

การควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแบบใหม่สำหรับคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์



นายณัฐวิทย์ พานิชชอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A NEW CAPACITOR-VOLTAGE CONTROL FOR MODULAR MULTILEVEL CONVERTERS

Mr. Nathawit Panichchob



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | การควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแบบใหม่สำหรับคอน |
|                                 | เวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์                     |
| โดย                             | นายณัฐวิทย์ พานิชชอบ                             |
| สาขาวิชา                        | วิศวกรรมไฟฟ้า                                    |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์    |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณวิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย)

ณัฐวิทย์ พานิชชอบ : การควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแบบใหม่สำหรับคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ (A NEW CAPACITOR-VOLTAGE CONTROL FOR MODULAR MULTILEVEL CONVERTERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 64 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแบบใหม่สำหรับคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ มอดูลาร์ เป้าหมายในการควบคุมคือลดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุภายในโมดูล โดยแนวคิดการควบคุมที่นำเสนออยู่บนพื้นฐานของหลักสมดุลกำลังงาน วิทยานิพนธ์นี้ได้วิเคราะห์การไหลวนของกำลังงานภายในคอนเวอร์เตอร์รวมทั้งหาสมการของกระแสไหลวนที่ทำให้กำลังงานออกและเข้าแต่ละโมดูลสมดุลกัน จากการวิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุพบว่า กระแสไหลวนตามหลักสมดุลกำลังงานที่นำเสนอจะทำให้การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อยที่สุด วิทยานิพนธ์ได้นำเสนอวงรอบควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์สองวงรอบได้แก่ วงรอบควบคุมสมดุลกำลัง/แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโดยเฉลี่ย และวงรอบควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของแต่ละโมดูล วงรอบการควบคุมที่นำเสนอมีลักษณะเป็นเชิงเส้นและไม่มีผลการเชื่อมร่วระหว่างกัน ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพ นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์ยังได้ออกแบบวงจรขับนำสวิตซ์ซึ่งรวมวงจรวัดและป้อนกลับข้อมูลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของโมดูลไว้ในวงจร ทำให้ลดขนาดของวงจรแต่ละโมดูลลงได้มาก เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ในระดับแรงดันต่ำต่อไป การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ตัวต้นแบบและประสิทธิภาพของวงรอบควบคุมที่นำเสนอยืนยันได้ด้วยผลการจำลองการทำงานและการทดลองจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5470201021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MODULAR MULTILEVEL CONVERTERS / CAPACITOR VOLTAGE CONTROL / POWER BALANCING / VOLTAGE BALANCING

NATHAWIT PANICHCHOB: A NEW CAPACITOR-VOLTAGE CONTROL FOR MODULAR MULTILEVEL CONVERTERS. ADVISOR: ASST. PROF. SOMBOON SANGWONGWANICH, Ph.D., 64 pp.

This thesis proposes a new capacitor-voltage control for modular multilevel converters which aims to reduce the voltage fluctuation across the capacitors of the submodules. The main idea of the proposed control is based on the concept of input-output power balancing of each submodule. The power flow inside the converter is rigorously analyzed, and the circulating current which satisfies the power balance condition is derived. From the analysis of capacitor-voltage fluctuation it is founded that the so-derived circulating current gives the minimum ripples of the capacitor voltages. In the proposed control scheme, there are two control loops, i.e. the power-balancing/averaged-voltage control loop and the individual submodule-voltage control loop. By choosing the squared capacitor voltages as the controlled variables, the proposed control loops become linear, and the two control loops are also shown to be almost decoupled from each other. As a result, the design of the two control loops becomes simple. Moreover, this thesis also proposes a gate-drive circuit with built-in capacitor-voltage sensing function. The size of each submodule is thus significantly reduced, which opens the way for application of multilevel converters in the low-voltage area. Performances of the proposed control are finally verified by simulation and experiment carried out on a converter prototype.

Department: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ ผศ. ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน หัวหน้าห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ผู้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือต่างๆ ที่ตลอดการทำวิจัย และขอขอบคุณรุ่นพี่, รุ่นน้อง และเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งให้กำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้โอกาสทางการศึกษาแก่ข้าพเจ้า รวมให้เป็นกำลังใจให้เสมอตลอดช่วงเวลาทำการวิจัย



## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญภาพ .....   | ญ    |
| สารบัญตาราง.....  | ฐ    |
| รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....  | ฑ    |
| บทที่ 1 .....   | 1    |
| 1.1 ความเบื้องต้น .....   | 1    |
| 1.2 ปัญหาของคอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ .....                                       | 2    |
| 1.3 การควบคุมคอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่เคยมีการนำเสนอในอดีต .....               | 4    |
| 1.3.1 การควบคุมด้วยวิธี State Redundant.....  | 4    |
| 1.3.2 การควบคุมด้วยวิธีกำจัดขนาดของกระแสไหลวน .....                                     | 5    |
| 1.3.3 การควบคุมผ่านวงรอบควบคุมค่าแรงดันเฉลี่ยและแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละ<br>โมดูล 7 |      |
| 1.4 สรุปปัญหาและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา.....                                       | 8    |
| 1.5 วัตถุประสงค์.....   | 9    |
| 1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....   | 9    |
| 1.7 วิธีการดำเนินการ.....   | 9    |
| 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....  | 10   |
| บทที่ 2 .....   | 11   |
| 2.1 การทำงานพื้นฐานของคอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์.....                              | 11   |
| 2.2 สมดุลกำลังของคอนเวอเตอร์.....   | 13   |

|  |    |
|--|----|
| 2.3 การวิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ .....   | 15 |
| บทที่ 3 .....  | 18 |
| 3.1 วงรอบควบคุมกำลังและแรงดันเฉลี่ย .....  | 18 |
| 3.1.1 วงรอบควบคุมสมดุลกำลัง (Power balance control).....   | 19 |
| 3.1.2 วงรอบควบคุมแรงดันเฉลี่ย ( Averaged Voltage Control ).....  | 20 |
| 3.2 วงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล (Individual voltage balancing control).....  | 21 |
| 3.3 เสถียรภาพของการทำงาน .....   | 22 |
| 3.3.1 เสถียรภาพของวงรอบควบคุมกำลัง/แรงดันเฉลี่ย .....  | 22 |
| 3.3.2 เสถียรภาพของวงรอบควบคุมสมดุลแรงดันแต่ละโมดูล .....   | 23 |
| 3.4 ผลการจำลองการทำงาน .....   | 24 |
| 3.4.1 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยวงรอบควบคุมที่<br>นำเสนอ 26  |    |
| 3.4.2 การควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยวงรอบ<br>ควบคุมที่นำเสนอเมื่อเปลี่ยนความถี่ขาออก .....          | 28 |
| 3.4.3 การควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวงรอบควบคุมที่นำเสนอเมื่อลด<br>ขนาดของค่าคำสั่งแรงดันขาออก .....                    | 32 |
| 3.4.4 การควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวงรอบควบคุมที่นำเสนอ เมื่อ<br>เปลี่ยนตัวประกอบกำลังขาออกเป็น 0.623 แบบล้าหลัง ..... | 34 |
| 3.4.5 การควบคุมการทำงานโดยไม่มีการควบคุมกระแสไหลวนให้เป็นไปตามหลักสมดุล<br>กำลัง 36  |    |
| บทที่ 4 .....  | 38 |
| 4.1 การออกแบบวงจรขั้วนำสวิตช์และวงจรตรวจวัดแรงดันภายในโมดูล.....   | 39 |
| 4.2 การควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์.....   | 43 |
| บทที่ 5 .....  | 47 |



|  |    |
|--|----|
| 5.1 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่<br>นำเสนอ.....            | 48 |
| 5.2 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบเมื่อลดค่าแรงดันขา<br>ออก 51                |    |
| 52   |    |
| 52   |    |
| 5.3 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบเมื่อเปลี่ยนความถี่ขา<br>ออก 53             |    |
| 5.4 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบที่ตัวประกอบกำลัง<br>0.642 แบบล้าหลัง ..... | 57 |
| บทที่ 6 .....  | 59 |
| 6.1 บทสรุปผลการวิจัย .....   | 59 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต .....  | 60 |
| รายการอ้างอิง .....  | 62 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....   | 64 |

## สารบัญภาพ

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์สามเฟสหลายระดับแบบมอดูลาร์.....   | 2    |
| 1.2 ความสัมพันธ์ของกระแสและการทำงานของสวิตช์ไวงาน.....   | 3    |
| 1.3 คอนเวอร์เตอร์เฟสเดียวสามระดับแบบมอดูลาร์.....  | 4    |
| 1.4 แผนภาพการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ โดยมีเป้าหมายในการลดขนาดของกระแสไหลวน..... | 6    |
| 1.5 แผนภาพการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ในบทความ [1].....                           | 8    |
| 2.1 คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์และแผนภาพการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์.....                         | 11   |
| 2.2 การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุตามสมการที่ 2.18 ที่ค่า $k$ และค่าตัวประกอบกำลังต่างๆ.....       | 17   |
| 3.1 วงรอบควบคุมสมดุลงำลังและแรงดันเฉลี่ย.....  | 18   |
| 3.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบควบคุมกำลัง.....  | 20   |
| 3.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบควบคุมกำลัง/แรงดันเฉลี่ย.....   | 21   |
| 3.4 วงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล.....   | 21   |
| 3.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบควบคุมสมดุของแรงดันแต่ละโมดูล.....  | 22   |
| 3.6 วงจรคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่ใช้ในการจำลองผลการทำงาน.....                                   | 25   |
| 3.7 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอ.....                                | 27   |
| 3.8 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอที่แรงดันขาออก 75 Hz.....            | 30   |

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.9 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอยู่ที่แรงดันขาออก 35 Hz.....                           | 31   |
| 3.10 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอยู่ที่แรงดันขาออก 106V.....                           | 33   |
| 3.11 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอดัวประกอบกำลัง 0.623.....                             | 35   |
| 3.12 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์โดยไม่มีการควบคุมกระแสไหลวน....   | 37   |
| 3.13 การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสำหรับการควบคุมการทำงานที่นำเสนอและควบคุมการทำงานโดยไม่มีการควบคุมกระแสไหลวน..... | 37   |
| 4.1 แผนภาพการควบคุมคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่นำเสนอ.....   | 38   |
| 4.2 แผนภาพการทำงานภายในโมดูล.....  | 39   |
| 4.3 โครงสร้างไอซี Analog Device Adum5341A.....   | 40   |
| 4.4 วงจรขั้วนำเกิด.....  | 41   |
| 4.5 วงจรป้อนกลับแรงดัน.....  | 42   |
| 4.6 โมดูลของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบ.....  | 42   |
| 4.7 แผนภาพการทำงานของบอร์ด FPGA และ DSP.....   | 46   |
| 5.1 ระบบทดสอบ.....   | 47   |
| 5.2 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอ.....  | 50   |
| 5.3 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอยู่ที่แรงดันเฟสขาออก 113.13V.....            | 52   |

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 5.4 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอที่<br>ความถี่ขาออก 75 Hz.....                      | 55   |
| 5.5 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอที่<br>ความถี่ขาออก 25 Hz.....                      | 56   |
| 5.6 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอที่<br>ตัวประกอบกำลังด้านโหลด 0.642 แบบล้าหลัง..... | 58   |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ความสัมพันธ์ของสถานะของตัวเก็บประจุและการทำงานของสวิตช์ไวงาน .....              | 3    |
| 1.2 สถานะการทำงานของโมดูลในแต่ละระดับแรงดันของคอนเวอร์เตอร์แบบมอดูลาร์สี่โมดูล..... | 4    |
| 3.1 พารามิเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่ใช้ในการจำลอง.....            | 24   |
| 3.2 อัตราการขยายของวงรอบควบคุมที่ใช้ในการจำลองผลการทำงาน.....                       | 24   |
| 3.3 จุดประสงค์และเงื่อนไขการจำลองผลการทำงาน.....                                    | 25   |
| 5.1 พารามิเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่ใช้ในการจำลอง.....            | 47   |
| 5.2 อัตราการขยายของวงรอบควบคุมที่ใช้ในการจำลองผลการทำงาน.....                       | 47   |
| 5.3 จุดประสงค์และเงื่อนไขการทดสอบการทำงาน.....                                      | 48   |

## รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $E$                      | แรงดันบัสไฟตรง                                       |
| $C$                      | ค่าความจุของตัวเก็บประจุภายในโมดูล                   |
| $C_d$                    | ค่าความจุของตัวเก็บประจุสำหรับแหล่งจ่ายไฟตรงด้านเข้า |
| $l$                      | ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำภายในแกน              |
| $r$                      | ค่าความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำภายในแกน           |
| $R$                      | ค่าความต้านทานด้านโหลด                               |
| $L$                      | ค่าความเหนี่ยวนำด้านโหลด                             |
| $S1, S2$                 | สวิตช์ไวงานภายในโมดูล                                |
| $V_C$                    | ค่าไฟตรงของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ                   |
| $\tilde{V}_C$            | ค่าแรงดันกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ         |
| $V_{Cju}$                | ค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุภายในโมดูลที่ $j$ เฟส ยู   |
| $V_{ju}$                 | ค่าแรงดันที่คร่อมขั้วของโมดูลที่ $j$ เฟส ยู          |
| $P_{ju}$                 | ค่ากำลังที่ไหลผ่านโมดูลที่ $j$ เฟส ยู                |
| $P_{in}$                 | ค่ากำลังขาเข้าคอนเวอร์เตอร์                          |
| $P_{out}$                | ค่ากำลังขาออกจากคอนเวอร์เตอร์                        |
| $P_{ac}$                 | ค่ากำลังไหลวนระหว่างแกนบนและล่าง                     |
| $V, I$                   | ค่าแอมแปร์ของแรงดันเฟสและกระแสขาออก                  |
| $\phi$                   | มุมระหว่างแรงดันเฟสและกระแสขาออก                     |
| $V_u, V_v, V_w$          | ค่าแรงดันเฟสขาออก                                    |
| $V_{uv}, V_{vw}, V_{wu}$ | ค่าแรงดันระหว่างเฟสขาออก                             |
| $V_u^*, V_v^*, V_w^*$    | ค่าคำสั่งแรงดันเฟสขาออก                              |
| $i_u, i_v, i_w$          | ค่ากระแสขาออก  |
| $\omega$                 | ค่าความถี่เชิงมุมขาออก                               |
| $f$                      | ค่าความถี่ขาออก                                      |
| $f_c$                    | ความถี่การสวิตช์                                     |
| $i_d$                    | กระแสด้านเข้าของคอนเวอร์เตอร์                        |
| $i_{pu}, i_{pv}, i_{pw}$ | กระแสที่ไหลในแกนบนของคอนเวอร์เตอร์                   |

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $i_{nu}, i_{nv}, i_{nw}$       | กระแสที่ไหลในแกนกลางของคอนเวอเตอร์                     |
| $i_{zu}, i_{zv}, i_{zw}$       | กระแสไหลวนทั้งสามเฟส                                   |
| $i_{zu}^*, i_{zv}^*, i_{zw}^*$ | กระแสไหลวนคำสั่งทั้งสามเฟส                             |
| $V_{Au}, V_{Av}, V_{Aw}$       | ค่าแรงดันควบคุมของวงรอบควบคุมสมดุลงำลัง/แรงดันเฉลี่ย   |
| $V_{Au}^*, V_{Av}^*, V_{Aw}^*$ | ค่าคำสั่งแรงดันควบคุมป้อนไปข้างหน้า                    |
| $V_{Bju}$                      | ค่าแรงดันควบคุมของวงรอบควบคุมแรงดันโมดูลที่ $j$ เฟส ยู |
| $\sum_{j=1}^8 V_{Bju}$         | ผลรวมแรงดันควบคุมแยกแต่ละโมดูลเฟส ยู                   |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเบื้องต้น

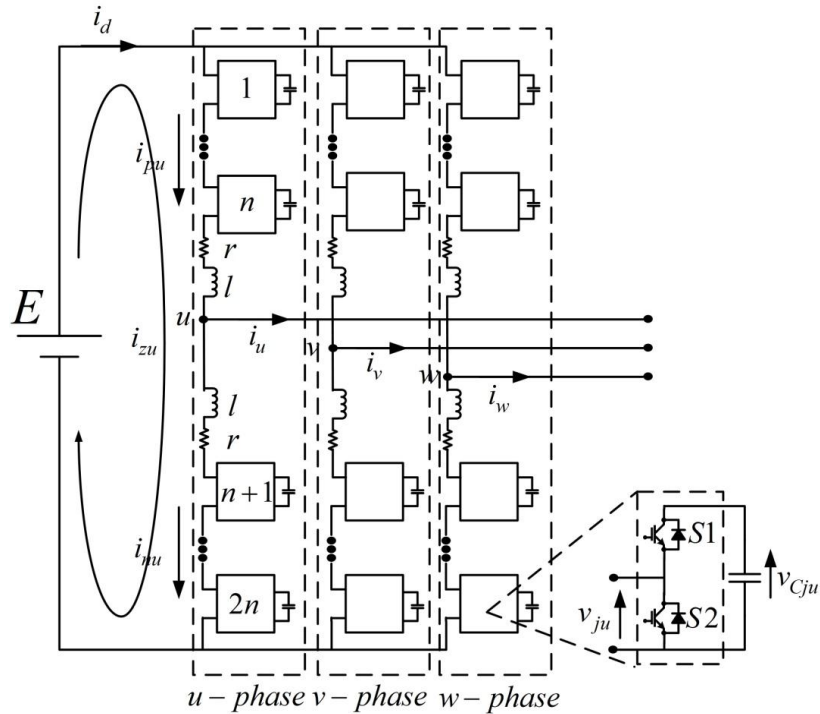
ในปัจจุบันระบบไฟฟ้าในระดับแรงดันปานกลางถึงแรงดันสูงต่างๆ เช่น ระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC) ระบบขดเคียวแรงดันในสายส่งแรงสูง (STATCOM) หรือระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แรงดันสูง (High-Voltage Motor drive system) ล้วนมีคอนเวอร์เตอร์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ [1] โดยคอนเวอร์เตอร์แรงดันสูงในยุคแรกเริ่มมักจะมีโครงสร้างแบบตริ่งจุดนิวทรัล (NPC) ที่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงทั้งด้านเข้าและด้านออก เพื่อลดขนาดของแรงดันเนื่องจากขีดจำกัดของสวิตช์ไวงาน เป็นผลทำให้คอนเวอร์เตอร์มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก อีกทั้งยังทำให้เกิดปรากฏการณ์เบี่ยงเบนของฟลักซ์แม่เหล็ก (DC Magnetic flux deviation) ของหม้อแปลง ในกรณีที่เกิดกระแสผิดพล่อง (Neutral-line-to-ground fault) อีกด้วย

เพื่อกำจัดปัญหาข้างต้นจึงมีแนวคิดในการนำคอนเวอร์เตอร์หลายระดับเข้ามามีการประยุกต์ใช้งานระบบไฟฟ้าแรงดันสูง โดยได้มีการนำเสนอโครงสร้างแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น โครงสร้างแบบไดโอดแคลมป์ (Diode-Clamp multilevel converters : DCMC) , โครงสร้างแบบฟลายอิงแคปาซิเตอร์ ( Flying-capacitor multilevel converters : FCMC) แต่โครงสร้างที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระยะหลังก็คือ โครงสร้างแบบมอดูลาร์ (Modular multilevel converter : MMC) [2] เนื่องจากโครงสร้างนี้มีข้อดีที่แตกต่างจากคอนเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดอื่นๆ คือ

1. โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์แบบมอดูลาร์มีลักษณะโครงสร้างแบบโมดูลย่อย (Multi-cell) ซึ่ง มีความยืดหยุ่นและนำเชื่อถือสูง อีกทั้งยังเข้าใจง่าย, ง่ายต่อการออกแบบและบำรุงรักษา
2. แรงดันและกระแสขาออกมีฮาร์มอนิกต่ำ ทำให้สามารถใช้วงจรกรองที่มีขนาดเล็กได้ เป็นผลให้คอนเวอร์เตอร์มีน้ำหนักเบา ประหยัดค่าใช้จ่ายและพื้นที่ใช้สอย
3. สามารถใช้สวิตช์ไวงานที่แบกรับภาระแรงดันต่ำได้
4. การควบคุมการทำงานไม่ซับซ้อน ถึงแม้คอนเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยโมดูลจำนวนมาก แต่ยังสามารถประยุกต์ใช้แนวคิดหรือวิธีการควบคุมการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยจำนวนโมดูลน้อยได้เช่นกัน

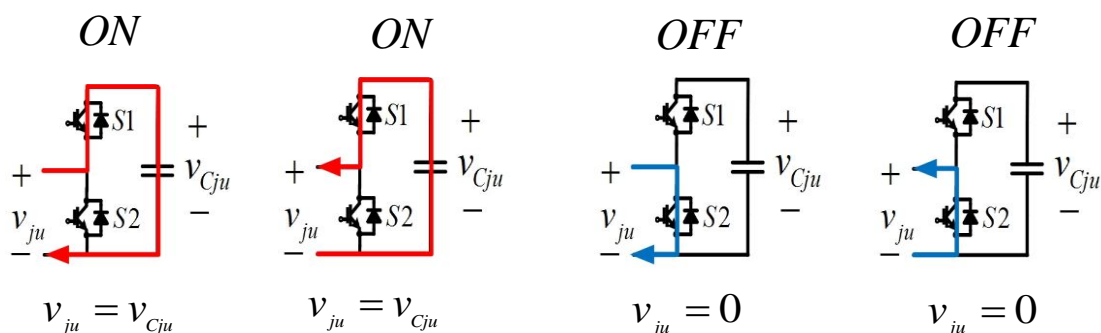


## 1.2 ปัญหาของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์สามเฟสหลายระดับแบบมอดูลาร์

รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์สามเฟสหลายระดับแบบมอดูลาร์ ในแต่ละเฟส ประกอบด้วยโมดูล (Module) จำนวนหลายโมดูลต่อกับตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ภายในโมดูลประกอบด้วย สวิตช์ไวงานจำนวนสองตัว (S1,S2) และตัวเก็บประจุ สวิตช์ไวงานทั้งสองตัวจะมีสถานะการทำงานที่ ตรงกันข้ามเสมอ โดยขณะที่สวิตช์ S1 นำกระแส S2 จะไม่นำกระแส ทำให้แรงดันคร่อมขั้วของโมดูล ( $v_{ju}$ ) จะมีค่าเท่ากับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ( $v_{Cju}$ ) ในสถานะนี้จะเรียกว่าโมดูลมีสถานะทำงาน (ON) ในทางตรงกันข้าม ขณะที่ S2 นำกระแส S1 จะไม่นำกระแส กระแสจะไม่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ดังนั้นแรงดันคร่อมขั้วโมดูลจึงมีค่าเป็นศูนย์ และสถานะนี้จะเรียกว่าโมดูลมีสถานะไม่ทำงาน (OFF) การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบ มอดูลาร์ก็คือการควบคุมการทำงานของโมดูลแต่ละ โมดูล ให้คอนเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันขาออกได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตาม แรงดันคร่อมตัว เก็บประจุภายในโมดูลจะมีความสัมพันธ์กับการทำงานของสวิตช์ไวงานและทิศทางของกระแสที่ไหล ในแต่ละแขน โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวได้สรุปไว้ดังตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของกระแสและการทำงานของสวิตช์ไวนาน

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ของสถานะของตัวเก็บประจุและการทำงานของสวิตช์ไวนาน

| สวิตช์ S1 | สวิตช์ S2 | แรงดันที่ขั้วโมดูล ( $v_{ju}$ ) | กระแสในแกน ( $i_{pu}, i_{nu}$ ) | สถานะตัวเก็บประจุ ( $v_{Cju}$ ) |
|-----------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ON        | OFF       | $v_{ju} = v_{Cju}$              | $> 0$                           | Charging                        |
| ON        | OFF       | $v_{ju} = v_{Cju}$              | $< 0$                           | Discharging                     |
| OFF       | ON        | $v_{ju} = 0$                    | $> 0$                           | Unchanged                       |
| OFF       | ON        | $v_{ju} = 0$                    | $< 0$                           | Unchanged                       |

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นว่าตัวเก็บประจุมีการอัดหรือคายประจุอยู่ตลอดเวลา จึงส่งผลให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเกิดการกระเพื่อมตลอดเวลาด้วยเช่นกัน ปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่สำคัญของคอนเวอร์เตอร์ หลายระดับแบบมอดูลาร์ ซึ่งนอกจากจะต้องควบคุมให้คอนเวอร์เตอร์สร้างแรงดันได้ตามต้องการแล้ว ยังต้องควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุภายในโมดูลให้ตรงกับค่าคำสั่งและไม่ให้เกิดกระเพื่อมที่มากเกินไปด้วย แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ไม่ถูกควบคุมหรือมีการกระเพื่อมมากเกินไป อาจส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์เกิดความเสียหายได้จากการที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่ามากกว่าค่าพิคกิ้งของตัวเก็บประจุภายในโมดูล อีกทั้งการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุยังสื่อถึงการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแกนบนและแกนล่างของคอนเวอร์เตอร์ดังที่ได้แสดงให้เห็นต่อไป

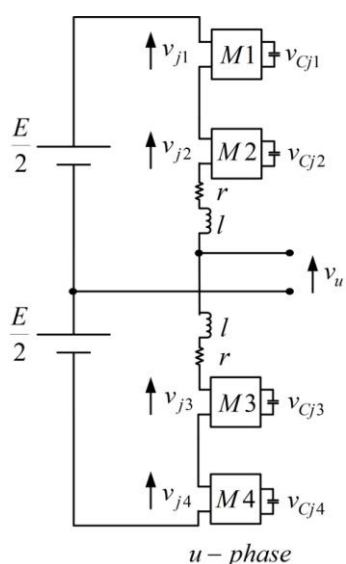
วิทยานิพนธ์ ฉะนั้นการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่มีค่ามากจะทำให้กระแสไหลวนภายในคอนเวอร์เตอร์มีค่ามากเช่นกัน ซึ่งจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียที่เยอะขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้แล้ว การวิเคราะห์หรือคำอธิบายที่ชัดเจนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไหลวนกับการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุก็เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เข้าใจกลไกการทำงานและนำไปสู่การออกแบบวงรอบควบคุมที่เหมาะสม

### 1.3 การควบคุมคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่เคยมีการนำเสนอในอดีต

แม้ในปัจจุบันบริษัท Siemens ได้นำคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้มาใช้จริงในการอุตสาหกรรม ในชื่อว่า HVDC-Plus โดยมีค่าพิกัดกำลัง 400 MVA ซึ่งประกอบด้วยโมดูลจำนวน 200 โมดูลในแต่ละเฟส [1] แต่ทางบริษัทมิได้บอกรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการควบคุมหรือคำอธิบายเกี่ยวกับการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมประจุกอย่างละเอียด ต่อมาได้มีบทความวิจัยเสนอวิธีการควบคุมคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ โดยมีรายละเอียดของแต่ละวิธีดังนี้

#### 1.3.1 การควบคุมด้วยวิธี State Redundant

บทความ [3] ได้เสนอวิธีการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยวิธี State Redundant ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้โดยสังเขปได้ดังนี้ เพื่อง่ายต่อความเข้าใจจึงขอยกตัวอย่างการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์เฟสเดียวสามระดับแบบมอดูลาร์ ซึ่งประกอบไปด้วยโมดูลทั้งหมด 4 โมดูล ดังแสดงในรูปที่ 1.2 วิธีการควบคุมดังกล่าวสามารถใช้กับคอนเวอร์เตอร์ที่มีโมดูลจำนวนมากได้ในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 1.3 คอนเวอร์เตอร์เฟสเดียวสามระดับแบบมอดูลาร์

ตารางที่ 1.2 สถานะการทำงานของโมดูลในแต่ละระดับแรงดันของคอนเวอร์เตอร์แบบมอดูลาร์สี่โมดูล

| แรงดันขาออก | Upper Arm Module |     | Lower Arm Module |     |
|-------------|------------------|-----|------------------|-----|
|             | M1               | M2  | M3               | M4  |
| $E/2$       | OFF              | OFF | ON               | ON  |
| 0           | ON               | OFF | ON               | OFF |
|             | ON               | OFF | OFF              | ON  |
|             | OFF              | ON  | ON               | OFF |
|             | OFF              | ON  | OFF              | ON  |
| $-E/2$      | ON               | ON  | OFF              | OFF |

ตารางที่ 1.2 แสดงสถานะการทำงานของโมดูลในแต่ละระดับแรงดัน จะเห็นว่าสำหรับระดับแรงดันหนึ่งๆ จำนวนโมดูลที่มีสถานะทำงานในแต่ละแขนจะคงที่เสมอ และในบางระดับแรงดัน

สามารถเลือกรูปแบบการทำงานได้หลายรูปแบบ เช่น การสร้างแรงดันศูนย์ สามารถเลือกสถานะการทำงานของโมดูลได้ถึง 4 รูปแบบ การคุมด้วยวิธี State Redundant จะใช้ความเป็นอิสระข้างต้นในการควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ สำหรับการวิธีการกำหนดสถานะว่าโมดูลใดควรทำงานหรือไม่ทำงานนั้น มีขั้นตอนดังนี้ คือ

1. เรียงลำดับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของแต่ละโมดูลจากน้อยไปมาก
2. พิจารณากระแสที่ไหลในแต่ละแขน หากที่กระแสในแขนมีทิศทางไหลเข้าอัดตัวเก็บประจุ โมดูลที่มีค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุน้อยกว่า จะได้รับเลือกให้มีสถานะทำงาน
3. ในทางตรงกันข้าม ถ้ากระแสในแขนมีทิศทางในการคายประจุ โมดูลที่มีค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมากกว่า จะได้รับเลือกให้มีสถานะทำงาน

สำหรับวิธีการสร้างแรงดันขาออกจะใช้วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse-Width-Modulation) โดยการเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันคำสั่งกับรูปคลื่นพาหะ (จำนวนคลื่นพาหะเท่ากับจำนวนระดับแรงดัน - 1) สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตความกว้างพัลส์จะบ่งบอกถึงจำนวนโมดูลที่อยู่ในสถานะทำงานในแต่ละช่วงเวลา สำหรับการควบคุมนี้ ผู้วิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้ แต่จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นได้ว่าการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเกิดขึ้น ซึ่งผู้วิจัยมีได้อธิบายถึงสาเหตุของการกระเพื่อมดังกล่าวอย่างละเอียด

### 1.3.2 การควบคุมด้วยวิธีกำจัดขนาดของกระแสไหลวน

บทความ [4] ได้วิเคราะห์พฤติกรรมของกระแสไหลวน ( $i_{zu}, i_{zv}, i_{zw}$ ) ของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ โดยได้ข้อสรุปดังนี้

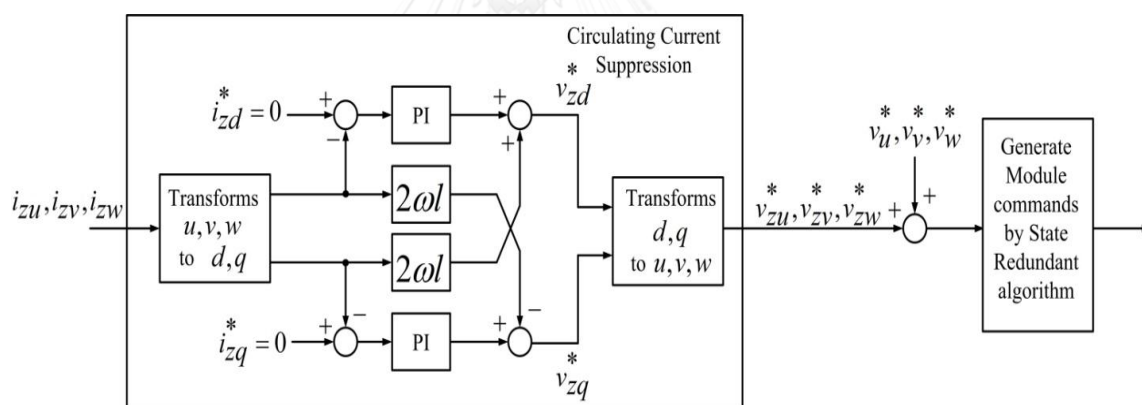
1. การทำงานของโมดูลในแขนบนและแขนล่างสามารถมองเป็นคอนเวอร์เตอร์หลายระดับสองตัวที่เป็นอิสระต่อกันได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์การทำงานและสร้างแบบจำลองอย่างง่าย
2. กระแสไหลวนภายในวงจรประกอบด้วยส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับจากกระแสขาออก ( $i_u / 2$ ) ส่วนไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟตรง ( $i_d / 3$ ) และส่วนกระแสสำหรับการควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ และสำหรับกรณีที่เป็นคอนเวอร์เตอร์

สามเฟสสามสาย กระแสไหลวนจะมีลักษณะเป็นลำดับเฟสลบ (Negative Sequence) และผลรวมทางพีชคณิตของกระแสไหลวนทั้งสามเฟส จะเท่ากับ กระแสที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายไฟตรง ( $i_d$ )

$$i_d = i_{zu} + i_{zv} + i_{zw}$$

3. กระแสไหลวนไม่สามารถกำจัดออกให้หมดไปได้ แต่สามารถควบคุมด้วยแรงดันคำสั่งได้ ในขณะเดียวกันแรงดันควบคุมการไหลของกระแสไหลวน ก็อาจถูกกำจัดหรือถูกลดทอนจากแรงดันคำสั่งอย่างอื่นและจะส่งผลเสียต่อการควบคุมกระแสไหลวนเช่นกัน

บทความ [5] ได้เสนอวิธีการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ โดยพยายามลดขนาดของกระแสไหลวนเพื่อลดกำลังสูญเสียและภาระในการรับกระแสของสวิตช์ไวงาน โดยแผนผังการควบคุมนี้ได้แสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.4 แผนภาพการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ โดยมีเป้าหมายในการลดขนาดของกระแสไหลวน

จากผลการจำลองด้วยวิธีการควบคุมข้างต้น ผู้วิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถลดขนาดของกระแสไหลวนได้จริงและส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับสองในกระแสไหลวนหายไปด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามผลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับสองของกระแสไหลวนมีส่วนในการช่วยลดการกระเพื่อมของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ดังจะได้กล่าวต่อไปในวิทยานิพนธ์นี้ ฉะนั้นวิธีการควบคุมดังกล่าวจะทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเกิดการกระเพื่อมที่มากขึ้น

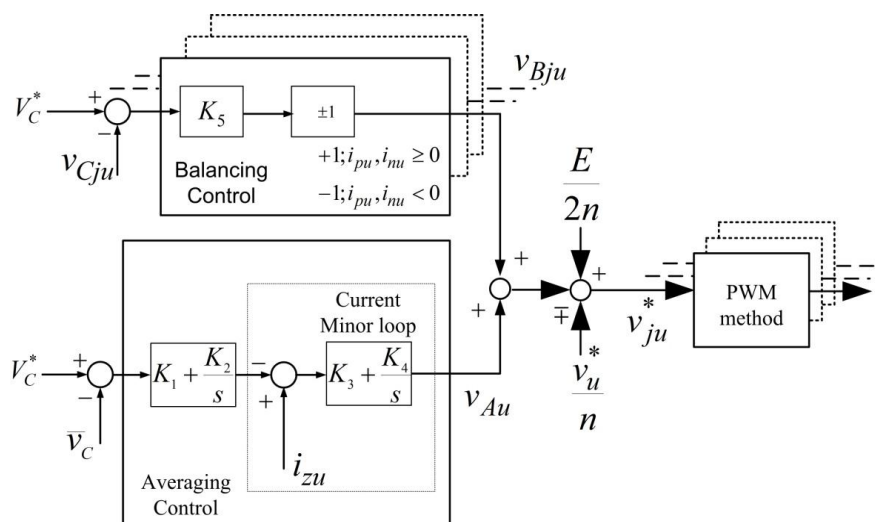
บทความ [6] ได้หาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ในเงื่อนไขต่างๆ โดยการวิเคราะห์ที่ได้อยู่บนพื้นฐานของการควบคุมแบบ State Redundant ซึ่งได้ข้อสรุปดังนี้

1. ขนาดค่ายอดของการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะแปรผกผันกับค่าดัชนีมอดูเลชัน (Modulation index)
2. แนวโน้มการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่ามากขึ้น ในย่านการทำงานที่มีค่าตัวประกอบกำลังน้อย
3. ค่ายอดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในแขนบนและแขนล่างจะมีค่าน้อยที่สุดในขณะที่คอนเวอร์เตอร์สร้างดันสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ เนื่องจากในกรณีดังกล่าวทุกโมดูลในแขนบนหรือแขนล่างจะไม่ทำงานทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุ การกระเพื่อมจึงเกิดขึ้นน้อย ในทางกลับกันค่ายอดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในแขนบนและแขนล่างจะมีค่ามากที่สุดในขณะที่คอนเวอร์เตอร์สร้างดันศูนย์

บทความข้างต้นได้แสดงให้เห็นถึงการกระเพื่อมของตัวเก็บประจุในเงื่อนไขการทำงานต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามทางผู้วิจัยก็ได้บอกถึงผลของฮาร์มอนิกสองในกระแสไหลวนที่มีต่อการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแต่อย่างใด

### 1.3.3 การควบคุมผ่านวงรอบควบคุมค่าแรงดันเฉลี่ยและแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละโมดูล

บทความ [2] เสนอการควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านแรงดันคำสั่งซึ่งประกอบด้วยแรงดันคำสั่งสำหรับควบคุมแรงดันเฉลี่ย ( $V_{Au}$ ) และแรงดันคำสั่งสำหรับควบคุมสมดุลของแรงดันแต่ละโมดูล ( $V_{Bju}$ ) แผนภาพการควบคุมโดยรวมแสดงดังรูปที่ 4 แรงดันคำสั่งสำหรับควบคุมแรงดันเฉลี่ยมีหน้าที่รักษาค่าแรงดันเฉลี่ยของตัวเก็บประจุโดยรวมให้มีค่าเท่ากับค่าคำสั่งโดยควบคุมผ่านกระแสไหลวน และแรงดันคำสั่งสำหรับควบคุมสมดุลแรงดันแต่ละโมดูลมีหน้าที่ควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของแต่ละโมดูลให้เท่ากับค่าคำสั่งด้วยเช่นกัน



รูปที่ 1.5 แผนภาพการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ในบทความ [2]

การควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ได้ดี และในบทความต่อมาได้มีการอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ [7] และเสถียรภาพของการทำงาน [8] แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของวงรอบควบคุมทั้งสองอาจมีทิศทางที่ขัดแย้งกันเองในบางขณะ ทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมการทำงานลดลง และการควบคุมดังกล่าวมิได้กล่าวถึงผลของฮาร์มอนิกอันดับที่สองของกระแสไหลวนที่มีต่อการกระเพื่อมของตัวเก็บประจุแต่อย่างใด

#### 1.4 สรุปปัญหาและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

1.4.1 วิธีการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่ได้ถูกนำเสนอไปแล้ว สามารถควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ให้สร้างแรงดันขาออกตามต้องการได้ แต่ยังคงขาดการวิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุภายในโมดูลอย่างละเอียด ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งของคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้

1.4.2 จากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีบทความใดที่วิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกอันดับที่สองของกระแสไหลวนที่มีต่อการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

1.4.3 สำหรับการควบคุมการทำงานผ่านวงรอบควบคุมสมดุลงของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและค่าเฉลี่ยของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ อาจมีบางขณะที่คำสั่งที่ของแต่ละวงรอบมีผลหักล้างกันเอง ทำให้วงรอบควบคุมไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งผลเชื่อมร่วมของวงรอบควบคุมทั้งสองทำให้การออกแบบและการวิเคราะห์เสถียรภาพของการทำงานทำได้ยากยิ่งขึ้น

1.4.4 คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ถึงแม้จะมีข้อดีหลายอย่างดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น แต่โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ก็ประกอบไปด้วยสวิตช์ไวงานจำนวนมาก ทำให้ต้องการวงจรขับนำสวิตช์และแหล่งจ่ายพลังงานที่ต้องแยกโดดกันเยอะขึ้นตามจำนวนสวิตช์ อีกทั้งระบบควบคุมยังต้องการข้อมูลของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากทุกโมดูลมาคำนวณด้วย ทำให้ต้องมีวงจรตรวจวัดแรงดันเป็นจำนวนมากเช่นกัน เป็นเหตุให้คอนเวอร์เตอร์มีขนาดใหญ่และมีราคาแพงจากจำนวนอุปกรณ์ที่มากขึ้น ฉะนั้นคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์จึงไม่คุ้มค่ากับการใช้งานในระดับแรงดันต่ำ

## 1.5 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการวิเคราะห์พฤติกรรมการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุรวมทั้งออกแบบการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ โดยเน้นในเรื่องของการลดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ พร้อมทั้งวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงาน อีกทั้งยังได้นำเสนอวงจรขับนำสวิตช์และวงจรตรวจวัดแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแบบใหม่เพื่อเป็นการลดขนาด, ลดต้นทุนของคอนเวอร์เตอร์ และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ในระดับแรงดันต่ำต่อไป

## 1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.6.1 วิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุกับกระแสไหลวนในคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์

1.6.2 ออกแบบการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ โดยมีเป้าหมายในการลดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

1.6.3 หาเสถียรภาพการทำงานของการควบคุมที่นำเสนอ

1.6.4 ทดสอบแนวคิดทางทฤษฎีด้วยการจำลองผลการการทำงานและทดสอบกับระบบจริงในทางปฏิบัติ

## 1.7 วิธีการดำเนินการ

1.7.1 ศึกษาวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่มีมาในอดีต

1.7.2 วิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

1.7.3 ออกแบบวงรอบควบคุมโดยมีเป้าหมายในการลดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุพร้อมทั้งหาเสถียรภาพของวงรอบควบคุม



- 1.7.4 จำลองผลการทำงานเพื่อยืนยันแนวคิด
- 1.7.5 ออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ สร้างระบบทดสอบ เพื่อยืนยันแนวคิดในทางปฏิบัติจริง
- 1.7.6 เก็บข้อมูล ประเมินผล สรุปผล
- 1.7.7 เขียนวิทยานิพนธ์

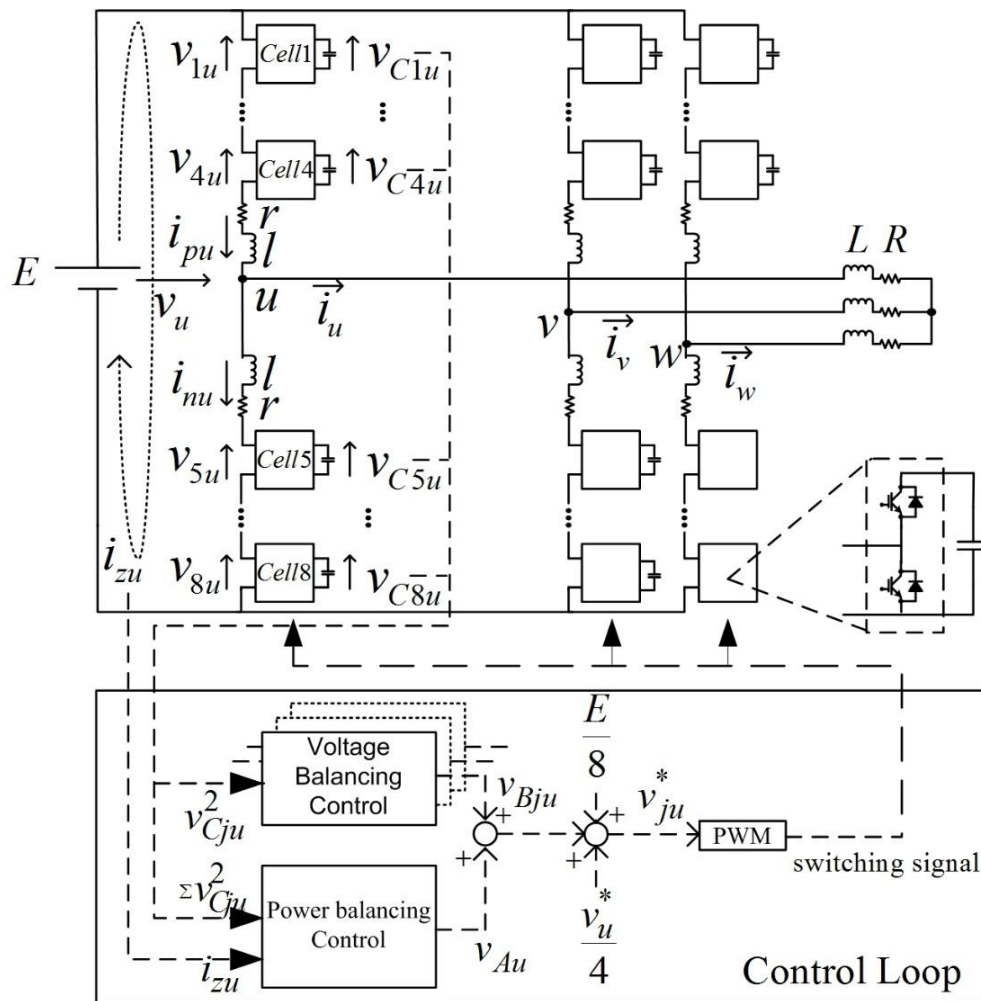
## 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.8.1 ทราบถึงพฤติกรรมการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ทำให้สามารถออกแบบการควบคุมการทำงานได้อย่างเหมาะสม
- 1.8.2 สามารถลดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุลงได้ ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์
- 1.8.3 เป็นแนวทางในการนำคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์มาประยุกต์ใช้ในระบบแรงดันต่ำ

บทที่ 2

สมมูลกำลังและการวิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

2.1 การทำงานพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์



รูปที่ 2.1 คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์และแผนภาพการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของวงจรคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์สามเฟส และแผนภาพการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ โดยในแต่ละเฟสของคอนเวอร์เตอร์ประกอบโมดูล จำนวนแปดโมดูลต่อกันกับตัวเหนี่ยวนำ  $l$  ที่มีความต้านทานภายในเท่ากับ  $r$  ภายในโมดูล

ประกอบด้วยสวิตช์ไวงานสองตัวและตัวเก็บประจุ การทำงานในแต่ละเฟสของคอนเวอร์เตอร์นั้นเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะเฟสของคอนเวอร์เตอร์เป็นหลัก

การควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแบบใหม่ของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วงรอบควบคุมสองชนิดได้แก่ วงรอบควบคุมสมดุลกำลัง/แรงดันเฉลี่ย (Power/Averaged voltage balancing control) และวงรอบควบคุมแรงดันในแต่ละโมดูล (Individual Voltage balancing control) โดยวงรอบควบคุมสมดุลกำลัง/แรงดันเฉลี่ย มีทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ให้เป็นไปตามสมดุลกำลังและควบคุมผลรวมของกำลังสองของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูลให้เท่ากับค่าคำสั่ง แรงดันควบคุมที่ได้จากวงรอบควบคุมนี้คือ  $v_{Au}$  สำหรับวงรอบควบคุมสมดุลแรงดันแต่ละโมดูลมีหน้าที่ควบคุมค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละโมดูลให้เท่ากับค่าคำสั่ง โดยผ่านทางแรงดันควบคุม  $v_{Bju}$  จากนั้นแรงดันควบคุมทั้งสองจะถูกนำไปรวมกับค่าแรงดันคำสั่งของแต่ละโมดูล ( $v_{ju}$ ) ซึ่งได้แสดงไว้ในสมการที่ (1.1)

$$\left. \begin{aligned} \text{upper arm: } v_{ju}^* &= v_{Au} + v_{Bju} - \frac{v_u^*}{4} + \frac{E}{8}; (j:1-4) \\ \text{lower arm: } v_{ju}^* &= v_{Au} + v_{Bju} + \frac{v_u^*}{4} + \frac{E}{8}; (j:5-8) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

แรงดันคำสั่งของแต่ละโมดูลจะถูกนำมาคูณกับค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุของโมดูลนั้นๆ หลังจากนั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะของแต่ละโมดูลซึ่งมีความถี่เท่ากัน แต่มีความเหลื่อมเฟส ( $\phi_j$ ) ต่างกันตามสมการที่ 2.2

$$\left. \begin{aligned} \text{upper arm: } \phi_j &= 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}; (j=1-4) \\ \text{lower arm: } \phi_j &= \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}; (j=5-8) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

หลังจากการมอดูเลตความกว้างพัลส์ สัญญาณขับนำสวิตช์ทั้งหมดจะถูกส่งเพื่อขับนำสวิตช์ไวงานในแต่ละโมดูล ทำให้คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่นำเสนอสามารถสร้างแรงดันในแต่ละเฟสได้ 9 ระดับ และแรงดันระหว่างสายได้ 17 ระดับ

## 2.2 สมดุลกำลังของคอนเวอร์เตอร์

พิจารณากำลัง ณ ขณะใดๆ ที่ไหลผ่านโมดูลแต่ละโมดูลในเฟสยู ( $p_{ju}$ ) จะได้ว่า

$$p_{ju} = \begin{cases} v_{ju} \cdot i_{pu}; & (j=1-4) \\ v_{ju} \cdot i_{nu}; & (j=5-8) \end{cases} \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาเทอมของกระแสที่ไหลผ่านแขนบนและแขนล่าง ( $i_{pu}, i_{nu}$ ) จะประกอบด้วยส่วนของกระแสไหลวน ( $i_{zu}$ ) และส่วนของกระแสไหลด ( $i_u$ ) โดยมีสมมุติฐานว่ากระแสไหลดจะแบ่งไหลในแขนบนและแขนล่างเท่าๆ กัน ฉะนั้นจะได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} i_{pu} &= i_z + \frac{i_u}{2} \\ i_{nu} &= i_z - \frac{i_u}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาเทอมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละโมดูลในสมการที่ (2.1) เทอมของแรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $v_{Bju}$  มีค่าน้อยกว่าเทอม  $\pm \frac{v_u^*}{4} + \frac{E}{8}$  มาก ดังนั้นจึงสามารถประมาณได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} \text{upper arm: } v_{ju}^* &\cong -\frac{v_u^*}{4} + \frac{E}{8}; & (j:1-4) \\ \text{lower arm: } v_{ju}^* &\cong +\frac{v_u^*}{4} + \frac{E}{8}; & (j:5-8) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

เมื่อแทนค่าเทอมของกระแสตามสมการที่ (2.4) และแรงดันตามสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.3) จะได้

$$\begin{aligned} \text{upper arm: } p_{ju} &\cong \left( -\frac{v_u^*}{4} + \frac{E}{8} \right) \left( i_{zu} + \frac{i_u}{2} \right); & (j:1-4) \\ &\cong \frac{E i_{zu}}{8} - \frac{v_u^* i_u}{8} + \underbrace{\frac{E i_u}{16} - \frac{v_u^* i_{zu}}{4}}_{P_{ac}}; & (2.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{lower arm: } p_{ju} &\cong \frac{E i_{zu}}{8} - \frac{v_u^* i_u}{8} - \underbrace{\left( \frac{E i_u}{16} - \frac{v_u^* i_{zu}}{4} \right)}_{P_{ac}}; & (j:5-8) \end{aligned} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.6) และ (2.7) จะเห็นได้ว่ากระแสไหลวน ( $i_{zu}$ ) จะนำกำลังจากแหล่งจ่ายไฟตรง ( $E$ ) เข้ามาอัดตัวเก็บประจุ ( $p_{in}$ ) และกำลังจะถูกถ่ายออกไปผ่านทางกระแสไหล (  $p_{out}$  ) แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงมีกำลังส่วนหนึ่งไหลวนระหว่างแกนบนและแกนล่าง ( $p_{ac}$ ) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุเกิดการกระเพื่อมอยู่ตลอดเวลา โดยการกระเพื่อมที่เกิดขึ้นจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันสำหรับตัวเก็บประจุในแกนเดียวกันและจะมีทิศทางที่ตรงข้ามกันสำหรับแกนบนและแกนล่าง

ด้วยสมมุติฐานว่าการที่คอนเวอร์เตอร์มีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมมูลกำลัง จะทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีการกระเพื่อมน้อยที่สุด เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$P_{in} = P_{out} \quad (2.8)$$

$$\therefore E \cdot i_{zu} = v_u \cdot i_u \quad (2.9)$$

ในสถานะอยู่ตัวคอนเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันขาออกได้ตามแรงดันคำสั่งซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ ฉะนั้นกระแสและแรงดันขาออกสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} v_u &\cong v_u^* = \sqrt{2}V \sin(\omega t) & i_u &= \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi) \\ v_v &\cong v_v^* = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \text{และ} & i_v = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3}) \\ v_w &\cong v_w^* = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}) & i_w &= \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi + \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $V$ ,  $I$  คือค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันและกระแสขาออกตามลำดับ และหลังจากแทนค่าค่าสมการ (2.10) ลงใน (2.9) จะได้สมการของกระแสไหลวนของทั้งสามเฟสดังนี้

$$\left. \begin{aligned} i_{zu} &= \frac{V \cdot I}{E} [\cos \phi - \cos(2\omega t + \phi)] \\ i_{zv} &= \frac{V \cdot I}{E} [\cos \phi - \cos(2\omega t + \phi + \frac{4\pi}{3})] \\ i_{zw} &= \frac{V \cdot I}{E} [\cos \phi - \cos(2\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3})] \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

จะเห็นได้ว่าการที่คอนเวอร์เตอร์มีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมมูลกำลังโดยสมบูรณ์ กระแสไหลวนจำเป็นจะต้องประกอบด้วยส่วนของไฟกระแสตรงและส่วนของฮาร์มอนิกอันดับที่สองโดยกระแสไหลวนจะมีลักษณะการไหลตามลำดับเฟสลบ

### 2.3 การวิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ

การคำนวณแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ( $v_{Cju}$ ) สามารถคำนวณได้จากกำลัง ณ ขณะใดๆ ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูล ( $p_{ju}$ ) จากความสัมพันธ์

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C v_{Cju}^2 \right) = p_{ju} \quad (2.12)$$

ในส่วนของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะประกอบไปด้วยส่วนของแรงดันไฟตรงและส่วนของแรงดันกระเพื่อมฉะนั้นจึงสามารถเขียนได้เป็น

$$v_c = V_c + \tilde{v}_c \quad (2.13)$$

เมื่อแทนค่า (11) ลงใน (12) จะได้

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} C V_c^2 + C V_c \tilde{v}_c + \frac{1}{2} C \tilde{v}_c^2 \right] = p_{ju} \quad (2.14)$$

โดยปกติแล้วขนาดของการกระเพื่อม ( $\tilde{v}_c$ ) จะมีค่าน้อยกว่าขนาดของแรงดันไฟตรง ( $V_c$ ) มากฉะนั้นสมการ (2.14) จึงประมาณได้เป็น

$$C V_c \frac{d\tilde{v}_{Cju}}{dt} \cong p_{ju} \quad (2.15)$$

จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.15) จะเห็นว่าเราสามารถหาขนาดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ( $\tilde{v}_c$ ) ได้จากกำลังที่ไหลผ่านในแต่ละโมดูล จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) จะเห็นว่าการคำนวณกำลังที่ไหลผ่านในแต่ละโมดูลจำเป็นต้องใช้เทอมของกระแสไหลวนตามสมการที่ (2.11) ด้วย ฉะนั้นเพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่ากระแสไหลวนที่มีส่วนประกอบของฮาร์มอนิกที่สอง ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมมูลกำลัง จะทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุภายในโมดูลมีค่าน้อยที่สุด จึงเขียนสมการกระแสไหลวนสำหรับเฟสยู ตามสมการที่ (2.11) ใหม่ดังนี้

$$i_{zu} = \frac{V \cdot I}{E} [\cos \phi - k \cdot \cos(2\omega t - \phi)] \quad (2.16)$$

เมื่อ ค่า  $k$  คือ สัมประสิทธิ์ของขนาดฮาร์มอนิกอันดับที่สองในกระแสไหลวน โดยที่  $0 \leq k \leq 1$

จากค่ากระแสไหลวนในสมการที่ (2.16) จะสามารถคำนวณค่าการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้ดังนี้

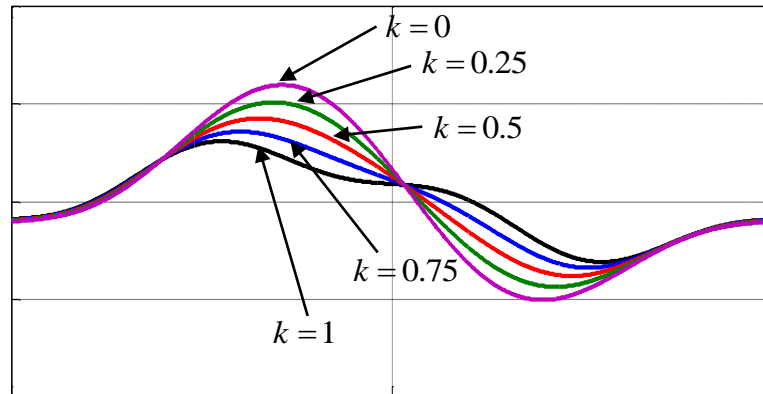
$$\tilde{v}_{C1u} = \frac{I}{CV_c\omega} \left[ \frac{\sqrt{2}V^2}{4E} \cos\phi \cos(\omega t) - \frac{\sqrt{2}}{16E} (E^2 - 2kV^2) \cos(\omega t - \phi) + \frac{V}{16} (1-k) \sin(2\omega t - \phi) - \frac{\sqrt{2}kV^2}{24E} \cos(3\omega t - \phi) \right] \quad (2.17)$$

หากกำหนดให้  $E \cong 2\sqrt{2}V$  สมการข้างต้นสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

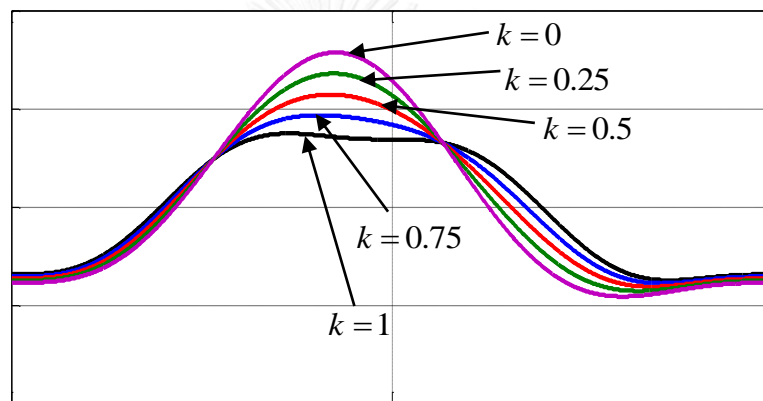
$$\tilde{v}_{C1u} = \frac{IV}{CV_c\omega} \left[ \frac{1}{8} \cos\phi \cos(\omega t) - \frac{1}{16} (4-k) \cos(\omega t - \phi) + \frac{1}{16} (1-k) \sin(2\omega t - \phi) - \frac{k}{48} \cos(3\omega t - \phi) \right] \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) สามารถสรุปได้ว่า

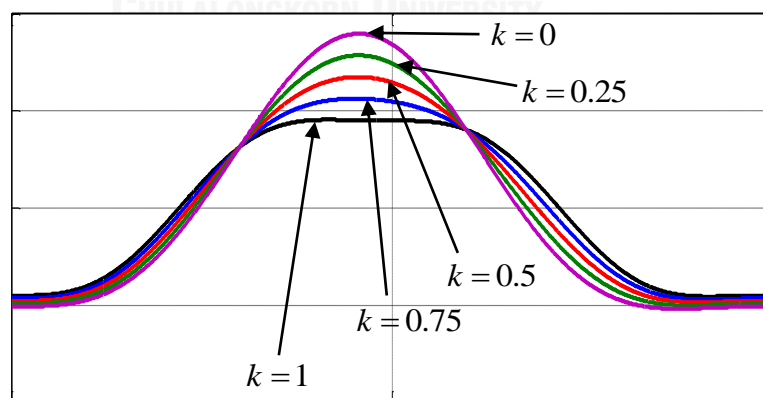
- 1) ค่ายอดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะแปรผันตรงกับค่า RMS ของกระแสไหล แต่จะแปรผกผันกับค่าความจุของตัวเก็บประจุและค่าความถี่ขาออก
- 2) ค่าตัวประกอบกำลังของโหลดมีผลต่อการกระเพื่อมของตัวเก็บประจุ โดยถ้าค่าตัวประกอบกำลังน้อย ค่ายอดการกระเพื่อมของแรงดันจะมีแนวโน้มในทางที่มากขึ้น
- 3) ค่ายอดการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ  $k = 0$  และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ  $k = 1$  ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากระแสไหลวนที่ประกอบด้วยฮาร์มอนิกอันดับที่สองตามหลักสมมูลกำลัง จะทำให้การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.2 (ก) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ค่า  $k$  ต่างๆ สำหรับค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1



รูปที่ 2.2 (ข) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ค่า  $k$  ต่างๆ สำหรับค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.75



รูปที่ 2.2 (ค) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่ค่า  $k$  ต่างๆ สำหรับค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.5

รูปที่ 2.2 การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุตามสมการที่ 2.18 ที่ค่า  $k$  และค่าตัวประกอบกำลังต่างๆ

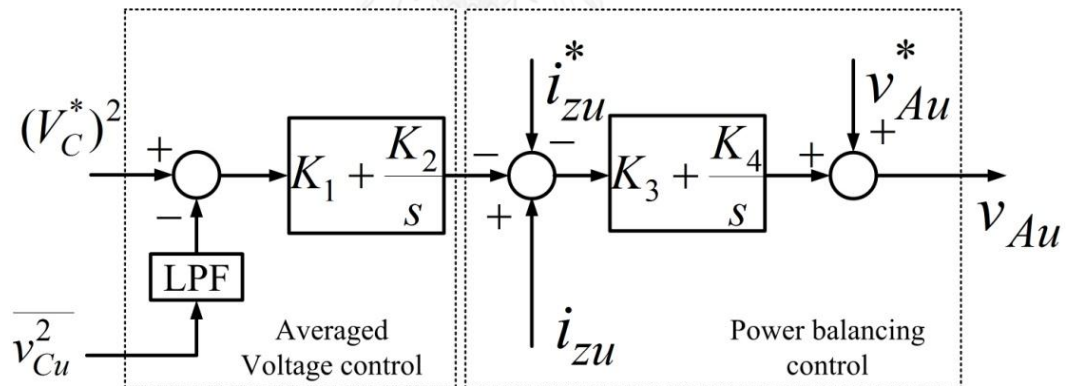


### บทที่ 3

#### วงรอบควบคุมการทำงานและผลการจำลองการทำงาน

ในเนื้อหาในบทที่สองได้แสดงให้เห็นว่า การที่กระแสไหลวนมีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมดุลกำลังจะทำให้การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อยที่สุด ฉะนั้นเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ โดยเป้าหมายของการควบคุม คือ การควบคุมกระแสไหลวนภายในคอนเวอร์เตอร์ให้เป็นไปตามกระแสไหลวนในอุดมคติตามสมการที่ (2.11) เพื่อให้การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุภายในโมดูลมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวงรอบควบคุมการทำงานสองวงรอบ ได้แก่ วงรอบควบคุมสมดุลกำลัง/แรงดันเฉลี่ย (Power Balancing/Averaged voltage balancing Control) และวงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล (Individual voltage balancing control) โดยในแต่ละวงรอบควบคุมมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 วงรอบควบคุมกำลังและแรงดันเฉลี่ย



รูปที่ 3.1 วงรอบควบคุมสมดุลกำลังและแรงดันเฉลี่ย

รูปที่ 3.1 แสดงวงรอบควบคุมสมดุลกำลังและแรงดันเฉลี่ย โดยวงรอบควบคุมนี้จะควบคุมกระแสไหลวนให้เป็นไปตามหลักสมดุลกำลัง รวมทั้งควบคุมค่าเฉลี่ยของกำลังสองของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูลให้มีค่าเท่ากับค่าคำสั่ง โดยผ่านแรงดันควบคุม  $v_A$  สำหรับวงรอบควบคุมนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

### 3.1.1 วงรอบควบคุมสมดุลกำลัง (Power balance control)

วงรอบควบคุมสมดุลกำลังมีหน้าที่ควบคุมกระแสไหลวน ( $i_z$ ) ให้มีค่าเป็นไปตามค่าคำสั่ง ( $i_z^*$ ) ตามสมการที่ (2.11) โดยผ่านตัวชดเชยแบบ PI ผ่านทางแรงดันควบคุม  $v_A$  สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไหลวนกับแรงดันควบคุม  $v_A$  สามารถพิจารณาได้ดังนี้

จากรูปที่ 2.1 สามารถเขียนสมการแรงดันของเคอร์เซอร์ไฟได้

$$E = \sum_{j=1}^4 v_{ju} + \sum_{j=5}^8 v_{ju} + 2 \left( r + l \frac{d}{dt} \right) i_{zu} \quad (3.1)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.1) ใน (3.1) จะได้

$$\left( l \frac{d}{dt} + r \right) i_{zu} = -4v_{Au} - \sum_{j=1}^8 v_{Bju} \quad (3.2)$$

หากกำหนดให้  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju} \equiv 0$  จะทำให้สมการที่ (3.2) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\left( l \frac{d}{dt} + r \right) i_{zu} = -4v_{Au} \quad (3.3)$$

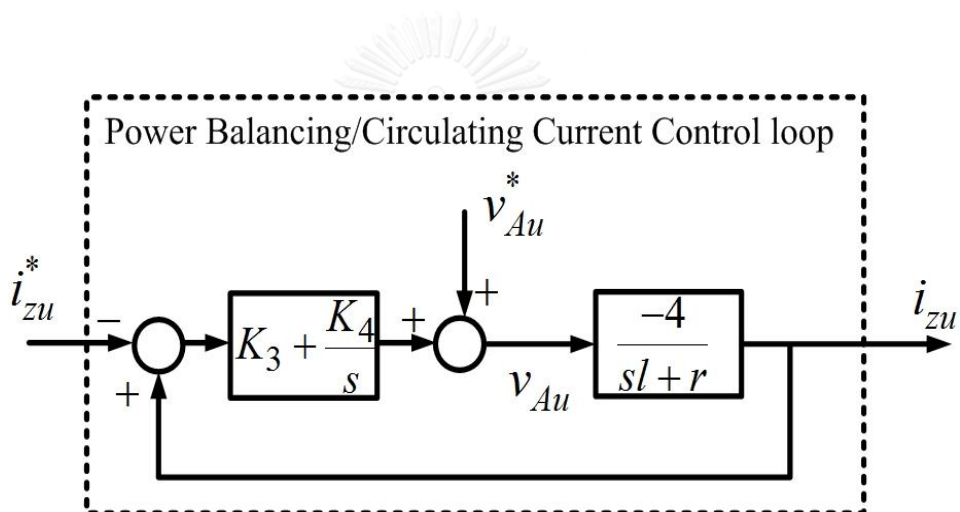
จากสมการ (3.3) จะเห็นได้ว่าหากมีการทำให้  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju} \equiv 0$  ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในส่วนของ

วงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล จะทำให้กระแสไหลวนมีความสัมพันธ์ขึ้นกับแรงดันควบคุม  $v_A$  เท่านั้น ฉะนั้นวงรอบควบคุมกำลังจึงสามารถควบคุมกระแสไหลวนได้โดยไม่มีผลกระทบจากวงรอบควบคุมอื่น แต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่ากระแสไหลวนคำสั่งตามสมการ (2.11) ประกอบไปด้วยส่วนของไฟฟ้ากระแสตรงและส่วนของฮาร์มอนิกอันดับที่สอง ฉะนั้นตัวชดเชยแบบ PI ของวงรอบควบคุมสมดุลกำลังจึงจำเป็นต้องมีค่าเวลาตอบสนอง (Response time) ที่ไว เพื่อให้กระแสไหลวนภายในวงจรสามารถติดตามองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่สองของค่าคำสั่งได้ทัน

อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติของตัวชดเชยแบบ PI ที่ไม่สามารถติดตามค่าสัญญาณไซน์ได้โดยสมบูรณ์ ฉะนั้นจึงต้องมีค่าสั่งแรงดันป้อนไปข้างหน้า (feed-forward voltage :  $v_A^*$ ) เพื่อเป็นการลดภาระของตัวชดเชยแบบ PI ในวงรอบควบคุมสมดุลกำลังและช่วยเพื่อประสิทธิภาพของการควบคุม โดยสามารถหาค่าแรงดันป้อนไปข้างหน้าดังกล่าวได้จากการแทนค่ากระแสไหลวนในอุดมคติ

ตามสมการที่ (2.11) ลงในสมการ (3.3) สุดท้ายจะได้ค่าแรงดันคำสั่งป้อนไปข้างหน้าของทั้งสามเฟส ดังแสดงตามสมการที่ (3.4)

$$\begin{aligned}
 v_{Au}^* &= \left[ -\frac{1}{4} \left( r + l \frac{d}{dt} \right) \right] \left[ \frac{VI}{E} (\cos \phi - \cos(2\omega t + \phi)) \right] \\
 &= \frac{VI}{4E} [-r \cos \phi - 2\omega l \sin(2\omega t + \phi) + r \cos(2\omega t + \phi)] \\
 v_{Av}^* &= \frac{VI}{4E} [-r \cos \phi - 2\omega l \sin(2\omega t + \phi + \frac{4\pi}{3}) + r \cos(2\omega t + \phi + \frac{4\pi}{3})] \\
 v_{Aw}^* &= \frac{VI}{4E} [-r \cos \phi - 2\omega l \sin(2\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3}) + r \cos(2\omega t + \phi + \frac{2\pi}{3})]
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

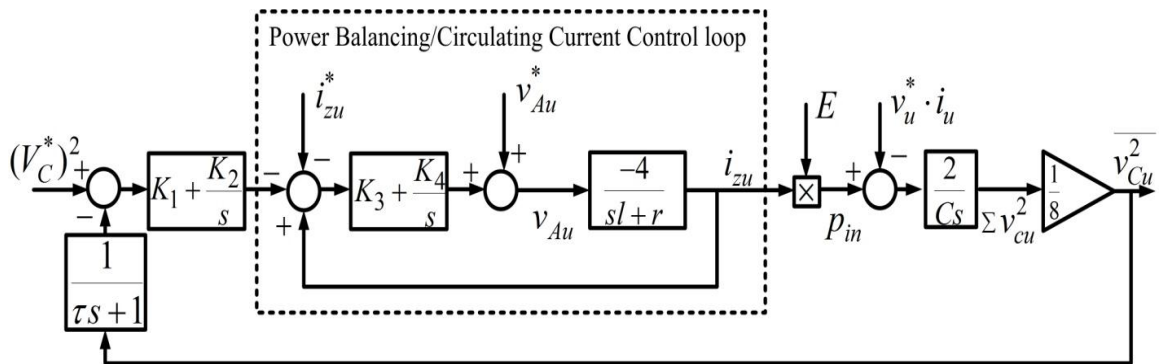


รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบควบคุมสมดุลกำลัง

### 3.1.2 วงรอบควบคุมแรงดันเฉลี่ย ( Averaged Voltage Control )

สำหรับวงรอบควบคุมแรงดันเฉลี่ย (Averaged Voltage Control) มีหน้าที่ควบคุมผลรวมกำลังสองของค่าแรงดันไฟตรงคร่อมตัวเก็บประจุรวมทุกโมดูล ( $\sum_{j=1}^8 v_{Cu}^2$ ) ให้มีค่าเท่ากับค่าคำสั่ง  $8(V_C^*)^2$  โดยผ่านตัวชดเชยแบบ PI ซึ่งการควบคุมผลรวมกำลังสองแทนการควบคุมค่าผลรวมแรงดันโดยตรงนั้น จะทำให้วงรอบควบคุมดังกล่าวมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและการวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงาน อีกทั้งการป้อนกลับของวงรอบควบคุมนี้จะผ่านตัวกรองผ่านต่ำ (Low pass filter) เนื่องจากสมมติฐานที่ว่า ถ้าวงรอบควบคุมแรงดันเฉลี่ยสามารถทำงานได้โดยสมบูรณ์ในสถานะอยู่ตัว ค่าไฟตรงของ  $8(V_C^*)^2$  จะมีค่าเท่ากับค่าคำสั่ง  $\sum_{j=1}^8 v_{Cu}^2$  ซึ่งทำให้ผลกระทบจากการการควบคุม

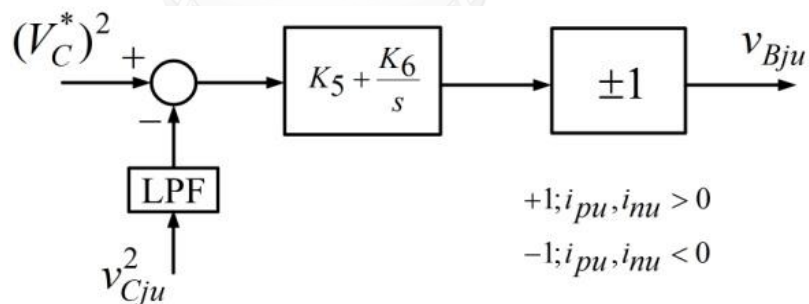
ผลรวมกำลังสองของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูลที่มีผลต่อวงรอบควบคุมสมดุลกำลังน้อยลง สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบควบคุมดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบควบคุมกำลัง/แรงดันเฉลี่ย

### 3.2 วงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล (Individual voltage balancing control)

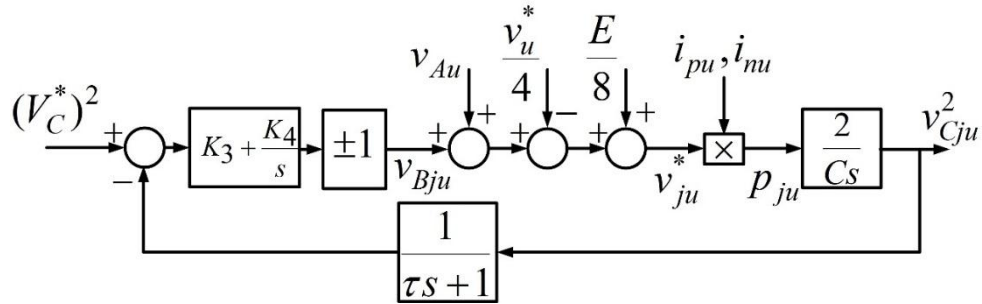
นอกจากการควบคุมการให้คอนเวอร์เตอร์มีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมดุลกำลังแล้ว การควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกตัวให้มีค่าเท่ากันและเท่ากับค่าคำสั่งก็เป็นสิ่งจำเป็น ฉะนั้นในทุกโมดูลจึงมีวงรอบควบคุมแรงดันแยกอิสระเป็นของตัวเอง โดยวงรอบควบคุมดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล

โดยวงรอบควบคุมนี้มีหน้าที่ควบคุมกำลังสองของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละโมดูล ( $v_{Cju}^2$ ) ให้เป็นไปตามค่าคำสั่ง ( $V_C^2$ ) ด้วยตัวชดเชยแบบ PI ซึ่งการทำงานของวงรอบควบคุมนี้จะขึ้นอยู่กับทิศทางของกระแสที่ไหลในแต่ละแขน ( $i_{pu}, i_{nu}$ ) ด้วย สำหรับในส่วนของการป้อนกลับค่าแรงดันกำลังสองจะผ่านตัวกรองผ่านต่ำเนื่องจากวงรอบควบคุมนี้จะควบคุมเฉพาะส่วนของค่าแรงดันไฟตรงเท่านั้น และจากสมการที่ (2.12) จะเห็นว่า  $v_{Cju}^2$  กับ  $p_{ju}$  มีความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้น ดังนั้นจึงเป็น

เหตุผลที่วงรอบควบคุมนี้ควบคุมค่ากำลังสองของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแทนค่าแรงดันโดยตรง จากสมบัติความเป็นเชิงเส้นทำให้วงรอบควบคุมนี้ง่ายต่อการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพการทำงาน ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบควบคุมนี้แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบควบคุมสมดุลของแรงดันแต่ละโมดูล

สำหรับผลรวมของแรงดันคำสั่งจากวงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล ( $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}^*$ ) แสดงได้ดังสมการที่ (3.5)

$$\sum_{j=1}^8 v_{Bju}^* = \left[ K_5 + \frac{K_6}{s} \right] \left[ \mp \sum_{j=1}^4 ((v_C^*)^2 - (\bar{v}_{Cj})^2) \pm \sum_{j=5}^8 ((v_C^*)^2 - (\bar{v}_{Cj})^2) \right] \quad (3.5)$$

$$\sum_{j=1}^8 v_{Bju}^* = \left[ K_5 + \frac{K_6}{s} \right] \left[ \mp \sum_{j=1}^4 \bar{v}_{Cj}^2 \pm \sum_{j=5}^8 \bar{v}_{Cj}^2 \right] \quad (3.6)$$

บนสมมติฐานว่า ในสถานะอยู่ตัววงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูลทุกวงรอบสามารถทำงานได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นค่าแรงดันไฟตรงคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูลจะมีค่าเท่ากับคำสั่ง  $\bar{v}_{Cju}^2 = V_C^2$  และโดยทั่วไปเครื่องหมายของกระแสที่ไหลในแขนบนและแขนล่างจะตรงกันข้ามกันเสมอ เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (3.6) จะได้ว่า  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}^* \equiv 0$  ซึ่งทำให้การทำงานของวงรอบควบคุมแรงดันแยกแต่ละโมดูลไม่ส่งผลกระทบต่อวงรอบควบคุมสมดุลกำลัง/แรงดันเฉลี่ย

### 3.3 เสถียรภาพของการทำงาน

#### 3.3.1 เสถียรภาพของวงรอบควบคุมกำลัง/แรงดันเฉลี่ย

จากรูปที่ 3.2 สำหรับวงรอบควบคุมกำลัง สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดของวงรอบควบคุมกระแสไหลวนได้ดังนี้

$$\frac{i_{zu}}{i_{zu}^*} = \frac{4(K_3s + K_4)}{ls^2 + (r + 4K_3)s + 4K_4} \quad (3.7)$$

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีของ Routh – Hurwitz วงรอบควบคุมกำลังจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ  $K_3, K_4 > 0$

เนื่องจากคำสั่งของกระแสไหลวนมีฮาร์มอนิกอันดับที่สอง เพราะฉะนั้นตัวชดเชยแบบ PI สำหรับวงรอบควบคุมนี้ควรมีอัตราขยายที่สูงเพื่อที่จะสามารถติดตามฮาร์มอนิกอันดับที่สองให้ได้มากที่สุด เป็นผลทำให้เวลาตอบสนองของวงรอบควบคุมนี้รวดเร็วกว่าวงรอบควบคุมแรงดันเฉลี่ยที่ไม่ต้องการเวลาตอบสนองที่ไว ดังนั้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงรอบควบคุมแรงดันเฉลี่ยซึ่งเป็นวงรอบนอกสุด จะสามารถประมาณวงรอบควบคุมกำลังได้เสมือนอัตราขยายที่มีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะฉะนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบควบคุมแรงดันเฉลี่ยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\bar{v}_C^2}{(V_C^*)^2} = \frac{E[K_1\tau s^2 + (K_1 + K_2\tau)s + K_2]}{4C\tau s^3 + 4Cs^2 + K_1Es + K_2E} \quad (3.8)$$

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีของ Routh – Hurwitz วงรอบควบคุมแรงดันเฉลี่ยจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ  $K_1 / K_2 > \tau$

### 3.3.2 เสถียรภาพของวงรอบควบคุมสมดุลแรงดันแต่ละโหมดูล

จากรูปที่ 3.5 สำหรับวงรอบควบคุมสมดุลแรงดันแยกแต่ละโหมดูลสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดได้โดยไม่ต้องคิดผลจาก  $v_{Au}$  เพราะมีการแยกการเชื่อมร่วมดังนี้

$$\frac{v_{Cju}^2}{(V_C^*)^2} = \frac{2i_{pu,nu}[K_5\tau s^2 + (K_5 + K_6\tau)s + K_6]}{C\tau s^3 + Cs^2 + 2i_{pu,nu}K_5s + 2i_{pu,nu}K_6} \quad (3.9)$$

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีของ Routh – Hurwitz วงรอบควบคุมสมดุลแรงดันแต่ละโหมดูลจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ  $K_5 / K_6 > \tau$

สรุปเงื่อนไขเสถียรภาพของการควบคุมได้ดังนี้คือ

$$\left. \begin{array}{l} K_1 / K_2 > \tau \\ K_3, K_4 > 0 \\ K_5 / K_6 > \tau \end{array} \right\} \quad (3.10)$$

### 3.4 ผลการจำลองการทำงาน

เพื่อเป็นการยืนยันการทำงานของวงรอบควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ว่าสามารถควบคุมกระแสไหลวนให้มอดูลประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่สองได้ตามค่าคำสั่ง เป็นผลทำให้การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุลดลง จึงได้มีการจำลองผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ตามเงื่อนไขต่างๆ ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่ใช้ในการจำลองผลการทำงาน ตารางที่ 3.2 แสดงค่าอัตราขยายของวงรอบควบคุมที่ใช้ในการจำลองผลการทำงาน และตารางที่ 3.3 แสดงจุดประสงค์และเงื่อนไขของการจำลองผลการทำงาน

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่ใช้ในการจำลอง

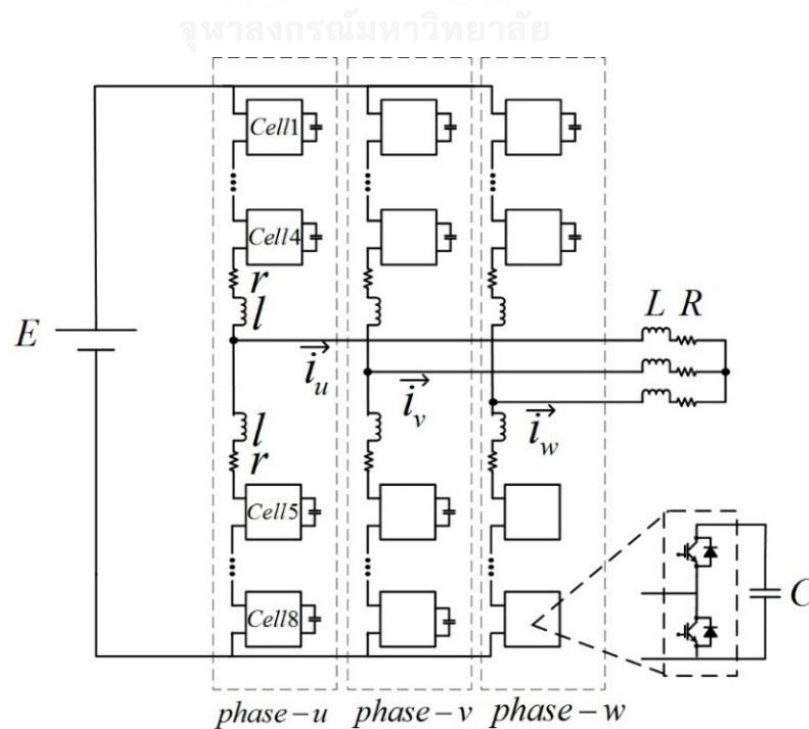
|                                       |                               |   |
|---------------------------------------|-------------------------------|---|
| แหล่งจ่ายไฟตรง                        | $E$                           | 540V  |
| แรงดันคำสั่งทั้งสามเฟส                | $v_u^*$<br>$v_v^*$<br>$v_w^*$ | $V \sin(2\pi ft)$<br>$V \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{3})$<br>$V \sin(2\pi ft + \frac{4\pi}{3})$ |
| แรงดันคำสั่งของตัวเก็บประจุ           | $v_C^*$                       | 135V  |
| ความถี่การสวิตช์                      | $f_c$                         | 2kHz  |
| ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานในแขนบน,ล่าง | $l, r$                        | 12mH, 1Ω  |
| ค่าความจุของตัวเก็บประจุภายในโมดูล    | $C$                           | 560μF   |

ตารางที่ 3.2 อัตราการขยายของวงรอบควบคุมที่ใช้ในการจำลองผลการทำงาน

|                     |                     |       |       |                     |                     |
|---------------------|---------------------|-------|-------|---------------------|---------------------|
| $K_1$               | $K_2$               | $K_3$ | $K_4$ | $K_5$               | $K_6$               |
| $20 \times 10^{-4}$ | $20 \times 10^{-4}$ | 5     | 125   | $10 \times 10^{-4}$ | $10 \times 10^{-4}$ |

ตารางที่ 3.3 จุดประสงค์และเงื่อนไขการจำลองผลการทำงาน

| จุดประสงค์การทดลอง |   | เงื่อนไขการจำลองการ |              |  |
|--------------------|---|---------------------|--------------|--|
|                    |   | แรงดันเฟสขาออก      | ความถี่ขาออก | โหลด   |
| 1                  | แสดงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอเมื่อ <ul style="list-style-type: none"> <li>● เปลี่ยนความถี่ขาออก</li> <li>● เปลี่ยนค่าแรงดันค่าออก</li> <li>● เปลี่ยนตัวประกอบกำลัง</li> </ul> | 162 V               | 50Hz         | <i>Series RL</i><br>$R = 40\Omega$<br>$L = 16.3mH$ |
|                    |   | 162 V               | 75Hz         |  |
|                    |   | 162 V               | 35Hz         |  |
|                    |   | 84.85 V             | 50Hz         |  |
|                    |   | 162 V               | 50Hz         | <i>Series RL</i><br>$R = 25\Omega$<br>$L = 100mH$  |
| 2                  | แสดงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์โดยไม่มีการควบคุมกระแสไหลวน   | 162 V               | 50Hz         | <i>Series RL</i><br>$R = 40\Omega$<br>$L = 16.3mH$ |



รูปที่ 3.6 คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่ใช้ในการจำลองผลการทำงาน



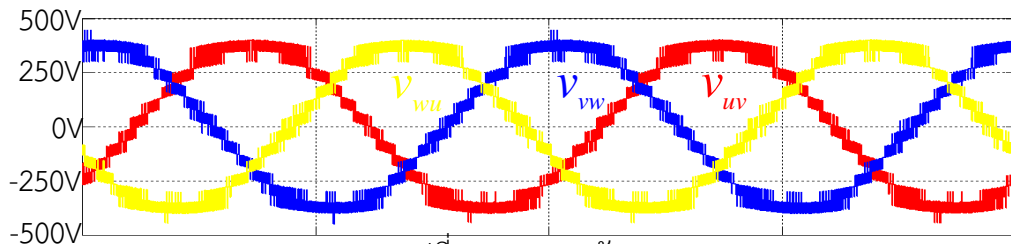
### 3.4.1 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยวงรอบควบคุมที่นำเสนอ

รูปที่ 3.7 แสดงผลการจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยวิธีการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ จากการเปรียบเทียบคำสั่งแรงดันของแต่ละโมดูลกับคลื่นพาหะเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ โดยคลื่นพาหะของแต่ละโมดูลมีความถี่การสวิตช์เท่ากันและมีความถี่ล้าเฟสตามสมการที่ 2.2 เป็นผลทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันระหว่างเฟสได้ 17 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) ทำให้กระแสในแต่ละเฟสเป็นรูปคลื่นไซน์ ถึงแม้วงจรโหลดจะมีความเหนี่ยวนำไม่มากนัก ดังแสดงในรูป 3.7 (ข)

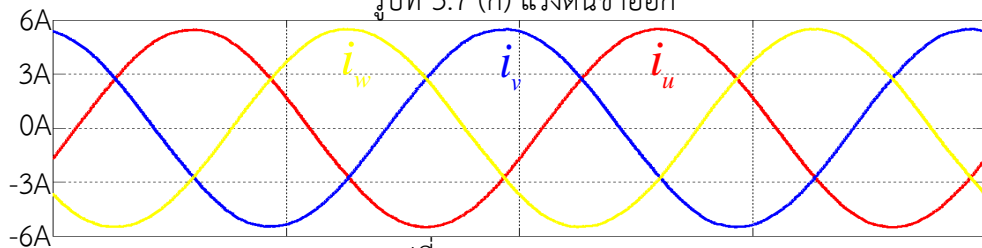
รูปที่ 3.7 (ค) แสดงกระแสที่ไหลในแขนบนและแขนล่างของเฟสยู จะเห็นว่ากระแสทั้งสองมีทิศทางการไหลที่ตรงข้ามกันเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแขนบนและล่าง และเป็นการยืนยันคำอธิบายของสมการที่ 2.6 และ 2.7 ได้เป็นอย่างดี

จากการออกแบบการอัตราขยายของวงรอบควบคุมกระแสไหลวนให้ให้มีเวลาตอบสนองรวดเร็วดังแสดงในตารางที่ 4 ผนวกกับคำสั่งแรงดันป้อนไปข้างหน้าตามสมการที่ 3.4 ทำให้เกิดองค์ประกอบของ ฮาร์มอนิกอันดับที่สองของกระแสไหลวนภายในวงจร และค่ากระแสไหลวนดังกล่าวยังมีค่าใกล้เคียงกับค่าคำสั่งดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ง) จึงกล่าวได้ว่าคอนเวอร์เตอร์ได้ประพฤติดัวเป็นไปตามหลักสมดุลกำลัง โดยแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูลแกว่งรอบค่าคำสั่ง 135V และมีความยออดของการกระเพื่อมเท่ากับ  $8V_{p-p}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (จ)

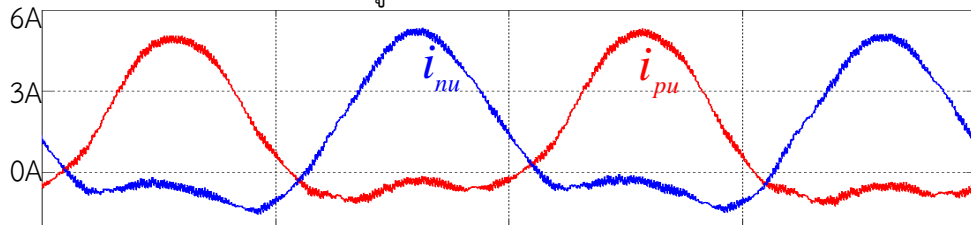
รูปที่ 3.7 (ฉ) แสดงค่าแรงดันคำสั่งของวงรอบควบคุมกำลัง/แรงดันเฉลี่ย ( $v_{Au}$ ) และผลรวมแรงดันคำสั่งของวงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล ( $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$ ) ของเฟสยู โดยแรงดันคำสั่งของวงรอบควบคุมกำลัง/แรงดันเฉลี่ย ประกอบด้วยฮาร์มอนิกอันดับที่สองเพื่อสร้างฮาร์มอนิกที่สองในกระแสไหลวน และจากการป้อนกลับค่าแรงดันกำลังสองผ่านตัวกรองผ่านต่ำทำให้ค่าของ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  มีค่าน้อยกว่า  $v_{Au}$  มาก วงรอบควบคุมสมดุลกำลัง/แรงดันเฉลี่ยจึงสามารถทำงานได้โดยไม่มีผลกระทบจากการทำงานของวงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล ซึ่งเป็นการยืนยันแนวคิดของการทำงานของวงรอบทั้งสองโดยไม่มีผลของการเชื่อมร่วมซึ่งกันและกันได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าค่าของ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  จะมีค่ามากในบางช่วงเวลา โดยเป็นผลมาจากการที่ทิศทางการไหลในแขนบนและล่างมีทิศเดียวกันในช่วงเวลานั้นๆ ทำให้แรงดันควบคุมของแต่ละโมดูลไม่สามารถหักล้างกันได้ตามคำอธิบายของสมการที่ 3.6 แต่ผลกระทบดังกล่าวก็เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และไม่ส่งผลกระทบต่อวงรอบควบคุมสมดุลกำลัง/แรงดันเฉลี่ย มากจนเกินไป



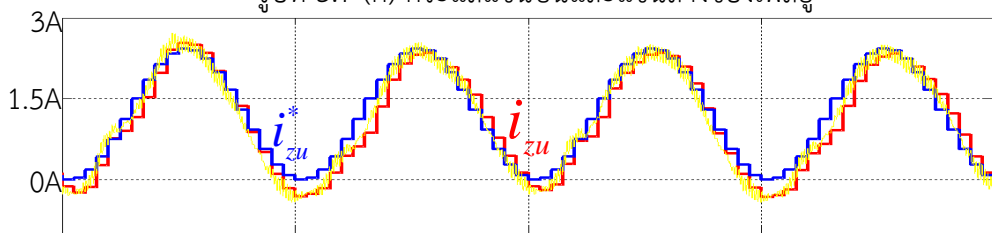
รูปที่ 3.7 (ก) แรงดันขาออก



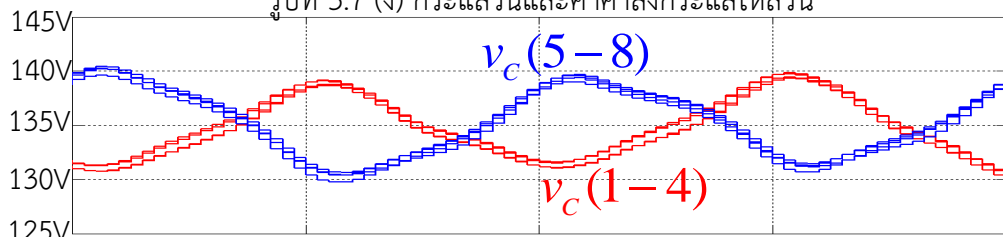
รูปที่ 3.7 (ข) กระแสขาออก



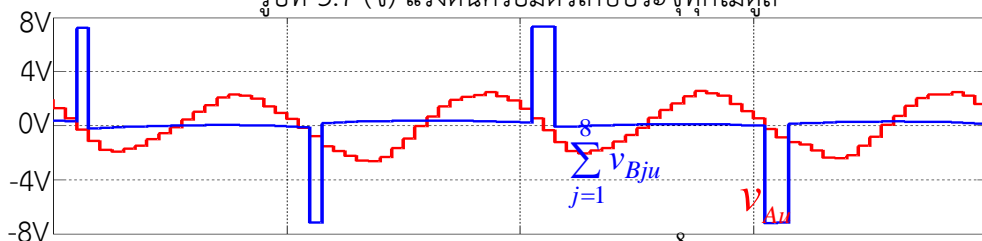
รูปที่ 3.7 (ค) กระแสแขนบนและแขนล่างของเฟสยู



รูปที่ 3.7 (ง) กระแสส่วนและค่าคำสั่งกระแสไหลวน



รูปที่ 3.7 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูล



รูปที่ 3.7 (ฉ) แรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  10ms/div

รูปที่ 3.7 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอ

### 3.4.2 การควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยวงรอบควบคุมที่นำเสนอเมื่อเปลี่ยนความถี่ขาออก

รูปที่ 3.8 และ 3.9 แสดงผลการจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ โดยเปลี่ยนความถี่ของค่าแรงดันคำสั่งขาออกเป็น 75Hz (รูปที่ 3.8) และ 35Hz (รูปที่ 3.9) ตามลำดับ รูปที่ 3.8 (ก),(ข) และ 3.9 (ก),(ข) แสดงแรงดันระหว่างเฟสขาออกและกระแสขาออกของคอนเวอร์เตอร์ จะเห็นว่าการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์สามารถทำให้คอนเวอร์เตอร์สร้างค่าแรงดันและกระแสขาออกที่มีความถี่ตรงกับค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี

รูปที่ 3.8 (ค) และ 3.9 (ค) แสดงกระแสที่ไหลในแขนบนและล่างของเฟสยู สำหรับการงานที่ความถี่ขาออก 75Hz และ 35Hz ตามลำดับ จะเห็นว่าถึงแม้ความถี่ขาออกจะเปลี่ยนไปแต่ทิศทางการไหลของกระแสทั้งสองโดยภาพรวมแล้วยังมีทิศทางที่ตรงข้ามกันเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแขนบนและล่าง

รูปที่ 3.8 (ง) และ 3.9 (ง) แสดงกระแสไหลวนและกระแสไหลวนคำสั่งของการทำงานที่ความถี่ขาออก 75Hz และ 35Hz ตามลำดับ จะเห็นว่ากระแสไหลวนภายในวงจรทั้งสองกรณีต่างมีองค์ประกอบของ ฮาร์โมนิกอันดับที่สอง และสามารถติดตามค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า วงรอบควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์สามารถควบคุมพฤติกรรมของคอนเวอร์เตอร์ให้เป็นไปตามหลักสมดุลกำลังได้ แม้ความถี่ขาออกจะเปลี่ยนไป เป็นผลทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแกว่งรอบค่าคำสั่ง  $135V$  โดยมีค่ายอดของการกระเพื่อมเท่ากับ  $6V_{p-p}$  สำหรับความถี่ขาออก 75Hz และค่ายอดของการกระเพื่อมมีค่า  $13V_{p-p}$  สำหรับความถี่ขาออก 35Hz ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (จ) และ 3.9 (จ) โดยจะเห็นว่ายิ่งความถี่ขาออกมีค่าน้อย ขนาดของกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ตามสมการที่ 2.18

รูปที่ 3.8 (ฉ) และ 3.9 (ฉ) แสดงค่าแรงดันคำสั่งของวงรอบควบคุมสมดุลกำลัง/แรงดันเฉลี่ย ( $v_{Au}$ ) และผลรวมแรงดันคำสั่งของวงรอบควบคุมสมดุลแรงดันแต่ละโมดูล ( $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$ ) ของการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ขาออก 75Hz และ 35Hz ตามลำดับ สำหรับความถี่ขาออก 75Hz จะเห็น

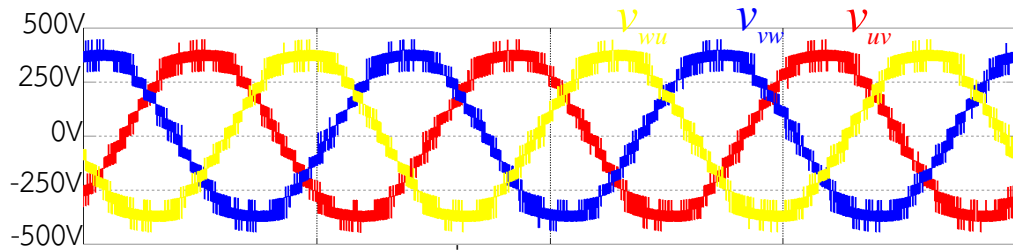
ได้ว่าค่า  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  มีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันควบคุม  $v_{Au}$  มาก เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานที่ความถี่ 35Hz เนื่องจากการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อยกว่าในการทำงานที่ความถี่สูง อีกทั้งความถี่ของกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุยังสูงขึ้นตามค่าความถี่ขาออก เป็นผลทำให้การป้อนกลับค่าแรงดันกำลังสองผ่านตัวกรองผ่านต่ำได้ค่าเป็นสัญญาณไฟตรงโดยสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้

$\sum_{j=1}^8 v_{Bju} \cong 0$  ตามคำอธิบายของสมการที่ 3.6 จึงเป็นการยืนยันการทำงานโดยไม่มีผลเชื่อมร่วมซึ่งกัน

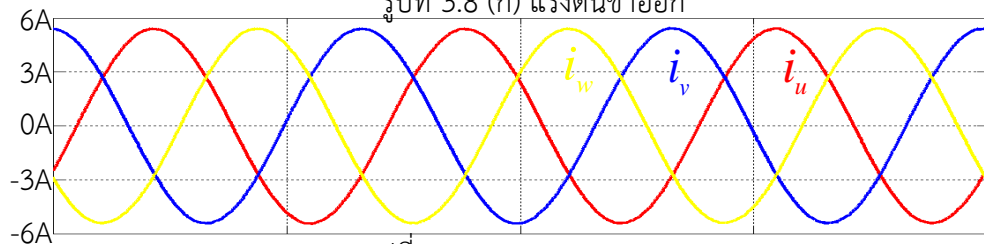
และกันสำหรับวงรอบควบคุมทั้งสอง ถึงแม้จะมีบางช่วงเวลาที่ค่า  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  มีค่ามากผิดปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่กระแสในแขนบนและล่างมีทิศทางเดียวกัน แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวก็เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบควบคุมกระแสไหลวนของวงรอบควบคุมสมดุลกำลังมากนัก

สำหรับที่ความถี่ขาออก 35Hz ค่า  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  จะมีค่ามากเนื่องจากการกระเพื่อมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่ามากขึ้นตามความถี่ขาออกที่ลดลง อีกทั้งความถี่ของการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อยตามความถี่ขาออก ทำให้การป้อนกลับค่าแรงดันกำลังสองผ่านตัวกรองต่ำทำได้ไม่สมบูรณ์นัก ค่าของแรงดันควบคุมแยกแต่ละโมดูลจึงหักล้างกันไม่สมบูรณ์ตามคำอธิบายของสมการที่

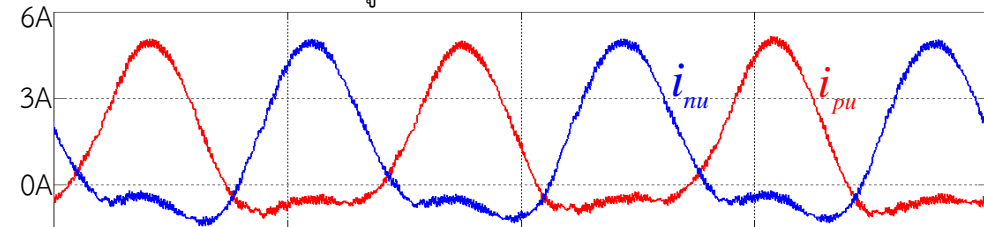
3.6 แต่อย่างไรก็ตามก็เป็นการลดผลกระทบของค่าแรงดันควบคุม  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  ที่มีต่อแรงดันควบคุม  $v_{Au}$  ได้ โดยจะเห็นว่ากระแสไหลวนยังคงสามารถติดตามค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นการยืนยันว่าคอนเวอร์เตอร์ยังคงมีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมดุลกำลัง



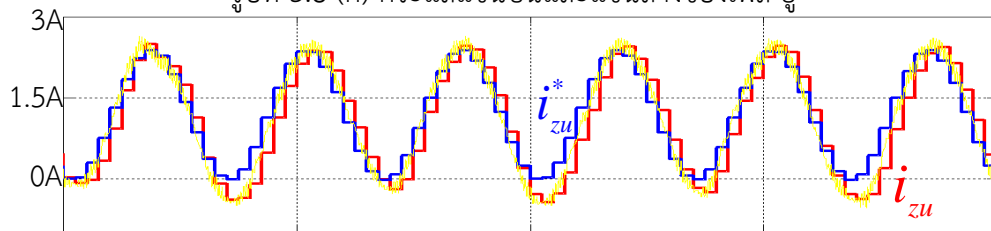
รูปที่ 3.8 (ก) แรงดันขาออก



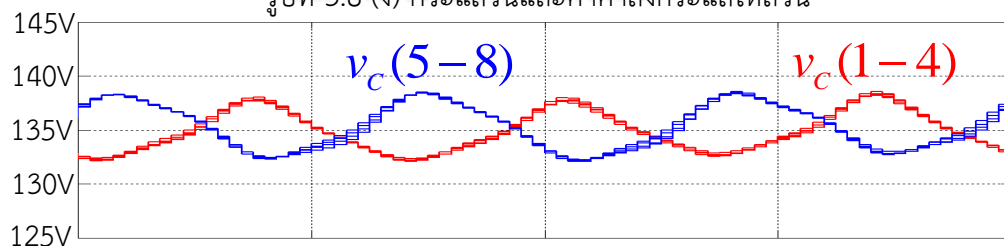
รูปที่ 3.8 (ข) กระแสขาออก



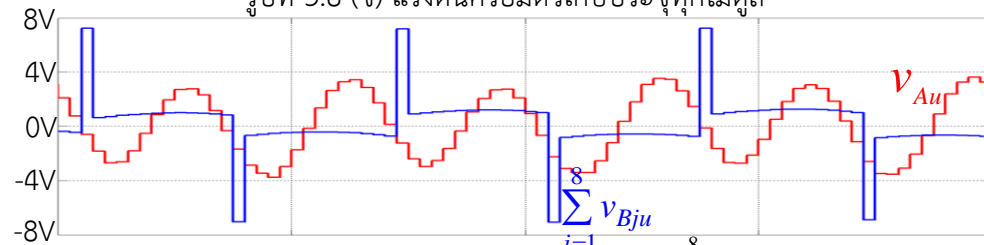
รูปที่ 3.8 (ค) กระแสแขนบนและแขนล่างของเฟส ยู



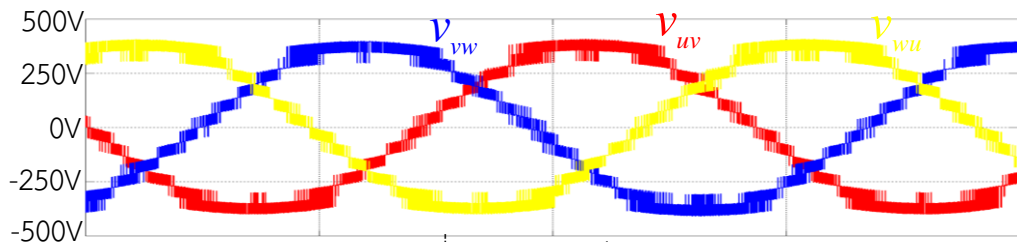
รูปที่ 3.8 (ง) กระแสเฉลี่ยและค่ากำลังกระแสไหลวน



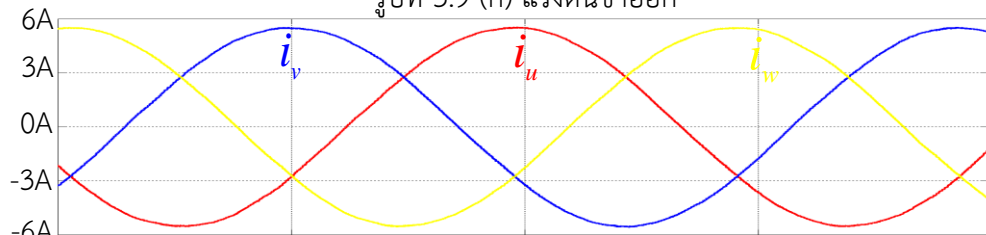
รูปที่ 3.8 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูล

รูปที่ 3.8 (ฉ) แรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$ 

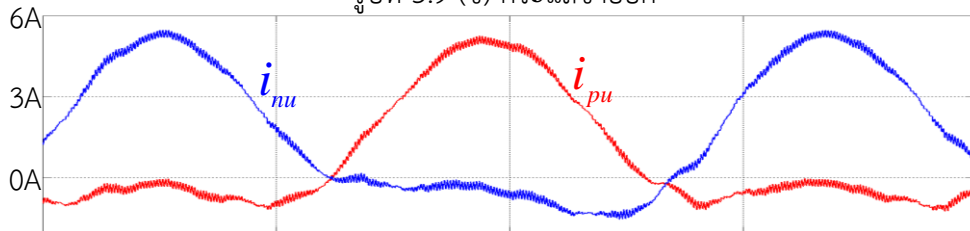
รูปที่ 3.8 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอที่แรงดันขาออก 75 Hz



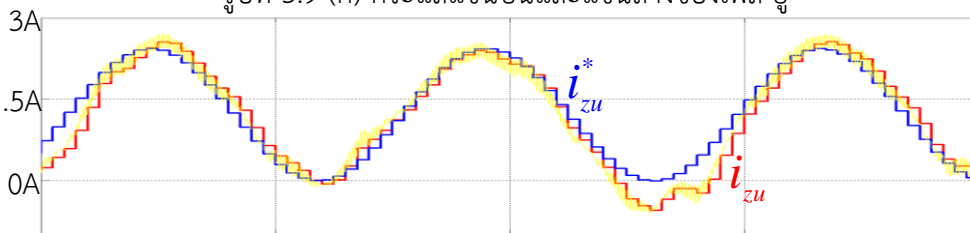
รูปที่ 3.9 (ก) แรงดันขาออก



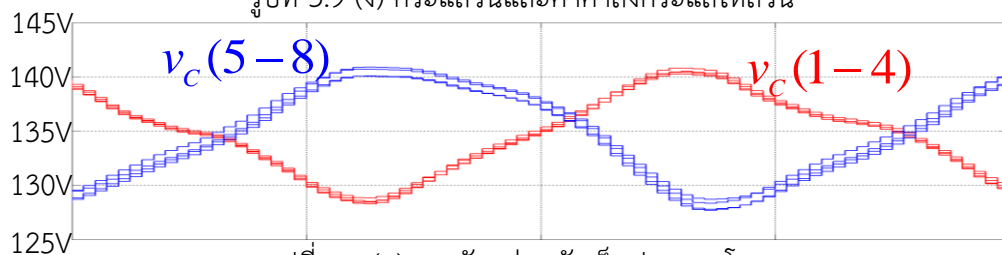
รูปที่ 3.9 (ข) กระแสขาออก



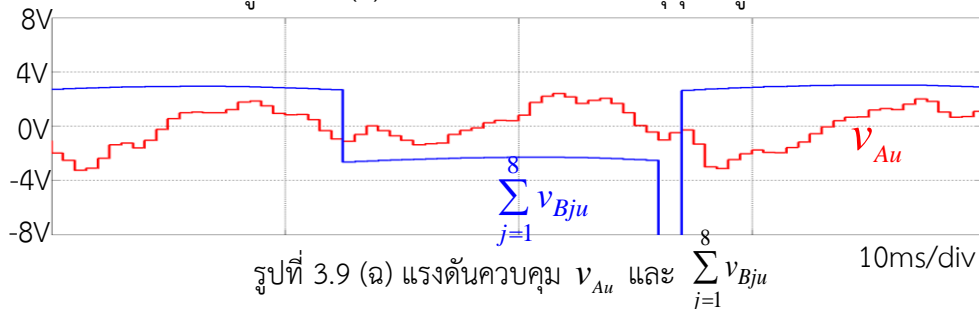
รูปที่ 3.9 (ค) กระแสแกนบนและแกนล่างของเฟส ยู



รูปที่ 3.9 (ง) กระแสเฉลี่ยและค่ากำลังกระแสไหลวน



รูปที่ 3.9 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูล



รูปที่ 3.9 (ฉ) แรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  10ms/div

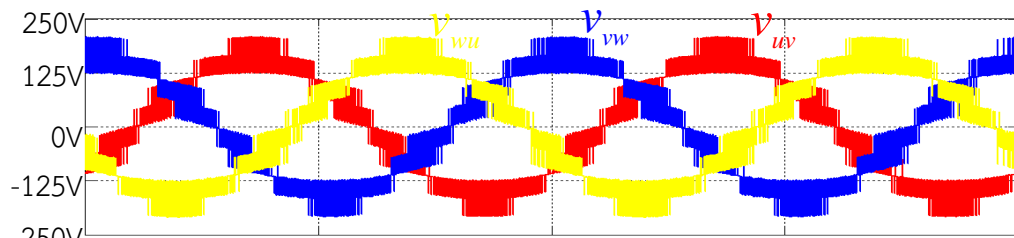
รูปที่ 3.9 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่  
นำเสนอนี้ที่แรงดันขาออก 35 Hz

### 3.4.3 การควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวงรอบควบคุมที่นำเสนอเมื่อลดขนาดของค่าคำสั่งแรงดันขาออก

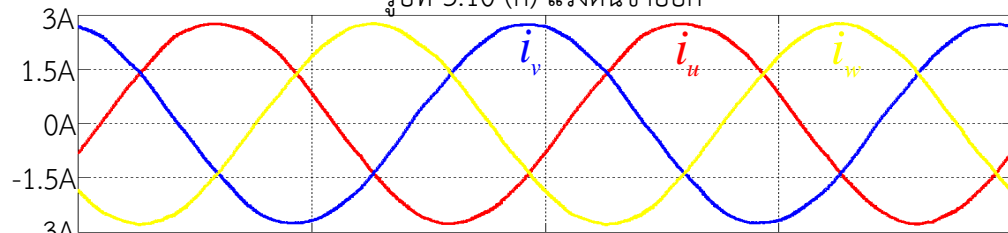
รูปที่ 3.10 แสดงผลการจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ โดยเปลี่ยนค่าอาเอ็มเอสของคำสั่งแรงดันขาออกเป็น 84.85V รูปที่ 3.10 (ก) และ 3.10 (ข) แสดงแรงดันระหว่างเฟสขาออกและกระแสขาออกของคอนเวอร์เตอร์ จะเห็นว่าการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ สามารถทำให้คอนเวอร์เตอร์สร้างค่าแรงดันและกระแสขาออกได้ตามค่าคำสั่ง

รูปที่ 3.10 (ค) แสดงกระแสที่ไหลในแขนบนและล่างของเฟสยู โดยจะเห็นว่าทิศทางการไหลของกระแสทั้งสองจะมีทิศทางการไหลที่ตรงข้ามกันเสมอ เนื่องจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแขนบนและแขนล่าง ซึ่งเป็นการยืนยันคำอธิบายตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 ได้เป็นอย่างดี

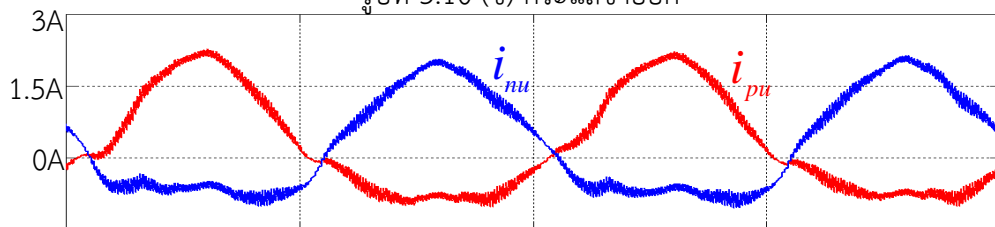
รูปที่ 3.10 (ง) แสดงกระแสไหลวนและกระแสไหลวนคำสั่ง จะเห็นว่ากระแสไหลวนภายในวงจรมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่สองตามค่าคำสั่ง แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่ากระแสไหลวนภายในวงจรถึงแม้จะสามารถติดตามค่าคำสั่งได้แต่ก็มีการกระเพื่อมเกิดขึ้น เนื่องมาจากการที่แรงดันคำสั่งป้อนไปข้างหน้า  $v_{Au}^*$  มีค่าน้อยลงตามกำลังขาออก ดังที่ได้แสดงในสมการที่ 3.4 ทำให้ผลกระทบของ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  ที่มีต่อ  $v_{Au}$  ชัดเจนยิ่งขึ้น เป็นผลทำให้เกิดกระเพื่อมขึ้นในกระแสไหลวน แต่อย่างไรก็ตามระบบควบคุมที่นำเสนอยังสามารถรักษาค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุให้แก่วงรอบค่าคำสั่ง 135V โดยมีค่ายอดของการกระเพื่อมเท่ากับ  $8V_{p-p}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (จ)



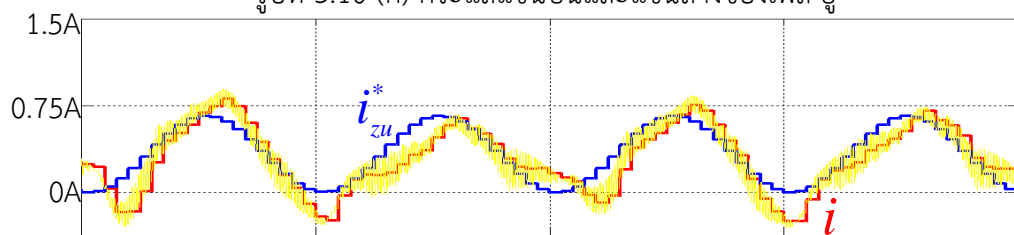
รูปที่ 3.10 (ก) แรงดันขาออก



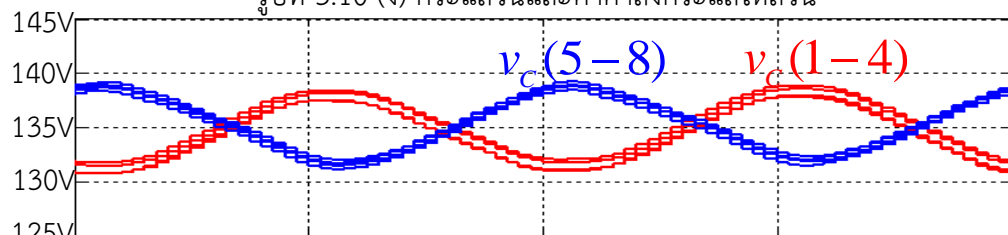
รูปที่ 3.10 (ข) กระแสขาออก



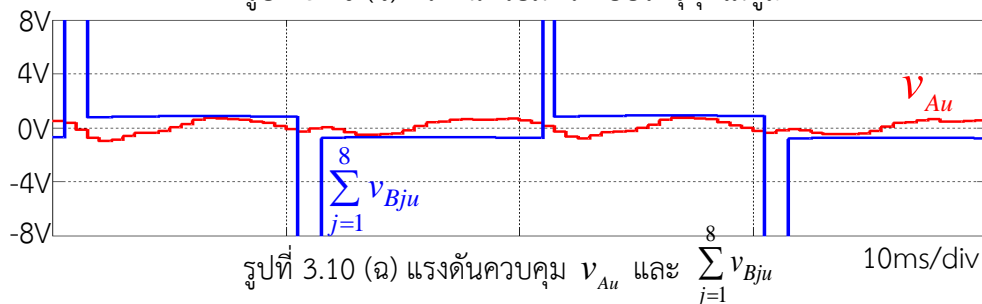
รูปที่ 3.10 (ค) กระแสแขนบนและแขนล่างของเฟส ยู



รูปที่ 3.10 (ง) กระแสเฉลี่ยและค่าคำสั่งกระแสไหลวน



รูปที่ 3.10 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูล

รูปที่ 3.10 (ฉ) แรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  10ms/div

รูปที่ 3.10 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่  
นำเสนอนี้ที่แรงดันขาออก 84.45V

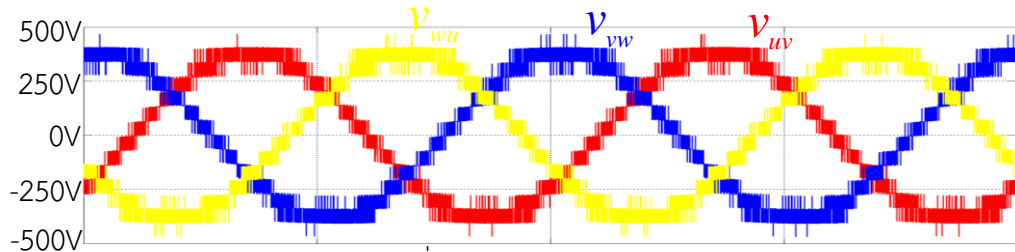


### 3.4.4 การควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวงรอบควบคุมที่นำเสนอ เมื่อเปลี่ยนตัวประกอบกำลังขาออกเป็น 0.623 แบบล้าหลัง

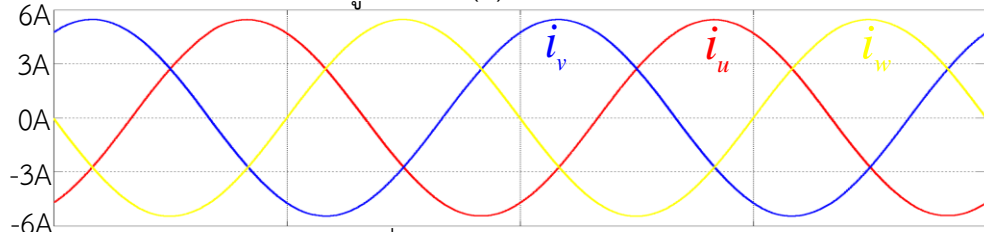
รูปที่ 3.11 แสดงผลการจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ โดยเปลี่ยนตัวประกอบกำลังขาออกเป็น 0.623 แบบล้าหลัง รูปที่ 3.11 (ก) และ 3.11 (ข) แสดงแรงดันระหว่างเฟสขาออกและกระแสขาออกของคอนเวอร์เตอร์ จะเห็นว่าการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์สามารถทำให้คอนเวอร์เตอร์สร้างค่าแรงดันและกระแสขาออกได้ตามค่าคำสั่ง แม้ว่าตัวประกอบกำลังด้านโหลดจะเปลี่ยนไป

รูปที่ 3.11 (ค) แสดงกระแสที่ไหลในแขนบนและล่างของเฟสยู จะเห็นว่าทิศทางการไหลของกระแสทั้งสองโดยภาพรวมแล้วจะมีทิศทางการไหลที่ตรงข้ามกันเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแขนบนและแขนล่าง

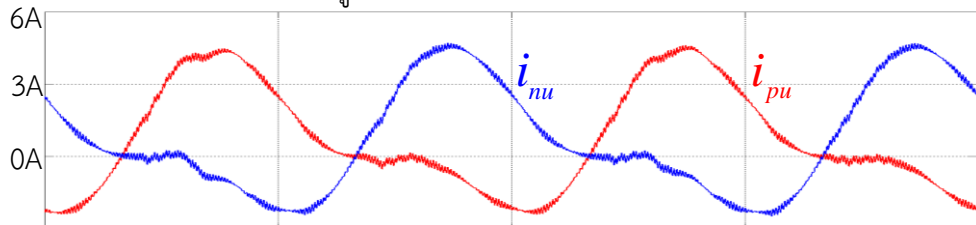
รูปที่ 3.11 (ง) แสดงกระแสไหลวนและค่าคำสั่งของกระแสไหลวน จากการออกแบบวงรอบควบคุมกำลังให้มีค่าตอบสนองที่ไว บวกกับค่าแรงดันคำสั่งป้อนไปข้างหน้า ทำให้กระแสไหลวนมีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่สอง และสามารถติดตามค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นการยืนยันว่าคอนเวอร์เตอร์มีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมมูลกำลัง แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุตามสมการที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าถ้าตัวประกอบกำลังด้านโหลดมีค่าน้อยลง จะทำให้ค่ายอดของการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่ามากขึ้น จากรูปที่ 3.11 (จ) จะเห็นว่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแกว่งรอบค่าคำสั่ง 135V และมีค่ายอดของการกระเพื่อมเท่ากับ  $10V_{p-p}$  เป็นผลทำให้  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  มีค่ามากขึ้น แต่ก็ไม่กระทบต่อการทำงานของวงรอบควบคุมกำลัง/แรงดันเฉลี่ย มากนัก



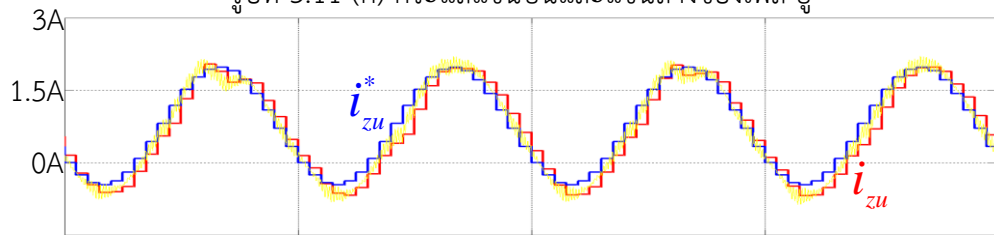
รูปที่ 3.11 (ก) แรงดันขาออก



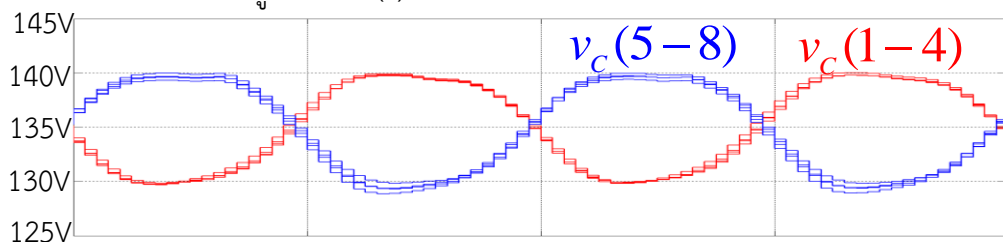
รูปที่ 3.11 (ข) กระแสขาออก



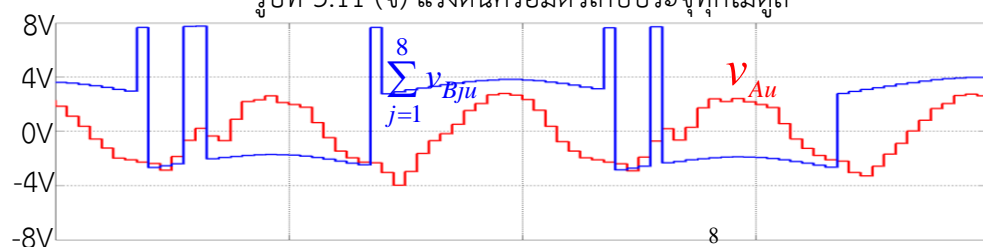
รูปที่ 3.11 (ค) กระแสแกนบนและแกนล่างของเฟส ยู



รูปที่ 3.11 (ง) กระแสเฉลี่ยและค่าคำสั่งกระแสไหลวน



รูปที่ 3.11 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูล



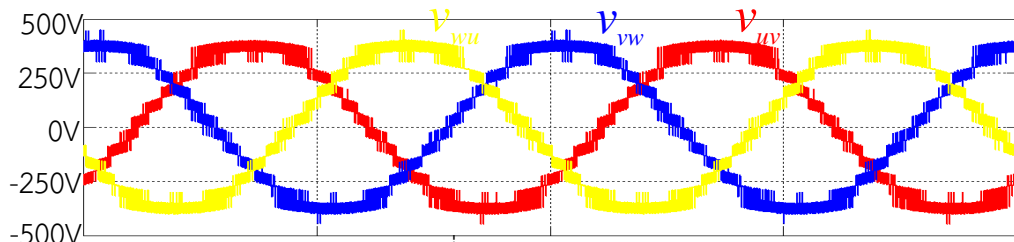
รูปที่ 3.11 (ฉ) แรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  10ms/div

รูปที่ 3.11 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยการควบคุมที่นำเสนอดัชนีประกอบกำลัง 0.623 แบบล้าหลัง

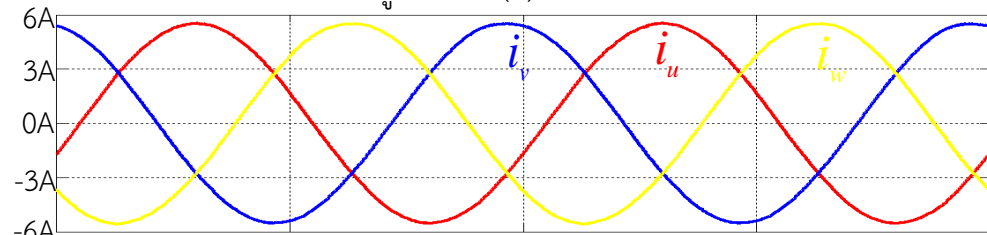
### 3.4.5 การควบคุมการทำงานโดยไม่มีควบคุมกระแสไหลวนให้เป็นไปตามหลักสมมูลกำลัง

รูปที่ 3.12 ได้แสดงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์โดยไม่มีควบคุมกระแสไหลวนให้เป็นไปตามหลักสมมูลกำลังเพื่อเป็นการเปรียบเทียบการทำงานกับระบบควบคุมที่นำเสนอ รูปที่ 3.12 (ก) และ 3.12 (ข) แสดงแรงดันและกระแสขาออกของคอนเวอร์เตอร์ โดยจะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์ยังสามารถสร้างแรงดันขาออกได้ตามค่าคำสั่งเป็นผลทำให้กระแสขาออกเป็นรูปไซน์

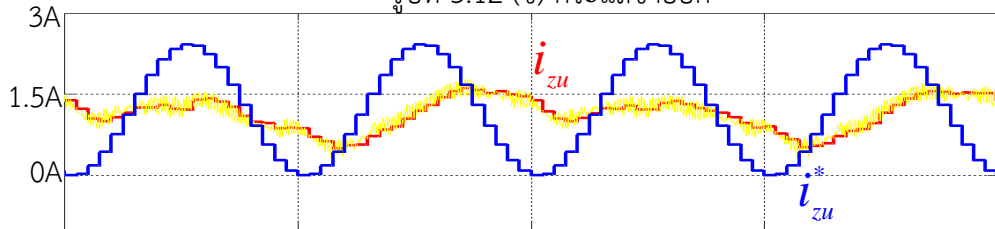
รูปที่ 3.12 (ค) แสดงกระแสไหลวนภายในคอนเวอร์เตอร์และกระแสไหลวนในอุดมคติตามหลักสมมูลกำลังที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ จะเห็นได้ว่ากระแสไหลวนภายในวงจรมีพฤติกรรมไม่เป็นไปตามกระแสไหลวนในอุดมคติและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่สองได้หายไปอย่างมาก เป็นผลทำให้โดยแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูลแรงรอบค่าคำสั่ง  $135V$  ด้วยค่ายอดแรงดันกระแสเฟืองที่มากขึ้นคือ  $12V_{p-p}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ง) ผลการจำลองได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีจากสมการที่ 2.18 โดยกำหนดค่า  $k = 0$  รูปที่ 3.13 แสดงการเปรียบเทียบการกระแสเฟืองของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่หนึ่ง เฟสยู ของคอนเวอร์เตอร์ ด้วยการควบคุมที่นำเสนอกับการควบคุมการทำงานที่ไม่มีควบคุมกระแสไหลวนให้เป็นไปตามหลักสมมูลกำลังด้วยเงื่อนไขการทำงานเดียวกัน จะเห็นว่าค่ายอดของการกระแสเฟืองของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วยระบบการควบคุมที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่า



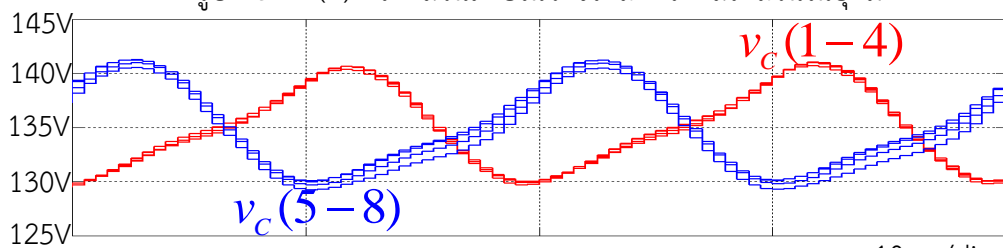
รูปที่ 3.12 (ก) แรงดันขาออก



รูปที่ 3.12 (ข) กระแสขาออก

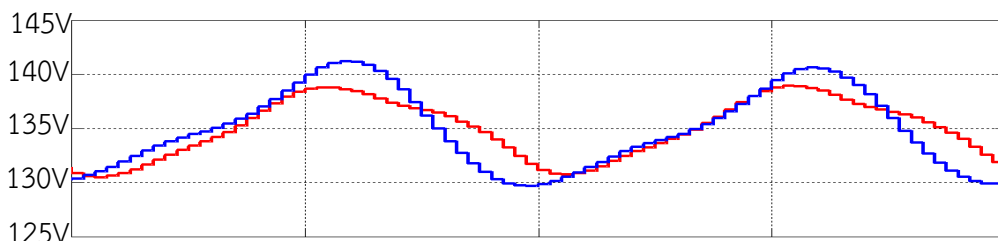


รูปที่ 3.12 (ค) กระแสภายในวงจรและกระแสไหลวนในอุดมคติ



รูปที่ 3.12 (ง) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูล 10ms/div

รูปที่ 3.12 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์โดยไม่มีการควบคุมกระแสไหลวน

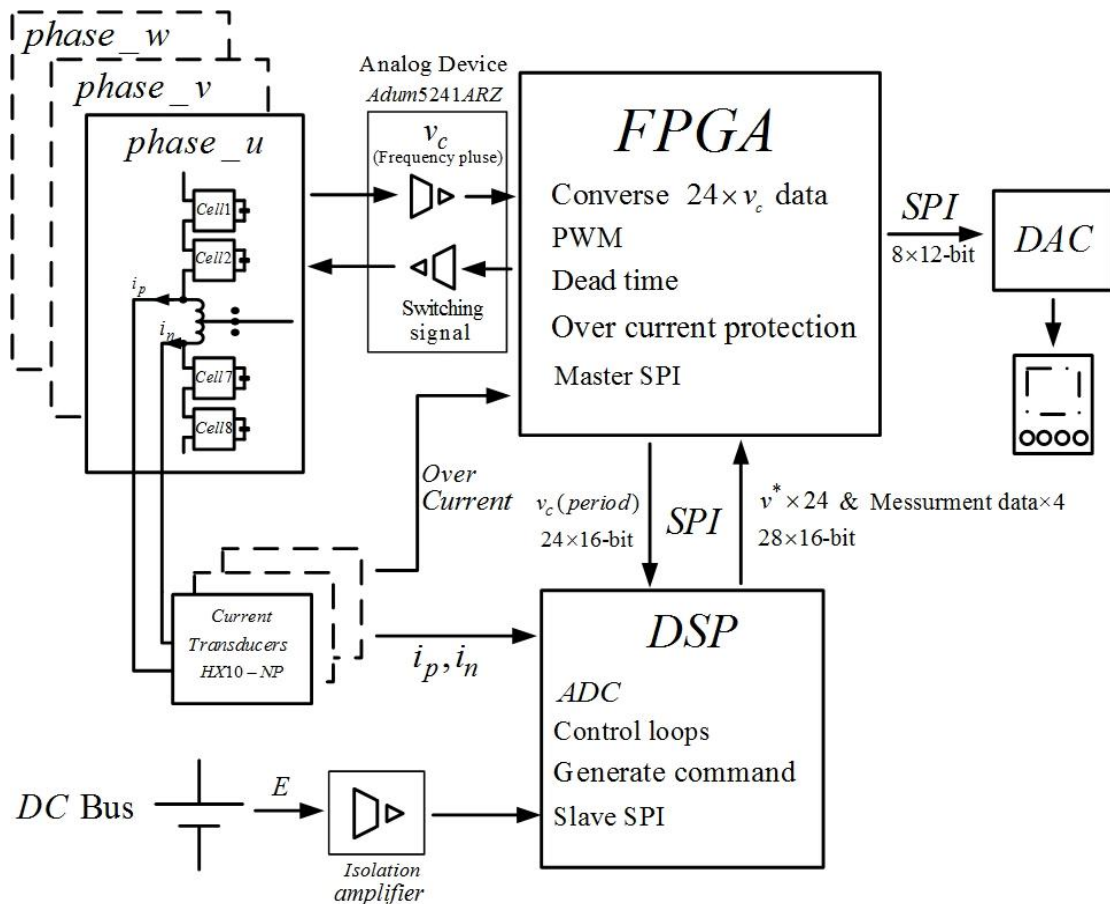


10ms/div

รูปที่ 3.13 การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสำหรับการควบคุมการทำงานที่นำเสนอ (สีแดง) และการควบคุมการทำงานโดยไม่มีการควบคุมกระแสไหลวน (สีน้ำเงิน)

## บทที่ 4

## คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบและการควบคุมการทำงาน



รูปที่ 4.1 แผนภาพการควบคุมคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่นำเสนอ

คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อยืนยันแนวคิดในทางปฏิบัติจริง รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพการทำงานของระบบควบคุมการทำงานที่นำเสนอ โดยผู้วิจัยได้เลือกตัวควบคุมแบบดิจิทัลสองชนิด ได้แก่ Field Programmable Gate Array (FPGA) และ Digital Signal Processing (DSP) ทำงานคู่กัน โดยส่งข้อมูลแลกเปลี่ยนกันผ่าน SPI (Serial Peripheral Interface) ในส่วนของบอร์ด FPGA มีหน้าที่หลัก คือ การกำหนดจังหวะการคำนวณ, การมอดูเลตเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิทช์, การรับข้อมูลป้อนกลับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ รวมทั้ง

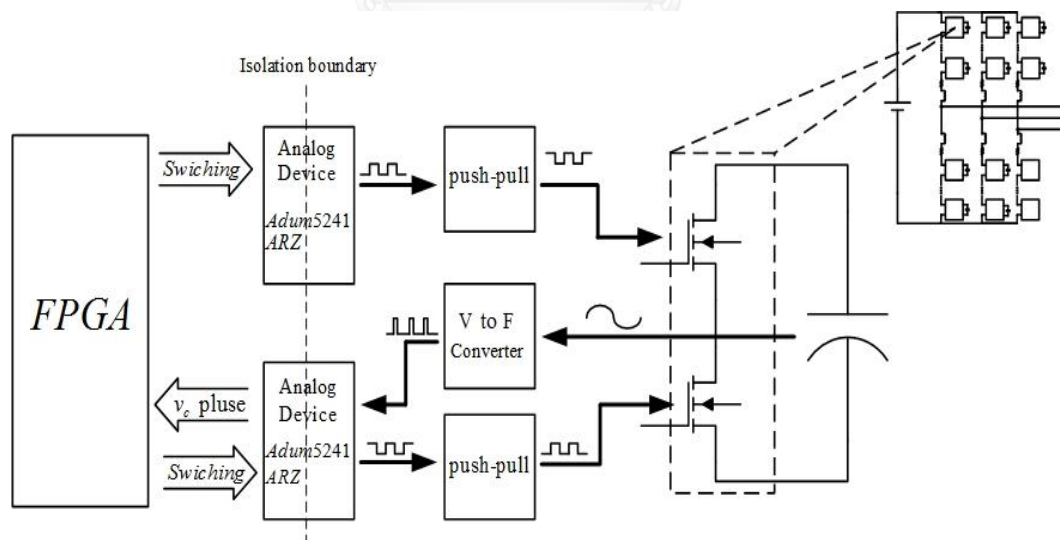
ตัดสัญญาณขับนำสวิตช์ในกรณีที่มีกระแสเกินพิกัด สำหรับบอร์ด DSP จะทำหน้าที่ในส่วนของการคำนวณทางคณิตศาสตร์ทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นการคำนวณค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ, การสร้างค่าคำสั่งต่างๆ และคำนวณที่เกี่ยวข้องกับวงรอบควบคุมทั้งหมด นอกจากนี้บอร์ด DSP ยังทำหน้าที่รับข้อมูลป้อนกลับของกระแสในแขนบนและล่างของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสามเฟส รวมทั้งแรงดันบัสไฟตรงผ่านทางโมดูลแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลภายในตัวบอร์ด (Internal Analog to Digital converter) นอกจากนี้ทางผู้วิจัยยังได้นำเสนอวงจรขับนำสวิตช์และวงจรตรวจวัดแรงดันภายในโมดูลที่มีขนาดเล็กและราคาไม่แพง ซึ่งเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ในระดับแรงดันต่ำต่อไป สำหรับคุณสมบัติของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่นำเสนอมีดังนี้

โครงสร้าง : คอนเวอร์เตอร์แบบมอดูลาร์ 3 เฟส แต่ละเฟสประกอบด้วย 8 โมดูล (4 โมดูลสำหรับ แขนบนและล่าง) คอนเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันเฟสได้ 9 ระดับ และแรงดันระหว่างสาย 17 ระดับ

ค่าพิกัด : 295 V line to line , 2040 kVA , 50Hz

ความถี่การสวิตช์ : 2 KHz

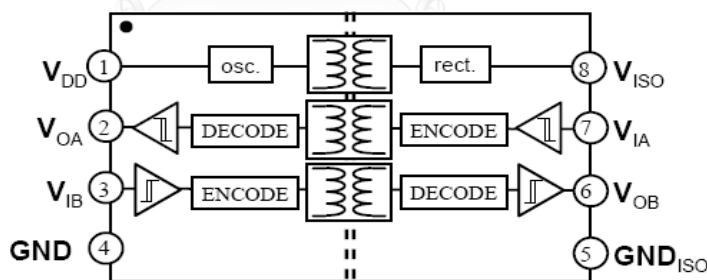
#### 4.1 การออกแบบวงจรขับนำสวิตช์และวงจรตรวจวัดแรงดันภายในโมดูล



รูปที่ 4.2 แผนภาพการทำงานภายในโมดูล

เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ประกอบด้วยโมดูลจำนวนมากทำให้ต้องการวงจรขับนำสวิตช์ที่ต้องมีสมบัติการแยกโดดของสัญญาณจำนวนมากเช่นกัน เป็นผลทำให้ต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานขับนำสวิตช์ไวงานเยอะขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ยังต้องการข้อมูลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากทุกโมดูล ทำให้ต้องมีวงจรตรวจวัดแรงดันเป็นจำนวนมากอีกเช่นกัน เพื่อให้ขนาดของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดเล็กลงและการทำงานภายในโมดูลมีหน้าที่โดยสมบูรณ์ภายในตัว ทางผู้วิจัยจึงได้เสนอแผนภาพการทำงานภายในโมดูลดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยภายในโมดูลประกอบไปด้วยวงจรขับนำสวิตช์ที่มีสมบัติแยกโดดกันสองชุดและวงจรแปลงสัญญาณแรงดันเป็นความสัญญาณความถี่หนึ่งชุด สัญญาณทั้งสามจะผ่านไอซีแยกโดดสัญญาณก่อนจะไปเชื่อมต่อกับบอร์ด FPGA

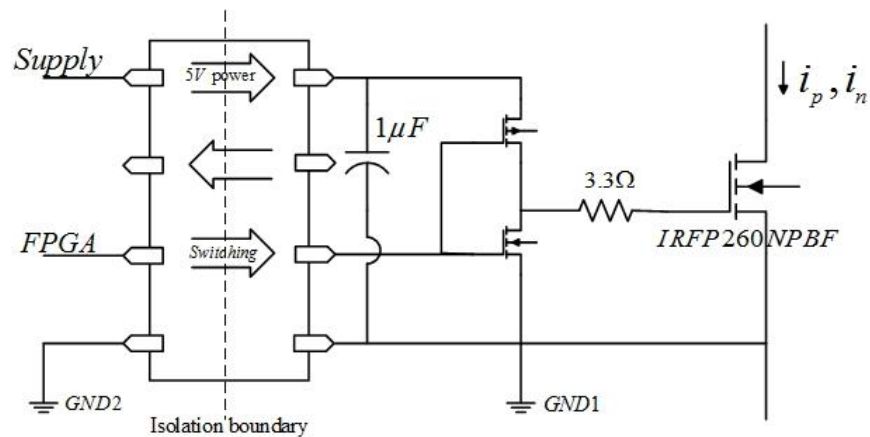
ในส่วนของไอซีแยกโดดสัญญาณทางผู้วิจัยได้เลือกไอซี Analog Devices Adum5241ARZ ดังแสดงในรูป 4.3 โดยไอซีดังกล่าวนอกจากจะมีคุณสมบัติสามารถ รับ-ส่ง สัญญาณดิจิทัลได้สองทิศทางแล้ว ยังสามารถส่งผ่านแรงดันไฟตรงขนาด 5V ผ่านตัวไอซีได้อีกด้วย ฉะนั้น Analog Devices Adum5241ARZ จึงเหมาะสมในการทำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์แยกโดดทางสัญญาณภายในโมดูล เพราะสามารถส่งสัญญาณขับนำสวิตช์และรับข้อมูลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุส่งกลับไปทีบอร์ด FPGA ได้ในตัวเดียวกัน อีกทั้งยังมีแหล่งจ่ายไฟตรงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานเอาไว้ใช้ในการขับนำสวิตช์ได้อีกด้วย



รูปที่ 4.3 โครงสร้างไอซี Analog Devices Adum5241ARZ

รูปที่ 4.4 แสดงวงจรขับนำสวิตช์ไวงานที่นำเสนอ หลักจากบอร์ด FPGA สร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ ตัวสัญญาณจะถูกส่งผ่านไอซีแยกโดด Analog Devices Adum5241ARZ เพื่อส่งการทำงานของสวิตช์ไวงานภายในโมดูลต่อไป แต่สัญญาณขับนำนี้ไม่สามารถนำไปขับสวิตช์กำลังได้โดยตรง เนื่องจากกระแสที่มาจากช่องส่งสัญญาณข้อมูลดิจิทัลของ Analog Devices Adum5241ARZ ไม่เพียงพอต่อการขับนำสวิตช์กำลัง ดังนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปขับนำมอดเฟสคู่ พี-เอ็น ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจร พูช - พูล (push-pull) สำหรับการนำสัญญาณไฟตรง 5V จากช่องจ่ายกำลังของ Analog Devices Adum5241ARZ ที่สามารถจ่ายกระแสได้มากกว่ามาใช้ในการขับนำสวิตช์กำลัง

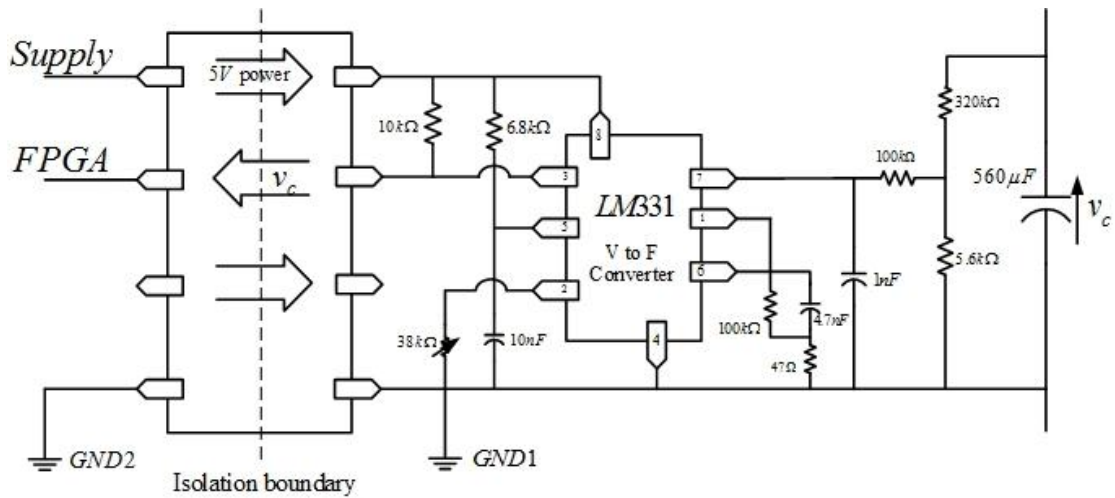
แทน แต่อย่างไรก็ตามวงจรขับนำสวิตช์ที่นำเสนอสามารถสร้างแรงดันขับนำสวิตช์ได้แค่ 5 โวลต์ เท่านั้น ซึ่งโดยปกติแล้วสวิตช์กำลังโดยทั่วไปต้องการแรงดันขับนำเกตที่ 15 โวลต์ ฉะนั้นการเลือกสวิตช์กำลังภายในโมดูลให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งสวิตช์ไวงานที่ใช้จำเป็นต้องมีคุณสมบัติที่สามารถนำกระแสสูงได้ด้วยแรงดันขับนำเกตต่ำๆ ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือก Power MOSFET IRFP260N เนื่องจากสามารถขับนำได้ที่แรงดัน 5 โวลต์ โดยกระแสไหลผ่านได้ถึง 56 A และมีความต้านทานภายใน 0.04 โอห์ม



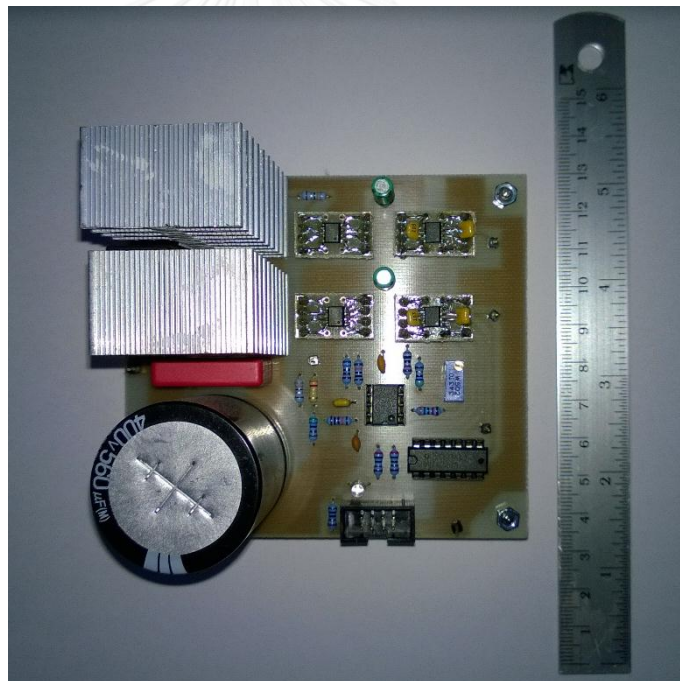
รูปที่ 4.4 วงจรขับนำเกต

สำหรับในส่วนของการป้อนกลับข้อมูลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ เนื่องจาก Analog Devices Adum5241ARZ สามารถส่งผ่านได้แค่สัญญาณดิจิทัลเท่านั้น การป้อนกลับแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโดยตรงผ่านไอซีแยกโดดจึงไม่สามารถทำได้ ฉะนั้นจึงได้ใช้ไอซี LM331 ซึ่งเป็นไอซีแปลงค่าสัญญาณแรงดันเป็นสัญญาณความถี่ (Voltage to Frequency converter) เพื่อแปลงสัญญาณแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุออกมาเป็นพัลส์ความถี่ เพื่อที่จะสามารถส่งผ่านข้อมูลผ่านทาง Analog Devices Adum5241ARZ ไปสู่บอร์ด FPGA เพื่อประมวลผลต่อไป โดยวงจรตรวจวัดแรงดันได้แสดงดังภาพที่ 4.5





รูปที่ 4.5 วงจรป้อนกลับแรงดัน



รูปที่ 4.6 โมดูลของคอนเวอร์เตอร์แบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบ

รูปที่ 4.6 แสดงโมดูลของคอนเวอร์เตอร์แบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบในทางปฏิบัติจริง จะเห็นว่า วงจรขับนำสวิทช์และการวัดค่าป้อนกลับของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ทำให้ โมดูลมีขนาดเล็กลง โดยจะเห็นว่าโมดูลหนึ่งๆ มีขนาดเพียง  $10 \times 10$  cm เท่านั้น

## 4.2 การควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์

ในปัจจุบันเครื่องมือคำนวณแบบดิจิทัลที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์ได้แก่ Field Programmable Gate Array (FPGA) และ Digital Signal Processing (DSP) ซึ่งทั้งสองอุปกรณ์นั้นมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน สำหรับบอร์ด DSP จะมีข้อดีในเรื่องของการใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมทำให้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ทำได้ง่าย อีกทั้งยังมีโมดูลการทำงานพื้นฐานที่ถูกเตรียมไว้แล้วในหน่วยความจำ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยข้อจำกัดของบอร์ด DSP ทำให้ตัวบอร์ดไม่สามารถสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์จำนวนมากเพื่อสั่งการทำงานของทุกโมดูลได้ อีกทั้งบอร์ด DSP ยังไม่สามารถรับข้อมูลป้อนกลับแรงดันจากทุกโมดูลภายในเวลาเดียวกันได้อีกด้วย แต่สำหรับบอร์ด FPGA ที่มีความอิสระในการเขียนโปรแกรมต่างๆ มากกว่าบอร์ด DSP ทำให้บอร์ด FPGA สามารถสร้างโปรแกรมการมอดูเลตเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ได้อย่างไม่จำกัดเท่าที่ทรัพยากรจะรองรับ อย่างไรก็ตามยังสามารถสร้างโปรแกรมรับข้อมูลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจำนวนมากได้ในเวลาเดียวกันด้วย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้เลือกบอร์ด FPGA ตระกูล Spartan-3 เบอร์ XC3S400 ซึ่งเป็นบอร์ด FPGA ที่มีราคาไม่แพงมากและหาซื้อได้ง่ายในประเทศไทย มาใช้ในการควบคุมคอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่น่าเสนอ สำหรับคุณสมบัติของบอร์ด FPGA XC3S400 ที่น่าสนใจคือ มีขนาดความจุทั้งหมด 400,000 เกต ทำงานบนสัญญาณนาฬิกาที่ 25 MHz และพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา VHDL

ในทางอุดมคติบอร์ด FPGA เพียงหนึ่งบอร์ดสามารถทำหน้าที่ควบคุมควบคุมการทำงานของคอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ได้แบบครบวงจร แต่การควบคุมการทำงานยังมีส่วนของการคำนวณวงรอบควบคุมที่มีจำนวนมากอีกเช่นกัน และด้วยข้อจำกัดทางทรัพยากรบอร์ด FPGA XC3S400 ทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่ดังกล่าวได้ทั้งหมด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกบอร์ด DSP TMS320F28335PGFA เข้ามาช่วยควบคุมการทำงานในส่วนของการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับวงรอบควบคุมและการคำนวณทางคณิตศาสตร์อื่นๆ ทั้งหมด สำหรับคุณสมบัติที่น่าสนใจของบอร์ด DSP TMS320F28335PGFA คือ เป็นระบบคำนวณแบบ floating point ทำให้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ทำได้ง่าย อีกทั้งยังมีโมดูลแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลภายในตัว (Internal Analog to Digital Converter : ADC) ทำให้สามารถรับค่าป้อนกลับกระแสในแกนล่าง, แขนบน และแรงดันบัล เข้ามาใช้ในการคำนวณได้โดยตรง และยังมีโมดูล SPI สำหรับใช้ในการติดต่อสื่อสารกับบอร์ดอื่นๆ ภายนอกได้อีกด้วย

รูปที่ 4.7 แสดงแผนภาพการทำงานร่วมกันของบอร์ด FPGA และ DSP สำหรับในส่วนของบอร์ด FPGA หลังจากรับค่าพัลส์ความถี่ของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากทุกโมดูลแล้ว สัญญาณเค้าเตอร์จากโมดูลสร้างสัญญาณนาฬิกาจะทำการนับความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่รับเข้ามาเพื่อหาคาบ

ขอบสัญญาณพัลส์ จากนั้นข้อมูลที่ได้จากการนับคาบสัญญาณจะถูกส่งไปบอร์ด DSP ผ่านทางโมดูล SPI เพื่อทำการคำนวณต่อไป โดยบอร์ด FPGA จะเป็นตัวกำหนดจังหวะการรับส่งข้อมูลทั้งหมด ในขณะที่บอร์ด DSP จะส่งค่าแรงดันคำสั่งของทุกโมดูลที่คำนวณเสร็จแล้วในช่วงการคำนวณก่อนหน้านี้มายังบอร์ด FPGA จากนั้นค่าคำสั่งของทุกโมดูลจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของแต่ละโมดูล หลังจากนั้นสัญญาณขับนำสวิตช์ที่ได้จากการมอดูเลตจะถูกนำไปสร้างช่วงประวิงเวลา (Dead time : 1us) แล้วจึงส่งไปขับนำสวิตช์ในแต่ละโมดูลต่อไป

หน้าที่ของบอร์ด FPGA นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังบอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนาล็อกด้วย (DAC) เนื่องจากโมดูล SPI ในบอร์ด DSP ถูกใช้ไปกับการสื่อสารกับบอร์ด FPGA ฉะนั้นบอร์ด DSP จึงไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังบอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนาล็อกได้โดยตรง แต่จะถูกส่งผ่านมายังบอร์ด FPGA ก่อน แล้วจึงถูกส่งต่อไปยังบอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนาล็อกอีกทีหนึ่ง หน้าที่อีกอย่างหนึ่งของบอร์ด FPGA คือการตัดสัญญาณขับนำสวิตช์เนื่องจากกระแสเกินพิกัด (Over Current Protection) โดยบอร์ด FPGA จะรับสัญญาณกระแสเกินจากบอร์ดตรวจวัดกระแสเพื่อที่จะหยุดการทำงานของโมดูลมอดูเลชันโดยตรง

ในส่วนของบอร์ด DSP หลังจากได้รับข้อมูลการนับความกว้างคาบของพัลส์แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจากบอร์ด FPGA แล้ว ก็ทำการคำนวณเพื่อแปลงค่าจำนวนนับดังกล่าวเป็นข้อมูลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุต่อไปโดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบและแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุได้แสดงดังสมการที่ 4.1

$$v_c = \frac{0.02066}{T} - 17.41 \quad (4.1)$$

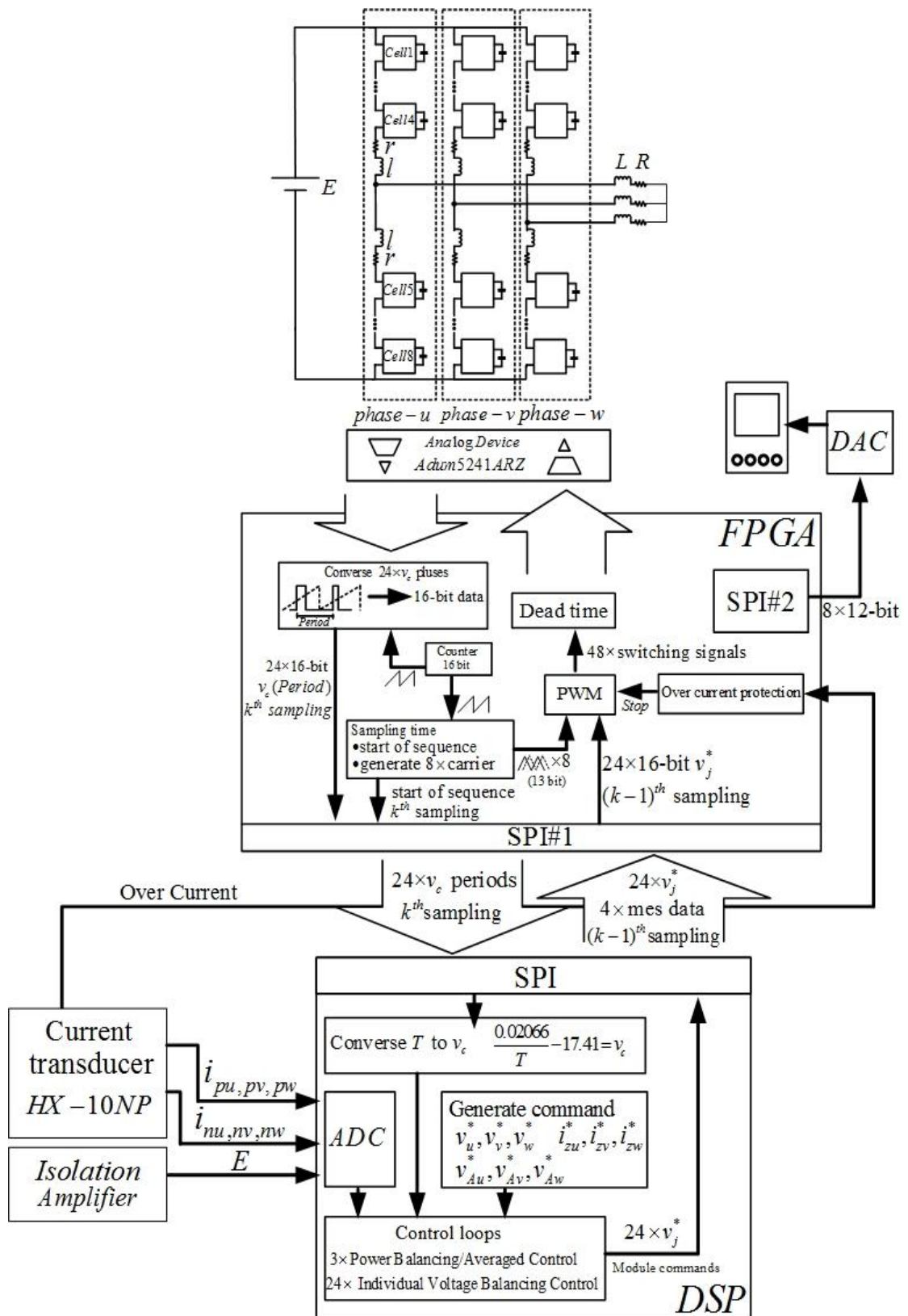
ในขณะที่บอร์ด DSP จะทำการรับสัญญาณป้อนกลับกระแสแกนบน, แกนล่าง และแรงดันบัสไฟตรง เข้ามาทางโมดูลแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) เพื่อคำนวณค่ากระแสไหลวนภายในวงจร หลังจากนั้นจึงทำการสร้างค่าคำสั่งคำสั่งต่าง คือ ค่าคำสั่งแรงดันขาออก, ค่าคำสั่งกระแสไหลวนและค่าแรงดันคำสั่งควบคุมป้อนไปข้างหน้า ( $v_A$ ) ของทั้งสามเฟส และเมื่อได้ข้อมูลที่จำเป็นต่อการคำนวณครบแล้ว จึงเข้าสู่กระบวนการคำนวณวงรอบควบคุมเพื่อสร้างค่าแรงดันคำสั่งของแต่ละโมดูล และเตรียมส่งกลับไปยังบอร์ด FPGA ในรอบคำนวณถัดไป

สรุปหน้าที่ของบอร์ด FPGA

1. หาค่าคาบของพัลส์ความถี่จากการป้อนกลับข้อมูลแรงดันจากทุกโมดูล
2. มอดดูเลตความถี่พัลส์เพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิทช์
3. สร้างช่วงประวิงเวลา (Dead time)
4. ส่งสัญญาณออกสู่วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนาล็อก (DAC)
5. ป้อนกันกระแสเกินค่าพิกัด

สรุปหน้าที่ของบอร์ด DSP

1. แปลงค่าคาบเป็นข้อมูลแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ
2. รับข้อมูลป้อนกลับกระแสแกนบน, แกนล่าง และแรงดันบัส ผ่านวงจรแปลงข้อมูลแอนาล็อกเป็นดิจิทัลภายใน
3. สร้างค่าคำสั่งของแรงดันขาออก, ค่าคำสั่งของกระแสไหลวน และค่าคำสั่งแรงดันควบคุมป้อนไปข้างหน้า
4. คำนวณวงรอบควบคุมทั้งหมด

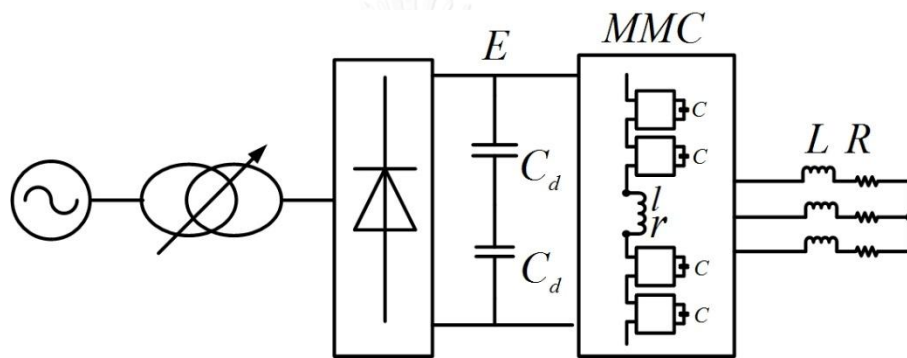


รูปที่ 4.7 แผนภาพการทำงานของบอร์ด FPGA และ DSP

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

เพื่อยืนยันการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบ รวมทั้งยืนยันประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบจึงได้ถูกทดสอบการทำงานด้วยเงื่อนไขต่างๆ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 5.3 ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรคอนเวอร์เตอร์ตัวต้นแบบ และตารางที่ 5.2 แสดงค่าอัตราขยายของวงรอบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบ

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ที่ใช้ในการจำลอง

|                                    |        |                           |
|------------------------------------|--------|---------------------------|
| ตัวเก็บประจุด้านบัสไฟตรง           | $C_d$  | $1900\mu F$               |
| ความถี่การสวิตช์                   | $f_c$  | $2\text{ kHz}$            |
| ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานภายในแขน  | $l, r$ | $10\text{ mH}, 1\ \Omega$ |
| ค่าความจุของตัวเก็บประจุภายในโมดูล | $C$    | $560\mu F$                |

ตารางที่ 5.2 อัตราการขยายของวงรอบควบคุมที่ใช้ในการจำลองผลการทำงา

|                     |                     |       |       |                     |                     |
|---------------------|---------------------|-------|-------|---------------------|---------------------|
| $K_1$               | $K_2$               | $K_3$ | $K_4$ | $K_5$               | $K_6$               |
| $20 \times 10^{-4}$ | $20 \times 10^{-4}$ | 5     | 75    | $10 \times 10^{-4}$ | $10 \times 10^{-4}$ |

ตารางที่ 5.3 จุดประสงค์และเงื่อนไขการทดสอบการทำงาน

| จุดประสงค์การทดลอง   | เงื่อนไขการทดสอบการทำงาน |         |                |              |  |
|--|--------------------------|---------|----------------|--------------|--|
|  | $E$                      | $V_C^*$ | แรงดันเฟสขาออก | ความถี่ขาออก | โหลด   |
| แสดงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอ <ul style="list-style-type: none"> <li>● ลดค่าแรงดันขาออก</li> <li>● เปลี่ยนความถี่ขาออก</li> <li>● เปลี่ยนตัวประกอบกำลัง</li> </ul> | 540V                     | 135V    | 162.6V         | 50Hz         | <i>Series RL</i><br>$R = 40\Omega$<br>$L = 16.1mH$ |
|  | 540V                     | 135V    | 113.1V         | 50Hz         |  |
|  | 300V                     | 75V     | 92.1V          | 75Hz         | <i>Series RL</i><br>$R = 25\Omega$<br>$L = 16.1mH$ |
|  | 300V                     | 75V     | 92.1V          | 25Hz         |  |
|  | 300V                     | 75V     | 92.1V          | 75Hz         | <i>Series RL</i><br>$R = 25\Omega$<br>$L = 63.3mH$ |

### 5.1 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอ

รูปที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอ รูปที่ 5.2 (ก) และ 5.2 (ข) แสดงค่าแรงดันระหว่างเฟสและกระแสขาออกของคอนเวอร์เตอร์ โดยจะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันขาออกได้ตามค่าคำสั่งและกระแสขาออกเป็นรูปไซน์ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าคอนเวอร์เตอร์ตัวต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้จริงตามต้องการ

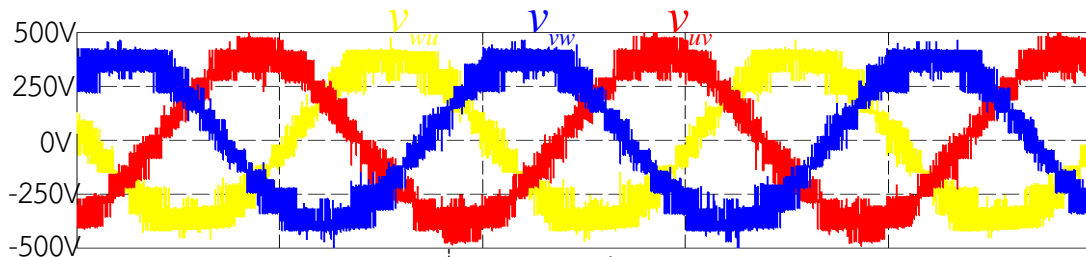
รูปที่ 5.2 (ค) แสดงกระแสที่ไหลในแกนบนและล่างของเฟสยู จะเห็นว่าทิศทางของกระแสทั้งสองต่างมีทิศตรงข้ามกันเนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแกนบนและล่าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานในบทที่สาม อีกทั้งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นการยืนยันคำอธิบายตามสมการที่ 2.7 ในทางปฏิบัติจริง

รูปที่ 5.2 (ง) แสดงกระแสไหลวนจากการคำนวณของบอร์ด DSP , ค่ากระแสไหลวนจริงจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดและค่ากระแสไหลวนคำสั่งของเฟสยู จะเห็นได้ว่า DSP สามารถอ่านค่ากระแสไหลวนภายในวงจรได้ใกล้เคียงกับค่าจริง และจากการออกแบบวงรอบควบคุมกำลังให้มีผลการตอบสนองไว ผนวกกับค่าแรงดันคำสั่งป้อนไปข้างหน้า ( $v_{Au}^*$ ) ตามสมการที่ 3.4 ทำให้กระแสไหลวนภายในวงจรเกิดองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่สองและสามารถติดตามค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นการยืนยันว่าวงรอบควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมคอนเวอร์เตอร์ตัวต้นแบบให้มีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมดุลพลังงานในทางปฏิบัติจริง

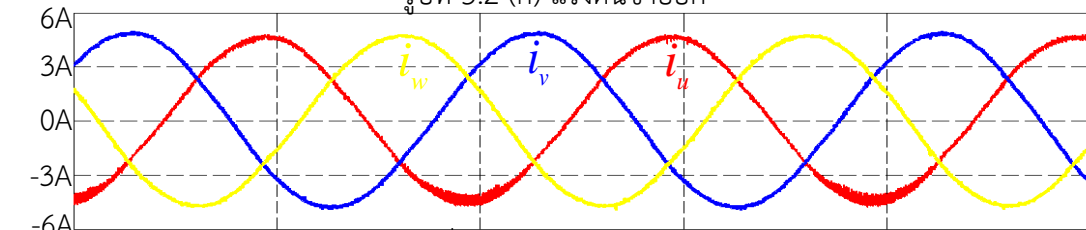
รูปที่ 5.2 (จ) แสดงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่ 1, 3 ของแขนบน และโมดูลที่ 5, 7 ของแขนล่างเฟสยู โดยจะเห็นว่าการแกว่งของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในแขนบนและล่าง มีทิศทางตรงข้ามกันเนื่องจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแขนตามคำอธิบายของสมการที่ 2.7 สำหรับโมดูลที่เหลือนจะมีลักษณะการกระเพื่อมแบบเดียวกัน โดยแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกโมดูลจะแกว่งรอบค่าคำสั่ง  $135V$  ด้วยค่ายอดการกระเพื่อม  $8V_{p-p}$  ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงาน และเป็นการยืนยันการทำงานของวงรอบควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ในทางปฏิบัติจริงได้เป็นอย่างดี

รูปที่ 5.2 (ฉ) แสดงค่าแรงดันคำสั่งของวงรอบควบคุมสมดุลกำลัง/แรงดันเฉลี่ย ( $v_{Au}$ ) และผลรวมของแรงดันควบคุมของวงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล ( $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$ ) จะเห็นว่า  $v_{Au}$  มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่สองเพื่อสร้างกระแสไหลวนให้เป็นไปตามค่าคำสั่ง สำหรับค่าแรงดัน  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  ถึงแม้จะมีการป้อนกลับค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุผ่านวงจรกรองต่ำแบบดิจิทัลใน DSP แต่ผลรวมของแรงดัน  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  ยังมีขนาดใกล้เคียงกับ  $v_{Au}$  ซึ่งไม่ตรงตามผลการจำลองการทำงาน โดยเป็นผลมาจากความไม่เป็นอุดมคติของวงจรป้อนกลับแรงดัน แต่อย่างไรก็ตามการป้อนกลับผ่านตัวกรองผ่านต่ำทำให้ผลของแรงดัน  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  ที่มีต่อแรงดัน  $v_{Au}$  น้อยลง ทำให้แรง  $v_{Au}$  ยังคงสามารถควบคุมกระแสไหลวนให้เป็นไปตามหลักสมดุลกำลังได้

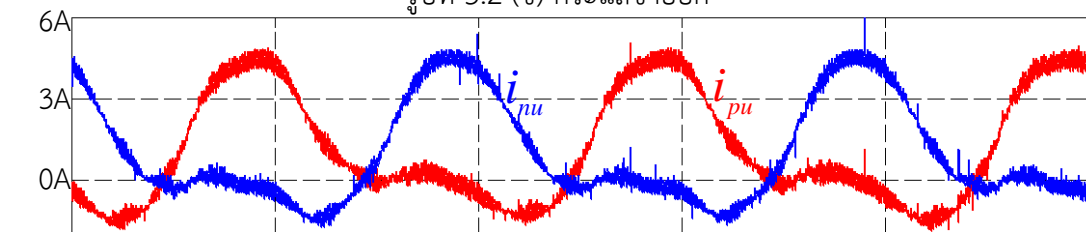




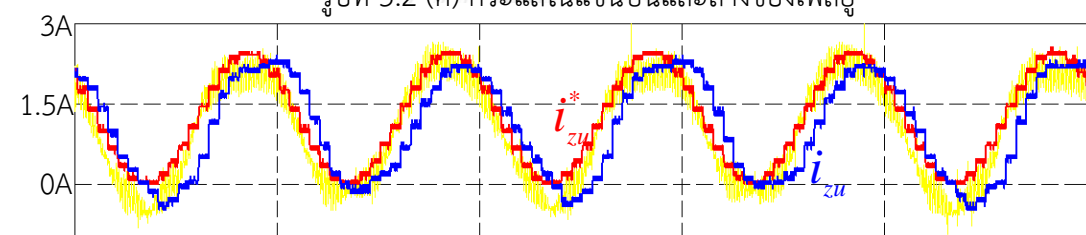
รูปที่ 5.2 (ก) แรงดันขาออก



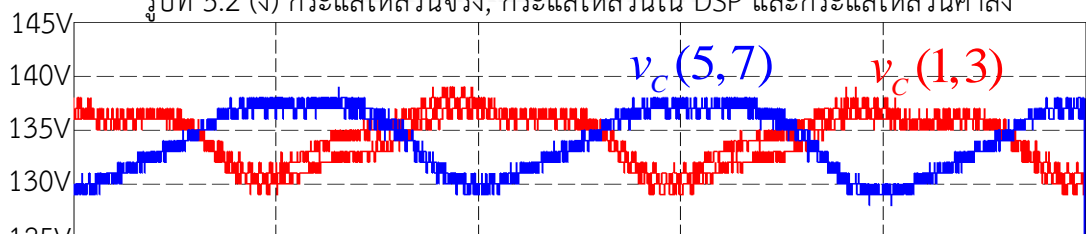
รูปที่ 5.2 (ข) กระแสขาออก



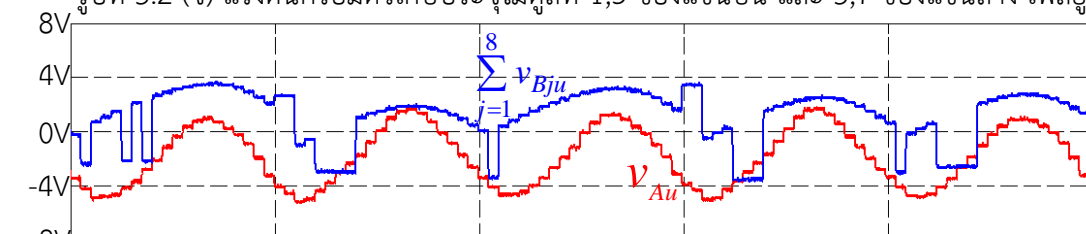
รูปที่ 5.2 (ค) กระแสในแขนบนและล่างของเฟสยู



รูปที่ 5.2 (ง) กระแสไหลจริง, กระแสไหลใน DSP และกระแสไหลคำสั่ง



รูปที่ 5.2 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่ 1,3 ของแขนบน และ 5,7 ของแขนล่าง เฟสยู



รูปที่ 5.2 (ฉ) แรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  10ms/div

รูปที่ 5.2 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอ

## 5.2 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบเมื่อลดค่าแรงดันขาออก

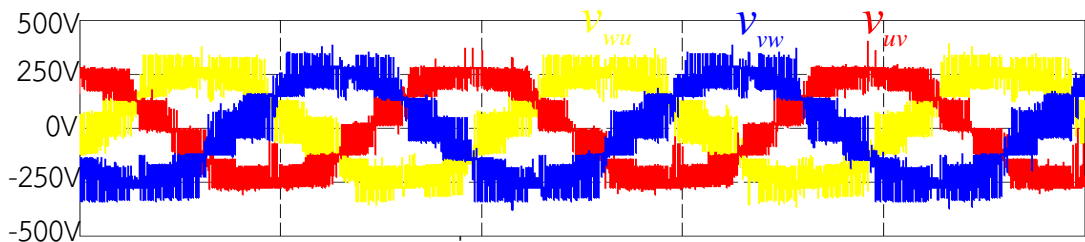
รูปที่ 5.3 แสดงผลการทดสอบผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอโดยเปลี่ยนค่าคำสั่งแรงดันเฟสขาออกเป็น 113.13 V รูปที่ 5.3 (ก) และ 5.3 (ข) แสดงแรงดันระหว่างสายและกระแสขาออกของคอนเวอร์เตอร์ โดยจะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์ตัวต้นแบบและระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถทำงานได้ตามต้องการถึงแม้ค่าคำสั่งแรงดันขาออกจะมีค่าลดลง

รูปที่ 5.3 (ค) แสดงกระแสที่ไหลในแขนบนและล่างของเฟสยู จะเห็นได้ว่าทิศทางของกระแสทั้งสองต่างมีทิศตรงข้ามกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแขนบนและล่าง โดยเป็นการยืนยันคำอธิบายตามสมการที่ 2.7 ด้วยผลการปฏิบัติจริง แม้ว่าจะค่าคำสั่งแรงดันขาออกจะเปลี่ยนไป

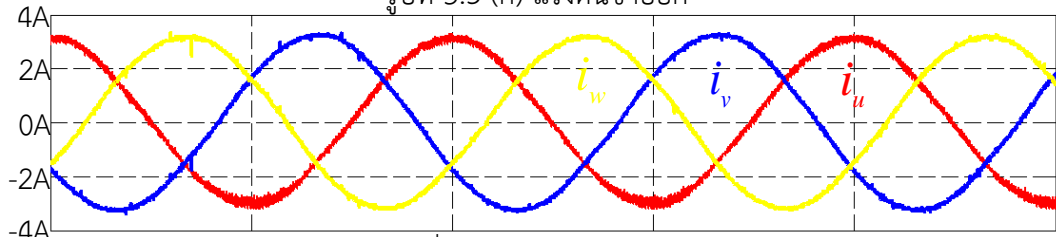
รูปที่ 5.3 (ง) แสดงกระแสไหลวนจากการคำนวณของ DSP , ค่ากระแสไหลวนจริงจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดและค่ากระแสไหลวนคำสั่งของเฟสยู จะเห็นได้ขนาดของกระแสไหลวนคำสั่งมีค่าลดลงตามกำลังขาออก และจากการออกแบบวงรอบควบคุมกำลังให้มีผลการตอบสนองที่ไว ผนวกกับค่าแรงดันคำสั่งป้อนไปข้างหน้า ทำให้กระแสไหลวนภายในวงจรเกิดองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่สอง และสามารถติดตามค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี เป็นการยืนยันว่าคอนเวอร์เตอร์ตัวต้นแบบมีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมมูลพลังงานแม้ว่าเงื่อนไขงานทำงานจะเปลี่ยนไป

รูปที่ 5.3 (จ) แสดงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่ 1, 3 ของแขนบน และโมดูลที่ 5, 7 ของแขนล่างของเฟสยู โดยจะเห็นว่าความกว้างของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในแขนบนและล่าง มีทิศทางตรงข้ามกัน สำหรับโมดูลที่เหลือจะมีลักษณะแบบเดียวกันเช่นกัน โดยแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแกว่งรอบค่าคำสั่ง 135V ด้วยค่ายอดการกระเพื่อม  $7V_{p-p}$  ซึ่งใกล้เคียงกับผลการจำลองการทำงานซึ่งเป็นการยืนยันการทำงานของวงรอบควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ในทางปฏิบัติจริงได้เป็นอย่างดี

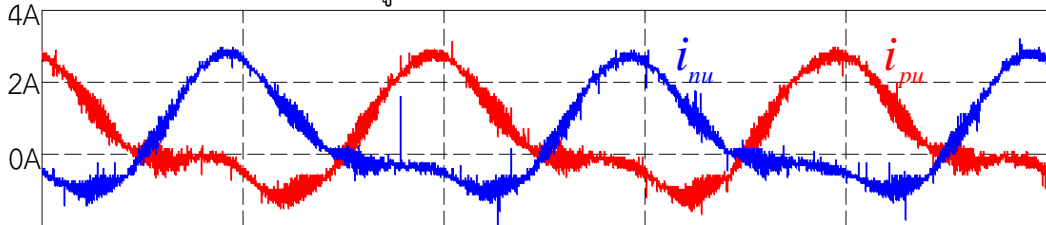
รูปที่ 5.3 (ฉ) แสดงค่าแรงดันคำสั่งของวงรอบควบคุมสมมูลกำลัง/แรงดันเฉลี่ย ( $v_{Au}$ ) และผลรวมของแรงดันควบคุมของวงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล ( $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$ ) ถึงแม้ค่าของ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  จะมีขนาดใกล้เคียงกับ  $v_{Au}$  แต่ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงรอบควบคุมสมมูลกำลัง/แรงดันเฉลี่ยมากนัก โดยแรงดันควบคุม  $v_{Au}$  ยังสามารถควบคุมกระแสไหลวนให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี



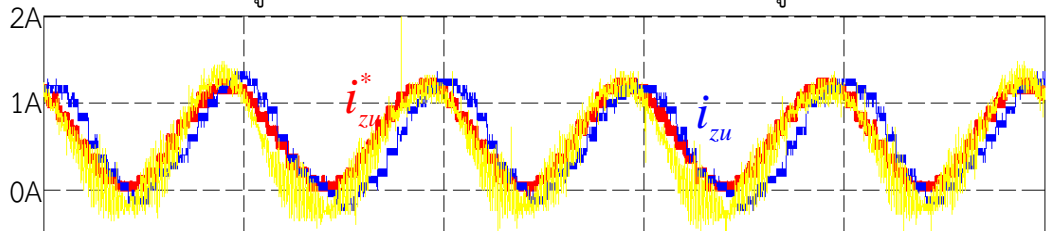
รูปที่ 5.3 (ก) แรงดันขาออก



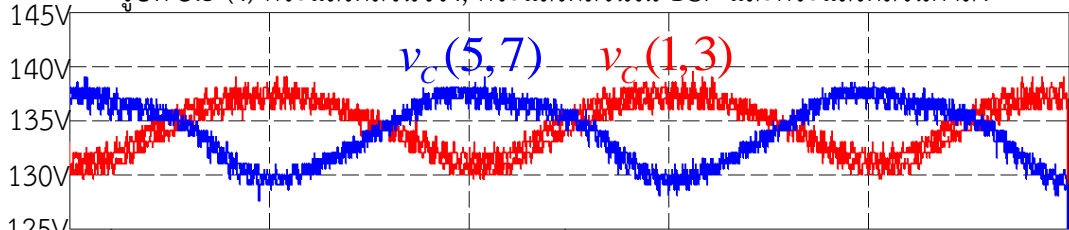
รูปที่ 5.3 (ข) กระแสขาออก



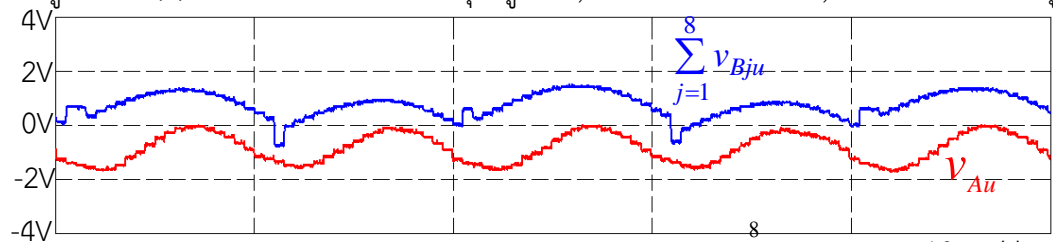
รูปที่ 5.3 (ค) กระแสในแขนบนและล่างของเฟสยู



รูปที่ 5.3 (ง) กระแสไหลวนจริง, กระแสไหลวนใน DSP และกระแสไหลวนคำสั่ง



รูปที่ 5.3 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่ 1,3 ของแขนบน และ 5,7 ของแขนล่าง เฟสยู



รูปที่ 5.3 (ฉ) แรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  10ms/div

รูปที่ 5.3 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอที่แรงดันเฟสขาออก 113.13V

### 5.3 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบเมื่อเปลี่ยนความถี่ขาออก

รูปที่ 5.4 และ 5.5 แสดงผลการทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอ ที่แรงดันบัส 300V และเปลี่ยนค่าความถี่ขาออกเป็น 75Hz และ 25Hz รูปที่ 5.4 (ก),(ข) และ 5.5 (ก),(ข) แสดงแรงดันระหว่างสายและกระแสขาออกของการทำงานที่ความถี่ 75Hz และ 25Hz ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันและกระแสขาออกได้ตามต้องการแม้ความถี่ขาออกจะเปลี่ยนไป

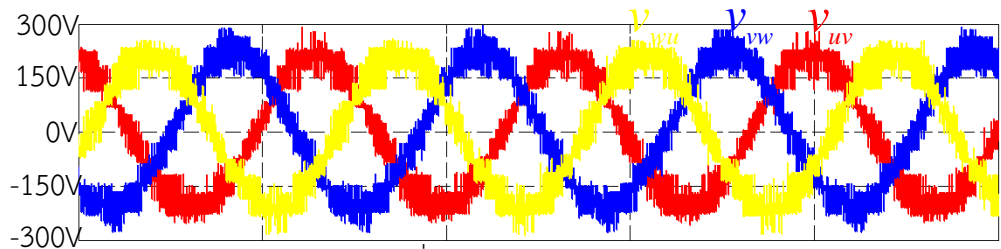
รูปที่ 5.4(ค) และ 5.5(ค) แสดงกระแสที่ไหลในแกนบนและล่างของเฟสยู จากการทำงานที่เงื่อนไขความถี่ขาออก 75Hz และ 25Hz ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทิศทางของกระแสทั้งสองต่างมีทิศตรงข้ามกัน เป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแกนบนและล่าง ซึ่งเป็นการยืนยันคำอธิบายตามสมการที่ 2.7 ด้วยผลการปฏิบัติจริง แม้ว่าเงื่อนไขการทำงานจะเปลี่ยนไป

รูปที่ 5.4(ง) และ 5.5(ง) แสดงกระแสไหลวนจากการคำนวณของ DSP , ค่ากระแสไหลวนจริงจากการวัดด้วยเครื่องมือวัด และค่ากระแสไหลวนคำสั่ง จากการทำงานที่ความถี่ขาออก 75Hz และ 25Hz ตามลำดับ สำหรับการทำงานที่ความถี่สูง การควบคุมกระแสไหลวนให้มีฮาร์มอนิกที่อันดับสองตามค่าคำสั่งอาจทำได้ไม่สมบูรณ์นัก เพราะนอกจากคุณสมบัติของตัวชดเชยแบบ PI ที่ไม่สามารถติดตามสัญญาณไซน์ได้สมบูรณ์แล้ว ยังมีข้อจำกัดในเรื่องคาบการคำนวณของตัวควบคุมแบบดิจิทัล ซึ่งจะมีช่วงเวลาการคำนวณที่หยาบมากขึ้นเมื่อเทียบกับความถี่ของฮาร์มอนิกอันดับที่สองในค่าคำสั่ง แต่อย่างไรก็ตามจากการออกแบบตัวชดเชยแบบ PI ผนวกกับค่าแรงดันคำสั่งป้อนไปข้างหน้า ทำให้กระแสไหลวนภายในวงจรมอเตอร์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่สองและสามารถติดตามค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นการยืนยันว่าระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถทำงานได้แม้ความถี่ขาออกจะเปลี่ยนไป

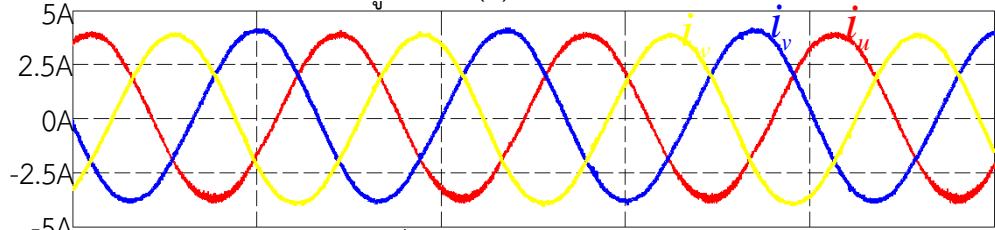
รูปที่ 5.4(จ) และ 5.5(จ) แสดงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่ 1, 3 ของแกนบน และโมดูลที่ 5, 7 ของแกนล่างของเฟสยู ที่ความถี่ขาออก 75Hz และ 25Hz ตามลำดับ โดยจะเห็นว่า การแกว่งของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในแกนบนและล่างมีทิศทางตรงข้ามกันเนื่องจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างแกนตามคำอธิบายของสมการที่ 2.7 สำหรับโมดูลที่เหลือจะมีลักษณะแบบเดียวกันเช่นกัน โดยทั้งสองกรณีแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแกว่งรอบค่าคำสั่ง 75V สำหรับการทำงานที่ความถี่ 75Hz แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่ายอดการกระเพื่อมอยู่ที่  $4V_{p-p}$  และการทำงานที่ความถี่ 25Hz ค่ายอดของการกระเพื่อมอยู่ที่  $17V_{p-p}$  ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า การทำงานที่ความถี่ต่ำจะ

ทำให้ค่ายอดของการกระเพื่อมมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันการวิเคราะห์ตามสมการที่ 2.18 ในทางปฏิบัติจริง

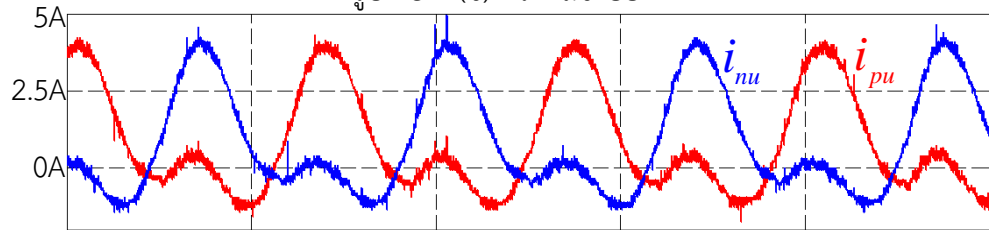
รูปที่ 5.4(ฉ) และ 5.5(ฉ) แสดงค่าแรงดันคำสั่งของวงรอบควบคุมสมดุลงำลัง/แรงดันเฉลี่ย ( $v_{Au}$ ) และผลรวมของแรงดันควบคุมของวงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล ( $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$ ) ของการทำงานที่ความถี่ขาออก 75Hz และ 25Hz ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าแรงดัน  $v_{Au}$  ของทั้งสองกรณีจะมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกอันดับที่สอง เพื่อสร้างกระแสไหลวนให้เป็นไปตามค่าคำสั่ง สำหรับการการทำงานที่ความถี่ 75Hz ค่าของ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  จะมีค่าน้อยเนื่องจากการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อย อีกทั้งยังกระเพื่อมด้วยความถี่สูงตามค่าแรงดันขาออก ทำให้การป้อนกลับค่าไฟตรงผ่านตัวกรองผ่านต่ำใน DSP สามารถทำงานได้โดยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น เป็นผลทำให้  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju} \cong 0$  ตามคำอธิบายของสมการที่ 3.6 ถึงแม้ว่าตัวชดเชยแบบ PI ของวงรอบควบคุมกำลังจะทำงานได้ไม่สมบูรณ์นักในการทำงานที่ความถี่สูง แต่จากผลการแยกเชื่อมร่วมของวงรอบทั้งสอง ทำให้คำสั่งป้อนไปข้างหน้า  $v_{Au}$  สามารถควบคุมกระแสไหลวนได้อย่างเต็มที่ ทำให้ค่ากระแสไหลวนสามารถติดตามค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี แต่สำหรับการการทำงานที่ความถี่ 25Hz นอกจากการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่ามากแล้ว ยังกระเพื่อมด้วยความถี่ต่ำอีกด้วย ฉะนั้นการป้อนกลับค่าไฟตรงผ่านวงจรกรองผ่านต่ำใน DSP จึงทำหน้าที่ได้ไม่สมบูรณ์ เงื่อนไข  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju} \cong 0$  จึงไม่เป็นจริงตามแนวคิดที่นำเสนอ แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบดังกล่าวก็ไม่ส่งผลต่อการทำงานของวงรอบควบคุมสมดุลงำลังมากนัก เพราะกระแสไหลวนภายในวงจรยังสามารถติดตามค่าคำสั่งได้เป็นอย่างดี



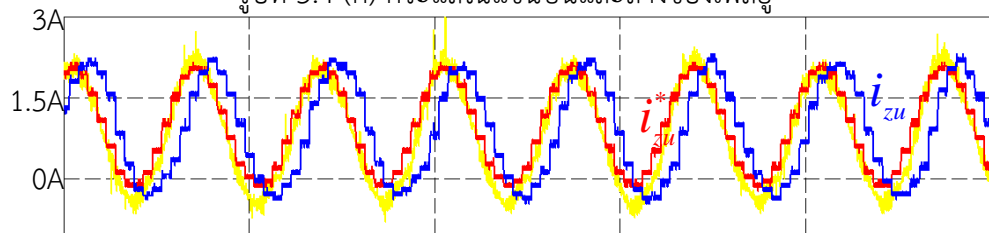
รูปที่ 5.4 (ก) แรงดันขาออก



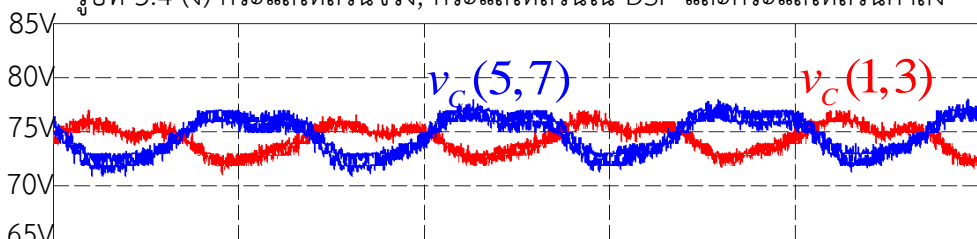
รูปที่ 5.4 (ข) กระแสขาออก



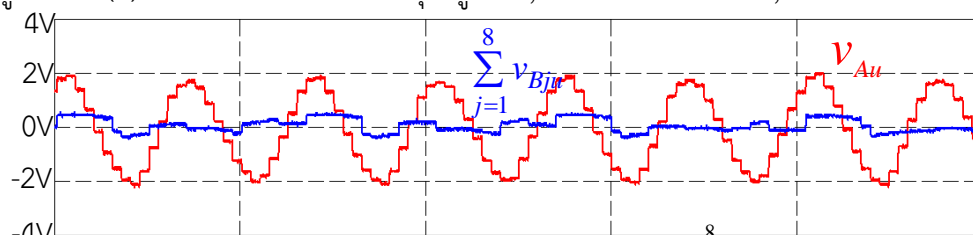
รูปที่ 5.4 (ค) กระแสในแขนบนและล่างของเฟสยู



รูปที่ 5.4 (ง) กระแสไหลวนจริง, กระแสไหลวนใน DSP และกระแสไหลวนคำสั่ง

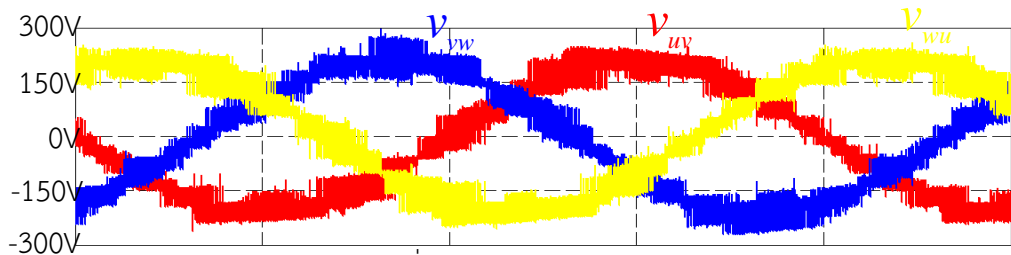


รูปที่ 5.4 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่ 1,3 ของแขนบน และ 5,7 ของแขนล่าง เฟสยู

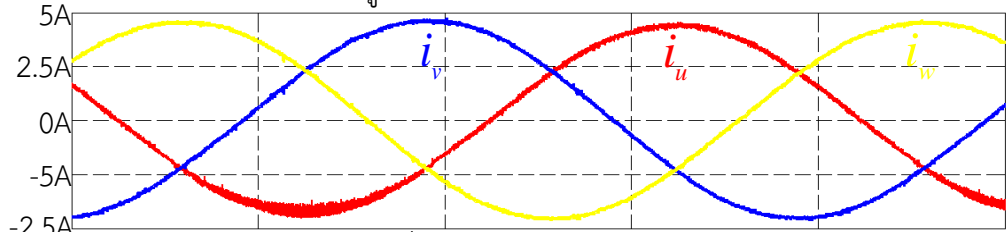


รูปที่ 5.4 (ฉ) แรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  10ms/div

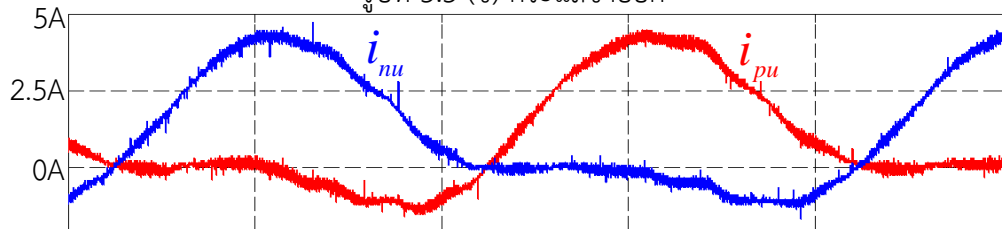
รูปที่ 5.4 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอที่ความถี่ขาออก 75 Hz



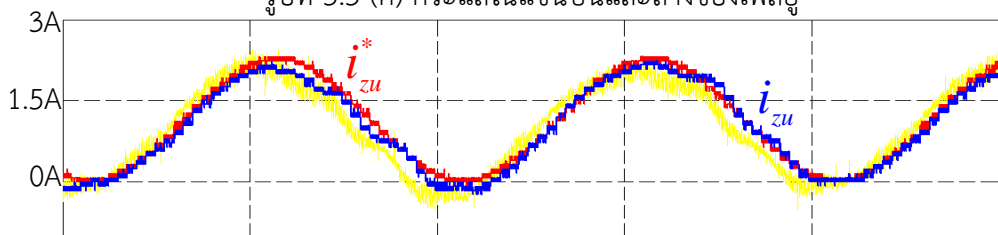
รูปที่ 5.5 (ก) แรงดันขาออก



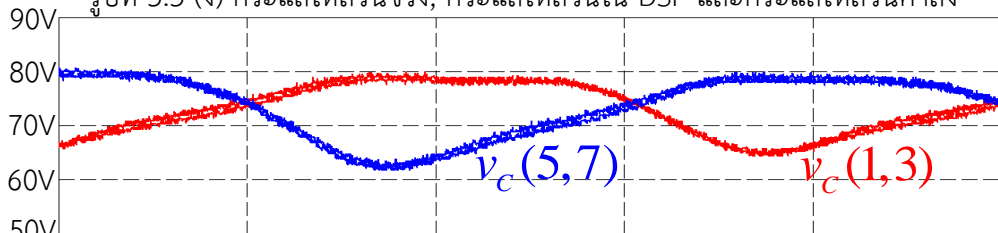
รูปที่ 5.5 (ข) กระแสขาออก



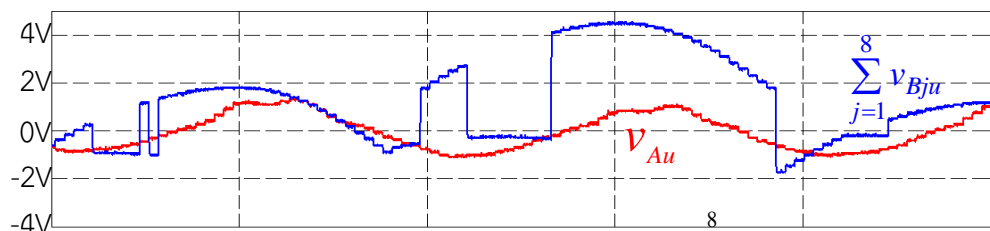
รูปที่ 5.5 (ค) กระแสในแขนบนและล่างของเฟสยู



รูปที่ 5.5 (ง) กระแสไหลวนจริง, กระแสไหลวนใน DSP และกระแสไหลวนคำสั่ง



รูปที่ 5.5 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่ 1,3 ของแขนบน และ 5,7 ของแขนล่าง เฟสยู



รูปที่ 5.5 (ฉ) แรงดันควบคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  10ms/div

รูปที่ 5.5 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอที่ความถี่ขาออก 25 Hz

## 5.4 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบที่ตัวประกอบกำลัง

### 0.642 แบบลำหลัง

รูปที่ 5.6 แสดงผลการทดสอบผลการดำเนินงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอโดยเปลี่ยนค่าตัวประกอบกำลังของโหลดเป็น 0.642 แบบลำหลัง รูปที่ 5.6 (ก) และ 5.6 (ข) แสดงแรงดันระหว่างสายและกระแสขาออกของคอนเวอร์เตอร์ โดยจะเห็นว่าคอนเวอร์เตอร์ตัวต้นแบบและระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถทำงานได้ตามต้องการถึงแม้ตัวประกอบกำลังของโหลดจะเปลี่ยนไป

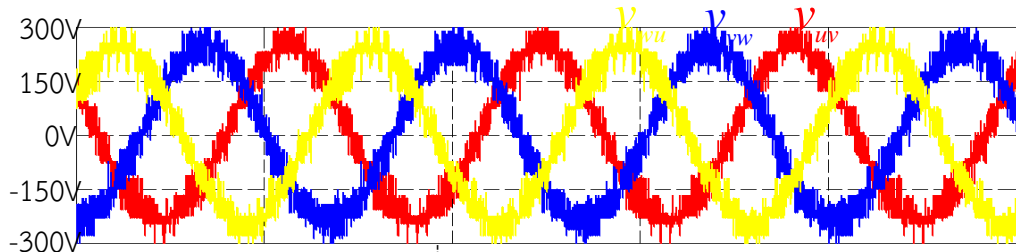
รูปที่ 5.6 (ค) แสดงกระแสที่ไหลในแขนบนและล่างของเฟสยู จะเห็นได้ว่าทิศทางของกระแสทั้งสองโดยภาพรวมจะมีลักษณะที่ตรงข้ามกัน แต่จะมีบางช่วงเวลาที่ทิศทางของกระแสทั้งสองมีทิศเดียวกันซึ่งส่งผลต่อการหักล้างกันของแรงดันควบคุมแต่ละโมดูล

รูปที่ 5.6 (ง) แสดงกระแสไหลวนจากการคำนวณของ DSP , ค่ากระแสไหลวนจริงจากการวัดด้วยเครื่องมือวัดและค่ากระแสไหลวนคำสั่งของเฟสยู จะเห็นว่ากระแสไหลวนประกอบด้วยฮาร์มอนิกอันดับที่สองและสามารถติดตามค่าคำสั่งได้ แต่ก็มีกระแสเฟื้อมเกิดขึ้นเนื่องจากวงรอบควบคุมสมดุลงำลัง/แรงดันเฉลี่ยถูกรบกวนจากผลรวมของแรงดันควบคุมแยกแต่ละโมดูล

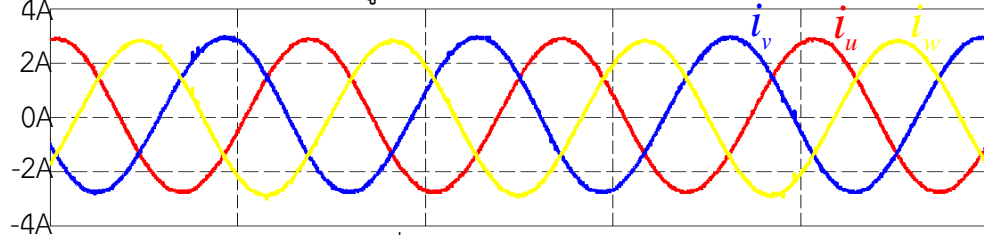
รูปที่ 5.6 (จ) แสดงแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่ 1 แขนบน และโมดูลที่ 5 ของแขนล่างของเฟสยู โดยจะเห็นว่า การแกว่งของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในแขนบนและล่าง มีทิศทางตรงข้ามกัน สำหรับโมดูลที่เหลือจะมีลักษณะแบบเดียวกันเช่นกัน โดยแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแกว่งรอบค่าคำสั่ง  $75V$  ด้วยค่ายอดการกระเพื่อม  $4V_{p-p}$  โดยเป็นการยืนยันการทำงานของวงรอบควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ในทางปฏิบัติจริงได้เป็นอย่างดี

รูปที่ 5.6 (ฉ) แสดงค่าแรงดันคำสั่งของวงรอบควบคุมสมดุลงำลัง/แรงดันเฉลี่ย ( $v_{Au}$ ) และผลรวมของแรงดันควบคุมของวงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล ( $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$ ) จะเห็นว่าค่าของ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  จะมีค่ามากในบางช่วงเวลา เนื่องจากเครื่องหมายของกระแสแขนในแขนบนและล่างเหมือนกัน เป็นผลทำให้เกิดการกระเพื่อมเกิดขึ้นในกระแสไหลวน แต่อย่างไรก็ตามวงรอบควบคุมสมดุลงำลังยังสามารถควบคุมกระแสไหลวนให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าคำสั่งได้

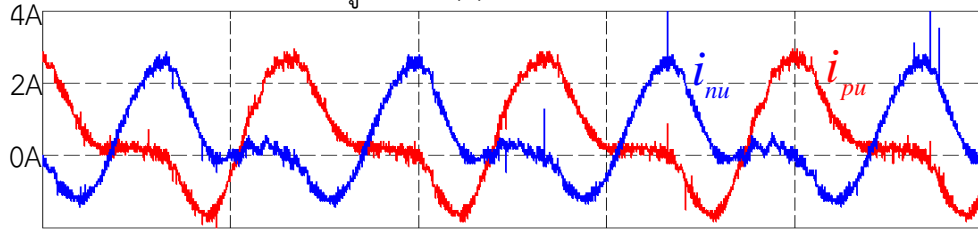




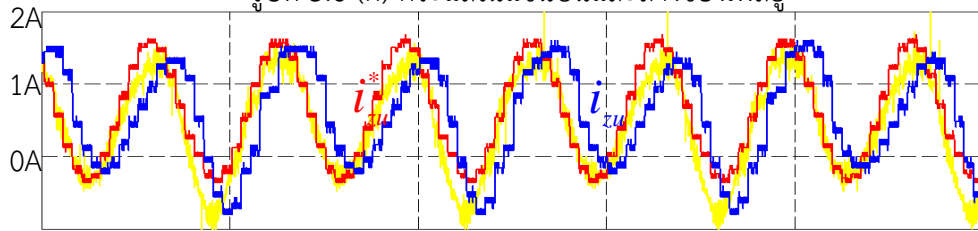
รูปที่ 5.6 (ก) แรงดันขาออก



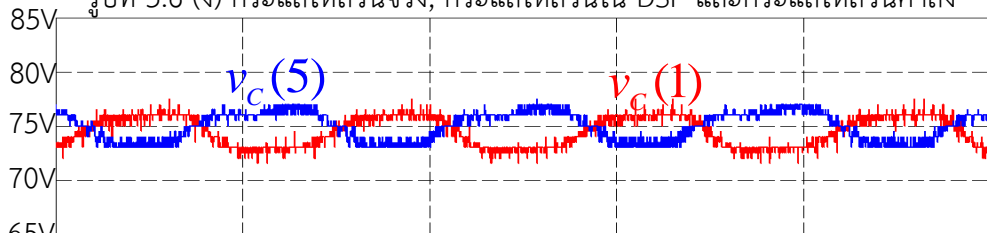
รูปที่ 5.6 (ข) กระแสขาออก



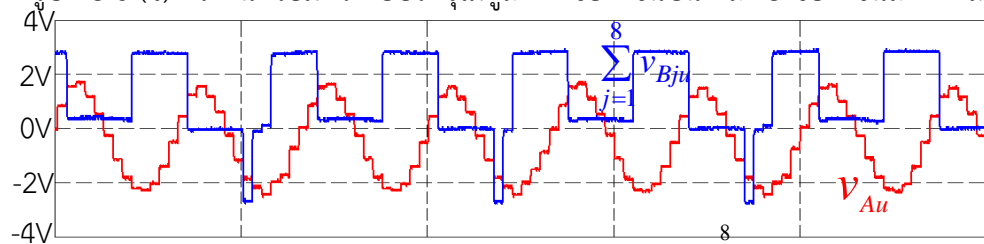
รูปที่ 5.6 (ค) กระแสในแขนบนและล่างของเฟสยู



รูปที่ 5.6 (ง) กระแสไหลวนจริง, กระแสไหลวนใน DSP และกระแสไหลวนคำสั่ง



รูปที่ 5.6 (จ) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโมดูลที่ 1 ของแขนบน และ 5 ของแขนล่าง เฟสยู



รูปที่ 5.6 (ฉ) แรงดันควมคุม  $v_{Au}$  และ  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju}$  10ms/div

รูปที่ 5.6 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบด้วยระบบควบคุมที่นำเสนอที่ตัวประกอบกำลังด้านโหลด 0.642 แบบล้าหลัง

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการควบคุมแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุแบบใหม่สำหรับคอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ โดยอาศัยสมมุติฐานว่าถ้าคอนเวอเตอร์มีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมดุลกำลังจะทำให้การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งผู้วิจัยได้วิเคราะห์สาเหตุของการกระเพื่อม ซึ่งนำไปสู่การออกแบบวงรอบควบคุมเพื่อให้คอนเวอเตอร์ทำงานได้ตามต้องการ และเพื่อเป็นการยืนยันแนวคิดทางปฏิบัติจริง คอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบการทำงาน อีกทั้งในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้ทำเสนอวงจรขับนำสวิตช์และการตรวจวัดแรงดันของตัวเก็บประจุภายในโมดูล เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้คอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ในระดับแรงดันต่ำต่อไป สำหรับประเด็นสำคัญของวิทยานิพนธ์สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) คอนเวอเตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์จะรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟตรงผ่านทางกระแสไหลวน และถ่ายพลังงานออกผ่านทางกระแสไหลต แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีพลังงานบางส่วนถูกกักเก็บอยู่ภายในคอนเวอเตอร์ ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะถูกถ่ายเทไปมาระหว่างแกนบนและล่างในเฟสเดียวกันของคอนเวอเตอร์ และพลังงานไหลวนนี้ยังเป็นสาเหตุหลักของการกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุด้วย
- 2) โดยสมมุติฐานว่าถ้าคอนเวอเตอร์มีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมดุลกำลัง จะทำให้การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์สมการสมดุลกำลัง จึงสรุปได้ว่า การที่คอนเวอเตอร์จะมีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมดุลกำลัง กระแสไหลวนภายในคอนเวอเตอร์ต้องประกอบไปด้วยส่วนของไฟตรงและฮาร์โมนิกอันดับที่สอง สำหรับการไหลของกระแสไหลวนทั้งสามเฟสจะอยู่ในรูปแบบลำดับเฟสลบ
- 3) จากการวิเคราะห์การกระเพื่อมของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ เป็นการยืนยันว่ากระแสไหลวนที่ประกอบด้วยฮาร์โมนิกอันดับที่สอง จะทำให้ค่ายอดของการกระเพื่อมของตัวเก็บประจุมีค่าน้อยที่สุดจริง และการกระเพื่อมของตัวเก็บประจุจะมีค่ามากที่สุดเมื่อฮาร์โมนิกอันดับที่สองภายในกระแสไหลวนหายไป นอกจากนี้ค่ายอดของการกระเพื่อมยัง

แปรผันตรงกับค่ากำลังขาออก แต่จะแปรผกผันกับค่าความถี่ขาออก ค่าความจุของตัวเก็บประจุ และค่าตัวประกอบกำลัง

- 4) วงรอบควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์มีด้วยกันสองวงรอบควบคุมได้แก่ วงรอบควบคุมสมดุลงำลัง/แรงดันเฉลี่ยและวงรอบควบคุมแรงดันแต่ละโมดูล สำหรับวงรอบควบคุมสมดุลงำลัง/แรงดันเฉลี่ย มีหน้าที่ทำให้คอนเวอร์เตอร์มีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมดุลงำลัง โดยควบคุมกระแสไหลวนให้มีฮาร์มอนิกที่สองตามค่าคำสั่งผ่านทางแรงดันควบคุม  $V_A$  รวมทั้งควบคุมผลรวมกำลังสองของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูลให้มีค่าเท่ากับค่าคำสั่ง สำหรับวงรอบควบคุมแรงดันแยกแต่ละโมดูล มีหน้าที่ควบคุมค่าไฟตรงของแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละโมดูลให้ตรงกับค่าคำสั่ง โดยวงรอบควบคุมทั้งสองจะมีการป้อนกลับค่าแรงดันกำลังสองเพื่อให้วงรอบควบคุมที่ลักษณะเป็นเชิงเส้น เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และหาเสถียรภาพ นอกจากนี้การป้อนกลับค่าแรงดันกำลังสองยังผ่านตัวกรองผ่านต่ำยังเป็นการลดผลกระทบจากการเชื่อมร่วมของวงรอบทั้งสองอีกด้วย
- 5) วงจรคอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อยืนยันการทำงานของวงรอบควบคุมที่นำเสนอในทางปฏิบัติจริง การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ได้ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบดิจิทัลสองชนิดได้แก่ FPGA และ DSP ทำงานคู่กัน นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอวงจรขับนำสวิตช์และวงจรตรวจวัดแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ ทำให้ขนาด และค่าใช้จ่ายของคอนเวอร์เตอร์น้อยลง ซึ่งเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ในระดับแรงดันต่ำต่อไป

## 6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ยืนยันว่าการที่กระแสไหลวนมีพฤติกรรมเป็นไปตามหลักสมดุลงำลัง จะทำให้การกระเพื่อมของตัวเก็บประจุน้อยที่สุด อีกทั้งยังเป็นการยืนยันการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบมอดูลาร์ตัวต้นแบบว่าสามารถทำงานได้ตามต้องการ แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีประเด็นต่างๆ ที่ต้องศึกษาหรือแก้ไขเพิ่มเติมดังนี้

- 1) การควบคุมกระแสไหลวนให้มีองค์ประกอบของฮาร์มอนิกอันดับที่สองด้วยตัวชดเชยแบบ PI อาจทำได้ไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร ฉะนั้นนี้อาจจะออกแบบการควบคุมใหม่โดยออกแบบตัวควบคุมในระบบพิกัดแกนหมุน จะทำให้ตัวชดเชยแบบ PI ทำงานได้ดีขึ้น

- 2) การควบคุมที่นำเสนอใช้วิธีการสร้างแรงดันด้วยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งจะทำให้มีกำลังสูญเสียสูงในกรณีที่ความถี่การสวิตช์มีค่ามาก ฉะนั้นในอนาคตอาจมีการนำแนวคิดที่นำเสนอใน วิทยานิพนธ์มาใช้ควบคู่กับการทำงานด้วยการสวิตช์แบบช้า เพื่อเป็นการลดกำลังการสูญเสียของคอนเวอร์เตอร์
- 3) การป้อนกลับแรงดันผ่านไอซี LM331 แปลงค่าแรงดันเป็นความถี่ มีความแม่นยำสูงในกรณีที่นำมาประยุกต์ใช้กับแรงดันไฟตรง แต่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุภายในโมดูลจะมีการกระเพื่อมอยู่ตลอดเวลา ฉะนั้นค่าป้อนกลับที่อ่านได้จะมีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง ในอนาคตอาจมีการนำไอซีชนิดอื่นมาประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
- 4) การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบดิจิทัล 2 ชนิด คือ DSP และ FPGA จะทำให้สัญญาณขั้วนำมีความล่าช้าไปหนึ่งคาบการคำนวณ ฉะนั้นในอนาคตอาจมีการใช้ FPGA ชนิดเดียวเพื่อกำจัดปัญหาดังกล่าว
- 5) ผลการแยกเชื่อมร่วมของการทำงานทั้งสองวงรอบอาจจะยังไม่สมบูรณ์นัก ในอนาคตอาจจะมีวิธีการอื่นๆ ที่ทำให้  $\sum_{j=1}^8 v_{Bju} = 0$  โดยสมบูรณ์ เพื่อเป็นการยืนยันการทำงานแบบแยกเชื่อมร่วมได้ดียิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] B. Gemmell, J. Dorn, D. Retzmann, and D. Soerangr, "Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission," in *IEEETDCE*, 2008, pp. 1–16.
- [2] M. Hagiwara and H. Akagi, "Control and Experiment of Pulse-Width-Modulated modular multilevel converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, pp. 1737-1746, 2009.
- [3] G. P. Adam, O. Anaya-Lara, and G. M. Burt, "Modular multilevel inverter: pulse width modulation and capacitor balancing technique," *IET Power Electron*, vol. 3, pp. 702-715, 2010.
- [4] X. Yang, X. W. J. Li, and W. Fan, "Circulating Current Model of Modular Multilevel Converter," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2011, pp. 1-6.
- [5] Q. Tu, Z. Zheng, and J. Zhang, "Circulating current suppressing controller in modular multilevel converter," in *IECON*, 2010, pp. 3198-3202.
- [6] S. Ceballos, J. Pou, C. Sanghun, and M. Saedifard, "Analysis of balancing limits in modular multilevel converter," in *IECON*, 2011, pp. 4397-4402.
- [7] H. Akagi, "Medium-voltage power converters and motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.* vol. 3, pp. 1786-1799, 2010.
- [8] M. Hagiwara, R. Maeda, and H. Akagi, "Control and Analysis of the Modular Multilevel Cascade Converters Based on Double-Star Chopper Cells (MMCC-DSCC)," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 26, pp. 1649-1658, 2011.



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐวิทย์ พานิชชอบ เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้นปีการศึกษา 2554

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- 1) Nathawit Panichchob and Somboon Sangwongwanich, New Capacitor Voltage Control For Modular Multilevel Inverters, The 2013 International Electrical Engineering Congress (iEECON2013), page 43, 2013.

