

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่าย  
ไฟตรงไม่เท่ากัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN AC POWER SOURCE USING A HYBRID CONVERTER WITH UNEQUAL DC-SOURCE H-  
BRIDGE CELLS



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

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบ ไฮบริดด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่ เท่ากัน
โดย	นายระพีพงศ์ เรียงเรียบ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณภัก

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณภัก)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.สมภาพ ผลไม้)

ระพีพงศ์ เรียงเรียบ : แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริด  
ด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน. ( AN AC POWER SOURCE  
USING A HYBRID CONVERTER WITH UNEQUAL DC-SOURCE H-BRIDGE CELLS)  
อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภิน

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน คอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวจะใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับเป็นส่วนหลักในการสร้างแรงดันและจะมีวงจรถยายเชิงเส้นทำหน้าที่ในการชดเชยแรงดันที่ผิดเพี้ยนไปและควบคุมให้แรงดันด้านออกได้ตามแรงดันคำสั่ง หลักการดังกล่าวทำให้สามารถสร้างแรงดันด้านออกที่มีคุณภาพและแบนด์วิดท์สูงกว่าคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้การมอดูเลตแบบพีดับบีวเอ็ม นอกจากนี้ในส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่นำเสนอจะใช้วิธีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน ทำให้สามารถเพิ่มจำนวนระดับของแรงดันได้มากขึ้น จึงสามารถลดการระก้างสูญเสียที่ใช้ในการชดเชยแรงดันของวงจรถยายเชิงเส้น และยังสามารถลดความซับซ้อนของวงจรโดยรวมที่ใช้ในการส่งควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ทำให้สามารถควบคุมการทำงานของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับทั้งสามเฟสได้ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว จากผลการทดสอบด้วยการสร้างแรงดันที่โหลดต่าง ๆ ทั้งโหลดที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น คอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่นำเสนอสามารถสร้างแรงดันคลื่นไซน์ที่มีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ และรองรับกระแสไฟฟ้าที่มีตัวประกอบค่ายอดได้ถึง 3 เท่า และมีค่าแบนด์วิดท์ประมาณ 5 กิโลเฮิรตซ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5970397921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Hybrid converter, Unequal dc-source, Linear Amplifier, AC Power Source, Multilevel inverter

Rapeepong Reangreab : AN AC POWER SOURCE USING A HYBRID CONVERTER WITH UNEQUAL DC-SOURCE H-BRIDGE CELLS. Advisor: Assoc. Prof. SURAPONG SUWANKAWIN, Ph.D.

This thesis proposes an ac power source using a hybrid converter with unequal dc-source h-bridge cells. The hybrid converter uses a multilevel inverter as the main part of the voltage generation and uses a linear amplifier to compensate the voltage distortion and control the output voltage corresponded to the command voltage. Such principle can achieve the higher quality and higher bandwidth in comparison to the conventional PWM converters. In addition, the proposed hybrid converter uses an unequal dc-source voltage, this method can increase the number of voltage levels of inverter. Thus, not only the power loss of linear amplifier can be reduced, but also the overall circuit is simple for implementation. This hybrid converter is, therefore, capable to operate as a three-phase ac power source with a single microcontroller. The experiment is set up to evaluate the performance of hybrid converter with various load, e.g. linear and non-linear loads. The high quality of output voltage is obtained even in the case of diode-rectifier load with crest factor of 3. For the sinusoidal steady state, the output voltage with less than 1% THDv is attained, whereas the bandwidth, measured from transience of step response, is approximately 5 kHz.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือของ รศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัย ขอขอบคุณรุ่นพี่, เพื่อน และรุ่นน้อง ในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่คอยให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย การดำเนินงานเกี่ยวกับเอกสารและการใช้โปรแกรม สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้โอกาสทางการศึกษาแก่ข้าพเจ้า รวมถึงเป็นกำลังใจและแรงผลักดันให้ตลอดช่วงเวลาทำการวิจัย

ระพีพงศ์ เรียงเรียบ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเบื้องต้น.....	1
1.2 หลักการพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดโดยใช้วงจรถยายเชิงเส้นในการชดเชยแรงดัน.....	1
1.3 คอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่เคยนำเสนอในอดีต.....	2
1.3.1 วงจรถยายไฮบริดแบบหลายเซลล์.....	2
1.3.2 วงจรถยายไฮบริดแบบมอดูลหลายระดับ.....	3
1.3.3 วงจรถยายเชิงเส้นชนิดไดโอดแคลมป์.....	4
1.3.4 วงจรถยายเชิงเส้นชนิดมอดูลาแบบเรียงต่อกัน.....	5
1.4 สรุปหัวข้อสำคัญของงานวิจัยในอดีต.....	6
1.5 แนวคิดที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้.....	8
1.6 วัตถุประสงค์.....	8
1.7 ขอบเขตของงานวิจัย.....	8
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	8

บทที่ 2	รูปแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน (Unequal DC-Source H-Bridge cells).....	9
2.1	ส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน .....	10
2.1.1	หลักการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน .....	10
2.1.2	รูปแบบการสับสวิตช์ของวงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	12
2.1.3	ตัวอย่างการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน.....	14
2.1.4	รูปแบบการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	17
2.2	ส่วนของวงจรขยายเชิงเส้น .....	19
2.2.1	ส่วนที่สร้างแรงดันชดเชยและจ่ายกำลังไฟฟ้า .....	20
2.2.2	ส่วนการคำนวณค่าแรงดันชดเชย .....	21
บทที่ 3	การออกแบบคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน.....	23
3.1	ส่วนหม้อแปลงกำลังสำหรับแรงดันบัสไฟตรง.....	23
3.1.1	การออกแบบหม้อแปลงกำลังเพื่อสร้างแรงดันบัสไฟตรง.....	24
3.1.2	วงจรการเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นสำหรับแรงดันบัสไฟตรง.....	24
3.2	ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบเอชบริดจ์.....	25
3.2.1	สวิตช์ที่ใช้งานสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์.....	26
3.2.2	การออกแบบวงจรเดดไทม์เพื่อป้องกันการเกิดลัดผ่านบัสไฟตรง.....	27
3.2.3	ปัญหาแรงดันสไปก์ที่เกิดจากการทำงานไม่พร้อมกันของสวิตช์.....	28
3.2.4	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็กเพื่อลดขนาดของแรงดันสไปก์..	32
3.3	ส่วนวงจรขยายเชิงเส้น.....	34
3.3.1	ส่วนการคำนวณแรงดันชดเชย.....	34
3.3.2	ส่วนวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า .....	34
3.4	ส่วนการควบคุมและการตรวจจับ.....	35



3.4.1	ไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	35
3.4.2	วงจรตรวจจับแรงดันไฟตรง.....	35
3.4.3	วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก .....	36
บทที่ 4	ผลการทดลองแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริด .....	37
4.1	การทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรกรองขนาดเล็ก.....	37
4.2	การทดสอบสร้างแรงดันโดยวงจรกรองขนาดเล็กเข้าไประหว่างอินเวอร์เตอร์และวงจรขยาย เชิงเส้น 40	
4.3	การทดสอบสร้างแรงดันคลื่นไซน์ 220V แบบไม่มีโหลด.....	43
4.4	การทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน.....	46
4.5	การทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ .....	50
4.6	การทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ .....	53
4.7	การทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส .....	57
4.8	การทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส.....	60
4.9	การทดสอบกลับขั้วแรงดันชั่วขณะและการลดขนาดของโอเวอร์ชูด.....	62
4.9.1	การลดขนาดโอเวอร์ชูดด้วยการเพิ่มความต้านทานในวงจรกรอง .....	64
4.9.2	การลดขนาดโอเวอร์ชูดด้วยการเพิ่มคำสั่งชดเชยในแรงดันที่ใช้สั่งอินเวอร์เตอร์หลาย ระดับ 64	
4.10	การทดสอบจำลองสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ .....	66
4.11	การทดสอบสร้างแรงดันคลื่นไซน์ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ .....	69
บทที่ 5	วิเคราะห์ผลการทดสอบ บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	70
5.1	วิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	70
5.2	บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	70
ภาคผนวก.....		72
บรรณานุกรม.....		73

ประวัติผู้เขียน..... 75



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนเวอเตอร์แบบไฮบริด .....	7
ตารางที่ 2.1 รูปแบบการสับวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 4 เซลล์ ด้วยลักษณะเลขฐาน 2.....	10
ตารางที่ 2.2 ตารางการสั่งสวิตช์ของเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์ .....	13
ตารางที่ 3.1 ตารางการออกแบบวงจรเดคใหม่ .....	28
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความเก็บประจุ และค่าความต้านทานที่ออกแบบ...	34
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรกรองขนาดเล็ก .....	37
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรกรองขนาดเล็ก.....	40
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรกรองขนาดเล็ก .....	40
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรกรองขนาดเล็ก.....	42
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบแบบไม่มีโหลด .....	43
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงผลการทดสอบแบบไม่มีโหลด.....	45
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน .....	46
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน .....	49
ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรม .....	50
ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อต่อโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน ..	53
ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรม .....	54
ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงผลการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน .....	56
ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส .....	57
ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว .	60
ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส .....	61

ตารางที่ 4.16 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส .. 62

ตารางที่ 4.17 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบกลับขั้วแรงดันชั่วขณะ ..... 62

ตารางที่ 4.18 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อทดสอบกลับขั้วแรงดันด้านออกชั่วขณะ..... 64

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบลดขนาดของโอเวอร์ชูตด้วยการเพิ่มค่าความต้านทานในวงจรกรอง ... 64

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบลดขนาดของโอเวอร์ชูตด้วยการชดเชยแรงดันที่ใช้ส่งอินเวอร์เตอร์..... 65

ตารางที่ 4.21 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบจำลองสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ..... 66

ตารางที่ 4.22 ค่า THDv ของแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับและแรงดันด้านออก..... 69



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 หลักการพื้นฐานคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริด .....	1
รูปที่ 1.2 วงจรขยายไฮบริดแบบหลายเซลล์ .....	2
รูปที่ 1.3 วงจรขยายไฮบริดแบบมอดูลาร์หลายระดับ .....	3
รูปที่ 1.4 วงจรขยายเชิงเส้นชนิดไดโอดแคลมป์ .....	4
รูปที่ 1.5 วงจรขยายเชิงเส้นชนิดมอดูลาแบบเรียงต่อกัน .....	5
รูปที่ 2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน .....	9
รูปที่ 2.2 แรงดันด้านออกของแต่ละเซลล์ และผลรวมแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อป้อนคำสั่งเป็นแรงดันคลื่นไซน์ .....	11
รูปที่ 2.3 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อป้อนแรงดันคำสั่งเป็นคลื่นไซน์ .....	12
รูปที่ 2.4 วงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์หนึ่งหน่วยเซลล์ .....	12
รูปที่ 2.5 เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เมื่อสร้างแรงดันด้านออกเป็น $+nV_{dc}$ ( $S_1, S_4$ ON) .....	13
รูปที่ 2.6 เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เมื่อสร้างแรงดันด้านออกเป็น 0 ( $S_1, S_3$ ON) .....	14
รูปที่ 2.7 เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เมื่อสร้างแรงดันด้านออกเป็น $-nV_{dc}$ ( $S_2, S_3$ ON) .....	14
รูปที่ 2.8 เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เมื่อสร้างแรงดันด้านออกเป็น 0 ( $S_2, S_4$ ON) .....	14
รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ใช้เซลล์แบบเอชบริดจ์ 4 เซลล์ต่อเรียงกัน .....	15
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อถูกสั่งให้สร้างแรงดันด้านออกเป็น $+13V_{DC}$ ...	16
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อถูกสั่งให้สร้างแรงดันด้านออกเป็น $-5V_{DC}$ .....	16
รูปที่ 2.12 วงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เซลล์ที่ n .....	17
รูปที่ 2.13 เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ $S_1 S_2$ ของทั้ง 4 เซลล์ .....	17
รูปที่ 2.14 เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ $S_3 S_4$ ของเซลล์ที่ 4 .....	18
รูปที่ 2.15 เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ $S_3 S_4$ ของเซลล์ที่ 3 .....	18

รูปที่ 2.16	เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ $S_3 S_4$ ของเซลล์ที่ 2.....	18
รูปที่ 2.17	เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ $S_3 S_4$ ของเซลล์ที่ 1.....	19
รูปที่ 2.18	แผนผังส่วนประกอบหลักของวงจรขยายเชิงเส้น .....	20
รูปที่ 2.19	วงจรขยายเชิงเส้นแบบอินเวอร์ตเมื่อป้อนคำสั่งแรงดันชดเชย .....	20
รูปที่ 2.20	แรงดันด้านออกเมื่อถูกชดเชยด้วยวงจรขยายเชิงเส้น เมื่อป้อนแรงดันคำสั่งเป็นคลื่นไซน์	21
รูปที่ 2.21	วิธีการคำนวณแรงดันชดเชยโดยใช้ออปแอมป์ขนาดเล็ก.....	22
รูปที่ 3.1	ภาพรวมของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่ใช้สำหรับทดสอบการทำงาน.....	23
รูปที่ 3.2	ค่าแรงดันด้านเข้าและด้านออกของหม้อแปลงกำลังสำหรับแรงดันบัลไฟตรง.....	24
รูปที่ 3.3	วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นด้วยไอโอดและตัวเก็บประจุสำหรับแรงดันบัลไฟตรงของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ .....	25
รูปที่ 3.4	วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นด้วยไดโอดและตัวเก็บประจุสำหรับแรงดันบัลไฟตรงของวงจรขยายเชิงเส้น .....	25
รูปที่ 3.5	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์ของแต่ละเซลล์.....	26
รูปที่ 3.6	สวิตช์และตัวขับนำสวิตช์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์.....	26
รูปที่ 3.7	วงจรเดดไทม์ที่ใช้สำหรับป้องกันการเกิดลัดผ่านของบัลไฟตรง .....	27
รูปที่ 3.8	แรงดันด้านเข้า ( $v_i$ ), แรงดันตัวเก็บประจุ ( $v_C$ ) และแรงดันด้านออก ( $v_o$ ) ของวงจรเดดไทม์	28
รูปที่ 3.9	แรงดันสไปก์ยอดอยู่กลางในกรณีที่แรงดันตกลงเป็น 0 ก่อนที่จะขึ้นเป็น $8V_{dc}$ .....	29
รูปที่ 3.10	แรงดันสไปก์ยอดอยู่กลางในกรณีที่แรงดันขึ้นเป็น $15V_{dc}$ ก่อนที่จะตกเป็น $8V_{dc}$ .....	29
รูปที่ 3.11	สถานะการสับสวิตช์ของวงจรในขณะที่ระดับแรงดันอยู่ที่ 0 เครื่องหมายลบ .....	30
รูปที่ 3.12	สถานะการสับสวิตช์ของวงจรในขณะที่สวิตช์ $S_{1n} S_{2n}$ ทำงานก่อน $S_{3n} S_{4n}$ .....	31
รูปที่ 3.13	สถานะการสับสวิตช์ของวงจรในขณะที่ระดับแรงดันอยู่ที่ 0 เครื่องหมายบวก .....	31
รูปที่ 3.14	ภาพแสดงการเกิดแรงดันสไปก์ $15V_{dc}$ เนื่องจากการเปลี่ยนเครื่องหมายของแรงดันผ่านจุดศูนย์ .....	32
รูปที่ 3.15	แรงดันสไปก์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใส่เดดไทม์ในการสับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ .	33
รูปที่ 3.16	วงจรตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็กสำหรับช่วยลดขนาดของแรงดันสไปก์.....	33

รูปที่ 3.17 แผนภาพรวมของวงจรขยายเชิงเส้นผนวกกับวงจรคำนวณแรงดันชดเชย .....	34
รูปที่ 3.18 ไอซีแยกโหนดจุดอ้างอิงระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรขยายเชิงเส้น .....	35
รูปที่ 3.19 วงจรตรวจจับแรงดันบัลไฟตรงโดยใช้ไอซีช่วยในการแยกโหนดจุดอ้างอิงระหว่างบัลไฟตรง และไมโครคอนโทรลเลอร์.....	36
รูปที่ 3.20 การสร้างแรงดันคำสั่งสำหรับวงจรขยายเชิงเส้นด้วยวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็น สัญญาณอนาล็อก .....	36
รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรรองขนาดเล็ก .....	37
รูปที่ 4.2 แรงดันด้านนอกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหลังเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีตัว เหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็ก .....	38
รูปที่ 4.3 แรงดันด้านนอกหลังผ่านการชดเชยจากวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มี ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็ก .....	38
รูปที่ 4.4 แรงดันชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำและตัว เก็บประจุขนาดเล็ก.....	39
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านนอกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อ ทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็ก .....	39
รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรรองขนาดเล็ก .....	40
รูปที่ 4.7 แรงดันด้านนอกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหลังเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรรอง ขนาดเล็ก.....	41
รูปที่ 4.8 แรงดันด้านนอกหลังผ่านการชดเชยจากวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยมี วงจรรองขนาดเล็ก .....	41
รูปที่ 4.9 แรงดันชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรรองขนาดเล็ก ...	42
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านนอกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อ ทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรรองขนาดเล็ก.....	42
รูปที่ 4.11 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบแบบไม่มีโหลด .....	43
รูปที่ 4.12 แรงดันด้านนอกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหลังเมื่อทดสอบแบบไม่มีโหลด .....	44
รูปที่ 4.13 แรงดันด้านนอกหลังผ่านการชดเชยจากวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบแบบไม่มีโหลด ....	44

รูปที่ 4.14 แรงดันชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบแบบไม่มีโหลด.....	45
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันแบบไม่มีโหลด.....	45
รูปที่ 4.16 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน.....	46
รูปที่ 4.17 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน.....	47
รูปที่ 4.18 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยแรงดันจากวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน.....	47
รูปที่ 4.19 แรงดันชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน.....	48
รูปที่ 4.20 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายโหลดเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน.....	48
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน.....	49
รูปที่ 4.22 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกัน.....	50
รูปที่ 4.23 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน.....	51
รูปที่ 4.24 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน.....	51
รูปที่ 4.25 แรงดันชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน.....	52
รูปที่ 4.26 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายโหลดเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน.....	52
รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน.....	53
รูปที่ 4.28 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน.....	53



รูปที่ 4.29 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหลังเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน .....	54
รูปที่ 4.30 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยจากวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน .....	55
รูปที่ 4.31 แรงดันชดเชยของวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน .....	55
รูปที่ 4.32 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายโหลดเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน .....	56
รูปที่ 4.33 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน .....	56
รูปที่ 4.34 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส .....	57
รูปที่ 4.35 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส .....	58
รูปที่ 4.36 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว .....	58
รูปที่ 4.37 แรงดันชดเชยของวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว .....	59
รูปที่ 4.38 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว ..	59
รูปที่ 4.39 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว .....	60
รูปที่ 4.40 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส .....	60
รูปที่ 4.41 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส .....	61
รูปที่ 4.42 กระแสไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่จ่ายให้กับโหลดเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส .....	62
รูปที่ 4.43 แรงดันด้านออกเมื่อป้อนคำสั่งให้กลับชั่วแรงดันชั่วขณะ .....	63

รูปที่ 4.44 ภาพขยายของแรงดันด้านออก ณ ช่วงที่กลับหัว.....	63
รูปที่ 4.45 แผนผังการชดเชยแรงดันที่ใช้สิ่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับเพื่อลดขนาดของโอเวอร์ชูต....	65
รูปที่ 4.46 แรงดันกลับหัวเมื่อใช้วิธีการลดขนาดโอเวอร์ชูตด้วยการชดเชยแรงดันที่ใช้สิ่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับ .....	65
รูปที่ 4.47 กราฟจำลองการเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะของขนาดแรงดันและเวลา .....	66
รูปที่ 4.48 แรงดันด้านออกทั้งสามเฟสเมื่อป้อนแรงดันคำสั่งที่จำลองการเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะของขนาดแรงดันและเวลา.....	67
รูปที่ 4.49 ภาพขยายที่ 2 ของแรงดันด้านออกที่จำลองการเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ.....	67
รูปที่ 4.50 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดเมื่อทดสอบจำลองการเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ .....	68
รูปที่ 4.51 ค่า THDv ของแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับและแรงดันด้านออกที่ระดับแรงดันต่าง ๆ .....	69

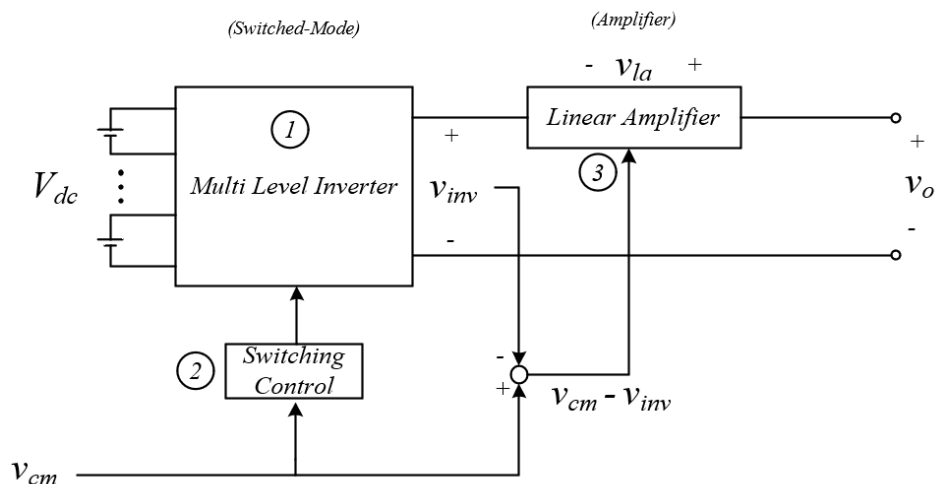
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเบื้องต้น

ในปัจจุบันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมีความสำคัญต่อระบบทดสอบ โดยมีคุณสมบัติที่ต้องการคือ คุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่ดี มีแบนด์วิดท์สูง\* มีความแม่นยำสูง และสามารถโปรแกรมแรงดันคำสั่งในรูปแบบต่าง ๆ ได้ วิธีพื้นฐานที่มีการประยุกต์ใช้คือการสร้างแหล่งจ่ายจากอินเวอร์เตอร์ที่มีการมอดูเลตแบบพีดีบีลิวเอ็มและวงจรกรองแบบแพสซีฟขนาดใหญ่พร้อมกับวงจรควบคุมแบบป้อนกลับ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีข้อจำกัดทางด้านเสถียรภาพและแบนด์วิดท์รวมถึงปัญหาของการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริด [1-7] ที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างอินเวอร์เตอร์หลายระดับและวงจรชดเชยแรงดันคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวจะมีอินเวอร์เตอร์หลายระดับเป็นส่วนหลักในการสร้างแรงดัน และใช้วงจรชดเชยแรงดันทำหน้าที่ชดเชยส่วนต่างระหว่างแรงดันคำสั่งที่เป็นรูปคลื่นไซน์และแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีรูปคลื่นแบบขั้น จากหลักการของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดดังกล่าวทำให้ได้แหล่งจ่ายแรงดันที่มีคุณภาพแรงดันที่สูง แบนด์วิดท์สูงและยังมีประสิทธิภาพที่ดี อย่างไรก็ตามในการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับจำเป็นต้องใช้สวิตช์และแหล่งจ่ายไฟตรงเป็นจำนวนมาก

### 1.2 หลักการพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดโดยใช้วงจรขยายเชิงเส้นในการชดเชยแรงดัน



รูปที่ 1.1 หลักการพื้นฐานคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริด

\* ความหมายของแบนด์วิดท์อยู่ในภาคผนวก

รูปที่ 1.1 แสดงถึงโครงสร้างหลักของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริด ซึ่งมีองค์ประกอบหลักอยู่ด้วยกัน 3 ส่วน คือ

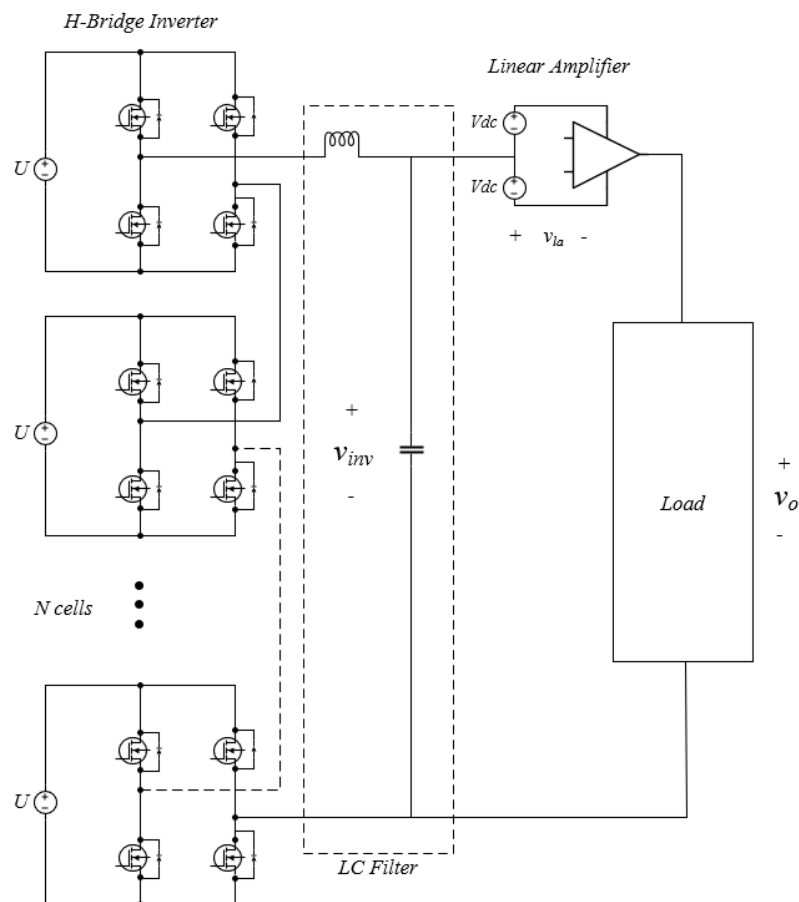
- 1) ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับ
- 2) ส่วนวงจรขยายเชิงเส้น

ส่วนควบคุมการสับสวิตช์และแรงดันของวงจรขยายเชิงเส้น

หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดจะมีส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับทำหน้าที่หลักในการสร้างแรงดันโดยมีการทำงานแบบวงรอบเปิด และให้วงจรขยายเชิงเส้นเป็นส่วนสร้างแรงดันชดเชยส่วนต่างระหว่างแรงดันคำสั่งกับแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับซึ่งทำงานแบบวงรอบปิด เพื่อให้ได้คือคุณภาพไฟฟ้าและประสิทธิภาพที่ดี ในทางปฏิบัติจะออกแบบให้ระดับแรงดันมีจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้ต้องใช้จำนวนเซลล์หรือโมดูลย่อยของอินเวอร์เตอร์ หรือจำนวนสวิตช์เพิ่มมากยิ่งขึ้น

### 1.3 คอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่แนะนำเสนอในอดีต

#### 1.3.1 วงจรขยายไฮบริดแบบหลายเซลล์

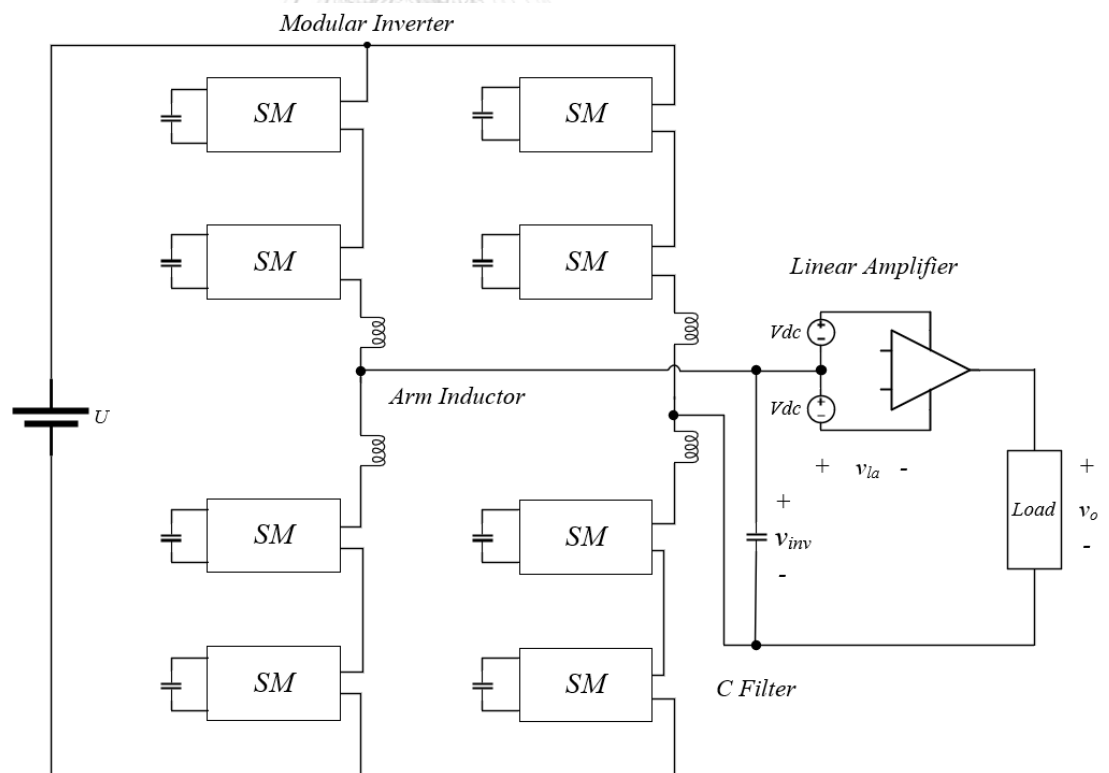


รูปที่ 1.2 วงจรขยายไฮบริดแบบหลายเซลล์

บทความ [1, 2] ได้เสนอแนวคิดของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดโดยใช้ส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเป็นแบบเอช-บริดจ์ (H-Bridge Inverter) หลาย ๆ เซลล์มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มจำนวนระดับของแรงดันให้สูงขึ้น และต่ออนุกรมกับวงจรขยายเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยจำนวนระดับของแรงดันจะเท่ากับจำนวนเซลล์ของอินเวอร์เตอร์ จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันไฟตรงของอินเวอร์เตอร์เอช-บริดจ์แต่ละเซลล์จะมีขนาดเท่ากันเท่ากับ  $U$  และที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะวงจรกรองพัลส์ซีฟขนาดเล็กรองแอมป์ประกอบความถี่สูง

ในการทำงานจะให้ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับทำหน้าที่ในการสร้างแรงดันเป็นขั้นบันไดเพื่อให้แรงดันใกล้เคียงค่าที่ต้องการมากที่สุด และส่วนต่างระหว่างแรงดันขั้นบันไดกับแรงดันคำสั่งจะถูกชดเชยด้วยวงจรขยายเชิงเส้นเพื่อให้แรงดันด้านออกเป็นไปตามที่ต้องการ หากต้องการให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้องใช้เซลล์ไฟฟ้าและสวิตช์เป็นจำนวนมาก

### 1.3.2 วงจรขยายไฮบริดแบบมอดูลาร์หลายระดับ

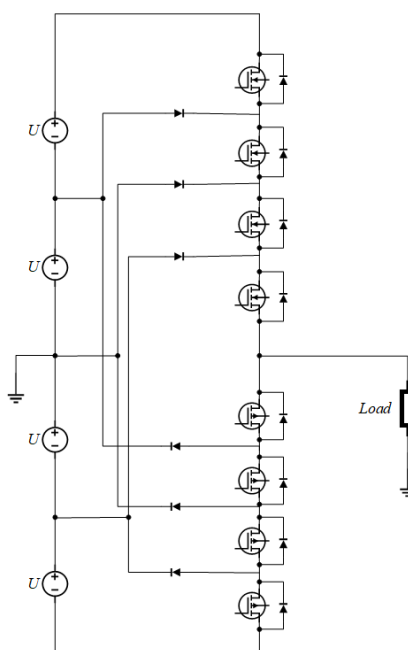


รูปที่ 1.3 วงจรขยายไฮบริดแบบมอดูลาร์หลายระดับ

บทความ [3] ได้เสนอคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดโดยใช้ส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเป็นแบบมอดูลาร์ (Modular Multilevel Inverter) และต่ออนุกรมเข้ากับวงจรขยายเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดปกติเพียงแต่ใช้ส่วนของการสร้างแรงดันขั้นบันไดเป็นอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์ และหากต้องการลดกำลังที่สูญเสียในวงจรขยายเชิงเส้น จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนระดับของแรงดันนั้นก็คือการเพิ่มจำนวนมอดูลย่อยของวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบมอดูลาร์

คอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีจุดเด่นที่ แรงดันไฟตรงด้านเข้าของแต่ละโมดูลย่อยไม่ต้องมีการแยกโดด อย่างไรก็ตามก็ตีระบบจะมีความซับซ้อนจากกลไกการควบคุมเพื่อสร้างสมดุลของแรงดันไฟตรงในแต่ละโมดูลย่อย นอกจากนี้ยังต้องมีตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ที่แต่ละขา (Arm inductor) ของอินเวอร์เตอร์อีกด้วย

### 1.3.3 วงจรขยายเชิงเส้นชนิดไดโอดแคลมป์

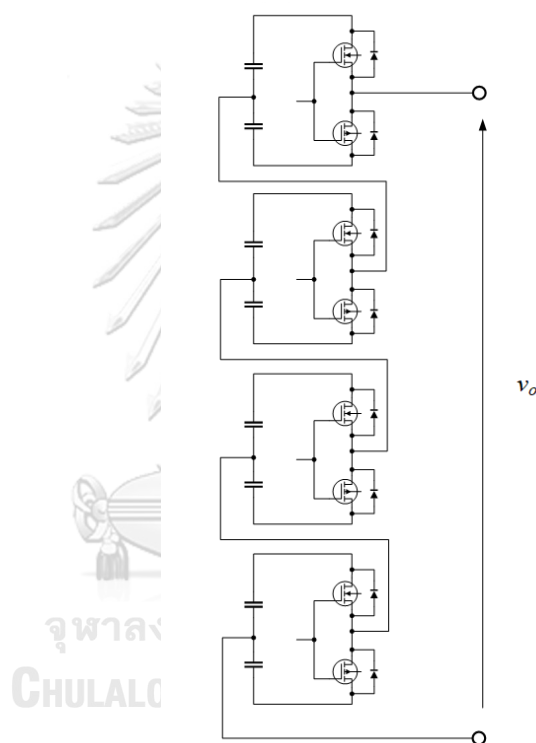


รูปที่ 1.4 วงจรขยายเชิงเส้นชนิดไดโอดแคลมป์

บทความ [4-6] ได้เสนอแนวคิดคอนเวอร์เตอร์ไฮบริดโดยใช้รูปลักษณะของวงจรไดโอดแคลมป์ดังแสดงในรูปที่ 1.4 โครงสร้างดังกล่าวจะแตกต่างจากโครงสร้างทั่วไป โดยส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับและส่วนวงจรขยายเชิงเส้นมิได้แยกออกจากกันอย่างชัดเจน ในกรณีนี้สวิตช์ทุกตัวจะผลัดกันทำงานทั้งในโหมดการสวิตช์และโหมดวงจรขยาย ทั้งนี้โหมดการทำงานจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันคำสั่ง ณ ขณะใดขณะหนึ่ง

อย่างไรก็ดีโครงสร้างดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สวิตช์ที่สามารถทำงานได้ทั้งโหมดการสวิตช์และโหมดขยายเชิงเส้น ซึ่งในทางปฏิบัติจะสามารถจัดหาได้ค่อนข้างยาก ประกอบกับจำเป็นต้องใช้สวิตช์ที่เป็นคู่ประกอบกันระหว่าง เอ็นแชนแนล มอสเฟต (N-Channel MOSFET) และ พี-แชนแนล มอสเฟต (P-Channel MOSFET) ซึ่งก็จัดหาได้ค่อนข้างยากอีกเช่นกัน

### 1.3.4 วงจรขยายเชิงเส้นชนิดมอดูลาแบบเรียงต่อกัน



รูปที่ 1.5 วงจรขยายเชิงเส้นชนิดมอดูลาแบบเรียงต่อกัน

บทความ [7] นำเสนอคอนเวอร์เตอร์ไฮบริดที่ใช้วงจรขยายเชิงเส้นชนิดมอดูลาแลลเรียงต่อกัน แนวคิดหลักจะคล้ายหลักในการทำงานจะคล้ายคลึงกับในกรณีของวงจรขยายเชิงเส้นชนิดไดโอดแคลมป์ในรูปที่ 1.4 นั่นคือสวิตช์ทุกตัวจะผลัดกันทำงานทั้งในโหมดการสวิตช์และโหมดขยายเชิงเส้น จุดที่แตกต่างคือจะใช้วงจรหลายระดับชนิดมอดูลาแบบเรียงต่อกันดังแสดงในรูปที่ 1.5 เมื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของคอนเวอร์เตอร์ไฮบริดนี้กับในกรณีของวงจรขยายเชิงเส้นชนิดไดโอดแคลมป์ในรูปที่ 1.4 แล้วจะเห็นได้ว่า วงจรนี้ยังคงมีข้อจำกัดของสวิตช์ที่ใช้ในทางปฏิบัติเช่นเดียวกัน แต่ข้อดีคือไม่จำเป็นต้องมีไดโอดแคลมป์ อย่างไรก็ตาม

ข้อเสียของวงจรนี้คือต้องใช้แหล่งจ่ายไฟตรงที่มีการแยกโดด (Isolated DC Supply) เพิ่มมากขึ้นเป็น 2 เท่า

#### 1.4 สรุปหัวข้อสำคัญของงานวิจัยในอดีต

จากการสืบค้นงานวิจัยในอดีต เราสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของคอนเวอร์เตอร์ไฮบริดแต่ละชนิด รวมถึงคอนเวอร์เตอร์ที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ดังแสดงในตารางที่ 1.1 โดยประเด็นที่งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญคือการลดจำนวนสวิตช์เพื่อความเรียบง่ายของฮาร์ดแวร์ในทางปฏิบัติ รวมถึงการควบคุมการสวิตช์ที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป





ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริด

Multilevel Power Amplifier	Topology		Switch Count	Diod e Count	Isolated DC Supply Count	Arm Inductor	Control complexity	Remark
	For switchin g mode	For linear amplifier						
1) Hybrid Multicell Amplifier [1-2]	H-bridge inverter	Separated push-pull linear amplifier connected in series	$2(L - 1)$	0	$\frac{L - 1}{2}$	Small	Simple	- Small inductor is only required for high-frequency component suppression.
2) Hybrid Modular - Multilevel Amplifier [3]	Half-bridge inverter	Separated push-pull linear amplifier connected in series	$4(L - 1)$	0	One bulk DC bus SM $2(L - 1)$	Large	Complicated	- Large arm inductor is required to limit the current ripple. - Huge computation is dedicated to the control loops of circulating current and capacitor voltage.
3) Diode-Clamped Linear Amplifier [4-6]	Diode-clamped inverter	Embedded in diode-clamped inverter structure with complementary N-channel and P-channel MOSFETs	$2(L - 1)$	$2(L - 2)$	$L - 1$	None	Moderate	- Rare sourcing for devices that design for both switching mode and linear amplifier mode.
4) Modular - Cascaded Linear Amplifier [7]	Half-bridge inverter	Embedded in half-bridge inverter structure with complementary N-channel and P-channel MOSFETs	$L - 1$	0	SM $L - 1$ DC $2(L - 1)$	None	Moderate	- Rare sourcing for matching of complementary N-Channel and P-Channel MOSFETs.
5) Unequal DC-Source H-Bridge cell (Proposed)	H-bridge inverter	Separated linear amplifier connected in series	$\log_2 \left( \frac{L+1}{2} \right)$	0	$\log_2 \left( \frac{L+1}{2} \right)$	Small	Simple	- Small inductor is only required for high-frequency component suppression.

L คือจำนวนระดับของแรงดันด้านออกที่สร้างได้

### 1.5 แนวคิดที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้

บทความ [8, 9] ได้นำแนวคิดที่ใช้แหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากันมาใช้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ทำให้สามารถเพิ่มจำนวนระดับของแรงดันด้านออกได้โดยใช้จำนวนเซลล์ของแรงดันไฟตรงเท่าเดิมซึ่งส่งผลให้แรงดันฮาร์มอนิกลดลง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์หลายระดับเป็นส่วนประกอบได้ จึงเกิดแนวคิดที่จะนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดซึ่งจะแสดงรายละเอียดในบทถัดไป

### 1.6 วัตถุประสงค์

- 1) พัฒนาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดโดยใช้แหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน
- 2) ออกแบบวิธีการควบคุมการทำงานเพื่อให้สามารถทำงานได้ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวเดียว

### 1.7 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) นำเสนอแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้การทำงานแบบไฮบริดที่ใช้แหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน
- 2) สามารถสร้างแรงดันด้านออกได้ตรงตามฟังก์ชันของแรงดันคำสั่ง
- 3) สามารถสร้างแรงดันทั้งสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 300 โวลต์ต่อเฟส และรองรับจ่ายกระแส 10 แอมแปร์ต่อเฟส

### 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีอินเวอร์เตอร์หลายระดับเป็นส่วนประกอบ
- 2) นำความรู้และหลักการไปต่อยอดเพื่อพัฒนาในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น

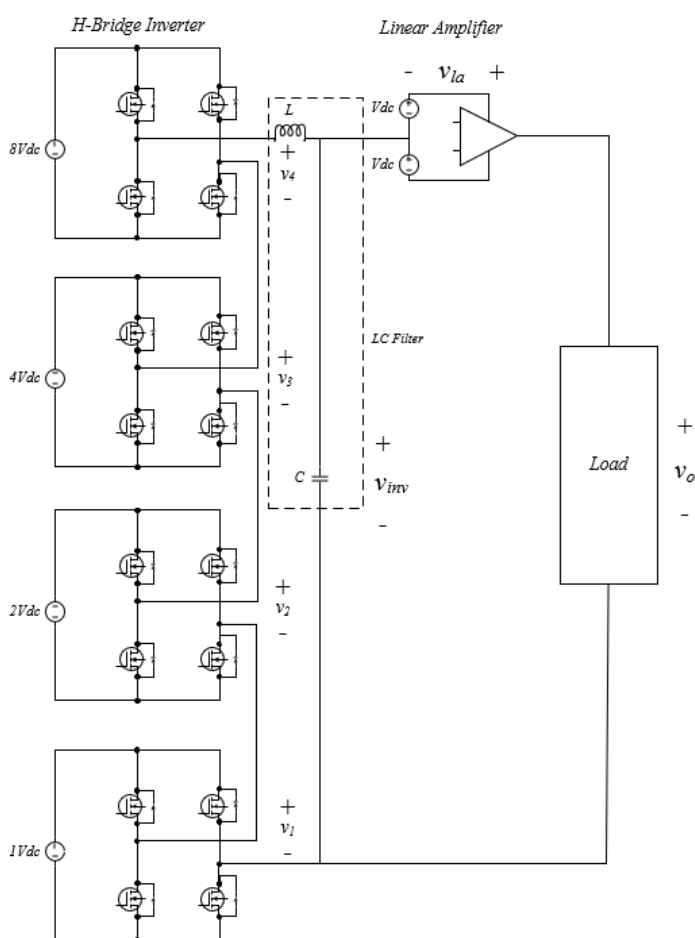
### 1.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ชนิดที่เป็นไฮบริดในแต่ละแบบ
- 2) ศึกษาอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ใช้แหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน และการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ
- 3) ออกแบบวงจรไฮบริดอินเวอร์เตอร์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน
- 4) จำลองการทำงานของวงจรและเปรียบเทียบผลการทำงานกับวงจรปกติ
- 5) ออกแบบและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์จริง
- 6) เก็บข้อมูลผลการทดสอบ

## บทที่ 2

### รูปแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน (Unequal DC-Source H-Bridge cells)

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่สร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้ส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเป็นแบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน (*Unequal DC-Source H-Bridge cells*) เพื่อเพิ่มจำนวนระดับของแรงดันให้มากขึ้น โดยยังคงใช้จำนวนสวิตช์และจำนวนเซลล์เท่าเดิม ในวงจรจะมีส่วนของวงจรขยายเชิงเส้นต่ออนุกรมอยู่ด้วยเพื่อชดเชยแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับให้แรงดันด้านออกตรงกับแรงดันคำสั่ง นอกจากนี้ในวงจรจะมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็กต่อระหว่างวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับกับวงจรขยายเชิงเส้นเพื่อแก้ปัญหาการเกิดสไปค์ของแรงดันเนื่องจากการทำงานไม่พร้อมกันในการสับสวิตช์ และยังสามารถกรองสัญญาณให้ความถี่อยู่ในช่วงที่วงจรขยายเชิงเส้นสามารถชดเชยแรงดันได้



รูปที่ 2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน

## 2.1 ส่วนของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน

สำหรับส่วนนี้จะกล่าวในเรื่องของวิธีการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถเพิ่มจำนวนระดับของแรงดันด้านออกได้โดยใช้จำนวนเซลล์ของอินเวอร์เตอร์เท่าเดิม และจะกล่าวรูปแบบการสับสวิตช์ของเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในลำดับถัดไป

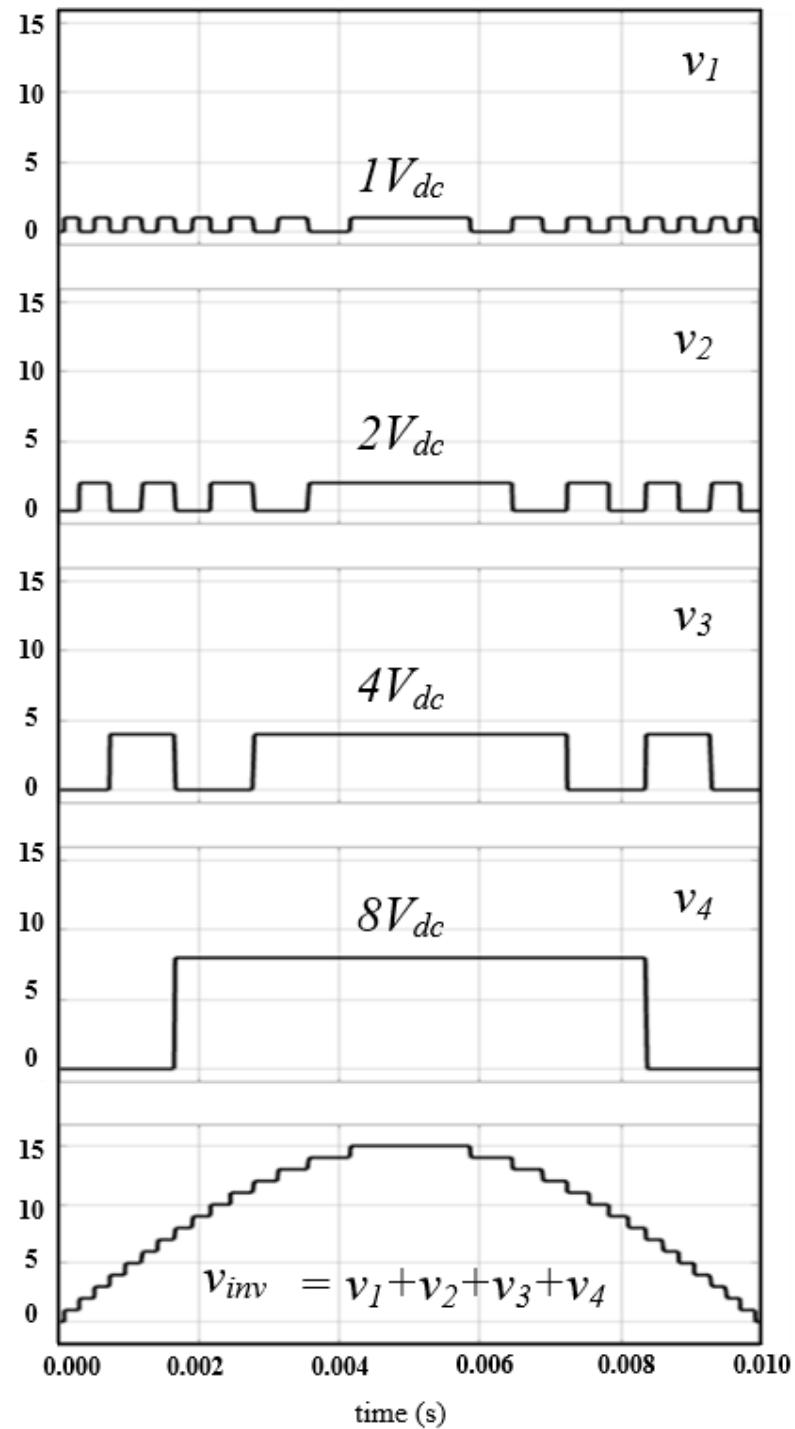
### 2.1.1 หลักการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน

ในการสร้างแรงดันจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบเอชบริดจ์ที่มีขนาดของแหล่งจ่ายไฟตรงเป็นลักษณะจำนวนเท่าของเลขสองเป็นจำนวน 4 เซลล์ นั่นคือจะใช้ขนาดแรงดันบัสไฟตรงเป็น  $V_{dc}$ ,  $2V_{dc}$ ,  $4V_{dc}$ ,  $8V_{dc}$  ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถสร้างขนาดของแรงดันได้ทั้งหมด 16 ระดับ นั่นคือ 0 ถึง  $15V_{dc}$  และรูปแบบของการสับสวิตช์ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 และกราฟตัวอย่างการสร้างแรงดันไว้ดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการสับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 4 เซลล์ ด้วยลักษณะเลขฐาน 2

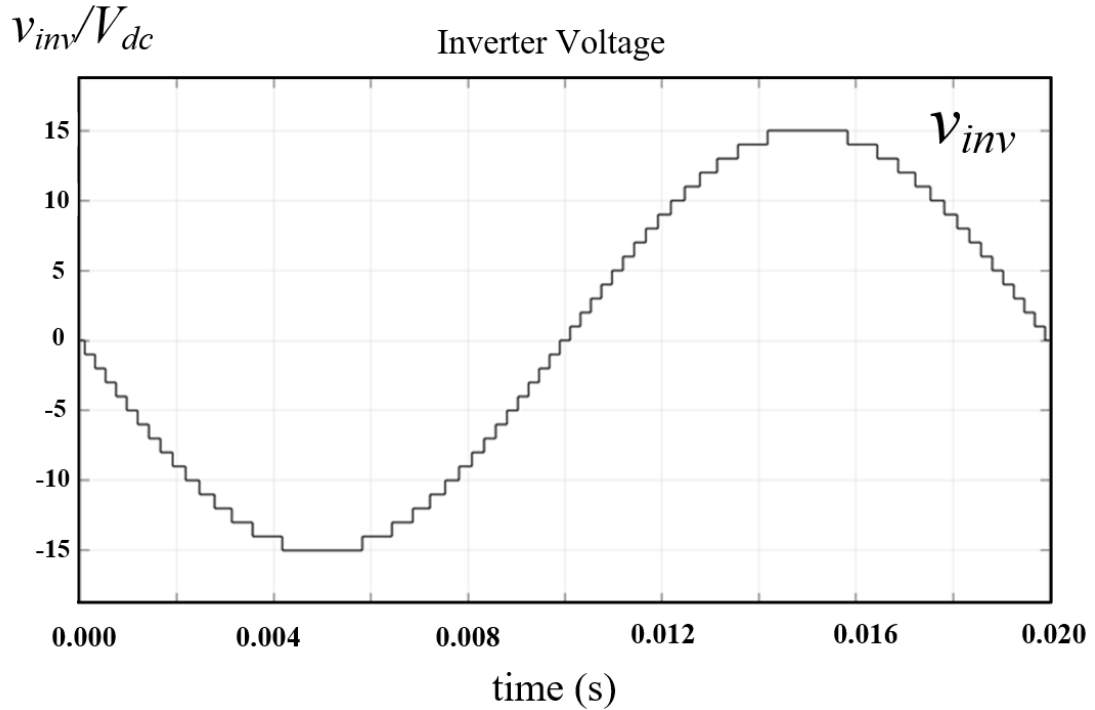
แรงดันด้านออก	$8V_{dc}$	$4V_{dc}$	$2V_{dc}$	$V_{dc}$
0	0	0	0	0
$V_{dc}$	0	0	0	$+V_{dc}$
$2V_{dc}$	0	0	$+2V_{dc}$	0
$3V_{dc}$	0	0	$+2V_{dc}$	$+V_{dc}$
$4V_{dc}$	0	$+4V_{dc}$	0	0
$5V_{dc}$	0	$+4V_{dc}$	0	$+V_{dc}$
$6V_{dc}$	0	$+4V_{dc}$	$+2V_{dc}$	0
$7V_{dc}$	0	$+4V_{dc}$	$+2V_{dc}$	$+V_{dc}$
$8V_{dc}$	$+8V_{dc}$	0	0	0
$9V_{dc}$	$+8V_{dc}$	0	0	$+V_{dc}$
$10V_{dc}$	$+8V_{dc}$	0	$+2V_{dc}$	0
$11V_{dc}$	$+8V_{dc}$	0	$+2V_{dc}$	$+V_{dc}$
$12V_{dc}$	$+8V_{dc}$	$+4V_{dc}$	0	0
$13V_{dc}$	$+8V_{dc}$	$+4V_{dc}$	0	$+V_{dc}$
$14V_{dc}$	$+8V_{dc}$	$+4V_{dc}$	$+2V_{dc}$	0
$15V_{dc}$	$+8V_{dc}$	$+4V_{dc}$	$+2V_{dc}$	$+V_{dc}$

$$v_n/V_{dc}$$



รูปที่ 2.2 แรงดันด้านออกของแต่ละเซลล์ และผลรวมแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อป้อนคำสั่งเป็นแรงดันคลื่นไซน์

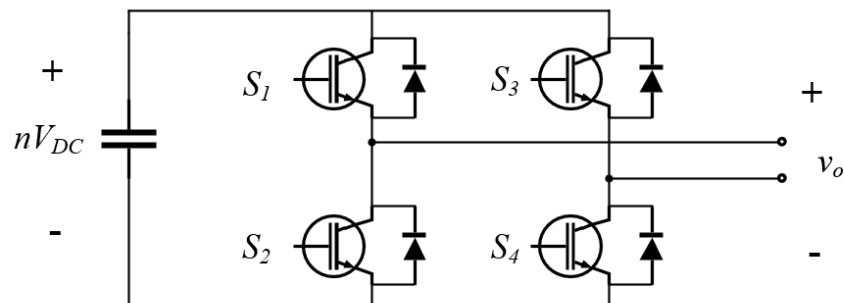
และเนื่องจากอินเวอร์เตอร์เป็นแบบเอชบริดจ์ซึ่งสามารถสร้างแรงดันได้ทั้งแรงดันบวกและแรงดันลบทำให้สามารถสร้างแรงดันได้ทั้งหมด 31 ระดับ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ เมื่อป้อนแรงดันคำสั่งเป็นคลื่นไซน์

หลังจากที่ได้กล่าววิธีการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยใช้แหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากันแล้ว ถัดไปจะเป็นการกล่าวรายละเอียดในเรื่องของรูปแบบการสับสวิตช์ของเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์ในแต่ละเซลล์

### 2.1.2 รูปแบบการสับสวิตช์ของวงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.4 วงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์หนึ่งหน่วยเซลล์

วงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์จะประกอบไปด้วยสวิตช์ 4 ตัวแบ่งเป็น 2 แขน แขนละ 2 ตัวต่อกันระหว่างแรงดันบัสไฟตรงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสวิตช์ที่อยู่แขนเดียวกันจะต้องทำงานตรง

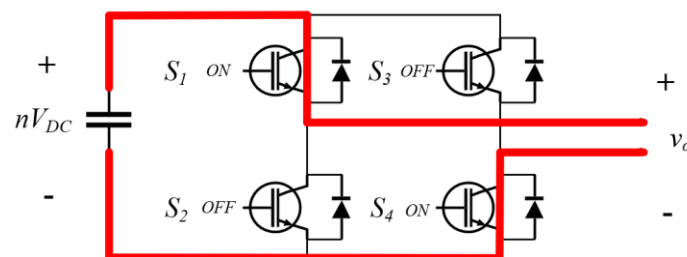
ข้ามกัน เช่น  $S_1$  ON , $S_2$  OFF ไม่สามารถ ON พร้อมกันได้เพราะจะทำให้เกิดการลัดผ่านของแรงดันบัสไฟตรงซึ่งจะเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ ในการป้องกันการลัดผ่านจะใช้การใส่เดดไทม์ในการสั่งสวิตช์ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไปในเรื่องการออกแบบอุปกรณ์

ตารางที่ 2.2 ตารางการสั่งสวิตช์ของเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์

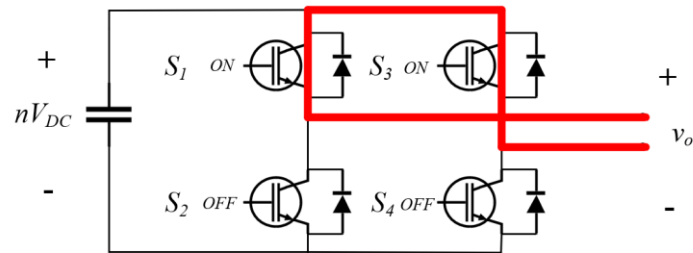
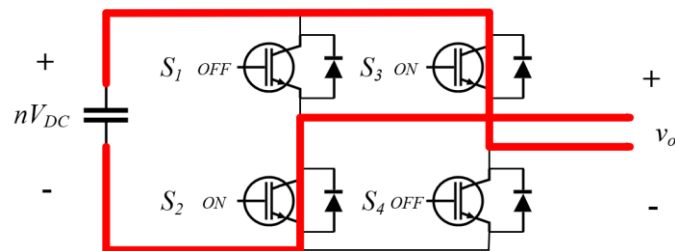
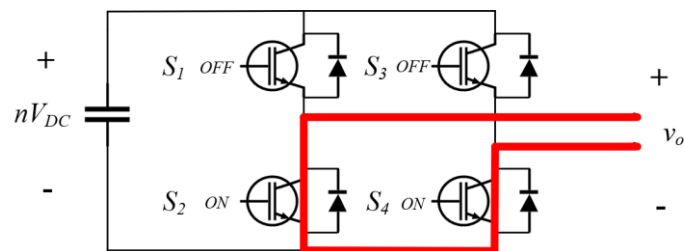
$S_1$	$S_3$	$v_o$
1	1	0
1	0	$nV_{dc}$
0	1	$-nV_{dc}$
0	0	0

จากตารางที่ 2.2 จะพบว่า สวิตช์  $S_1, S_2$  เป็นสวิตช์ที่ใช้เลือกเครื่องหมายบวกหรือลบของแรงดันด้านออก ในส่วนสวิตช์  $S_3, S_4$  เป็นสวิตช์ที่ใช้เลือกขนาดของแรงดันด้านออก ทำให้สามารถออกแบบเงื่อนไขการขับสวิตช์ได้ดังนี้

- แรงดันบวก  $S_1$  ON ( $S_2$  OFF)
  - สร้างแรงดัน  $nV_{DC}$   $S_3$  OFF ( $S_4$  ON)      ดังตัวอย่าง รูปที่ 2.5
  - สร้างแรงดัน 0  $S_3$  ON ( $S_4$  OFF)      ดังตัวอย่าง รูปที่ 2.6
- แรงดันลบ  $S_1$  OFF ( $S_2$  ON)
  - สร้างแรงดัน  $-nV_{DC}$   $S_3$  ON ( $S_4$  OFF)      ดังตัวอย่าง รูปที่ 2.7
  - สร้างแรงดัน 0  $S_3$  OFF ( $S_4$  ON)      ดังตัวอย่าง รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.5 เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เมื่อสร้างแรงดันด้านออกเป็น  $+nV_{dc}$  ( $S_1, S_4$  ON)

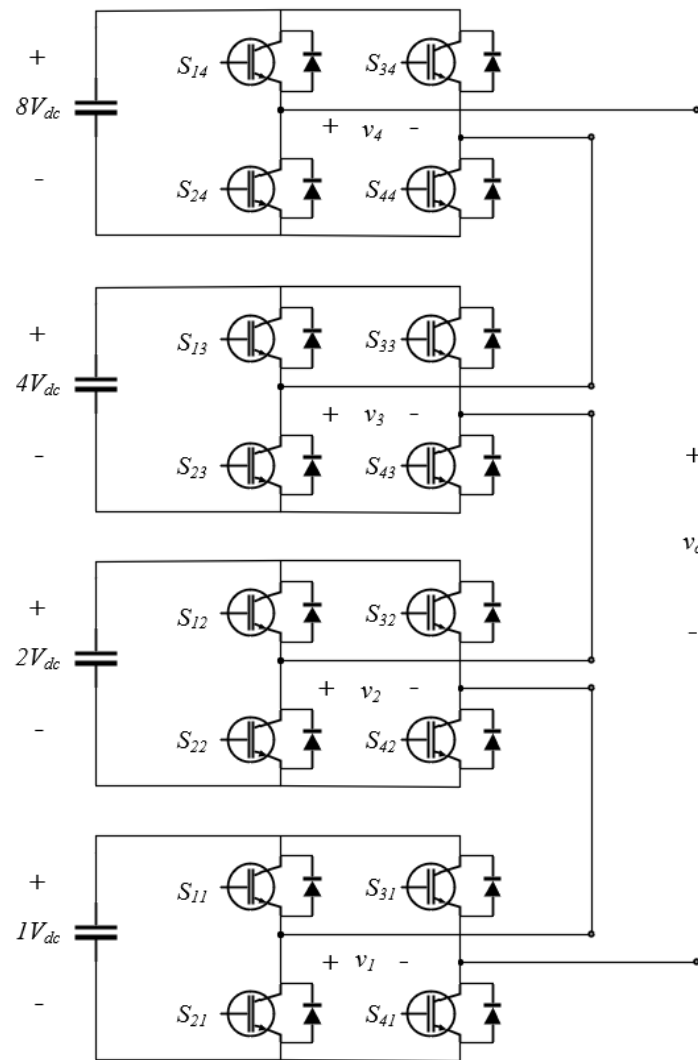
รูปที่ 2.6 เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เมื่อสร้างแรงดันด้านออกเป็น 0 ( $S_1, S_3$  ON)รูปที่ 2.7 เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เมื่อสร้างแรงดันด้านออกเป็น  $-nV_{dc}$  ( $S_2, S_3$  ON)รูปที่ 2.8 เอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เมื่อสร้างแรงดันด้านออกเป็น 0 ( $S_2, S_4$  ON)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

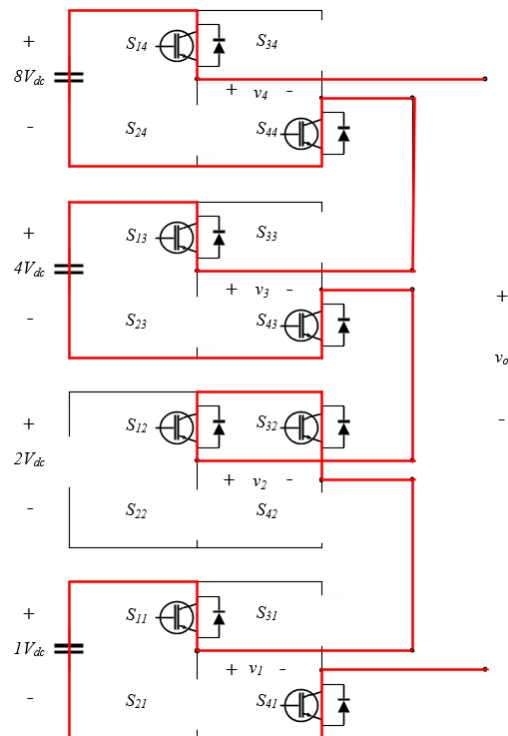
### 2.1.3 ตัวอย่างการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน

จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว เงื่อนไขที่ใช้ในการสับสวิตช์คือเครื่องหมายและขนาดของแรงดันคำสั่ง ถ้าหากแรงดันคำสั่งมีเครื่องหมายบวกโปรแกรมจะสั่งให้สวิตช์  $S_1$   $S_2$  ของอินเวอร์เตอร์ในทุกโมดูลสับสวิตช์เป็น  $S_1$  ON และ  $S_2$  OFF ในทางกลับกันหากต้องการแรงดันคำสั่งมีเครื่องหมายลบโปรแกรมจะสั่งให้สวิตช์  $S_1$   $S_2$  ของอินเวอร์เตอร์ในทุกโมดูลสับสวิตช์เป็น  $S_1$  OFF และ  $S_2$  ON รูปที่ 2.9 - รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของการสั่งสวิตช์  $S_1$   $S_2$  เพื่อสร้างแรงดันที่มีเครื่องหมายบวกและเครื่องหมายลบ

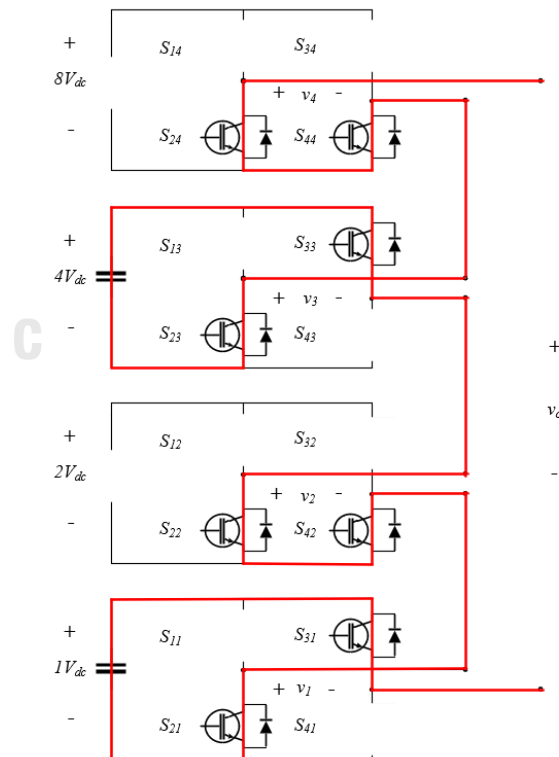




รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ใช้เซลล์แบบเอชบริดจ์ 4 เซลล์ต่อเรียงกัน



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อถูกสั่งให้สร้างแรงดันด้านออกเป็น  $+13V_{DC}$



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างวงจรอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อถูกสั่งให้สร้างแรงดันด้านออกเป็น  $-5V_{DC}$

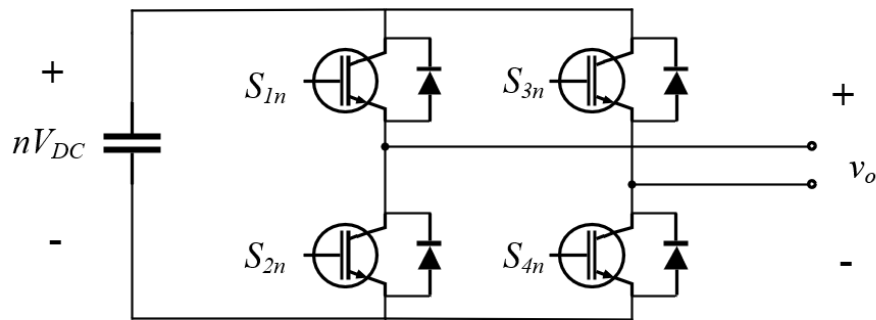
### 2.1.4 รูปแบบการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของไมโครคอนโทรลเลอร์

เงื่อนไขในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) เครื่องหมายของแรงดันคำสั่ง ( $S_{1n}$   $S_{2n}$ )

2) ขนาดของแรงดันคำสั่ง ( $S_{3n}$   $S_{4n}$ )

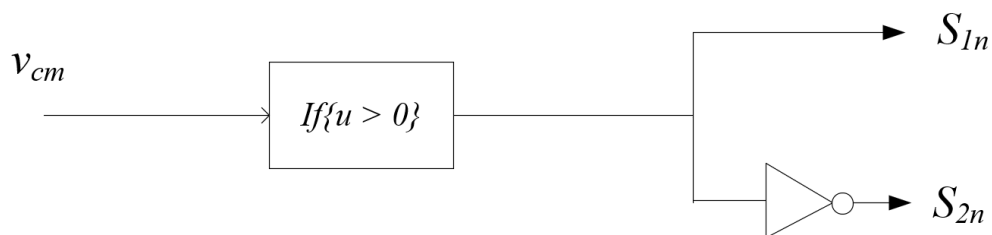
$S_{1n}$   $S_{2n}$   $S_{3n}$   $S_{4n}$  คือ สวิตช์ของเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 วงจรเอชบริดจ์อินเวอร์เตอร์เซลล์ที่  $n$

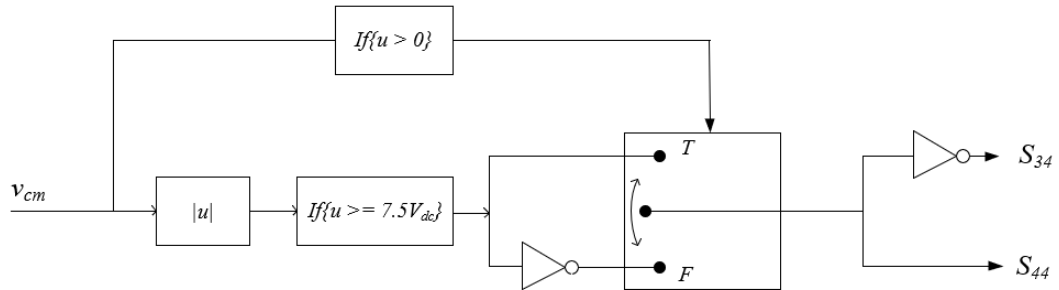
สำหรับสวิตช์  $S_{1n}$   $S_{2n}$  ใช้สำหรับกำหนดเครื่องหมายของแรงดันด้านออก ทำให้สามารถใช้สัญญาณขับนำสวิตช์เดียวกันทั้ง 4 เซลล์ได้ดังรูปที่ 2.13

สำหรับสวิตช์  $S_{3n}$   $S_{4n}$  ของแต่ละเซลล์จะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันและเครื่องหมายของแรงดันคำสั่งโดยมีลำดับขั้นตอนของแต่ละเซลล์ดังรูปที่ 2.14 -รูปที่ 2.17

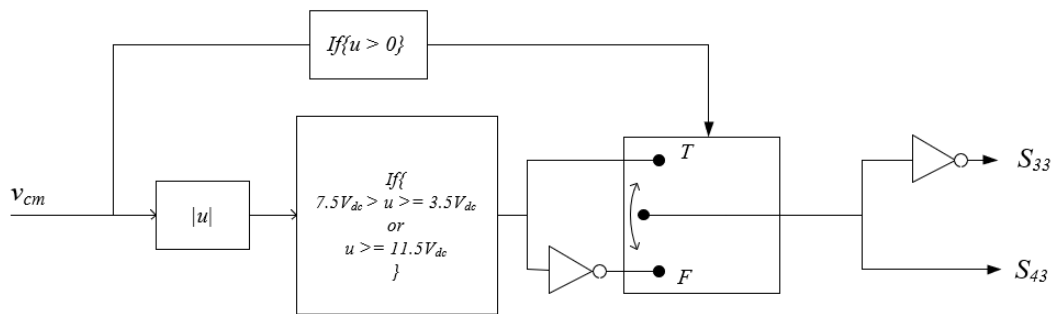


รูปที่ 2.13 เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์  $S_1$   $S_2$  ของทั้ง 4 เซลล์

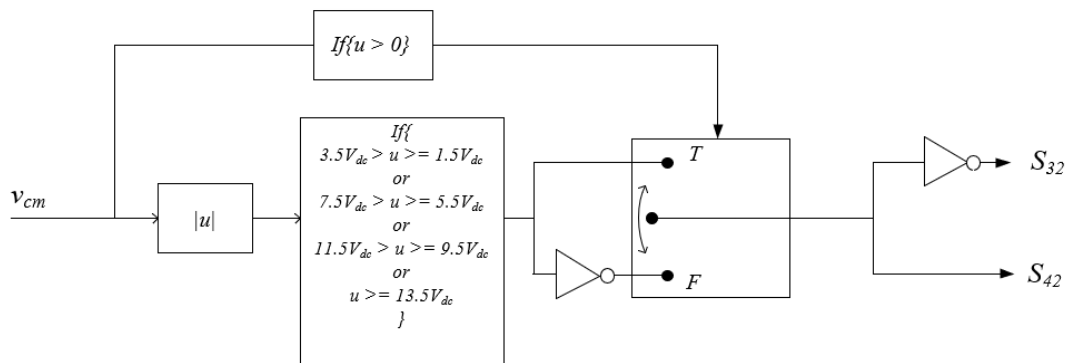
สำหรับเซลล์ที่ 4



รูปที่ 2.14 เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์  $S_3 S_4$  ของเซลล์ที่ 4 สำหรับเซลล์ที่ 3

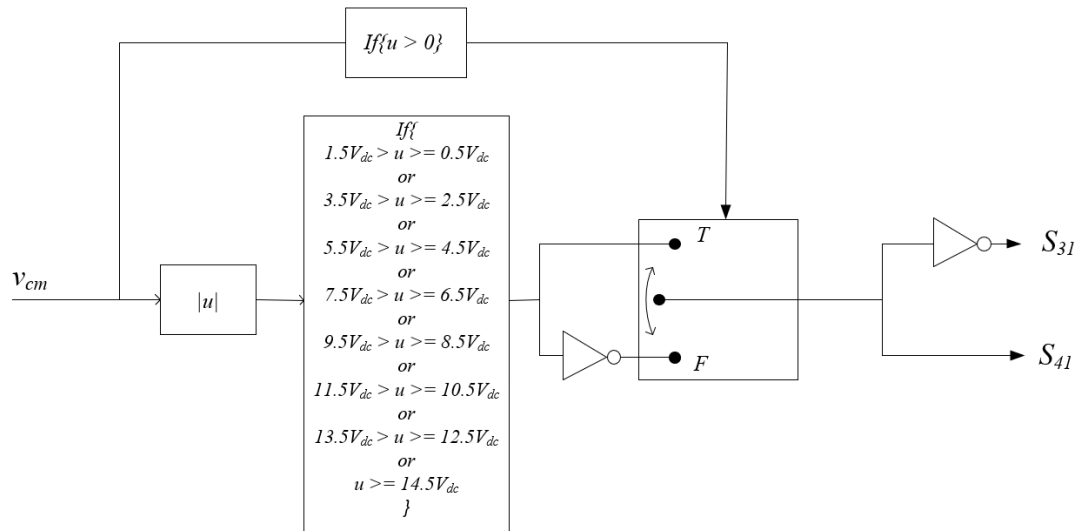


รูปที่ 2.15 เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์  $S_3 S_4$  ของเซลล์ที่ 3 สำหรับเซลล์ที่ 2



รูปที่ 2.16 เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์  $S_3 S_4$  ของเซลล์ที่ 2

สำหรับเซลล์ที่ 1

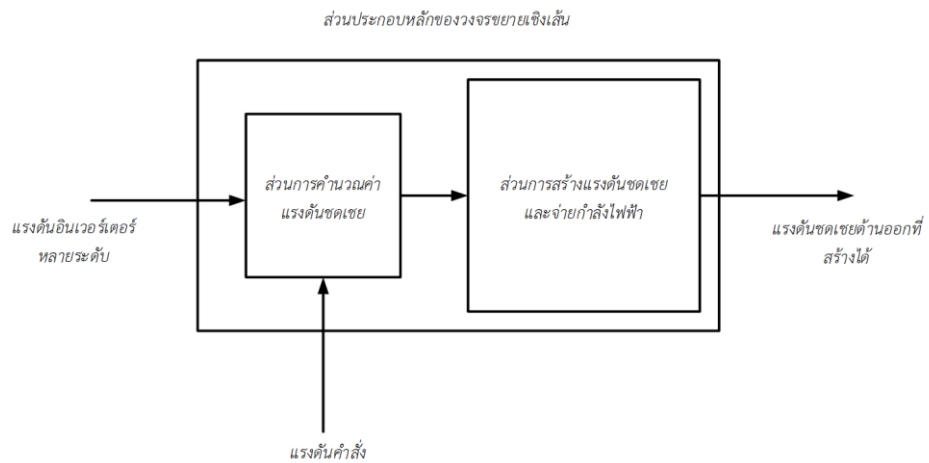


รูปที่ 2.17 เงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์  $S_3$   $S_4$  ของเซลล์ที่ 1

จากเงื่อนไขการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบหนึ่งเฟส จะเห็นได้ว่ามีรูปแบบที่แตกต่างกันทั้งหมด 10 ช่อง (สร้างเครื่องหมายแรงดัน 2 ช่อง และ สร้างขนาดแรงดัน 8 ช่อง) ดังนั้นหากต้องการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบสามเฟส จะต้องใช้รูปแบบการขับนำสวิตช์ทั้งหมด 30 ช่องซึ่งจะสั่งด้วยพอร์ต GPIO ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และในทางปฏิบัติจะทำการตรวจจับแรงดันไฟตรงของแต่ละเซลล์เข้ามาใช้ในการเปรียบเทียบแรงดันคำสั่งเพื่อให้แรงดันด้านออกมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

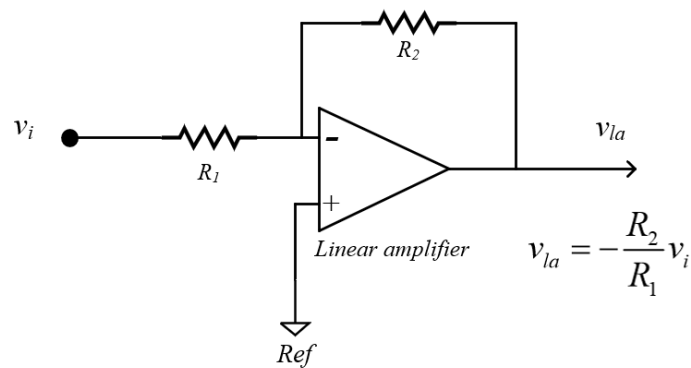
## 2.2 ส่วนของวงจรขยายเชิงเส้น

หน้าที่ที่สำคัญของวงจรขยายเชิงเส้นคือการชดเชยแรงดันส่วนต่างระหว่างแรงดันคำสั่งและอินเวอร์เตอร์หลายระดับ วงจรขยายเชิงเส้นจึงประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนวงจรที่จ่ายกำลังไฟฟ้า 2) ส่วนของการคำนวณแรงดันชดเชย ดังรูปที่ 2.18 โดยในส่วนของการคำนวณแรงดันชดเชยจะใช้วงจรออปแอมป์ขนาดเล็กในการสร้างแรงดันผลต่างระหว่างแรงดันคำสั่งกับแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ และส่วนวงจรที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจะรับค่าผลต่างแรงดันมาขยายเพื่อสร้างแรงดันชดเชยให้แรงดันด้านออกตรงกับค่าแรงดันคำสั่ง



รูปที่ 2.18 แผนผังส่วนประกอบหลักของวงจรรขยายเชิงเส้น

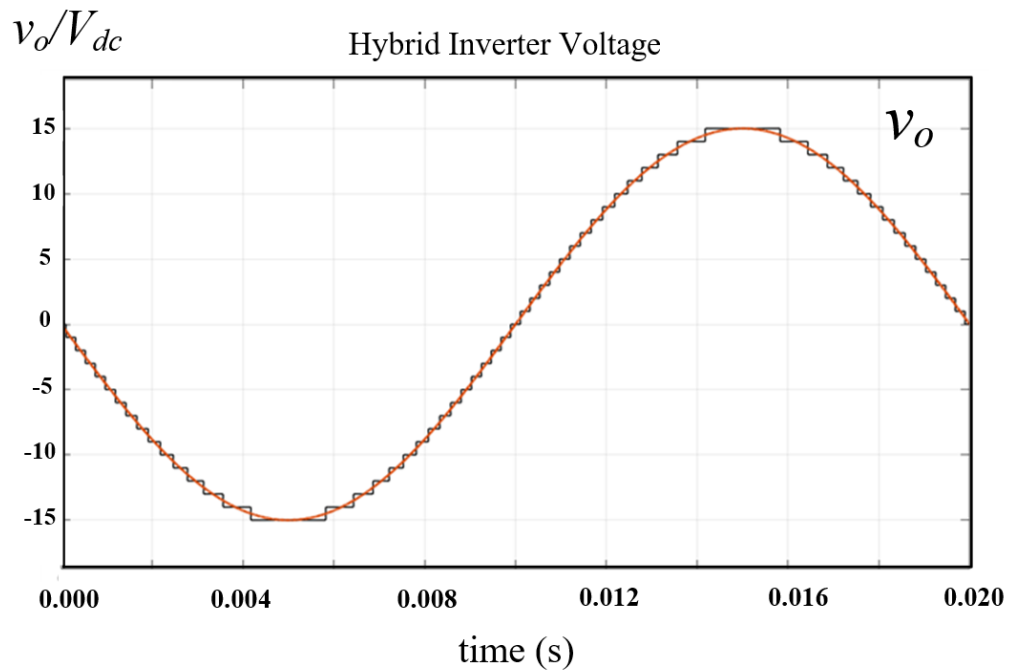
### 2.2.1 ส่วนที่สร้างแรงดันชดเชยและจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2.19 วงจรรขยายเชิงเส้นแบบอินเวอร์ตเมื่อป้อนคำสั่งแรงดันชดเชย

รูปที่ 2.19 แสดงวงจรรขยายเชิงเส้นแบบอินเวอร์ต ซึ่งสามารถสร้างแรงดันด้านออกได้ตามที่ต้องการด้วยแรงดันคำสั่งโดยมีอัตราขยายของแรงดันคำสั่งเป็นดังสมการที่ (2.1) และเมื่อนำมาต่อเรียงอนุกรมกับอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะสามารถสร้างแรงดันด้านออกรวมให้เป็นไปตามแรงดันคำสั่งได้ ตัวอย่างการสร้างแรงดันไซน์จากอินเวอร์เตอร์หลายระดับทำงานร่วมกับวงจรรขยายเชิงเส้นถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.20 และในส่วนของวิธีการคำนวณค่าแรงดันชดเชยจะกล่าวในลำดับถัดไป

$$v_{la} = -\frac{R_2}{R_1} v_i \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.20 แรงดันด้านออกเมื่อถูกชดเชยด้วยวงจรถยายเชิงเส้น เมื่อป้อนแรงดันคำสั่งเป็นคลื่นไซน์

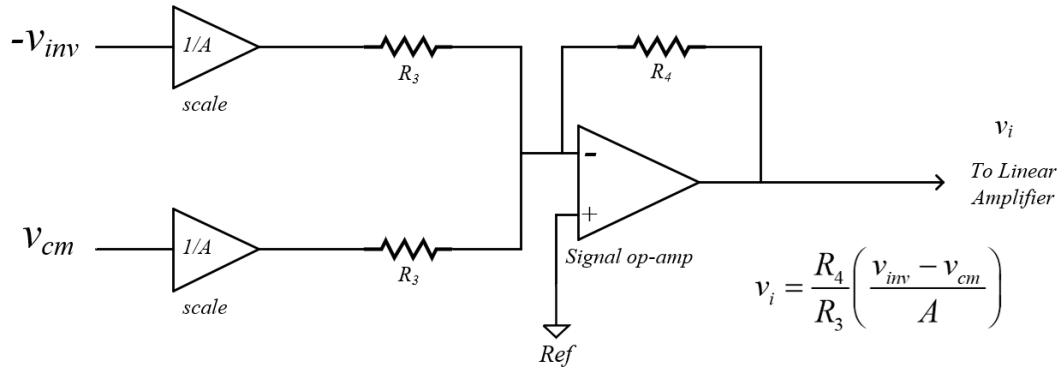
### 2.2.2 ส่วนการคำนวณค่าแรงดันชดเชย

ในส่วนของการคำนวณค่าแรงดันชดเชยจะต้องใช้การตรวจจับแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเพื่อมาคำนวณหาผลต่างกับแรงดันคำสั่ง โดยมีขั้นตอนการทำงานดังแผนภาพรูปที่ 2.21 จากแผนภาพจะสามารถหาผลต่างของแรงดันได้จากวงจรถยายผลบวกโดยมีค่าแรงดันลบของอินเวอร์เตอร์หลายระดับบวกกับค่าแรงดันคำสั่ง ซึ่งได้แรงดันด้านออกดังสมการ (2.2) และเมื่อนำไปผนวกกับสมการ (2.1) จะได้ค่าแรงดันชดเชยของวงจรถยายเชิงเส้นตามสมการ (2.3) โดย  $A$  คืออัตราย่อขนาดของแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับและแรงดันคำสั่ง ส่วน  $R_1, R_2, R_3, R_4$  คือค่าความต้านทานที่ใช้กำหนดอัตราขยายของวงจรถยายเชิงเส้น และเพื่อให้ได้ค่าแรงดันชดเชยตรงกับแรงดันคำสั่งจริงจะต้องกำหนดค่าความต้านทานให้ตัวคูณขยายเป็นหนึ่งหน่วยพอดีนั่นคือเงื่อนไขสมการที่ (2.4)

$$v_i = \frac{R_4}{R_3} \left( \frac{v_{inv} - v_{cm}}{A} \right) \quad (2.2)$$

$$v_{la} = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3 A} (v_{cm} - v_{inv}) \quad (2.3)$$

$$\frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} = A \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.21 วิธีการคำนวณแรงดันชดเชยโดยใช้โอปแอมป์ขนาดเล็ก

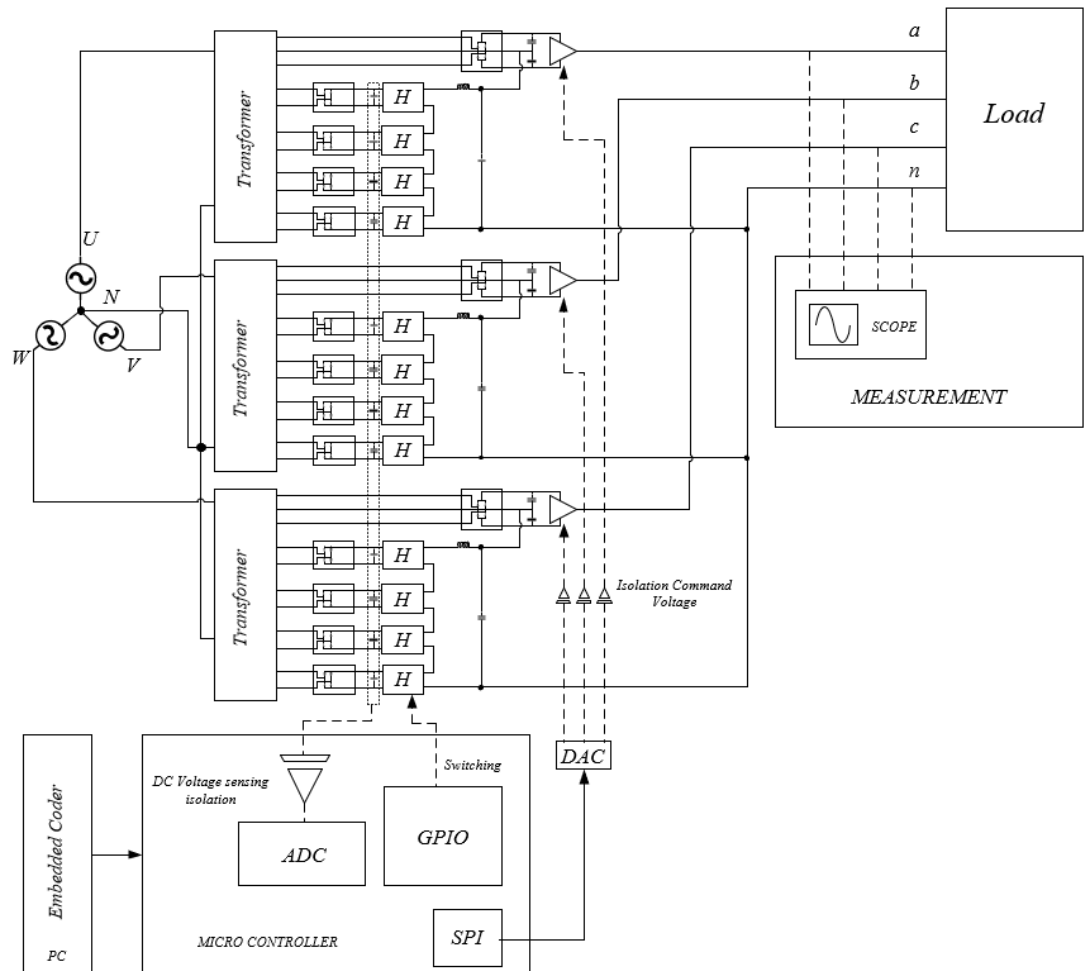
จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นสรุปได้ว่าวงจรขยายเชิงเส้นสามารถสร้างแรงดันชดเชยได้โดยใช้การตรวจจับแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับด้วยอัตราย่อขยายและนำมาผ่านวงจรคำนวณแรงดันชดเชยซึ่งใช้โอปแอมป์ขนาดเล็กในการคำนวณ และนำค่าแรงดันที่คำนวณได้ดังกล่าวไปส่งและขยายโดยวงจรขยายเชิงเส้นขนาดใหญ่ที่ใช้สำหรับจ่ายกำลัง อย่างไรก็ตามแรงดันคำสั่ง ( $v_{cm}$ ) ที่ใช้จะต้องเป็นสัญญาณอนาล็อกซึ่งจะกล่าววิธีการสร้างแรงดันคำสั่งที่เป็นสัญญาณอนาล็อกไว้ในบทถัดไปในหัวข้อการออกแบบอุปกรณ์



### บทที่ 3

#### การออกแบบคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน

รูปที่ 3.1 ภาพรวมของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่ใช้สำหรับทดสอบการทำงาน โดยอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ทดสอบของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนของหม้อแปลงกำลังและบัสไฟตรง 2) อินเวอร์เตอร์หลายระดับ 3) ส่วนวงจรขยายเชิงเส้น 4) ส่วนการควบคุมและการตรวจจับ



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่ใช้สำหรับทดสอบการทำงาน

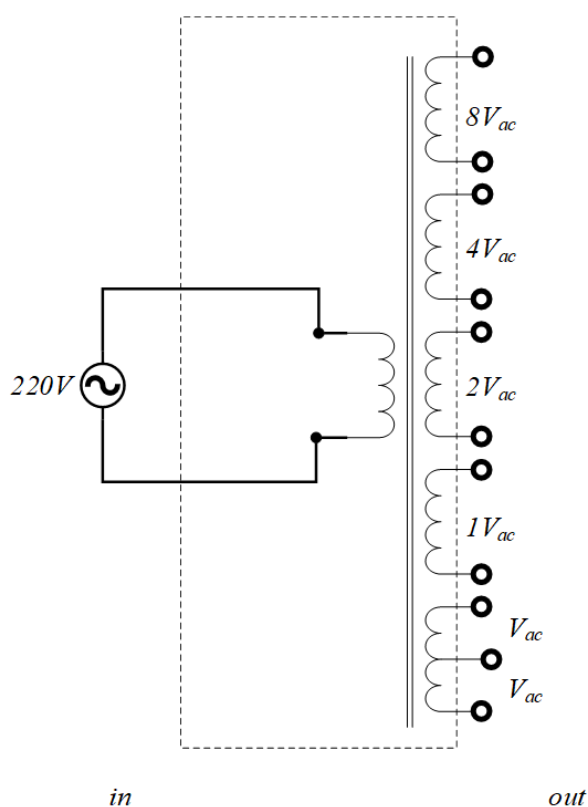
#### 3.1 ส่วนหม้อแปลงกำลังสำหรับแรงดันบัสไฟตรง

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟตรงที่แยกโดดจากกันเป็นจำนวนหลายจำนวน ในการสร้างแรงดันไฟตรงจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัว

ช่วยในการสร้างแหล่งจ่ายย่อยหลายแหล่งที่แยกโดดกัน และใช้การเรียงกระแสไฟฟ้าด้วย ไดโอดแบบเต็มคลื่นประกอบเข้ากับตัวเก็บประจุเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟตรง

### 3.1.1 การออกแบบหม้อแปลงกำลังเพื่อสร้างแรงดันบัลไฟตรง

หม้อแปลงทางฝั่งด้านปฐมภูมิจะรับแรงดันกระแสสลับ 220 V และฝั่งด้านทุติยภูมิ จะแยกขดลวดออกเป็น 5 ขด โดย 4 ขดแรกจะใช้สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับซึ่งจะมี จำนวนอัตราส่วนรอบเป็นจำนวนเท่าของเลขสอง และอีก 1 ขดจะใช้สำหรับวงจรขยายเชิง เส้นซึ่งขดลวดนี้จะมีแทปกกลางเพื่อใช้เป็นแรงดันอ้างอิงสำหรับวงจรขยายเชิงเส้น โดยให้ฝั่ง ปฐมภูมิจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ถึง 1500 VA

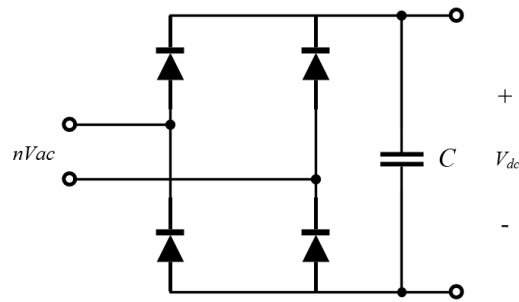


รูปที่ 3.2 ค่าแรงดันด้านเข้าและด้านออกของหม้อแปลงกำลังสำหรับแรงดันบัลไฟตรง

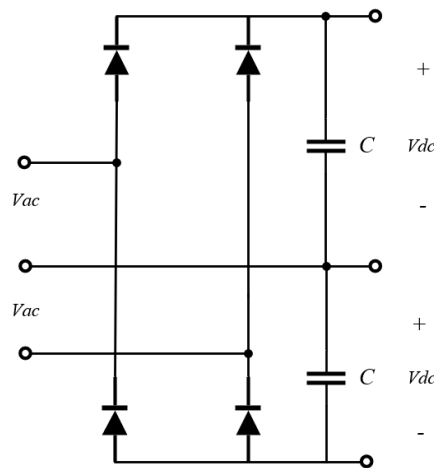
### 3.1.2 วงจรการเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นสำหรับแรงดันบัลไฟตรง

วงจรการเรียงกระแสที่ใช้จะแบ่งออกเป็น 2 แบบ แบบแรกคือ ใช้สำหรับ อินเวอร์เตอร์ (รูปที่ 3.3) และอีกแบบจะใช้สำหรับวงจรขยายเชิงเส้น (รูปที่ 3.4) สำหรับ แบบแรก (รูปที่ 3.3) จะใช้ไดโอด 4 ตัวในการเรียงกระแสและใช้ตัวเก็บประจุ 1 ตัวช่วยใน การรักษาระดับแรงดันให้คงที่วงจรชนิดนี้จะไม่มีความดันกึ่งกลางบัลซึ่งเหมาะกับอินเวอร์เตอร์ แบบเอชบริดจ์

สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบที่ 2 (รูปที่ 3.4) จะใช้ไดโอด 4 ตัวในการเรียงกระแส เช่นเดียวกันแต่จะใช้ตัวเก็บประจุ 2 ตัวต่ออนุกรมกันและนำจุดกึ่งกลางระหว่างตัวเก็บประจุ มาต่อตรงกับแทปกกลางของหม้อแปลง วงจรชนิดที่ 2 นี้จะมีแรงดันกึ่งกลางบัลซึ่งต้องใช้เป็น แหล่งจ่ายให้กับวงจรขยายเชิงเส้นที่จำเป็นต้องมีแรงดันกึ่งกลางเป็นจุดอ้างอิง



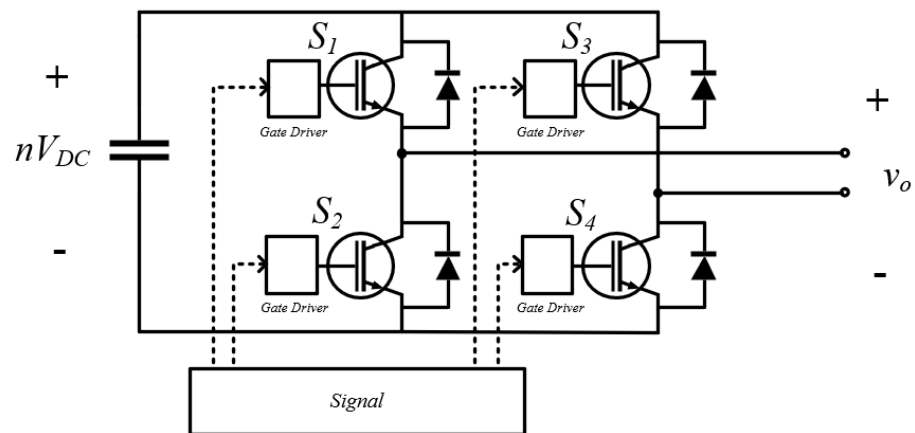
รูปที่ 3.3 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นด้วยไอโอดและตัวเก็บประจุสำหรับแรงดันบัลไฟตรงของ อินเวอร์เตอร์หลายระดับ



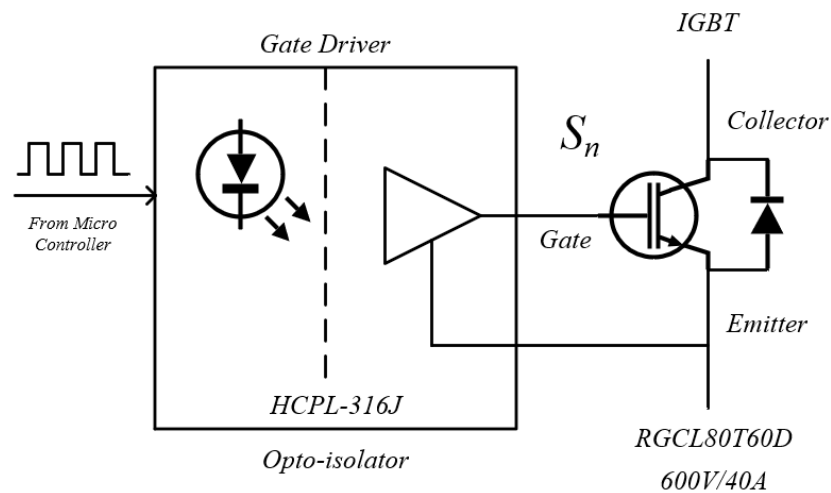
รูปที่ 3.4 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นด้วยไดโอดและตัวเก็บประจุสำหรับแรงดันบัลไฟตรงของ วงจรขยายเชิงเส้น

### 3.2 ส่วนอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบเอชบริดจ์

รูปที่ 3.5 แสดงหนึ่งเซลล์อินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์ซึ่งประกอบไปด้วย 4 สวิตช์ แต่ละสวิตช์จะมีตัวขั้วนำสวิตช์ประกอบอยู่เพื่อใช้สั่งการเปิดและปิดของสวิตช์จากคำสั่งของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์ของแต่ละเซลล์



รูปที่ 3.6 สวิตช์และตัวขับนำสวิตช์ที่ใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์

### 3.2.1 สวิตช์ที่ใช้งานสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์

สวิตช์แต่ละตัวจะต้องรับแรงดันบัสไฟตรงของเซลล์ได้และควรใช้สวิตช์ชนิดเดียวกันหมดทุกเพื่อให้การทำงานมีความสอดคล้องหรือมีลักษณะเฉพาะเดียวกัน โดยสวิตช์ที่เลือกใช้จะเป็น ไอจีบีที (IGBT: Insulated-gate bipolar transistor) RGCL80T60D ที่สามารถรับแรงดันไฟตรงได้ถึง 600 V, 40 A เนื่องจากค่าแรงดันบัสไฟตรงสูงสุดคือ  $8V_{dc} = 250 \text{ V}$  และเพื่อความปลอดภัยจากการเบรคดาวน์ของแรงดันอีกประมาณ 2 เท่า ตัวขับนำสวิตช์

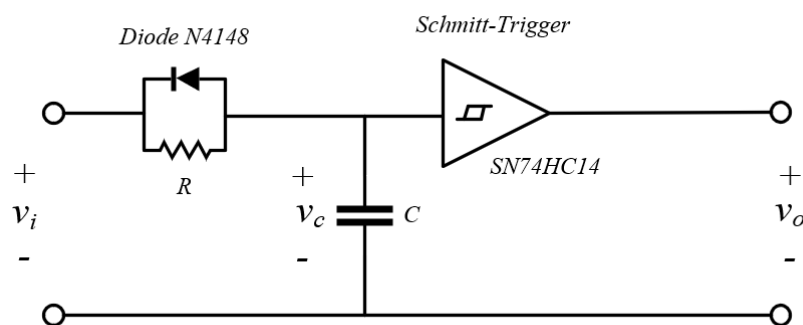
จากรูปที่ 3.6 ที่ขาเกตของไอจีบีทีแต่ละตัวจะต้องมีตัวขับนำสวิตช์ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติการแยกโดดจากฝั่งไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยเนื่องจากแรงดันที่ใช้ในการขับนำขาเกตจะต้องใช้แรงดันที่ขาอิมิตเตอร์ของไอจีบีทีตัวนั้นเป็นจุดอ้างอิง โดยตัวไอซีที่ใช้คือ

HCPL-316J เป็นไอซีชนิดออปโตคัปเปิลเลอร์ซึ่งมีคุณสมบัติแยกโดด และยังเป็นไอซีตัวเดียวกับที่ห้องปฏิบัติการใช้

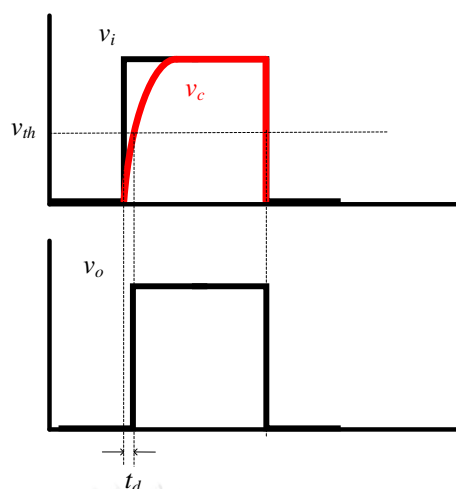
### 3.2.2 การออกแบบวงจรเดทไทม์เพื่อป้องกันการเกิดลัดผ่านบัสไฟตรง

เพื่อป้องกันการเกิดลัดผ่านบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์แบบเอชบริดจ์ ในการสับสวิทช์จะต้องมีเดทไทม์เนื่องจากสวิทช์แต่ละตัวมีช่วงเวลาตีเลยในการเปิด รูปที่ 3.7 แสดงวงจรเดทไทม์ที่ประกอบไปด้วย วงจรอันดับหนึ่งที่มีตัวต้านทาน, ไดโอด และตัวเก็บประจุต่อกัน วงจรดังกล่าวจะช่วยทำให้ช่วงเวลาในการเพิ่มแรงดันนานขึ้น แต่ในช่วงขาลงจะมีไดโอดช่วยลัดผ่านตัวต้านทานทำให้ช่วงเวลาในการลดแรงดันเร็วไวมาก นอกจากนี้ยังใช้ไอซีชนิดทรานซิสเตอร์ (SN74HC14) ช่วยทำให้สัญญาณมีเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยจะสร้างแรงดันเมื่อแรงดันของตัวเก็บประจุมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $v_{th}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณขนาดของตัวต้านทาน ( $R$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C$ ) จากช่วงเวลาเดทไทม์ ( $t_d$ ) ที่ต้องการได้ดังสมการที่ (3.1) เมื่อ  $v_i$  คือแรงดันด้านเข้า ในรูปที่ 3.8 แสดงสัญญาณคำสั่งด้านเข้า ( $v_i$ ) และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $v_c$ ) และสัญญาณด้านออกที่มีเดทไทม์ ( $v_o$ ) จากสมการดังกล่าวทำให้สามารถออกแบบค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุได้ดังตารางที่ 3.1

$$RC = - \frac{t_d}{\ln \left( 1 - \frac{v_{th}}{v_i} \right)} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.7 วงจรเดทไทม์ที่ใช้สำหรับป้องกันการเกิดลัดผ่านของบัสไฟตรง



รูปที่ 3.8 แรงดันด้านเข้า ( $v_i$ ), แรงดันตัวเก็บประจุ ( $v_c$ ) และแรงดันด้านออก ( $v_o$ ) ของวงจร  
เดดไทม์

ตารางที่ 3.1 ตารางการออกแบบวงจรเดดไทม์

Dead time ( $t_d$ )	1 us
$v_{th}/v_i$	0.2
R	50 kOhm
C	100 pF

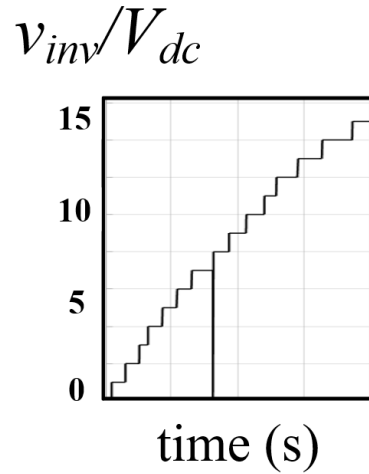
### 3.2.3 ปัญหาแรงดันสไปก์ที่เกิดจากการทำงานไม่พร้อมกันของสวิตช์

ในขณะที่แรงดันด้านออกเปลี่ยนระดับขึ้นของแรงดัน จะเกิดแรงดันสไปก์ขึ้น เนื่องจากการทำงานไม่พร้อมกันของสวิตช์โดยรูปแบบที่เกิดขึ้นถูกแบ่งเป็น 2 กรณี คือ 1) กรณีแรงดันเปลี่ยนระดับขึ้นจาก  $7V_{dc}$  เป็น  $8V_{dc}$  2) กรณีการเปลี่ยนเครื่องหมายของแรงดัน

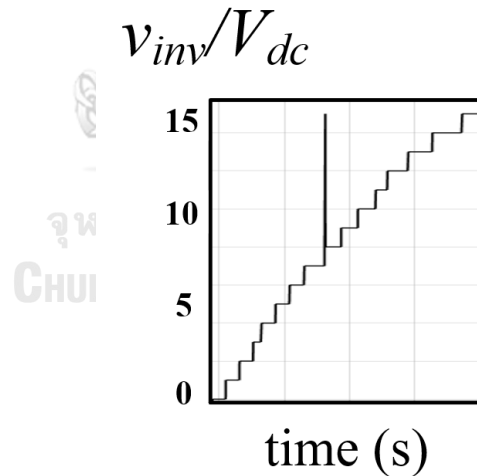
#### กรณีแรงดันเปลี่ยนระดับขึ้นจาก $7V_{dc}$ เป็น $8V_{dc}$

การเกิดแรงดันสไปก์ขนาดมากที่สุดของการเปลี่ยนระดับขึ้นคือ กรณีที่แรงดันเปลี่ยนระดับจาก  $7V_{dc}$  เป็น  $8V_{dc}$  เนื่องจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับเซลล์ที่  $4V_{dc}$ ,  $2V_{dc}$  และ  $1V_{dc}$  จะต้องเปลี่ยนสถานะเป็นแรงดัน 0 ทั้งสามเซลล์ และเซลล์  $8V_{dc}$  จะต้องเปลี่ยนสถานะจากแรงดัน  $0V$  เป็น  $8V_{dc}$  ทำให้เกิดแรงดันสไปก์ได้ 2 ลักษณะ คือ สไปก์ยอดอยู่บนและสไปก์ยอดอยู่ล่าง รูปที่ 3.9 แสดงเหตุการณ์ที่สวิตช์ของเซลล์  $4V_{dc}$   $2V_{dc}$  และ  $1V_{dc}$  ลดแรงดันก่อนที่ ของเซลล์  $8V_{dc}$  จะเพิ่มแรงดัน ทำให้แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์จาก

$7V_{dc}$  ตกลงเป็น 0 ก่อนที่จะขึ้นเป็น  $8V_{dc}$  และสำหรับรูปที่ 3.10 แสดงเหตุการณ์ที่สวิตช์ของเซลล์  $8V_{dc}$  เพิ่มแรงดันก่อนที่สวิตช์ของเซลล์  $4V_{dc}$   $2V_{dc}$  และ  $1V_{dc}$  จะลดแรงดัน ทำให้แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์จาก  $7V_{dc}$  ขึ้นไปเป็น  $15V_{dc}$  ก่อนที่จะตกกลับมาเป็น  $8V_{dc}$



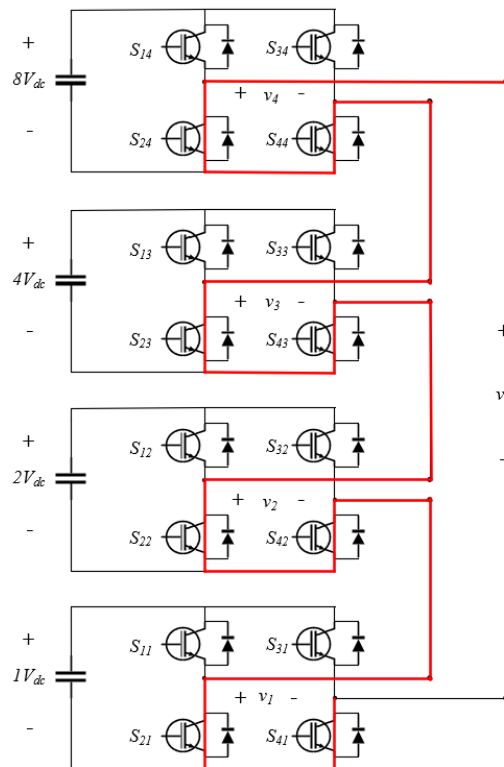
รูปที่ 3.9 แรงดันสไปก์หยุดอยู่กลางในกรณีที่แรงดันตกลงเป็น 0 ก่อนที่จะขึ้นเป็น  $8V_{dc}$



รูปที่ 3.10 แรงดันสไปก์หยุดอยู่กลางในกรณีที่แรงดันขึ้นเป็น  $15V_{dc}$  ก่อนที่จะตกเป็น  $8V_{dc}$

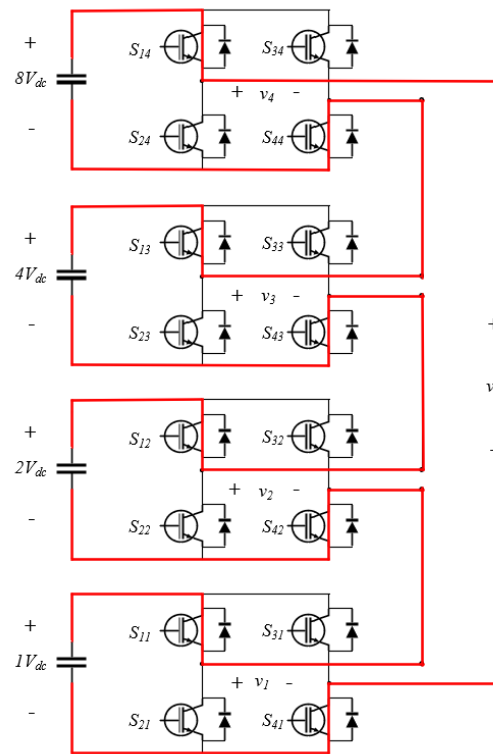
### กรณีแรงดันเปลี่ยนเครื่องหมายเมื่อตัดผ่านจุดศูนย์

การเปลี่ยนระดับขั้นของแรงดันในขณะที่แรงดันคำสั่งมีการเปลี่ยนเครื่องหมายผ่านจุดศูนย์จะเกิดแรงดันสไปก์สูงสุด  $15V_{dc}$  เนื่องจากสวิตช์ส่วนที่กำหนดเครื่องหมายแรงดัน ( $S_{1n}$   $S_{2n}$ ) ไม่สามารถทำงานได้พร้อมกันกับสวิตช์ที่ใช้กำหนดขนาดของแรงดัน ( $S_{3n}$   $S_{4n}$ ) รูปที่ 3.11 แสดงสถานะการสับสวิตช์ของวงจรในขณะที่ระดับแรงดันอยู่ที่ 0 เครื่องหมายลบ และในขณะที่แรงดันคำสั่งกำลังผ่านจุดศูนย์สวิตช์  $S_1$  ของทุกเซลล์เปลี่ยนจาก OFF เป็น ON ก่อนสวิตช์  $S_3$  ทำให้สถานะการสับสวิตช์เป็นดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะเกิดแรงดันด้านออกเป็น  $15V_{dc}$  ก่อนที่สวิตช์  $S_3$  จะเปลี่ยนจาก OFF เป็น ON เพื่อสร้างแรงดัน 0 เครื่องหมายบวกดังรูปที่ 3.13 ส่งผลให้แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเกิดยอดสไปค์ขึ้น  $15V_{dc}$  ดังรูปที่ 3.14

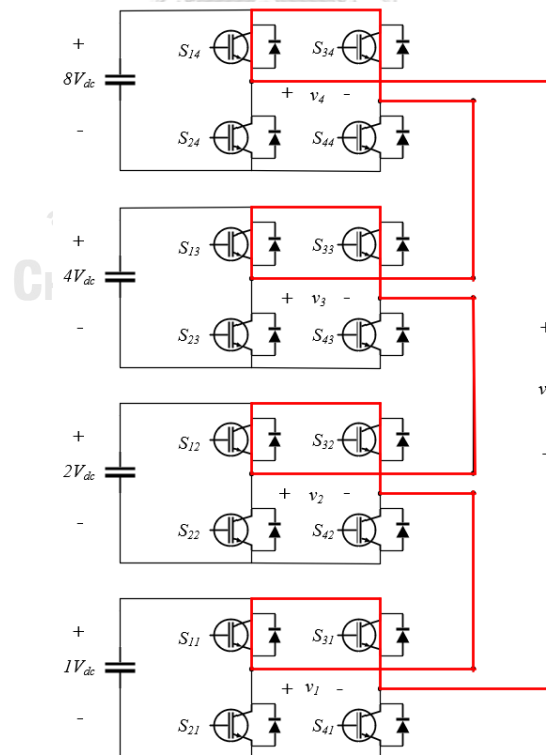


รูปที่ 3.11 สถานะการสับสวิตช์ของวงจรในขณะที่ระดับแรงดันอยู่ที่ 0 เครื่องหมายลบ

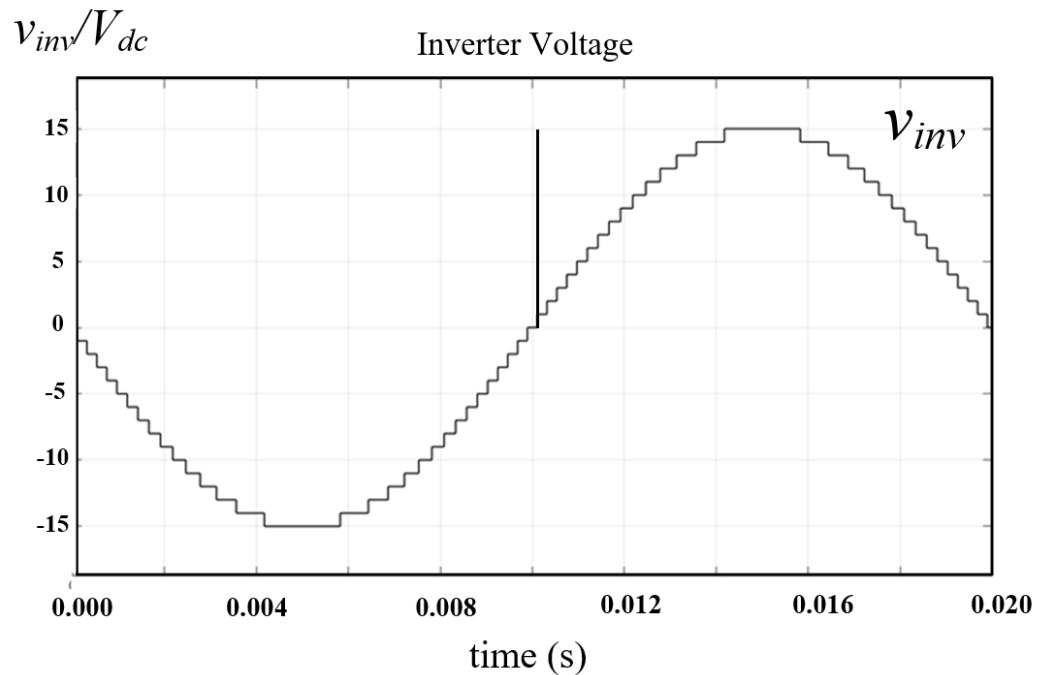




รูปที่ 3.12 สถานะการสับสวิตช์ของวงจรในขณะสวิตช์  $S_{1n}$   $S_{2n}$  ทำงานก่อน  $S_{3n}$   $S_{4n}$



รูปที่ 3.13 สถานะการสับสวิตช์ของวงจรในขณะระดับแรงดันอยู่ที่ 0 เครื่องหมายบวก

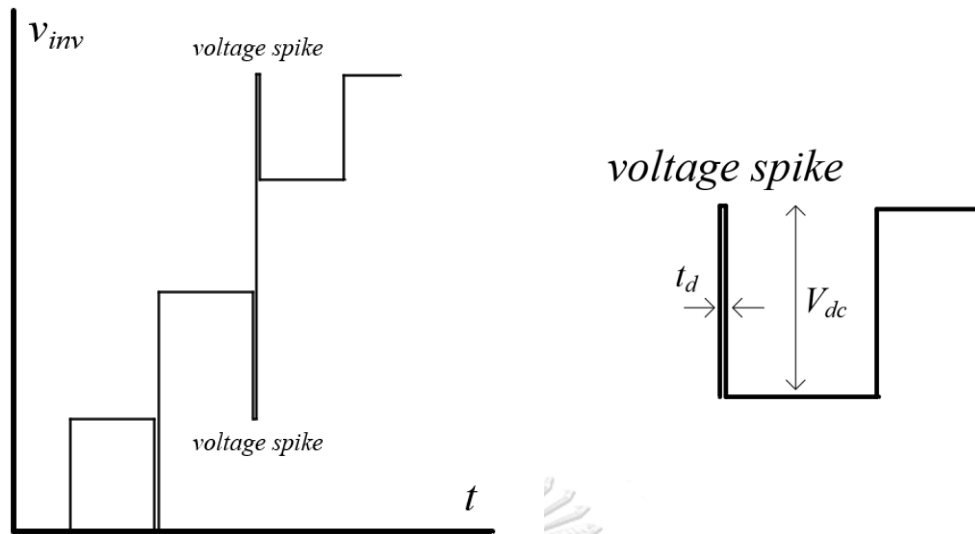


รูปที่ 3.14 ภาพแสดงการเกิดแรงดันสไปก์  $15V_{dc}$  เนื่องจากการเปลี่ยนเครื่องหมายของแรงดันผ่านจุด

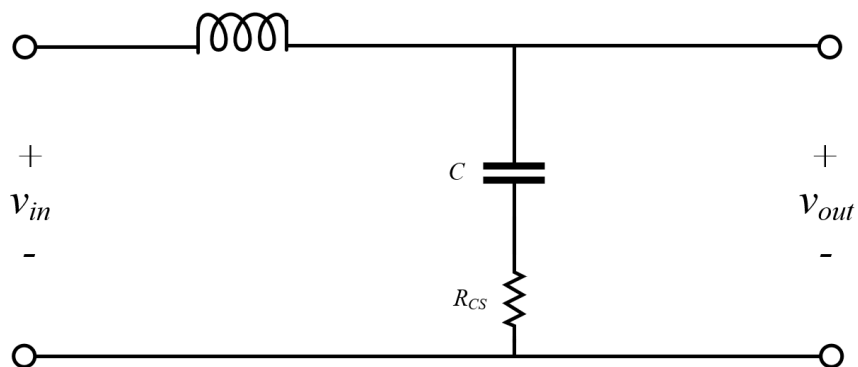
ศูนย์

### 3.2.4 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็กเพื่อลดขนาดของแรงดันสไปก์

จากที่ได้กล่าวมาเกี่ยวกับการสับวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในทางปฏิบัติจะเกิดแรงดันสไปก์ขึ้นเนื่องจากสวิตช์ทำงานไม่พร้อมกันดังรูปที่ 3.15 ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้วงจรกรองขนาดเล็กซึ่งประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานขนาดเล็กต่อกัน ดังวงจรรูปที่ 3.16 จะสามารถประมาณความถี่คัทออฟได้ดังสมการ (3.2) และมีเงื่อนไขผลตอบแทนแบบหน่วงวิกฤตดังสมการ (3.3)



รูปที่ 3.15 แรงดันสไปก์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใส่เดดไทม์ในการสับสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ



รูปที่ 3.16 วงจรตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็กลำดับสำหรับช่วยลดขนาดของแรงดันสไปก์

$$f_{cut\ off} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

$$R = \sqrt{\frac{4L}{C}} \quad (3.3)$$

จากสมการ (3.2) (3.3) จะสามารถออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความเก็บประจุ และค่าความต้านทานของวงจรกรองได้ดังตารางที่ 3.2 ในสำหรับค่าความต้านทานจะใช้ค่า

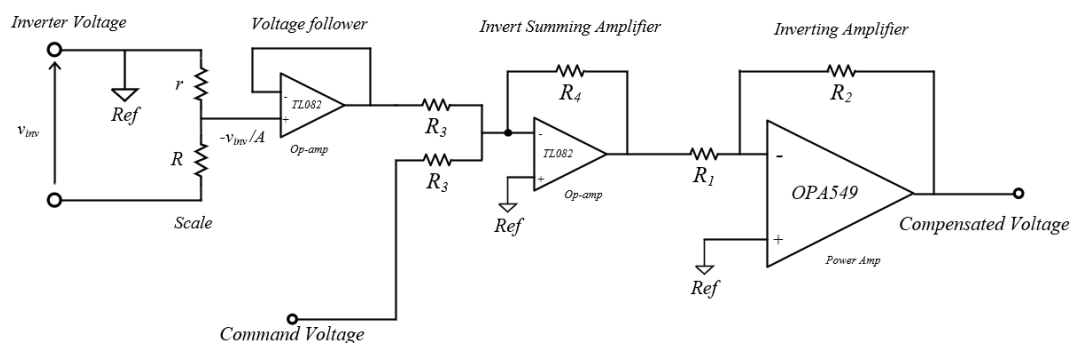
น้อยกว่าค่าที่ตรงเงื่อนไขผลตอบสนองของหน่วยวิกฤติเพื่อหน่วยการสั้นของแรงดันให้เพียงพอต่อการชดเชยของวงจรถยายเชิงเส้น

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความเก็บประจุ และค่าความต้านทานที่ออกแบบ

Cut off frequency	15000 Hz
L	20 uH
C	5 uF
R	1 Ohm

### 3.3 ส่วนวงจรถยายเชิงเส้น

การออกแบบอุปกรณ์ในวงจรถยายเชิงเส้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนของการคำนวณแรงดันชดเชย 2) ส่วนวงจรถยายกำลังไฟฟ้า 3) ส่วนการแยกโดดจุดอ้างอิงระหว่างวงจรถยายเชิงเส้นและวงจรถควบคุม โดยแผนภาพรวมดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แผนภาพรวมของวงจรถยายเชิงเส้นผนวกกับวงจรถคำนวณแรงดันชดเชย

#### 3.3.1 ส่วนการคำนวณแรงดันชดเชย

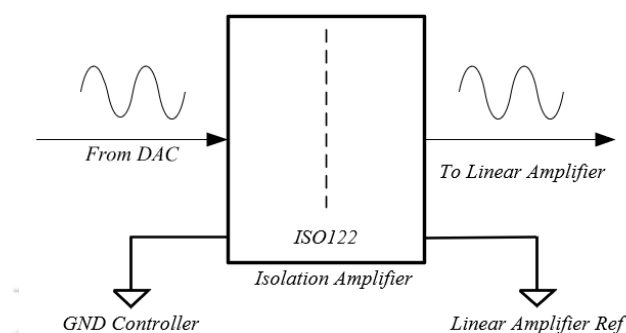
ส่วนของการคำนวณแรงดันชดเชย(ฝั่งซ้าย)จะใช้ไอซีออปแอมป์ขนาดเล็ก (ไอซี TL082) ในการตรวจจับแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับและนำมาคำนวณกับแรงดันคำสั่งเพื่อให้ได้ค่าแรงดันชดเชยสำหรับไปสั่งวงจรถยายกำลังไฟฟ้าต่อไป

#### 3.3.2 ส่วนวงจรถยายกำลังไฟฟ้า

ในส่วนวงจรถยายกำลังไฟฟ้า(ฝั่งขวา)จะใช้ไอซีออปแอมป์กำลัง (OPA549) ซึ่งสามารถรับแรงดันไฟเลี้ยงได้ถึง  $\pm 30V$  และรับกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องสูงสุดได้ 8A ซึ่งหากต้องการเพิ่มพิกัดของกระแสไฟฟ้าจะต้องใช้ไอซีอีกตัวต่อเพิ่ม ซึ่งจากการทดสอบต่อโหลดที่ค่าพิกัดจำเป็นต้องใช้ไอซีออปแอมป์กำลัง 2 ตัวต่อหนึ่งเฟส

### 3.3.3 การแยกโดดระหว่างวงจรถ่ายเชิงเส้นกับวงจรถอบคุม

เนื่องจากแรงดันคำสั่งของวงจรถ่ายเชิงเส้นจะต้องใช้จุดอ้างอิงคือที่จุดด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ ทำให้ไม่สามารถใช้จุดอ้างอิงเดียวกันได้ทั้งสามเฟส จึงจำเป็นต้องใช้ไอซีแยกโดดสัญญาณแบบอนาล็อก (ไอซีISO122) เพื่อแยกจุดอ้างอิงของแต่ละเฟสและยังแยกจากฝั่งไมโครคอนโทรลเลอร์อีกด้วย ตัวอย่างของวงจรถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ไอซีแยกโดดจุดอ้างอิงระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรถ่ายเชิงเส้น

## 3.4 ส่วนการควบคุมและการตรวจจับ

ในส่วนของการควบคุมจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนหลักในการประมวลผล โดยการรับค่าแรงดันบัสไฟตรงจากวงจรถวจจับจากนั้นนำไปสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับและสร้างแรงดันคำสั่งสำหรับวงจรถ่ายเชิงเส้น

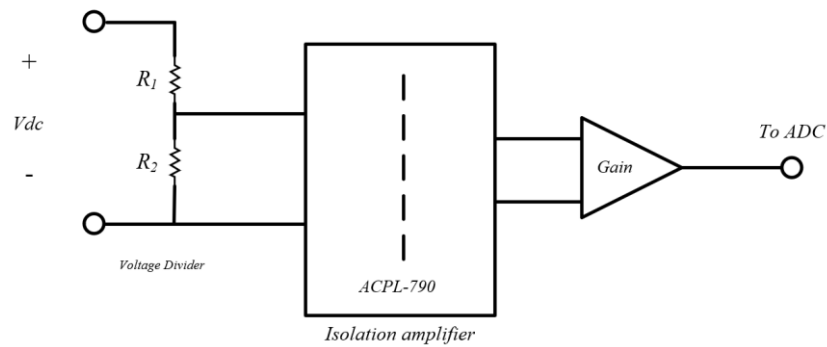
### 3.4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานจะใช้บอร์ด TMS320F28335 เนื่องจากรองรับใช้งานในโหมดฐานโมเดลจากโปรแกรม MATLAB SIMULINK ได้ ซึ่งง่ายต่อการศึกษาใช้งาน อีกทั้งยังรองรับการติดต่อสื่อสารแบบ SPI (Serial Peripheral Interface) สำหรับการใช้งานวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

### 3.4.2 วงจรถวจจับแรงดันไฟตรง

เนื่องจากการสั่งแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะต้องรู้ค่าแรงดันบัสไฟตรงของแต่ละเซลล์เพื่อให้ได้แรงดันด้านออกที่แม่นยำจะต้องมีวงจรถวจจับแรงดันไฟตรงของแต่ละเซลล์อยู่ซึ่งจะต้องมีคุณสมบัติแยกโดดเพราะไม่สามารถใช้จุดอ้างอิงเดียวกันได้

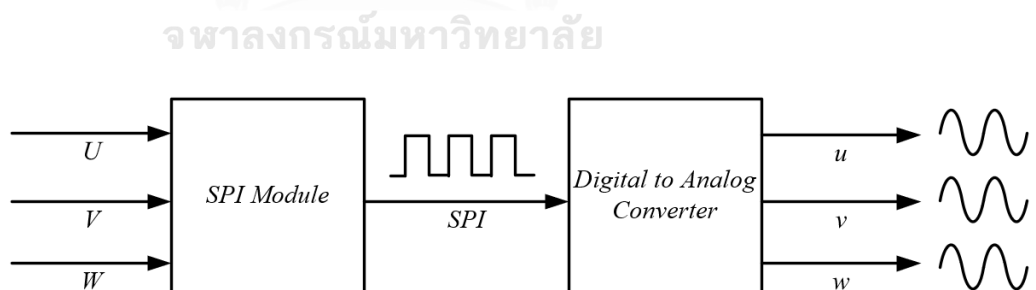
รูปที่ 3.19 แสดงหลักการวงจรตรวจจับแรงดันที่ใช้ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรแบ่งแรงดันโดยใช้ตัวต้านทานและนำแรงดันไปเข้าไอซีแยกโดด (ACPL-790) หลังจากนั้นจะมีวงจรอปแอมป์ในการขยายแรงดันเพื่อนำไปต่อเข้ากับพอร์ตการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อมาใช้ในการสั่งสวิตช์



รูปที่ 3.19 วงจรตรวจจับแรงดันบัสไฟตรงโดยใช้ไอซีช่วยในการแยกโดดจุดอ้างอิงระหว่างบัสไฟตรงและไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.4.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก

วงจรขยายเชิงเส้นจะต้องใช้สัญญาณอนาลอกในการสั่งแรงดัน ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้ไอซีแปลงสัญญาณดิจิทัลจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณอนาลอก ซึ่งไอซีที่ใช้งานคือ TLV5630 โดยสามารถรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปแบบ SPI (Serial Peripheral Interface) และมีความละเอียดของข้อมูลคือ 12 บิต โดยมีแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 3.20



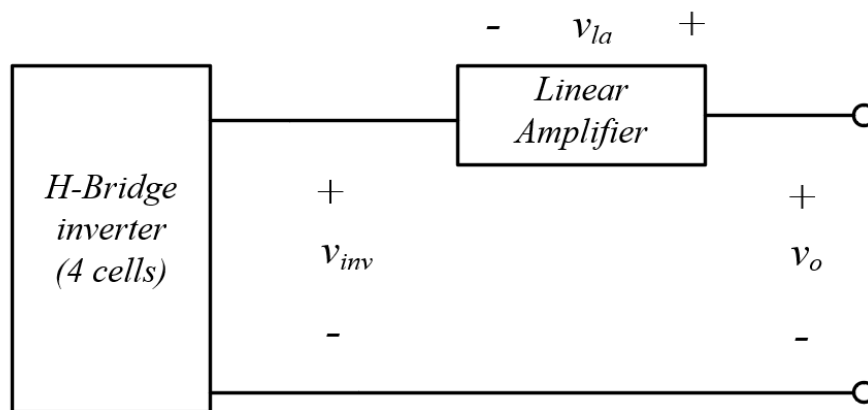
รูปที่ 3.20 การสร้างแรงดันคำสั่งสำหรับวงจรขยายเชิงเส้นด้วยวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

## บทที่ 4

### ผลการทดลองแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริด

ในบทที่ 4 จะเป็นการทดสอบคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน โดยการทดสอบจะเริ่มจากสร้างแรงดันด้านออกโดยไม่มีวงจรรอง การสร้างแรงดันด้านออกที่มีวงจรรอง และทดสอบด้วยโหลดต่าง ๆ รวมถึงการทดสอบกลับเฟสของแรงดันชั่วขณะ

#### 4.1 การทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรรองขนาดเล็ก

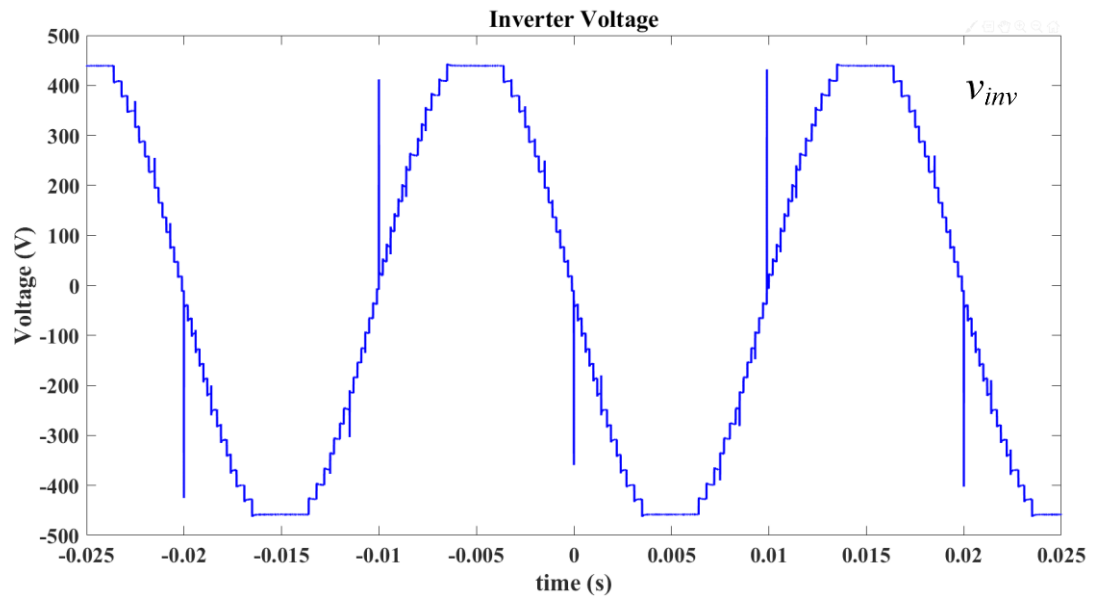


รูปที่ 4.1 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรรองขนาดเล็ก

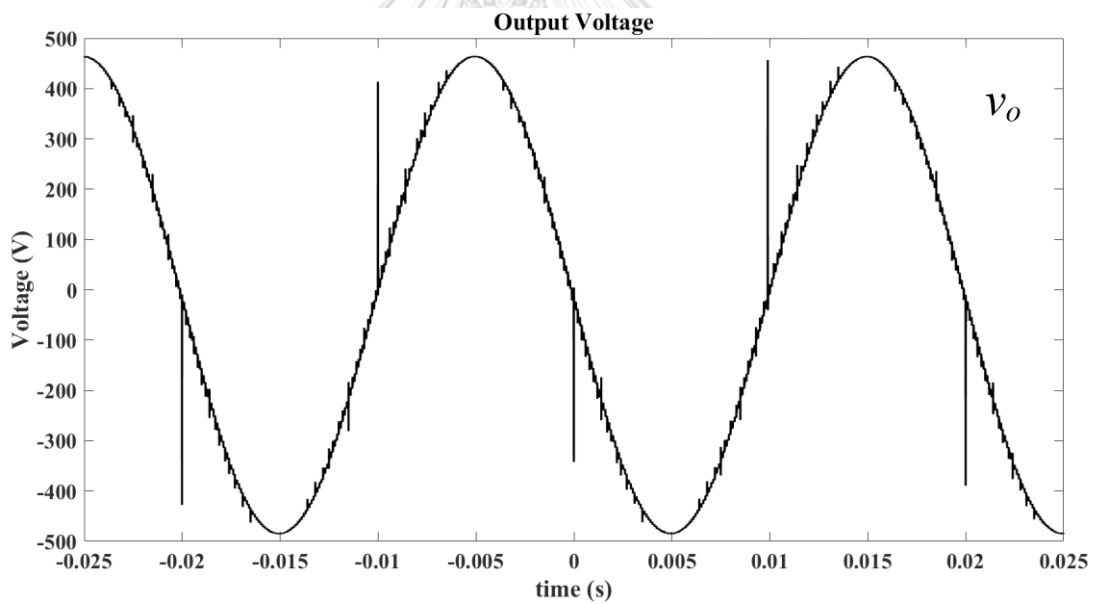
การทดสอบที่ 4.1 จะทดสอบโดยการป้อนคำสั่งแรงดันรูปคลื่นไซน์ที่มีค่ายอดสูงสุดที่สร้างได้โดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็กช่วยในการลดขนาดแรงดันสไปก์ และมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 4.1 จากผลการทดสอบจะได้แรงดันที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับสร้างเป็นดังรูปที่ 4.2 และแรงดันที่ด้านออกหลังผ่านการชดเชยแรงดันด้วยวงจรขยายเชิงเส้นถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.3 โดยมีค่าแรงดันชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นเป็นดังรูปที่ 4.4 และสเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรรองขนาดเล็ก

แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ 335 V RMS
ความถี่	50 Hz
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	ไม่มี
ตัวเก็บประจุ $C$	ไม่มี
โหลด	ไม่มี

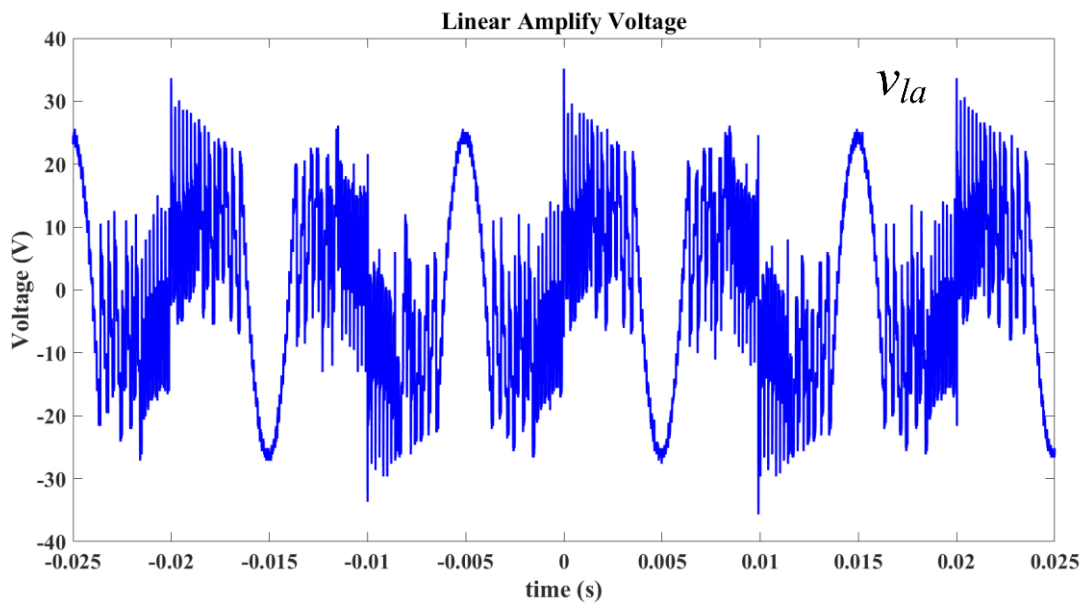


รูปที่ 4.2 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหลังเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็ก

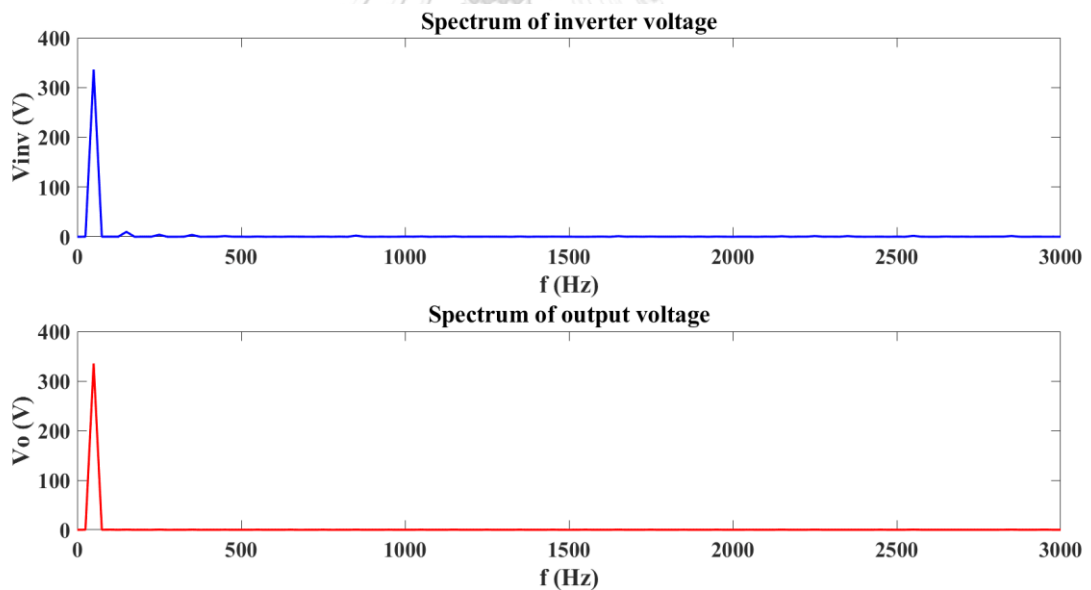


รูปที่ 4.3 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยจากวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็ก





รูปที่ 4.4 แรงดันขดเคี้ยวของวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็ก



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็ก

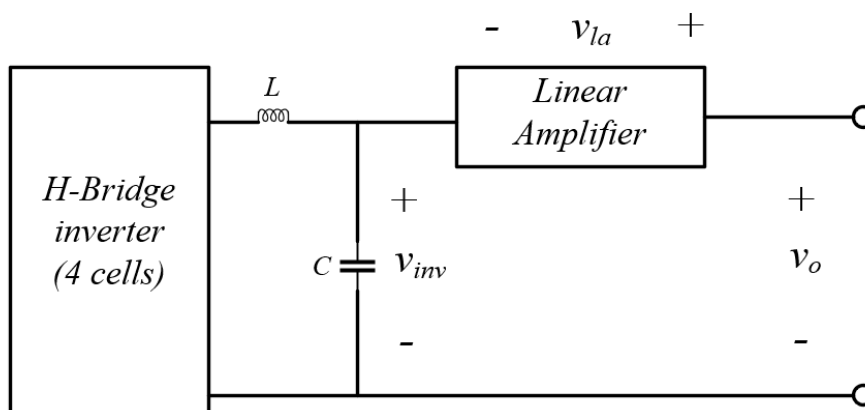
จากผลการทดสอบสามารถหาค่า Total Harmonic Distortion (THD) ของแรงดันของอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรกรองขนาดเล็ก

<i>Output Voltage (RMS)</i>	<i>335.6V</i>
<i>THD Inverter Voltage (THD<sub>v<sub>inv</sub></sub>)</i>	<i>3.71%</i>
<i>THD Output Voltage (THD<sub>v<sub>o</sub></sub>)</i>	<i>0.44%</i>

#### 4.2 การทดสอบสร้างแรงดันโดยวงจรกรองขนาดเล็กเข้าไประหว่างอินเวอร์เตอร์และ วงจรขยายเชิงเส้น

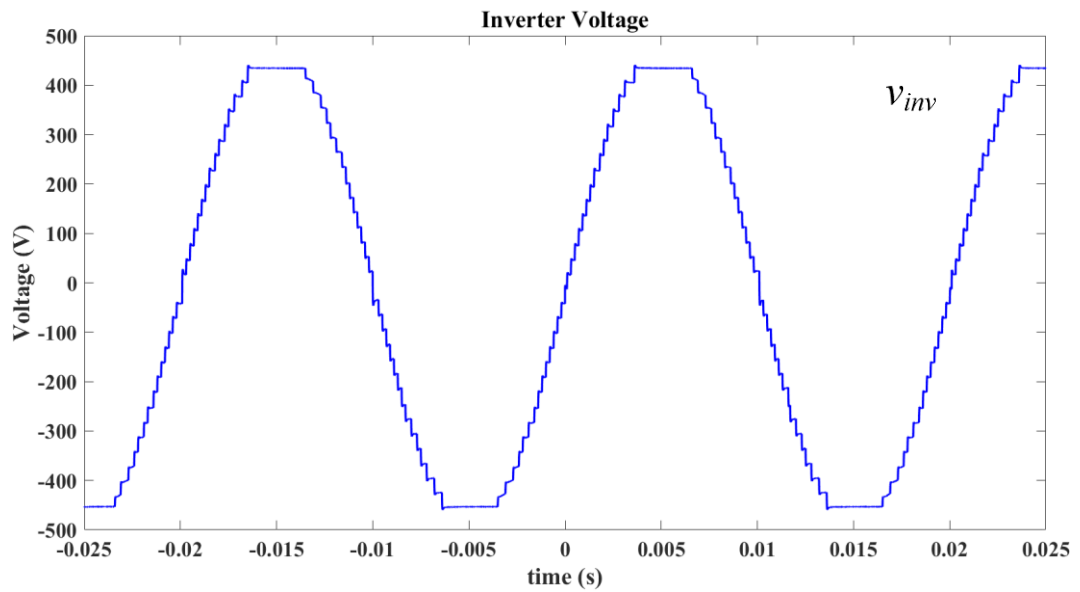
ในการทดสอบที่ 4.2 จะทดสอบโดยการสร้างแรงดันด้านออกเป็นรูปคลื่นไซน์ด้วยแรงดัน 335V RMS โดยจะมีวงจรกรองขนาดเล็กต่อเข้าระหว่างอินเวอร์เตอร์หลายระดับและวงจรขยายเชิงเส้นดังวงจรรูปที่ 4.6 และมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 4.3 ซึ่งได้ผลการทดสอบของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์หลายระดับสร้างเป็นดังรูปที่ 4.7 และแรงดันที่ด้านออกหลังผ่านการชดเชยแรงดันด้วยวงจรขยายเชิงเส้นถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.8 โดยมีค่าแรงดันชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นเป็นดังรูปที่ 4.9 และสเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.10



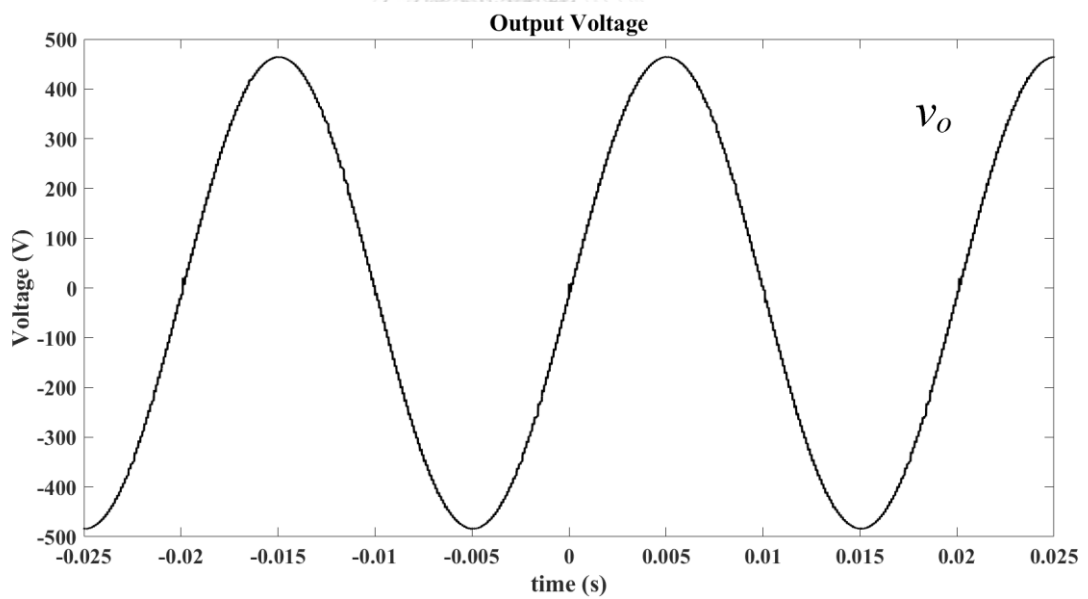
รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรกรองขนาดเล็ก

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบสร้างแรงดันโดยไม่มีวงจรกรองขนาดเล็ก

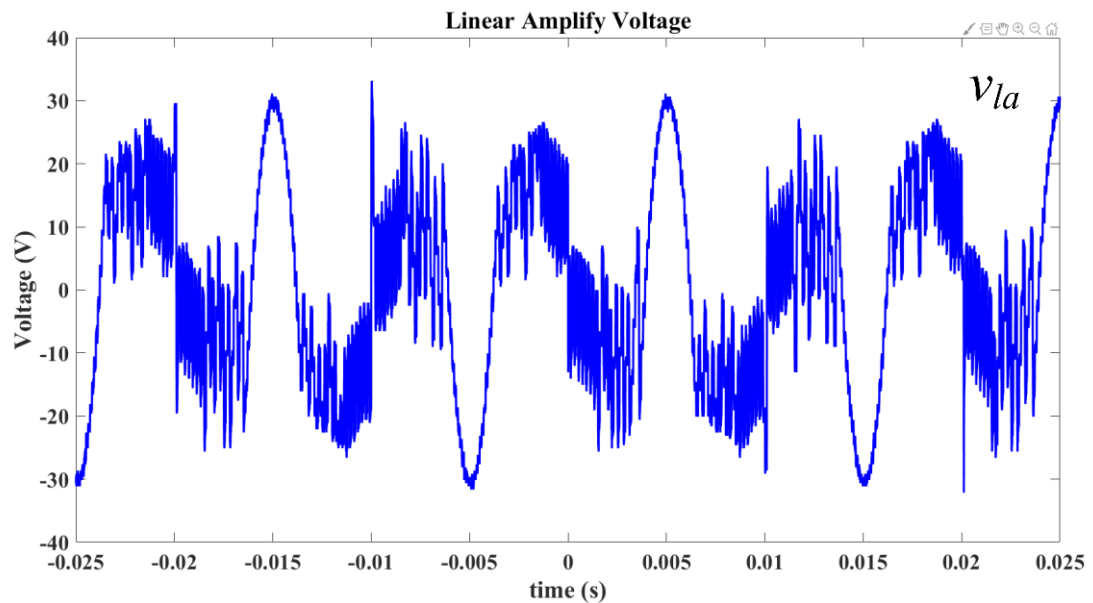
แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ 335 V RMS
ความถี่	50 Hz
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	20 $\mu$ H
ตัวเก็บประจุ $C$	5 $\mu$ F
โหลด	ไม่มี



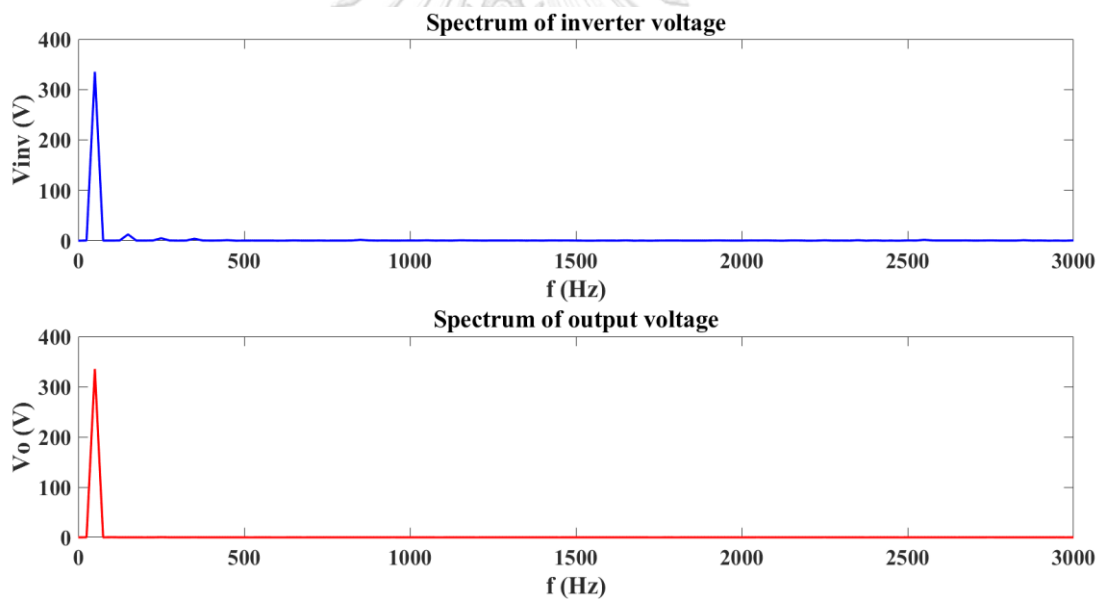
รูปที่ 4.7 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหลังเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรกรองขนาดเล็ก



รูปที่ 4.8 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยจากวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรกรองขนาดเล็ก



รูปที่ 4.9 แรงดันขดเซยของวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรถองขนาดเล็ก



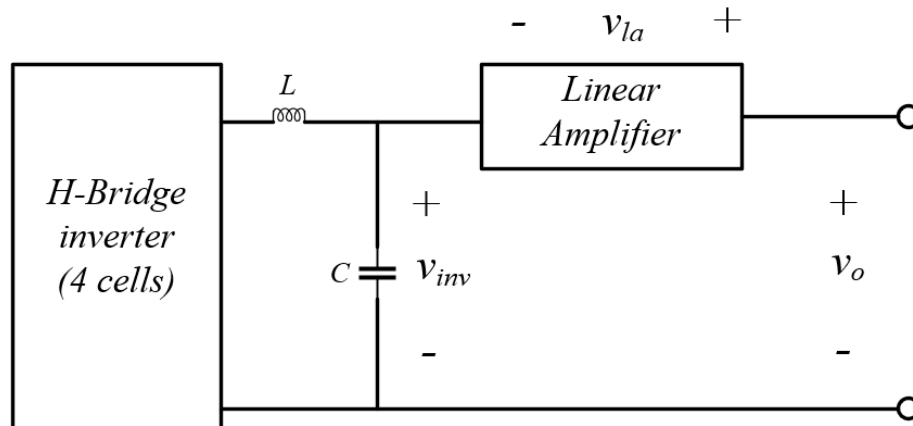
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรถองขนาดเล็ก

จากผลการทดสอบสามารถหาค่า Total Harmonic Distortion (THD) ของแรงดันของอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการทดสอบสร้างแรงดันโดยมีวงจรถองขนาดเล็ก

<i>Output Voltage (RMS)</i>	335.5V
<i>THD Inverter Voltage (THD<sub>v<sub>inv</sub></sub>)</i>	4.37%
<i>THD Output Voltage (THD<sub>v<sub>o</sub></sub>)</i>	0.27%

### 4.3 การทดสอบสร้างแรงดันคลื่นไซน์ 220V แบบไม่มีโหลด

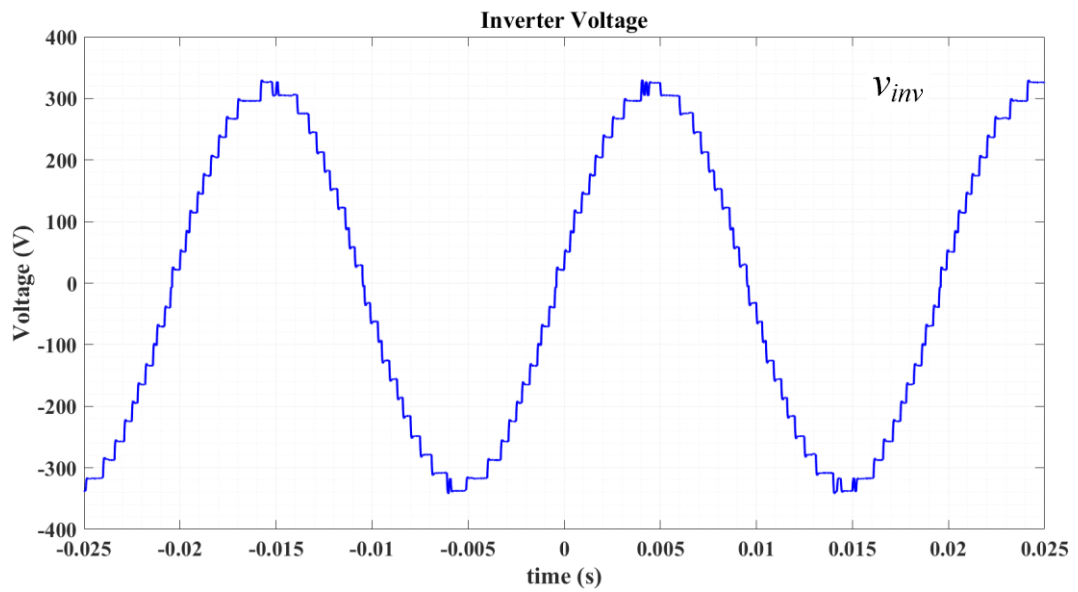


รูปที่ 4.11 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบแบบไม่มีโหลด

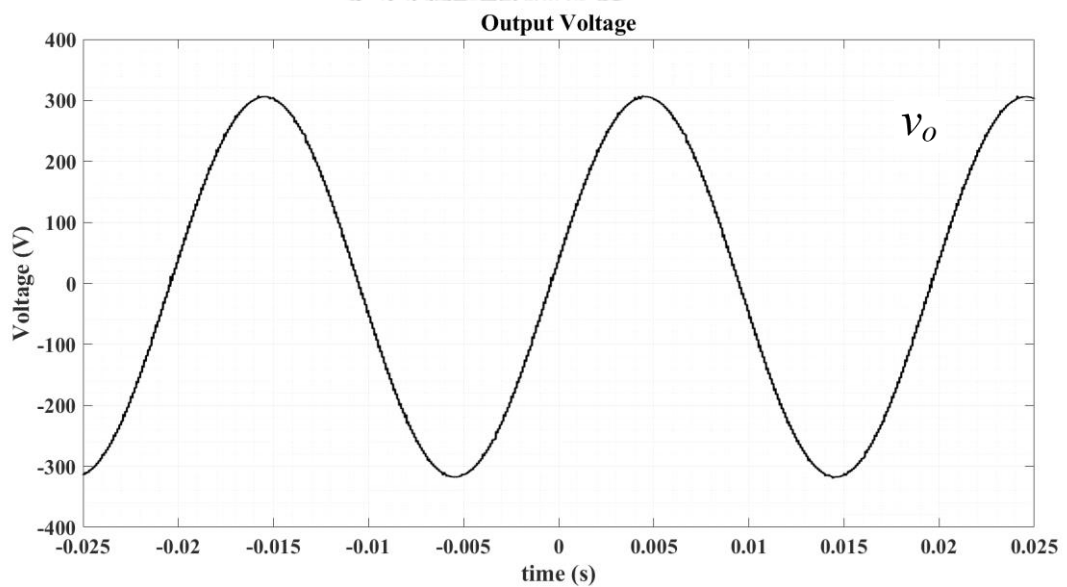
การทดสอบแบบไม่มีโหลดทดลองด้วยการป้อนคำสั่งเป็นแรงดันไซน์ 220V RMS ที่มีเงื่อนไขการทำงานดังตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบทั้งแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับ แรงดันหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรขยายเชิงเส้น แรงดันชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.12 ,รูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ และสเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบแบบไม่มีโหลด

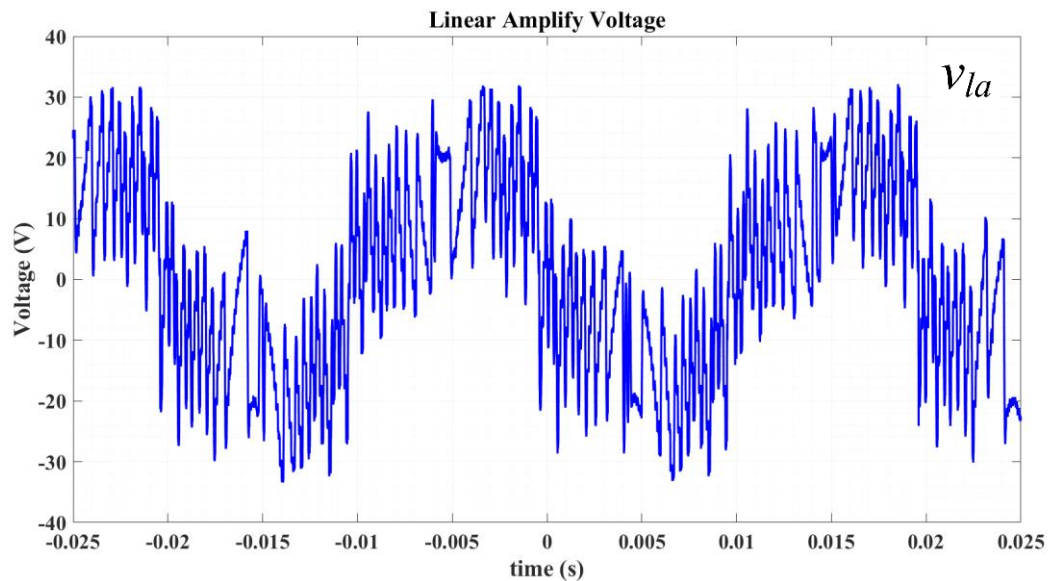
แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ 220V RMS
ความถี่	50 Hz
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	20 $\mu$ H
ตัวเก็บประจุ $C$	5 $\mu$ F
โหลด	ไม่มี



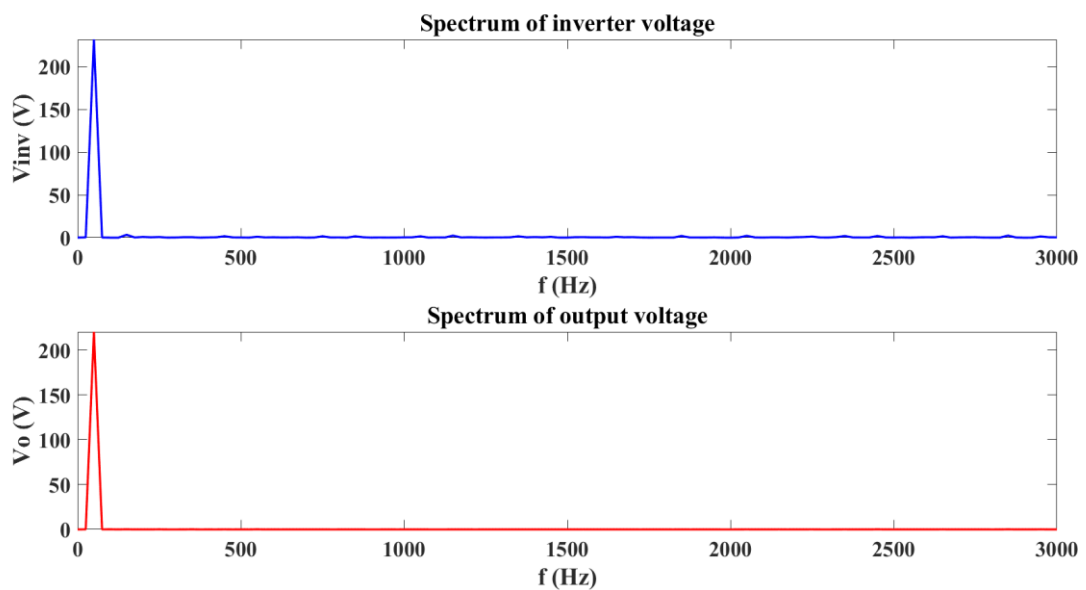
รูปที่ 4.12 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหลังเมื่อทดสอบแบบไม่มีโหลด



รูปที่ 4.13 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยจากวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบแบบไม่มีโหลด



รูปที่ 4.14 แรงดันชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบแบบไม่มีโหลด



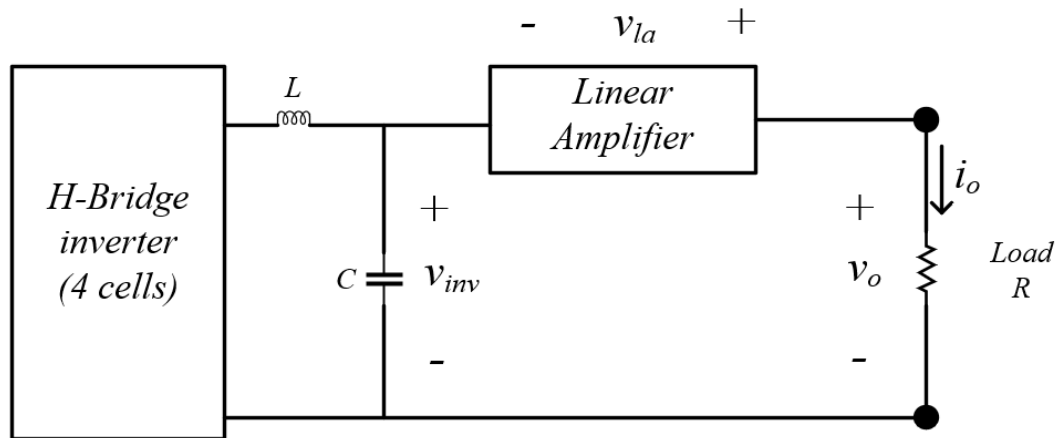
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบสร้างแรงดันแบบไม่มีโหลด

จากผลการทดสอบสามารถหาค่า Total Harmonic Distortion (THD) ของแรงดันของอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงผลการทดสอบแบบไม่มีโหลด

Output Voltage (RMS)	220.3V
THD Inverter Voltage ( $THD_{V_{inv}}$ )	3.56%
THD Output Voltage ( $THD_{V_o}$ )	0.24%

## 4.4 การทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน



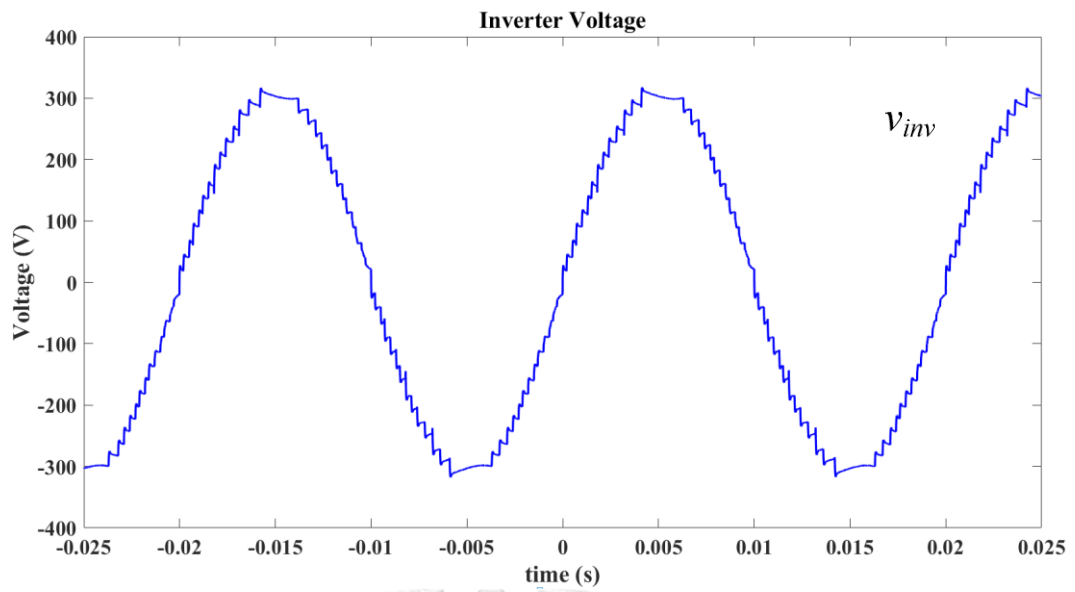
รูปที่ 4.16 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน

ในการทดสอบที่ 4.4 จะทดสอบด้วยการต่อโหลดตัวต้านทานเพื่อให้จ่ายกระแสไฟฟ้าในระดับพิกัดของเครื่องโดยมีเงื่อนไขในการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 4.7 และจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.17 แรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีการลดระดับลงเนื่องจากการคลายประจุของตัวเก็บประจุในแต่ละบัสไฟตรงเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด แต่อย่างไรก็ตามการลดระดับดังกล่าวยังสามารถถูกชดเชยได้ด้วยวงจรขยายเชิงเส้นทำให้ได้แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยและแรงดันที่ใช้ในการชดเชยของวงจรขยายเชิงเส้นเป็นดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 ตามลำดับ สำหรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดตัวต้านทานถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.20 และสเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.21

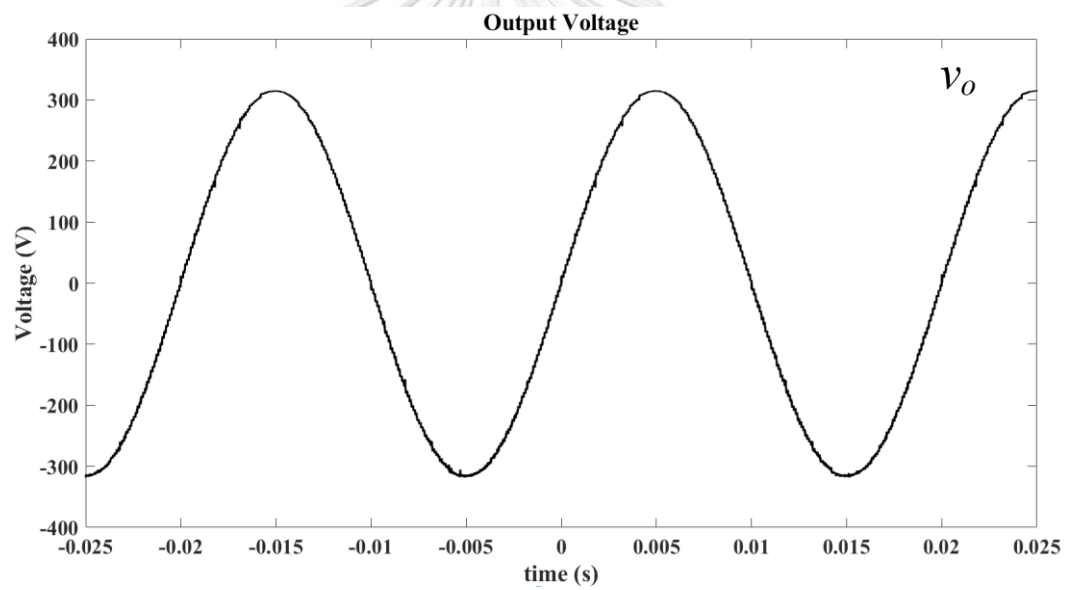
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน

แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ $220V\ RMS$
ความถี่	$50\ Hz$
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	$20\ \mu H$
ตัวเก็บประจุ $C$	$5\ \mu F$
โหลด $R$	$R = 40\ Ohm$

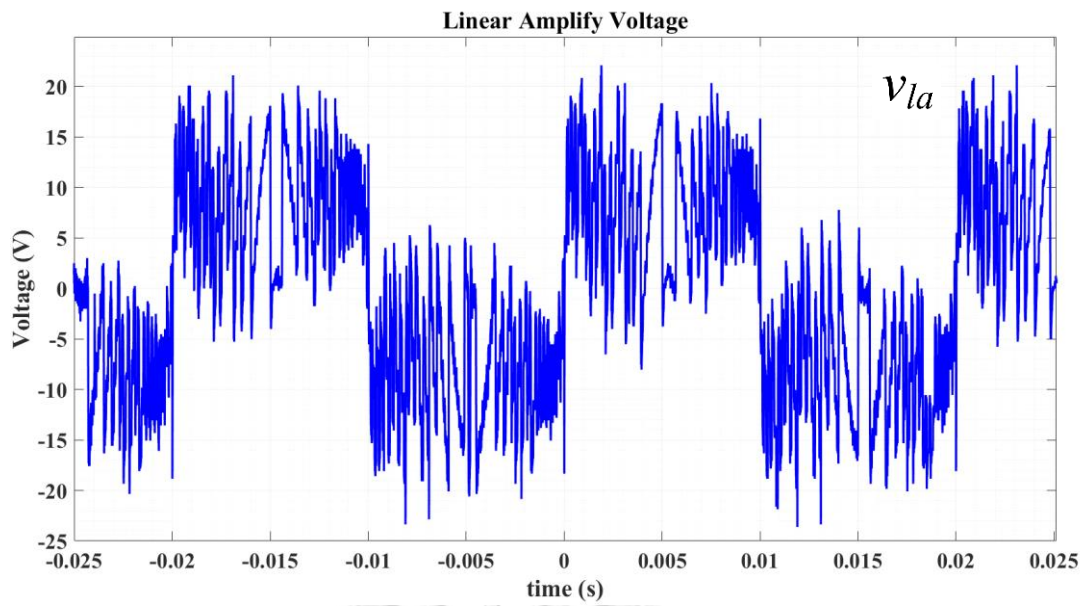




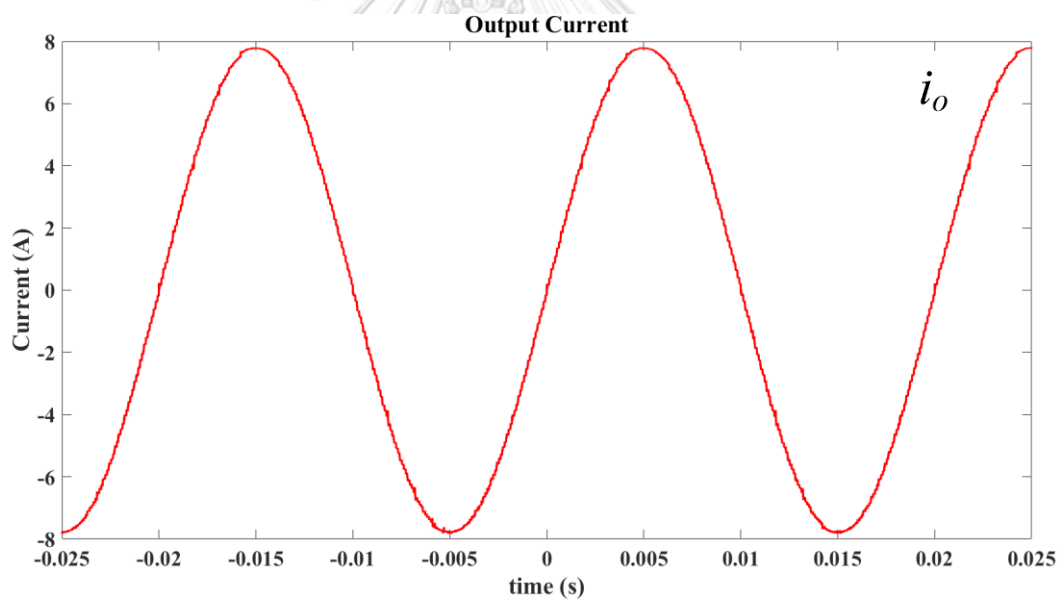
รูปที่ 4.17 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน



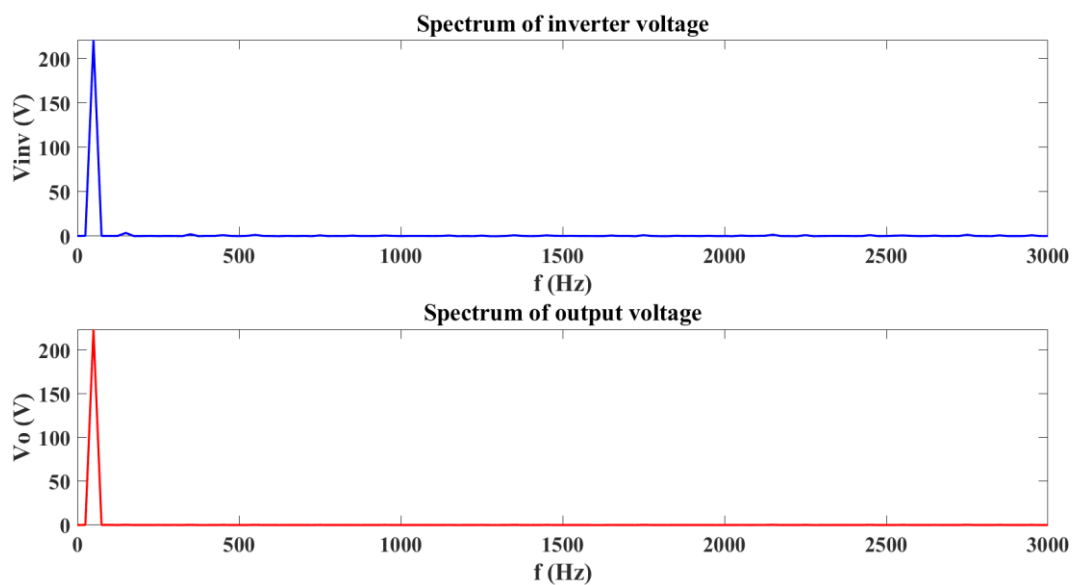
รูปที่ 4.18 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยแรงดันจากวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 4.19 แรงดันขดเซยของวงจรมายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 4.20 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายโหลดเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน



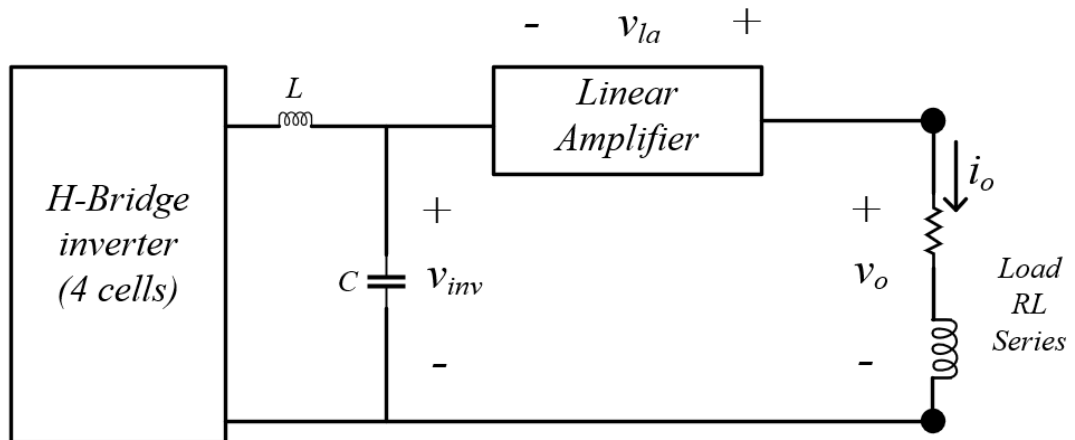
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน

จากผลการทดสอบสามารถหาค่า Total Harmonic Distortion (THD) ของแรงดันของอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกได้ดัง

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทาน

<i>Output Voltage (RMS)</i>	223.7 V
<i>Output Current (RMS)</i>	5.52A
<i>THD Inverter Voltage (THD<sub>v<sub>inv</sub></sub>)</i>	2.83%
<i>THD Output Voltage (THD<sub>v<sub>o</sub></sub>)</i>	0.36%

#### 4.5 การทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

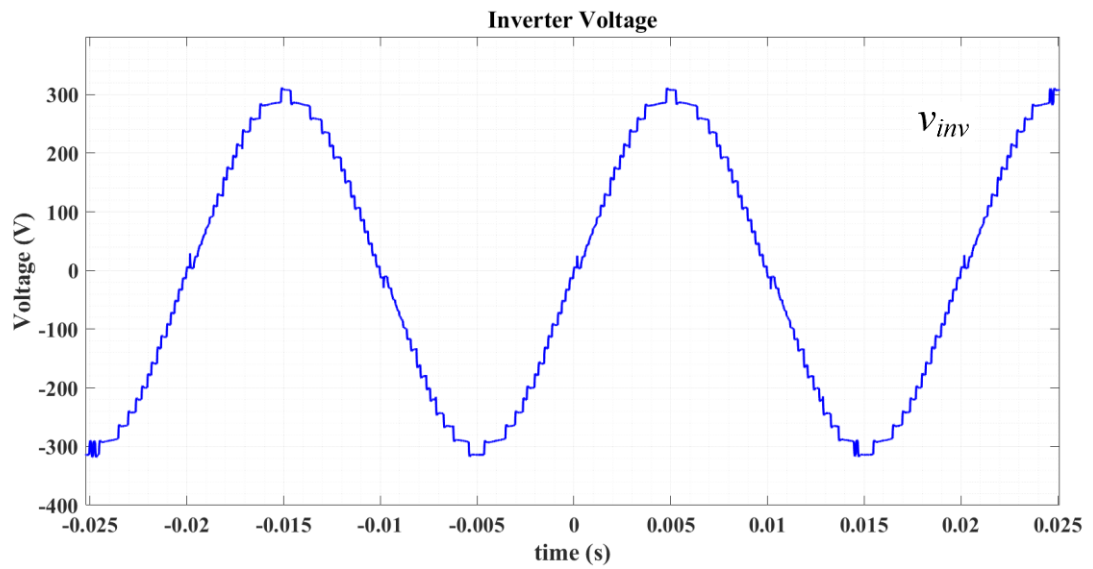


รูปที่ 4.22 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกัน

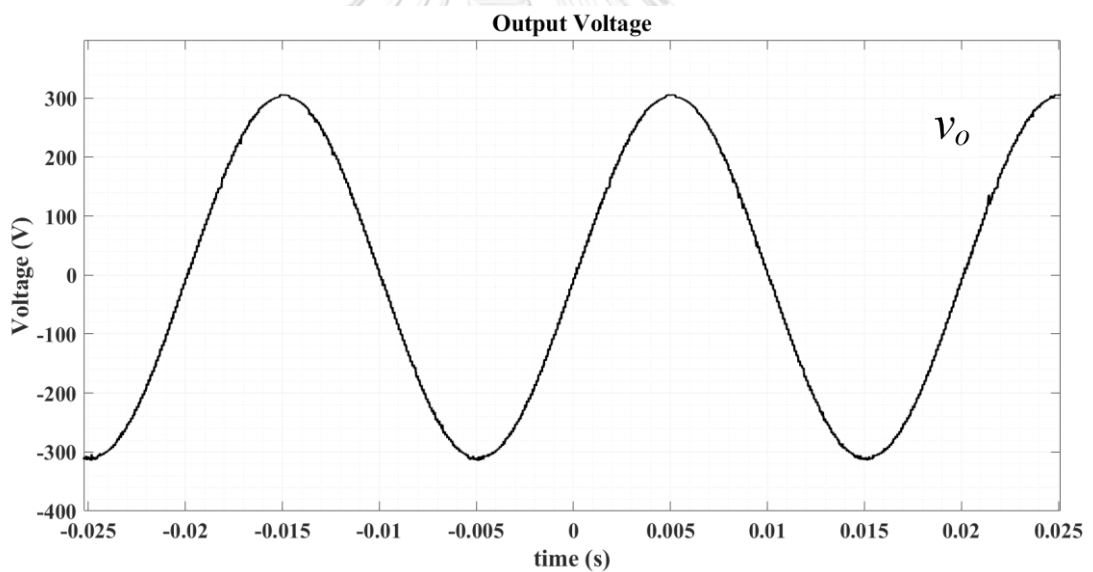
ในการทดสอบที่ 4.5 จะทดสอบโดยการต่อโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 4.22 โดยมีเงื่อนไขการทำงานดังตารางที่ 4.9 และได้ผลการทดสอบสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับดังรูปที่ 4.23 และได้แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรขยายเชิงเส้นเป็นดังรูปที่ 4.24 ในส่วนของแรงดันที่ชดเชยและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายโหลดแสดงไว้ดังรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 ตามลำดับ และสเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรม

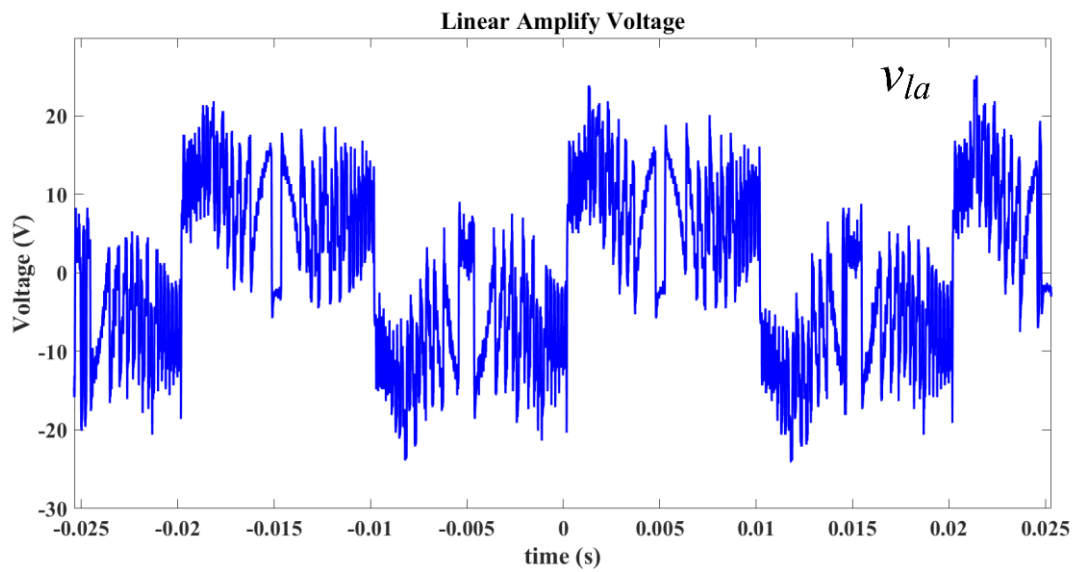
แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ 220V RMS
ความถี่	50 Hz
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	20 $\mu$ H
ตัวเก็บประจุ $C$	5 $\mu$ F
โหลด $RL$ Series	$R = 50\Omega$ , $L = 64.7$ mH (pf 0.926)



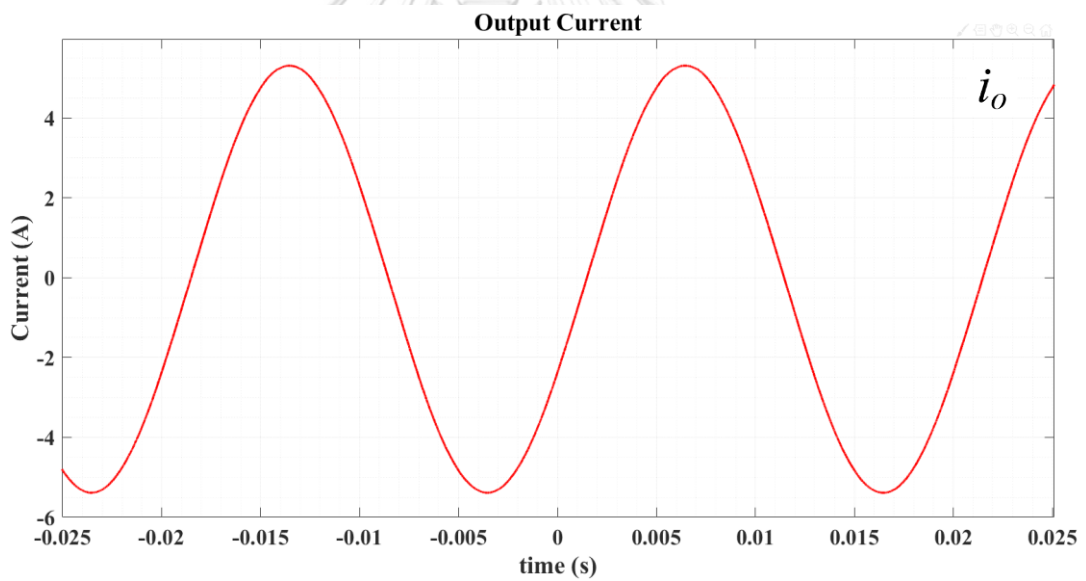
รูปที่ 4.23 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน



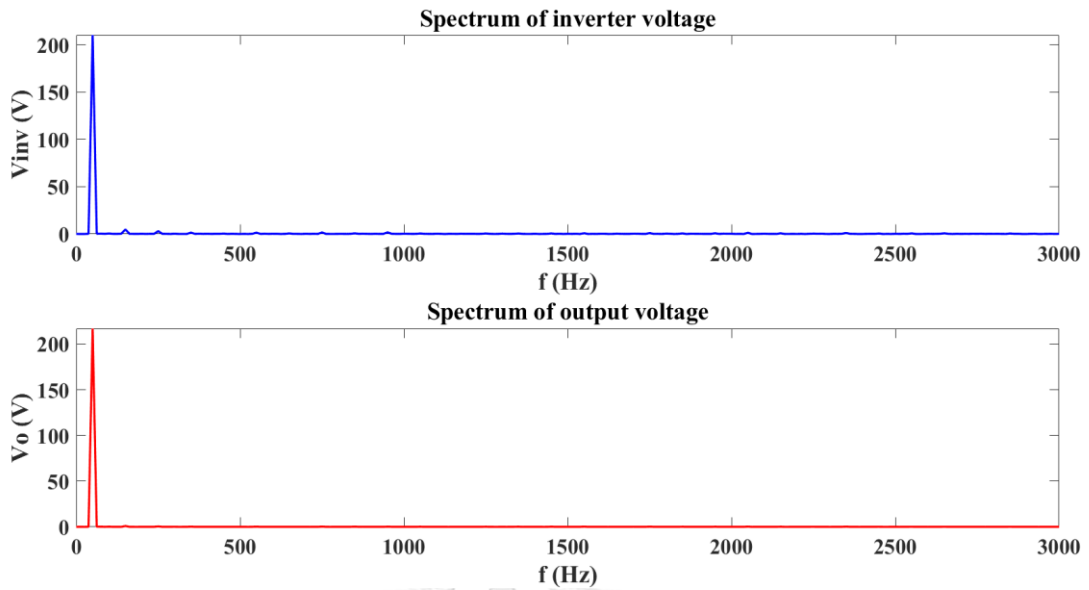
รูปที่ 4.24 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน



รูปที่ 4.25 แรงดันขดเซยของวงจรมายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหนดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน



รูปที่ 4.26 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายโหนดเมื่อทดสอบด้วยโหนดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน



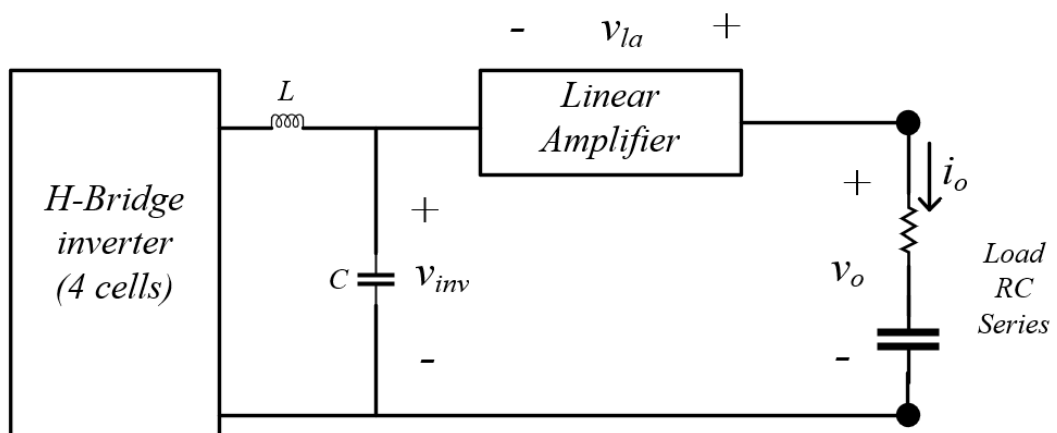
รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันต้านออกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน

จากผลการทดสอบสามารถหาค่า Total Harmonic Distortion (THD) ของแรงดันของอินเวอร์เตอร์และแรงดันต้านออกได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อต่อโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกัน

<i>Output Voltage (RMS)</i>	217.0 V
<i>Output Current (RMS)</i>	3.77A
<i>THD Inverter Voltage (THD<sub>V<sub>inv</sub></sub>)</i>	3.29%
<i>THD Output Voltage (THD<sub>V<sub>o</sub></sub>)</i>	0.58%

#### 4.6 การทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

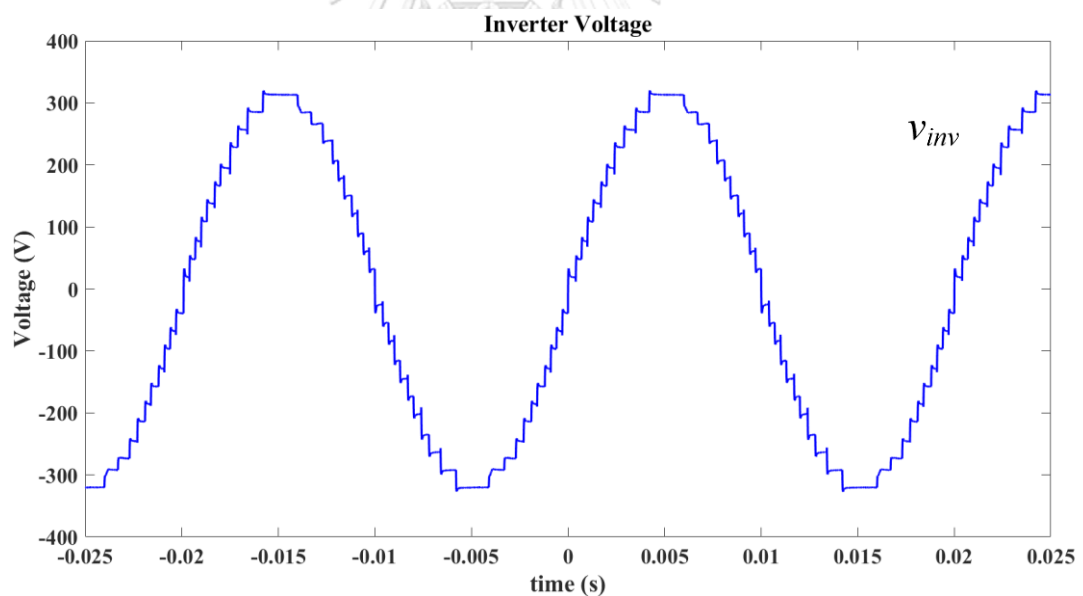


รูปที่ 4.28 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน

ในการทดสอบที่ 4.6 จะทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 4.11 ซึ่งได้ผลการทดสอบแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับดังรูปที่ 4.29 และได้แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรถายเชิงเส้นเป็นดังรูปที่ 4.29 ในส่วนของแรงดันที่ชดเชยและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายโหลดแสดงไว้ดังรูปที่ 4.31 และ รูปที่ 4.32 ตามลำดับ และสเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.33

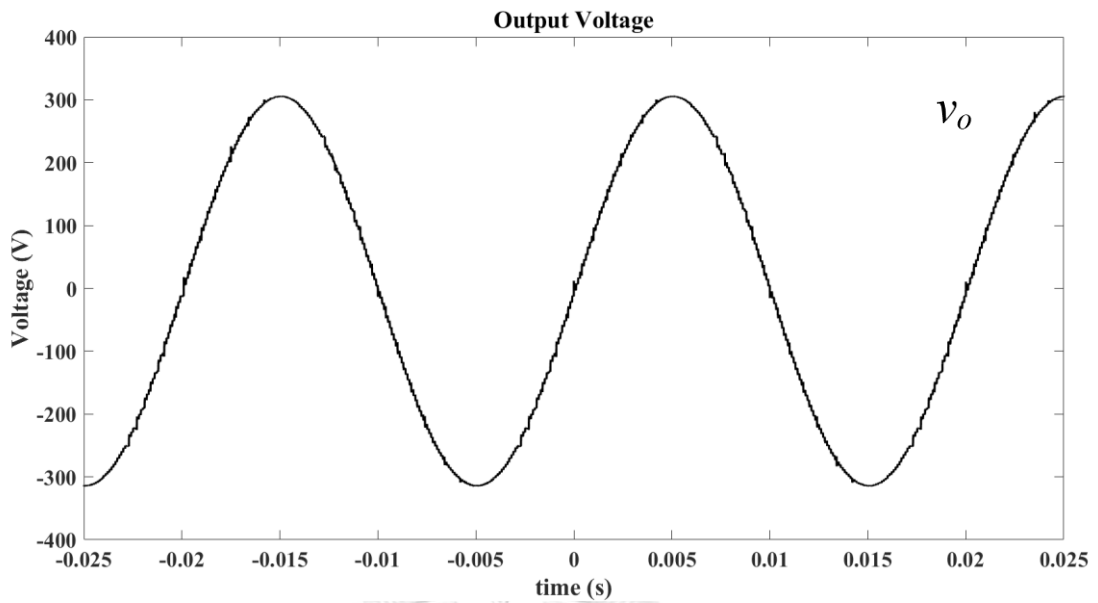
ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรม

แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ $220V_{RMS}$
ความถี่	$50\text{ Hz}$
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	$20\text{ }\mu\text{H}$
ตัวเก็บประจุ $C$	$5\text{ }\mu\text{F}$
โหลด $RC\text{ Series}$	$R = 100\text{ Ohm}, C = 20\text{ }\mu\text{F} (pf\ 0.53)$

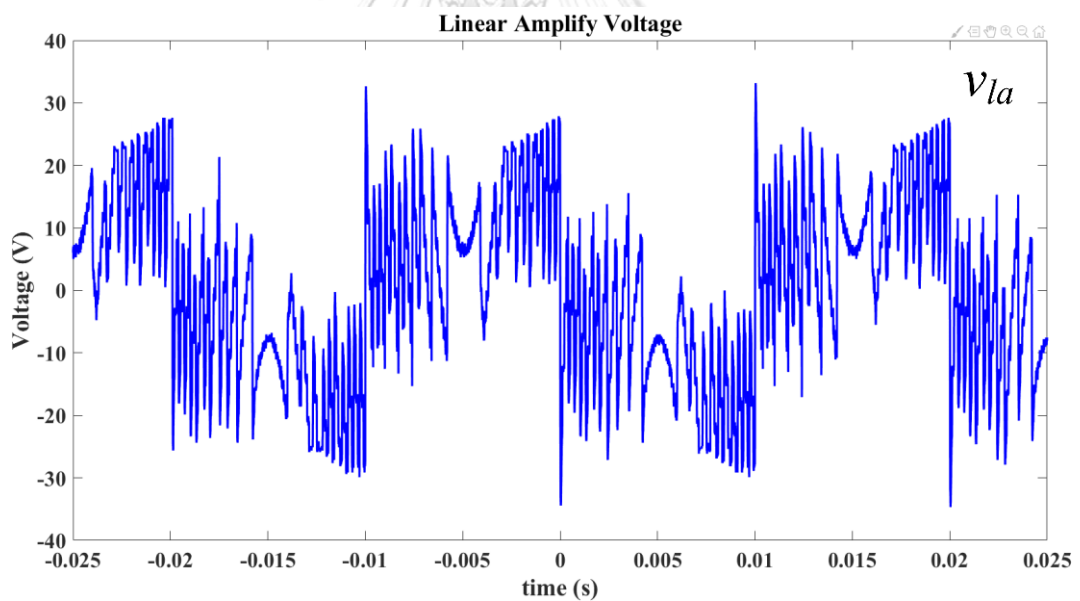


รูปที่ 4.29 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับหลังเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน

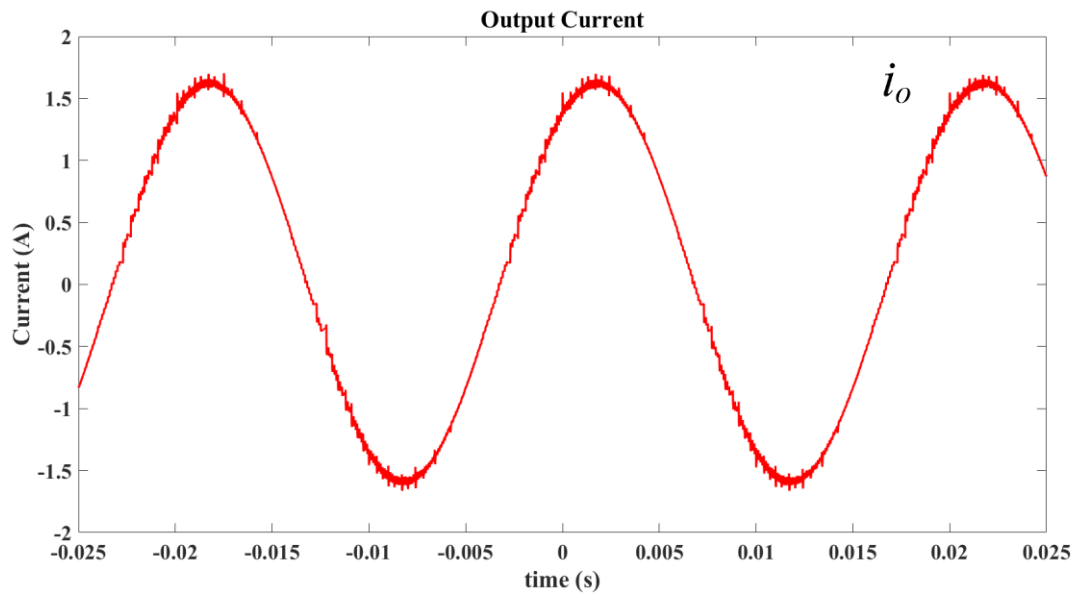




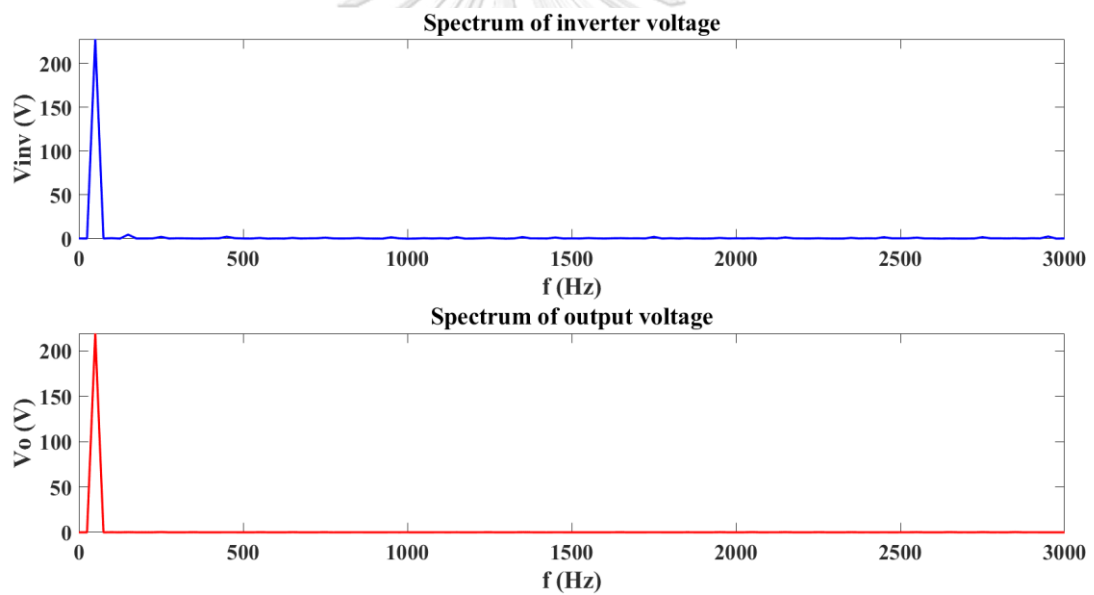
รูปที่ 4.30 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยจากวงจรมายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัว  
ต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน



รูปที่ 4.31 แรงดันชดเชยของวงจรมายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อ  
อนุกรมกัน



รูปที่ 4.32 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายโหลดเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน



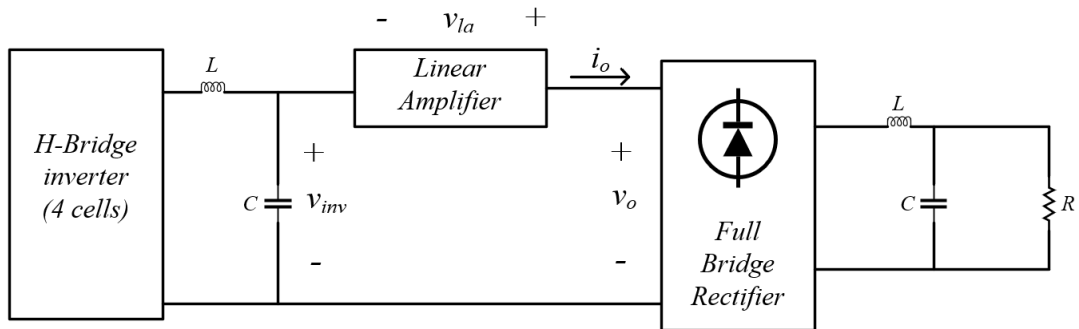
รูปที่ 4.33 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน

จากผลการทดสอบสามารถหาค่า Total Harmonic Distortion (THD) ของแรงดันของอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงผลการทดสอบด้วยโหลดตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน

<i>Output Voltage (RMS)</i>	219.3V
<i>Output Current (RMS)</i>	1.13A
<i>THD Inverter Voltage (THD<sub>v<sub>inv</sub></sub>)</i>	3.58%
<i>THD Output Voltage (THD<sub>v<sub>o</sub></sub>)</i>	0.44%

#### 4.7 การทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส

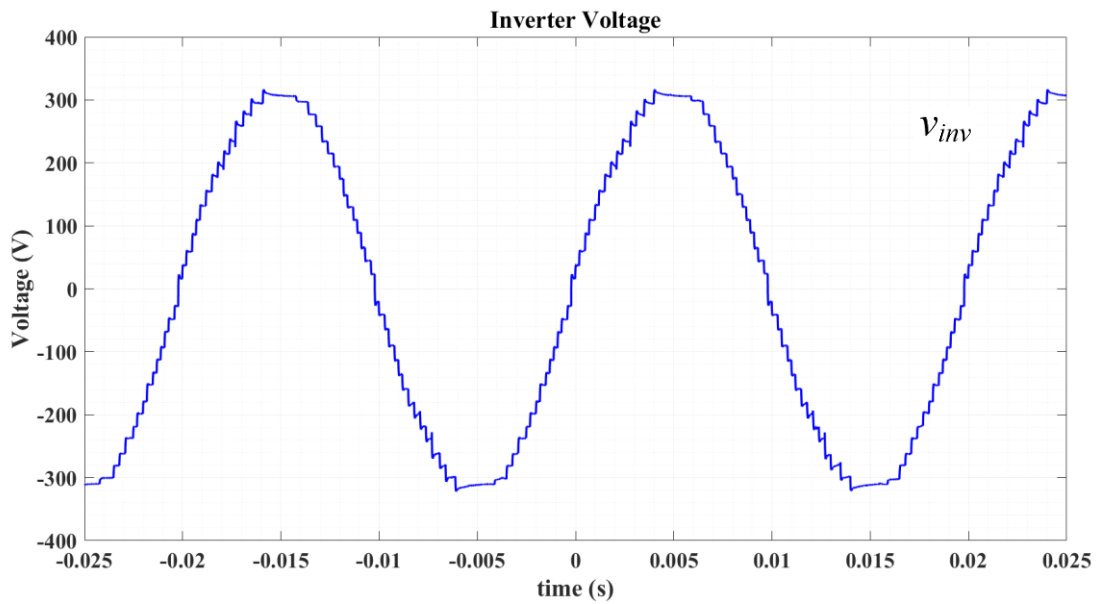


รูปที่ 4.34 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส

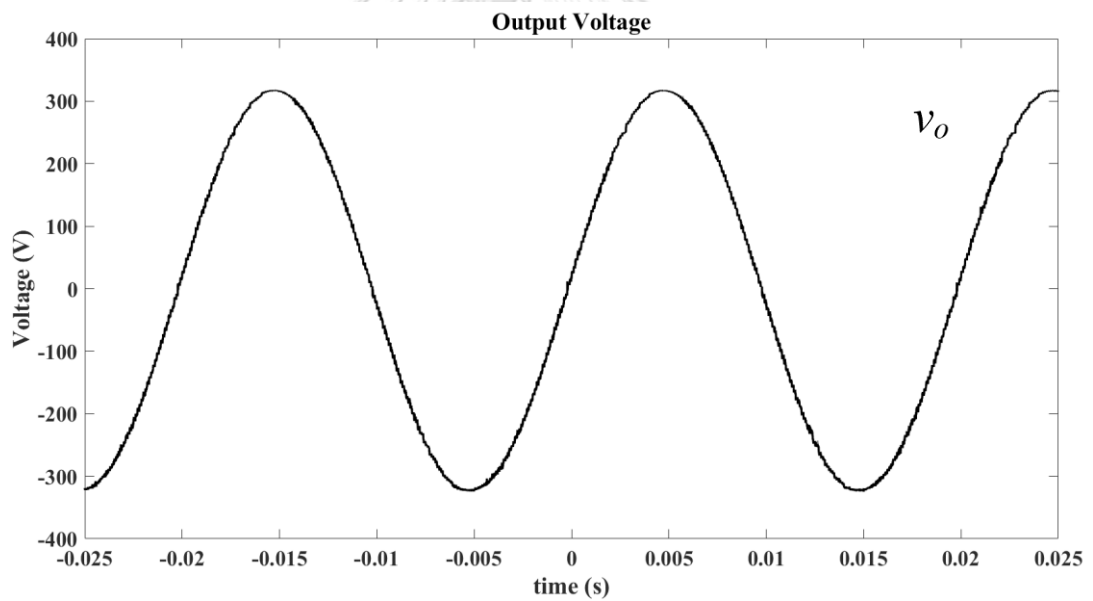
ในการทดสอบที่ 4.7 จะทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟสซึ่งเป็นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 4.13 และได้ผลการทดสอบของแรงดันจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับ แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรรขยายเชิงเส้นดังรูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 ตามลำดับ ในส่วนของค่าแรงดันชดเชยและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.37 และรูปที่ 4.38 ตามลำดับ และสเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันด้านออกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.39

ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟส

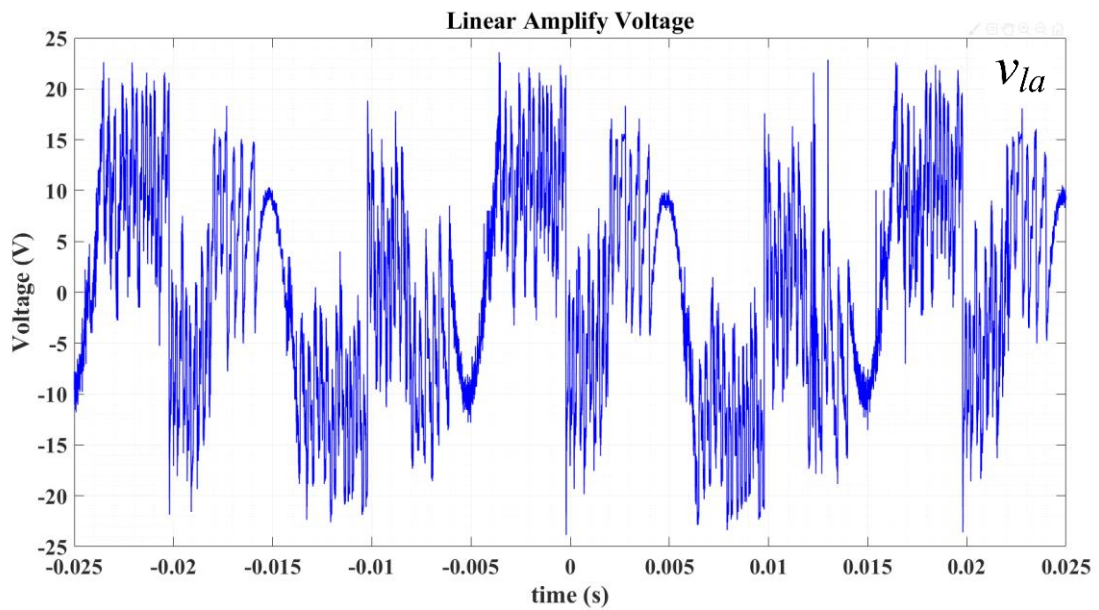
แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ 230V RMS
ความถี่	50 Hz
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	20 $\mu$ H
ตัวเก็บประจุ $C$	5 $\mu$ F
โหลด	Full Bridge Rectifier $L$ 0.3mH $C$ 120 $\mu$ F $R$ 100 Ohm



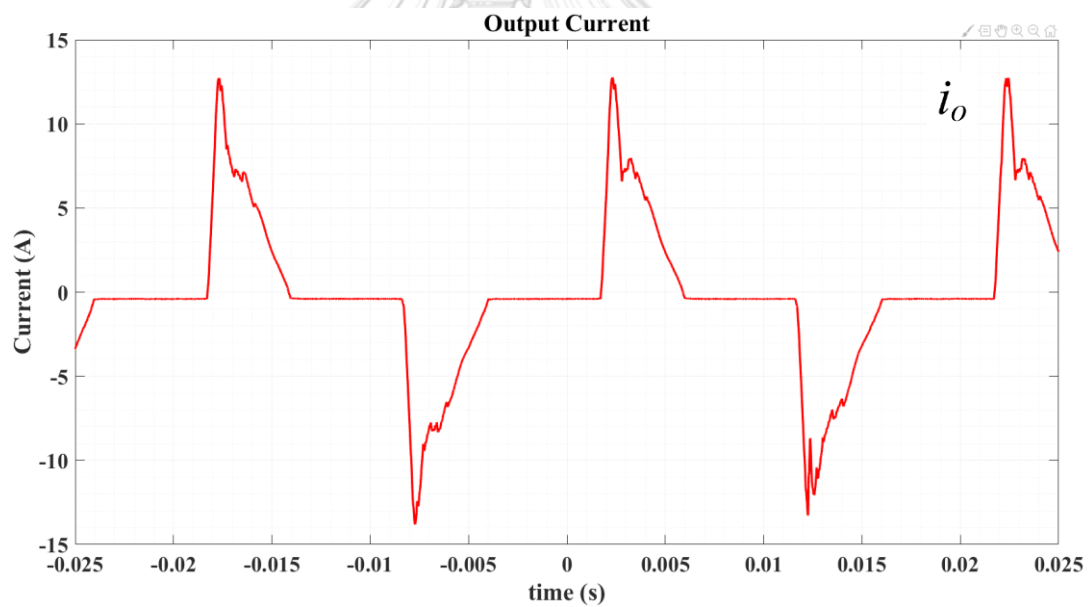
รูปที่ 4.35 แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การแรงกระแสแบบหนึ่งเฟส



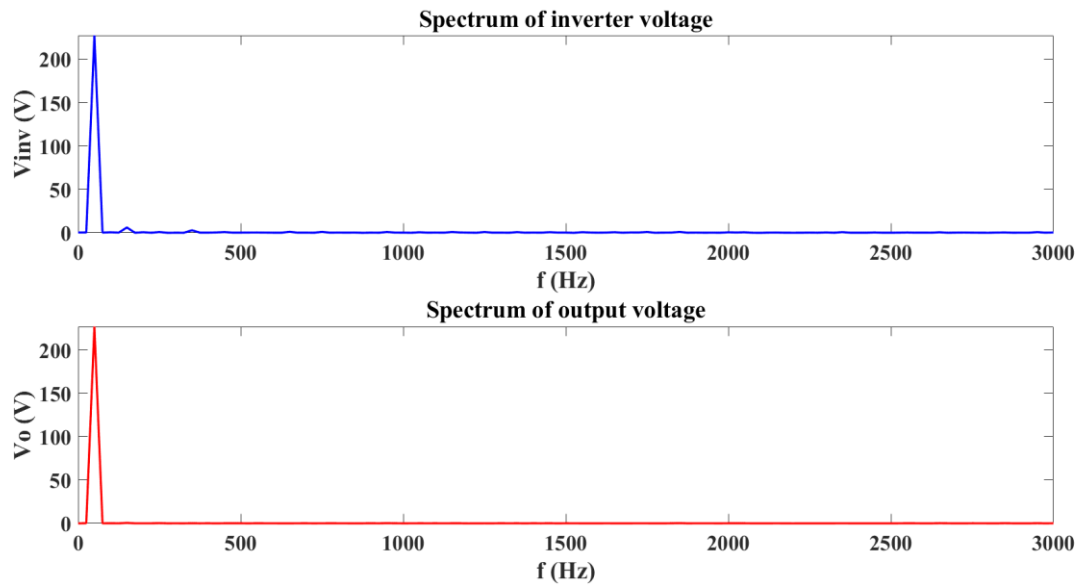
รูปที่ 4.36 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรมายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว



รูปที่ 4.37 แรงดันขดเซยของวงจรมายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว



รูปที่ 4.38 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว



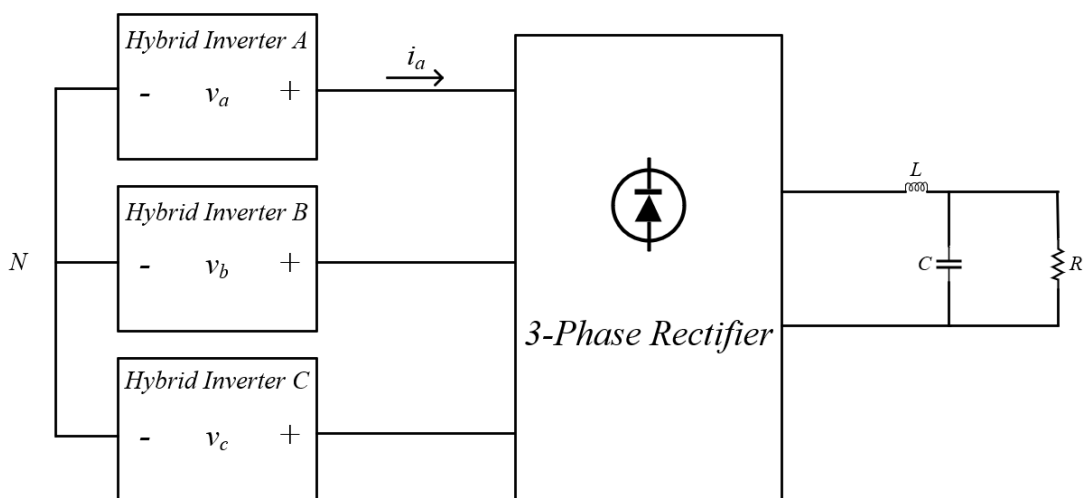
รูปที่ 4.39 สเปกตรัมของแรงดันอินเวอร์เตอร์และแรงดันต้านออกหลังผ่านวงจรขยายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว

ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบเฟสเดียว

<i>Output Voltage (RMS)</i>	227.0V
<i>Output Current (RMS)</i>	4.35A (12.91A Peak)
<i>THD Inverter Voltage (THD<sub>v<sub>inv</sub></sub>)</i>	3.58%
<i>THD Output Voltage (THD<sub>v<sub>o</sub></sub>)</i>	0.52%

จากผลการทดสอบสามารถหาค่า Total Harmonic Distortion (THD) ของแรงดันของอินเวอร์เตอร์และแรงดันต้านออกได้ดังตารางที่ 4.14 และยังสามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบค่ายอด (Crest factor) ได้เป็น 2.97

#### 4.8 การทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส

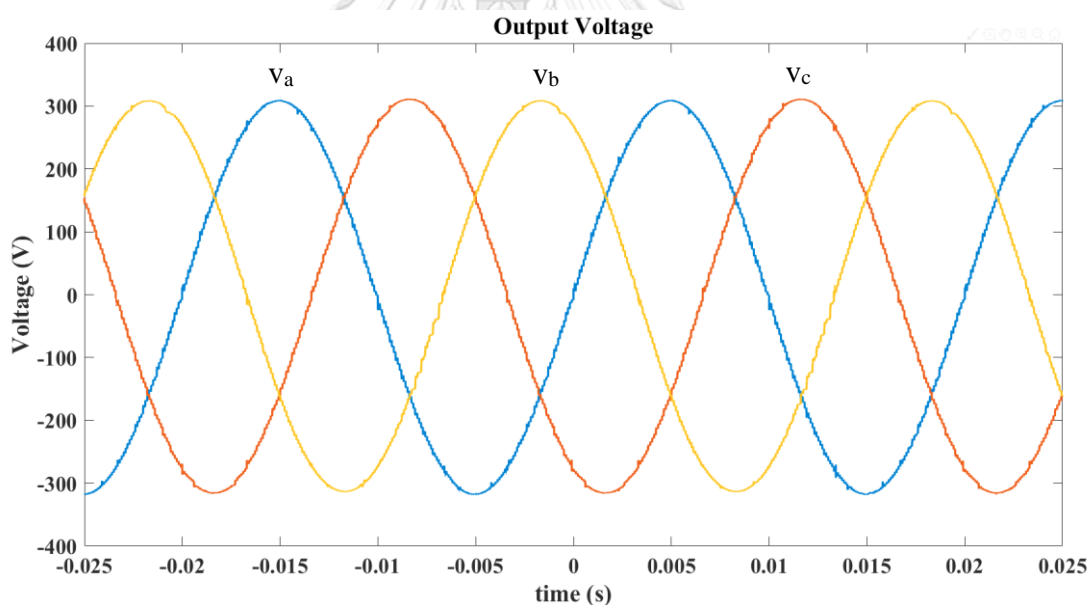


รูปที่ 4.40 วงจรที่ใช้ทดสอบสำหรับการทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส

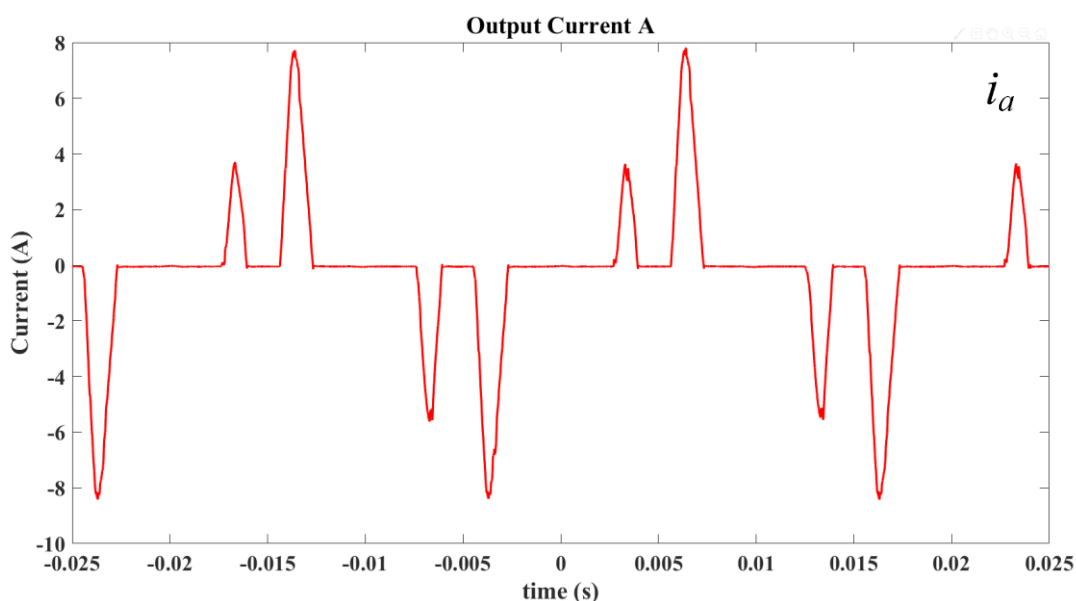
ในการทดสอบที่ 4.8 จะทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟสซึ่งเป็นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 4.15 และได้ผลการทดสอบของแรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรถายเชิงเส้นดังรูปที่ 4.41 และกระแสไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่จ่ายให้กับโหลดถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.42

ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส

แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ 220V RMS (3-phase, Line to Neutral)
ความถี่	50 Hz
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	20 $\mu$ H
ตัวเก็บประจุ $C$	5 $\mu$ F
โหลด	3-Phase Rectifier $L$ 0.3mH $C$ 160 $\mu$ F $R$ 300 $\Omega$



รูปที่ 4.41 แรงดันด้านออกหลังผ่านการชดเชยด้วยวงจรถายเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส



รูปที่ 4.42 กระแสไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่จ่ายให้กับโหลดเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส

ตารางที่ 4.16 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อทดสอบด้วยโหลดที่ใช้การเรียงกระแสแบบสามเฟส

<i>Output Voltage a/b/c (RMS)</i>	221 / 222 / 221V
<i>Output Current a (RMS)</i>	2.40A (7.81A Peak)
<i>THD Output Voltage a/b/c (THD<sub>v<sub>o</sub></sub>)</i>	0.30 / 0.46 / 0.93 %

จากผลการทดสอบสามารถหาค่า Total Harmonic Distortion (THD) ของแรงดันด้านออกได้ดังตารางที่ 4.16 และสามารถความมอดูลาค่าตัวประกอบค่ายอด (Crest factor) ได้เป็น 3.25

#### 4.9 การทดสอบกลับชั่วแรงดันชั่วขณะและการลดขนาดของโอเวอร์ชูด

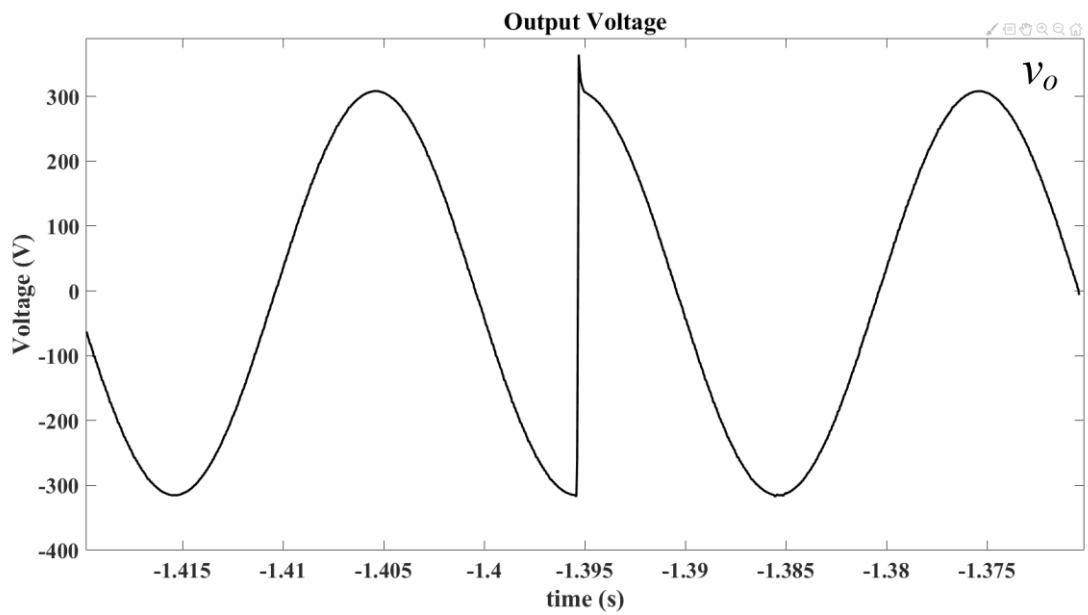
ในการทดสอบที่ 4.9 จะทดสอบด้วยการป้อนคำสั่งให้กลับชั่วแรงดันชั่วขณะ โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 4.17 จากผลการทดสอบได้แรงดันด้านออกดังรูปที่ 4.43 และรูปที่ 4.44 แสดงภาพขยายของแรงดันด้านออกในขณะที่มีการกลับชั่วของแรงดัน

#### การทดสอบกลับชั่วแรงดันชั่วขณะ

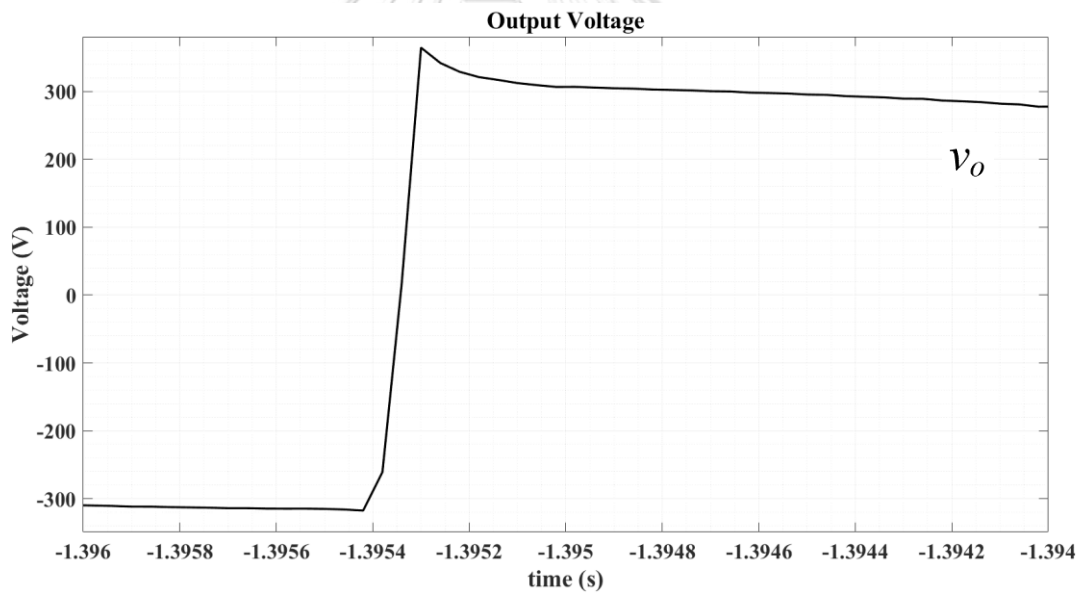
ตารางที่ 4.17 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบกลับชั่วแรงดันชั่วขณะ

แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ 220V RMS
ความถี่	50 Hz
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	20 $\mu$ H
ตัวเก็บประจุ $C$	5 $\mu$ F
โหลด	ไม่มี





รูปที่ 4.43 แรงดันด้านออกเมื่อป้อนคำสั่งให้กลับขั้วแรงดันชั่วขณะ



รูปที่ 4.44 ภาพขยายของแรงดันด้านออก ณ ช่วงที่กลับขั้ว

จากผลการทดสอบสามารถคำนวณค่าแบนด์วิดท์ที่ได้ดังสมการ (4.1) และได้ค่าแบนด์วิดท์ดังตารางที่ 4.18

$$f_{3dB} \approx \frac{0.35}{\text{RiseTime}} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.18 ตารางแสดงผลการทดสอบเมื่อทดสอบกลับชั่วแรงดันด้านออกชั่วขณะ

<i>Rise Time</i>	<i>0.7 us</i>
<i>Bandwidth (<math>f_{3dB}</math>)</i>	<i>5 kHz</i>

จากผลการทดสอบกลับชั่วของแรงดันด้านออก พบว่ามีช่วงเวลาขาขึ้นคือ 0.7 ไมโครวินาที ทำให้สามารถประมาณค่าแบนด์วิดท์ของแรงดันได้ 5 kHz นอกจากนี้แรงดันด้านออกยังมีโอเวอร์ชูตจากการกลับชั่วแรงดันชั่วขณะอยู่ประมาณ 8.6%

#### 4.9.1 การลดขนาดโอเวอร์ชูตด้วยการเพิ่มความต้านทานในวงจรกรอง

วิธีการลดขนาดของโอเวอร์ชูตของแรงดันแบบขั้นสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มค่าความต้านทานที่อนุกรมกับตัวเก็บประจุในวงจรกรองที่ต่อกับด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับในลำดับถัดไปจะเป็นการทดสอบกลับชั่วแรงดันด้านออกชั่วขณะเพื่อวัดค่าเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูตในแต่ละค่าความต้านทานที่เพิ่มเข้าไปในวงจรกรอง จากผลการทดสอบตารางที่ 4.19 จะพบว่าการเพิ่มขนาดของค่าความต้านทานจะสามารถช่วยลดขนาดของโอเวอร์ชูตได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นโดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 7-10%

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบลดขนาดของโอเวอร์ชูตด้วยการเพิ่มค่าความต้านทานในวงจรกรอง

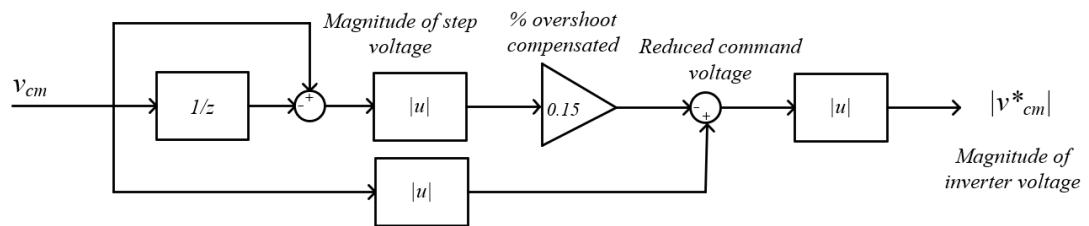
<i>R</i>	<i>C</i>	<i>%Overshoot</i>
<i>5 Ohm</i>	<i>5 uF</i>	<i>9.29</i>
<i>8 Ohm</i>	<i>5 uF</i>	<i>7.76</i>
<i>15 Ohm</i>	<i>5 uF</i>	<i>8.07</i>
<i>50 Ohm</i>	<i>5 uF</i>	<i>9.65</i>

#### 4.9.2 การลดขนาดโอเวอร์ชูตด้วยการเพิ่มค่าสังขตเซย์ในแรงดันที่ใช้สั่ง

##### อินเวอร์เตอร์หลายระดับ

นอกจากการเพิ่มขนาดของค่าความต้านทานในวงจรกรองแล้วยังสามารถลดขนาดของโอเวอร์ชูตได้ด้วยวิธีการชดเชยขนาดของแรงดันที่ใช้สั่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับ โดยเพิ่มวิธีการชดเชยแรงดันดังแผนภาพรูปที่ 4.45 ซึ่งแนวคิดของวิธีดังกล่าวคือ การนำค่าแรงดันคำสั่งที่ปัจจุบันมาลบกับค่าแรงดันคำสั่งก่อนหน้าเพื่อคำนวณหาขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน จากนั้นจะใช้ค่าแรงดัน 15% ของขนาดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปมาหักล้างกับแรงดันปัจจุบันที่ใช้สั่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับ วิธีดังกล่าวยังถือเป็นระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า และสาเหตุที่ใช้ค่าขนาดแรงดันชดเชยมากกว่า 10% เป็นเพราะว่าในบางกรณีแรงดันคำสั่งอาจมีค่าต่ำกว่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จึงต้องใช้ค่าขนาดแรงดันชดเชยที่มากขึ้น

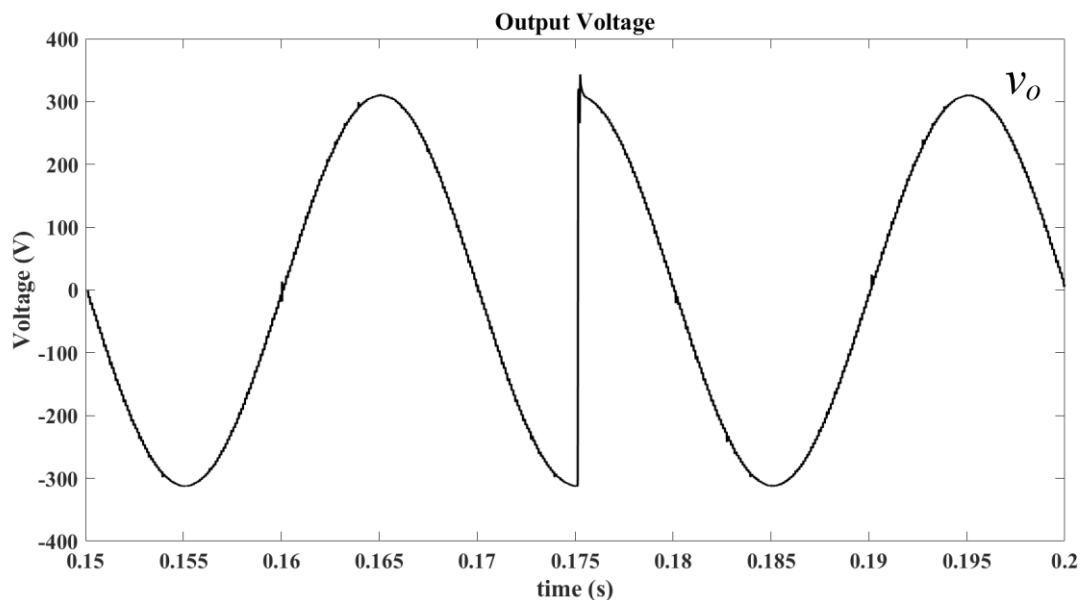
จากผลการทดสอบการลดขนาดของโอเวอร์ชูตด้วยการชดเชยแรงดันที่ใช้สั่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้ผลดังตารางที่ 4.20 จากตารางจะพบวิธีดังกล่าวสามารถลดขนาดของโอเวอร์ชูตได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการเพิ่มค่าความต้านทานในวงจรกรอง และได้แรงดันด้านออกดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.45 แผนผังการชดเชยแรงดันที่ใช้สั่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับเพื่อลดขนาดของโอเวอร์ชูต

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบลดขนาดของโอเวอร์ชูตด้วยการชดเชยแรงดันที่ใช้สั่งอินเวอร์เตอร์

$R$	$C$	% compensate	%Overshoot
5 Ohm	5 $\mu$ F	15	4.82



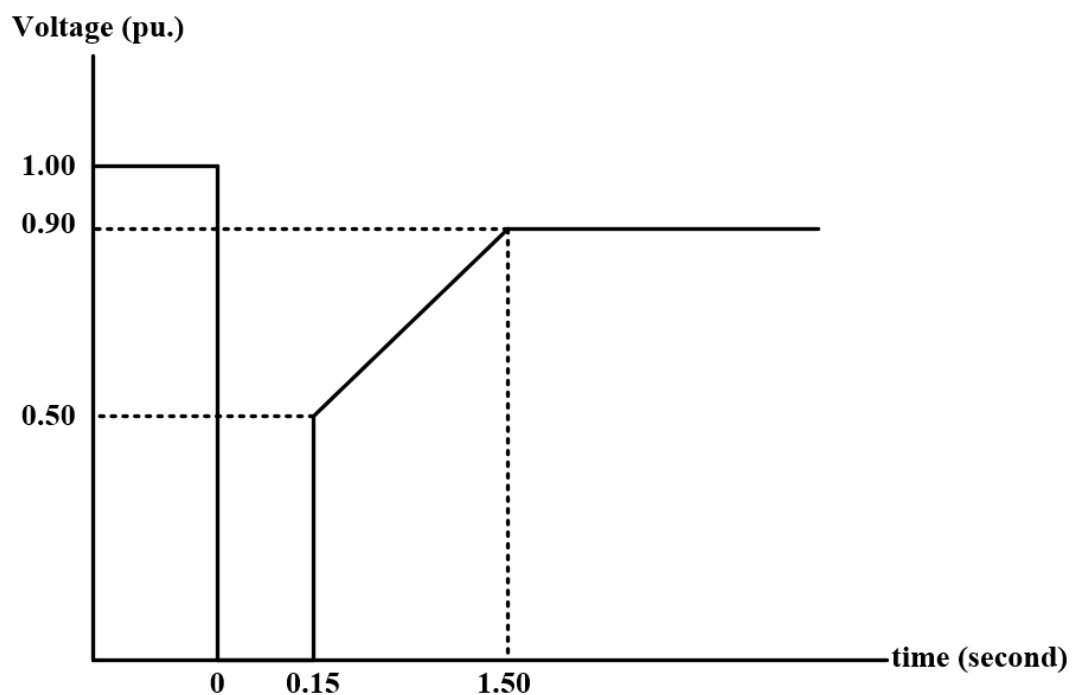
รูปที่ 4.46 แรงดันกลับชั่วเมื่อใช้วิธีการลดขนาดโอเวอร์ชูตด้วยการชดเชยแรงดันที่ใช้สั่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับ

#### 4.10 การทดสอบจำลองสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ

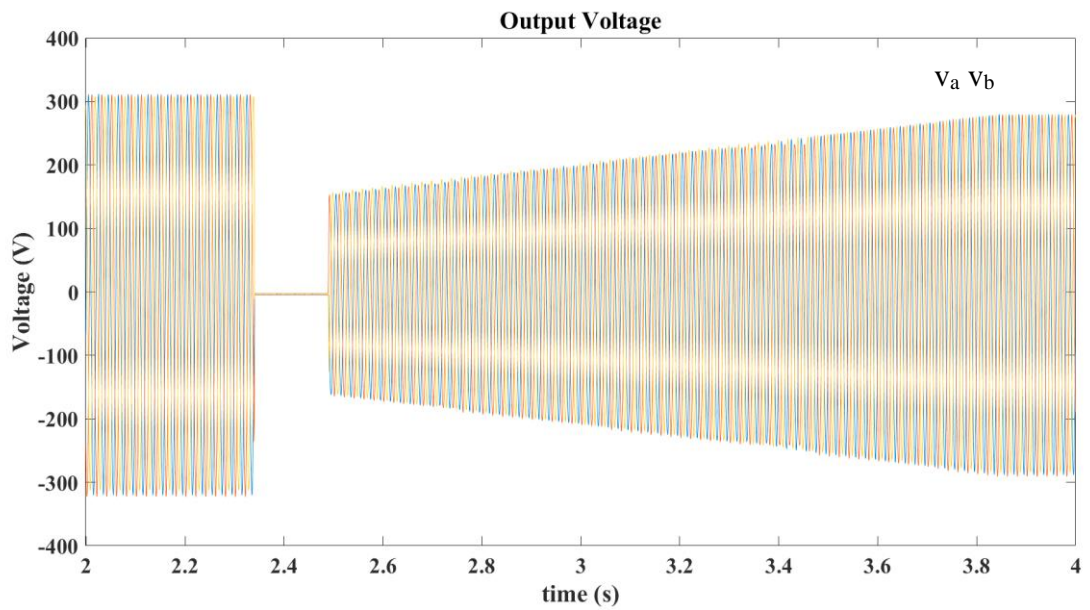
ในการทดสอบที่ 4.10 จะเป็นการทดสอบการจำลองสภาวะแรงดันตกชั่วขณะซึ่งใช้สำหรับการทดสอบมาตรฐานของอินเวอร์เตอร์โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังตารางที่ 4.21 และมีฟังก์ชันการทดสอบขนาดของแรงดันในแต่ละเวลาเป็นดังรูปที่ 4.47 ผลการทดสอบได้แรงดันด้านออกของทั้งสามเฟสเป็นดังรูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.49 จะเป็นภาพขยายของแรงดันด้านออกในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ และรูปที่ 4.50 แสดงกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดเฟสที่หนึ่งเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ

ตารางที่ 4.21 ตารางแสดงค่าเงื่อนไขในการทดสอบจำลองสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ

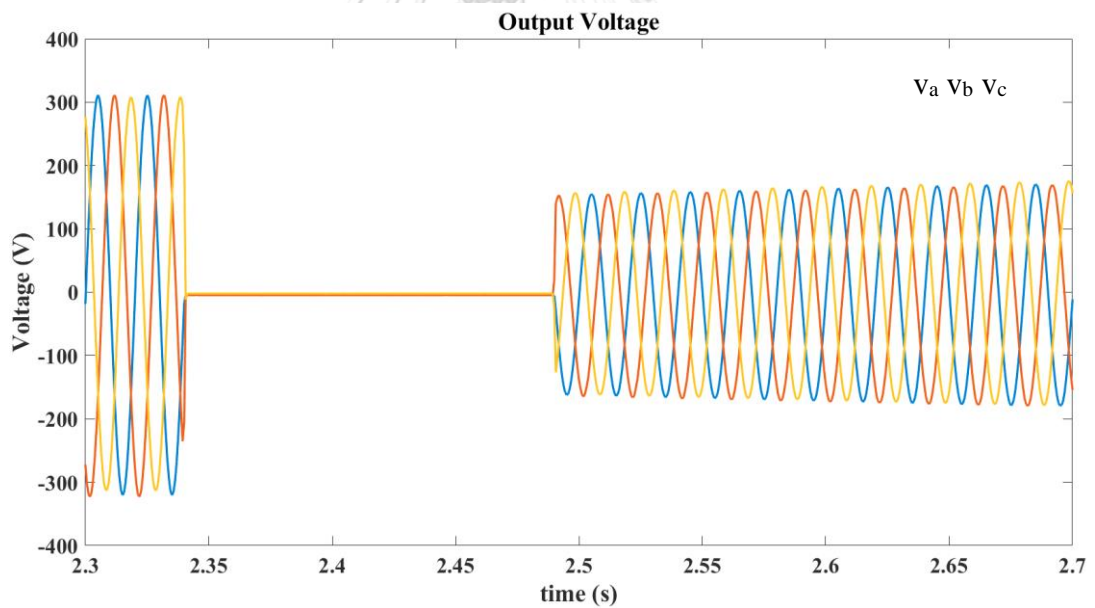
แรงดันคำสั่ง	คลื่นไซน์ 220V RMS (3-phase, Line to Neutral)
ความถี่	50 Hz
ตัวเหนี่ยวนำ $L$	20 $\mu$ H
ตัวเก็บประจุ $C$	5 $\mu$ F
โหลด	R 100 $\Omega$ L 16.2 mH



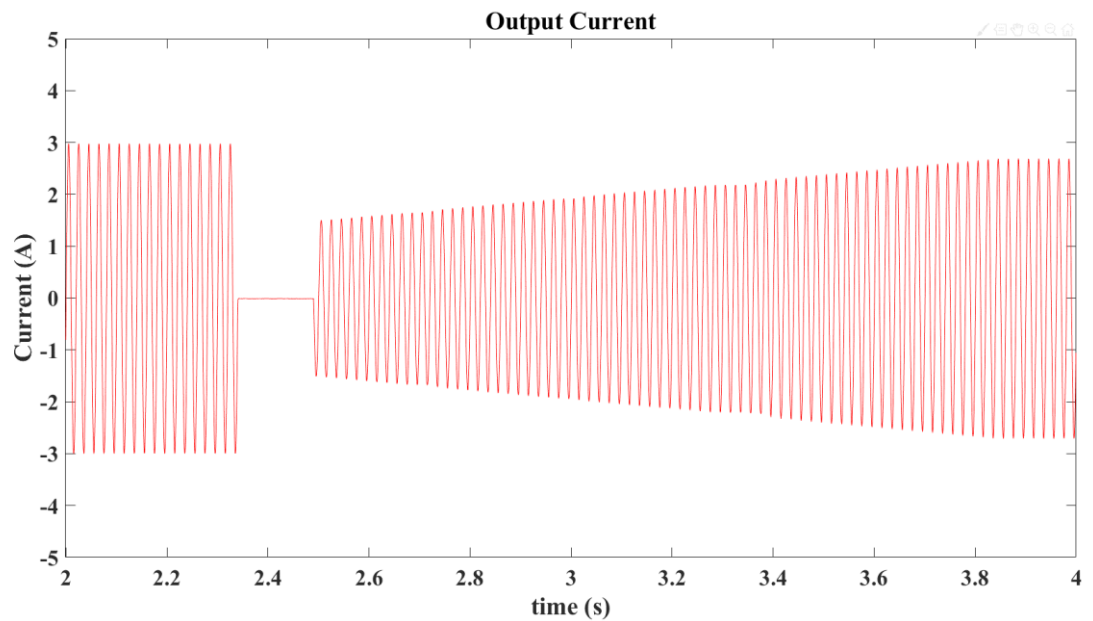
รูปที่ 4.47 กราฟจำลองการเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะของขนาดแรงดันและเวลา



รูปที่ 4.48 แรงดันด้านออกทั้งสามเฟสเมื่อป้อนแรงดันคำสั่งที่จำลองการเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะของขนาดแรงดันและเวลา



รูปที่ 4.49 ภาพขยายที่ 2 ของแรงดันด้านออกที่จำลองการเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ



รูปที่ 4.50 กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดเมื่อทดสอบจำลองการเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ

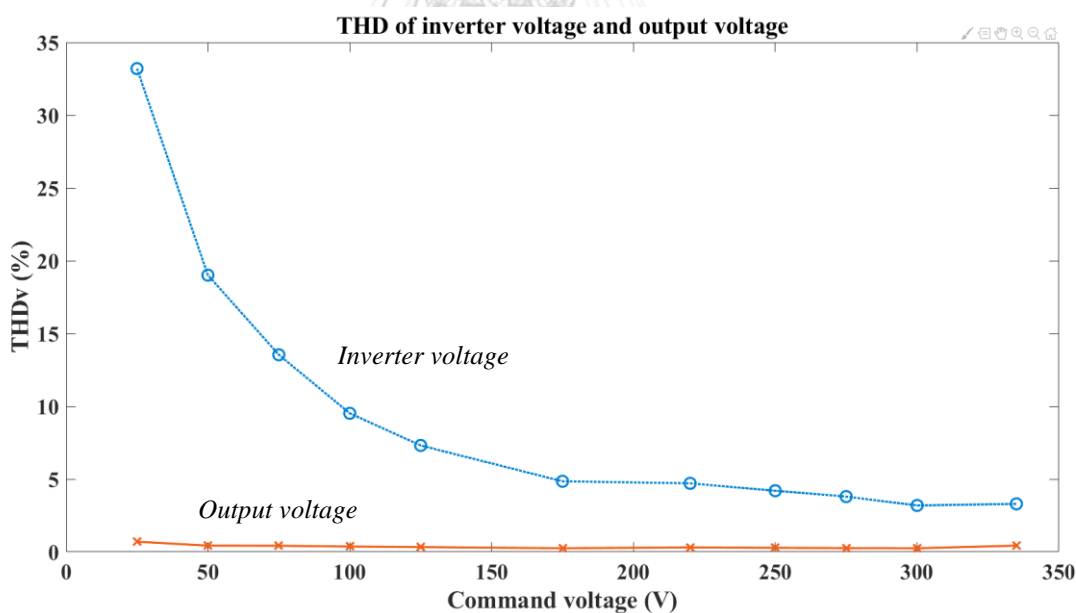
จากผลการทดสอบสภาวะแรงดันตกชั่วขณะพบว่าไฮบริดคอนเวอร์เตอร์สามารถสร้างแรงดันด้านออกที่มีรูปแบบได้ตรงกับกราฟการจำลองรูปที่ 4.47

#### 4.11 การทดสอบสร้างแรงดันคลื่นไซน์ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ

การทดสอบที่ 4.11 จะทดสอบด้วยการสร้างแรงดันด้านออกรูปคลื่นไซน์ที่ระดับแรงดันตั้งแต่ 25-335V และคำนวณค่า  $THD_v$  ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 4.22 และกราฟรูปที่ 4.51

ตารางที่ 4.22 ค่า  $THD_v$  ของแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับและแรงดันด้านออก

Output voltage	%THD <sub>v</sub> inverter	%THD <sub>v</sub> output
25V	33.2	0.70
50V	19.01	0.43
75V	13.54	0.42
100V	9.52	0.37
125V	7.31	0.33
175V	4.85	0.25
220V	4.71	0.31
250V	4.20	0.28
275V	3.80	0.26
300V	3.19	0.25
335V	3.30	0.43



รูปที่ 4.51 ค่า  $THD_v$  ของแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับและแรงดันด้านออกที่ระดับแรงดันต่าง ๆ

จากผลการทดสอบจะพบว่าแรงดันที่สร้างจากอินเวอร์เตอร์หลายระดับจะมีค่า  $THD_v$  สูงขึ้นเมื่อแรงดันคำสั่งมีค่าน้อยเนื่องจากจำนวนระดับของแรงดันมีค่าน้อย อย่างไรก็ตามแรงดันด้านออกหลังการชดเชยด้วยวงจรถายเชิงเส้นมีค่า  $THD_v$  อยู่ประมาณ 0.2 – 0.7

## บทที่ 5

### วิเคราะห์ผลการทดสอบ บทสรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบแรงดันอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ใช้วิธีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน จะเกิดแรงดันสไปก์ขึ้นซึ่งวงจรถายเชิงเส้นไม่สามารถชดเชยได้หมด จึงจำเป็นต้องมีวงจรถองขนาดเล็กลงคือตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุขนาดเล็ก ซึ่งจากผลการทดสอบวงจรถองสามารถลดขนาดของแรงดันสไปก์ให้เพียงพอต่อการชดเชยของวงจรถายเชิงเส้นได้ โดยการทดสอบที่กระแสพิกัดจะได้ว่าแรงดันด้านออกมีค่าผิดเพี้ยน Total Harmonic Distortion (THD) ไม่เกิน 1% และยังสามารถรองรับโหลดแบบไม่เชิงเส้นที่มีค่าตัวประกอบยอดคลื่นของกระแสไฟฟ้า (Crest Factor) ได้ประมาณ 3 เท่า นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนรูปแบบของแรงดันด้านออกได้อย่างฉับพลันโดยการป้อนรูปแบบแรงดันคำสั่งตามที่ต้องการ เช่น การกลับขั้วของแรงดันหรือลดขนาดของแรงดันอย่างทันทีทันใด แต่ยังคงมีค่าโอเวอร์ชูตของแรงดันประมาณ 7-10% จากผลการทดสอบการกลับเฟสแรงดันสามารถคำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ของแรงดันได้ประมาณ 5 kHz และสามารถสร้างแรงดันที่มีค่ายอดได้สูงสุดถึง 475 V

#### 5.2 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดด้วยเซลล์แบบเอชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายไฟตรงไม่เท่ากัน สามารถสร้างแรงดันด้านออกได้ตามที่ต้องการไม่ว่าโหลดจะเป็นทั้งแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นและยังมีค่าแบนด์วิดท์สูงถึง 5 kHz ซึ่งสูงกว่าแหล่งจ่ายกระแสสลับที่วางขายในอุตสาหกรรมสำหรับระบบทดสอบโดยมีค่าแบนด์วิดท์อยู่ที่ระดับประมาณ 2.4 kHz และ ค่ายอดแรงดันสูงสุด 424 V แต่อย่างไรก็ตามคอนเวอร์เตอร์แบบไฮบริดที่ใช้ในการทดสอบยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความละเอียดของไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้พยายามลดการใช้งานพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ให้เพียงพอที่จะทำงานกับระบบอุปกรณ์ทั้งหมดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวเดียวได้ ซึ่งโดยปกติแล้วอินเวอร์เตอร์หลายระดับมักจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สองตัวทำงานร่วมกันเช่น DSP กับ FPGA นอกจากนี้หากใช้ตัวคอนโทรลเลอร์ที่มีความไวและความละเอียดสูงขึ้นจะทำให้คุณภาพของแรงดันไฟฟ้าที่สร้างได้สูงขึ้นด้วย

จากผลการทดสอบการกลับขั้วของแรงดันคำสั่งจะพบว่าแรงดันด้านออกเกิดค่าโอเวอร์ชูตอยู่ที่ประมาณ 7-10% สาเหตุเกิดจากการสั้นพ้องของวงจรถองขนาดเล็ก การเพิ่มตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุสามารถลดขนาดของโอเวอร์ชูตได้เพียงเล็กน้อย



เท่านั้น จากผลการทดสอบวิธีการลดขนาดโอเวอร์ชูตด้วยการชดเชยแรงดันที่ใช้ส่งอินเวอร์เตอร์หลายระดับ จะสามารถลดค่าของโอเวอร์ชูตได้ดีกว่าการเพิ่มความต้านทานในวงจรกรอง



### ภาคผนวก

แบนด์วิดท์ (Bandwidth) คือ ช่วงความถี่ระหว่างขอบล่างและขอบบนที่มีแอมพลิจูดของผลตอบสนองขนาด 0.707 เท่าของแรงดันคำสั่ง (3 เดซิเบล) และสามารถประมาณค่าแบนด์วิดท์จากการทดสอบผลตอบสนองแบบขั้น โดยหาได้จากช่วงเวลาขึ้นของแรงดัน (rise time) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ (a) เมื่อ rise time คือช่วงเวลาตั้งแต่แรงดันขนาด 10% ถึง 90%

$$f_{3dB} \approx \frac{0.35}{\text{rise time}} \quad (a)$$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บรรณานุกรม

1. G. Gong, D.H., and J. W. Kolar, A Comparative Study of Multicell Amplifiers for AC-Power-Source Applications. *IEEE Trans. Power Electron.* p. 149–164.
2. Gong, G., H. Ertl, and J.W. Kolar. A multi-cell cascaded power amplifier. in Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. 2006.
3. Silva, G.S.d., et al., Hybrid AC Power Source Based on Modular Multilevel Converter and Linear Amplifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015. 30(1): p. 216-226.
4. Fujita, H. and N. Yamashita, Performance of a Diode-Clamped Linear Amplifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008. 23(2): p. 824-831.
5. Yamashita, N. and H. Fujita. A Filter-Less EMI-Free Power Converter Using a Diode-Clamped Linear Amplifier. in 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2009.
6. Fujita, H., A Single-Phase Utility-Interface Circuit Without Any AC Inductor nor EMI Filter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009. 45(5): p. 1860-1867.
7. Obara, H., T. Ohno, and A. Kawamura. Multi-Level Topology Based Linear Amplifier Family for Realization of Noise-Less Inverters. in 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). 2018.
8. Kishida, Y., N. Hatano, and A. Iwata. Development of STATCOM with gradationally controlled voltage inverter. in 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. 2009.
9. Mori, O., et al. A Single Phase Uninterruptible Power System with a Gradationally Controlled Voltage Inverter. in IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. 2006.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายระพีพงศ์ เรียงเรียบ
วัน เดือน ปี เกิด	18 ธันวาคม 2536
สถานที่เกิด	ปทุมธานี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง)
ที่อยู่ปัจจุบัน	10 รังสิตปทุมธานี14ซอย13 ต.ประชาธิปัตย์ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130
ผลงานตีพิมพ์	R.Rapeepong, "An AC Power Source Using A Hybrid Converter with Unequal DC-Source H-Bridge Cells," EECON-41, pp.209-212, 2018.
รางวัลที่ได้รับ	เหรียญทองแดง ฟิสิกส์โอลิมปิกระดับชาติครั้งที่ 10 (TPhO-10)