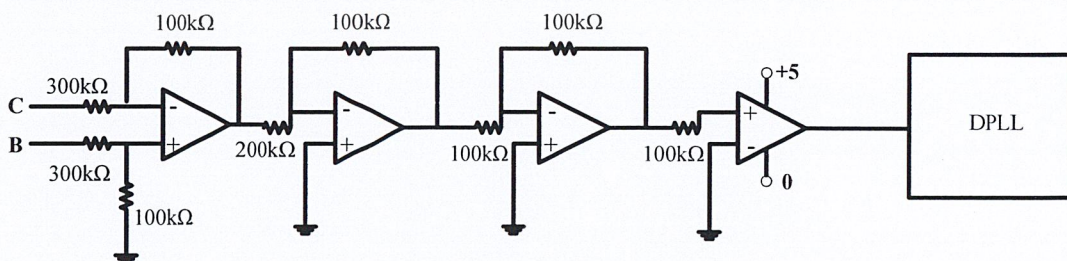
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมการทำงานโดยรวมของเครื่องต้นแบบ FCI

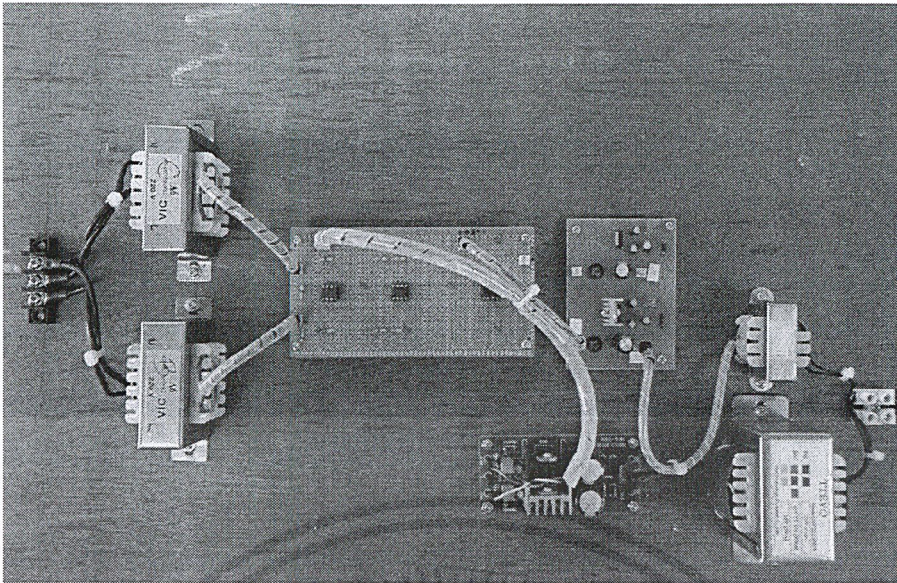
### 4.3 วงจรตรวจจ็ับแรงดันผ่านศูนย์

วงจรตรวจจ็ับแรงดันผ่านศูนย์ (Zero-crossing Voltage Detector) เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่มีแรงดันอ้างอิงลงกราวนด์ หมายถึงมีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันด้านขาออกของวงจรจะแกว่งระหว่างแรงดันอิมิตต์ว้านบวกและลบ เนื่องจากออปแอมป์มีอัตราขยายสูงมาก แรงดันอินพุตที่ต่างกันเพียงเล็กน้อยก็ส่งผลให้เกิดการอิมิตต์วที่เอาต์พุตแล้วทุกครั้งอินพุตมีการผ่านศูนย์ที่เป็นแรงดันอ้างอิงด้านขาออกจึงมีการเปลี่ยนสถานะทุกครั้งโดยในปริณญาณิพนธ์นี้จะทำการใช้วงจรตรวจจ็ับแรงดันผ่านศูนย์นี้มาใช้เป็นสัญญาณด้านขาเข้าของวงจรถิจิตอลเฟสล็อก ดังรูปที่ 4.5



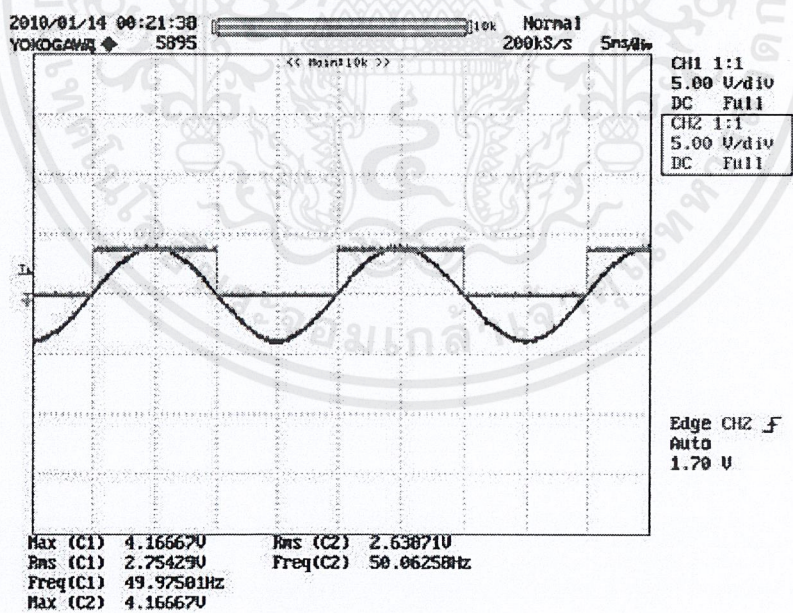
รูปที่ 4.5 วงจรตรวจจ็ับแรงดันผ่านศูนย์ และดิจิตอลเฟสล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 วงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์

ในปริิฏยณานิพนธ์เล่มนี้เป็นการนำสัญญาณไซน์เฟส B กับ สัญญาณไซน์เฟส C มาทำการเปรียบเทียบกันโดยใช้วงจร Comparator และจากนั้นก็นำไปผ่านวงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ โดยสัญญาณด้านขาออกจะมีลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สัญญาณด้านขาออกของวงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรานำสัญญาณไซน์เฟส B กับ สัญญาณไซน์เฟส C มาทำการเปรียบเทียบกัน โดยสัญญาณด้านขาออกของวงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ จะตามสัญญาณไซน์เฟส A อยู่  $90^\circ$  ตามแผนภาพเฟสเซอร์ดังรูปที่ 4.9 หลังจากนั้นนำสัญญาณด้านขาออกของวงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ ไปเข้าเป็นสัญญาณด้านขาเข้าของดิจิตอลเฟสล็อกkup เมื่อเข้าดิจิตอลเฟสล็อกkup ในดิจิตอลเฟสล็อกkup จะทำให้สัญญาณนำสัญญาณไซน์เฟส A อยู่  $90^\circ$  ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สัญญาณด้านขาออกของดิจิตอลเฟสล็อกkup จึงมีเฟสตรงกับสัญญาณไซน์เฟส A



รูปที่ 4.8 แผนภาพเฟสเซอร์การเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณไซน์เฟส B กับสัญญาณไซน์เฟส C



ในวงจรดิจิตอลเฟสล็อกกรุป นี้จะสามารถกำหนดค่าแบนวิดธ์ได้จากสมการที่ (4.1) โดยค่า  $\Delta f_{\max}$  คือ ช่วงกว้างความถี่ที่ยังสามารถทำให้สัญญาณความถี่ด้านขาเข้าและความถี่ด้านขาออกล็อกไปด้วยกัน

$$\begin{aligned}\Delta f_{\max} &= f_{out} - f_c \\ &= \frac{Mf_c}{2KN}\end{aligned}\quad (4.1)$$

$$IDCLK = 2Nf_c \quad (4.2)$$

ในปริิฏยฐานิพนธ์นี้จะทำการสร้างสัญญาณไซน์ความถี่มูลฐาน  $f_c = 50$  Hz โดยใช้ dsPIC ซึ่งกำหนดให้มีการชักตัวอย่างข้อมูล 1 ไซเคิลเท่ากับ 256 จุดข้อมูลดังนั้น ความถี่ในการชักตัวอย่างข้อมูลจึงเท่ากับ  $50 \times 256 = 12.8$  kHz สำหรับความถี่มูลฐาน 50 Hz

ค่า  $IDCLK$  ได้จากความถี่ของตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Crystal Oscillator) นำมาทำการหารความถี่ให้เท่ากับ 6.144 MHz ดังนั้น  $N$  จึงมีค่าเท่ากับ 61440 ดังสมการที่ (4.2) ส่วนค่า  $Mf_c$  ได้จากความถี่ของตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Crystal Oscillator) ความถี่ 24.576 MHz

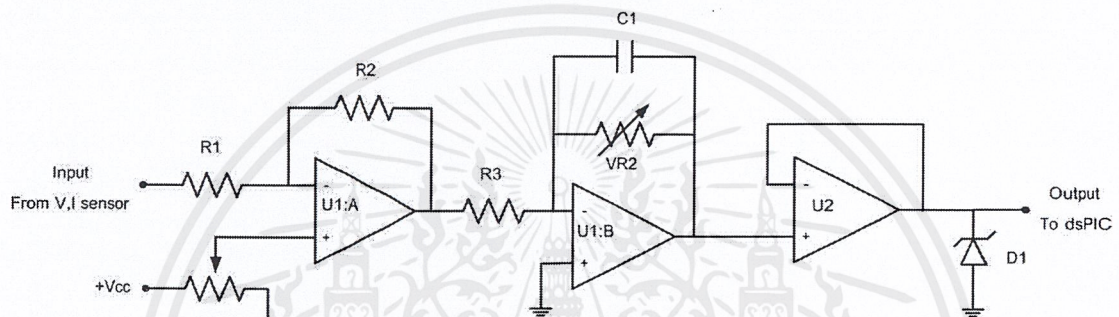
จากสมการที่ (4.1) กำหนดค่าช่วงกว้างความถี่ที่ยังสามารถทำให้สัญญาณความถี่ด้านขาเข้าและความถี่ด้านขาออกล็อกไปด้วยกันโดยในปริิฏยฐานิพนธ์เล่มนี้ได้ใช้  $\Delta f_{\max} = 6.25$  ดังนั้นจะต้องใช้ค่า  $K = 32 = (2^5)$  โดยที่ค่า  $K$  สามารถเลือกได้ตั้งแต่  $2^3 - 2^{17}$

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อนำสัญญาณที่ได้จากตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ เข้ามาในดิจิตอลเฟสล็อกกรุปจะทำให้สัญญาณด้านขาออกของดิจิตอลเฟสล็อกกรุปมีเฟสตรงกับเฟส A เนื่องจากสัญญาณจาก ตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์ จะตามสัญญาณไซน์เฟส A อยู่  $90^\circ$  แต่เมื่อเข้าดิจิตอลเฟสล็อกกรุป ในดิจิตอลเฟสล็อกกรุป จะทำให้สัญญาณนำสัญญาณไซน์เฟส A อยู่  $90^\circ$  ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สัญญาณด้านขาออกของดิจิตอลเฟสล็อกกรุป จึงมีเฟสตรงกับสัญญาณไซน์เฟส A

สัญญาณที่ได้จากดิจิตอลเฟสล็อกกรุปจะนำไปสร้างความถี่ให้เท่ากับ 12.8 kHz โดยค่า 12.8 kHz นี้จะทำการส่งค่าไปที่ dsPIC เพื่อทำการแซมปิ้งค่าไซน์และความถี่ 12.8 kHz ยังได้ส่งไปที่วงจรรับโดยมีการนับตั้งแต่ 0-255 เพื่อเป็นการชี้ตำแหน่งของค่าไซน์เนื่องจากใน dsPIC ได้เก็บข้อมูลค่าไซน์ไว้ทั้งหมด 256 ค่าไว้

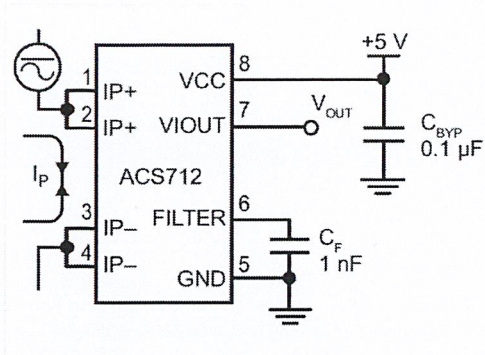
#### 4.5 วงจรตรวจวัดแรงดันและกระแส

การนำสัญญาณแรงดันระบบ กระแสระบบและกระแสอินเวอร์เตอร์เพื่อส่งไปประมวลผลในการป้อนกลับสำหรับระบบควบคุมแบบวงปิด ดังรูปที่ 3.3 นั้น จะใช้ dsPIC ในการคำนวณและต้องรับสัญญาณแรงดันและกระแสนาลอกเข้ามาคำนวณ และข้อจำกัดของการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล(ADC: Analog-to-Digital Converter) ของ dsPIC จะต้องมีค่าระหว่าง 0-3.3V ซึ่งจะพบว่าจะได้สัญญาณเฉพาะช่วงบวกเท่านั้น แต่สัญญาณกระแสและแรงดันที่วัดมานั้นเป็นสัญญาณไซน์ซึ่งมีทั้งช่วงบวกและลบ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับระดับแรงดันของสัญญาณให้อยู่ในช่วง -1.65V ถึง 1.65V และยกระดับสัญญาณขึ้น จะทำให้แรงดันอยู่ในช่วงบวกทั้งหมด เพื่อให้ dsPIC สามารถแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลได้

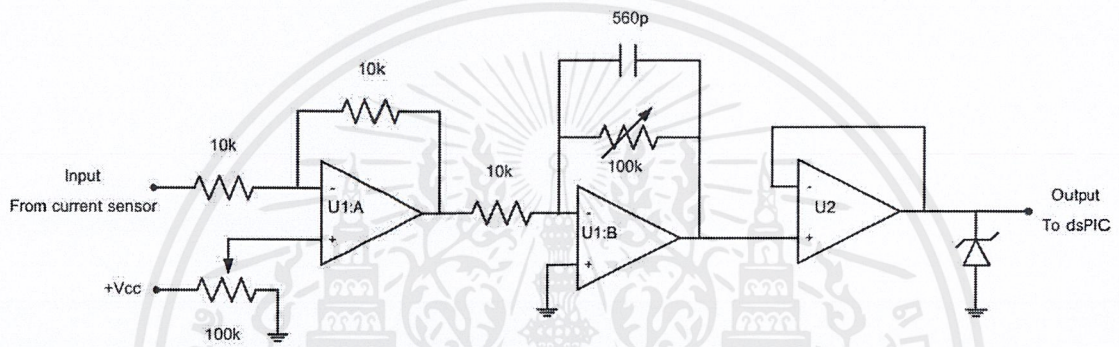


รูปที่ 4.11 วงจรยกกระดับแรงดัน

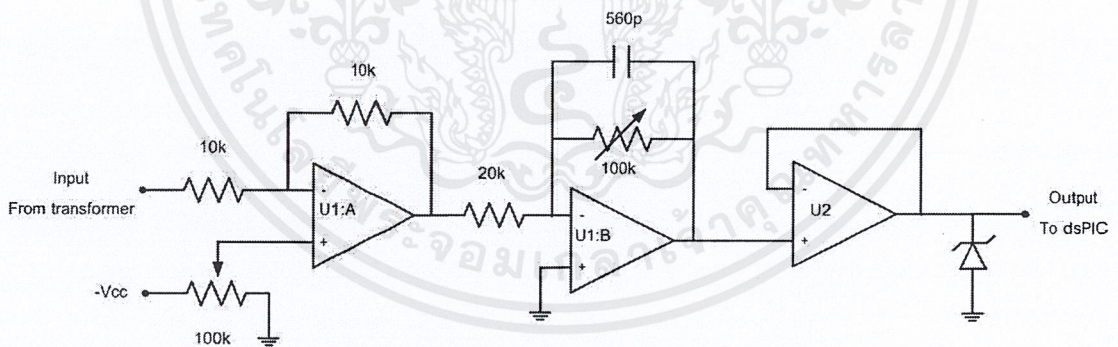
ในการออกแบบวงจรจะใช้วงจรยกระดับสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายผลต่าง(U1:A)วงจรขยายแบบกลับเฟส(U1:B) วงจรบัฟเฟอร์(U2) และใช้ซีเนอร์ไดโอดเพิ่มป้องกันแรงดันเกิน 3.3V ดังรูปที่ 4.11 โดยนำสัญญาณอินพุตมาจากแรงดันเฟสของระบบที่ทั้งหมดแปลงลดแรงดันทั้งสามเฟสจาก  $220V_{rms}$  เป็น  $3V_{rms}$  แล้วลดแรงดันด้วยโวลเตจดีไวเดอร์อีกครั้งหนึ่งให้ได้  $800mV_{rms}$  และสัญญาณที่ได้มาจากตัวตรวจจับกระแสระบบและกระแสอินเวอร์เตอร์ทั้งสามเฟสที่ได้มาจาก Hall Effect Current Sensor เบอร์ ACS712ELCTR-30A-T ซึ่งจะเป็นสัญญาณอนาล็อกรูปไซน์ที่อยู่ในซีกบวกลบแล้ว ดังนั้นค่าตัวแปรของอัตราขยายของวงจรรยกกระดับสัญญาณของวงจรถวจจับกระแสและวงจรถวจจับแรงดันจะไม่เหมือนกัน ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ซึ่งในวงจรจริงจะใช้ Potentiometer ในการปรับค่าความต้านทานเพื่อให้ได้ความละเอียดมากขึ้น และยังสามารถปรับใช้ได้เมื่อมีการปรับแต่งหรือเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตของวงจรรยกกระดับสัญญาณ



รูปที่ 4.12 ACS712ELCTR-30A-T Hall Effect Current Sensor



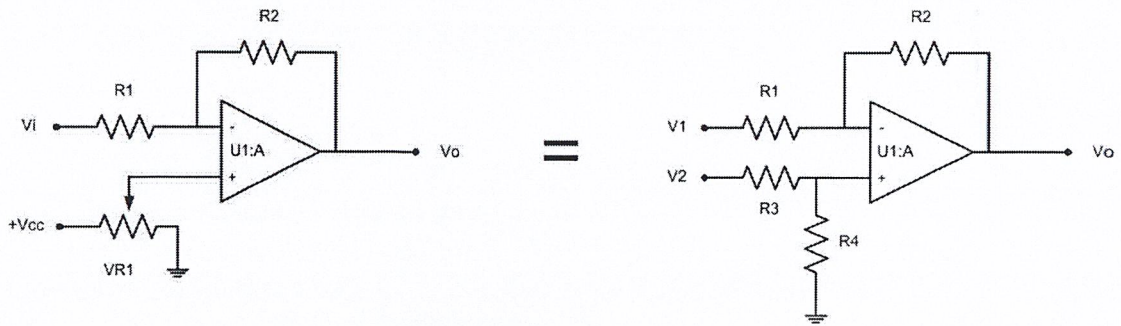
รูปที่ 4.13 วงจรยกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดกระแส



รูปที่ 4.14 วงจรยกระดับสัญญาณของวงจรตรวจวัดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5.1 วงจรขยายผลต่าง



รูปที่ 4.15 วงจรขยายผลต่าง

วงจรขยายผลต่างคือ วงจรออปแอมป์ที่ทำหน้าที่ขยายผลต่างของแรงดันทั้งสองทางด้านอินพุต จากจุด  $V1$  และ  $V2$  ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับอินพุตผลต่างของออปแอมป์มาตรฐาน แต่ต่างกันที่วงจรขยายผลต่างมีการป้อนกลับทางลบเพื่อควบคุมอัตราขยายของวงจรตามต้องการ พิจารณาให้  $V2 = 0$  ดังนั้นจึงเหลือแค่  $V1$  ตัวเดียวที่ผ่านทางออปแอมป์เข้าทางขาอินพุตลบจะได้เอาท์พุต

$$\frac{V1}{R1} = \frac{-Vo}{R2}$$

$$V'o = -\frac{(V1)(R2)}{R1} \quad (4.3)$$

พิจารณาให้  $V1 = 0$  ดังนั้นจึงเหลือแค่  $V2$  ตัวเดียวที่ผ่านทางออปแอมป์เข้าทางขาอินพุตบวก จะได้เอาท์พุต

$$\frac{(V2)(R4)}{R3 + R4} = \frac{(Vo)(R1)}{R1 + R2}$$

$$V''o = \frac{(V2)(R4)}{R3 + R4} \times \frac{R1 + R2}{R1} \quad (4.4)$$

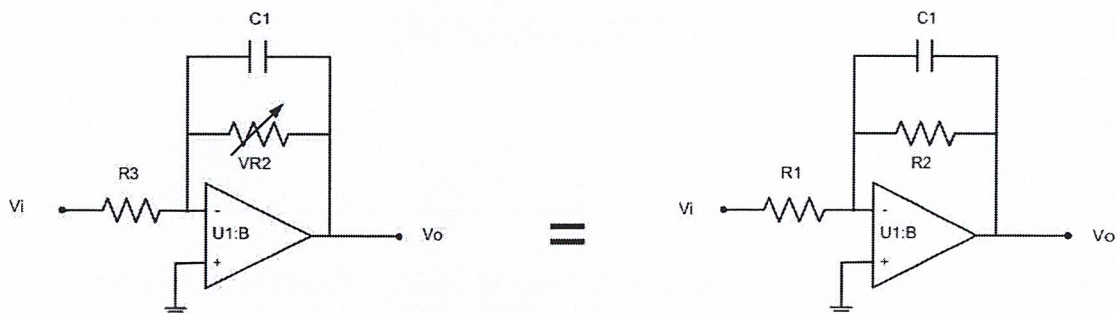
ผลรวมของ  $V'o$  และ  $V''o$  จากสมการ (4.3) และ (4.4) จะได้

$$Vo = V''o + V'o$$

$$\therefore Vo = \frac{(Vo)(R1)}{R1 + R2} - \frac{(V1)(R2)}{R1} \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5.2 วงจรขยายกลับเฟส



รูปที่ 4.16 วงจรขยายกลับเฟส

วงจขยายสัญญาณแบบกลับเฟส เป็นการจัดวงจขยายที่สัญญาณอินพุต กับสัญญาณเอาต์พุตมีเฟสต่างกัน  $180^\circ$  สัญญาณอินพุตถูกป้อนให้ขาอินเวอร์ตลักษณะวงจขยายสัญญาณแบบกลับเฟสแสดงดังรูปที่ 4.16

จากรูปที่ 4.16 แสดงวงจขยายสัญญาณแบบกลับเฟสสัญญาณอินพุต  $V_i$  ถูกป้อนเข้าที่ขาอินเวอร์ต(-) มี  $R_1$  เป็นตัวต้านทานกำหนดขนาดของสัญญาณอินพุตมี  $R_2$  เป็นตัวต้านทานกำหนดอัตราการป้อนกลับถ้าสัญญาณอินพุตซึ่งบวกเข้ามาผ่านออปแอมป์ขยายออกเอาต์พุตเป็นซีกลบและสัญญาณอินพุตซึ่งลบเข้ามาผ่านออปแอมป์ขยายออกเอาต์พุตเป็นซีกบวก อัตราการขยายของวงจรถ้าได้ ดังสมการ

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (4.6)$$

เครื่องหมายลบในสมการแสดงว่า สัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตมีมุมต่างเฟสกัน  $180^\circ$  อัตราขยายสัญญาณของออปแอมป์ตามสมการที่ (4.6) พบว่าสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_2$  และ  $R_1$  การกำหนดอัตราส่วนของ  $R_2$  และ  $R_1$  แตกต่างกัน ทำให้อัตราขยายสัญญาณของวงจรถ่างกันด้วย

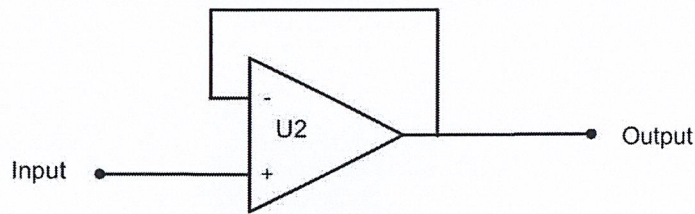
ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ที่ต่อคร่อม  $R_2$  อยู่เป็นส่วนประกอบของวงจกรองความถี่ต่ำผ่าน (Active Low-pass Filter) ซึ่งจะได้ความถี่คัตออฟ (Cut-off Frequency,  $f_c$ ) ดังสมการ

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R_2)(C_1)} \quad (4.7)$$

อัตราขยายของช่วงผ่าน (Pass Band) เป็น  $-R_2/R_1$  และช่วงลดทอน (Stop Band) หยดลงที่  $-6\text{dB/octave}$  เนื่องจากเป็นตัวกรอง first-order

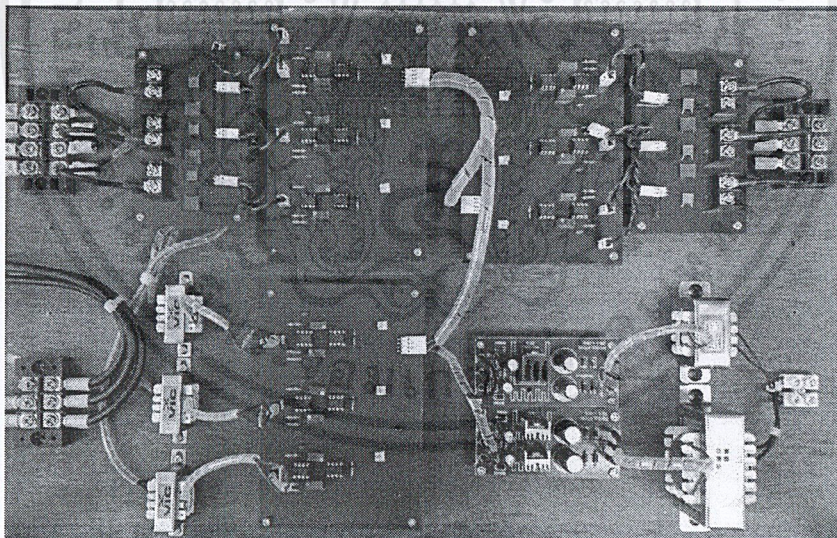
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.5.3 วงจรตามแรงดัน หรือวงจรบัฟเฟอร์



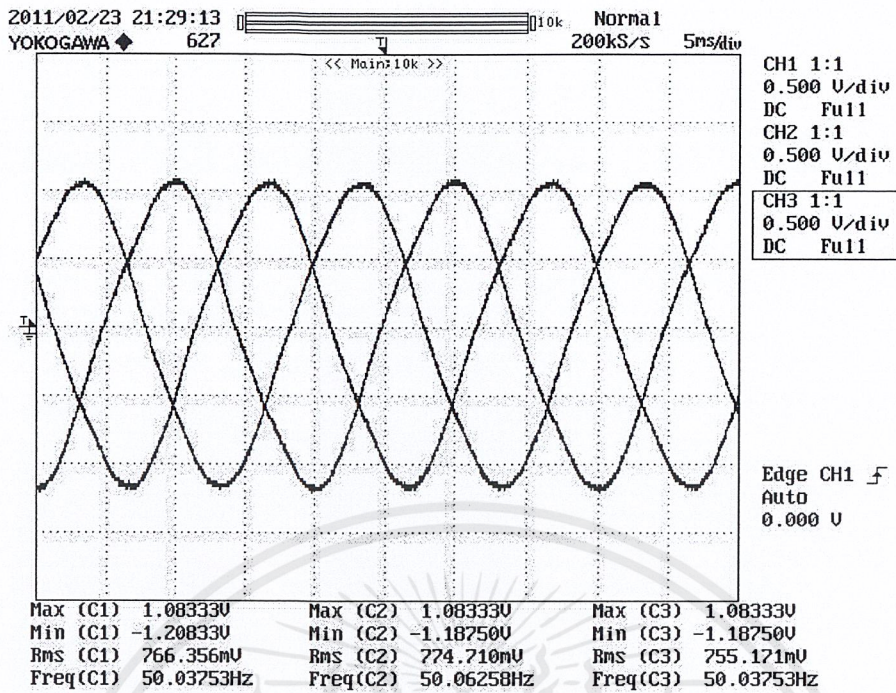
รูปที่ 4.17 วงจรตามแรงดัน หรือวงจรบัฟเฟอร์

วงจรตามแรงดัน หรือวงจรบัฟเฟอร์ หรือ Isolation Amplifier เป็นวงจรที่ใช้เชื่อมวงจรสองวงจรเข้าด้วยกัน เช่นระบบไอซีที่ต่างตระกูลกันหรือทรานซิสเตอร์ที่ไม่แมทซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์กัน จึงจำเป็นต้องใช้บัฟเฟอร์เพราะคุณสมบัติของออปแอมป์ทางอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก ทำให้ดึงกระแสจากอินพุทต่ำมากเมื่อเชื่อมต่อกับวงจรอื่นแล้วจะไม่ทำให้วงจรอื่นมีผลแตกต่างไปจากเดิมเป็นวงจรที่นำออปแอมป์มาต่อแล้วทำให้อัตราขยายแรงดันเท่ากับหนึ่ง และสัญญาณเอาต์พุตไม่มีการกลับเฟสหรือกลับขั้วกับสัญญาณอินพุตจะได้  $V_o = V_i$

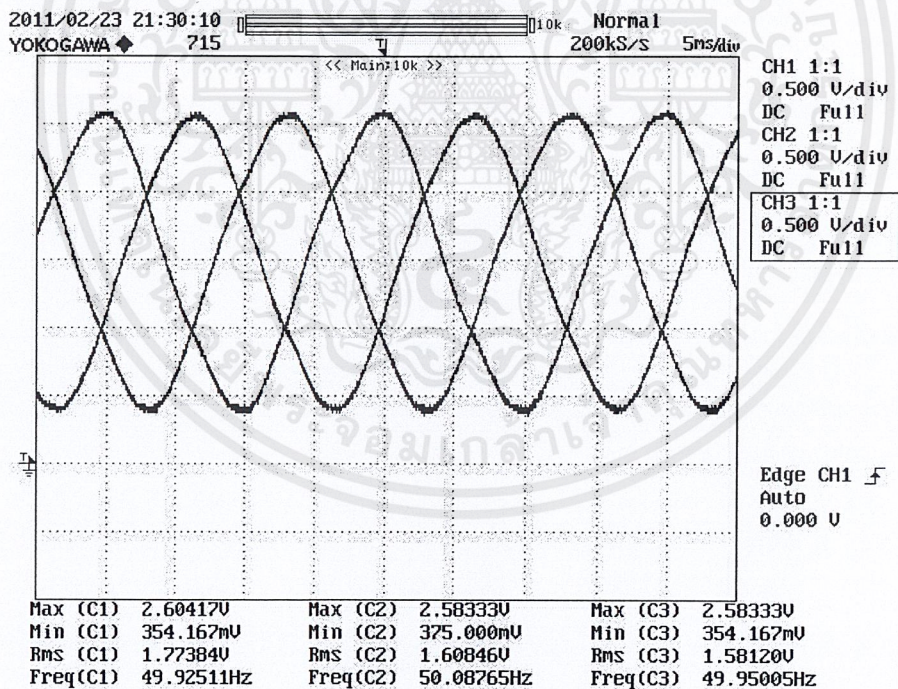


รูปที่ 4.18 วงจรตรวจวัดแรงดันระบบ กระแสระบบ และกระแสอินเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

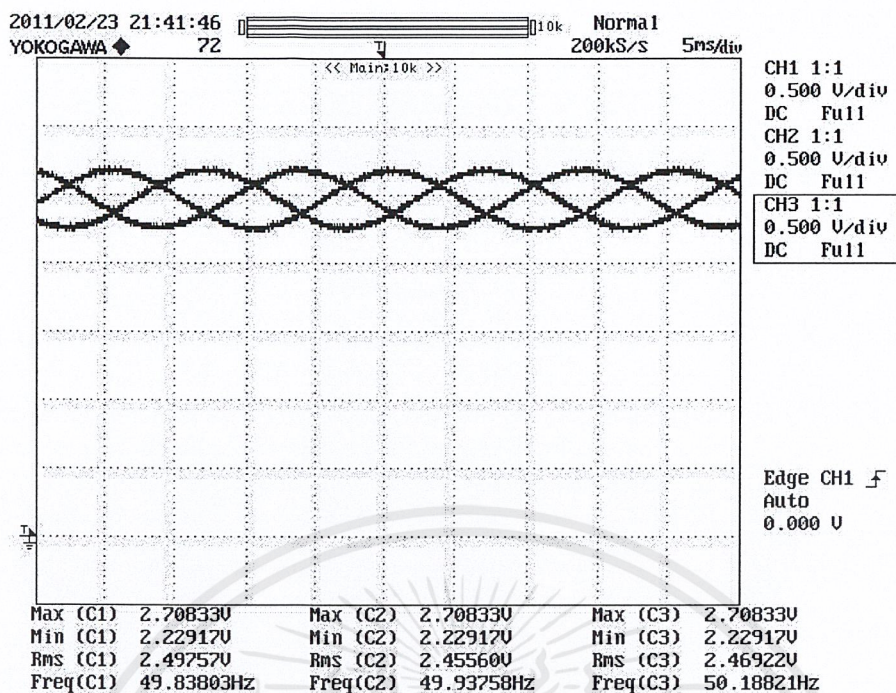


รูปที่ 4.19 แรงดันเฟสทั้งสามเฟสเมื่อลดแรงดันเหลือ 800mV<sub>rms</sub>

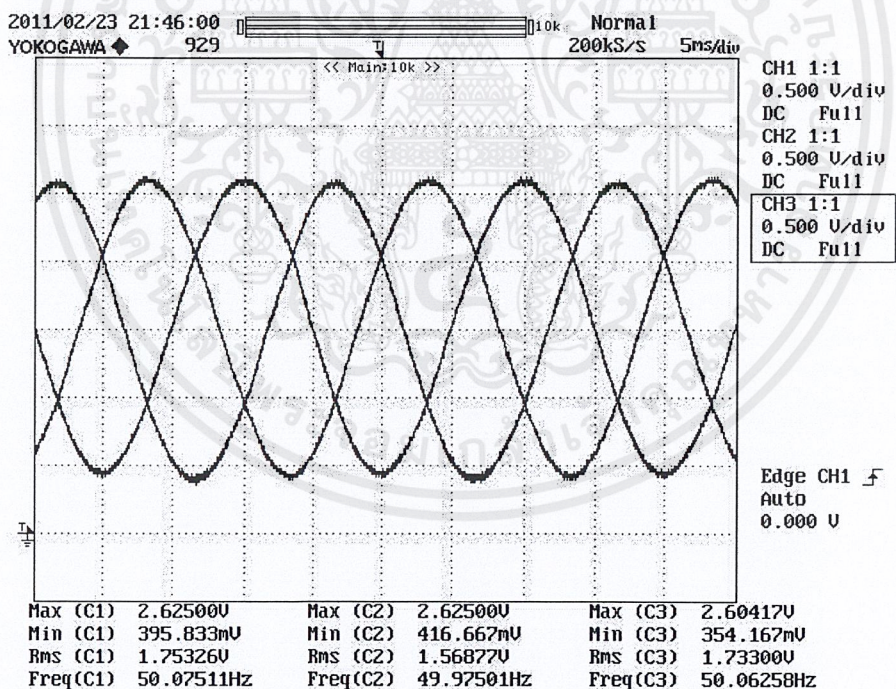


รูปที่ 4.20 สัญญาณอนาล็อกขาออกจากวงจรตรวจจับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 สัญญาณสามเฟสจาก Hall Effect Current Sensor ที่กระแส 2 A<sub>rms</sub>



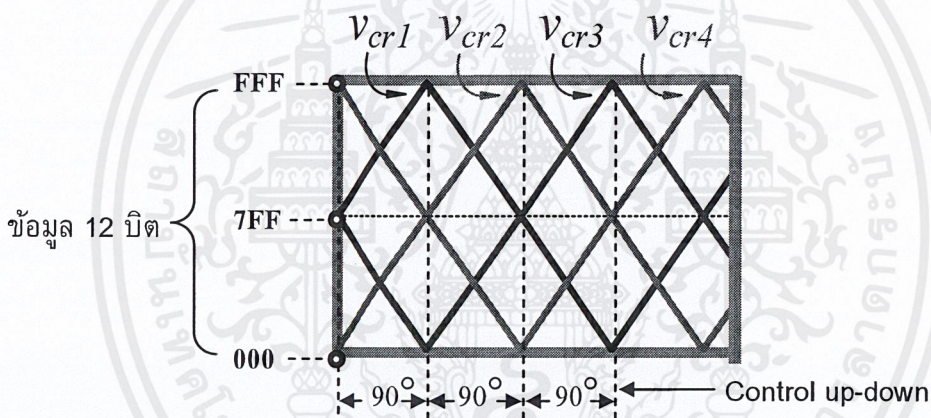
รูปที่ 4.22 สัญญาณอนาล็อกจากวงจรตรวจจับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การสร้างสัญญาณเกิดจากFPGA

การออกแบบและโปรแกรม FPGA จะกระทำบนโปรแกรม QuartusII9.1 Web Edition ในการออกแบบโดยการสร้างบล็อกไดอะแกรมจาก MEGA Function และใช้ภาษา VHDL

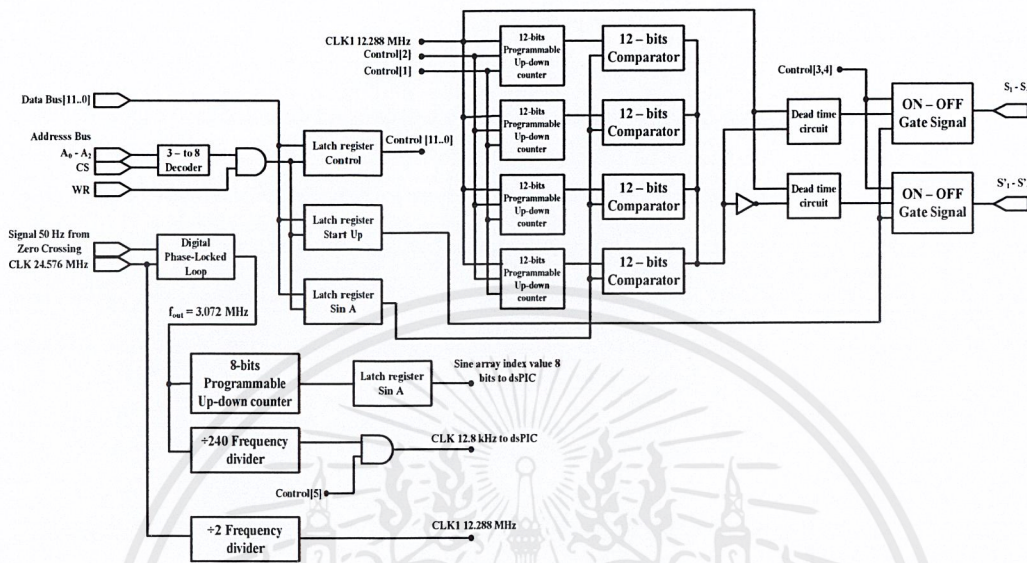
ในการสร้างวงจรมอดดูเลตสัญญาณเกิดสำหรับ FCI ด้วย FPGA จะประกอบไปด้วยวงจรถอดรหัส (Decoder), หน่วยเก็บข้อมูลชั่วคราว (Latch), วงจรนับ (Counter), วงจรเปรียบเทียบ (Comparator), วงจรสร้างความถี่ (Clock signal) และวงจรประวิงเวลา (Dead-time), วงจรดิจิตอลเฟสล็อกกลุ๊ป (Digital Phase-Locked Loop) ซึ่งวงจรที่ได้ออกแบบสามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด dsPIC ผ่านทางบัสข้อมูล 12 บิต และบัสแอสเตรส 3 บิต โดยสามารถควบคุมการ เปิด-ปิด สัญญาณเกิดได้โดยบอร์ด dsPIC สัญญาณเกิดที่ทำการสร้างคือ เทคนิคการพีดับบลิวเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟส (Phase-shifted multi-carrier PWM scheme; PSPWM) [3] ดังแสดงในรูปที่ 4.23



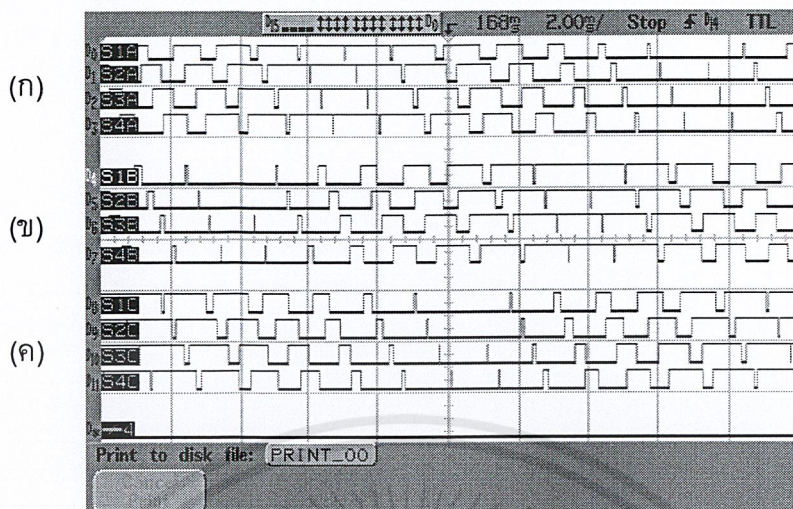
รูปที่ 4.23 แสดงการสร้างสัญญาณแคเรียร์แบบ PSPWM ของวงจรถับ (Counter) ทั้ง 4 ตัว

จากรูปที่ 4.23 เป็นรูปแบบการสร้างพีดับบลิวเอ็มชนิด PSPWM มีลักษณะสัญญาณแคเรียร์ 4 สัญญาณ แต่ละสัญญาณมีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  และในแต่ละแคเรียร์มียอดคลื่นเท่ากันในแต่ละแคเรียร์ จากลักษณะดังกล่าวสามารถนำไปสร้างแคเรียร์ด้วย FPGA ได้ดังนี้ โดยการใช่วงจรนับขึ้น-ลง (Up-down counter) (ในปริญญาณิพนธ์นี้เลือกศึกษาบัสข้อมูล 12 บิต) ในการสร้างสัญญาณแคเรียร์ทั้ง 4 สัญญาณ ส่วนการเลื่อนเฟสต่างกัน  $90^\circ$  สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของแคเรียร์ (เป็น Hexadecimal) ดังต่อไปนี้คือ  $Tri1 = BFF$  (สถานะนับขึ้น),  $Tri2 = 7FF$  (สถานะนับขึ้น),  $Tri3 = 3FF$  (สถานะนับลง) และ  $Tri4 = 000$  (สถานะนับลง) จากนั้นใช้ตัวควบคุมการนับขึ้น-ลง (Control up-down counter;  $v_{ref,cr}$ ) เป็นตัวกำหนดยอดคลื่นของวงจรถับ ทำให้ใช้ตัวควบคุมการนับขึ้น-ลง (Control up-down counter) ถึง 4 ตัว เนื่องจากในแต่ละแคเรียร์มียอดคลื่นของแคเรียร์ต่างกัน  $90^\circ$  [3,5]

โดยในรูปที่ 4.24 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลตใน 1 กิ่งของ FCI แบบ PSPWM และในรูปที่ 4.25 แสดงสัญญาณเกตที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค PSPWM ที่  $m_a = 1.0$



รูปที่ 4.24 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลตใน 1 เฟสด้วย FPGA ที่ใช้เทคนิค PSPWM



รูปที่ 4.25 สัญญาณเกตที่ได้จากการทดลองด้วยเทคนิค PSMW ที่  $m_a = 1.0$

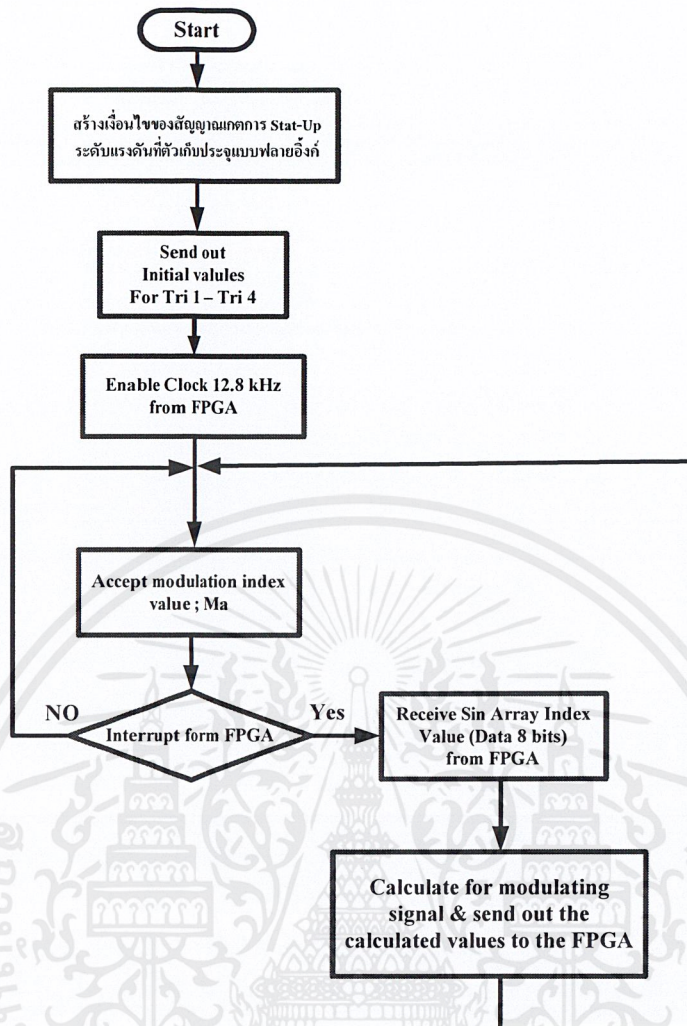
(ก) สัญญาณเกต  $S_{1A}$ - $S_{4A}$

(ข) สัญญาณเกต  $S_{1B}$ - $S_{4B}$

(ค) สัญญาณเกต  $S_{1C}$ - $S_{4C}$

#### 4.7 การสร้างสัญญาณแชนเปลิ่งไซน์จาก dsPIC

ในส่วนของ dsPIC นั้นจะมีหน้าที่ คำนวณอัตราการมอดดูเลตแชนเปลิ่งไซน์ และ สัญญาณควบคุมต่างๆ โดยส่งข้อมูลดังนี้ ส่งข้อมูลขนาด 12 บิต แอดเดรส 3 บิต สัญญาณ CS สัญญาณ WR ทั้งนี้ยังรวมถึงการสร้างสัญญาณเกตการ Start Up ระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุ แบบฟลายอิงค์ด้วย และในปริณูณานิพนธ์นี้ ยังได้มีการปรับปรุงจากวิทยานิพนธ์เล่มก่อน[3]โดย การใช้ดิจิตอลเฟสล็อกกลูป (Digital Phase-Locked Loop) ใน FPGA มาทำการผ่านวงจรรีบและ ส่งข้อมูลขนาด 8 บิตไป แชนเปลิ่งค่าไซน์ให้ตรงกับไซน์ของการไฟฟ้าอีกด้วย เพื่อที่จะใช้กับ ระบบ D-STATCOM ให้สามารถเชื่อมต่อกับระบบของการไฟฟ้าได้



รูปที่ 4.26 ผังงาน (Flow chart) การคำนวณค่าการมอดดูเลตและส่งข้อมูลสัญญาณควบคุมต่างๆ ของ dsPIC

จากรูปที่ 4.26 เป็นผังการทำงานของการทำงานการคำนวณค่าการมอดดูเลตและส่งสัญญาณควบคุมต่างๆ โดยเหตุผลที่ใช้ dsPIC เนื่องจาก dsPIC มีการทำงานที่รวดเร็วในการประมวลผลถึง 8 MHz ต่อบรรยากาศ โดยที่ทำงานวิทยานิพนธ์เล่มก่อน[3]นั้นได้ใช้คอมพิวเตอร์ (ใช้โปรแกรมวิซวลเบสิก) เป็นชุดควบคุมทำให้การแซมปลิงค่าไซน์ไม่สามารถแซมปลิงออกมาได้อย่างถูกต้อง เพราะคอมพิวเตอร์ต้องมีการวนรอบไปทำการประมวลที่โปรแกรมอื่นภายในตัวคอมพิวเตอร์ด้วย ไม่ได้ทำงานที่การคำนวณค่ามอดดูเลตเพียงอย่างเดียว ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้เปลี่ยนมาใช้ dsPIC ในการแซมปลิงค่าไซน์แทน เนื่องจาก dsPIC ไม่มีการประมวลผลที่โปรแกรมอื่นนอกจากการคำนวณค่ามอดดูเลต และการแซมปลิงไซน์ ทำให้สัญญาณไซน์ที่ได้ออกมามีความถูกต้องมากกว่าการใช้คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

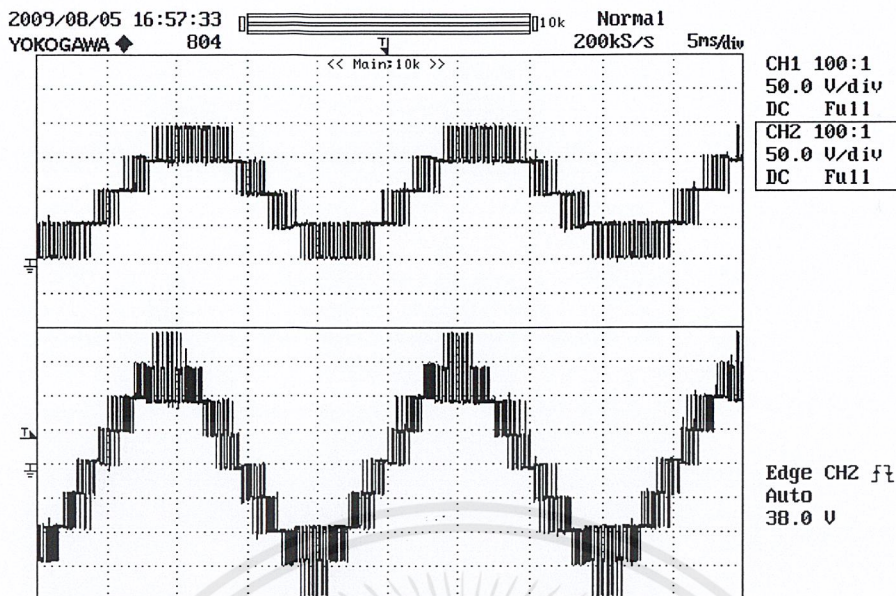
เบื้องต้นได้กล่าวถึงโครงสร้างของเครื่องต้นแบบ FCI รวมทั้งการสร้างสัญญาณเกิดจาก FPGA และ dsPIC มาแล้ว ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของเครื่องต้นแบบ FCI ในแต่ละหัวข้อการศึกษาโดยในการทดลองแต่ละหัวข้อได้กำหนดคุณสมบัติการทำงานของ FCI ภายใต้อุปกรณ์ที่ติดตั้งตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Parameter operating	Phase-shifted PWM (PSPWM)
$f_m$	50 Hz
$f_{cr}$	750 Hz
$m_f$	15
$f_{sw,dev}$	750 Hz
$f_{sw,inv}$	3000 Hz
R-load	หลอดไฟ 15 หลอด/100W (3 เฟสต่อแบบ Y)
RL-load	หลอดไฟ 15 หลอด/100W และบัลลัสแกนเหล็ก 36 ตัว/ขนาด 40W (3 เฟสต่อแบบ Y)
ตัวประกอบกำลัง (PF)	0.8 lagging
หม้อแปลง	1,320 VA 85/220
ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ	43.5 mH

#### 4.8 การทดลองและผลการทดลองสร้างแรงดันด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์

ผลของสัญญาณที่ได้จากการทดลองของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ด้วยเทคนิค PSPWM แสดงในรูปที่ 4.27 เป็นรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการทดลองกรณีการทำงานด้วยเทคนิค PSPWM ที่สภาวะ No-load โดยที่เส้นบนเป็นผลที่ได้จากการวัดที่ตำแหน่ง  $v_{A0}$  (วัดเทียบกับ Negative bus ของ DC-link) เส้นล่างเป็นผลที่ได้จากการวัดที่ตำแหน่ง  $v_{AB}$  (วัดเทียบระหว่างสาย)

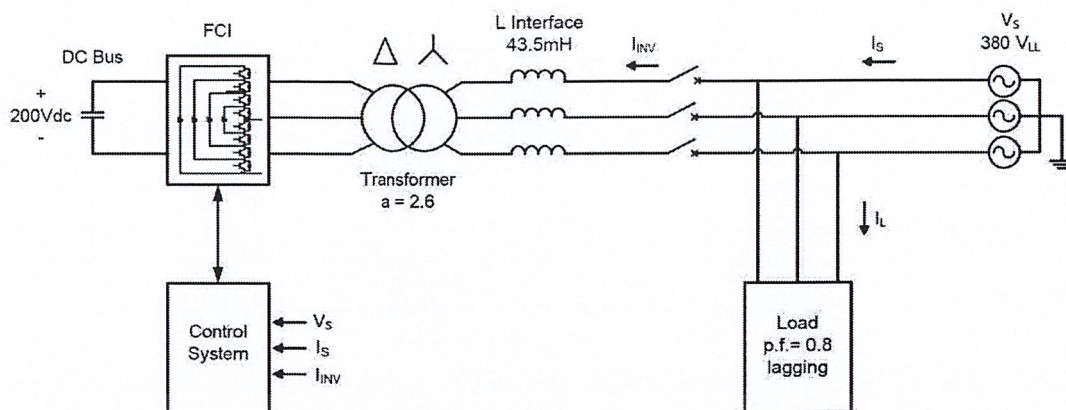


รูปที่ 4.27 รูปคลื่นของแรงดันด้านออกรูปคลื่น  $v_{A0}$  (เส้นบน) และ  $v_{AB}$  (เส้นล่าง) จาก FCI ที่ใช้เทคนิค PSPWM ที่ได้จากการทดลองที่  $m_a = 0.8$  ที่สภาวะ No-load

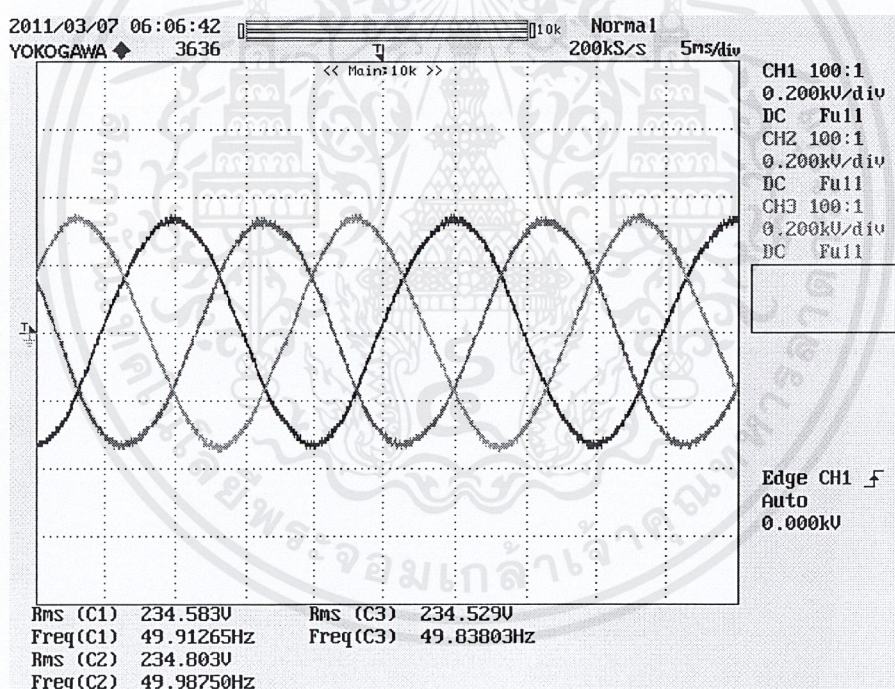
#### 4.9 การทดลองและผลการทดลองในส่วนของ D-STATCOM

การทดลองอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยใช้เทคนิค PSPWM ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับ D-STATCOM เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องต้นแบบ FCI สามารถสร้างแรงดันขาออกระหว่างสาย ( $V_{AB}$ ) ได้เพียง  $120V_{rms}$  ที่ค่ามอดดูเลชันเท่ากับ 1.0 จึงต้องผ่านหม้อแปลงแรงดันที่มีอัตราส่วนหม้อแปลงเท่ากับ 2.6 โดยการใช้การต่อหม้อแปลงแบบ สตาร์-เดลต้า จะมีแรงดันด้านขาออกระหว่างสายเท่ากับ  $380-450V_{rms}$  เท่ากับแรงดันระหว่างสายของระบบไฟฟ้า

ในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ใช้การปรับค่ามอดดูเลชันในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์(แยกการปรับ  $m_a$  ในแต่ละเฟส) ให้มีแรงดันเฟสเท่ากับระบบไฟฟ้าคือ 230 โวลต์หรือควรจะมากกว่าเล็กน้อย (รูปที่ 4.29) เพื่อให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสแอกทีฟเข้าสู่ระบบ โดยในการทดลองชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบด้วยการปรับค่ามอดดูเลชันตั้งแต่ 0.73 ถึง 0.86 (แต่ละเฟสไม่เท่ากัน)

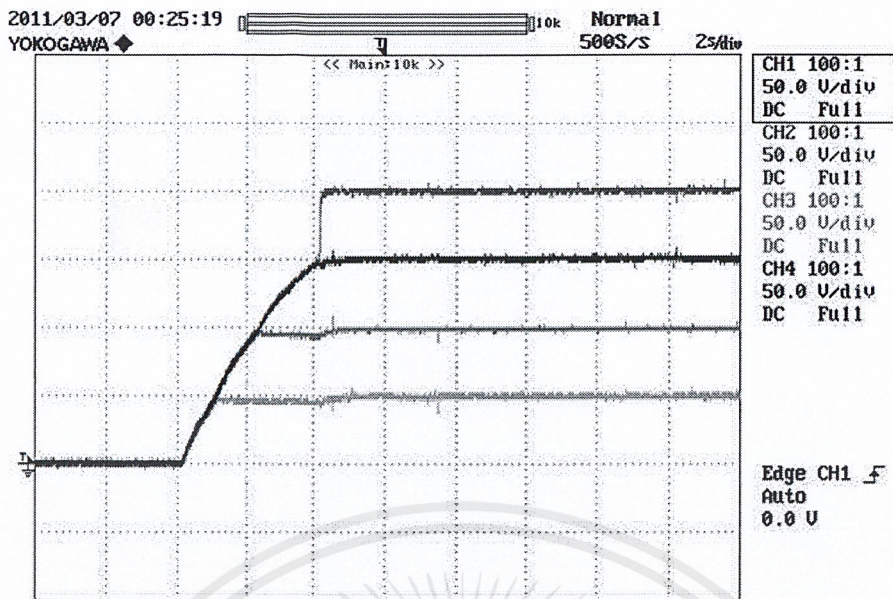


รูปที่ 4.28 ไตอะแกรมการทำงานโดยรวมของการทำงานของ D-STATCOM



รูปที่ 4.29 แรงดันเฟสของ FCI หลังจากผ่าน Low pass filter ก่อนเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบ ที่  $m_a = 0.73$ (เฟส a),  $0.75$ (เฟส b),  $0.79$ (เฟส c) (แต่ละเฟสไม่เท่ากัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

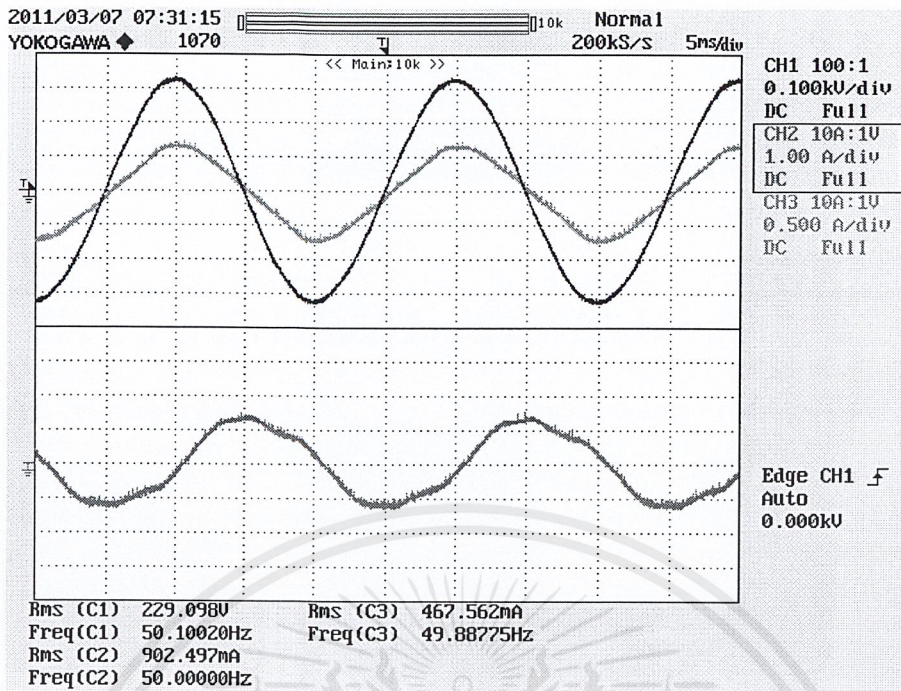


รูปที่ 4.30 แรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงและแรงดัน DC-link ขณะ Start up เครื่อง FCI

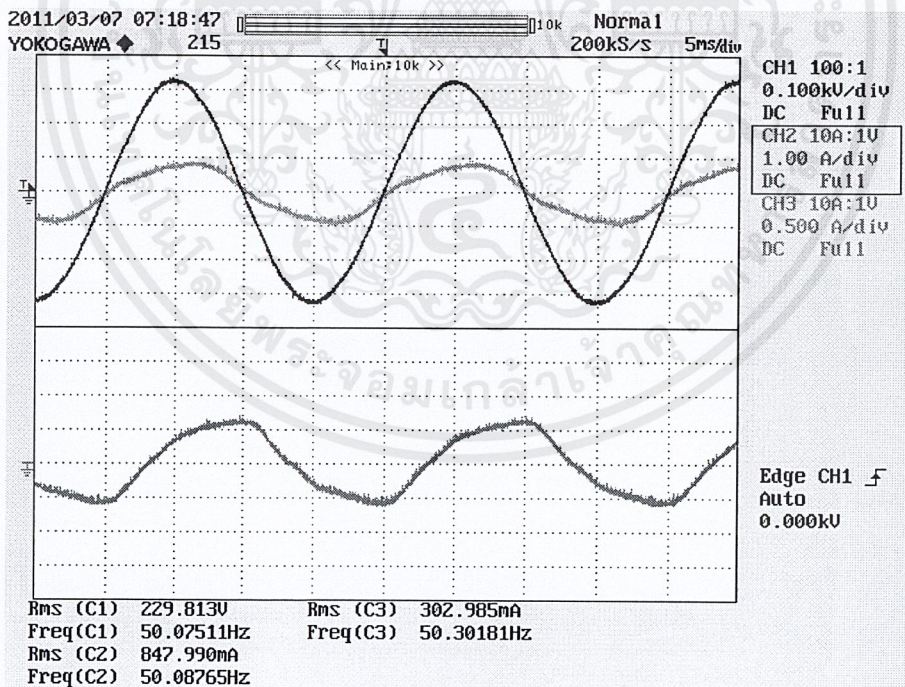
จากรูปที่ 4.30 แสดงแรงดันของตัวเก็บประจุฟลายอิงแต่ละระดับชั้นโดยเริ่มอัดประจุที่ระดับแรงดัน  $50V_{dc}$ ,  $100V_{dc}$ , และ  $150V_{dc}$  ตามลำดับ จากผลของค่าคงตัวเวลา (Time constant) ทำให้รูปคลื่นแรงดันมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ขณะอัดประจุจะเกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวต้านทานเชื่อมต่อ เมื่ออัดประจุตัวเก็บประจุฟลายอิงเสร็จจะตัดตัวต้านทานออก ทำให้รูปคลื่นแรงดันจะมีลักษณะชันมากขึ้นขณะอัดประจุที่ DC-link ให้มีระดับแรงดันที่  $200V_{dc}$  เมื่อแรงดันที่ DC-link คงที่ แรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงจะสามารถรักษาระดับแรงดันในแต่ละระดับได้เอง

ผลการทดลองการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของโหลด แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันระบบ กระแสระบบ และกระแสอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 4.31-4.36 โดยพิจารณาแรงดันของระบบและกระแสของระบบในรูปคลื่นบน ผลการทดลองในรูปคลื่นบนแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันระบบและกระแสระบบซึ่งบ่งบอกค่าตัวประกอบกำลังของระบบ และพิจารณากระแสของอินเวอร์เตอร์ในรูปคลื่นล่าง ผลการทดลองในรูปคลื่นล่างแสดงถึงกระแสชดเชยรีแอกทีฟ มุมเฟสของกระแสชดเชยเปรียบเทียบกับแรงดันระบบ โดยโหลดของระบบมีค่าตัวประกอบกำลัง 0.8

รูปที่ 4.31-4.33 เป็นผลการทดลองที่ค่ามอดดูเลชันที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบในแต่ละเฟส ในเฟส A จะพบว่า D-STATCOM สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่า 0.876 ในขณะที่ใช้ค่ามอดดูเลชันเริ่มต้น

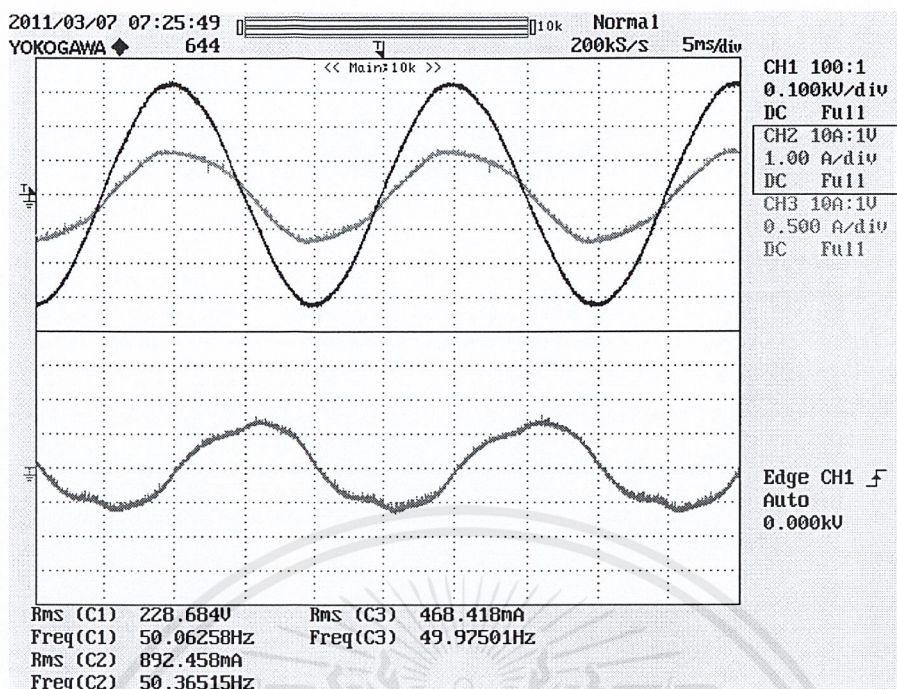


รูปที่ 4.31 รูปคลื่นของแรงดันระบบ  $V_{S,AN}$ , กระแสระบบ  $I_{S,A}$  (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์  $I_{INV,A}$  (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่  $m_a = 0.73$



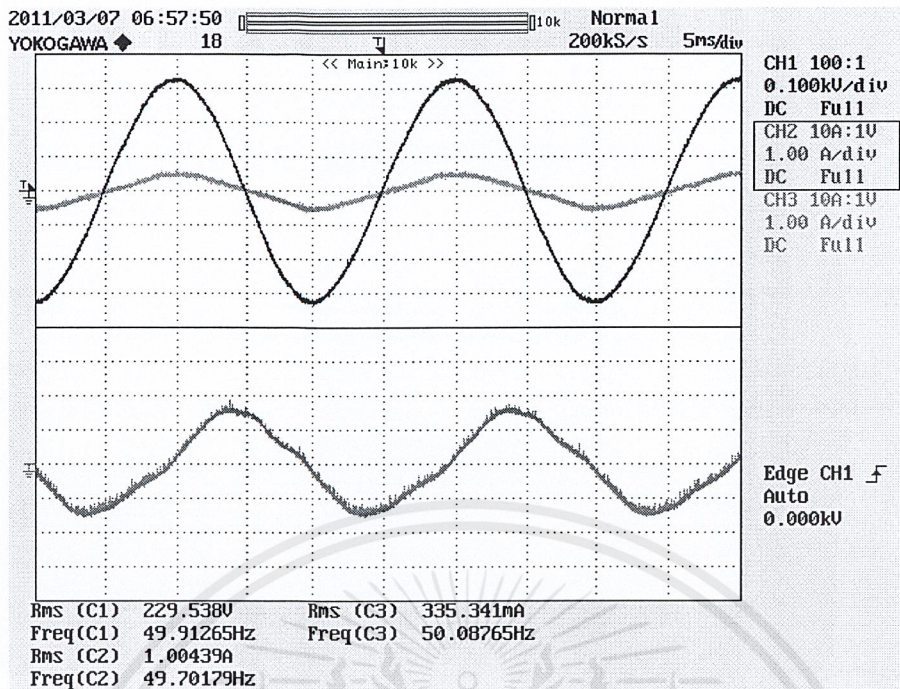
รูปที่ 4.32 รูปคลื่นของแรงดันระบบ  $V_{S,BN}$ , กระแสระบบ  $I_{S,B}$  (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์  $I_{INV,B}$  (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่  $m_b = 0.75$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

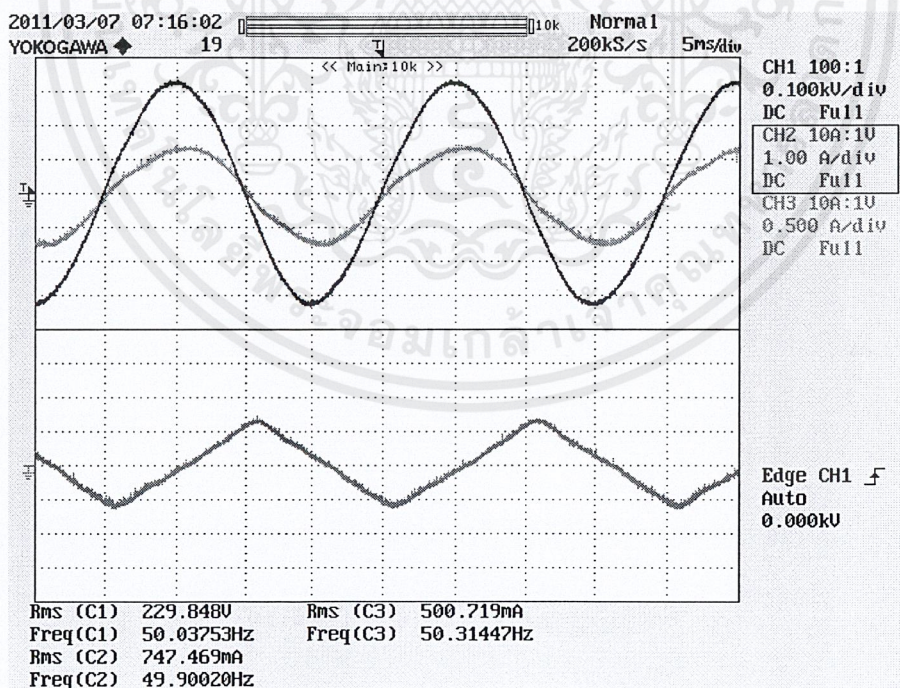


รูปที่ 4.33 รูปคลื่นของแรงดันระบบ  $V_{S,CN}$ , กระแสระบบ  $I_{S,C}$  (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์  $I_{INV,C}$  (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่  $m_c = 0.79$

รูปที่ 4.34-4.36 เป็นผลการทดลองที่ D-STATCOM สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่า 1.0 ได้ สังเกตได้จากแรงดันของระบบและกระแสของระบบมีเฟสตรงกันพอดี

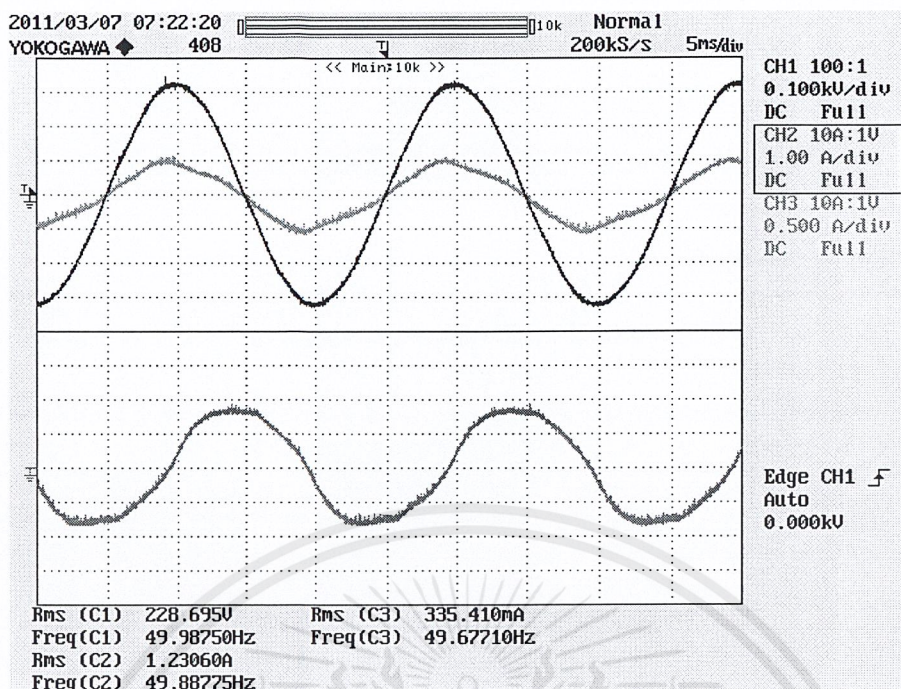


รูปที่ 4.34 รูปคลื่นของแรงดันระบบ  $V_{S,AN}$ , กระแสระบบ  $I_{S,A}$  (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์  $I_{INV,A}$  (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่  $m_a = 0.80$



รูปที่ 4.35 รูปคลื่นของแรงดันระบบ  $V_{S,BN}$ , กระแสระบบ  $I_{S,B}$  (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์  $I_{INV,B}$  (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่  $m_b = 0.82$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 รูปคลื่นของแรงดันระบบ  $V_{s,CN}$ , กระแสระบบ  $I_{s,C}$  (เส้นบน) และกระแสอินเวอร์เตอร์  $I_{INV,C}$  (เส้นล่าง) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่  $m_c = 0.86$

ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังกับค่าอัตราการมอดดูเลตของเฟส A

$m_a$	$I_{INV,A}$ (mA)	$\theta$ (lagging)	Displacement Factor ( $\cos\theta$ )
0.73	902.497	28.8	0.876
0.74	897.331	21.6	0.929
0.75	781.271	18.1	0.950
0.76	895.288	14.4	0.968
0.77	1005.52	10.8	0.982
0.78	1119.37	7.2	0.992
0.79	1029.96	3.6	0.998
0.80	1004.39	1.1	0.999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

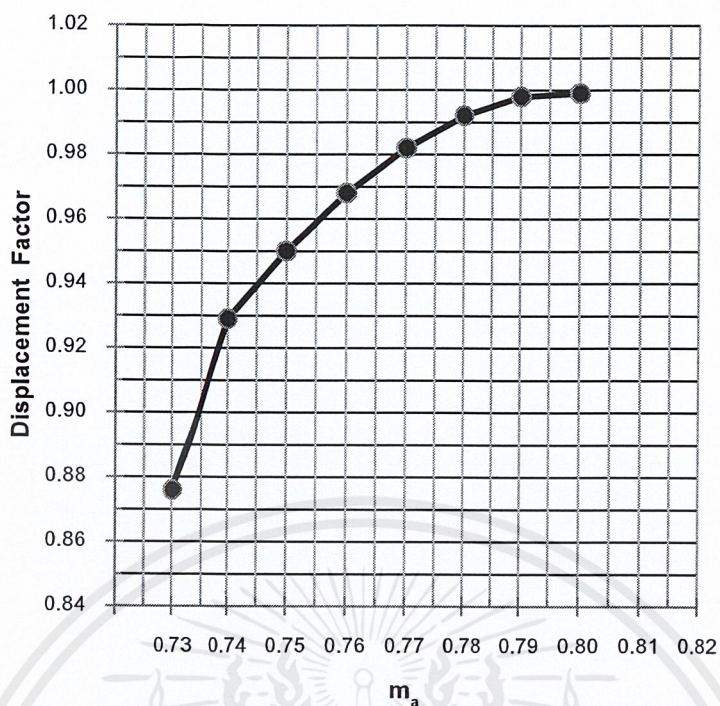
ตารางที่ 4.4 ตารางสรุปเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังกับค่าอัตราการมอดดูเลตของเฟส B

$m_b$	$I_{INV.B}$ (mA)	$\theta$ (lagging)	Displacement Factor ( $\cos\theta$ )
0.75	847.990	30.7	0.859
0.76	813.556	23.6	0.916
0.77	926.718	20.1	0.939
0.78	860.614	16.4	0.959
0.79	825.526	12.8	0.975
0.80	762.635	9.3	0.987
0.81	793.217	5.8	0.994
0.82	747.469	4.5	0.997

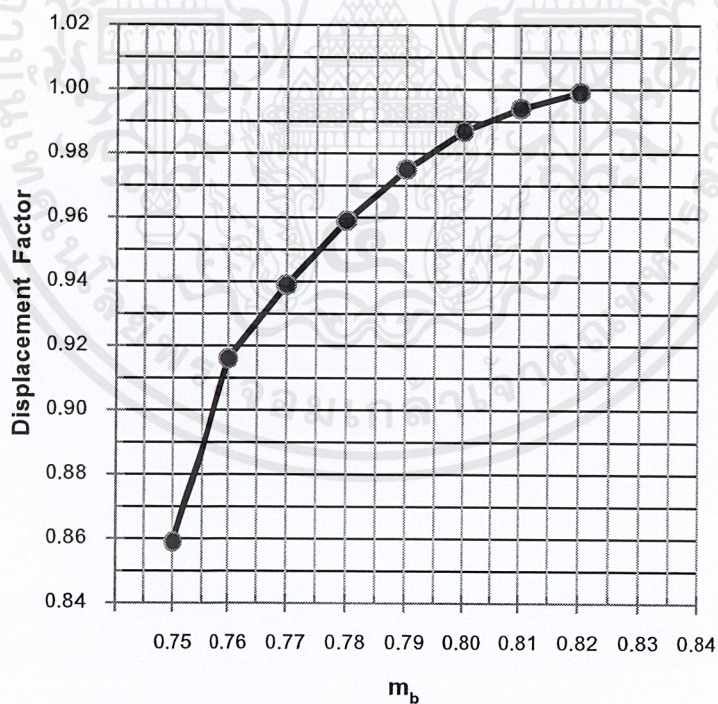
ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังกับค่าอัตราการมอดดูเลตของเฟส C

$m_c$	$I_{INV.C}$ (mA)	$\theta$ (lagging)	Displacement Factor ( $\cos\theta$ )
0.79	892.458	29.4	0.871
0.80	893.419	25.7	0.901
0.81	935.762	22.1	0.927
0.82	966.975	18.6	0.948
0.83	914.635	13.0	0.974
0.84	922.402	9.4	0.987
0.85	1173.22	5.9	0.995
0.86	1230.60	2.2	0.999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

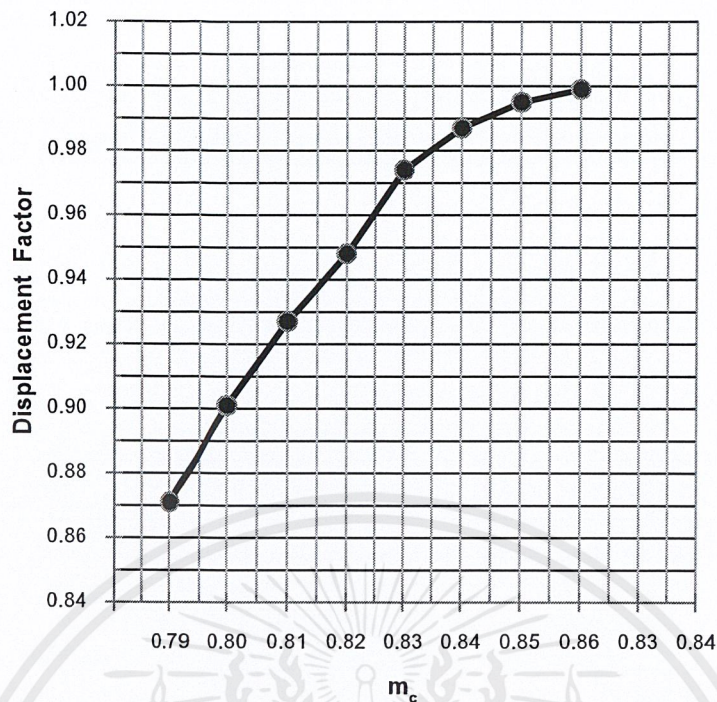


รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการมอดดูเลขชี้กับค่าตัวประกอบกำลังของเฟส A



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการมอดดูเลขชี้กับค่าตัวประกอบกำลังของเฟส B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการมอดดูเลชันกับค่าตัวประกอบกำลังของเฟส C

ผลของสัญญาณที่ได้จากการทดลองของอินเวอร์เตอร์ห้าระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ด้วยเทคนิค PSPWM ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ของ D-STATCOM โดยในการทดลองชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าด้วยการปรับค่ามอดดูเลชันดังแสดงในรูปที่ 4.31, 4.34 (สำหรับเฟส A) รูปที่ 4.32, 4.35 (สำหรับเฟส B) และรูปที่ 4.33, 4.36 (สำหรับเฟส C) โดยพิจารณาในเฟส A กระแสของอินเวอร์เตอร์หรือกระแสรีแอกทีฟ ( $I_{INV,A}$ ) ที่จ่ายเข้าสู่ระบบส่งผลให้มุมระหว่างแรงดันของระบบไฟฟ้า ( $V_{S,AN}$ ) กับกระแสของระบบ ( $I_{S,A}$ ) มีค่าลดลงซึ่งจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบเพิ่มมากขึ้นจาก 0.876 ที่ค่ามอดดูเลชันเท่ากับ 0.73 เป็นค่า 0.999 ที่ค่ามอดดูเลชัน 0.8 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และในรูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการมอดดูเลชันกับค่าตัวประกอบกำลังของเฟส A จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับค่ามอดดูเลชันเพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นกับเฟส B และ C เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับเฟส A เช่นกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในปฏิญานิพนธ์นี้เลือกศึกษาวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์แบบ 3 เฟส โดยใช้เทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบหลายแคเรียร์ชนิดเลื่อนเฟส (Phase-shifted multi-carrier PWM scheme; PSPWM) [7] มาประยุกต์ใช้งานเป็น D-STATCOM เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าด้วยการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ในขั้นตอนแรกได้ศึกษาวิจัยจากการจำลองการทำงานของ D-STATCOM โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC สร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ รวมถึงวงจรสร้างสัญญาณมอดดูเลตสำหรับขับเกตของ FCI และจำลองระบบควบคุม D-STATCOM โดยการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์แบบป้อนกลับ ผลการจำลอง D-STATCOM พบว่า FCI สามารถจ่ายกระแสรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของระบบที่มีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ให้มีค่าเป็น 1.0 ได้

นอกจากผลการจำลองชดเชยกำลังไฟฟ้าแล้ว ปฏิญานิพนธ์นี้ยังศึกษาผลการจำลองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ( $K_p$  และ  $K_i$ ) ที่ค่าต่างๆ เพื่อพิจารณาถึงผลตอบสนองของระบบควบคุมในการสร้างแรงดันที่ FCI และผลตอบสนองของกระแสชั่วขณะ โดยนำผลการศึกษามาใช้วิเคราะห์ระบบควบคุมของ D-STATCOM เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของกระแสที่พารามิเตอร์ค่าต่างๆ ของระบบควบคุมที่ รวมถึงนำผลการวิเคราะห์มาใช้ในการออกแบบระบบควบคุม D-STATCOM

โครงสร้างของ D-STATCOM จำเป็นต้องมีอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันและตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อเพื่อเปลี่ยนกระแสเป็นกระแสรีแอกทีฟจ่ายเข้าสู่ระบบ จึงใช้เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์เพื่อใช้เป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับ D-STATCOM แต่อุปสรรคของเครื่องต้นแบบ FCI คือสามารถสร้างแรงดันขาออกระหว่างสายของอินเวอร์เตอร์ได้เพียง  $100V_{rms}$  ที่มีมอดดูเลชันเท่ากับ 0.8 จึงต้องเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ผ่านหม้อแปลงอัตราส่วน 2.6 โดยใช้การต่อแบบ เดลต้า-สตาร์ เพื่อเพิ่มแรงดันให้เท่ากับระบบไฟฟ้าที่  $380V_{rms}$  ต่อกับตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อเพื่อจ่ายกระแสรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดที่ค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8

ในการทดลองชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเริ่มจากการสร้างแรงดันที่อินเวอร์เตอร์จะนำ FPGA และ dsPIC มาประยุกต์ใช้งานในการสร้างสัญญาณมอดดูเลตสำหรับสวิทช์กำลังของ FCI และใช้หม้อแปลงปรับค่าได้ผ่าน bridge rectifier เพื่อสร้างแรงดันที่ DC link ของอินเวอร์เตอร์ ในการควบคุมการสร้างแรงดันของ FCI จะใช้การปรับค่ามอดดูเลชันเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันของ FCI เนื่องจากระบบควบคุมยังเป็นแบบวงเปิด และการปรับค่ามอดดูเลชันแบบแยกอิสระกันทุกเฟส เนื่องจากที่ค่ามอดดูเลชันเดียวกันแรงดันที่เกิดขึ้นที่ FCI มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของแรงดันไม่เท่ากันในแต่ละเฟสซึ่งเป็นผลมาจากเฟสล๊อคกลุ่ม เมื่อสามารถสร้างแรงดันของ FCI ให้มีขนาดเท่ากับระบบไฟฟ้าแล้ว จึงเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของระบบไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าก่อนเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบค่าตัวประกอบกำลังของระบบมีค่า 0.8 และเมื่อเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบที่ค่ามอดดูเลขชั้นของเฟส A เป็น 0.73 สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบเป็น 0.876 และเมื่อเพิ่มค่ามอดดูเลขชั้นของเฟส A เป็น 0.80 สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเป็น 1.0 ได้

## 5.2 อุปสรรคและข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 อุปสรรค

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นจากการออกแบบและการทดลอง

1. ขณะเชื่อมต่อ D-STATCOM เข้ากับระบบไฟฟ้า มุมเฟสของกระแสชดเชยรีแอกทีฟไม่เป็น  $90^\circ$  เนื่องจากค่าความต้านทานแฝงในหม้อแปลงมีค่าสูง
2. สัญญาณเกตยังถูกรบกวนจากการทำงานของวงจรกำลัง
3. แรงดันขาออกของ FCI มีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละเฟส ทำให้การจ่ายกระแสรีแอกทีฟไม่เป็นไปตามทฤษฎี ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างเล็กน้อยของวงจรกำลังในแต่ละกิ่งเฟสของ FCI
4. แรงดันขาออกของ FCI ยังมีความผิดเพี้ยนจากไซน์อยู่ เนื่องจากค่า Modulo Control (K) ที่ใช้ในเฟสล๊อคกลุ่ม มีค่าน้อย

### 5.2.2 แนวทางแก้ไข

1. สร้างระบบควบคุม D-STATCOM ให้เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ตามที่ดำเนินการแล้วในการจำลอง จะช่วยแก้ปัญหาได้หลายประการเช่น ระบบควบคุมจะชดเชยกระแสรีแอกทีฟให้มีมุมเฟสเป็น  $90^\circ$  ได้ ช่วยให้สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้ดีขึ้น และระบบควบคุมยังสร้างแรงดันขาออกของ FCI ให้ขนาดแรงดันเท่ากันทุกเฟส และมุมต่างเฟส  $120^\circ$  เท่ากันทุกเฟส
2. ควรออกแบบหม้อแปลงที่ใช้เพิ่มระดับแรงดันอินเวอร์เตอร์ใหม่ เพื่อลดค่าความต้านทานของหม้อแปลง และลดค่าความสูญเสียจากขดลวด
3. ใช้สายสัญญาณที่มีชีลด์ (Shielded cable) ที่สามารถป้องกันคลื่นรบกวนจากภายนอกได้
4. ปรับปรุงค่า Modulo Control (K) ที่ใช้ในเฟสล๊อคกลุ่มให้มีค่ามากขึ้น แต่จะส่งผลให้เฟสล๊อคกลุ่มมีช่วงความถี่รักษาสภาพล๊อค (Lock range) ลดลง

## บรรณานุกรม

- [1] Fang Z. Peng, J. Rodriguez, and Jih-Sheng Lai, "Multilevel Inverter: A survey of Topologies, Controls and Application", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 49, No. 4, August 2002.
- [2] Bin Wu, **High Power Converter and AC Drive**, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., 2006, pp.127-136.
- [3] สติติย์พร เกตุสกุล, "การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเทคนิคพีดีบีบลิวเอ็มแบบหลายพหุระดับคลื่นเฟสและเลื้อยระดับสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์", **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [4] Donal G. Troha and Jame D. Gallia, "Digital Phase-Locked Loop Design Using SN54/74LS297", **Low Power Schottky Application**, SDLA005B, March 1997, pp. 1-10.
- [5] ศิวะพัทธ์ คุ่มมะณี, "การพัฒนาอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณเกิดด้วย FPGA สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์", **วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [6] G. Y. Jong, T. J. Park and B. H.Kwon, "Line-voltage-sensorless active power filter for reactive power compensation", **IEE Proc. Electr. Power Appl.**, Vol. 147, No.5, September 2000, pp. 385-390.
- [7] P. Keawworasut and S. Polmai, "Balancing of Capacitor Voltage of Flying-Capacitor Multilevel Inverter by SPWM Techniques", **31st Electrical Engineering Conference (EECON-31)**, Royal Hill Golf and Spa, Nakhonnayok, Thailand, Oct 29-31, 2008, pp. 501-504.
- [8] John J. Paserba, Gregory F. Reed, M.Takeda, T.Aritsuka "FACT and Custom Power Equipment for the Enhancement of Power Transmission System Performance and Power Quality", **Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (VII SEPOPE)** Curitiba, Brazil, May 21-26, 2000, pp. 1-11.
- [9] L. Tolbert, F. Z. Peng And T. Habetler, "Multilevel converter for large electric drives", **IEEE trans. Ind. Application**, vol. 35, pp. 36-44, Jan/Feb, 1999.
- [10] Fang Zheng Peng, "Dynamic Performance and Control of a Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverters", **IEEE Trans.**, Vol. 33, No. 3, May/June 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ปฐมพงศ์ วิจิตร, สุรจิต แสนทวีสุข , “เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าดิจิทัล”, **ปริญญาทิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี, 2551.
- [12] สุมาลี อุณหวนิชย์, “**ระบบควบคุม (Control System)**”, ว. เพ็ชรสกุล, กรกฎาคม 2545.

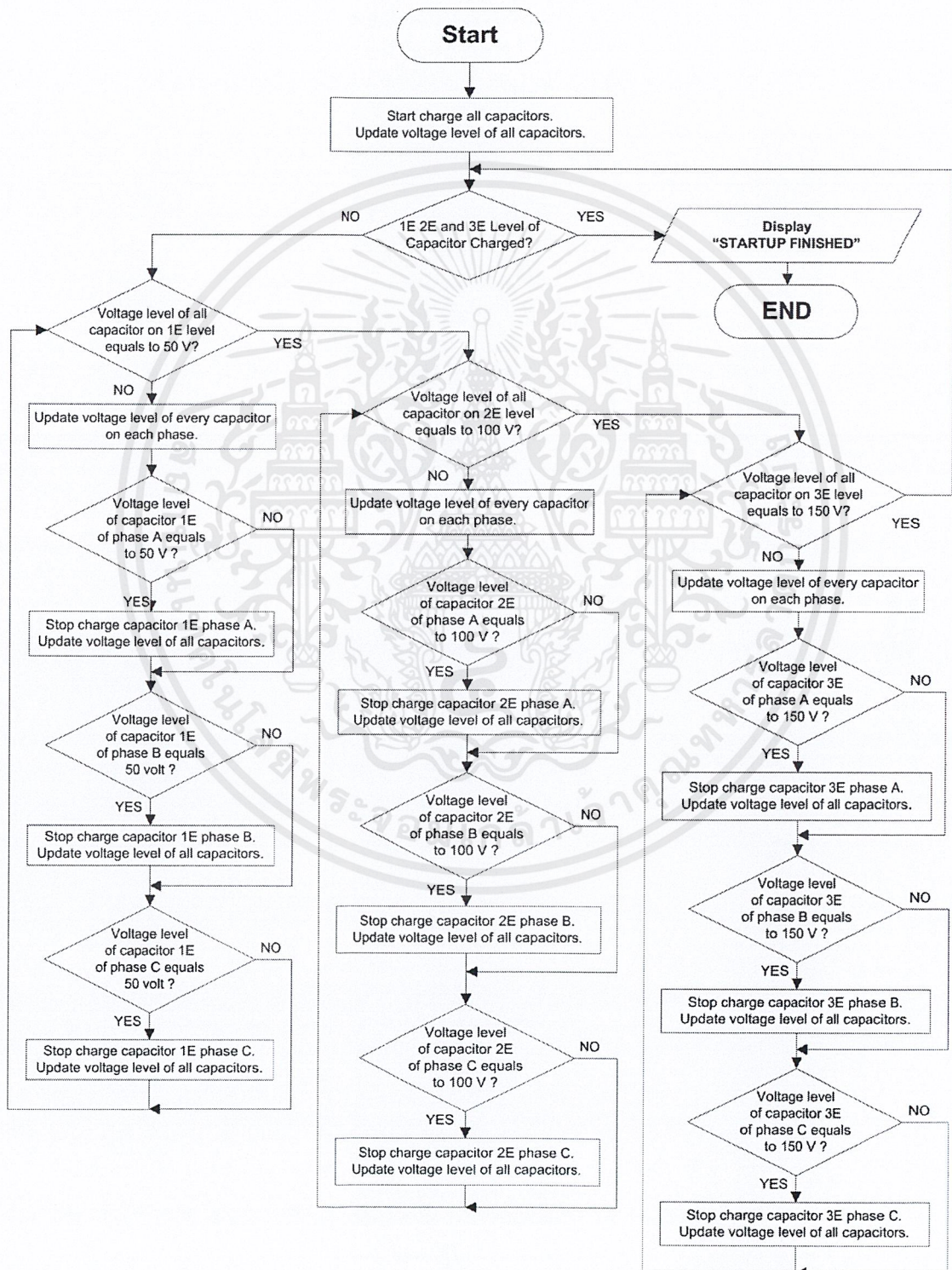




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

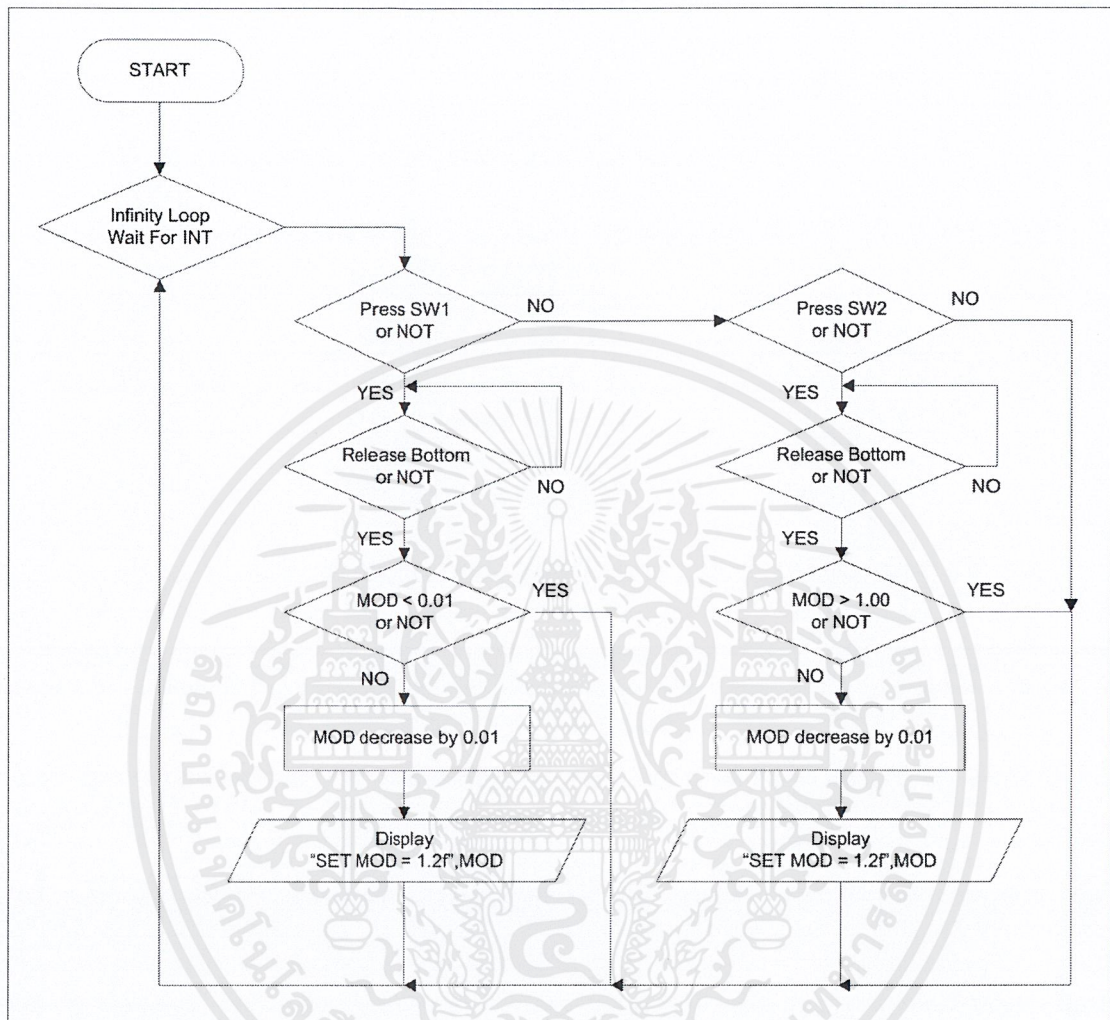
ภาคผนวก ก.  
Flowcharts ของโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

Flowcharts ของโปรแกรม Startup



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Flowcharts ของโปรแกรม Modulation Index Configuration

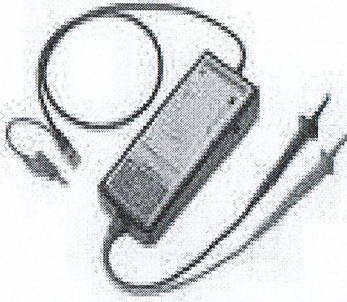


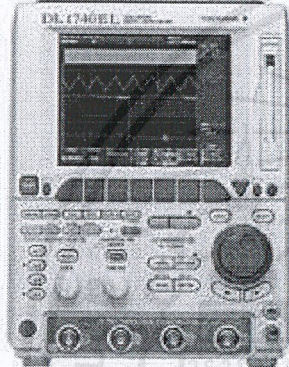
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.  
อุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญาโท

	<p><u>ผลิตภัณฑ์</u> : Multi Meter(FLUKE)</p> <p><u>รุ่น</u> : 179</p> <p><u>รายละเอียด</u> :</p> <p>True RMS 1kHz Accuracy = 0.09% Vac or Vdc : 0.1mV to 1000V Iac to Idc : 0 to 10A</p>
	<p><u>ผลิตภัณฑ์</u> : Current Probe(YOKOGAMA)</p> <p><u>รุ่น</u> : 701930</p> <p><u>รายละเอียด</u> :</p> <p>Current ranges: Bandwidth: DC to 10 MHz; Current measurement: Max 30/150/500A Maximum continuous input range: 150 A<sub>rms</sub> Amplitude accuracy (DC, and 45 to 66 Hz, 0 to 150 Arms): ±1% of rdg ±1 mV Output voltage rate: 0.01 V/A</p>
	<p><u>ผลิตภัณฑ์</u> : Current Probe(FLUKE)</p> <p><u>รุ่น</u> : 80i-110s</p> <p><u>รายละเอียด</u> :</p> <p>Current ranges: 0 to 10 A dc or ac peak 0 to 100 A dc or ac peak Frequency: DC to 100kHz .(@3 db) Output signals: 10 A range: 100 mV/A 100 A range: 10 mV/A</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

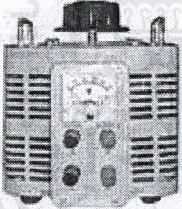
	<u>ผลิตภัณฑ์</u> : Band Differential Probe
	<u>รุ่น</u> : 700925
	<u>รายละเอียด</u> : 100 MHz A probe lets you make wide-band Differential input measurements

	<u>ผลิตภัณฑ์</u> : Digital Oscilloscope (YOKOGAWA)
	<u>รุ่น</u> : DL1740E / (4 Channel)
	<u>รายละเอียด</u> : 500 MHz Analog Bandwidth 2 MW/ch Max. record length 1 GS/s Max. sampling rate 400V(DC+AC peak) $\pm 1.5\%$ DC accuracy

	<u>ผลิตภัณฑ์</u> : MIXED SIGNAL OSCILLOSCOPE
	<u>รุ่น</u> : 54622D
	<u>รายละเอียด</u> : 100 MHz 200 MS/s 100-240 V input 300 Vrms 1.2 A 2 Ch. Analog 16 Ch. Digital

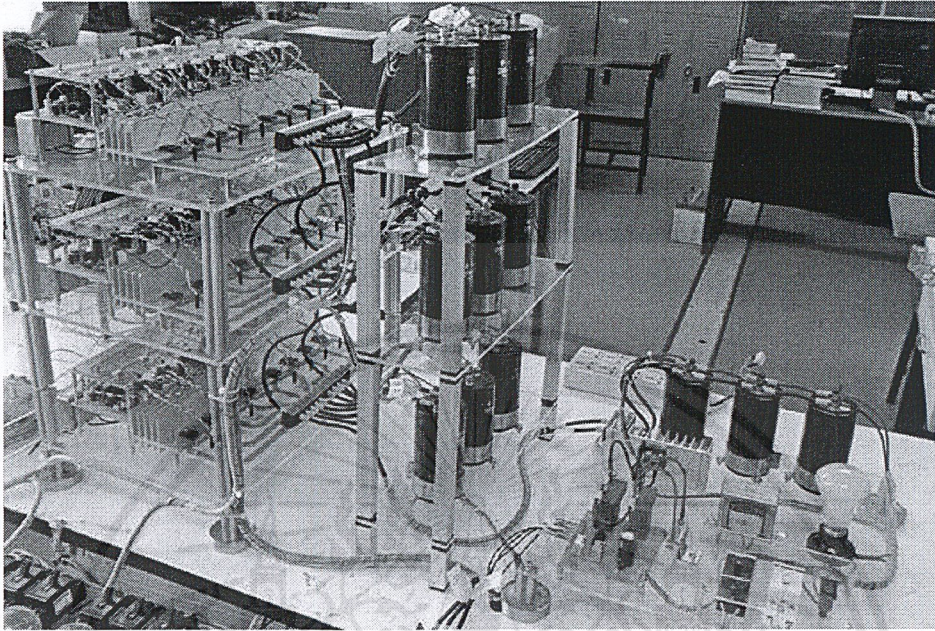
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ผลิตภัณฑ์ : FUNCTION GENERATOR
	รุ่น : 33120A
	รายละเอียด : - ความถี่ของ Output จะอยู่ในช่วงระยะที่ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันที่เลือกในขณะนั้น ซึ่งจะมีค่าโดย Default เป็น 1 Khz สำหรับทุกฟังก์ชัน - แอมพลิจูดของ Output จะอยู่ในช่วงระยะที่ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันที่เลือกและ Output ปลายทาง ซึ่งจะมี แอมพลิจูดโดย Default เป็น 100 mVpp (50 ohms) สำหรับทุกฟังก์ชัน - ความยาวของ Waveform มีขนาดตั้งแต่ 8 ถึง 16,000 จุด มีความละเอียดของแอมพลิจูดเท่ากับ 12 มีอัตราการสุ่มเป็น 40 Msa/s

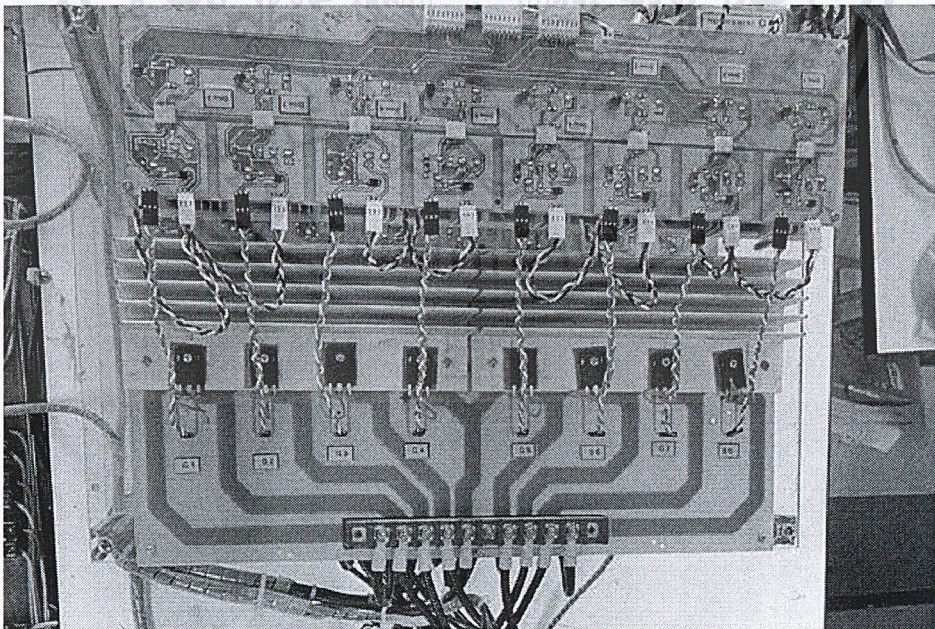
	ผลิตภัณฑ์ : Variable Voltage Transformer
	รุ่น : SD-16
	รายละเอียด : Capacity 4 KVA Input Voltage 220V Output 0-250 V Output Current 16 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.  
เครื่องต้นแบบที่ใช้ในปริญญาโท

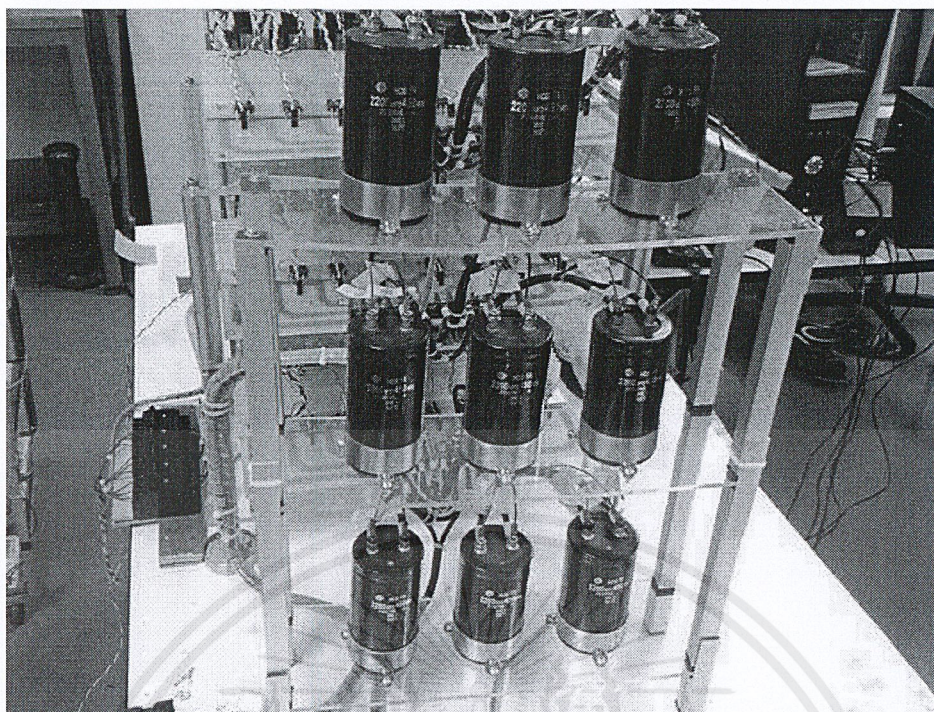


รูปที่ ค. 1 เครื่องต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

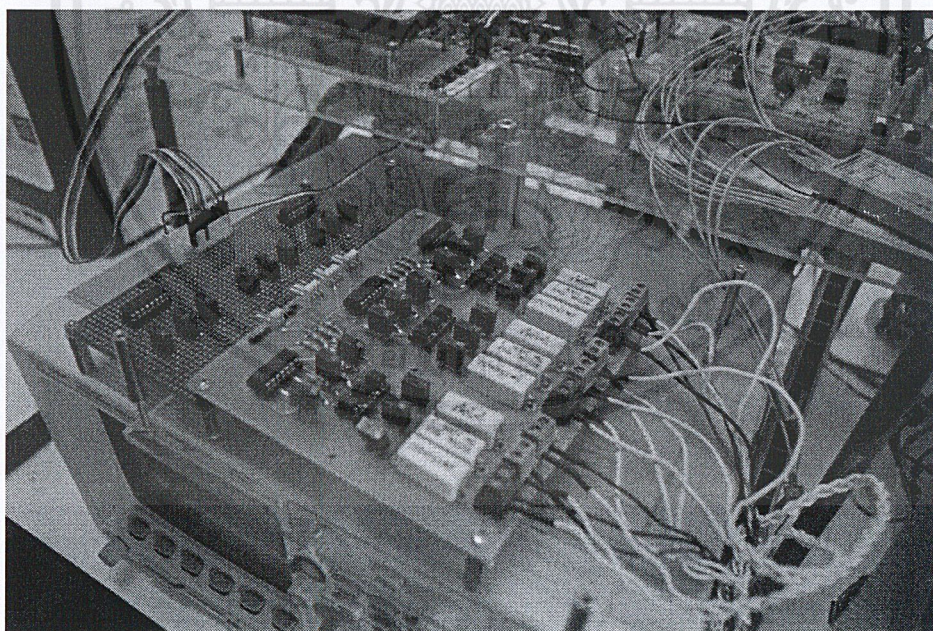


รูปที่ ค. 2 วงจรขับเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

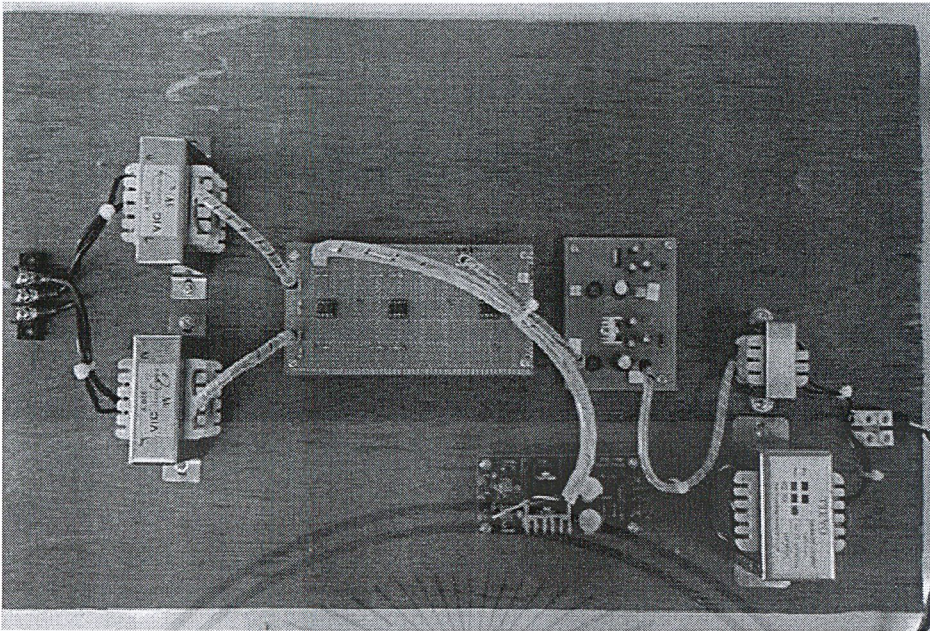


รูปที่ ค. 3 ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงต์

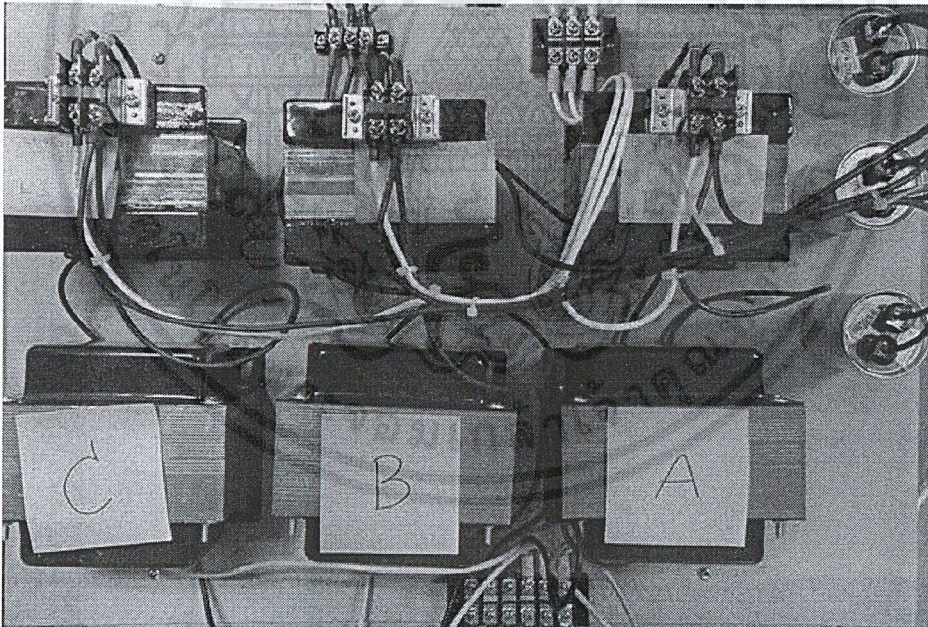


รูปที่ ค. 4 ชุดตรวจจับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

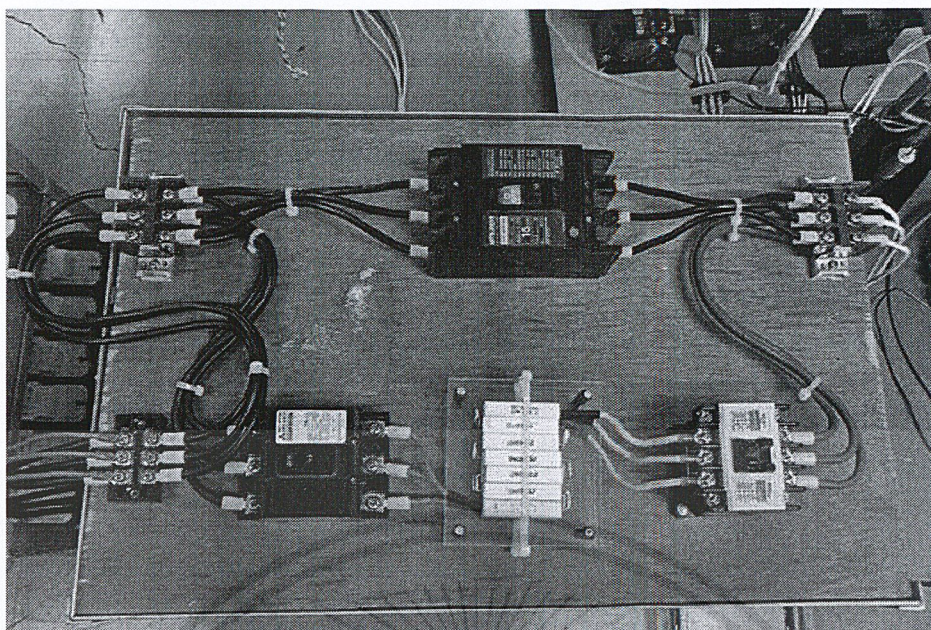


รูปที่ ค. 5 ชุดวงจรตรวจจับแรงดันผ่านศูนย์

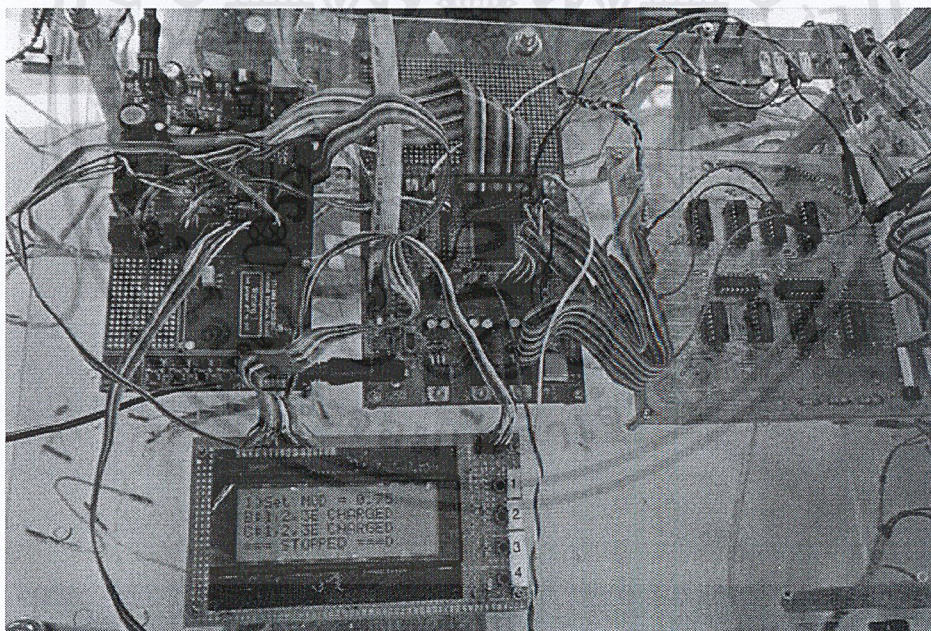


รูปที่ ค. 6 ชุดหม้อแปลงและตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค. 7 ชุดเซอร์กิตเบรคเกอร์ตัดต่อวงจร

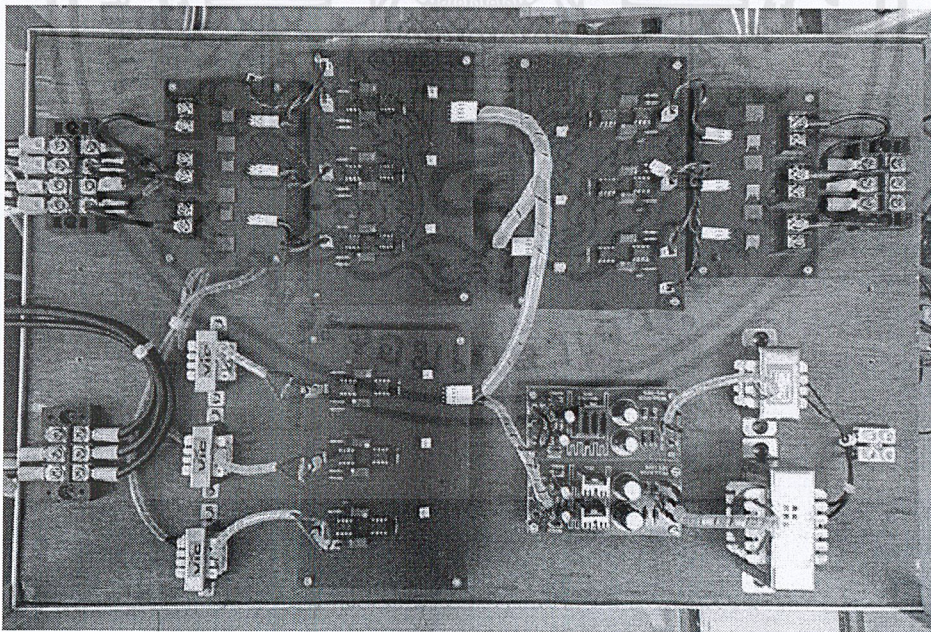


รูปที่ ค. 8 ชุดวงจรควบคุม FPGA และ dsPIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค. 9 โหลดที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ค. 10 ชุดวงจรตรวจจับแรงดันและกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ สำหรับประยุกต์ในงานคุณภาพไฟฟ้า

## Flying Capacitor Multilevel Inverter for Power Quality Applications

พศวัต รัชสิทธิ์ยานนท์, มนัส วารุทัย, รัสสะ โพธิ์อยู่ และ วรพงศ์ วงศ์ลิ้มอมรเลิศ  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
3 หมู่ 2 ถ.ฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ : 0-2329-8000

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดลอง การทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ซึ่งใช้เทคนิคการมอดดูเลตแบบไซน์ ด้วยเทคนิคการเลื่อนเฟสแคเรียร์ (PSPWM) โดยนำไปประยุกต์ใช้งานเป็น D-STATCOM เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบ บทความนี้พิจารณาและออกแบบพารามิเตอร์สำหรับการควบคุม D-STATCOM ผลการจำลองแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมสำหรับการชดเชยกำลังไฟฟาร์แอคทีฟ

คำสำคัญ : อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์, ดี-สแตตคอม, คุณภาพไฟฟ้า, เทคนิคพีดีบีเอ็มแบบเลื่อนเฟส

### Abstract

This paper presents experimental results of flying-capacitor multilevel inverter using phase-shifted multi-carrier pulse width modulation technique. This inverter is used as D-STATCOM for power quality improvement. In this paper, parameters of the D-STATCOM control system is considered and designed. The simulation results show the performance of the control system for reactive power compensation.

Keyword: flying-capacitor multilevel inverter, D-STATCOM, power quality, phase shift PWM

### 1. คำนำ

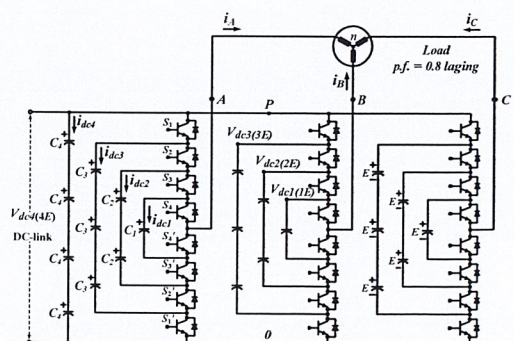
ปัจจุบันนี้ ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ เริ่มมีความต้องการใช้อุปกรณ์กำลังสูงซึ่งต้องเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง โดยมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงเป็นระดับกิโลโวลต์ จึงเป็นการยากที่จะนำอุปกรณ์สวิตช์กำลัง (Power semiconductor) เพียงตัวเดียวมาต่อโดยตรงกับระบบ ส่งจ่ายและจำหน่าย ดังนั้นจึงได้นำวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter) เข้ามาแทนอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ โดยมีข้อดีคือแรงดันด้านขาออกมีความใกล้เคียงสัญญาณไซน์ แรงดันตกคร่อมที่สวิตช์แต่ละตัวมีค่าต่ำ และขนาดฮาโมนิคส์ของแรงดันด้านออกลดลงเมื่อระดับอินเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น [1]-[2] ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับ เพื่อนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า เช่น D-STATCOM (Distribution Static Compensator)

อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์มีคอมมอนดีซีลิงค์ และสามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์ในแต่ละสถานะได้ แต่อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีตัวเก็บประจุจำนวนมาก (ตัวเก็บประจุที่ไม่ถูกต่อเข้ากับคอมมอนดีซีลิงค์ จะเรียกว่า ตัวเก็บประจุฟลายอิง) ซึ่งการกำหนดของแรงดันทางขาออกของอินเวอร์เตอร์ จะเกิดจากผลรวมของระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงแต่ละตัวในสถานะการณีสวิตช์นั้นๆ ดังนั้นการนำอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มาใช้งาน จะต้องคำนึงถึงเรื่องการรักษาสมดุลแรงดันที่ตัวเก็บประจุฟลายอิงค์เป็นสำคัญ [2]

โครงการนี้เกี่ยวข้องกับการนำอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์มาใช้เป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับ D-STATCOM โดยเลือกใช้เทคนิคการมอดดูเลตแบบไซน์ (SPWM) ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของสัญญาณแคเรียร์ออกเป็น 2 ชนิด คือ เทคนิค PSPWM (Phase-shifted Multi-carrier PWM Scheme) และ IPDPWM (Level-shifted Multi-carrier PWM Scheme) โดยเทคนิคที่นำมาใช้คือเทคนิค PSPWM เพราะสามารถรักษาแรงดันที่ตัวเก็บประจุได้ อีกทั้งแรงดันด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์น้อยในย่นการใช้งาน ในบทความนี้ได้ศึกษาการทำงานของ D-STATCOM เข้ากับระบบของการไฟฟ้าเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า

### 2. อินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

รูปที่ 3 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ซึ่งแรงดันขาออกของอินเวอร์เตอร์ ที่พิจารณาคือแรงดันที่จุด A เทียบกับจุด 0 (ดีซีบัสด้านล่าง) เมื่อสวิตช์  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ทำงานแรงดันของอินเวอร์เตอร์  $V_{A0} = 4E$  ในทำนองเดียวกันเมื่อ  $S_1, S_2$  และ  $S_3$  ทำงาน  $V_{A0} = 3E$  หากพิจารณาที่  $V_{A0} = 3E$  จะสามารถสร้างระดับแรงดันได้จาก 4 รูปแบบของสถานะการณีสวิตช์ที่ต่างกัน [2]

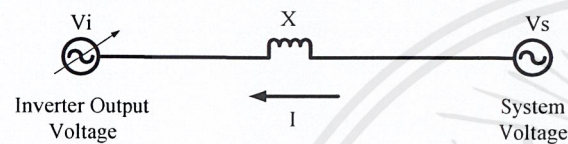


รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ ชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

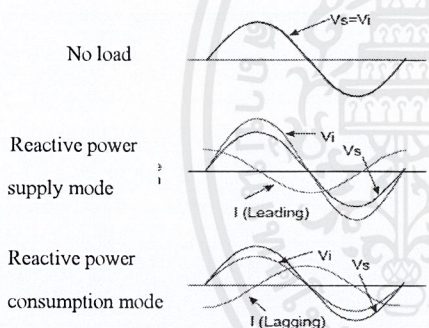
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. D-STATCOM (Distribution Static Compensator)

D-STATCOM (Distribution Static Compensator) ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ต่อขนานกับระบบไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ (Interfacing Reactor) ทำหน้าที่สร้างกำลังไฟฟ้านอกที่จ่ายเข้าระบบไฟฟ้า เช่นเดียวกับการกำเนิดกำลังไฟฟ้านอกที่จาก คาปาซิเตอร์ และ มอเตอร์ซิงโครนัสดังรูปที่ 2 แต่เนื่องจาก D-STATCOM มีข้อดีก็คือสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้านอกที่ฟ้ได้ต่อ เนื่อง มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ไม่มีส่วนเคลื่อนที่ได้ จึงสามารถนำ D-STATCOM ไปใช้เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้หลากหลาย ทั้งการควบคุมตัวประกอบกำลัง การแก้ปัญหาฮาร์มอนิก การแก้ปัญหาอาร์มอิก การรักษาระดับแรงดัน เป็นต้น [4-5]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของ D-STATCOM



รูปที่ 3 โหมดการทำงานของ D-STATCOM

จากรูปที่ 2 แรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) เป็นตัวควบคุมกระแสของ D-STATCOM ( $I$ ) ถ้าแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) มีค่าเท่ากับแรงดันของระบบไฟฟ้า ( $V_s$ ) เป็นผลให้ไม่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้านอกที่ฟ้ไปยังระบบ ถ้าแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) มีค่าสูงกว่าแรงของระบบไฟฟ้า ( $V_s$ ) จะทำให้กระแสของ D-STATCOM ( $I$ ) นำหน้าแรงดันของไฟฟ้า ( $V_s$ ) อยู่  $90^\circ$  เป็นผลให้กำลังรีแอคทีฟนำหน้า (leading reactive power) ไหลจาก D-STATCOM ไปยังระบบไฟฟ้า เรียก โหมดการทำงานนี้ว่า "Reactive power supply mode" ส่วนถ้าแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) ต่ำกว่าแรงดันของระบบไฟฟ้า ( $V_s$ ) จะทำให้กระแสของ D-STATCOM ( $I$ ) ตามหลังแรงดันไฟฟ้าของระบบ ( $V_s$ ) อยู่  $90^\circ$  เป็นผลทำให้กำลังรีแอคทีฟล้าหลัง (lagging reactive power) ไหลเข้ามาที่ D-STATCOM เรียกโหมดการทำงานนี้ว่า

"Reactive power consumption mode" ซึ่งกำลังไฟฟ้านอกที่ฟ้เป็นสัดส่วนความแตกต่างระหว่างแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ ( $V_i$ ) และแรงดันของระบบไฟฟ้า ( $V_s$ ) [6]

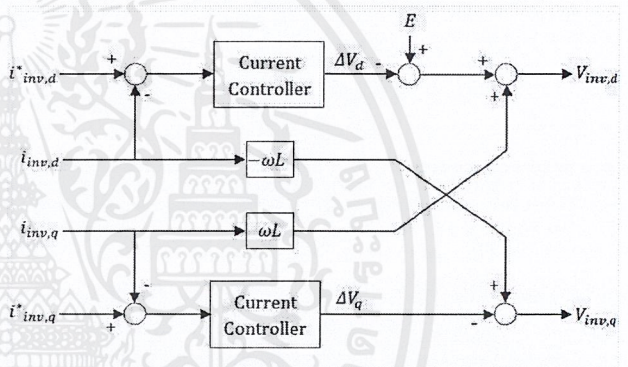
### 4. ผลการจำลองทำงานจากโปรแกรม การ

#### PSCAD/EMTDC

การควบคุมการทำงานของ D-STATCOM ถูกควบคุมให้ทำงานในโหมด Reactive power supply mode โดยควบคุมให้ D-STATCOM ทำการจ่ายเพียงกำลังไฟฟ้านอกที่ฟ้ให้กับระบบไฟฟ้า

$$i_s = i_L + i_{inv} \tag{1}$$

เมื่อ  $i_{inv}$  คือ กระแสอินเวอร์เตอร์  
 $i_s$  คือ กระแสระบบ  
 $i_L$  คือ กระแสโหลด



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมของ D-STATCOM

จากรูปที่ 4 แสดงบล็อกไดอะแกรม ใช้ในการควบคุม D-STATCOM เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้านอกที่ฟ้ จากชุดควบคุมจะได้ค่าแรงดันในกรอบอ้างอิงซิงโครนัส  $d-q$  ดังสมการที่ (2) จากนั้นทำการแปลงกรอบอ้างอิงจากกรอบอ้างอิงซิงโครนัสเป็นกรอบอ้างอิง  $a-b-c$  เพื่อเป็นแรงดันอ้างอิงในการนำไปสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ทำระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์

$$\begin{aligned} v_{inv,d} &= \omega L i_{inv,q} + E - \Delta v_{inv,d} \\ v_{inv,q} &= \omega L i_{inv,d} - \Delta v_{inv,q} \end{aligned} \tag{2}$$

เมื่อ  $v_{inv,d}$  คือ แรงดันอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ในแกน  $d$   
 $v_{inv,q}$  คือ แรงดันอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ในแกน  $q$   
 $\Delta v_{inv,d}$  คือ ผลตอบสนองจากชุดควบคุม PI ในแกน  $d$   
 $\Delta v_{inv,q}$  คือ ผลตอบสนองจากชุดควบคุม PI ในแกน  $q$   
 $E$  คือ แรงดันของระบบ

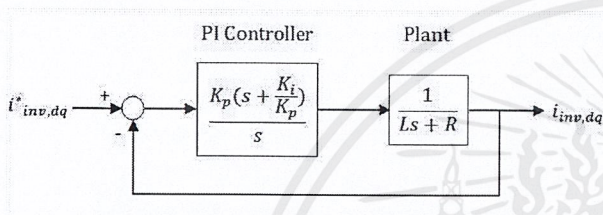
พิจารณากระแสในแนวแกน  $q$  เนื่องจากต้องการควบคุมตัวประกอบกำลังให้มีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นอินเวอร์เตอร์ทำระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์จะต้องจ่ายกระแสอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน  $q$  ( $i_{inv,q}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชดเชยกระแสของระบบในแนวแกน  $q$  ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $i_{sq}^* = 0$ ) โดยค่ากระแสอ้างอิงอินเวอร์เตอร์ ( $i_{inv,q}^*$ ) มีค่าเท่ากับกระแสโหลด ( $i_{Lq}$ ) ในทิศตรงกันข้าม

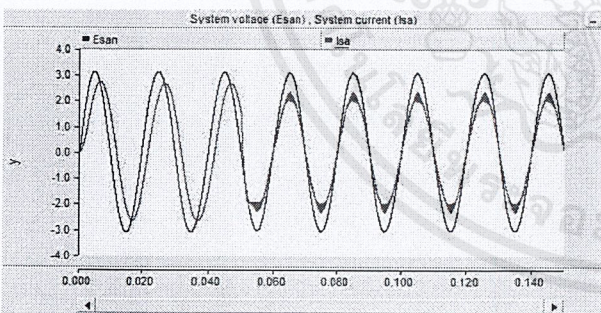
พิจารณากระแสในแนวแกน  $d$  เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ทำระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ต้องการชดเชยเพียงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จึงไม่จำเป็นต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบ ดังนั้นกระแสอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน  $d$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $i_{inv,d}^* = 0$ ) กระแสอ้างอิงอินเวอร์เตอร์จึงต้องกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ ( $i_{inv,d}^* = 0$ )

$$\begin{aligned} i_{inv,d}^* &= 0 \\ i_{inv,q}^* &= -i_{L,q} \end{aligned} \tag{3}$$



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรม Transfer Function แบบวงปิด

เนื่องจากระบบควบคุมในการจำลองนี้ใช้ระบบ PI controller ในการควบคุม ซึ่งแสดงในรูปที่ 5 จาก Transfer function ของระบบควบคุมซีโรของระบบจะมีค่าเท่ากับ  $-K/K_p$  ส่วนค่าโพลของระบบมีสองค่าคือ 0 และ  $-R/L$



รูปที่ 6 ผลการจำลองการทำงาน D-STATCOM แสดงรูปคลื่นแรงดันเฟสระบบ ( $E_{s,an}$ ) และกระแสระบบ ( $I_{s,o}$ )

จากรูปที่ 7 พบว่าเมื่อเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้าที่เวลา 0.05 วินาที กระแสของอินเวอร์เตอร์จะไหลเข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทำให้ระบบมีค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเป็นหนึ่งได้

## 5. การทดลองและผลการทดลองการทำงาน

### D-STATCOM

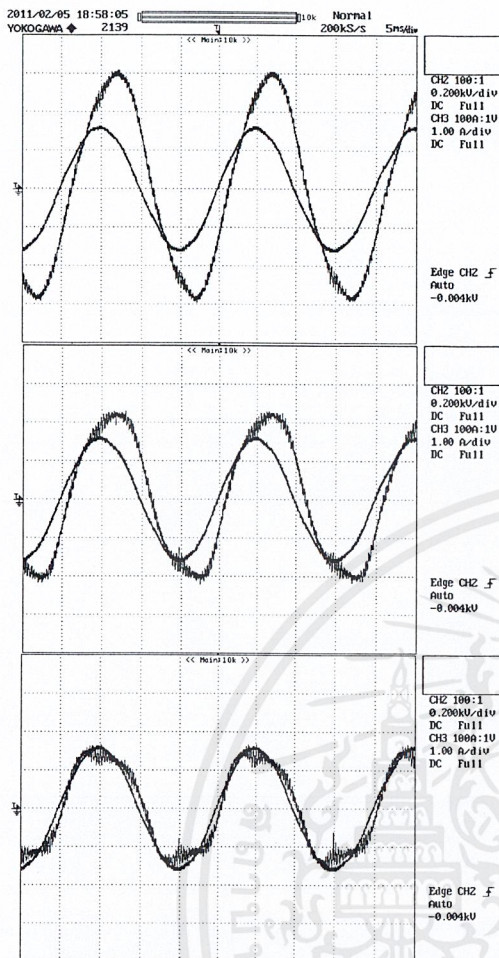
การทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ทำงานเป็น D-STATCOM โดยมีเงื่อนไขในการทดลองวงจรถามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Parameter operating	Phase-shifted PWM (PSPWM)
$f_m$	50 Hz
$f_{cr}$	750 Hz
$m_f$	15
$f_{sw,dev}$	750 Hz
$f_{sw,inv}$	3000 Hz
R-load	โหลดไฟ 15 หลอด/100W (3Y)
RL-load	โหลดไฟ 15 หลอด/100W และ บัลลาสแกนเหล็ก 36 ตัว/ขนาด 40W (3Y)
ตัวประกอบกำลัง (PF)	0.8 lagging
หม้อแปลง	1,320 VA 100/260 3 ตัว
ตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อ	43.5 mH

การทดลองอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยใช้เทคนิค PSPWM ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับ D-STATCOM เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้า แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องต้นแบบ FCI สามารถสร้างแรงดันขาออกระหว่างสาย ( $V_{LL}$ ) ได้เพียง 120 โวลต์ ที่ค่ามอดดูเลชันเท่ากับ 1.0 จึงต้องแปลงแรงดันผ่านหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนเท่ากับ 2.6 โดยใช้การต่อหม้อแปลงแบบเดลต้า-สตาร์จะได้แรงดันด้านขาออกระหว่างสายเท่ากับ 380-400 โวลต์ เท่ากับแรงดันระหว่างสายของระบบไฟฟ้า

ในการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ใช้ค่ามอดดูเลชันเท่ากับ 0.74 เพื่อควบคุมการสร้างแรงดันด้านขาออกระหว่างสายของ FCI ให้เท่ากับ 380 โวลต์ ซึ่งจะเท่ากับแรงดันของระบบไฟฟ้าที่เรากำหนดไว้ โดยในการทดลองชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบด้วยการปรับค่ามอดดูเลชันตั้งแต่ 0.74 ถึง 1.0



รูปที่ 7 รูปคลื่นของแรงดัน ( $V_{s,cv}$ ) และกระแส ( $I_{s,c}$ ) ใน D-STATCOM ที่ได้จากการทดลองที่ค่า  $m_a = 0.74$  (เส้นบน),  $m_a = 0.80$  (เส้นกลาง) และ  $m_a = 0.85$  (เส้นล่าง)

ผลของสัญญาณที่ได้จากการทดลองของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ด้วยเทคนิค PSPWM ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์ของ D-STATCOM โดยในการทดลองชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าด้วยการปรับค่ามอดดูเลชันตั้งแต่ 0.74 ถึง 1.00 โดยจะทำให้กระแสของระบบ ( $I_{s,c}$ ) เปลี่ยนแปลง และมุมระหว่างแรงดันของระบบไฟฟ้า ( $V_{s,cv}$ ) กับกระแสของระบบ ( $I_{s,c}$ ) มีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังของระบบเพิ่มมากขึ้นจาก 0.842 ที่ค่ามอดดูเลชันเท่ากับ 0.74 และเป็นค่า 0.991 ที่ค่ามอดดูเลชัน 0.85 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดดูเลชันกับค่าตัวประกอบกำลังจะเห็นได้ชัดเมื่อเราทำการปรับค่ามอดดูเลชันเพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบกำลังก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

## 6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการทำงานอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์ โดยใช้เทคนิค PSPWM ทำงานเป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับ D-STATCOM เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบ

ไฟฟ้า พบว่าอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟชดเชยให้กับระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้

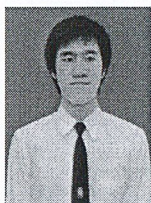
แต่ปัญหาที่พบคือนอกจากอินเวอร์เตอร์จะชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าระบบแล้ว ยังชดเชยกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบด้วยซึ่งอาจเกิดจากการควบคุม D-STATCOM ที่ยังเป็นระบบควบคุมแบบวงเปิดอยู่

## เอกสารอ้างอิง

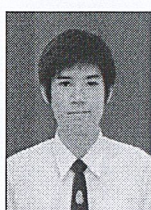
- [1] L. Tolbert, F-Z. Peng. And T. Habetler, "Multilevel converter for large electric drives" IEE trans. Ind. Applicat, vol. 35, pp. 36-44, Jan/Feb, 1999.
- [2] P. Keawworasut and S. Polmai, "Balancing of Capacitor Voltage of Flying-Capacitor Multilevel Inverter by SPWM Techniques" 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), Royal Hill Golf and Spa, Nakhon nayok, Thailand, pp. 501-504, Oct 29-31, 2008.
- [3] Bin Wu, *High-Power Converters and ac Drives*, The Institute of Electrical and Electronics Engineering. Inc., 2006, pp. 127-136.
- [4] C. Sumpavakup, B. Borriboon, K. Somsai and N. Neawyeandee, "PQR Transformation Technique for Load Voltage Regulation by Using D-STATCOM" The First Annual Meeting of the Power and Energy Research Evolution (AMPERE 2008), Nakhon nayok, Thailand, PSS-001, pp. 1-5, April 24- 25, 2008.
- [5] John J. Paserba, Gregory F. Reed , Masatoshi Takeda, Tomohiko Aritsuka "FACT and Custom Power Equipment for the Enhancement of Power Transmission System Performance and Power Quality", Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (VII SEPOPE) Curitiba, Brazil, May 21-26, 2000
- [6] G.-Y.Jong, T-J,Park and B.-H.Kwon, "Line-voltage-sensorless active power filter for reactive power compensation", IEE Proc-Electr. Power Appl. Vol. 147 No.5.September 2000
- [7] Fang Zheng Peng, "Dynamic Performance and Control of a Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverters", IEEE Trans., Vol. 33, No. 3, May/June 1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



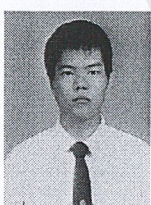
นาย พศวัต รักษ์พิทยานนท์ วัน/เดือน/ปีเกิด 28 มิถุนายน 2532  
 ที่อยู่ 224/65 หมู่บ้าน ลัดดารมย์ ซอย มัยลาภ ถนน เกษตร-นวมินทร์ แขวง  
 จระเข้บัว เขต ลาดพร้าว กรุงเทพฯ 10230  
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนนบดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนี)  
 E-mail : podsawat.dew@gmail.com



นาย มนัส วารุทัย วัน/เดือน/ปีเกิด 7 เมษายน 2532  
 ที่อยู่ 57 หมู่ที่ 1 ตำบล ท่าถ่าน อำเภอ พนมสารคาม จังหวัด ฉะเชิงเทรา  
 24120  
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนนบดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนี)  
 E-mail : manas.warutai@gmail.com



นาย รัสสะ โพธิ์อยู่ วัน/เดือน/ปีเกิด 28 มกราคม 2531  
 ที่อยู่ 166/3 หมู่ 2 ตำบล ท่าพ้อ อำเภอเมืองพิจิตร จังหวัด พิจิตร 66000  
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนพิจิตรพิทยาคม  
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี  
 E-mail : p.rassa@live.com



นาย วรพงศ์ วงศ์ล้อมมรเลิศ วัน/เดือน/ปีเกิด 14 มกราคม 2532  
 ที่อยู่ 23-25 ซอย 1 ถนน ประชาแรมมิต ตำบล บางคล้า อำเภอ บางคล้า  
 จังหวัด ฉะเชิงเทรา 24110  
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนเซนต์หลุยส์  
 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนเบญจมราช-  
 รังสฤษฎ์ ฉะเชิงเทรา  
 E-mail : worrapongw@gmail.com