

การทำให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาห์ของการมอดูเลตเชิงสเปกเตอร์สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ

นายศุภกร ไพบูลย์



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)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Carrier-Based Realization of Space-Vector Modulation for Three-Level Inverters

Mr. Supakorn Paiboon



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาห้ของการมอดูเลตเชิงสเป
	ซเวกเตอร์สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ
โดย	นายศุภกร ไพบูลย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ นาคพิระยุทธ)

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

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

ศุภกร ไพบูลย์ : การทำให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาห์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ (Carrier-Based Realization of Space-Vector Modulation for Three-Level Inverters) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน, 77 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการทำการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์รูปแบบต่างๆของอินเวอร์เตอร์สามระดับให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาห์โดยอาศัยทฤษฎีการมอดูเลตแบบชั่วครู่ ซึ่งช่วยให้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ทำได้ง่ายขึ้นอย่างมาก วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการหาค่าแรงดันอ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาห์โดยคำนวณจากค่าแรงดันคำสั่งและแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสม และได้ประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอกับการมอดูเลตเชิงเวกเตอร์ที่เป็นที่นิยม 2 รูปแบบ คือ การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุดและการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ใช้เวกเตอร์เสมือนสามตัวที่ใกล้ที่สุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอสามารถทำให้เป็นจริงได้โดยง่าย และทฤษฎีมีความถูกต้องและใช้งานได้จริงในเชิงปฏิบัติ



ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670407221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: SPACE-VECTOR MODULATION / CARRIER-BASED MODULATION / DIPOLAR MODULATION

SUPAKORN PAIBOON: Carrier-Based Realization of Space-Vector Modulation for Three-Level Inverters. ADVISOR: ASST. PROF. DR.SOMBOON SANGWONGWANICH, CO-ADVISOR: ASST. PROF. DR.SURAPONG SUWANKAWIN, 77 pp.

This thesis presents carrier-based realization of all space-vector modulation methods for three-level inverters using dipolar modulation theory, which greatly simplify the practical implementation. Algorithm to derive reference voltages for comparison with carrier waves is given using only voltage commands and appropriate zero voltages. As examples, the proposed algorithm is applied to two space-vector modulation methods, i.e. the nearest-three-vector modulation (NTV) and the nearest-three-virtual-vector (NTV²) modulation. The experimental result show that the proposed unified algorithm can be realized very easily, and all the theoretical results are correct and feasible in practice.



Department: Electrical Engineering

Field of Study: Electrical Engineering

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความเอาใจใส่และช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ผศ.ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ และ ผศ.ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเสมอมา ขอขอบคุณ คำแนะนำและกำลังใจจากรุ่นพี่รุ่นน้องห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังทุกคน ตลอดจน โครงการทุนกักนฤฤที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฒ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ	1
1.2 สเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	2
1.3 หลักการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ	3
1.4 รูปแบบของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ [4]-[10].....	4
1.4.1 การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุด (Nearest-Three-Vector Modulation: NTV).....	4
ก) การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุด (NTV) ที่ใช้ 4 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [4][5]	4
ข) การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุด (NTV) ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [6]-[8].....	5
1.4.2 การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์เสมือนสามตัวที่ใกล้ที่สุด (NTV ²) [9][10]	6
1.5 ข้อเสียของการคำนวณการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ	7
1.6 การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ	9
1.7 เป้าหมายของงานวิจัย	9

บทที่ 2 ขั้นตอนการคำนวณการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ และทฤษฎีการมอดูเลตแบบซั้วคู่	10
2.1 ขั้นตอนการคำนวณการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ	10
2.1.1 คำนวณหาค่าขนาดและมุมของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง	10
2.1.2 การตรวจสอบตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง [3]	10
2.1.3 การคำนวณช่วงเวลาการสวิตช์ [2]	11
2.1.4 การคำนวณค่าวัฏจักรงานของแต่ละสวิตช์	13
2.2 ทฤษฎีการมอดูเลตแบบซั้วคู่ [1]	13
บทที่ 3 แนวความคิดใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์	16
3.1 แนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วง	16
3.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ต	17
3.2.1 หาพิกัดจุดศูนย์ถ่วงของเวกเตอร์แรงดันในแต่ละเซกเตอร์จากแนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วง	18
3.2.2 ตรวจสอบเซกเตอร์และพื้นที่สามเหลี่ยมย่อยที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งตกอยู่	20
3.2.3 หาค่าวัฏจักรงานของเวกเตอร์แรงดัน 3 ตัวที่ใช้ในการสร้างเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง	28
3.2.4 หาค่าแรงดันอ้างอิงบัสบวก และแรงดันอ้างอิงบัสลบ	29
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้วิธีการที่น่าสนใจกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ แบบ NTV และ NTV ²	32
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ตแบบซั้วเดี่ยวทั้ง 3 เฟส	32
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV ² กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ตแบบซั้วเดี่ยว 2 เฟสซั้วคู่ 1 เฟส	39
บทที่ 5 กลไกการควบคุมสมดุลแรงดันกึ่งกลางบัส	40
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกึ่งกลางบัสกับกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัส	40

5.2 แนวคิดใหม่ในการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสด้านกระแสในวอร์ลท์ที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสด โดยไม่มีต้องมีอุปกรณ์ควบคุมสำหรับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV และ NTV ²	41
บทที่ 6 ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองการทำงาน.....	52
6.1 การจำลองการทำงาน	52
6.1.1 ผลการจำลองการทำงาน	53
6.2 การทดลองการทำงานกับระบบจริง	54
6.2.1 ผลการทดลองการทำงาน.....	55
6.3 ผลการเปรียบเทียบช่วงเวลาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของ TMS320LF2407 ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์	72
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	73
7.1 บทสรุปงานวิจัย	73
7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัยในลำดับถัดไป.....	73
รายการอ้างอิง	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	77

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1	วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล.....	1
รูปที่ 1.2	วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	2
รูปที่ 1.3	สเปซเวกเตอร์แรงดันและสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	2
รูปที่ 1.4	สเปซเวกเตอร์และการแบ่งพื้นที่ย่อยในเซกเตอร์ I ของการมอดูเลตแบบ NTV.....	4
รูปที่ 1.5	สเปซเวกเตอร์และการแบ่งพื้นที่ย่อยในเซกเตอร์ I ของการมอดูเลตแบบ NTV ²	6
รูปที่ 1.6	แผนผังการคำนวณการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	7
รูปที่ 1.7	ลำดับสถานะการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในพื้นที่ 4H เซกเตอร์ I (ตารางที่ 1.3).....	8
รูปที่ 1.8	แผนผังการคำนวณการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์กของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	9
รูปที่ 2.1	แผนผังสเปซเวกเตอร์สำหรับ m_1 และ m_2 ในเซกเตอร์ I.....	11
รูปที่ 2.2	เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง \mathbf{V}^* อยู่ในพื้นที่ 2 ของเซกเตอร์ I.....	11
รูปที่ 2.3	แนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงในการมอดูเลตแบบซั้วคู่.....	14
รูปที่ 2.4	รูปแบบของการมอดูเลตแบบซั้วคู่.....	15
รูปที่ 3.1	แนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วง.....	16
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการหาค่า \mathbf{U}_p และ \mathbf{U}_n ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์.....	18
รูปที่ 3.3	ค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_z ของเวกเตอร์สถานะการสวิตช์.....	18
รูปที่ 3.4	ระนาบแรงดันลำดับศูนย์ v_z และเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ในปริภูมิสามมิติ.....	19
รูปที่ 3.5	เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับเมื่อลบค่าแรงดันลำดับศูนย์แล้ว.....	19
รูปที่ 3.6	พิกัดเชิงแรงดันเฟสของเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i ในแต่ละเซกเตอร์.....	20
รูปที่ 3.7	แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ I.....	20
รูปที่ 3.8	แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ II เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ II.....	21

รูปที่ 3.9 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ III เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ใน
เซกเตอร์ III..... 22

รูปที่ 3.10 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ IV เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ใน
เซกเตอร์ IV 23

รูปที่ 3.11 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ V เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ใน
เซกเตอร์ V..... 24

รูปที่ 3.12 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ VI เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ใน
เซกเตอร์ VI 25

รูปที่ 3.13 การตรวจสอบเซกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง 26

รูปที่ 3.14 ค่าวัฏจักรงานย่อย λ_i ของเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i 29

รูปที่ 3.15 การมอดูเลตแบบ NTV เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในพื้นที่ 4H ของเซกเตอร์ I..... 30

รูปที่ 3.16 การหาค่าแรงดันอ้างอิงบัสบวก (U_p) และแรงดันอ้างอิงบัสลบ (U_n) 31

รูปที่ 4.1 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของ
พื้นที่ 1 34

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 1 35

รูปที่ 4.3 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของ
พื้นที่ 2L 35

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 2L 35

รูปที่ 4.5 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของ
พื้นที่ 2H..... 36

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 2H 36

รูปที่ 4.7 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของ
พื้นที่ 3 36

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 3 36

รูปที่ 4.9 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของ
พื้นที่ 4L 37

รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 4L..... 37

รูปที่ 4.11 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 4H..... 37

รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 4H 38

รูปที่ 5.1 แสดงทิศทางกระแสनिवर्त्तของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล 40

รูปที่ 6.1 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับกับโหลดตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวต้านทาน 52

รูปที่ 6.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง 54

รูปที่ 6.3 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [4] (ตารางที่ 1.3) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.1) โดยที่ค่า k (เซกเตอร์คู่)=0.5, k (เซกเตอร์คี่)=0.5 56

รูปที่ 6.4 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 1, 2L, 2H, 3) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [4] (ตารางที่ 1.3) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.1) โดยที่ค่า k (เซกเตอร์คู่)=0.5, k (เซกเตอร์คี่)=0.5 57

รูปที่ 6.5 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [5] (ตารางที่ 1.3) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.2) โดยที่ค่า k (เซกเตอร์คู่)=0.7, k (เซกเตอร์คี่)=0.3 58

รูปที่ 6.6 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 1,2L,2H,3) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [5] (ตารางที่ 1.3) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.2) โดยที่ค่า k (เซกเตอร์คู่)=0.7, k (เซกเตอร์คี่)=0.3 59

รูปที่ 6.7 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [6] (ตารางที่ 1.5; แบบที่ 1) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.3; แบบที่ 1)..... 60

- รูปที่ 6.17 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 1) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² [9] (ตารางที่ 1.8) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยว 2 เฟสซัวคู่ 1 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอในสมการ (4.2)-(4.3)..... 70
- รูปที่ 6.18 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 3, 4, 5) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² [9] (ตารางที่ 1.8) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยว 2 เฟสซัวคู่ 1 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ สมการ (4.2)-(4.3)..... 71
- รูปที่ 6.19 แสดงช่วงเวลาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของ TMS320LF2407 ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² [9] (ตารางที่ 1.8) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยว 2 เฟสซัวคู่ 1 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ..... 72



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	สถานะของสวิตช์กับแรงดันด้านนอกในแต่ละเฟสเมื่อ $i = \{u, v, w\}$	1
ตารางที่ 1.2	กลุ่มเวกเตอร์แรงดันและสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ	3
ตารางที่ 1.3	รูปแบบสถานะการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 4 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์.....	5
ตารางที่ 1.4	ค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_0 ของการมอดูเลตแบบ NTV ในแต่ละพื้นที่ของเซกเตอร์ I [5].....	5
ตารางที่ 1.5	รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [6].....	6
ตารางที่ 1.6	รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [7].....	6
ตารางที่ 1.7	รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [8].....	6
ตารางที่ 1.8	รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ² ในเซกเตอร์ I	7
ตารางที่ 1.9	ค่าวัฏจักรงานของแต่ละสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในพื้นที่ 4H ของเซกเตอร์ I.....	8
ตารางที่ 3.1	เงื่อนไขในการตรวจสอบเซกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง	27
ตารางที่ 3.2	การแปลงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ I ไปอ้างอิงเซกเตอร์ II, III, IV, V, VI	27
ตารางที่ 3.3	เงื่อนไขการตรวจสอบพื้นที่ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง V^* สำหรับการมอดูเลตแบบ NTV และ NTV ²	28
ตารางที่ 3.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง λ_i กับ d_i ในแต่ละเวกเตอร์ของพื้นที่ 4H เซกเตอร์ I.....	30
ตารางที่ 4.1	แรงดันลำดับศูนย์ในทุกเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในตารางที่ 1.1 [4] ($k = 0.5$)	32
ตารางที่ 4.2	แรงดันลำดับศูนย์ในทุกเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ใน ตารางที่ 1.3 [5]	33
ตารางที่ 4.3	แรงดันลำดับศูนย์ในแต่ละเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในตารางที่ 1.3 [6].....	33
ตารางที่ 4.4	แรงดันลำดับศูนย์ในแต่ละเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในตารางที่ 1.4 [7].....	33
ตารางที่ 4.5	แรงดันลำดับศูนย์ในแต่ละเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในตารางที่ 1.5 [8].....	34
ตารางที่ 4.6	รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 4 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์.....	38

ตารางที่ 4.7 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์..... 38

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการคำนวณกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสของอินเวอร์เตอร์สาม
ระดับที่ใช้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV แบบใช้ 4 เวกเตอร์ตารางที่ 1.3 [4] ($k = 0.5$) กรณีที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในพื้นที่ 4L หรือ 4H ของแต่ละเซกเตอร์ 42

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการคำนวณกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสของอินเวอร์เตอร์สาม
ระดับที่ใช้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² ตารางที่ 1.8 [9][10] กรณีที่เวกเตอร์แรงดัน
คำสั่งอยู่ในพื้นที่ 1 ของทุกเซกเตอร์..... 47

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของการจำลองและทดลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ 53



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

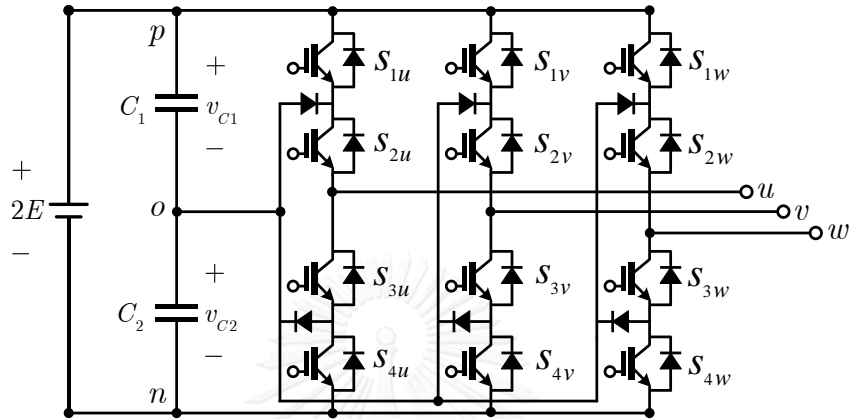
v_p, v_o, v_n	: แรงดันที่บัส p, o, n เทียบกับจุดนิวทรัลเสมือนของบัสไฟตรง
v_{dc}	: แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง
E	: แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุสมดุกล
s_{iu}	: สถานะการสวิตช์ในเฟส u เมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4\}$
s_{iv}	: สถานะการสวิตช์ในเฟส v เมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4\}$
s_{iw}	: สถานะการสวิตช์ในเฟส w เมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4\}$
v_{C1}, v_{C2}	: แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ $C1, C2$
v_{uo}, v_{vo}, v_{wo}	: แรงดันที่ขั้วของเฟส u, v, w เทียบกับจุด o
v_{uv}	: แรงดันที่ขั้วของเฟส u เทียบกับเฟส v
\mathbf{V}^*	: เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง
\mathbf{V}_S^+	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดเล็กบวก
\mathbf{V}_S^-	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดเล็กลบ
\mathbf{V}_M	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดกลาง
\mathbf{V}_L	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดใหญ่
$\mathbf{V}_{S_i}^+$: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดเล็กบวกเมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
$\mathbf{V}_{S_i}^-$: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดเล็กลบเมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
\mathbf{V}_{M_i}	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดกลางเมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
\mathbf{V}_{L_i}	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันขนาดใหญ่เมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
\mathbf{V}_{ZS_i}	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันเสมือนขนาดเล็กเมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
\mathbf{V}_{ZM_i}	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันเสมือนขนาดกลางเมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
\mathbf{V}_{ZL_i}	: กลุ่มเวกเตอร์แรงดันเสมือนขนาดใหญ่เมื่อ $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
\mathbf{V}_Z	: เวกเตอร์แรงดันศูนย์
\mathbf{V}_O	: เวกเตอร์แรงดันด้านนอก
\mathbf{V}_i	: เวกเตอร์แรงดัน 3 เวกเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงรอบเวกเตอร์คำสั่ง เมื่อ $i = \{1, 2, 3\}$
$\mathbf{S}_u, \mathbf{S}_v, \mathbf{S}_w$: เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ของเฟส u, v, w ตามลำดับ
$\ \cdot\ $: ขนาดของเวกเตอร์
f_s, T_s	: ความถี่การสวิตช์ และคาบเวลาการสวิตช์ ตามลำดับ
f	: ความถี่หลักมูล

T_1, T_2, T_3	: ช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดัน V_1, V_2 และ V_3 ตามลำดับ
v_u^*, v_v^*, v_w^*	: แรงดันคำสั่งเฟส u, v, w ตามลำดับ
v_u, v_v, v_w	: แรงดันด้านออกของเฟส u, v, w ตามลำดับ
v_z	: แรงดันลำดับศูนย์
v_{zp}	: แรงดันลำดับศูนย์บวก
v_{zn}	: แรงดันลำดับศูนย์ลบ
k	: สัดส่วนการใช้สถานะการสวิตช์ที่มีเวกเตอร์แรงดันซ้ำซ้อน
V	: ขนาดของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง
θ	: มุมเฟสของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง
U_p, U_n	: สัญญาณอ้างอิงบัสบวก และสัญญาณอ้างอิงบัสลบ ตามลำดับ
K	: ดัชนีการมอดูเลต
m_{up}, m_{vp}, m_{wp}	: ฟังก์ชันการมอดูเลตของบัส p ไปยังเฟส u, v, w
m_{uo}, m_{vo}, m_{wo}	: ฟังก์ชันการมอดูเลตของบัส o ไปยังเฟส u, v, w
m_{un}, m_{vn}, m_{wn}	: ฟังก์ชันการมอดูเลตของบัส n ไปยังเฟส u, v, w
$\lambda_{1s}, \lambda_{2s}, \lambda_{3s}$: พิกัดจุดศูนย์ถ่วงของเวกเตอร์แรงดัน V_i ในแต่ละเซกเตอร์ เมื่อ $s = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
v_{iu}, v_{iv}, v_{iw}	: ค่าพิกัดเชิงแรงดันเฟสของเวกเตอร์แรงดัน V_i เมื่อ $i = \{1, 2, 3\}$
λ_i	: พิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงพื้นที่ย่อย เมื่อ $i = \{1, 2, 3\}$
d_i	: ค่าวัฏจักรงานของเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ $i = \{1, 2, \dots, n\}$
u_{up}, u_{vp}, u_{wp}	: แรงดันอ้างอิงบัสบวกของเฟส u, v, w ตามลำดับ
u_{un}, u_{vn}, u_{wn}	: แรงดันอ้างอิงบัสลบของเฟส u, v, w ตามลำดับ
$\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$: แรงดันเฟสคำสั่งที่มีค่าสูงสุด
$\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$: แรงดันเฟสคำสั่งที่มีค่ากลาง
$\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$: แรงดันเฟสคำสั่งที่มีค่าต่ำสุด
i_o	: กระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัส
i_{C1}, i_{C2}	: กระแสนิวทรัลที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ $C1, C2$
\bar{i}_o	: ค่ากระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสเฉลี่ยต่อคาบ
i_u, i_v, i_w	: กระแสด้านออกเฟสของเฟส u, v, w
V_{peak}	: แรงดันคำสั่ง
Δv	: ผลต่างระหว่างแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ $C1$ กับ $C2$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ



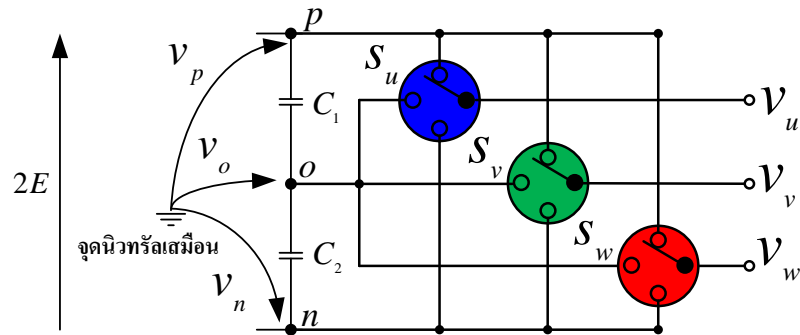
รูปที่ 1.1 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตรึงจุดนิวทรัล

อินเวอร์เตอร์สามระดับอาศัยแหล่งจ่ายไฟตรง และใช้แรงดันไฟตรงสามระดับที่ได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งครึ่งแรงดันบัสไฟตรง ทำให้แต่ละเฟสสามารถสร้างแรงดันได้ 3 ค่า วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 โดยแต่ละเฟสจะประกอบด้วยสวิตช์กำลัง 4 ตัวและไดโอดที่ตรึงจุดนิวทรัล 2 ตัว รวมทั้งหมดสามเฟสจะมีสวิตช์กำลัง 12 ตัวและไดโอด 6 ตัว สวิตช์กำลังในแต่ละเฟสจะนำกระแสเป็นคู่เพื่อเชื่อมต่อบัสบวก (p), บัสลบ (n) หรือจุดกึ่งกลางบัส (o) ไปยังสายต้านออกตามความสัมพันธ์ที่แสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สถานะของสวิตช์กับแรงดันต้านออกในแต่ละเฟสเมื่อ $i = \{u, v, w\}$

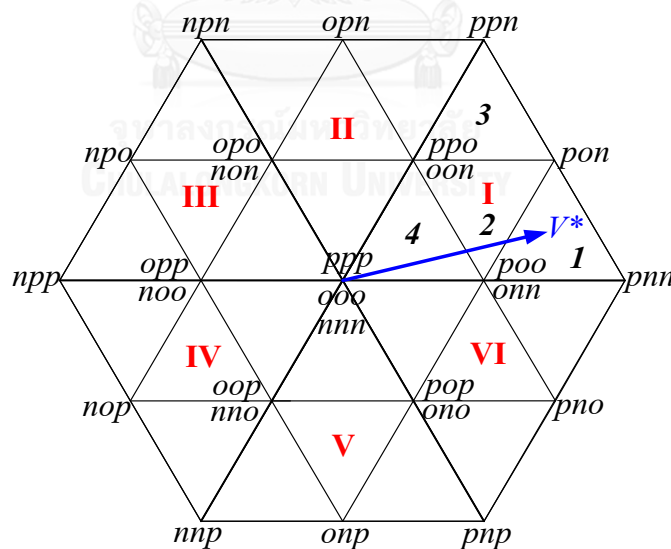
บัสที่เชื่อมต่อ	แรงดันต้านออกของเฟส i เทียบกับจุด o (v_{io})	S_{i1}	S_{i2}	S_{i3}	S_{i4}
p	v_{C1}	On	On	Off	Off
o	0	Off	On	On	Off
n	v_{C2}	Off	Off	On	On

1.2 สเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ



รูปที่ 1.2 วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

อินเวอร์เตอร์สามระดับมีสถานะการสวิตช์ S_i มีทั้งหมด $3^3 = 27$ สถานะ ในมุมมองเชิงสเปซเวกเตอร์บางสถานะการสวิตช์ S_i จะให้เวกเตอร์แรงดันที่ซ้ำซ้อน ทำให้มีเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i ที่แตกต่างกันทั้งหมดเพียง 19 เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ตัวอักษร p, o หรือ n แทนการเชื่อมต่อระหว่างบัส p, o, n กับแรงดันด้านออกของแต่ละเฟส เรียงตามเฟส u, v และ w ตามลำดับ โดยเวกเตอร์แรงดันมีนิยามดังสมการที่ (1.1) การใช้เวกเตอร์แรงดันเหล่านี้เพื่อสร้างเวกเตอร์แรงดันตามคำสั่ง (\mathbf{V}^*) มีหลักการคำนวณซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 1.3 สเปซเวกเตอร์แรงดันและสถานะการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

$$\mathbf{V}_o = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{uo} \\ v_{vo} \\ v_{wo} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

วงจรมุมของอินเวอร์เตอร์สามระดับแสดงได้ด้วยสวิตช์ 3 ทางดังรูปที่ 1.3 จากสมการที่ (1.1) เราสามารถแบ่งกลุ่มของเวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับตามขนาดของเวกเตอร์และทิศทางของกระแสในทรานซิสเตอร์ได้ 5 กลุ่ม ดังแสดงแต่ละสถานะในตารางที่ 1.2 คือ

1. กลุ่มเวกเตอร์ศูนย์ \mathbf{V}_Z ซึ่ง $\|\mathbf{V}_Z\| = 0$
2. กลุ่มเวกเตอร์ขนาดเล็กบวก \mathbf{V}_S^+ ซึ่ง $\|\mathbf{V}_S^+\| = \sqrt{2/3} \cdot E$ เมื่อ $v_{C1} = v_{C2} = E$ และกระแสในทรานซิสเตอร์มีเครื่องหมายเป็นบวกเมื่อเขียนในรูปของกระแสด้านนอก
3. กลุ่มเวกเตอร์ขนาดเล็กลบ \mathbf{V}_S^- ซึ่ง $\|\mathbf{V}_S^-\| = \sqrt{2/3} \cdot E$ เมื่อ $v_{C1} = v_{C2} = E$ และกระแสในทรานซิสเตอร์มีเครื่องหมายเป็นลบเมื่อเขียนในรูปของกระแสด้านนอก
4. กลุ่มเวกเตอร์ขนาดกลาง \mathbf{V}_M ซึ่ง $\|\mathbf{V}_M\| = \sqrt{2} \cdot E$ เมื่อ $v_{C1} = v_{C2} = E$
5. กลุ่มเวกเตอร์ขนาดใหญ่ \mathbf{V}_L ซึ่ง $\|\mathbf{V}_L\| = \sqrt{2/3} \cdot 2E$ เมื่อ $v_{C1} = v_{C2} = E$

ตารางที่ 1.2 กลุ่มเวกเตอร์แรงดันและสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

กลุ่มเวกเตอร์แรงดัน	สถานะการสวิตช์
เวกเตอร์ศูนย์ \mathbf{V}_Z	(ppp),(ooo),(nnn)
เวกเตอร์ขนาดเล็กบวก \mathbf{V}_S^+	(onn),(ppo),(non),(opp),(nno),(pop)
เวกเตอร์ขนาดเล็กลบ \mathbf{V}_S^-	(poo),(oon),(opo),(noo),(oop),(ono)
เวกเตอร์ขนาดกลาง \mathbf{V}_M	(pon),(opn),(npo),(nop),(onp),(pno)
เวกเตอร์ขนาดใหญ่ \mathbf{V}_L	(pnn),(ppn),(npn),(npp),(nnp),(pnp)

1.3 หลักการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

ในการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) ที่สามารถสร้างได้จะต้องอยู่ในกรอบหกเหลี่ยมของเวกเตอร์แรงดันดังแสดงรูปที่ 1.3 ซึ่งประกอบด้วยรูปสามเหลี่ยมใหญ่ (เซกเตอร์) I, II, III, IV, V และ VI ทั้งหมด 6 เซกเตอร์ แต่ละเซกเตอร์ถูกแบ่งเป็นพื้นที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามเวกเตอร์แรงดัน 19 เวกเตอร์ การสร้างเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) ให้มีขนาดและมุมเฟสตามต้องการจะใช้เวกเตอร์แรงดัน 3 เวกเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงเวกเตอร์คำสั่ง (\mathbf{V}^*) นั้น ช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แต่ละตัวหาได้จากสมการที่ (1.2) และ (1.3)

$$\mathbf{V}^* T_s = \mathbf{V}_1 T_1 + \mathbf{V}_2 T_2 + \mathbf{V}_3 T_3 \quad (1.2)$$

$$T_s = T_1 + T_2 + T_3 \quad (1.3)$$

โดยที่ $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3$ คือ เวกเตอร์แรงดัน 3 เวกเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงเวกเตอร์คำสั่ง (\mathbf{V}^*)

T_s คือ คาบเวลาการสวิตช์ ($T_s = 1/f_s$, f_s = ความถี่การสวิตช์)

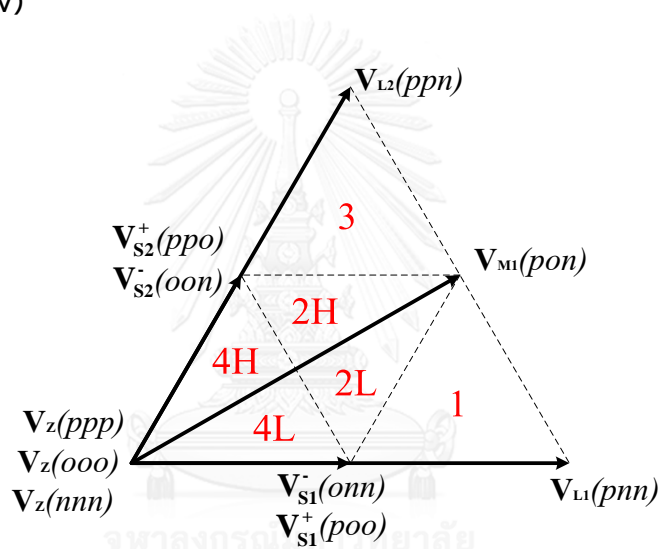
T_1, T_2, T_3 คือ ช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดัน $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ และ \mathbf{V}_3 ตามลำดับ

การเลือกเวกเตอร์แรงดัน 3 เวกเตอร์นั้นสามารถทำได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับการแบ่งเซกเตอร์และพื้นที่ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในแต่ละรูปแบบ ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

1.4 รูปแบบของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ [4]-[10]

การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวิธีการแบ่งพื้นที่ย่อยในแต่ละเซกเตอร์และการเลือกสถานะการสวิตช์ในกรณีที่มีความซ้ำซ้อน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่นิยมมี 2 รูปแบบคือ

1.4.1 การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุด (Nearest-Three-Vector Modulation: NTV)



รูปที่ 1.4 สเปซเวกเตอร์และการแบ่งพื้นที่ย่อยในเซกเตอร์ I ของการมอดูเลตแบบ NTV

การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุดของพื้นที่รูปสามเหลี่ยมย่อยที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งตกอยู่ สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบตามจำนวนเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ การแบ่งพื้นที่สามเหลี่ยมย่อยในแต่ละเซกเตอร์จะแบ่งออกเป็น 6 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 1.4

ก) การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุด (NTV) ที่ใช้ 4 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [4][5]

การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์รูปแบบนี้ จะใช้สถานะการสวิตช์ที่มีเวกเตอร์แรงดัน(ขนาดเล็ก)ซ้ำซ้อน 2 สถานะในการสร้างแรงดัน ดังนั้นเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่ใช้ทั้งหมดจึงมี 4 สถานะดังแสดงในตารางที่ 1.3 [4]

ตารางที่ 1.3 รูปแบบสถานะการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 4 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์

พื้นที่	1	2L	2H	3	4L	4H
เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ ในเซกเตอร์ I	<i>onn</i>	<i>onn</i>	<i>oon</i>	<i>oon</i>	<i>onn</i>	<i>oon</i>
	<i>pnn</i>	<i>oon</i>	<i>pon</i>	<i>pon</i>	<i>oon</i>	<i>ooo</i>
	<i>pon</i>	<i>pon</i>	<i>poo</i>	<i>ppn</i>	<i>ooo</i>	<i>poo</i>
	<i>poo</i>	<i>poo</i>	<i>ppo</i>	<i>ppo</i>	<i>poo</i>	<i>ppo</i>

งานวิจัย [5] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตแบบ NTV แบบนี้ กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ โดยชี้ให้เห็นว่าค่าแรงดันด้านออกที่ได้จะเป็นผลบวกระหว่างค่าแรงดันคำสั่ง v_u^* , v_v^* , v_w^* กับค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_z ดังแสดงในสมการที่ (1.4) และตารางที่ 1.4 ในที่นี้ k คือ สัดส่วนการใช้สถานะการสวิตช์ที่มีเวกเตอร์แรงดันซ้ำซ้อน เช่น *ppo* กับ *oon* หรือ *poo* กับ *onn* เป็นต้น

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_u^* + v_z \\ v_v^* + v_z \\ v_w^* + v_z \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

ตารางที่ 1.4 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_z ของการมอดูเลตแบบ NTV ในแต่ละพื้นที่ของเซกเตอร์ I [5]

พื้นที่	แรงดันลำดับศูนย์ v_z ของเซกเตอร์ I
1	$(k-1)v_w - kv_u + (2k-1)E$
2L	$(k-1)v_w - kv_v + (k-1)E$
2H	$(k-1)v_v - kv_u + kE$
3	$(k-1)v_w - kv_u + (2k-1)E$
4L	$(k-1)v_u - kv_v$
4H	$(k-1)v_v - kv_w$

หมายเหตุ ; k (เซกเตอร์ I,III,V) = $1-k$ (เซกเตอร์ II,IV,VI)

ข) การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุด (NTV) ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [6]-[8]

การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุดรูปแบบนี้จะเลือกใช้เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ 3 ตัว ซึ่งช่วยลดการสูญเสียจากการสวิตช์เนื่องจากมี 1 เฟสที่จะไม่มีการสวิตช์ ดังแสดงในตารางที่ 1.5-ตารางที่ 1.7

ตารางที่ 1.5 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [6]

พื้นที่	เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 1						เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 2					
	เซกเตอร์ I			เซกเตอร์ II			เซกเตอร์ I			เซกเตอร์ II		
1	<i>poo</i>	<i>pon</i>	<i>pnn</i>	<i>oon</i>	<i>opn</i>	<i>ppn</i>	<i>onn</i>	<i>pnn</i>	<i>pon</i>	<i>opn</i>	<i>ppn</i>	<i>ppo</i>
2L, 2H	<i>ppo</i>	<i>poo</i>	<i>pon</i>	<i>oon</i>	<i>opn</i>	<i>non</i>	<i>onn</i>	<i>oon</i>	<i>pon</i>	<i>opn</i>	<i>opo</i>	<i>ppo</i>
3	<i>ppo</i>	<i>ppn</i>	<i>pon</i>	<i>non</i>	<i>npn</i>	<i>opn</i>	<i>oon</i>	<i>pon</i>	<i>ppn</i>	<i>npn</i>	<i>opn</i>	<i>opo</i>
4L, 4H	<i>ppp</i>	<i>ppo</i>	<i>poo</i>	<i>nnn</i>	<i>non</i>	<i>oon</i>	<i>nnn</i>	<i>onn</i>	<i>oon</i>	<i>opo</i>	<i>ppo</i>	<i>ppp</i>

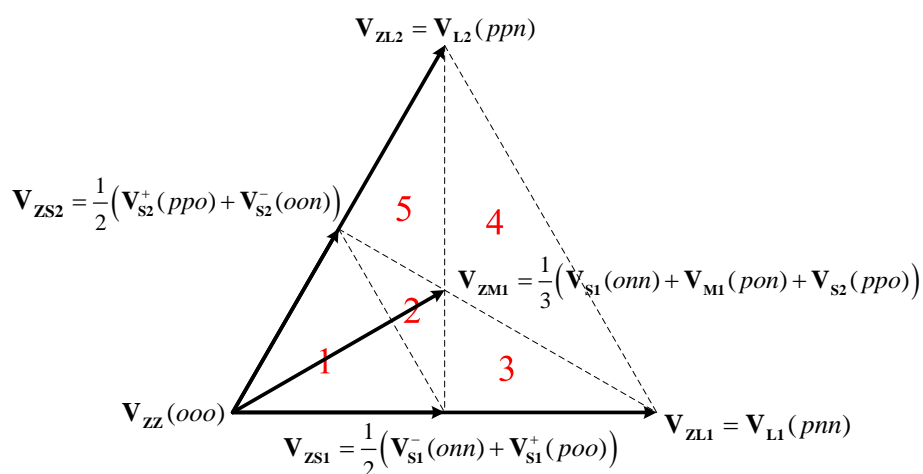
ตารางที่ 1.6 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [7]

พื้นที่	เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 1						เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 2					
	เซกเตอร์ I			เซกเตอร์ II			เซกเตอร์ I			เซกเตอร์ II		
4L	<i>ppp</i>	<i>ppo</i>	<i>poo</i>	<i>nnn</i>	<i>non</i>	<i>oon</i>	<i>ooo</i>	<i>oon</i>	<i>onn</i>	<i>ooo</i>	<i>opo</i>	<i>ppo</i>
4H	<i>nnn</i>	<i>onn</i>	<i>oon</i>	<i>opo</i>	<i>ppo</i>	<i>ppp</i>	<i>ooo</i>	<i>poo</i>	<i>ppo</i>	<i>ooo</i>	<i>oon</i>	<i>non</i>

ตารางที่ 1.7 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ [8]

พื้นที่	เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 1						เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 2					
	เซกเตอร์ I			เซกเตอร์ II			เซกเตอร์ I			เซกเตอร์ II		
1	<i>poo</i>	<i>pon</i>	<i>pnn</i>	<i>oon</i>	<i>opn</i>	<i>ppn</i>	<i>onn</i>	<i>pnn</i>	<i>pon</i>	<i>opn</i>	<i>ppn</i>	<i>ppo</i>
2L, 2H	<i>ppo</i>	<i>poo</i>	<i>pon</i>	<i>oon</i>	<i>opn</i>	<i>non</i>	<i>onn</i>	<i>oon</i>	<i>pon</i>	<i>opn</i>	<i>opo</i>	<i>ppo</i>
3	<i>ppo</i>	<i>ppn</i>	<i>pon</i>	<i>non</i>	<i>npn</i>	<i>opn</i>	<i>oon</i>	<i>pon</i>	<i>ppn</i>	<i>npn</i>	<i>opn</i>	<i>opo</i>
4L, 4H	<i>ooo</i>	<i>poo</i>	<i>ppo</i>	<i>ooo</i>	<i>oon</i>	<i>non</i>	<i>ooo</i>	<i>oon</i>	<i>onn</i>	<i>ooo</i>	<i>opo</i>	<i>ppo</i>

1.4.2 การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์โดยใช้เวกเตอร์เสมือนสามตัวที่ใกล้ที่สุด (NTV²) [9][10]

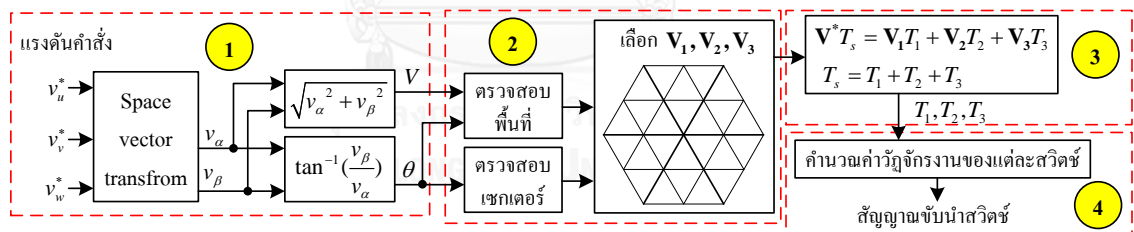
รูปที่ 1.5 สเปซเวกเตอร์และการแบ่งพื้นที่ย่อยในเซกเตอร์ I ของการมอดูเลตแบบ NTV²

รูปที่ 1.5 แสดงนิยามของเวกเตอร์เสมือนและการแบ่งพื้นที่ย่อยในเซกเตอร์ I สำหรับการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ที่ใช้เวกเตอร์เสมือน 3 ตัวที่ใกล้ที่สุด (Nearest-Three-Virtual-Vector Modulation: NTV²) วิธีนี้มีคุณสมบัติทำให้กระแสนิวทรัลเฉลี่ยต่อคาบการสวิตช์เท่ากับศูนย์ เวกเตอร์ขนาดเล็กเสมือน $\mathbf{V}_{zs1}, \mathbf{V}_{zs2}$ เวกเตอร์ขนาดกลางเสมือน \mathbf{V}_{zmi} นิยามจากผลบวกของเวกเตอร์ขนาดเล็ก $\mathbf{V}_{s1}, \mathbf{V}_{s2}$ สองตัวและเวกเตอร์ขนาดกลาง \mathbf{V}_{mi} โดยกำหนดให้วิถีจักรงานเท่ากันทุกเวกเตอร์ การนิยามดังกล่าวจะทำให้เวกเตอร์เสมือนทุกตัวให้กระแสนิวทรัลเฉลี่ยเป็นศูนย์เสมอ ดังนั้นการมอดูเลตแบบ NTV² ซึ่งใช้เวกเตอร์เสมือน 3 ตัวจะเท่ากับใช้เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ 5 สถานะดังแสดงในตารางที่ 1.8

ตารางที่ 1.8 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV² ในเซกเตอร์ I

พื้นที่	1	2	3	4	5
เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้	<i>ppo</i>	<i>ppo</i>	<i>ppo</i>	<i>ppo</i>	<i>ppo</i>
	<i>poo</i>	<i>poo</i>	<i>poo</i>	<i>ppn</i>	<i>ppn</i>
	<i>ooo</i>	<i>pon</i>	<i>pon</i>	<i>pon</i>	<i>pon</i>
	<i>oon</i>	<i>oon</i>	<i>pnn</i>	<i>pnn</i>	<i>oon</i>
	<i>onn</i>	<i>onn</i>	<i>onn</i>	<i>onn</i>	<i>onn</i>

1.5 ข้อเสียของการคำนวณการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ



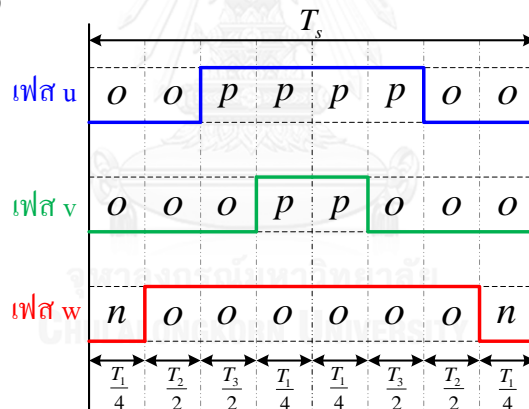
รูปที่ 1.6 แผนผังการคำนวณการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

รูปที่ 1.6 แสดงขั้นตอนการคำนวณการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้วซึ่งมีข้อเสียดังต่อไปนี้

1. การคำนวณหาขนาด (V) และมุมเฟส (θ) ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) ต้องใช้ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อน และต้องแปลงแรงดันคำสั่งจากรูปแรงดันเฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) ด้วยสมการที่ (1.1) ก่อนเสมอ
2. การตรวจสอบเซกเตอร์และพื้นที่ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) มีความยุ่งยาก และมีวิธีการขึ้นกับลักษณะการแบ่งพื้นที่ย่อยในแต่ละเซกเตอร์ วิธีการตรวจสอบจึงแตกต่างกันตามวิธีการมอดูเลตที่ใช้ เช่น NTV หรือ NTV²

3. การคำนวณหาช่วงเวลาการใช้แวกเตอร์แรงดันแต่ละตัวของการมอดูเลตเชิงสเปซแวกเตอร์ (T_1, T_2, T_3) มีความซับซ้อน โดยเฉพาะในกรณีที่มีพื้นที่ย่อยมีลักษณะไม่เหมือนกัน เช่น NTV² เพราะต้องคำนวณโดยการแตกแวกเตอร์แรงดันคำสั่งในแนวแวกเตอร์แรงดันที่เลือกใช้ ซึ่งต้องอาศัยฟังก์ชันตรีโกณ
4. ค่าช่วงเวลา (T_1, T_2, T_3) ที่คำนวณได้ ยังต้องนำไปแปลงเป็นค่าวัฏจักรงานของสวิตช์แต่ละตัว การคำนวณในขั้นตอนนี้ต้องอาศัยข้อมูลสถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ ซึ่งแตกต่างกันตามเซกเตอร์และพื้นที่ย่อย การคำนวณจึงมีความซับซ้อนและใช้เวลาค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าหลักการคำนวณในทุกๆ พื้นที่นั้นจะเป็นหลักการเดียวกันก็ตาม ตัวอย่างการคำนวณแสดงในตัวอย่างที่ 1 ข้างล่างนี้
5. นอกจากนี้ค่าวัฏจักรงานหาได้ก็ไม่ได้อยู่ในรูปของแรงดันเฟสคำสั่ง (v_u^*, v_v^*, v_w^*) จึงไม่สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฟสที่สร้างจริงกับแรงดันเฟสคำสั่ง (v_u^*, v_v^*, v_w^*) ได้
6. การคำนวณในกรณีที่แรงดันบัลไฟตรงไม่สมดุล มีความยุ่งยากมาก

ตัวอย่างที่ 1 เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในพื้นที่ 4H ของเซกเตอร์ I และใช้การมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 4 แวกเตอร์สถานะการสวิตช์ (ตารางที่ 1.3) ดังแสดงในรูปที่ 1.7 จากสามารถคำนวณหาค่าวัฏจักรงานของแต่ละสวิตช์ได้ดังตารางที่ 1.9



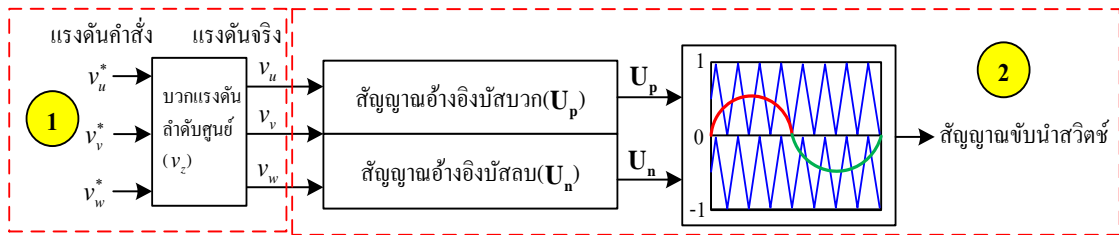
รูปที่ 1.7 ลำดับสถานะการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในพื้นที่ 4H เซกเตอร์ I (ตารางที่ 1.3)

ตารางที่ 1.9 ค่าวัฏจักรงานของแต่ละสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในพื้นที่ 4H ของเซกเตอร์ I

เฟส	ค่าวัฏจักรงานของแต่ละสวิตช์		
	S_{1j} และ S_{2j} on	S_{2j} และ S_{3j} on	S_{3j} และ S_{4j} on
u	$\left(T_3 + \frac{T_1}{2}\right) \frac{1}{T_s}$	$\left(T_2 + \frac{T_1}{2}\right) \frac{1}{T_s}$	0
v	$\frac{T_1}{2T_s}$	$\left(T_2 + T_3 + \frac{T_1}{2}\right) \frac{1}{T_s}$	0
w	0	$\left(T_2 + T_3 + \frac{T_1}{2}\right) \frac{1}{T_s}$	$\frac{T_1}{2T_s}$

หมายเหตุ ; $j = \{u, v, w\}$

1.6 การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ



รูปที่ 1.8 แผนผังการคำนวณการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

รูปที่ 1.8 แสดงการคำนวณของวิธีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ที่อาศัยทฤษฎีการมอดูเลตแบบขั้วคู่ (dipolar modulation) [1] ซึ่งจะกล่าวในภายหลัง โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

1. คำนวณค่าแรงดันเฟสที่สร้างจริง (v_u, v_v, v_w) จากการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) เข้ากับค่าแรงดันคำสั่ง (v_u^*, v_v^*, v_w^*)
2. คำนวณหาสัญญาณอ้างอิงบัสบวก (U_p) และสัญญาณอ้างอิงบัสลบ (U_n) แล้วนำไปเปรียบเทียบกับคลื่นพาห์สองชุดเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์

เมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในรูปที่ 1.6 กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ในรูปที่ 1.8 จะเห็นได้ว่าการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์นั้นมีความซับซ้อนมากกว่าการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ อีกทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวกับการทำการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาห์ในอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้นมียุ่อย่างจำกัด ถึงแม้ว่าในงานวิจัยที่ [5] จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตแบบ NTV กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังไม่ครอบคลุมการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ทุกรูปแบบ

งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะหาวิธีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ที่สมมูลกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แต่ละรูปแบบ และลดความซับซ้อนของการคำนวณโดยใช้ค่าแรงดันเฟสโดยตรงในการคำนวณทุกขั้นตอน ประเด็นหลักของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้คือ 1) การหาความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์และการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์โดยใช้ทฤษฎีการมอดูเลตแบบขั้วคู่ 2) การเสนอแนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วง (barycentric coordinates) ในการคำนวณค่าวัฏจักรงานของการใช้เวกเตอร์ในเทอมของแรงดันเฟสโดยตรง โดยไม่ผ่านการคำนวณหาเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) และ 3) ประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่เป็นที่นิยม 2 รูปแบบ คือ การมอดูเลตแบบ NTV และการมอดูเลตแบบ NTV²

1.7 เป้าหมายของงานวิจัย

การทำการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในงานวิจัยต่างๆ ให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาห์ โดยอาศัยทฤษฎีการมอดูเลตแบบขั้วคู่ และแนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วง

บทที่ 2

ขั้นตอนการคำนวณการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ และทฤษฎีการมอดูเลตแบบชั่วคู่

2.1 ขั้นตอนการคำนวณการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

2.1.1 คำนวณหาค่าขนาดและมุมของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง

ขนาด (V) และมุม (θ) ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) คำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ โดยที่ v_α และ v_β สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1.1)

$$V = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (2.1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_\beta}{v_\alpha} \right) \quad (2.2)$$

2.1.2 การตรวจสอบตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง [3]

การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ ต้องตรวจสอบว่าเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) อยู่ในเซกเตอร์และพื้นที่ใด เพื่อจะได้เลือกเวกเตอร์แรงดันที่ใช้ได้ถูกต้องจากรูปที่ 1.3 รูปหกเหลี่ยมถูกแบ่งเป็นเซกเตอร์ I, II, III, IV, V และ VI ทั้งหมด 6 เซกเตอร์ เราสามารถตรวจสอบได้ว่าเวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ใด ดังนี้

เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) อยู่ในเซกเตอร์ I $\Leftrightarrow 0^\circ \leq \theta < 60^\circ$

เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) อยู่ในเซกเตอร์ II $\Leftrightarrow 60^\circ \leq \theta < 120^\circ$

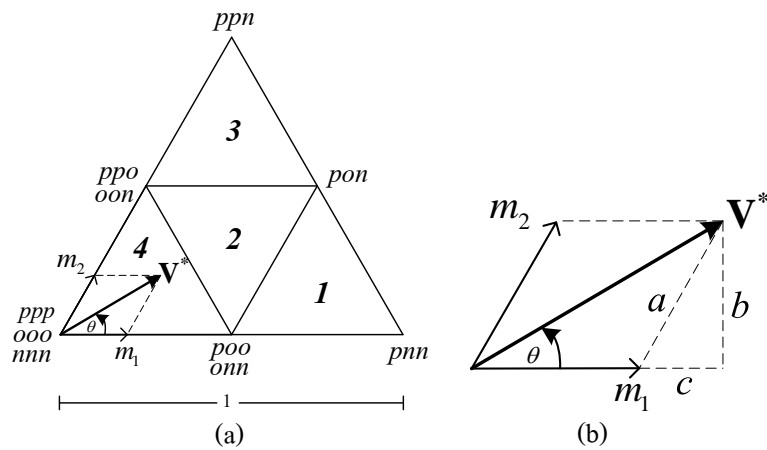
เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) อยู่ในเซกเตอร์ III $\Leftrightarrow 120^\circ \leq \theta < 180^\circ$

เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) อยู่ในเซกเตอร์ IV $\Leftrightarrow 180^\circ \leq \theta < 240^\circ$

เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) อยู่ในเซกเตอร์ V $\Leftrightarrow 240^\circ \leq \theta < 300^\circ$

เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) อยู่ในเซกเตอร์ VI $\Leftrightarrow 300^\circ \leq \theta < 360^\circ$

เมื่อตรวจสอบได้แล้วว่าเวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในเซกเตอร์ใด ต้องตรวจสอบต่อไปว่าเวกเตอร์แรงดันคำสั่งนั้นอยู่ในพื้นที่ย่อย 1, 2, 3 หรือ 4 ของเซกเตอร์นั้น การตรวจสอบพื้นที่จะคำนวณในกรณีเซกเตอร์ I เป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนการตรวจสอบพื้นที่ในกรณีเซกเตอร์อื่นๆ ก็ทำได้ในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 2.1 แผนผังสเปซเวกเตอร์สำหรับ m_1 และ m_2 ในเซกเตอร์ I

จากรูปที่ 2.1 (b) สามารถคำนวณหาค่า m_1 และ m_2 ได้ดังนี้

$$m_2 = a = \frac{b}{\sin \pi/3} = \frac{2}{\sqrt{3}} b = \frac{2}{\sqrt{3}} V \sin \theta \tag{2.3}$$

$$m_1 = V \cos \theta - \left(\frac{2}{\sqrt{3}} V \sin \theta \right) \cos \pi/3 = V \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) \tag{2.4}$$

จากนั้นสามารถเขียนเงื่อนไขการตรวจสอบพื้นที่ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่งได้ดังนี้

พื้นที่ 1 : $m_1 \geq 0.5$

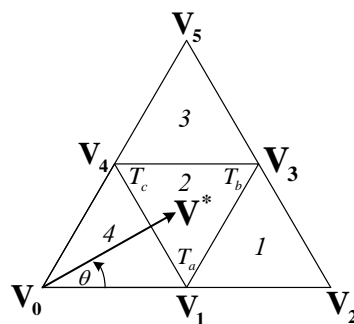
พื้นที่ 2 : $m_1, m_2 < 0.5$ และ $(m_1 + m_2) > 0.5$

พื้นที่ 3 : $m_2 \geq 0.5$

พื้นที่ 4 : $m_1, m_2 < 0.5$ และ $(m_1 + m_2) \leq 0.5$

อย่างไรก็ตามแนวทางการคำนวณหาเงื่อนไขการตรวจสอบตำแหน่งเวกเตอร์แรงดันคำสั่งของแต่ละพื้นที่ด้วยวิธีข้างต้นไม่สามารถใช้ได้เมื่อแบ่งพื้นที่ของเซกเตอร์เป็นรูปแบบอื่นๆ กล่าวคือต้องพิจารณาเป็นกรณีๆไป

2.1.3 การคำนวณช่วงเวลาการสวิตช์ [2]



รูปที่ 2.2 เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง V^* อยู่ในพื้นที่ 2 ของเซกเตอร์ I

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณหาช่วงเวลาการสวิตช์เมื่อเวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในพื้นที่ 2 ของเซกเตอร์ I โดยกำหนดให้เวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_2 อยู่ที่แกนอ้างอิงและมีขนาดเป็น $2E\sqrt{2/3}$ หน่วย จะหาเวกเตอร์แรงดันที่อยู่รอบเวกเตอร์คำสั่ง (\mathbf{V}^*) 3 เวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{V}_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 2E\sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{V}_3 = \frac{\sqrt{3}}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 \\ 1/2 \end{bmatrix} \cdot 2E\sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{V}_4 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/2 \\ \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot 2E\sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.7)$$

โดยที่ $\mathbf{V}^* = V \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$ และช่วงเวลาของแต่ละเวกเตอร์คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{V}^* T_s = \mathbf{V}_1 T_1 + \mathbf{V}_3 T_2 + \mathbf{V}_4 T_3 \quad (2.8)$$

$$T_s = T_1 + T_2 + T_3 \quad (2.9)$$

แทนค่าของเวกเตอร์แรงดัน $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_3, \mathbf{V}_4$ ในสมการที่ (2.8) จะได้

$$V T_s \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} = \left\{ \frac{1}{2} T_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{3}}{2} T_2 \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 \\ 1/2 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} T_3 \begin{bmatrix} 1/2 \\ \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \right\} 2E\sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} V T_s \cos \theta \\ V T_s \sin \theta \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \frac{1}{2} T_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3}{4} T_2 \\ \frac{\sqrt{3}}{4} T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{4} T_3 \\ \frac{\sqrt{3}}{4} T_3 \end{bmatrix} \right\} 2E\sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.11)$$

เพราะฉะนั้น

$$V T_s (\cos \theta) = 2E\sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{2} T_1 + \frac{3}{4} T_2 + \frac{1}{4} T_3 \right) \quad (2.12)$$

$$V T_s \sin \theta = 2E\sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{4} T_2 + \frac{\sqrt{3}}{4} T_3 \right) \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.9), (2.12) และ (2.13) จะได้

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1/2 & 3/4 & 1/4 \\ 0 & \sqrt{3}/4 & \sqrt{3}/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_s \\ V(\cos \theta) T_s / (2E\sqrt{2/3}) \\ V(\cos \theta) T_s / (2E\sqrt{2/3}) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$T_1 = T_s (1 - 2K \sin \theta) \quad (2.15)$$

$$T_2 = T_s \left[2K \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) - 1 \right] \quad (2.16)$$

$$T_3 = T_s \left[2K \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) + 1 \right] \quad (2.17)$$

โดยที่ $K = \frac{V}{2E}$ (K = ดัชนีการมอดูเลต)

ในส่วนพื้นที่อื่นๆ (1, 3, 4) ของเซกเตอร์ I และเซกเตอร์อื่นๆ ก็มีการคำนวณหาช่วงเวลาการสวิตช์ในลักษณะเดียวกันกับการคำนวณข้างต้น อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าช่วงเวลาการสวิตช์ (T_1, T_2, T_3) มีความซับซ้อน เพราะต้องคำนวณแยกตามเซกเตอร์และพื้นที่ โดยเฉพาะในกรณีพื้นที่ที่ย่อยมีรูปร่างแตกต่างกัน(รูปที่ 1.4-รูปที่ 1.5)

2.1.4 การคำนวณค่าวัฏจักรงานของแต่ละสวิตช์

การเลือกใช้เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ในการสร้างเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) ทำได้หลายรูปแบบ ทำให้เกิดรูปแบบการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ได้หลากหลาย ทั้งนี้การคำนวณค่าวัฏจักรงานของแต่ละสวิตช์นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์และมีสมการการคำนวณที่ต่างกันตามพื้นที่และเซกเตอร์ ขั้นตอนนี้จึงมีความซับซ้อนและใช้เวลาค่อนข้างมาก ตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้

2.2 ทฤษฎีการมอดูเลตแบบข้าวคู [1]

ทฤษฎีการมอดูเลตแบบข้าวคู เป็นทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการมอดูเลตด้วยคลื่นพาห้สำหรับอินเวอร์เตอร์สามระดับ ทฤษฎีนี้ช่วยให้การมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับมีความคล้ายคลึงกันกับการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาห้ของอินเวอร์เตอร์สองระดับ แนวคิดการมอดูเลตแบบข้าวคูมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันบัสไฟตรงสำหรับทุกวิธีการมอดูเลต สามารถแสดงในรูปสมการทั่วไปได้ดังสมการที่ (2.18) ค่าแรงดันด้านออกที่สร้างจริงจะเป็นผลบวกระหว่างค่าคำสั่งแรงดัน v_u^*, v_v^*, v_w^* กับค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_z เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.18) ใหม่ดังสมการที่ (2.19) จะพบว่า แรงดันด้านออกเทียบกับจุดกึ่งกลางบัส(o) จะเป็นผลรวมระหว่างแรงดัน U_p ที่สร้างจากบัสบวก ($v_p - v_n$) และแรงดัน U_n ที่สร้างจากบัสลบ ($v_n - v_o$) และจากสมการที่ (2.20) จะเห็นว่า แรงดันลำดับศูนย์ v_z ก็เป็นผลรวมของแรงดันลำดับศูนย์บวก(v_{zp}) และแรงดันลำดับศูนย์ลบ(v_{zn}) เช่นกัน

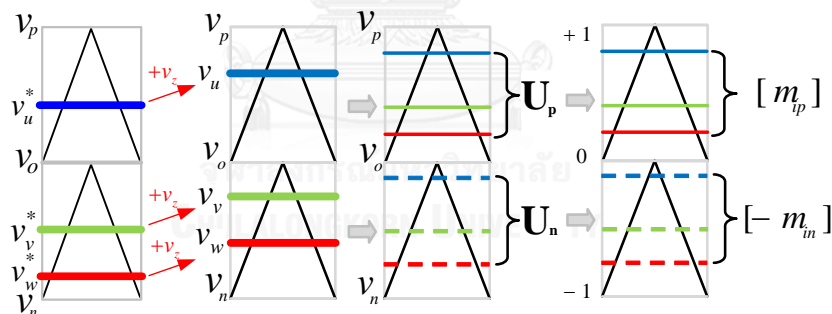
$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_u^* + v_z \\ v_v^* + v_z \\ v_w^* + v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{up} & m_{uo} & m_{un} \\ m_{vp} & m_{vo} & m_{vn} \\ m_{wp} & m_{wo} & m_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_o \\ v_n \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} m_{up} & m_{uo} & m_{un} \\ m_{vp} & m_{vo} & m_{vn} \\ m_{wp} & m_{wo} & m_{wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{up} & m'_{uo} & m'_{un} \\ m'_{vp} & m'_{vo} & m'_{vn} \\ m'_{wp} & m'_{wo} & m'_{wn} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} x & y & z \\ x & y & z \\ x & y & z \end{bmatrix}}_{\text{zero voltage matrix}}$$

เมื่อ $0 \leq m_{ij} \leq 1, \sum_j m_{ij} = 1, \sum_j m'_{ij} = 0, i = \{u, v, w\}, j = \{p, o, n\}$ โดยที่ $x + y + z = 1$

$$\begin{bmatrix} v_{uo} \\ v_{vo} \\ v_{wo} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} v_u - v_o \\ v_v - v_o \\ v_w - v_o \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{up} \\ m_{vp} \\ m_{wp} \end{bmatrix}}_{\mathbf{U}_p} (v_p - v_o) + \underbrace{\begin{bmatrix} m_{un} \\ m_{vn} \\ m_{wn} \end{bmatrix}}_{\mathbf{U}_n} (v_n - v_o) \quad (2.19)$$

$$v_{zo} \triangleq v_z - v_o = \overbrace{x(v_p - v_o)}^{v_{zp}} + \overbrace{z(v_n - v_o)}^{v_{zn}} \quad (2.20)$$



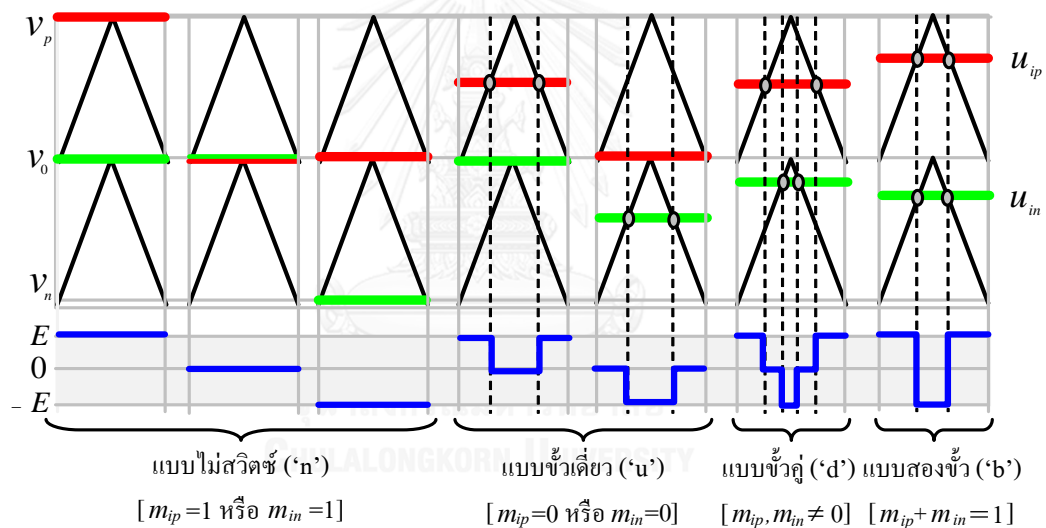
รูปที่ 2.3 แนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงในการมอดูเลตแบบข้าวคู

รูปที่ 2.3 แสดงแนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งในการมอดูเลตตามสมการที่ (2.19) ค่าแรงดันอ้างอิง \mathbf{U}_p และ \mathbf{U}_n ในลักษณะต่างๆ จะทำให้ได้รูปแบบการสวิตช์ที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 กล่าวคือ

1. แบบไม่สวิตช์ (Non-Switching) หมายถึง การต่อแรงดันเฟสด้านออกเข้ากับบัสบวก บัสกลาง หรือบัสลบตลอดคาบการสวิตช์ ในกรณีนี้จะไม่มีการสวิตช์และแรงดันด้านออกจะเท่ากับ v_p, v_o หรือ v_n

2. แบบขั้วเดียว (Unipolar Switching) หมายถึง การใช้แรงดันด้านเข้า v_p และ v_o หรือ v_n และ v_o ในการสร้างแรงดันด้านออก ในกรณีนี้จะมีจำนวนการสวิตช์ 2 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์
3. แบบขั้วคู่ (Dipolar Switching) หมายถึง การใช้แรงดันด้านเข้าทั้ง 3 ระดับคือ v_p, v_o และ v_n ในการสร้างแรงดันด้านออก ในกรณีนี้จะมีจำนวนการสวิตช์ 4 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์
4. แบบสองขั้ว (Bipolar Switching) หมายถึง การใช้แรงดันด้านเข้า v_p และ v_n ในการสร้างแรงดันด้านออก ในกรณีนี้จะมีจำนวนการสวิตช์ 2 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์

รูปแบบการสวิตช์ 1, 2, 4 อาจมองได้ว่าเป็นกรณีพิเศษของการมอดูเลตแบบขั้วคู่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจึงเรียกเทคนิคการมอดูเลตตามสมการที่ (2.19) ว่าการมอดูเลตแบบขั้วคู่ (dipolar pulse-width modulation)

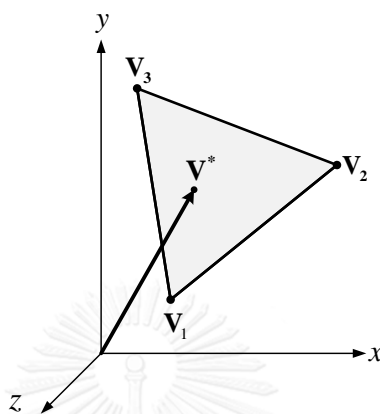


รูปที่ 2.4 รูปแบบของการมอดูเลตแบบขั้วคู่

บทที่ 3

แนวความคิดใหม่ที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์

3.1 แนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วง



รูปที่ 3.1 แนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วง

แนวความคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วง คือการแสดงพิกัด $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ ของจุด \mathbf{V}^* ที่อยู่ภายใน (หรือภายนอก) รูปสามเหลี่ยมที่มีจุดยอดประกอบด้วยเวกเตอร์ $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3$ ซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (3.1)

$$\mathbf{V}^* = \lambda_1 \mathbf{V}_1 + \lambda_2 \mathbf{V}_2 + \lambda_3 \mathbf{V}_3 ; \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1 \quad (3.1)$$

สมการที่ (1.1) ที่แสดงหลักการสร้างเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) ของมอเตอร์เชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (3.2)

$$\mathbf{V}^* = \left(\frac{T_1}{T_s}\right) \mathbf{V}_a + \left(\frac{T_2}{T_s}\right) \mathbf{V}_b + \left(\frac{T_3}{T_s}\right) \mathbf{V}_c ; \frac{T_1}{T_s} + \frac{T_2}{T_s} + \frac{T_3}{T_s} = 1 \quad (3.2)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (3.1) กับสมการที่ (3.2) จะพบว่าหลักการมอเตอร์เชิงสเปซเวกเตอร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้นเป็นหลักการเดียวกับแนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วง เมื่อ $\lambda_i = \frac{T_i}{T_s} ; i = \{1, 2, 3\}$ ดังนั้นการคำนวณช่วงเวลาการใช้เวกเตอร์แรงดันในการสร้างเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) สามารถใช้แนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วงคำนวณได้ อีกทั้งยังช่วยให้การคำนวณนั้นง่ายขึ้น เนื่องจากการคำนวณพิกัดจุดศูนย์ถ่วงสามารถคำนวณโดยมองเวกเตอร์แรงดันเฟสในปริภูมิสามมิติได้โดยไม่ต้องทำการแปลงสเปซเวกเตอร์ ดังที่จะแสดงต่อไปในสมการที่ (3.3)-(3.8) นอกจากนี้เรายังสามารถตรวจสอบว่า เวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*) อยู่ในพื้นที่ที่ได้โดยพิจารณาจากค่าและเครื่องหมายของพิกัดจุดศูนย์ถ่วงโดยตรงด้วย และวิธีการตรวจสอบนี้ใช้ได้กับพื้นที่สามเหลี่ยมทุกรูปแบบ การ

แปลงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงพื้นที่หนึ่ง ไปเป็นพิกัดจุดศูนย์ถ่วงที่อ้างอิงอีกพื้นที่หนึ่งก็สามารถทำได้ โดยอาศัยเมทริกซ์การแปลงที่ง่าย ซึ่งคุณสมบัตินี้จะช่วยลดความยุ่งยากของการคำนวณลงได้มาก ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

จัดรูปสมการที่ (3.1) ใหม่ จะได้ว่า

$$\mathbf{V}^* - \mathbf{V}_3 = \lambda_1 (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_3) + \lambda_2 (\mathbf{V}_2 - \mathbf{V}_3) \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} v_u^* \\ v_v^* \\ v_w^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{3u} \\ v_{3v} \\ v_{3w} \end{bmatrix} = \lambda_1 \left(\begin{bmatrix} v_{1u} \\ v_{1v} \\ v_{1w} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{3u} \\ v_{3v} \\ v_{3w} \end{bmatrix} \right) + \lambda_2 \left(\begin{bmatrix} v_{2u} \\ v_{2v} \\ v_{2w} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{3u} \\ v_{3v} \\ v_{3w} \end{bmatrix} \right) \quad (3.4)$$

พิจารณาเฉพาะองค์ประกอบในเฟส u, v จะได้

$$v_u^* - v_{3u} = \lambda_1 (v_{1u} - v_{3u}) + \lambda_2 (v_{2u} - v_{3u}) \quad (3.5)$$

$$v_v^* - v_{3v} = \lambda_1 (v_{1v} - v_{3v}) + \lambda_2 (v_{2v} - v_{3v}) \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1u} - v_{3u} & v_{2u} - v_{3u} \\ v_{1v} - v_{3v} & v_{2v} - v_{3v} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_u^* - v_{3u} \\ v_v^* - v_{3v} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

ดังนั้น

$$\begin{cases} \lambda_{1s} = \frac{(v_u^* - v_{3u})(v_{2v} - v_{3v}) - (v_v^* - v_{3v})(v_{2u} - v_{3u})}{(v_{1u} - v_{3u})(v_{2v} - v_{3v}) - (v_{1v} - v_{3v})(v_{2u} - v_{3u})} \\ \lambda_{2s} = \frac{(v_v^* - v_{3v})(v_{1u} - v_{3u}) - (v_u^* - v_{3u})(v_{1v} - v_{3v})}{(v_{1u} - v_{3u})(v_{2v} - v_{3v}) - (v_{1v} - v_{3v})(v_{2u} - v_{3u})} \\ \lambda_{3s} = 1 - \lambda_1 - \lambda_2 \end{cases} \quad (3.8)$$

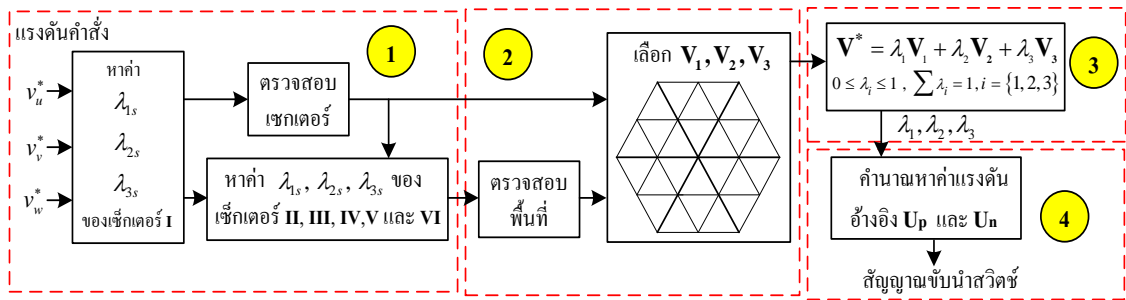
โดยที่ λ_{is} คือ ค่าพิกัดจุดศูนย์ถ่วงของเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i 3 ตัวในแต่ละเซกเตอร์; $i = \{1, 2, 3\}$

v_j^* คือ ค่าแรงดันคำสั่งในแต่ละเฟส; $j = \{u, v, w\}$

v_{iu}, v_{iv}, v_{iw} คือ ค่าพิกัดเชิงแรงดันเฟสของเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i

3.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์

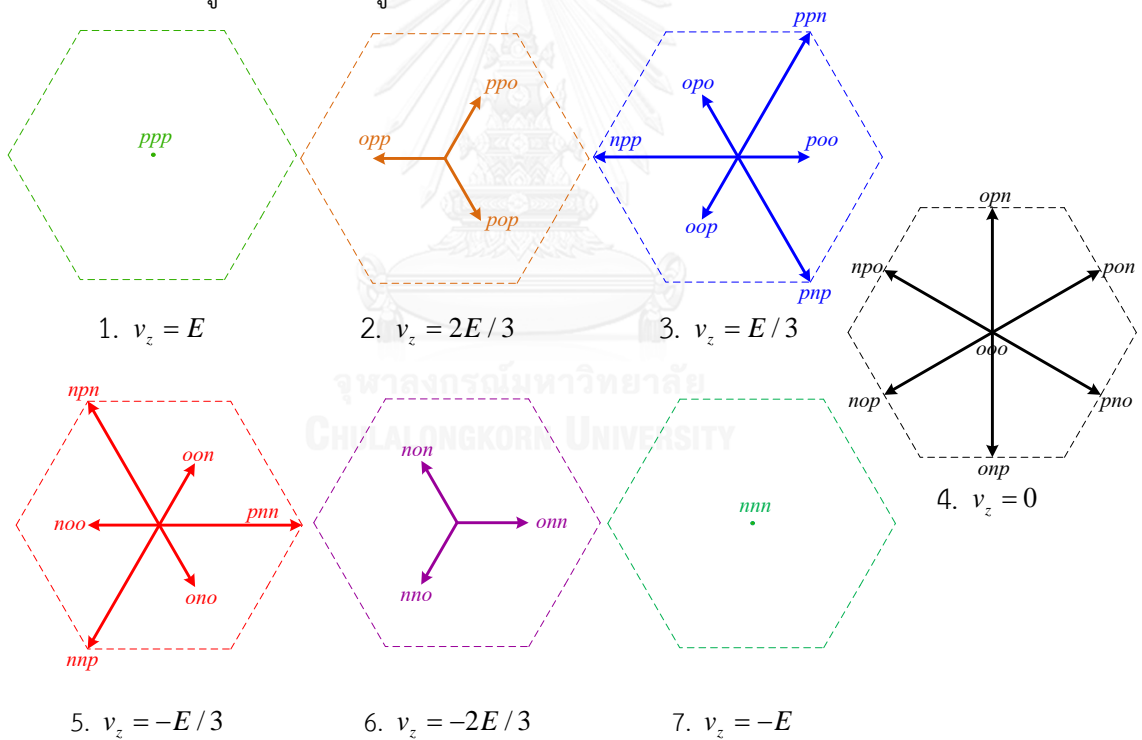
จากสมการที่ (2.19) สามารถกล่าวได้ว่า ปัญหาการหาความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ ก็คือ การหาค่าแรงดันอ้างอิง \mathbf{U}_p และ \mathbf{U}_n ที่เกิดจากการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์นั่นเอง ขั้นตอนการคำนวณหาค่า \mathbf{U}_p และ \mathbf{U}_n แสดงได้ดัง รูปที่ 3.2 และ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการหาค่า U_p และ U_n ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

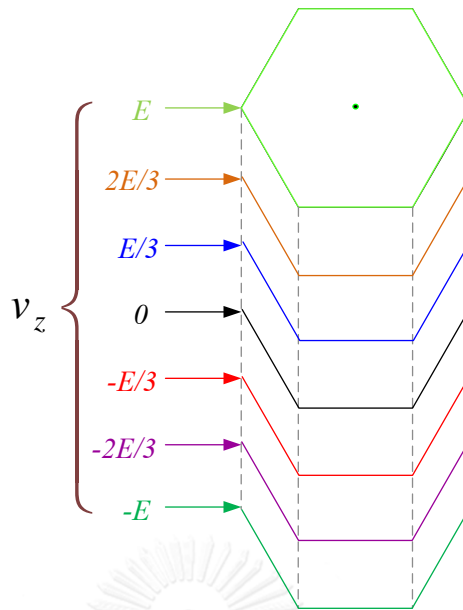
3.2.1 หาพิกัดจุดศูนย์กลางถ่วงของเวกเตอร์แรงดันในแต่ละเซกเตอร์จากแนวคิดพิกัดจุดศูนย์กลางถ่วง

เมื่อพิจารณาค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_z ของเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ S_i ในรูปที่ 1.3 จะได้ค่าแรงดันลำดับศูนย์ 7 ค่าและแสดงเป็นระนาบแรงดันลำดับศูนย์พร้อมกับค่าเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่ให้แรงดันลำดับศูนย์ค่านั้นได้ดังรูปที่ 3.3



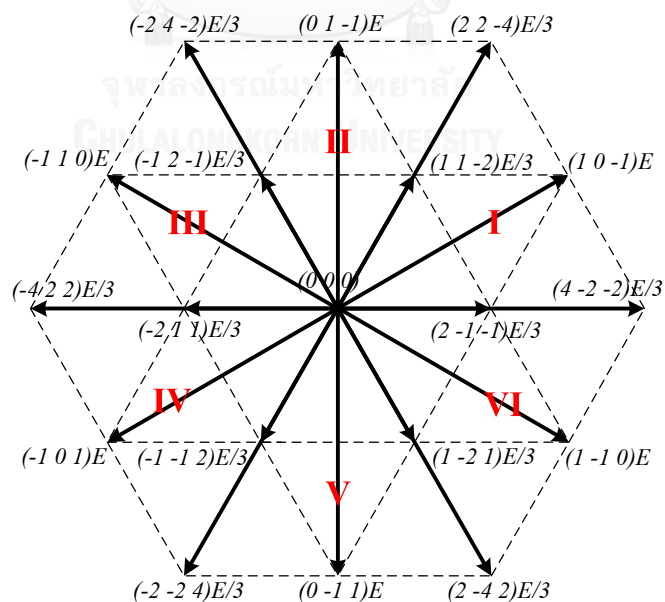
รูปที่ 3.3 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_z ของเวกเตอร์สถานะการสวิตช์

ซึ่งเราสามารถเขียนระนาบแรงดันลำดับศูนย์ v_z ของเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ลงในปริภูมิสามมิติของแรงดันเฟสได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4



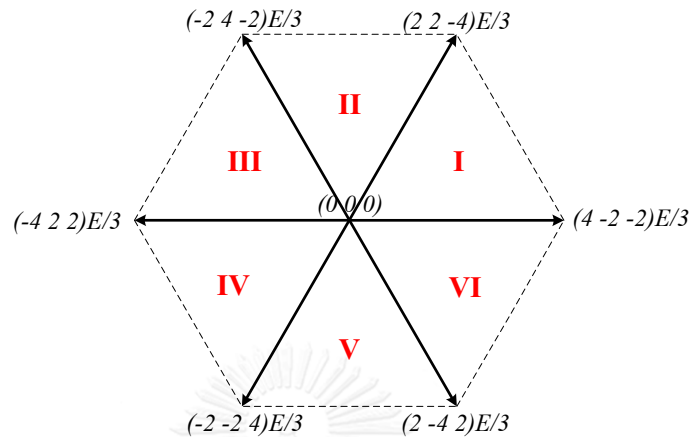
รูปที่ 3.4 ระนาบแรงดันลำดับศูนย์ v_z และเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ในปริภูมิสามมิติ

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าค่าเวกเตอร์แรงดันที่เกิดจากเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ \mathbf{S}_i ในรูปที่ 1.3 ไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงต้องลบค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_z ออกจากค่าเวกเตอร์แรงดันที่เกิดจากเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ เพื่อให้ได้เวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i ที่เป็นแรงดันเฟสโดยตรงและอยู่ในระนาบเดียวกันดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เวกเตอร์แรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับเมื่อลบค่าแรงดันลำดับศูนย์แล้ว

ค่าพิกัดเชิงแรงดันเฟสของเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i ในแต่ละเซกเตอร์ (v_{iu}, v_{iv}, v_{iw}) จึงเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.6 ค่าพิกัดนี้สามารถใช้คำนวณพิกัดจุดศูนย์ถ่วงของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง $\mathbf{V}^* = (v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ ได้จากสมการที่ (3.8) ซึ่งเป็นการคำนวณจากแรงดันเฟสโดยตรง

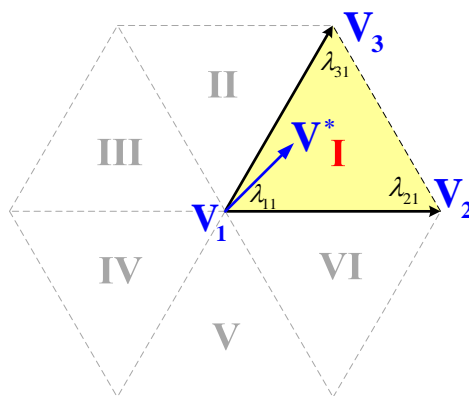


รูปที่ 3.6 พิกัดเชิงแรงดันเฟสของเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i ในแต่ละเซกเตอร์

3.2.2 ตรวจสอบเซกเตอร์และพื้นที่สามเหลี่ยมย่อยที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งตกอยู่

กำหนดให้ค่าพิกัดจุดศูนย์ถ่วงของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง $\mathbf{V}^* = (v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ คำนวณโดยอ้างอิงเซกเตอร์ I โดยใช้สมการที่ (3.8) มีค่าเป็น $(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31})$ (หมายเหตุ ในที่นี้ เวกเตอร์แรงดันคำสั่งไม่จำเป็นต้องอยู่ในเซกเตอร์ I แต่เราก็สามารถหาค่าพิกัดจุดศูนย์ถ่วงได้) ค่าพิกัดนี้สามารถใช้ตรวจสอบเซกเตอร์ที่แท้จริงของเวกเตอร์แรงดันคำสั่งได้ด้วย โดยพิจารณาจากเงื่อนไขในตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการพิจารณาสามารถอธิบายเป็นแผนภาพได้ในรูปที่ 3.13 ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณเงื่อนไขในการพิจารณาของแต่ละเซกเตอร์ดังต่อไปนี้

1. พิจารณาเครื่องหมายของพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ I $(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31})$ เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ I

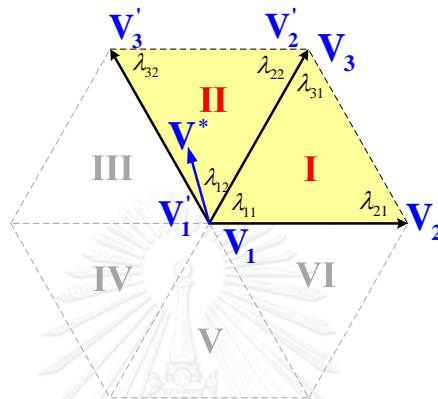


รูปที่ 3.7 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ I

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่า
$$\mathbf{V}^* = \lambda_{11}\mathbf{V}_1 + \lambda_{21}\mathbf{V}_2 + \lambda_{31}\mathbf{V}_3 \quad (3.9)$$

พิจารณาเครื่องหมายของ $(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31})$ เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ II คำนวณโดยอ้างอิงเซกเตอร์ I โดยใช้สมการที่ (3.8) จะได้
$$0 \leq \lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31} \leq 1$$

2. พิจารณาเครื่องหมายและความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ I $(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31})$ กับพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ II $(\lambda_{12}, \lambda_{22}, \lambda_{32})$ เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ II



รูปที่ 3.8 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ II เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ II

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่า $\mathbf{V}_2 = (\mathbf{V}'_2 - \mathbf{V}'_3)$, $\mathbf{V}_3 = \mathbf{V}'_2$ และกำหนดให้ $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}'_1 = (0, 0, 0)$ แทนค่า $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ และ \mathbf{V}_3 ในสมการ (3.9) จะได้

$$\mathbf{V}^* = \lambda_{21}(\mathbf{V}'_2 - \mathbf{V}'_3) + \lambda_{31}\mathbf{V}'_2 \quad (3.10)$$

จัดรูปสมการ (3.10) ใหม่ ;
$$\mathbf{V}^* = (\lambda_{21} + \lambda_{31})\mathbf{V}'_2 - \lambda_{21}\mathbf{V}'_3 \quad (3.11)$$

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่า ;
$$\mathbf{V}^* = \lambda_{12}\mathbf{V}'_1 + \lambda_{22}\mathbf{V}'_2 + \lambda_{33}\mathbf{V}'_3 \quad (3.12)$$

แทนค่า \mathbf{V}'_1 ในสมการ (3.12) ;
$$\mathbf{V}^* = \lambda_{22}\mathbf{V}'_2 + \lambda_{33}\mathbf{V}'_3 \quad (3.13)$$

เปรียบเทียบสมการ (3.11) กับสมการ (3.13) จะได้

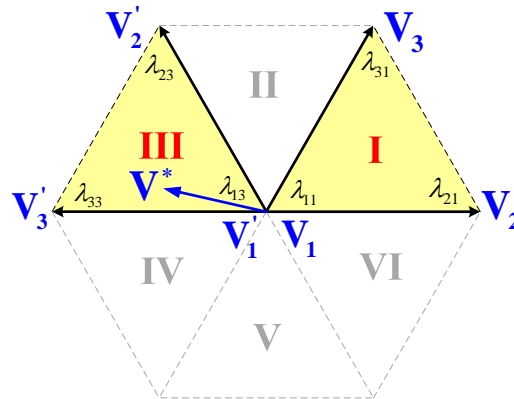
$$\lambda_{22} = (\lambda_{21} + \lambda_{31}) = (1 - \lambda_{11}) ; 0 \leq \lambda_{22} \leq 1 \quad (3.14)$$

$$\lambda_{32} = (-\lambda_{21}) ; 0 \leq \lambda_{32} \leq 1 \quad (3.15)$$

และ
$$\lambda_{12} = 1 - \lambda_{22} - \lambda_{32} = 1 - \lambda_{31} ; 0 \leq \lambda_{12} \leq 1 \quad (3.16)$$

พิจารณาเครื่องหมายของ $(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31})$ จากสมการ (3.14) - (3.16) เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ II จะได้
$$0 \leq \lambda_{11}, \lambda_{31} \leq 1 \text{ และ } \lambda_{21} \leq 0$$

3. พิจารณาเครื่องหมายและความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ I ($\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}$) กับ พิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ III ($\lambda_{13}, \lambda_{23}, \lambda_{33}$) เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ III



รูปที่ 3.9 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ III เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ III

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่า $\mathbf{V}_2 = (-\mathbf{V}_3')$, $\mathbf{V}_3 = (\mathbf{V}_2' - \mathbf{V}_3')$ และกำหนดให้ $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_1' = (0,0,0)$ แทนค่า \mathbf{V}_1 , \mathbf{V}_2 และ \mathbf{V}_3 ในสมการ (3.9) จะได้

$$\mathbf{V}^* = \lambda_{21}(-\mathbf{V}_3') + \lambda_{31}(\mathbf{V}_2' - \mathbf{V}_3') \quad (3.17)$$

$$\text{จัดรูปสมการ (3.17) ใหม่ ;} \quad \mathbf{V}^* = \lambda_{31}\mathbf{V}_2' - (\lambda_{21} + \lambda_{31})\mathbf{V}_3' \quad (3.18)$$

$$\text{จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่า ;} \quad \mathbf{V}^* = \lambda_{12}\mathbf{V}_1' + \lambda_{22}\mathbf{V}_2' + \lambda_{33}\mathbf{V}_3' \quad (3.19)$$

$$\text{แทนค่า } \mathbf{V}_1' \text{ ในสมการ (3.19) ;} \quad \mathbf{V}^* = \lambda_{22}\mathbf{V}_2' + \lambda_{33}\mathbf{V}_3' \quad (3.20)$$

เปรียบเทียบสมการ (3.18) กับสมการ (3.20) จะได้

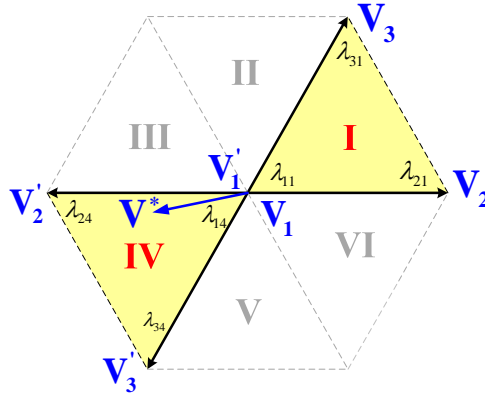
$$\lambda_{22} = \lambda_{31} \quad ; \quad 0 \leq \lambda_{22} \leq 1 \quad (3.21)$$

$$\lambda_{32} = -(\lambda_{21} + \lambda_{31}) = (\lambda_{11} - 1) \quad ; \quad 0 \leq \lambda_{32} \leq 1 \quad (3.22)$$

$$\text{และ} \quad \lambda_{12} = 1 - \lambda_{22} - \lambda_{32} = 1 + \lambda_{21} + \lambda_{31} \quad ; \quad 0 \leq \lambda_{12} \leq 1 \quad (3.23)$$

พิจารณาเครื่องหมายของ $(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31})$ จากสมการ (3.21) - (3.23) เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ III จะได้ $1 \leq \lambda_{11}$ และ $\lambda_{21} \leq 0$ และ $0 \leq \lambda_{31} \leq 1$

4. พิจารณาเครื่องหมายและความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ I ($\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}$) กับ พิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ IV ($\lambda_{14}, \lambda_{24}, \lambda_{34}$) เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ IV



รูปที่ 3.10 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ IV เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ IV

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่า $\mathbf{V}_2 = (-\mathbf{V}'_2)$, $\mathbf{V}_3 = (-\mathbf{V}'_3)$ และกำหนดให้ $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}'_1 = (0, 0, 0)$
แทนค่า \mathbf{V}_1 , \mathbf{V}_2 และ \mathbf{V}_3 ในสมการ (3.9) จะได้

$$\mathbf{V}^* = \lambda_{21}(-\mathbf{V}'_2) + \lambda_{31}(-\mathbf{V}'_3) \quad (3.24)$$

จัดรูปสมการ (3.24) ใหม่ ; $\mathbf{V}^* = \lambda_{31}\mathbf{V}'_2 - (\lambda_{21} + \lambda_{31})\mathbf{V}'_3$ (3.25)

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่า ; $\mathbf{V}^* = \lambda_{12}\mathbf{V}'_1 + \lambda_{22}\mathbf{V}'_2 + \lambda_{33}\mathbf{V}'_3$ (3.26)

แทนค่า \mathbf{V}'_1 ในสมการ (3.26) ; $\mathbf{V}^* = \lambda_{22}\mathbf{V}'_2 + \lambda_{33}\mathbf{V}'_3$ (3.27)

เปรียบเทียบสมการ (3.25) กับสมการ (3.27) จะได้

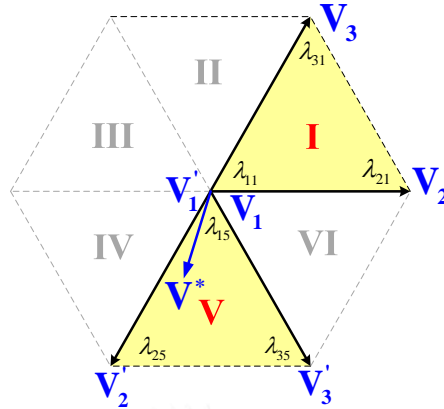
$$\lambda_{22} = (-\lambda_{31}) ; 0 \leq \lambda_{22} \leq 1 \quad (3.28)$$

$$\lambda_{32} = -(\lambda_{31}) ; 0 \leq \lambda_{32} \leq 1 \quad (3.29)$$

และ $\lambda_{12} = 1 - \lambda_{22} - \lambda_{32} = 1 + \lambda_{21} + \lambda_{31} ; 0 \leq \lambda_{12} \leq 1$ (3.30)

พิจารณาเครื่องหมายของ $(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31})$ จากสมการ (3.28) - (3.30) เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ IV
จะได้ $1 \leq \lambda_{11}$ และ $\lambda_{21} \leq 0$ และ $\lambda_{31} \leq 0$

5. พิจารณาเครื่องหมายและความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ I ($\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}$) กับ พิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ V ($\lambda_{15}, \lambda_{25}, \lambda_{35}$) เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ V



รูปที่ 3.11 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ V เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ V

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า $\mathbf{V}_2 = (\mathbf{V}'_3 - \mathbf{V}'_2)$, $\mathbf{V}_3 = (-\mathbf{V}'_2)$ และกำหนดให้ $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}'_1 = (0, 0, 0)$ แทนค่า \mathbf{V}_1 , \mathbf{V}_2 และ \mathbf{V}_3 ในสมการ (3.9) จะได้

$$\mathbf{V}^* = \lambda_{21}(\mathbf{V}'_3 - \mathbf{V}'_2) + \lambda_{31}(-\mathbf{V}'_2) \quad (3.31)$$

จัดรูปสมการ (3.31) ใหม่ ;
$$\mathbf{V}^* = -(\lambda_{21} + \lambda_{31})\mathbf{V}'_2 + \lambda_{21}\mathbf{V}'_3 \quad (3.32)$$

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า ;
$$\mathbf{V}^* = \lambda_{12}\mathbf{V}'_1 + \lambda_{22}\mathbf{V}'_2 + \lambda_{33}\mathbf{V}'_3 \quad (3.33)$$

แทนค่า \mathbf{V}'_1 ในสมการ (3.33) ;
$$\mathbf{V}^* = \lambda_{22}\mathbf{V}'_2 + \lambda_{33}\mathbf{V}'_3 \quad (3.34)$$

เปรียบเทียบสมการ (3.32) กับสมการ (3.34) จะได้

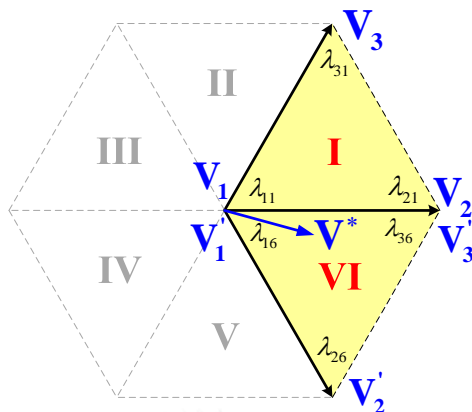
$$\lambda_{22} = -(\lambda_{21} + \lambda_{31}) ; 0 \leq \lambda_{22} \leq 1 \quad (3.35)$$

$$\lambda_{32} = \lambda_{21} ; 0 \leq \lambda_{32} \leq 1 \quad (3.36)$$

และ
$$\lambda_{12} = 1 - \lambda_{22} - \lambda_{32} = 1 + \lambda_{31} ; 0 \leq \lambda_{12} \leq 1 \quad (3.37)$$

พิจารณาเครื่องหมายของ $(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31})$ จากสมการ (3.35) - (3.37) เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ V จะได้ $1 \leq \lambda_{11}$ และ $0 \leq \lambda_{21} \leq 1$ และ $\lambda_{31} \leq 0$

6. พิจารณาเครื่องหมายและความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ I ($\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}$) กับ พิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ VI ($\lambda_{16}, \lambda_{26}, \lambda_{36}$) เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ VI



รูปที่ 3.12 แสดงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงและเวกเตอร์แรงดันอ้างอิงเซกเตอร์ I กับ VI เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ VI

จากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่า $\mathbf{V}_2 = \mathbf{V}'_3$, $\mathbf{V}_3 = (\mathbf{V}'_3 - \mathbf{V}'_2)$ และกำหนดให้ $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}'_1 = (0, 0, 0)$ แทนค่า \mathbf{V}_1 , \mathbf{V}_2 และ \mathbf{V}_3 ในสมการ (3.9) จะได้

$$\mathbf{V}^* = \lambda_{21} \mathbf{V}'_3 + \lambda_{31} (\mathbf{V}'_3 - \mathbf{V}'_2) \quad (3.38)$$

จัดรูปสมการ (3.38) ใหม่ ;
$$\mathbf{V}^* = (-\lambda_{31}) \mathbf{V}'_2 + (\lambda_{21} + \lambda_{31}) \mathbf{V}'_3 \quad (3.39)$$

จากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่า ;
$$\mathbf{V}^* = \lambda_{12} \mathbf{V}'_1 + \lambda_{22} \mathbf{V}'_2 + \lambda_{33} \mathbf{V}'_3 \quad (3.40)$$

แทนค่า \mathbf{V}'_1 ในสมการ (3.40) ;
$$\mathbf{V}^* = \lambda_{22} \mathbf{V}'_2 + \lambda_{33} \mathbf{V}'_3 \quad (3.41)$$

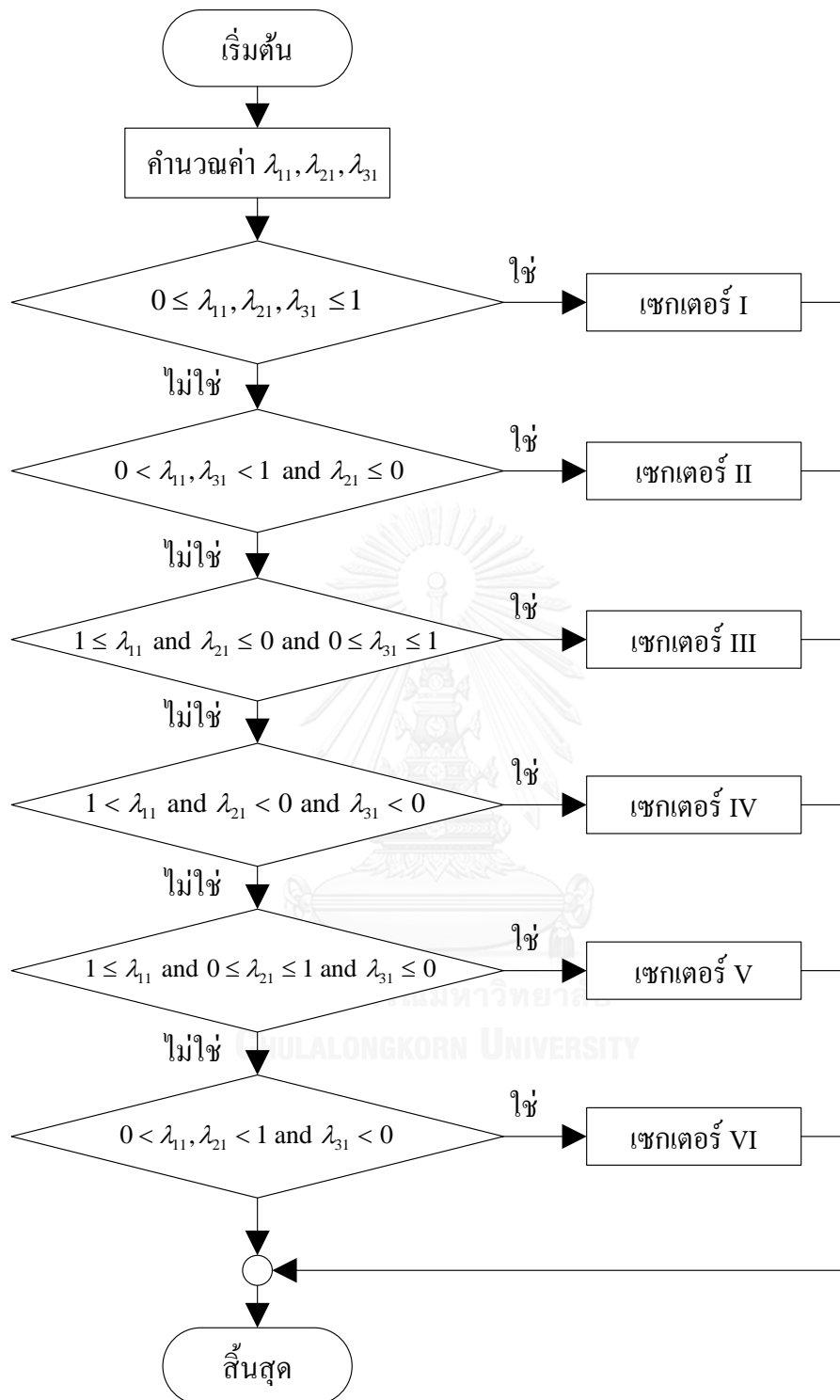
เปรียบเทียบสมการ (3.39) กับสมการ (3.41) จะได้

$$\lambda_{22} = (-\lambda_{31}) ; 0 \leq \lambda_{22} \leq 1 \quad (3.42)$$

$$\lambda_{32} = (\lambda_{21} + \lambda_{31}) ; 0 \leq \lambda_{32} \leq 1 \quad (3.43)$$

และ
$$\lambda_{12} = 1 - \lambda_{22} - \lambda_{32} = 1 - \lambda_{21} ; 0 \leq \lambda_{12} \leq 1 \quad (3.44)$$

พิจารณาเครื่องหมายของ $(\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31})$ จากสมการ (3.42) - (3.44) เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในเซกเตอร์ V จะได้ $0 \leq \lambda_{11}, \lambda_{21} \leq 1$ และ $\lambda_{31} \leq 0$



รูปที่ 3.13 การตรวจสอบเชกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดันค่าสั่ง

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการตรวจสอบเชกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง

เชกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*)	เงื่อนไข
เชกเตอร์ I	$0 \leq \lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31} \leq 1$
เชกเตอร์ II	$0 \leq \lambda_{11}, \lambda_{31} \leq 1$ และ $\lambda_{21} \leq 0$
เชกเตอร์ III	$1 \leq \lambda_{11}$ และ $\lambda_{21} \leq 0$ และ $0 \leq \lambda_{31} \leq 1$
เชกเตอร์ IV	$1 \leq \lambda_{11}$ และ $\lambda_{21} \leq 0$ และ $\lambda_{31} \leq 0$
เชกเตอร์ V	$1 \leq \lambda_{11}$ และ $0 \leq \lambda_{21} \leq 1$ และ $\lambda_{31} \leq 0$
เชกเตอร์ VI	$0 \leq \lambda_{11}, \lambda_{21} \leq 1$ และ $\lambda_{31} \leq 0$

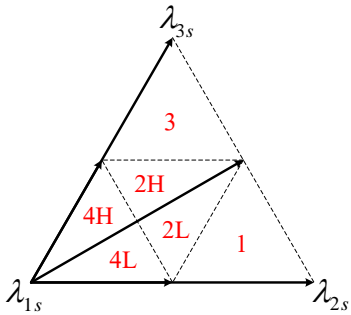
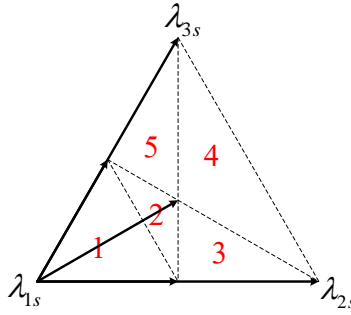
การหาค่าพิกัดจุดศูนย์ถ่วงของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง $\mathbf{V}^* = (v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ อ้างอิงเชกเตอร์ที่แท้จริงซึ่งอาจจะเป็นเชกเตอร์ II (λ_{i2}), III (λ_{i3}), IV (λ_{i4}), V (λ_{i5}) หรือ VI (λ_{i6}) ก็ได้ นั่นสามารถคำนวณได้จากค่าพิกัดจุดศูนย์ถ่วงของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง $\mathbf{V}^* = (v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ อ้างอิงเชกเตอร์ I (λ_{i1}) โดยไม่ต้องคำนวณสมการที่ (3.8) ซ้ำ แต่อาศัยเพียงการแปลงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงตามความสัมพันธ์ที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น และสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การแปลงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเชกเตอร์ I ไปอ้างอิงเชกเตอร์ II, III, IV, V, VI

เชกเตอร์ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง (\mathbf{V}^*)	พิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงแต่ละเชกเตอร์
เชกเตอร์ I (λ_{i1})	$\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}$
เชกเตอร์ II (λ_{i2})	$\lambda_{12} = (1 - \lambda_{31}), \lambda_{22} = (1 - \lambda_{11}), \lambda_{32} = -\lambda_{21}$
เชกเตอร์ III (λ_{i3})	$\lambda_{13} = (1 + \lambda_{21}), \lambda_{23} = \lambda_{31}, \lambda_{33} = (\lambda_{11} - 1)$
เชกเตอร์ IV (λ_{i4})	$\lambda_{14} = (1 + \lambda_{21} + \lambda_{31}), \lambda_{24} = -\lambda_{21}, \lambda_{34} = -\lambda_{31}$
เชกเตอร์ V (λ_{i5})	$\lambda_{15} = (1 + \lambda_{31}), \lambda_{25} = (\lambda_{11} - 1), \lambda_{35} = \lambda_{21}$
เชกเตอร์ VI (λ_{i6})	$\lambda_{16} = (1 - \lambda_{21}), \lambda_{26} = -\lambda_{31}, \lambda_{36} = (1 - \lambda_{11})$

นอกจากนั้นการตรวจสอบเชกเตอร์แล้ว ค่าพิกัดจุดศูนย์ถ่วงของเวกเตอร์แรงดันคำสั่งยังสามารถใช้ตรวจสอบพื้นที่ของ \mathbf{V}^* ได้ดังแสดงเป็นตัวอย่างสำหรับเชกเตอร์ S (S=I-VI) ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการตรวจสอบพื้นที่ของเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง \mathbf{V}^* สำหรับการมอดูเลตแบบ NTV และ NTV²

สำหรับการมอดูเลตแบบ NTV	สำหรับการมอดูเลตแบบ NTV ²
 <p>พื้นที่ 1 $\Leftrightarrow \lambda_{2s} \geq 0.5$ พื้นที่ 2L $\Leftrightarrow \lambda_{2s} < 0.5$ และ $\lambda_{1s} < 0.5$ และ $\lambda_{3s} < 0.5$ และ $\lambda_{2s} \geq \lambda_{3s}$ พื้นที่ 2H $\Leftrightarrow \lambda_{2s} < 0.5$ และ $\lambda_{1s} < 0.5$ และ $\lambda_{3s} < 0.5$ และ $\lambda_{2s} < \lambda_{3s}$ พื้นที่ 3 $\Leftrightarrow \lambda_{3s} \geq 0.5$ พื้นที่ 4L $\Leftrightarrow \lambda_{1s} \geq 0.5$ และ $\lambda_{2s} \geq \lambda_{3s}$ พื้นที่ 4H $\Leftrightarrow \lambda_{1s} \geq 0.5$ และ $\lambda_{2s} < \lambda_{3s}$</p>	 <p>พื้นที่ 1 $\Leftrightarrow \lambda_{1s} \geq 0.5$ พื้นที่ 2 $\Leftrightarrow \lambda_{1s} < 0.5$ และ $\lambda_{1s} \geq \lambda_{2s}$ และ $\lambda_{1s} \geq \lambda_{3s}$ พื้นที่ 3 $\Leftrightarrow \lambda_{2s} > \lambda_{1s}$ และ $\lambda_{1s} \geq \lambda_{3s}$ พื้นที่ 4 $\Leftrightarrow \lambda_{3s} > \lambda_{1s}$ และ $\lambda_{2s} > \lambda_{1s}$ พื้นที่ 5 $\Leftrightarrow \lambda_{3s} > \lambda_{1s}$ และ $\lambda_{1s} \geq \lambda_{2s}$</p>

3.2.3. หาค่าวิถัจกรงานของเวกเตอร์แรงดัน 3 ตัวที่ใช้ในการสร้างเวกเตอร์แรงดันคำสั่ง

เมื่อทราบเซกเตอร์และพื้นที่สามเหลี่ยมย่อยที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งตกอยู่แล้ว จะสามารถกำหนดเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i 3 ตัวของพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างแรงดันคำสั่งและคำนวณหาค่าพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเวกเตอร์ทั้งสามตัวของพื้นที่นั้นได้ดังสมการที่ (3.45) ค่าพิกัด (λ_i) นี้ก็คือค่าวิถัจกรงานของเวกเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแรงดันที่คำนวณในการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์นั่นเอง

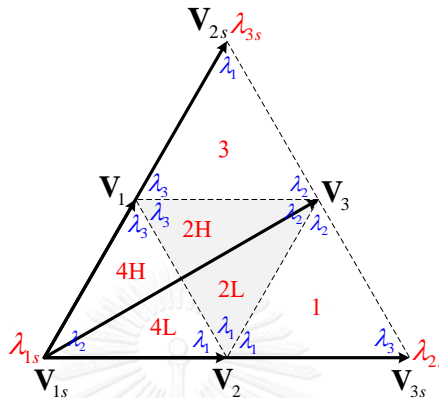
$$[v_u^* \quad v_v^* \quad v_w^*]^T = \lambda_1 \mathbf{V}_1 + \lambda_2 \mathbf{V}_2 + \lambda_3 \mathbf{V}_3 \quad (3.45)$$

โดยที่ $0 \leq \lambda_i \leq 1$, $\sum \lambda_i = 1$, $\mathbf{V}_i = [v_{ij}]$; $i = \{1, 2, 3\}$, $j = \{u, v, w\}$

ค่าวิถัจกรงาน (λ_i) ของเวกเตอร์ \mathbf{V}_i สามารถคำนวณจากการแปลงพิกัดจุดศูนย์ถ่วงเช่นกัน โดยแปลงจากค่าพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงเซกเตอร์ (λ_{rs}) ไปเป็นพิกัดจุดศูนย์ถ่วงอ้างอิงพื้นที่ย่อย (λ_i)

แทน ดังแสดงในตัวอย่างที่ 2 โดยไม่ต้องคำนวณพิกัดจุดศูนย์กลางใหม่ตามสมการที่ (3.8) ซ้ำอีก ทำให้การคำนวณง่ายขึ้น

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณหาพิกัดจุดศูนย์กลาง λ_1 , λ_2 และ λ_3 เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในพื้นที่ 4L, 4H ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ค่าวิถุจักรงานย่อย λ_i ของเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i

$$\mathbf{V}^* \text{ อังอิงเซกเตอร์ S: } \mathbf{V}^* = [\lambda_{1s} \quad \lambda_{2s} \quad \lambda_{3s}] [\mathbf{V}_{1s} \quad \mathbf{V}_{3s} \quad \mathbf{V}_{2s}]^T \quad (3.46)$$

$$\mathbf{V}^* \text{ อังอิงพื้นที่ 4L, 4H: } \mathbf{V}^* = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3] [\mathbf{V}_2 \quad \mathbf{V}_{1s} \quad \mathbf{V}_1]^T \quad (3.47)$$

$$\text{อาศัยความสัมพันธ์} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{V}_{1s} \\ \mathbf{V}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{1s} \\ \mathbf{V}_{3s} \\ \mathbf{V}_{2s} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$\text{จะได้} \quad [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3] = [\lambda_{1s} \quad \lambda_{2s} \quad \lambda_{3s}] \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.49)$$

$$\text{ดังนั้น } \lambda_1, \lambda_2 \text{ และ } \lambda_3 \text{ เมื่อ } \mathbf{V}^* \text{ อยู่ในพื้นที่ 4L, 4H คือ } \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\lambda_{2s} \\ (\lambda_{1s} - \lambda_{2s} - \lambda_{3s}) \\ 2\lambda_{3s} \end{bmatrix}$$

3.2.4. หาค่าแรงดันอังอิงบัสบวก และแรงดันอังอิงบัสลบ

เนื่องจากค่าแรงดันอังอิงสัมพันธ์โดยตรงกับสถานะการสวิตช์ และเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i บางตัวมีสถานะการสวิตช์ $\mathbf{S}_i = [s_{ui} \quad s_{wi} \quad s_{vi}]$ ได้หลายสถานะ จึงมีความจำเป็นต้องคำนวณหาค่าวิถุจักรงานของสถานะการสวิตช์ จากค่าวิถุจักรงานของเวกเตอร์แรงดัน สมการที่ (3.45) เมื่อเขียนในเทอมของเวกเตอร์สถานะการสวิตช์จะเป็นดังสมการที่ (3.50) โดยที่ d_i และ n คือค่าวิถุจักรงานของ

เวกเตอร์สถานะการสวิตช์และจำนวนเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่ใช้ตามลำดับ ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง λ_i กับ d_i สามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 3.4 ในตัวอย่างที่ 3

$$\begin{bmatrix} v_u^* & v_v^* & v_w^* \end{bmatrix}^T = \sum_{i=1}^n d_i \mathbf{S}_i^T, \quad \sum d_i = 1, 0 \leq d_i \leq 1 \quad (3.50)$$

จากสมการที่ (3.50) สามารถหาแรงดันอ้างอิงบัสบวก (\mathbf{U}_p) และแรงดันอ้างอิงบัสลบ (\mathbf{U}_n) ได้ดังสมการที่ (3.51) และ (3.52) ตามลำดับ ซึ่งอธิบายดังรูปที่ 3.16 ในตัวอย่างที่ 3 นอกจากนี้ยังสามารถหาแรงดันลำดับศูนย์ได้จากสมการที่ (3.53)

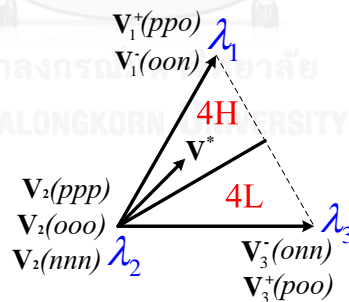
$$\mathbf{U}_p = [u_{jp}] = \sum d_i [\text{sgn}^+(s_{ji})]^T (v_p - v_o), \quad j = \{u, v, w\} \quad (3.51)$$

$$\mathbf{U}_n = [u_{jn}] = \sum d_i [\text{sgn}^-(s_{ji})]^T (v_n - v_o) \quad (3.52)$$

$$\text{โดยที่ } \text{sgn}^+(s_{ji}) = \begin{cases} 1; & s_{ji} = p \\ 0; & \text{else} \end{cases}, \quad \text{sgn}^-(s_{ji}) = \begin{cases} 1; & s_{ji} = n \\ 0; & \text{else} \end{cases}$$

$$v_z = v_{zp} + v_{zn}; \quad v_{zp} = \frac{1}{3} \sum_{j=u,v,w} u_{jp}, \quad v_{zn} = \frac{1}{3} \sum_{j=u,v,w} u_{jn} \quad (3.53)$$

ตัวอย่างที่ 3 เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในพื้นที่ 4H ของเซกเตอร์ I และใช้การมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 4 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ (ตารางที่ 1.3) ดังแสดงในรูปที่ 3.15



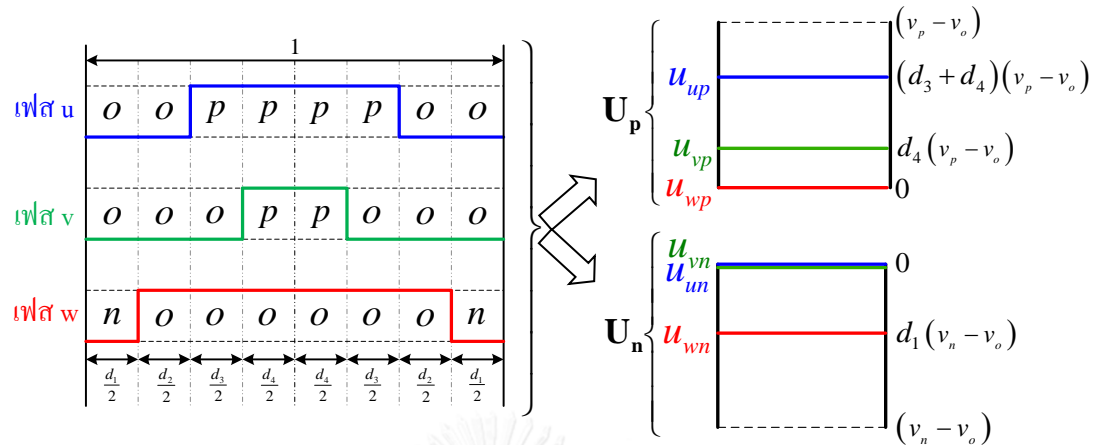
รูปที่ 3.15 การมอดูเลตแบบ NTV เมื่อ \mathbf{V}^* อยู่ในพื้นที่ 4H ของเซกเตอร์ I

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ_i กับ d_i ในแต่ละเวกเตอร์ของพื้นที่ 4H เซกเตอร์ I

เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่ใช้	เวกเตอร์แรงดัน \mathbf{V}_i	ค่าวัฏจักรงาน λ_i	ค่าวัฏจักรงาน d_i
oon	\mathbf{V}_1^-	λ_1	$d_1 = k\lambda_1$
ooo	\mathbf{V}_2	λ_2	$d_2 = \lambda_2$
poo	\mathbf{V}_3^+	λ_3	$d_3 = \lambda_3$
ppo	\mathbf{V}_1^+	λ_1	$d_4 = (1-k)\lambda_1$

หมายเหตุ ; k คือสัดส่วนการใช้สถานะการสวิตช์ที่มีเวกเตอร์แรงดันซ้ำซ้อน

จากสมการที่ (3.51), (3.52) สามารถหาแรงดันอ้างอิงบัสบวก (U_p) และแรงดันอ้างอิงบัสลบ (U_n) ได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การหาค่าแรงดันอ้างอิงบัสบวก (U_p) และแรงดันอ้างอิงบัสลบ (U_n)

และจากสมการ (3.53) จะได้

$$v_{zp} = \frac{1}{3}(d_3 + 2d_4)(v_p - v_o), \quad v_{zn} = \frac{1}{3}d_1(v_n - v_o) \quad (3.54)$$

$$v_z = v_{zp} + v_{zn} = \frac{1}{3}\{(d_3 + 2d_4)(v_p - v_o) + d_1(v_n - v_o)\} \quad (3.55)$$

สมการที่ (3.51)- (3.52) สามารถใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห้ได้ทุกรูปแบบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการมอดูเลต 2 รูปแบบ ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ แบบ NTV และ NTV²

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV กับการมอดูเลตบนฐาน คลื่นพาห์แบบชั่วคราวทั้ง 3 เฟส

เมื่อพิจารณาสถานะการสวิตช์ที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสในทุกพื้นที่ย่อยของเซกเตอร์ จะพบว่า การมอดูเลตแบบ NTV เป็นการมอดูเลตแบบชั่วคราวทั้ง 3 เฟส และเมื่อใช้สมการที่ (3.51) - (3.53) จะคำนวณได้ว่าแรงดันอ้างอิง $\mathbf{U}_p = [u_{jp}]$, $\mathbf{U}_n = [u_{jn}]$ ของการมอดูเลตแบบ NTV จะเป็นดังสมการที่ (4.1)

$$u_{jp} = \begin{cases} v_j = v_j^* + v_z & \text{if } v_j \geq 0 \\ 0 & \text{if } v_j < 0 \end{cases}, u_{jn} = \begin{cases} 0 & \text{if } v_j \geq 0 \\ v_j = v_j^* + v_z & \text{if } v_j < 0 \end{cases}; j = \{u, v, w\} \quad (4.1)$$

โดยที่ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) จะมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนการใช้เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่มีเวกเตอร์แรงดันเข้าซ้อน (k) ในแต่ละพื้นที่สามเหลี่ยมย่อย กำหนดให้ $\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ คือ แรงดันเฟสคำสั่งที่มีค่าสูงสุด, $\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ คือ แรงดันเฟสคำสั่งที่มีค่ากลาง และ $\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ คือ แรงดันเฟสคำสั่งที่มีค่าต่ำสุด เมื่อใช้สมการที่ (3.51) - (3.55) จะสามารถคำนวณค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของการมอดูเลตแบบ NTV จากงานวิจัย [4]-[8] ให้อยู่ในรูปของแรงดันเฟสคำสั่ง (v_u^*, v_v^*, v_w^*) ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1- ตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 แรงดันลำดับศูนย์ในทุกเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในตารางที่ 1.1 [4] ($k = 0.5$)

พื้นที่	เครื่องหมายค่าแรงดันคำสั่งเฟส $\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$, $\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$, $\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ ตามลำดับ	แรงดันลำดับศูนย์ (v_z)
1, 3	++-	$\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*) / 2$
	+--	
2L, 2H	++-	$(\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*) + E) / 2$
	+--	$(\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*) - E) / 2$
4L, 4H	++-	$\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*) / 2$
	+--	$\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*) / 2$

ตารางที่ 4.2 แรงดันลำดับศูนย์ในทุกเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ใน ตารางที่ 1.3 [5]

พื้นที่	เครื่องหมายค่าแรงดันคำสั่ง เฟส $\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$, $\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$, $\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ ตามลำดับ	แรงดันลำดับศูนย์ (v_z)
1, 3	++-	$(k-1)\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*) - k\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*) + (2k-1)E$
	+- -	
2L, 2H	++-	$(k-1)\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*) - k\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*) + kE$
	+- -	$(k-1)\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*) - k\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*) + (k-1)E$
4L, 4H	++-	$(k-1)\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*) - k\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$
	+- -	$(k-1)\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*) - k\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$

หมายเหตุ ; k (เซกเตอร์ I,III,V) = $1-k$ (เซกเตอร์ II,IV,VI)

ตารางที่ 4.3 แรงดันลำดับศูนย์ในแต่ละเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในตารางที่ 1.3 [6]

พื้นที่	เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 1		เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 2	
	เซกเตอร์ I, III, V	เซกเตอร์ II, IV, VI	เซกเตอร์ I, III, V	เซกเตอร์ II, IV, VI
1	$E - \max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์สับวก)	$-E - \min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์สลับ)	$-E - \min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์สลับ)	$E - \max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์สับวก)
2L, 2H				
3				
4L, 4H				

ตารางที่ 4.4 แรงดันลำดับศูนย์ในแต่ละเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในตารางที่ 1.4 [7]

พื้นที่	เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 1		เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 2	
	เซกเตอร์ I, III, V	เซกเตอร์ II, IV, VI	เซกเตอร์ I, III, V	เซกเตอร์ II, IV, VI
4L	$E - \max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์สับวก)	$-\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์ศูนย์ฝั่งลบ)	$-\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์ศูนย์ฝั่งลบ)	$E - \max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์สับวก)
4H	$-E - \min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์สลับ)	$-\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์ศูนย์ฝั่งบวก)	$-\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์ศูนย์ฝั่งบวก)	$-E - \min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์สลับ)

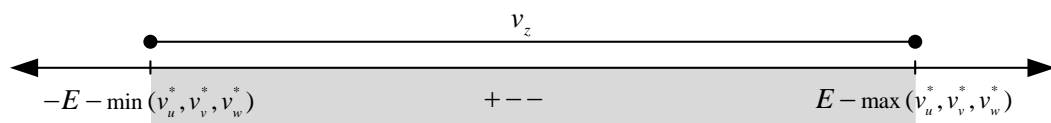
ตารางที่ 4.5 แรงดันลำดับศูนย์ในแต่ละเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ NTV ในตารางที่ 1.5 [8]

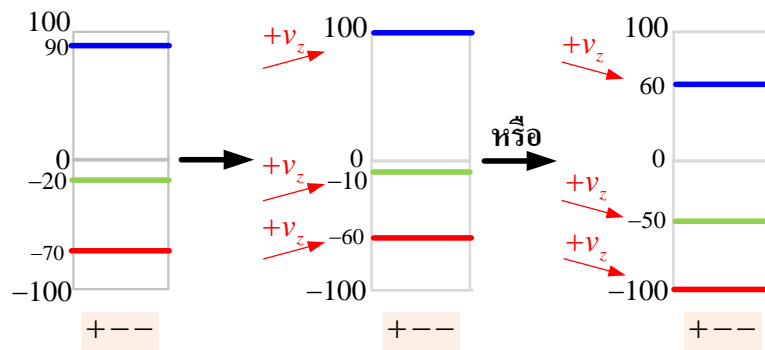
พื้นที่	เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 1		เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่เลือกใช้ แบบที่ 2	
	เซกเตอร์ I, III, V	เซกเตอร์ II, IV, VI	เซกเตอร์ I, III, V	เซกเตอร์ II, IV, VI
1	$E - \max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์บัสบวก)	$-E - \min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์บัสลบ)	$-E - \min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์บัสลบ)	$E - \max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์บัสบวก)
2L, 2H				
3				
4L, 4H	$-\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์ศูนย์ฝั่งบวก)	$-\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์ศูนย์ฝั่งลบ)	$-\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์ศูนย์ฝั่งลบ)	$-\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)$ (แคลมป์ศูนย์ฝั่งบวก)

จากตารางที่ 4.1 -ตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเราสามารถทำการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แทนการมอดูเลตแบบ NTV ในงานวิจัย [4]-[8] ได้ โดยการแทนค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ที่อยู่ในรูปของแรงดันเฟสคำสั่ง (v_u^*, v_v^*, v_w^*) ลงในสมการ (4.1) อย่างไรก็ตามค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของการมอดูเลตแบบ NTV ในงานวิจัย [4]-[8] ยังอยู่ภายใต้ข้อจำกัดที่เมื่อบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) แล้วแรงดันเฟสต้องไม่เปลี่ยนเครื่องหมาย ซึ่งจากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) สำหรับแต่ละพื้นที่ที่เป็นไปได้จะมีค่าอยู่ในช่วง $[-E - \min(v_u^*, v_v^*, v_w^*), E - \max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)]$ และการบวกแรงดันลำดับศูนย์ในมุมมองของการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ อาจทำให้แรงดันเฟสเปลี่ยนหรือไม่เปลี่ยนเครื่องหมายก็ได้ ดังแสดงตัวอย่างในเซกเตอร์ I ต่อไปนี้

1. พื้นที่ 1: เครื่องหมายของแรงดันเฟสคำสั่ง (v_u^*, v_v^*, v_w^*) = (+, -, -)

ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ในพื้นที่ 1 จะไม่เปลี่ยนเครื่องหมายแรงดันเฟส ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 4.2

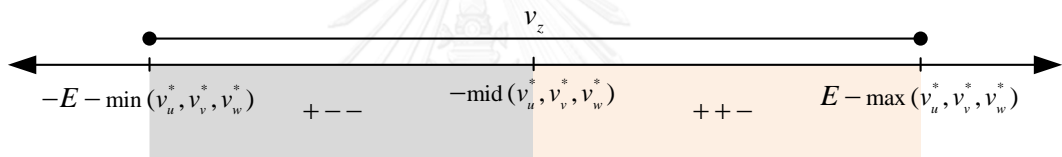
รูปที่ 4.1 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 1



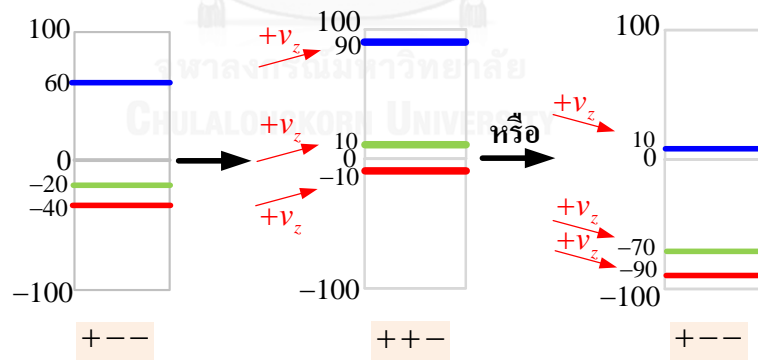
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 1

2. พื้นที่ 2L: เครื่องหมายของแรงดันเฟสคำสั่ง $(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = (+, -, -)$

ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 2L แสดงดังรูปที่รูปที่ 4.3 ซึ่งการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ในพื้นที่ 2L จะเปลี่ยนเครื่องหมายแรงดันเฟสกลางได้ ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 4.4



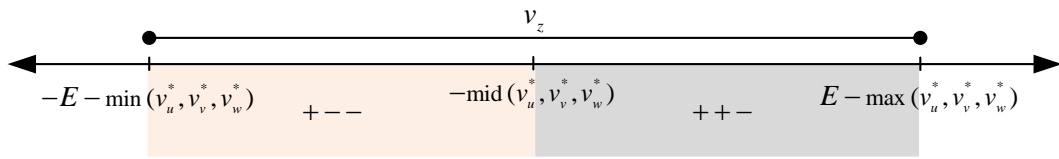
รูปที่ 4.3 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 2L



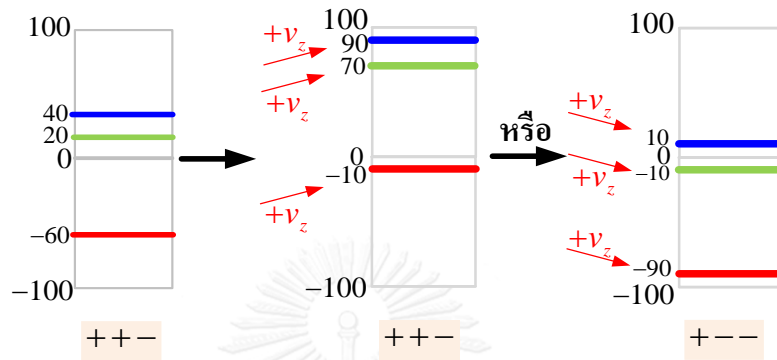
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 2L

3. พื้นที่ 2H: เครื่องหมายของแรงดันเฟสคำสั่ง $(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = (+, +, -)$

ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 2H แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ในพื้นที่ 2H จะเปลี่ยนเครื่องหมายแรงดันเฟสกลางได้ ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 4.6



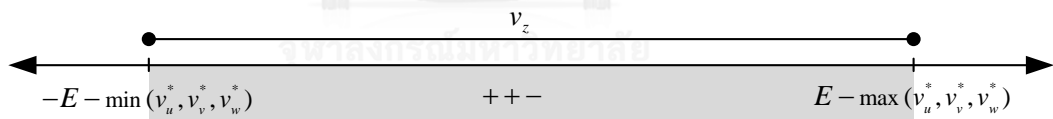
รูปที่ 4.5 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 2H



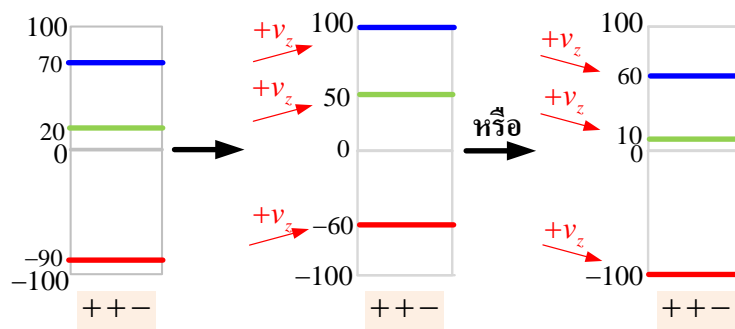
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 2H

4. พื้นที่ 3: เครื่องหมายของแรงดันเฟสคำสั่ง $(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = (+, +, -)$

ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 3 แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ในพื้นที่ 3 จะไม่เปลี่ยนเครื่องหมายแรงดันเฟส ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 4.8



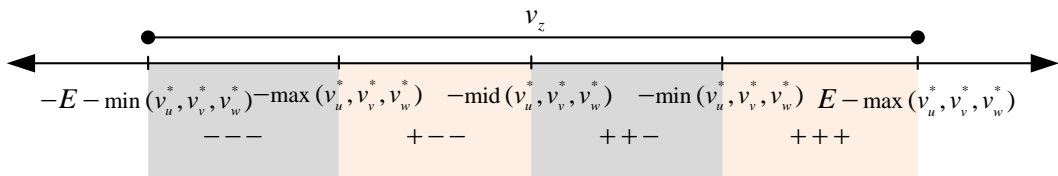
รูปที่ 4.7 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 3



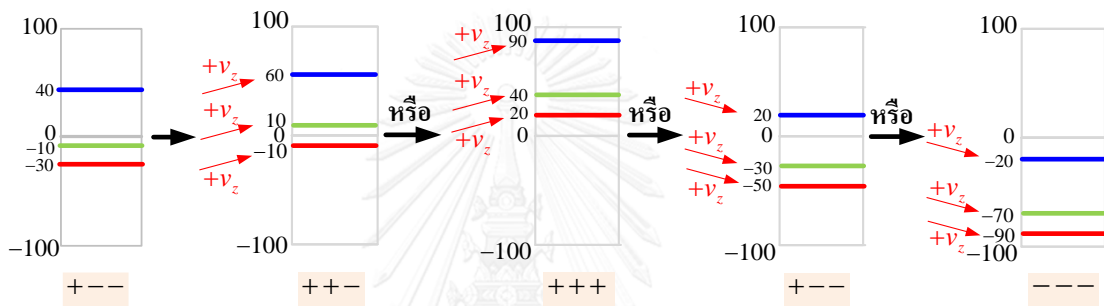
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 3

5. พื้นที่ 4L: เครื่องหมายของแรงดันเฟสคำสั่ง $(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = (+, -, -)$

ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 4L แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ในพื้นที่ 4L จะเปลี่ยนเครื่องหมายแรงดันเฟสได้ทุกเฟส ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 4.10



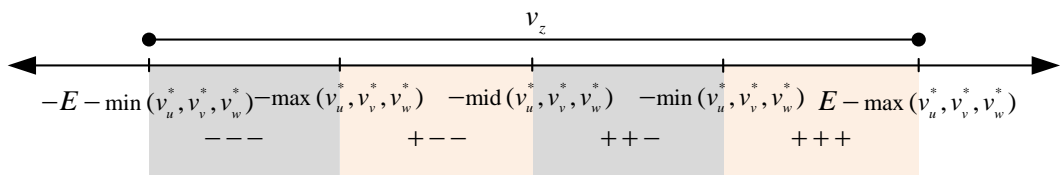
รูปที่ 4.9 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 4L



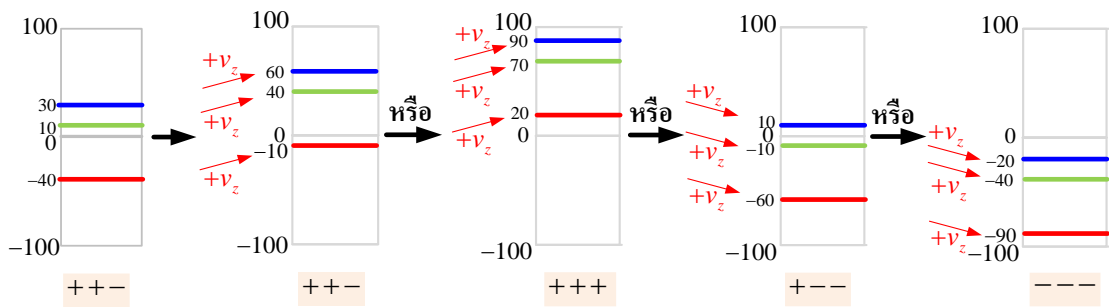
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 4L

6. พื้นที่ 4H: เครื่องหมายของแรงดันเฟสคำสั่ง $(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = (+, +, -)$

ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 4H แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ในพื้นที่ 4H จะเปลี่ยนเครื่องหมายแรงดันเฟสได้ทุกเฟส ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) และเครื่องหมายแรงดันเฟสหลังบวกแรงดันลำดับศูนย์ของพื้นที่ 4H



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) ของพื้นที่ 4H

การที่แรงดันเฟสเปลี่ยนเครื่องหมายหลังบวกด้วยค่าแรงดันลำดับศูนย์แล้ว สะท้อนถึงการใช้รูปแบบสถานะการสวิตช์ที่แตกต่างจากกรณีที่ไม่เปลี่ยนเครื่องหมาย ดังนั้นเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ในพื้นที่สามเหลี่ยมย่อย 2L, 2H, 4L, 4H ของการมอดูเลตแบบ NTV ตามตารางที่ 1.1-ตารางที่ 1.7 ในงานวิจัย [4]-[8] ยังไม่ครอบคลุมเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ทั้งหมดของการมอดูเลตแบบ NTV นั้นเอง งานวิจัยนี้สามารถแสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์สถานะการสวิตช์ในพื้นที่สามเหลี่ยมย่อย 2L, 2H, 4L, 4H ที่เป็นไปได้ทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 4 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์

พื้นที่	1	2L, 2H		3	4L, 4H			
เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่ใช้	onn	onn	oon	oon	onn	oon	ooo	ooo
	pnn	oon	pon	pon	oon	ooo	poo	oon
	pon	pon	poo	ppn	ooo	poo	ppo	onn
	poo	poo	ppo	ppo	poo	ppo	ppp	nnn
เครื่องหมายค่าแรงดันแต่ละเฟส	+ - -	+ - -	+ + -	+ + -	+ - -	+ + -	+ + +	- - -
การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์	3u	3u	3u	3u	3u	3u	3u	3u

ตารางที่ 4.7 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ NTV ที่ใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์

พื้นที่	1		2L, 2H		3		4L, 4H					
เวกเตอร์สถานะการสวิตช์ที่ใช้	poo	onn	ppo	poo	onn	ppo	oon	ppp	nnn	ooo	poo	ooo
	pon	pnn	poo	pon	oon	ppn	pon	ppo	onn	poo	ooo	oon
	pnn	pon	pon	oon	pon	pon	ppn	poo	oon	ppo	oon	onn
เครื่องหมายค่าแรงดันแต่ละเฟส	⊕ - -	+ - ⊖	⊕ + +	+ ⊖ -	+ - ⊖	⊕ + -	+ + ⊕	⊕ + +	- - ⊖	+ + ⊕	+ ⊖ -	⊖ - -
การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์	1n2u	1n2u	1n2u	1n2u	1n2u	1n2u	1n2u	1n2u	1n2u	1n2u	1n2u	1n2u
	3u	3u	3u	3u	3u	3u	3u	3u	3u	3u	3u	3u

หมายเหตุ ; ⊕ หมายถึงแคลมป์บัสบวก, ⊖ หมายถึงแคลมป์บัสลบ, ⊖ หมายถึงแคลมป์บัสศูนย์

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยว 2 เฟสซัวคู่ 1 เฟส

เมื่อใช้สมการที่ (3.51) - (3.53) จะคำนวณได้ว่าแรงดัน $U_p = [u_{jp}]$, $U_n = [u_{jn}]$ และแรงดันลำดับศูนย์ v_z ของการมอดูเลตแบบ NTV² จะเป็นดังสมการที่ (4.2) และ (4.3) ซึ่งสอดคล้องกับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซัวเดี่ยว 2 เฟสซัวคู่ 1 เฟสของงานวิจัย [10]

$$\left. \begin{aligned} u_{jp} &= \frac{v_j^*}{2} + v_{zp} = \frac{v_j^* - \min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)}{2} \\ u_{jn} &= \frac{v_j^*}{2} + v_{zn} = \frac{v_j^* - \max(v_u^*, v_v^*, v_w^*)}{2} \end{aligned} \right\} j = \{u, v, w\} \quad (4.2)$$

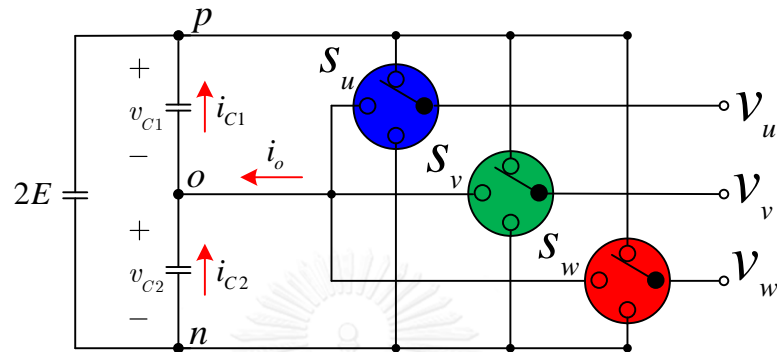
$$v_z = v_{zp} + v_{zn} = \frac{-\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*) - \min(v_u^*, v_v^*, v_w^*)}{2} \quad (4.3)$$

อย่างไรก็ตามอินเวอร์เตอร์สามระดับนั้นมีปัญหาสำคัญคือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุสองตัวอาจไม่สมดุลเนื่องจากการทำงานที่ไม่สมมาตรของวงจรถูกำลั้งและการแกว่งที่ความถี่ต่ำของแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่สามของความถี่หลักมูลของแรงดันต้านออกในภาวะอยู่ตัว ส่งผลให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและตัวเก็บประจุเชื่อมต่อกับบัสบวกและบัสลบมีจุดการทำงานที่อยู่นอกย่านการทำงานที่ปลอดภัยและยังทำให้อุปกรณ์ที่ต่อยุ่บัสบวกและลบได้แรงดันเกินไม่เท่ากันซึ่งส่งผลกระทบต่ออินเวอร์เตอร์ระยะยาว ดังนั้นจำเป็นต้องมีกลไกในการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสให้สมดุล ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

บทที่ 5

กลไกการควบคุมสมดุลแรงดันกึ่งกลางบัส

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกึ่งกลางบัสกับกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัส



รูปที่ 5.1 แสดงทิศทางกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบตริงจุดนิวทรัล

จากรูปที่ 5.1 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$i_o = i_{C1} - i_{C2} \quad (5.1)$$

$$v_{C1} + v_{C2} = 2E \quad (5.2)$$

จาก (5.2) ;
$$\frac{dv_{C1}}{dt} + \frac{dv_{C2}}{dt} = 0 \quad (5.3)$$

$$\frac{dv_{C1}}{dt} = -\frac{dv_{C2}}{dt} \quad (5.4)$$

$$\frac{1}{C} i_{C1} = -\frac{1}{C} i_{C2} \quad (5.5)$$

$$i_{C1} = -i_{C2} \quad (5.6)$$

แทนค่า (5.6) ลงใน (5.1) ;
$$\frac{i_o}{2} = i_{C1} = -i_{C2} \quad (5.7)$$

ดังนั้น
$$\frac{i_o}{2C} = \frac{dv_{C1}}{dt} = -\frac{dv_{C2}}{dt} \quad (5.8)$$

จากความสัมพันธ์ใน (5.8) จะเห็นได้เราสามารถควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสผ่านกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสได้

งานวิจัยสำหรับอินเวอร์สสามระดับที่มีมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV ที่ผ่านมาส่วนใหญ่ จะควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสผ่านกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสโดยการปรับค่า k (สัดส่วนการใช้สถานะการสวิตช์ที่มีเวกเตอร์แรงดันซ้ำซ้อน) โดยมีรูปควบคุม ซึ่งค่อนข้างมีความซับซ้อน [11]-[17] และไม่สามารถใช้ควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสของมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² ได้ ซึ่งงานวิจัยสำหรับควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสของมอดูเลตแบบ NTV² ยังมีอยู่อย่างจำกัด ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดใหม่ในการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสผ่านกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสอย่างง่าย โดยไม่ต้องมีรูปควบคุม และยังสามารถควบคุมได้ทั้งการมอดูเลตแบบ NTV และ NTV² อีกด้วย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

5.2 แนวคิดใหม่ในการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสผ่านกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสโดยไม่ต้องมีรูปควบคุมสำหรับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV และ NTV²

เราสามารถการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสผ่านกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสโดยการเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงบัสบวก (u_{jp}), บัสลบ (u_{jn}) และฟังก์ชันการมอดูเลตบัสบวก (m_{jp}), บัสลบ (m_{jn}) ใหม่ เพื่อให้เกิดกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสในตัว ดังแสดงใน (5.9)- (5.12) โดยสามารถอธิบายได้ด้วยตัวอย่างการคำนวณของการมอดูเลตแบบ NTV และ NTV² ในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ตามลำดับ

$$u'_{jp} = \frac{u_{jp} \times v_{C1}}{E} ; j = \{u, v, w\} \quad (5.9)$$

$$u'_{jn} = \frac{u_{jn} \times v_{C2}}{E} ; j = \{u, v, w\} \quad (5.10)$$

$$m'_{jp} = \begin{cases} \frac{u'_{jp}}{E} & ; \max(u'_{jp}) \leq E \\ \frac{u'_{jp} - [\max(u'_{jp}) - E]}{E} & ; \max(u'_{jp}) > E \end{cases} ; j = \{u, v, w\} \quad (5.11)$$

$$m'_{jn} = \begin{cases} \frac{u'_{jn}}{E} & ; \min(u'_{jn}) \geq -E \\ \frac{u'_{jn} - [\min(u'_{jn}) + E]}{E} & ; \min(u'_{jn}) < -E \end{cases} ; j = \{u, v, w\} \quad (5.12)$$

โดยที่ $E = \frac{v_{dc}}{2} = \frac{v_{C1} + v_{C2}}{2}$

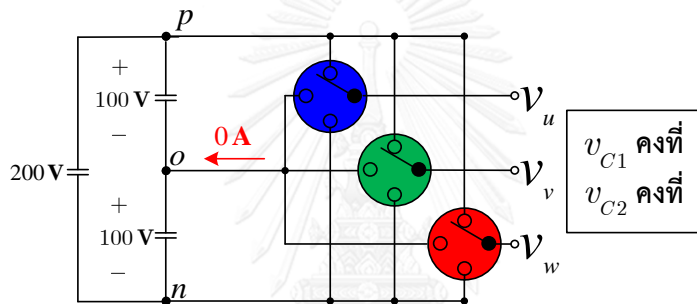
ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างการคำนวณกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ใช้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV แบบใช้ 4 เวกเตอร์ตารางที่ 1.3 [4] ($k = 0.5$) กรณีที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในพื้นที่ 4L หรือ 4H ของแต่ละเซกเตอร์

พิจารณากระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ใช้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV แบบใช้ 4 เวกเตอร์ตารางที่ 1.3 [4] ($k = 0.5$) กรณีที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในพื้นที่ 4L หรือ 4H	
พื้นที่ 4L ของเซกเตอร์คี่ (เซกเตอร์ I, III, V) หรือ พื้นที่ 4H ของเซกเตอร์คู่ (เซกเตอร์ II, IV, VI)	พื้นที่ 4L ของเซกเตอร์คู่ (เซกเตอร์ II, IV, VI) หรือ พื้นที่ 4H ของเซกเตอร์คี่ (เซกเตอร์ I, III, V)
<p>สมมติให้ $v_{dc} = 200 \text{ V} \Rightarrow E = 100 \text{ V}$</p> <p>$\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = 40 \text{ V} \quad ; \quad 4 \text{ A}$</p> <p>$\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = -10 \text{ V} \quad ; \quad -1 \text{ A}$</p> <p>$\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = -30 \text{ V} \quad ; \quad -3 \text{ A}$</p> <p>คำนวณโดยใช้แนวคิดใหม่ที่น่าเสนอใน บทที่ 3 จะได้</p> <p>$\max(u_{up}, u_{vp}, u_{wp}) = 25 \text{ V} \quad ; \quad (5/3) \text{ A}$</p> <p>$\text{mid}(u_{up}, u_{vp}, u_{wp}) = 0 \text{ V} \quad ; \quad (-5/6) \text{ A}$</p> <p>$\min(u_{up}, u_{vp}, u_{wp}) = 0 \text{ V} \quad ; \quad (-5/6) \text{ A}$</p> <p>$\max(u_{un}, u_{vn}, u_{wn}) = 0 \text{ V} \quad ; \quad (7/3) \text{ A}$</p> <p>$\text{mid}(u_{un}, u_{vn}, u_{wn}) = -25 \text{ V} \quad ; \quad (-1/6) \text{ A}$</p> <p>$\min(u_{un}, u_{vn}, u_{wn}) = -45 \text{ V} \quad ; \quad (-13/6) \text{ A}$</p>	<p>สมมติให้ $v_{dc} = 200 \text{ V} \Rightarrow E = 100 \text{ V}$</p> <p>$\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = 30 \text{ V} \quad ; \quad 3 \text{ A}$</p> <p>$\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = 10 \text{ V} \quad ; \quad 1 \text{ A}$</p> <p>$\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = -40 \text{ V} \quad ; \quad -4 \text{ A}$</p> <p>คำนวณโดยใช้แนวคิดใหม่ที่น่าเสนอใน บทที่ 3 จะได้</p> <p>$\max(u_{up}, u_{vp}, u_{wp}) = 45 \text{ V} \quad ; \quad (13/6) \text{ A}$</p> <p>$\text{mid}(u_{up}, u_{vp}, u_{wp}) = 25 \text{ V} \quad ; \quad (1/6) \text{ A}$</p> <p>$\min(u_{up}, u_{vp}, u_{wp}) = 0 \text{ V} \quad ; \quad (-7/3) \text{ A}$</p> <p>$\max(u_{un}, u_{vn}, u_{wn}) = 0 \text{ V} \quad ; \quad (5/6) \text{ A}$</p> <p>$\text{mid}(u_{un}, u_{vn}, u_{wn}) = 0 \text{ V} \quad ; \quad (5/6) \text{ A}$</p> <p>$\min(u_{un}, u_{vn}, u_{wn}) = -25 \text{ V} \quad ; \quad (-5/3) \text{ A}$</p>
<p>กรณีที่ 1 ; แรงดันบัสสมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัส</p> <p>เมื่อ $m_{ip} = \frac{u_{ip}}{v_{C1}}$ และ $m_{in} = \frac{u_{in}}{v_{C2}}$</p> <p>จะได้</p>	<p>กรณีที่ 1 ; แรงดันบัสสมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัส</p> <p>เมื่อ $m_{ip} = \frac{u_{ip}}{v_{C1}}$ และ $m_{in} = \frac{u_{in}}{v_{C2}}$</p> <p>จะได้</p>

$$i_0 = \frac{\left(\frac{5}{3} \times 75\right) + \left(\frac{-5}{6} \times 100\right) + \left(\frac{-5}{6} \times 100\right)}{100} + \frac{\left(\frac{7}{3} \times 100\right) + \left(\frac{-1}{6} \times 75\right) + \left(\frac{-13}{6} \times 55\right)}{100} = 0.6 \text{ A}$$

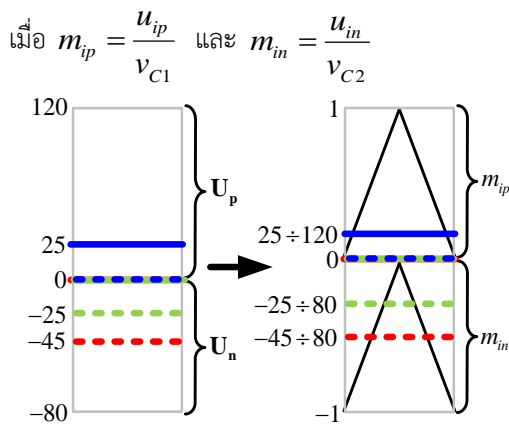
$$i_0 = \frac{\left(\frac{13}{6} \times 55\right) + \left(\frac{1}{6} \times 75\right) + \left(\frac{-7}{3} \times 100\right)}{100} + \frac{\left(\frac{5}{6} \times 100\right) + \left(\frac{5}{6} \times 100\right) + \left(\frac{-5}{3} \times 75\right)}{100} = -0.6 \text{ A}$$

กรณีนี้ที่ 1 เมื่อแรงดันบั๊สสมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบั๊ส เมื่อ $k m_{ip} = (u_{ip} / v_{C1})$ และ $k m_{in} = (u_{in} / v_{C2})$ ค่ากระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบั๊สเฉลี่ยต่อคาบ (\bar{i}_0) ของพื้นที่ 4L หรือ 4H มีค่าดังนี้ $\bar{i}_0 = 3 \times (i_{0(\text{sector I,III,V})} + i_{0(\text{sector II,IV,VI})}) = 3 \times (0.6 - 0.6) = 0 \text{ A}$



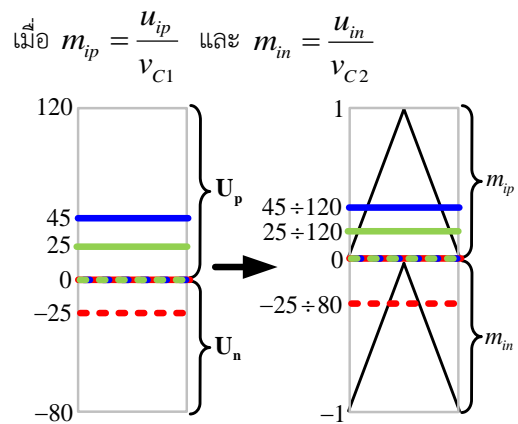
ดังนั้นจากความสัมพันธ์ใน (5.8) จะไม่เกิดการชาร์จหรือดิสชาร์จตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ส่งผลให้แรงดันกึ่งกลางบั๊สสมดุลต่อไป

กรณีนี้ที่ 2 ; แรงดันไม่บั๊สสมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบั๊ส



จะได้

กรณีนี้ที่ 2 ; แรงดันไม่บั๊สสมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบั๊ส



จะได้

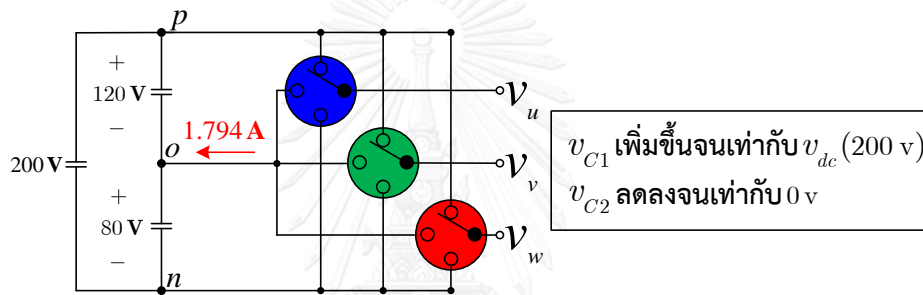
$$i_0 = \frac{\left(\frac{5}{3} \times 95\right) + \left(\frac{-5}{6} \times 120\right) + \left(\frac{-5}{6} \times 120\right)}{120} + \frac{\left(\frac{7}{3} \times 80\right) + \left(\frac{-1}{6} \times 55\right) + \left(\frac{-13}{6} \times 35\right)}{80}$$

$$= 0.924 \text{ A}$$

$$i_0 = \frac{\left(\frac{13}{6} \times 75\right) + \left(\frac{1}{6} \times 95\right) + \left(\frac{-7}{3} \times 120\right)}{120} + \frac{\left(\frac{5}{6} \times 80\right) + \left(\frac{5}{6} \times 80\right) + \left(\frac{-5}{3} \times 55\right)}{80}$$

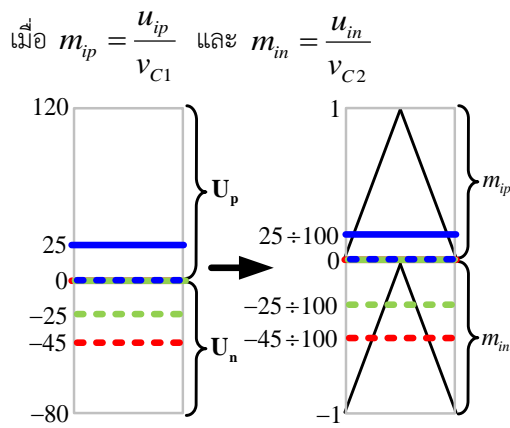
$$= -0.326 \text{ A}$$

กรณีนี้ที่ 2 เมื่อแรงดันบัสไม่สมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัส เมื่อ $m_{ip} = (u_{ip} / v_{C1})$ และ $m_{in} = (u_{in} / v_{C2})$ ค่ากระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสเฉลี่ยต่อคาบ (\bar{i}_0) ของพื้นที่ 4L หรือ 4H มีค่าดังนี้ $\bar{i}_0 = 3 \times (i_{0(\text{sector I,III,V})} + i_{0(\text{sector II,IV,VI})}) = 3 \times (0.924 - 0.326) = 1.794 \text{ A}$



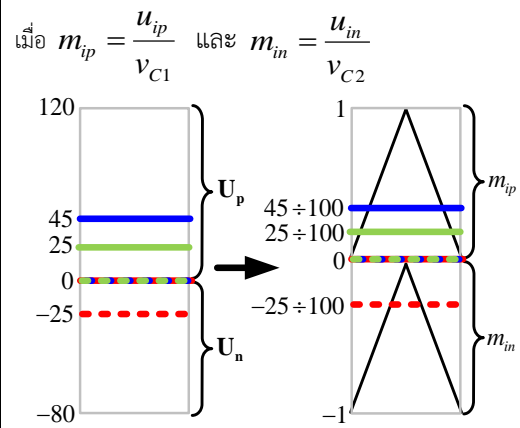
ดังนั้นจากความสัมพันธ์ใน (5.8) จะเกิดการชาร์จตัวเก็บประจุ C1 และดิสชาร์จตัวเก็บประจุ C2 ส่งผลให้แรงดันกึ่งกลางบัสไม่สามารถกลับมาสมดุลได้ โดยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C1 จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายไฟตรง และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C2 จะลดลงจนมีค่าเท่ากับ 0 V

กรณีนี้ที่ 3 ; แรงดันไม่บัสสมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัส



จะได้

กรณีนี้ที่ 3 ; แรงดันไม่บัสสมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัส

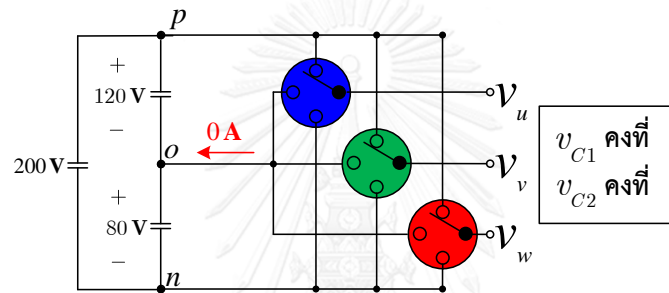


จะได้

$$i_0 = \frac{\left(\frac{5}{3} \times 75\right) + \left(\frac{-5}{6} \times 100\right) + \left(\frac{-5}{6} \times 100\right)}{100} + \frac{\left(\frac{7}{3} \times 100\right) + \left(\frac{-1}{6} \times 75\right) + \left(\frac{-13}{6} \times 55\right)}{100} = 0.6 \text{ A}$$

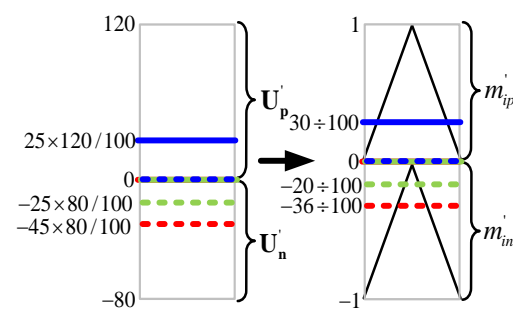
$$i_0 = \frac{\left(\frac{13}{6} \times 55\right) + \left(\frac{1}{6} \times 75\right) + \left(\frac{-7}{3} \times 100\right)}{100} + \frac{\left(\frac{5}{6} \times 100\right) + \left(\frac{5}{6} \times 100\right) + \left(\frac{-5}{3} \times 75\right)}{100} = -0.6 \text{ A}$$

กรณีที่ 3 เมื่อแรงดันบัสไม่สมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัส เมื่อ $m_{ip} = (u_{ip} / E)$ และ $m_{in} = (u_{in} / E)$ ค่ากระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสเฉลี่ยต่อคาบ (\bar{i}_0) ของพื้นที่ 4L หรือ 4H มีค่าดังนี้ $\bar{i}_0 = 3 \times (i_{0(\text{sector I, III, V})} + i_{0(\text{sector II, IV, VI})}) = 3 \times (0.6 - 0.6) = 0 \text{ A}$



ดังนั้นจากความสัมพันธ์ใน (5.8) จะไม่เกิดการชาร์จหรือดิสชาร์จตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ส่งผลให้แรงดันกึ่งกลางบัสไม่สมดุล และไม่สามารถกลับมาสมดุลได้ โดยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C1 และ C2 จะคงที่

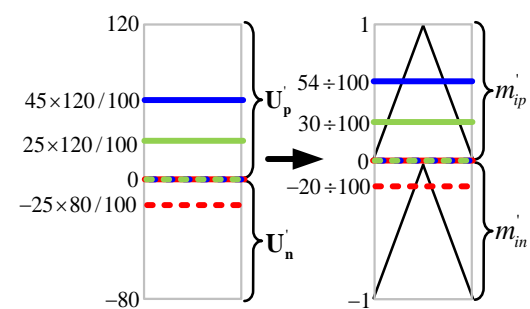
กรณีที่ 4 ; แรงดันไม่บัสสมดุลโดยมีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสแนวคิดใหม่ที่น่าเสนอในสมการ (5.9)- (5.12)



จะได้

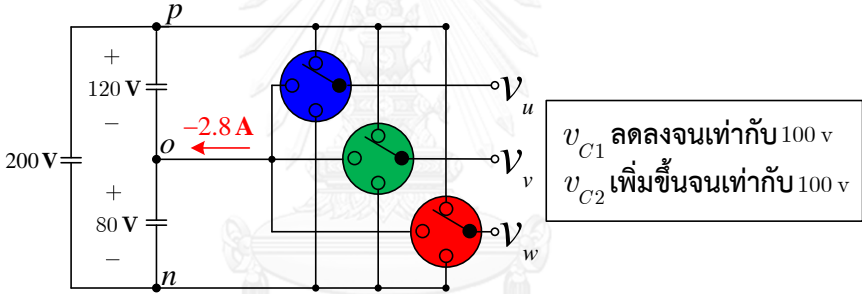
$$\begin{aligned} \max(u'_{up}, u'_{vp}, u'_{wp}) &= 30 \text{ v} \quad ; \quad 2 \text{ A} \\ \text{mid}(u'_{up}, u'_{vp}, u'_{wp}) &= 0 \text{ v} \quad ; \quad -1 \text{ A} \\ \min(u'_{up}, u'_{vp}, u'_{wp}) &= 0 \text{ v} \quad ; \quad -1 \text{ A} \end{aligned}$$

กรณีที่ 4 ; แรงดันไม่บัสสมดุลโดยมีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสแนวคิดใหม่ที่น่าเสนอในสมการ (5.9) - (5.12)



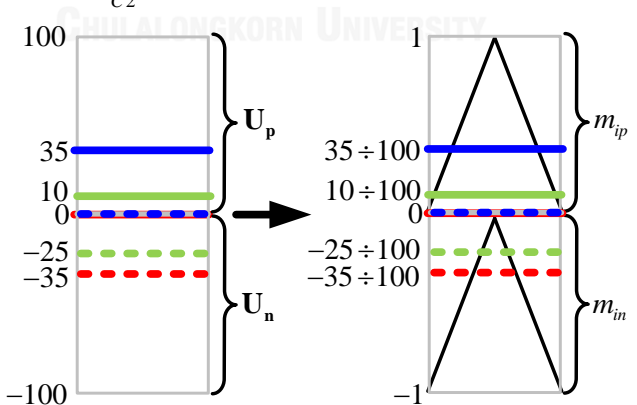
จะได้

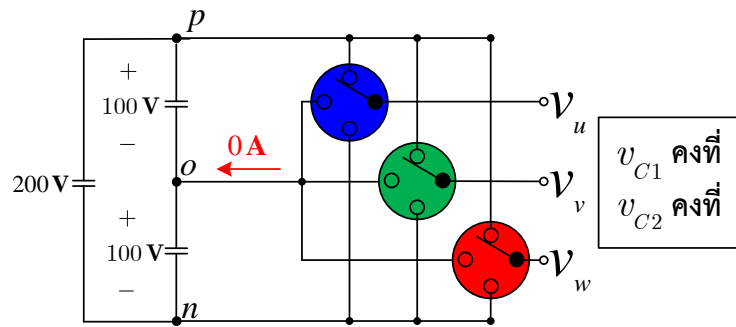
$$\begin{aligned} \max(u'_{up}, u'_{vp}, u'_{wp}) &= 54 \text{ v} \quad ; \quad (13/5) \text{ A} \\ \text{mid}(u'_{up}, u'_{vp}, u'_{wp}) &= 30 \text{ v} \quad ; \quad (1/5) \text{ A} \\ \min(u'_{up}, u'_{vp}, u'_{wp}) &= 0 \text{ v} \quad ; \quad (-14/5) \text{ A} \end{aligned}$$

$\begin{aligned} \max(u'_{un}, u'_{vn}, u'_{wn}) &= 0 \text{ v} \quad ; (28/15) \text{ A} \\ \text{mid}(u'_{un}, u'_{vn}, u'_{wn}) &= -20 \text{ v} \quad ; (-2/15) \text{ A} \\ \min(u'_{un}, u'_{vn}, u'_{wn}) &= -36 \text{ v} \quad ; (-26/15) \text{ A} \\ i_0 &= \frac{(2 \times 70) + (-1 \times 100) + (-1 \times 100)}{100} + \\ &\quad \frac{\left(\frac{28}{15} \times 100\right) + \left(\frac{2}{15} \times 80\right) + \left(\frac{-26}{15} \times 64\right)}{100} \\ &= 0.264 \text{ A} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \max(u'_{un}, u'_{vn}, u'_{wn}) &= 0 \text{ v} \quad ; (2/3) \text{ A} \\ \text{mid}(u'_{un}, u'_{vn}, u'_{wn}) &= 0 \text{ v} \quad ; (2/3) \text{ A} \\ \min(u'_{un}, u'_{vn}, u'_{wn}) &= -20 \text{ v} \quad ; (-4/3) \text{ A} \\ i_0 &= \frac{\left(\frac{13}{5} \times 46\right) + \left(\frac{1}{5} \times 70\right) + \left(\frac{-14}{5} \times 100\right)}{100} \\ &\quad + \frac{\left(\frac{2}{3} \times 100\right) + \left(\frac{2}{3} \times 100\right) + \left(\frac{-4}{3} \times 80\right)}{100} \\ &= -1.197 \text{ A} \end{aligned}$
<p>กรณีี่ 4 แรงดันไม่บัสมสมดุลโดยมีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสนวัตกรรมที่นำเสนอในสมการ (5.9)- (5.12) ค่ากระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสเฉลี่ยต่อคาบ (\bar{i}_0) ของพื้นที่ 4L หรือ 4H มีค่าดังนี้</p> $\bar{i}_0 = 3 * (i_{0(\text{sector I,III,V})} + i_{0(\text{sector II,IV,VI})}) = 3 * (0.264 - 1.197) = -2.8 \text{ A}$  <p>ดังนั้นจากความสัมพันธ์ใน (5.8) จะเกิดการดิสชาร์จตัวเก็บประจุ C1 และชาร์จตัวเก็บประจุ C2 ส่งผลให้แรงดันกึ่งกลางบัสนสามารถกลับมาสมดุลได้ โดยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C1 จะลดลงจนมีค่าเท่ากับ 100 V และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C2 จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 100 V</p>	

สำหรับกลไกการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสนของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ NTV ในส่วนของพื้นที่อื่น(1, 2L, 2H, 3) และการมอดูเลตแบบ NTV รูปแบบอื่น[6]-[8] มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการคำนวณในตารางที่ 5.1 นอกจากนี้กลไกการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสดังกล่าว ยังสามารถใช้ควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสนของการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วเดียว 3 เฟสได้อีกด้วย

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างการคำนวณกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ใช้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² ตารางที่ 1.8 [9][10] กรณีที่เวกเตอร์แรงดันคำสั่งอยู่ในพื้นที่ 1 ของทุกเซกเตอร์

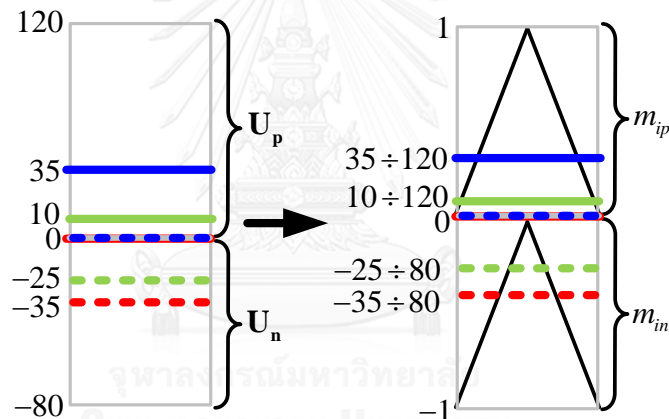
พิจารณากระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ใช้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV ² ตารางที่ 1.8 [9][10] กรณีที่เวกเตอร์แรงดันอยู่ในพื้นที่ 1 ของทุกเซกเตอร์
<p>สมมติให้ $v_{dc} = 200 \text{ V} \Rightarrow E = 100 \text{ V}$</p> <p>$\max(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = 40 \text{ V} \quad ; \quad 4 \text{ A}$</p> <p>$\text{mid}(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = -10 \text{ V} \quad ; \quad -1 \text{ A}$</p> <p>$\min(v_u^*, v_v^*, v_w^*) = -30 \text{ V} \quad ; \quad -3 \text{ A}$</p> <p>คำนวณโดยใช้แนวคิดใหม่ที่นำเสนอใน บทที่ 3 จะได้</p> <p>$\max(u_{up}, u_{vp}, u_{wp}) = 35 \text{ V} \quad ; \quad 2 \text{ A}$</p> <p>$\text{mid}(u_{up}, u_{vp}, u_{wp}) = 10 \text{ V} \quad ; \quad -0.5 \text{ A}$</p> <p>$\min(u_{up}, u_{vp}, u_{wp}) = 0 \text{ V} \quad ; \quad -1.5 \text{ A}$</p> <p>$\max(u_{un}, u_{vn}, u_{wn}) = 0 \text{ V} \quad ; \quad 2 \text{ A}$</p> <p>$\text{mid}(u_{un}, u_{vn}, u_{wn}) = -25 \text{ V} \quad ; \quad -0.5 \text{ A}$</p> <p>$\min(u_{un}, u_{vn}, u_{wn}) = -35 \text{ V} \quad ; \quad -1.5 \text{ A}$</p>
<p>กรณีที่ 1 ; แรงดันบัสสมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัส</p> <p>เมื่อ $m_{ip} = \frac{u_{ip}}{v_{C1}}$ และ $m_{in} = \frac{u_{in}}{v_{C2}}$</p>  <p>จะได้</p> $i_0 = \frac{(2 \times 65) + (-0.5 \times 90) + (-1.5 \times 100)}{100} + \frac{(2 \times 100) + (-0.5 \times 75) + (-1.5 \times 65)}{100} = 0 \text{ A}$ <p>ค่ากระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสเฉลี่ยต่อคาบ (\bar{i}_0) ของพื้นที่ 1 มีค่า ดังนี้ $\bar{i}_0 = 6 \times i_0 = 0 \text{ A}$</p>



ดังนั้นจากความสัมพันธ์ใน (5.8) จะไม่เกิดการชาร์จหรือดิสชาร์จตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ส่งผลให้แรงดันกึ่งกลางบัสดังต่อไปนี้

กรณีที่ 2 ; แรงดันไม่บัสดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสด

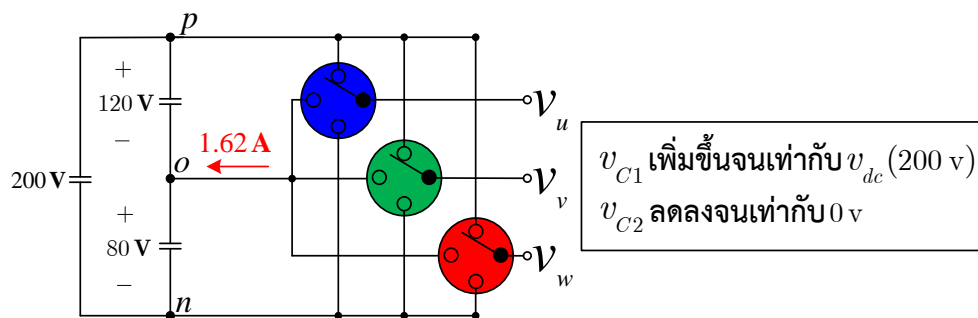
เมื่อ $m_{ip} = \frac{u_{ip}}{v_{C1}}$ และ $m_{in} = \frac{u_{in}}{v_{C2}}$



จะได้

$$i_0 = \frac{(2 \times 85) + (-0.5 \times 110) + (-1.5 \times 120)}{120} + \frac{(2 \times 80) + (-0.5 \times 55) + (-1.5 \times 45)}{80} = 0.27 \text{ A}$$

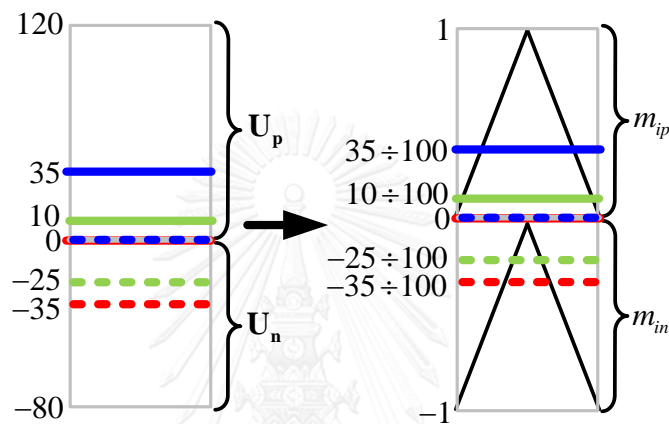
ค่ากระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสดึงต่อคาบ (i_0) ของพื้นที่ 1 มีค่า ดังนี้ $i_0 = 6 \times i_0 = 1.62 \text{ A}$



ดังนั้นจากความสัมพันธ์ใน (5.8) จะเกิดการชาร์จตัวเก็บประจุ C1 และดิสชาร์จตัวเก็บประจุ C2 ส่งผลให้แรงดันกึ่งกลางบัสไม่สามารถกลับมาสมดุลได้ โดยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C1 จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่ายไฟตรง และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C2 จะลดลงจนมีค่าเท่ากับ 0 V

กรณีที่ 3 ; แรงดันไม่บัลสมดุลและไม่มีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัส

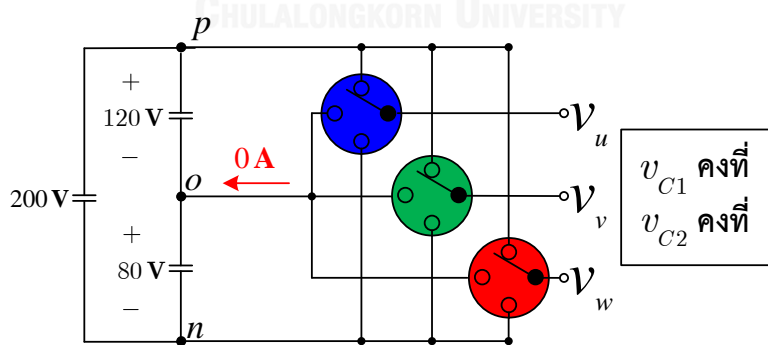
เมื่อ $m_p = \frac{u_{ip}}{E}$ และ $m_n = \frac{u_{in}}{E}$



จะได้

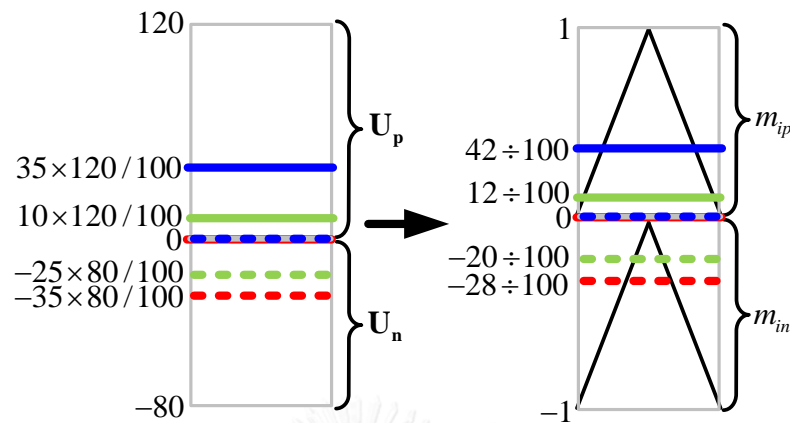
$$i_0 = \frac{(2 \times 65) + (-0.5 \times 90) + (-1.5 \times 100)}{100} + \frac{(2 \times 100) + (-0.5 \times 75) + (-1.5 \times 65)}{100} = 0 \text{ A}$$

ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสเฉลี่ยต่อคาบ (\bar{i}_0) ของพื้นที่ 1 มีค่า ดังนี้ $\bar{i}_0 = 6 \times i_0 = 0 \text{ A}$



ดังนั้นจากความสัมพันธ์ใน (5.8) จะไม่เกิดการชาร์จหรือดิสชาร์จตัวเก็บประจุ C1 และ C2 ส่งผลให้แรงดันกึ่งกลางบัสไม่สมดุล และไม่สามารถกลับมาสมดุลได้ โดยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C1 และ C2 จะคงที่

กรณีนี้ที่ 4 ; แรงดันไม่บัสมวลโดยมีกระบวนการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสแนวคิดใหม่ที่น่าเสนอในสมการ (5.9)-(5.12)



จะได้

$$\max(u'_{up}, u'_{vp}, u'_{wp}) = 42 \text{ v} ; (12/5) \text{ A}$$

$$\text{mid}(u'_{up}, u'_{vp}, u'_{wp}) = 12 \text{ v} ; (-3/5) \text{ A}$$

$$\min(u'_{up}, u'_{vp}, u'_{wp}) = 0 \text{ v} ; (-9/5) \text{ A}$$

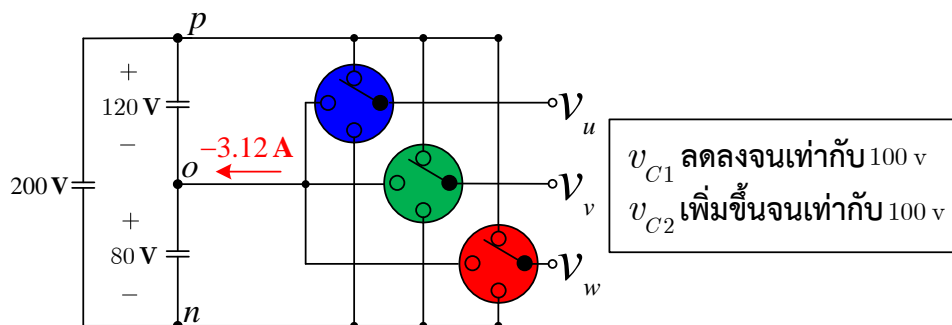
$$\max(u'_{un}, u'_{vn}, u'_{wn}) = 0 \text{ v} ; (8/5) \text{ A}$$

$$\text{mid}(u'_{un}, u'_{vn}, u'_{wn}) = -20 \text{ v} ; (-2/5) \text{ A}$$

$$\min(u'_{un}, u'_{vn}, u'_{wn}) = -28 \text{ v} ; (-6/5) \text{ A}$$

$$i_0 = \frac{\left(\frac{12}{5} \times 58\right) + \left(\frac{-3}{5} \times 88\right) + \left(\frac{-9}{5} \times 100\right)}{100} + \frac{\left(\frac{8}{5} \times 100\right) + \left(\frac{-2}{5} \times 80\right) + \left(\frac{-6}{5} \times 72\right)}{100} = -0.52 \text{ A}$$

ค่ากระแสฉนวนที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสเฉลี่ยต่อคาบ (\bar{i}_0) ของพื้นที่ 1 มีค่า ดังนี้ $\bar{i}_0 = 6 \times i_0 = -3.12 \text{ A}$



ดังนั้นจากความสัมพันธ์ใน (5.8) จะเกิดการดิซชาร์จตัวเก็บประจุ C_1 และชาร์จตัวเก็บประจุ C_2 ส่งผลให้แรงดันกึ่งกลางบัสสามารถกลับมาสมดุลได้ โดยแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 จะลดลงจนมีค่าเท่ากับ 100 V และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_2 จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 100 V

สำหรับกลไกการควบคุมแรงดันบั๊สของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² ในส่วนของพื้นที่อื่น (2, 3, 4, 5) มีลักษณะเดียวกันกับการคำนวณในตารางที่ 5.2 นอกจากนี้กลไกการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบั๊สดังกล่าว ยังสามารถใช้ควบคุมแรงดันกึ่งกลางบั๊สของการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์แบบซั้วเดี่ยว 2 เฟสซั้วคู่ 1 เฟสได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตามแนวคิดใหม่ในการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบั๊สผ่านกระแสนิวทรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบั๊สที่นำเสนอ นั้นไม่สามารถควบคุมสมดุลของแรงดันกึ่งบั๊สได้ตลอดเวลา ยังมีการแกว่งของแรงดันกึ่งกลางบั๊สอยู่ เพียงแต่สามารถควบคุมแรงดันกึ่งกลางบั๊สเฉลี่ยต่อคาบให้สมดุล เพื่อให้อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานในย่านที่ปลอดภัยได้



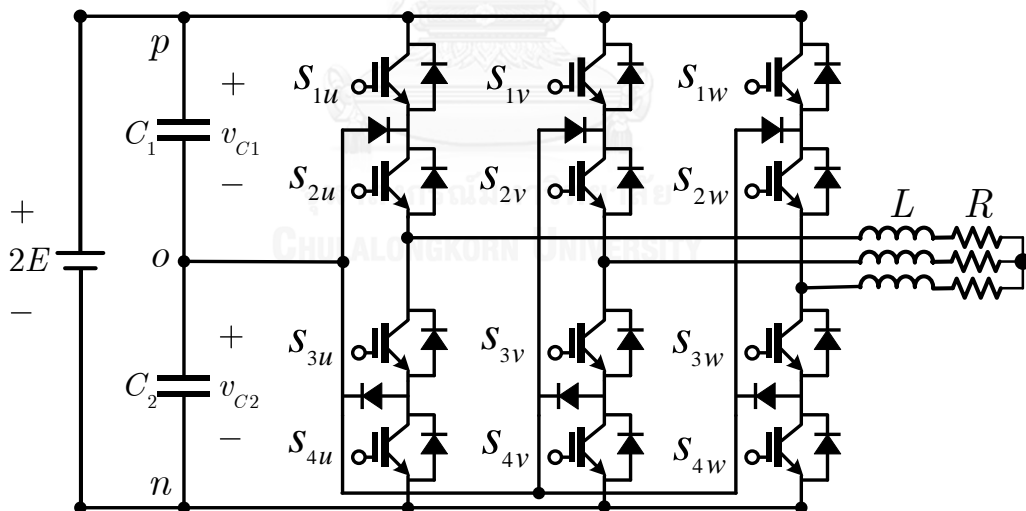
บทที่ 6

ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองการทำงาน

6.1 การจำลองการทำงาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวการทดสอบความถูกต้องของทฤษฎีที่นำเสนอ ทำโดยการจำลองการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ทั้งแบบ NTV และ NTV² ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และคำนวณค่าแรงดันอ้างอิงบัสบวกและบัสลบที่เกิดจากการมอดูเลตเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ ในการจำลองนั้นจะกำหนดให้แรงดันคำสั่งเป็นแรงดันสามเฟสสมดุลที่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังสมการที่ (6.1) และอินเวอร์เตอร์สามระดับจะมีโหนดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทานดังแสดงในรูปที่ 6.1 โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองดังตารางที่ 6.1

$$\begin{aligned} v_u^* &= V_{peak} \cos(2\pi f \cdot t) \\ v_v^* &= V_{peak} \cos(2\pi f \cdot t - 2\pi / 3) \\ v_w^* &= V_{peak} \cos(2\pi f \cdot t + 2\pi / 3) \end{aligned} \quad (6.1)$$



รูปที่ 6.1 วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับกับโหนดตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของการจำลองและทดลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

แหล่งจ่ายไฟตรง	$2E$	540 V
แรงดันคำสั่ง	V_{peak}	130 V และ 230 V
ตัวเก็บประจุ	C_1, C_2	560 μ F
ความถี่ขาออกของคอนเวอร์เตอร์	f	50 Hz
ความถี่การสวิตช์	f_s	4 kHz
โหลด	L, R	68.56 mH, 52 Ω

6.1.1 ผลการจำลองการทำงาน

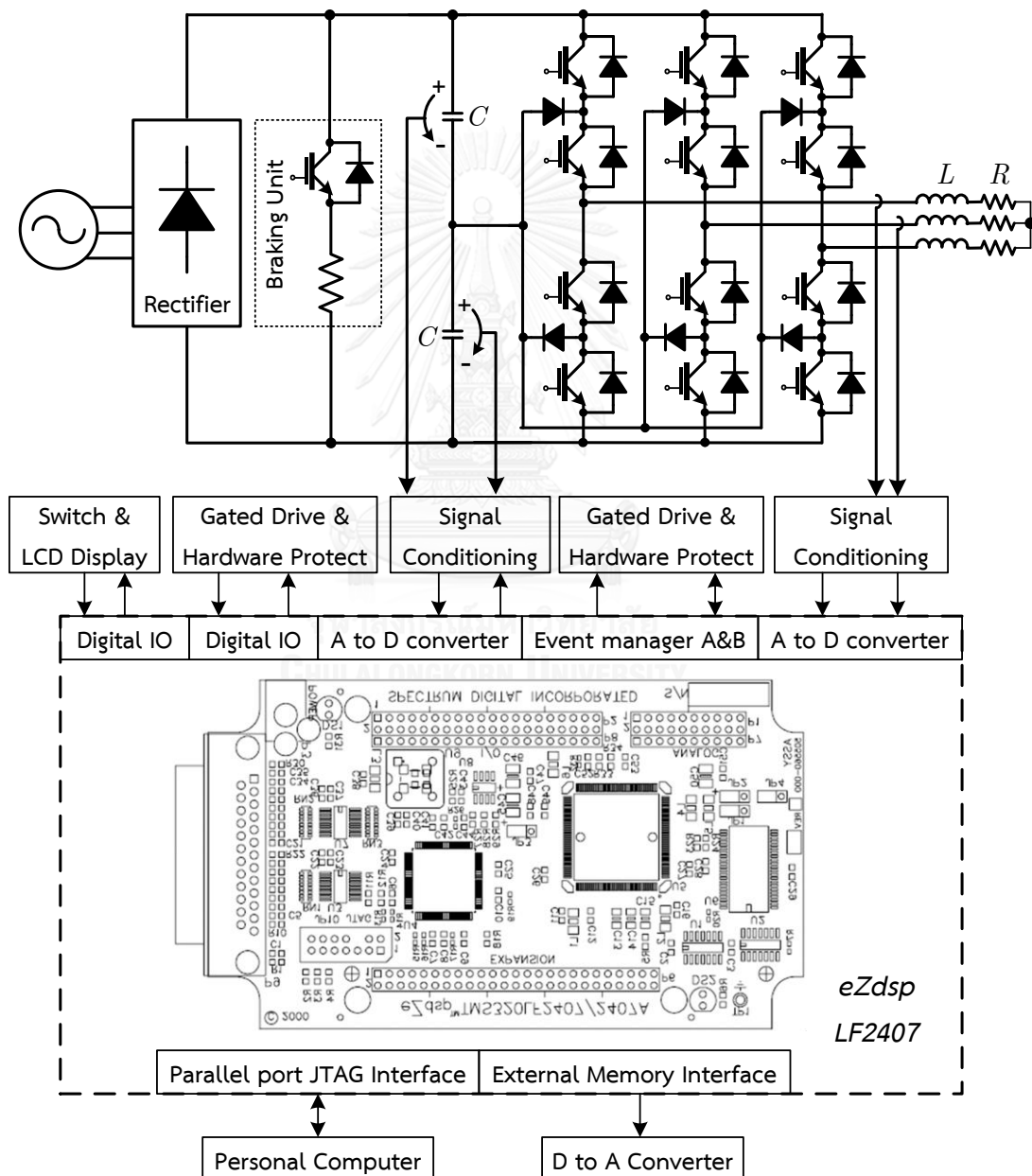
รูป (ก) ของรูปที่ 6.3 - รูปที่ 6.16 เป็นผลการจำลองการมอดูเลตของสเปซเวกเตอร์เชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV ทั้งแบบใช้ 4 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์[4][5] และแบบใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์[6]-[8] เปรียบเทียบกับ รูป (ค) ของรูปที่ 6.3 - รูปที่ 6.16 เป็นผลการจำลองการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ โดยค่าของแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) ในการจำลองจะมี 2 ค่าคือ 1). 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ซึ่งจะจำลองอ้างอิงงานวิจัย [4]-[8] และ 2). 230 V (พื้นที่ 1, 2L, 2H, 3) ซึ่งจะจำลองอ้างอิงงานวิจัย [4][5][6][8] ยกเว้นงานวิจัย [7] เนื่องจากไม่ได้กล่าวถึงการมอดูเลตกรณีที่แรงดันคำสั่ง (V_{peak}) อยู่ในพื้นที่ 1, 2L, 2H และ 3 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นปริมาณต่างๆ ($v_u^*, v_w, v_{uo}, i_u, i_o, \Delta v$) มีค่าสมมูลกันจริงตามทฤษฎีที่นำเสนอ เมื่อพิจารณา ณ ขณะหนึ่งๆ จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันอ้างอิง U_p และ U_n ของเฟส u จะมีลักษณะการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วคราว 3 เฟสจริง และแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) มีค่าตรงตามที่คำนวณทางทฤษฎีจากสมการที่ (3.51)-(3.53)

รูป (ก) ของรูปที่ 6.17 - รูปที่ 6.18 เป็นผลการจำลองการมอดูเลตของสเปซเวกเตอร์เชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² [9] เปรียบเทียบกับ รูป (ค) ของรูปที่ 6.17 - รูปที่ 6.18 เป็นผลการจำลองการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ โดยค่าของแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) ในการจำลองจะมี 2 ค่าคือ 1). 130 V (พื้นที่ 1) และ 2). 230 V (พื้นที่ 3, 4, 5) จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นปริมาณต่างๆ ($v_u^*, v_w, v_{uo}, i_u, i_o, \Delta v$) มีค่าสมมูลกันจริงตามทฤษฎีที่นำเสนอ เมื่อพิจารณา ณ ขณะหนึ่งๆ จะเห็นว่ารูปคลื่นแรงดันอ้างอิง U_p และ U_n ของเฟส u จะมีลักษณะการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วคราว 2 เฟสชั่วคราว 1 เฟสจริง และแรงดันลำดับศูนย์ (v_z) มีค่าตรงตามที่คำนวณทางทฤษฎีจากสมการที่ (3.51)-(3.53)

นอกจากนี้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่าแนวคิดใหม่ในการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสเฉลี่ยต่อคาบให้สมมูลที่นำเสนอ นั้นสามารถทำได้จริงตามทฤษฎี

6.2 การทดลองการทำงานกับระบบจริง

ในการทดลองกับอินเวอร์เตอร์สามระดับจริง ได้เลือกตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320LF2407 มาใช้ในการควบคุมการมอดูเลตอินเวอร์เตอร์สามระดับ และได้เลือก IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) เป็นสวิตช์กำลัง โครงสร้างของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นดังรูปที่ 6.2 โดยมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นพารามิเตอร์เดียวกับการจำลอง ที่กล่าวมาแล้วในตารางที่ 6.1



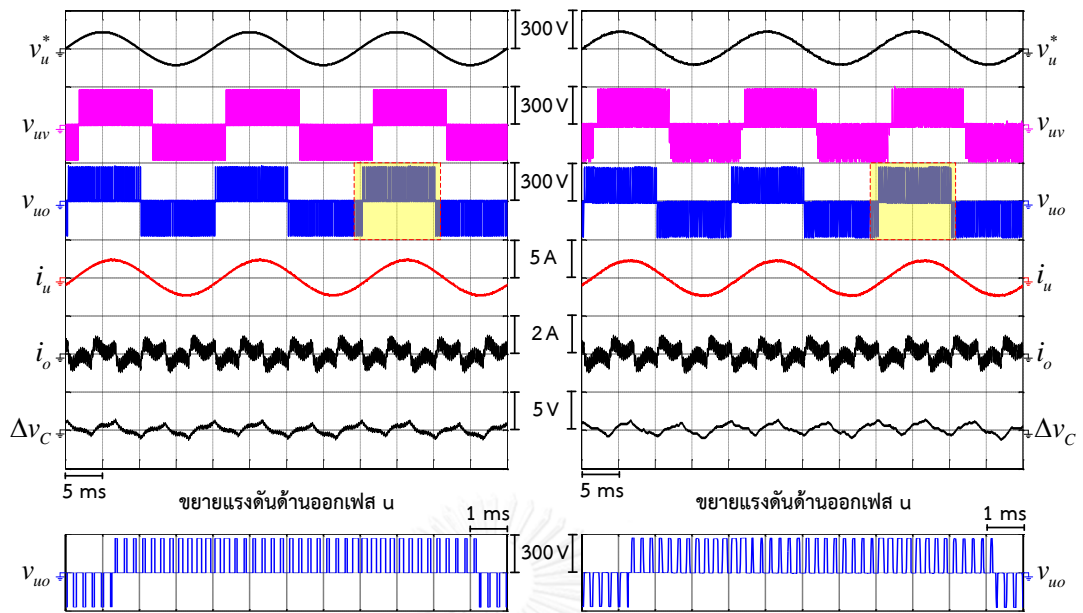
รูปที่ 6.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลอง

6.2.1 ผลการทดลองการทำงาน

รูป (ข) ของรูปที่ 6.3 - รูปที่ 6.16 เป็นผลการทดลองการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์เชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV ทั้งแบบใช้ 4 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์[4][5] และแบบใช้ 3 เวกเตอร์สถานะการสวิตช์[6]-[8] เปรียบเทียบกับ รูป (ง) ของรูปที่ 6.3 - รูปที่ 6.16 เป็นผลการทดลองการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ โดยค่าของแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) ในการทดลองจะมี 2 ค่าคือ 1). 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ซึ่งจะทดลองอ้างอิงงานวิจัย [4]-[8] และ 2). 230 V (พื้นที่ 1, 2L, 2H, 3) ซึ่งจะทดลองอ้างอิงงานวิจัย [4][5][6][8] ยกเว้นงานวิจัย [7] เนื่องจากไม่ได้กล่าวถึงการมอดูเลตกรณีที่แรงดันคำสั่ง (V_{peak}) อยู่ในพื้นที่ 1, 2L, 2H และ 3

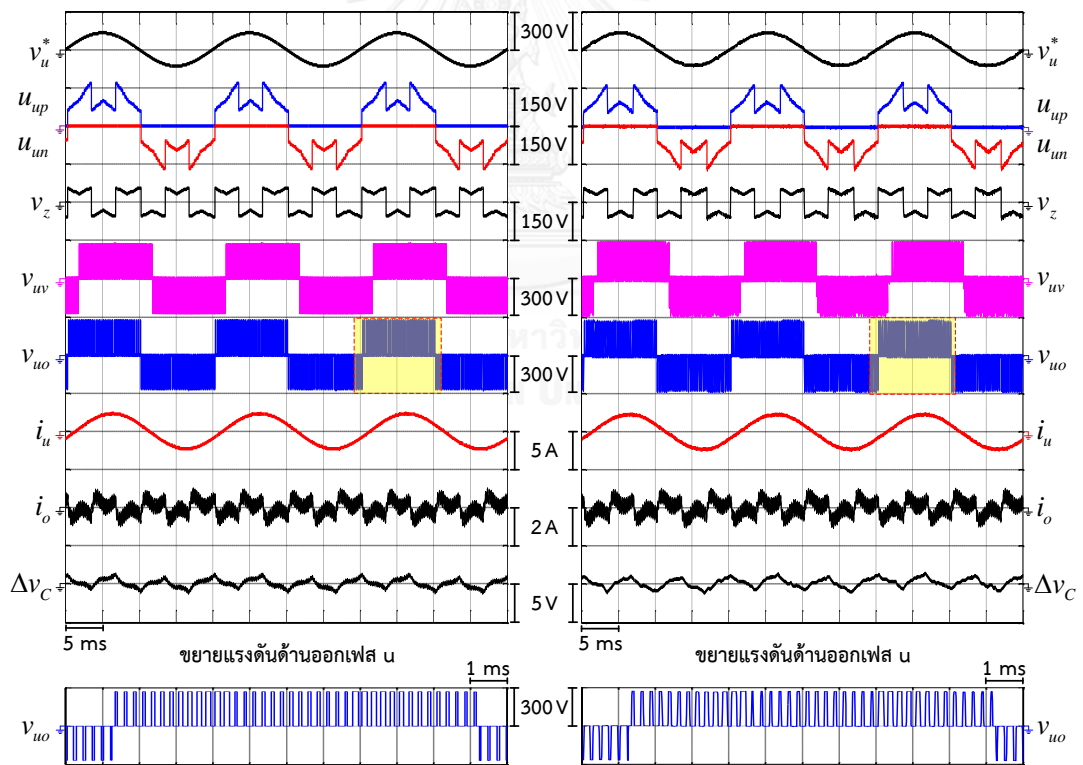
รูป (ข) ของรูปที่ 6.17 - รูปที่ 6.18 เป็นผลการทดลองการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์เชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² [9] เปรียบเทียบกับ รูป (ง) ของรูปที่ 6.17 - รูปที่ 6.18 เป็นผลการทดลองการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ โดยค่าของแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) ในการทดลองจะมี 2 ค่าคือ 1). 130 V (พื้นที่ 1) และ 2). 230 V (พื้นที่ 3, 4, 5)

จะเห็นว่ารูปคลื่นปริมาณต่างๆ (v_u^* , v_{uv} , v_{uo} , i_u , i_o , Δv) ระหว่างผลการทดลองการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์กับผลการทดลองการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ มีค่าสมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอและมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองมาก นอกจากนี้แนวคิดใหม่ในการควบคุมแรงดันกึ่งกลาง บัสเฉลี่ยต่อคาบให้สมมูลที่นำเสนอ นั้นสามารถทำได้จริงทางปฏิบัติอีกด้วย



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

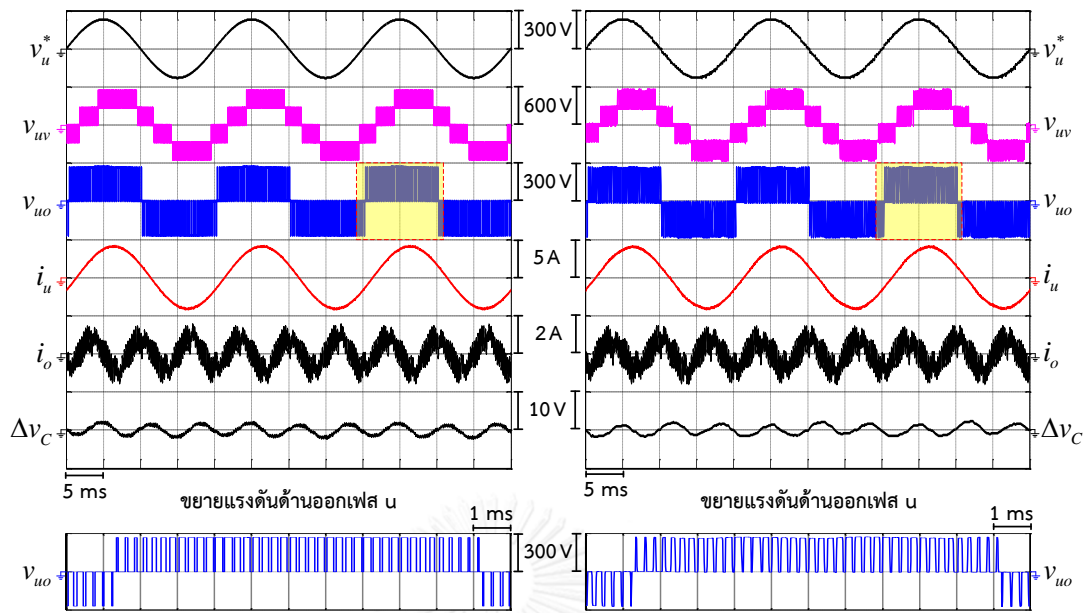
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

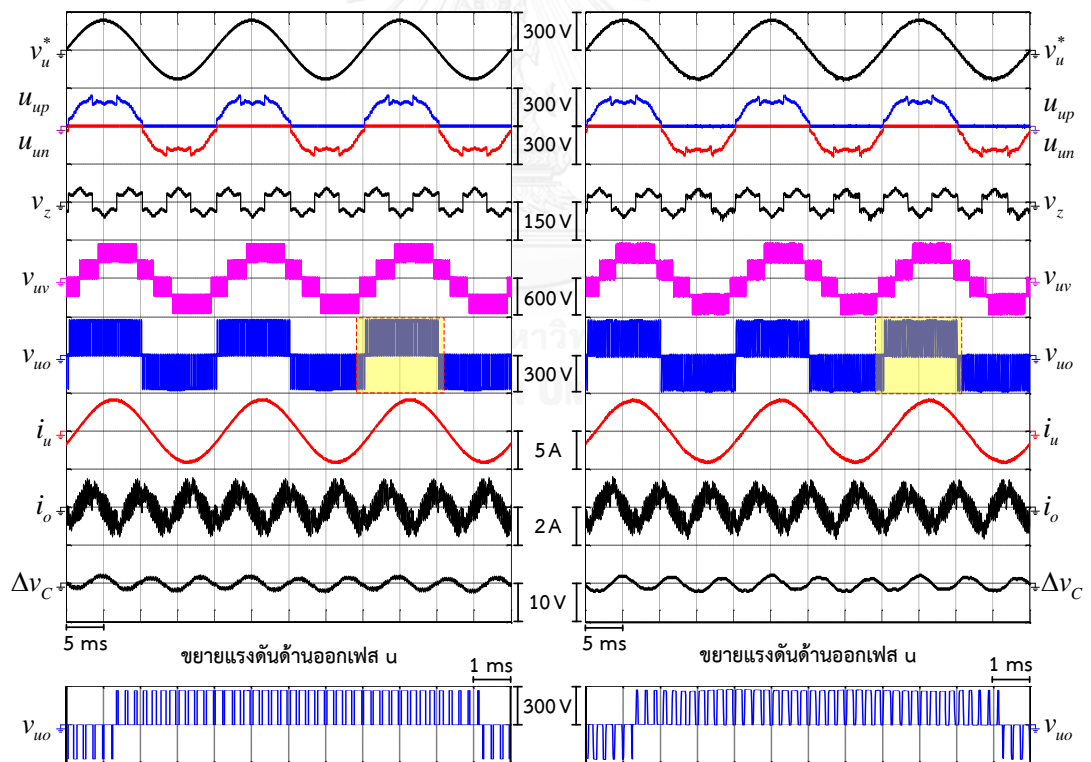
(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.3 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [4] (ตารางที่ 1.3) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วเดียวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.1) โดยที่ค่า k (เซกเตอร์คู่)=0.5, k (เซกเตอร์คี่)=0.5



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

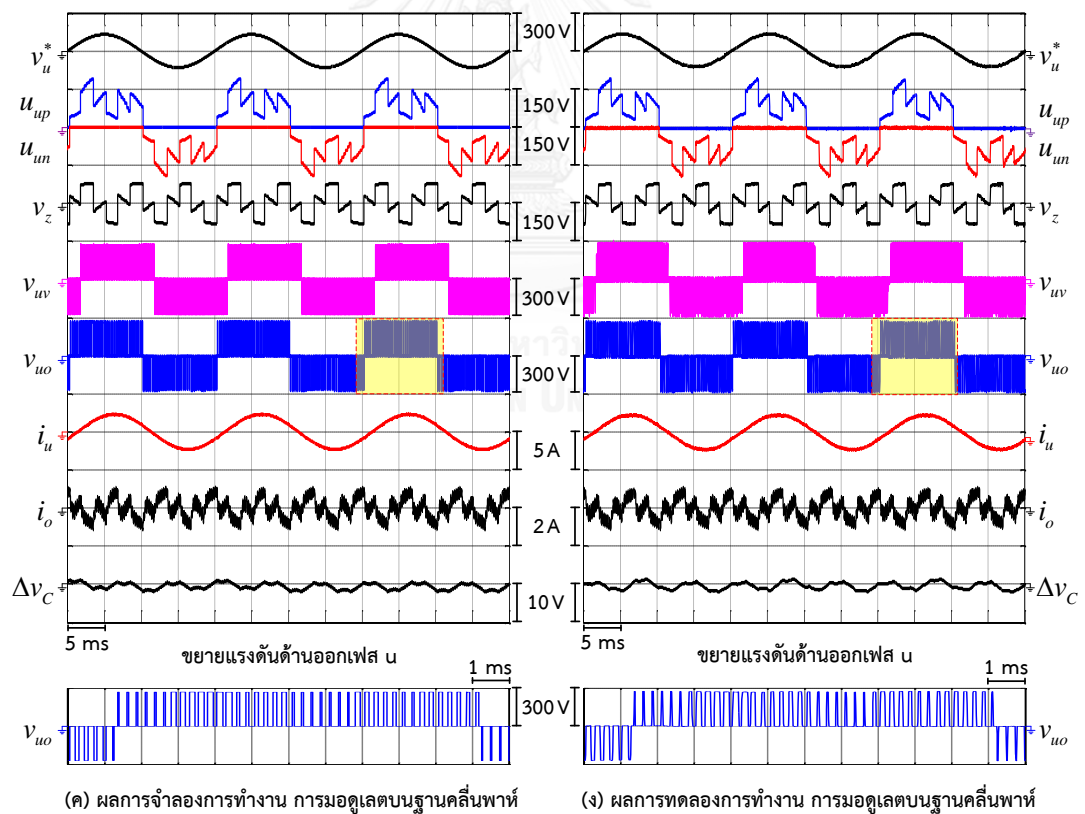
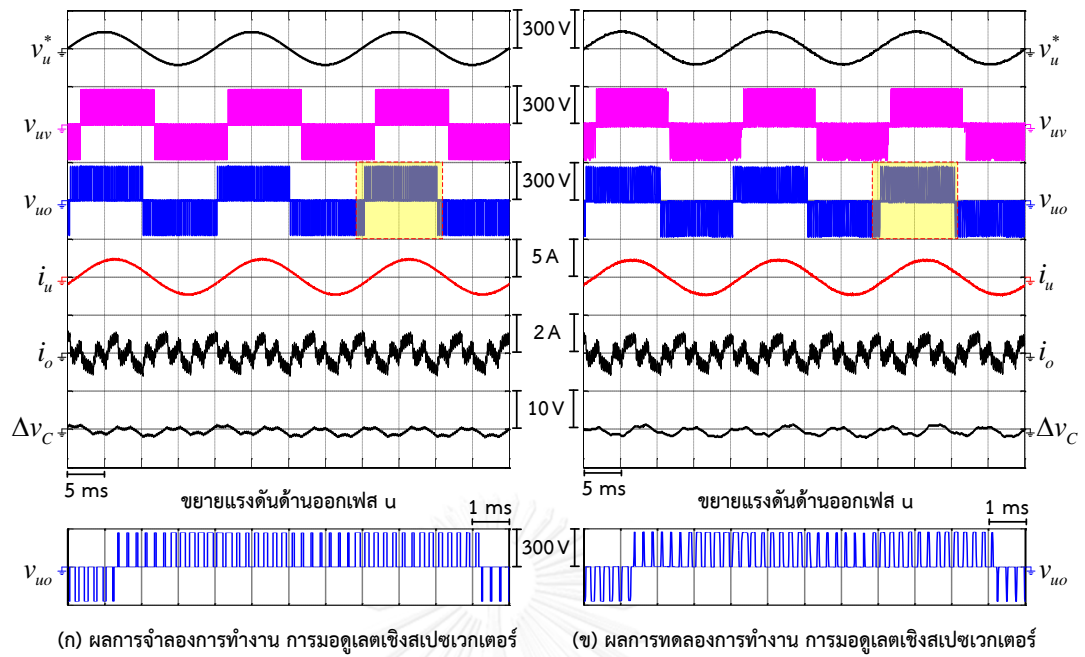
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



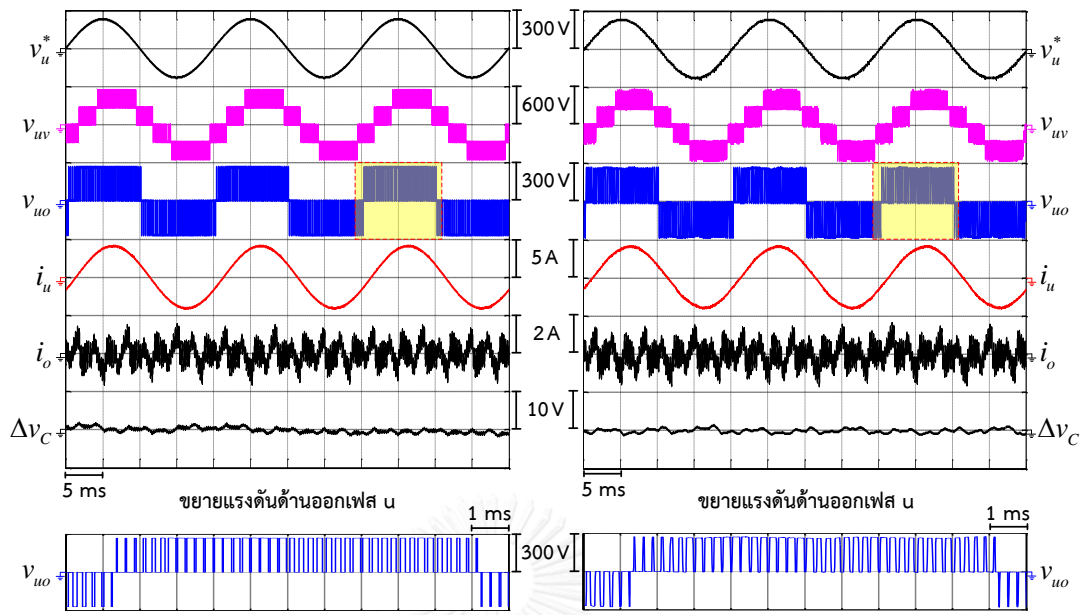
(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.4 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 1, 2L, 2H, 3) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [4] (ตารางที่ 1.3) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบซัวเดี่ยวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.1) โดยที่ค่า k (เซกเตอร์คี่)=0.5, k (เซกเตอร์คู่)=0.5

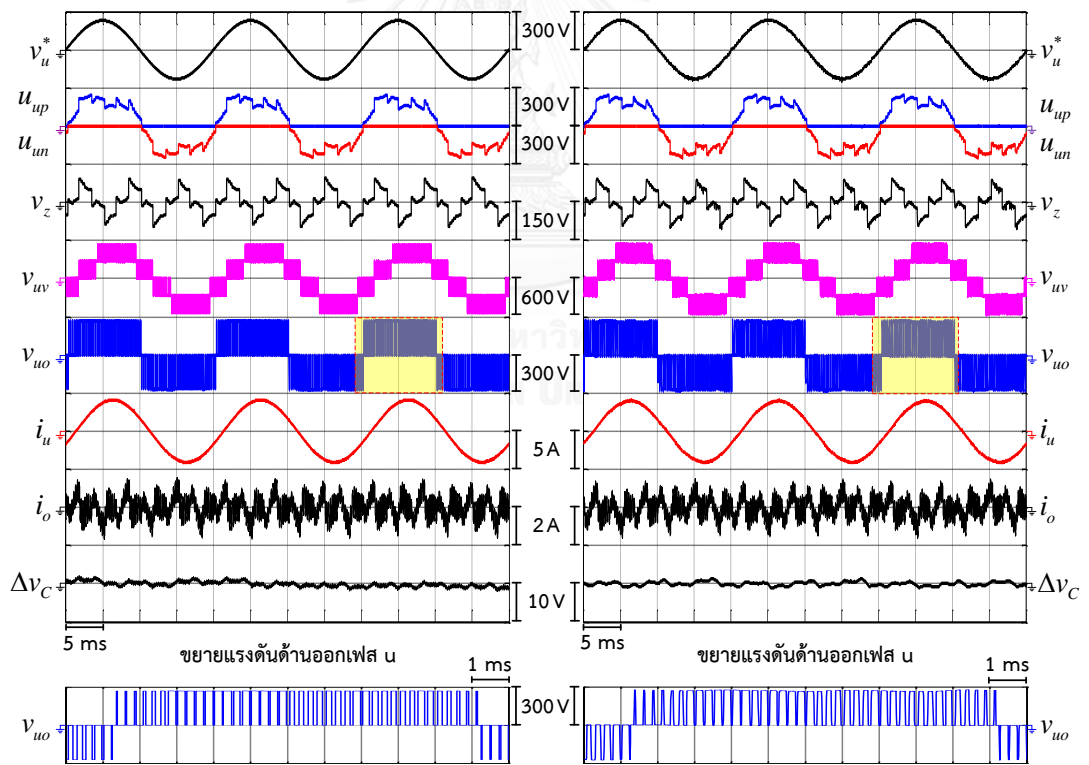


รูปที่ 6.5 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [5] (ตารางที่ 1.3) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วคราวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.2) โดยที่ค่า k (เซกเตอร์คี่)=0.7, k (เซกเตอร์คู่)=0.3



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

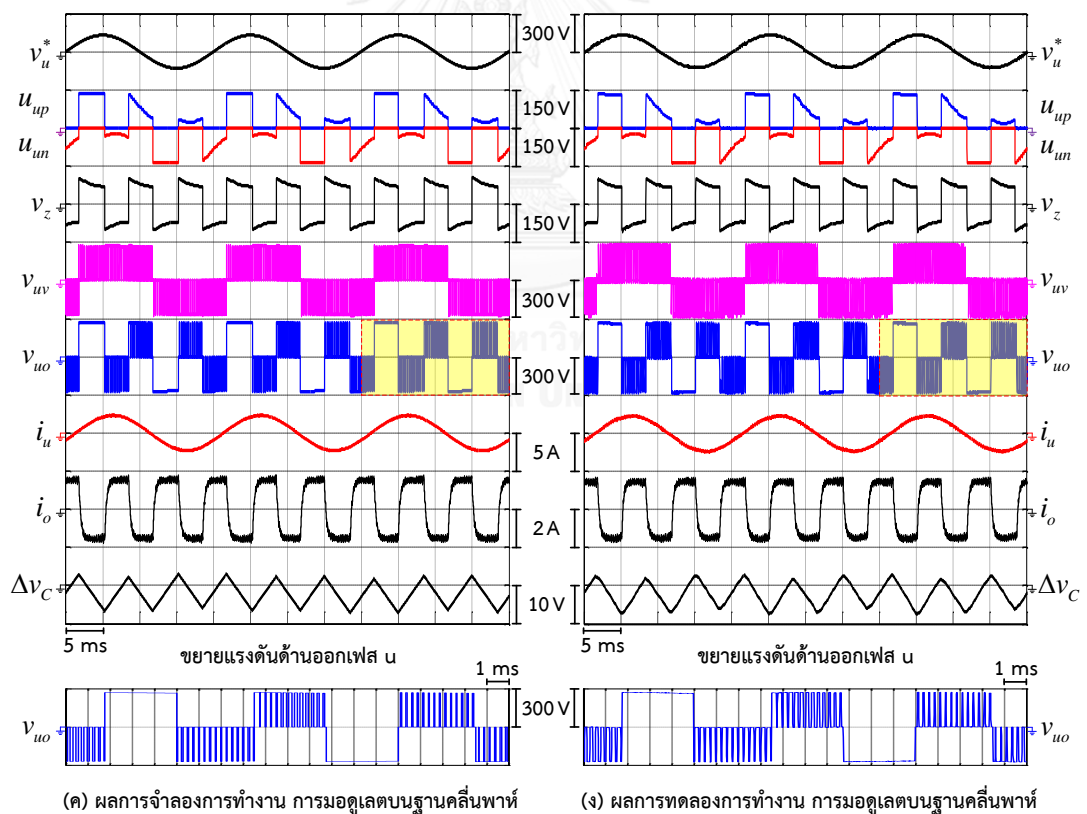
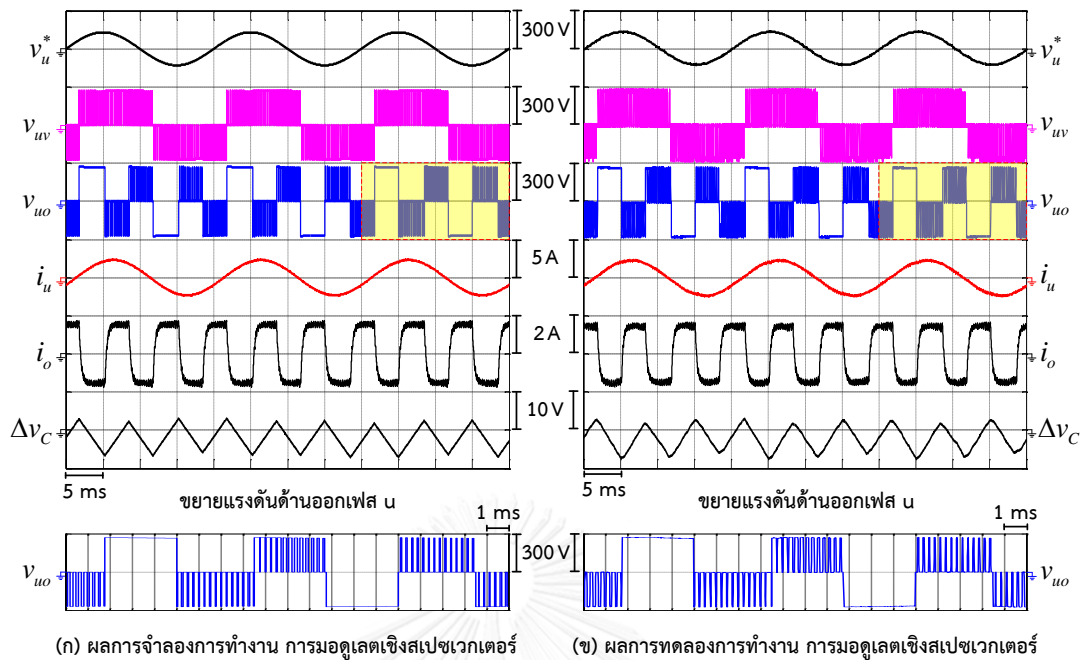
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



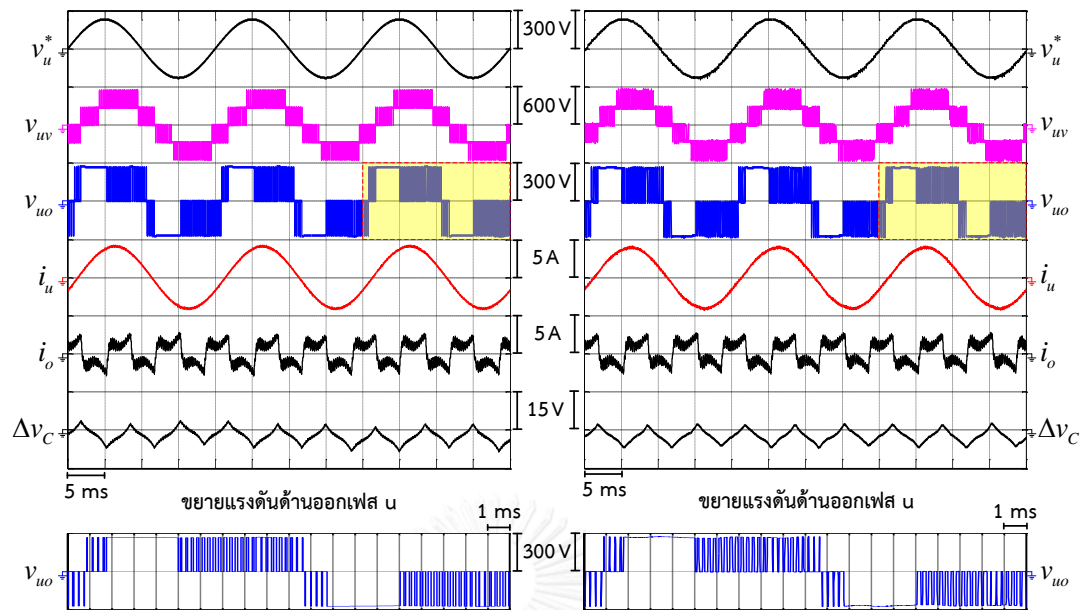
(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.6 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 1,2L,2H,3) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [5] (ตารางที่ 1.3) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วเดียวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.2) โดยที่ค่า k (เซกเตอร์คี่)=0.7, k (เซกเตอร์คู่)=0.3

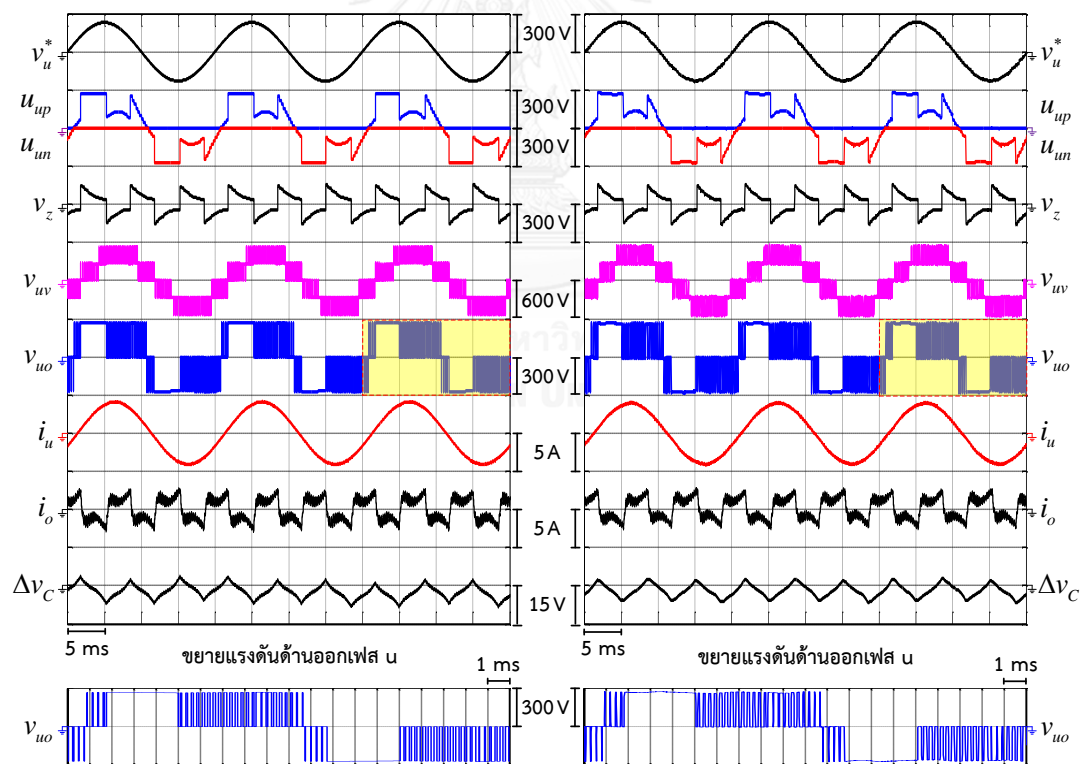


รูปที่ 6.7 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [6] (ตารางที่ 1.5; แบบที่ 1) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วคราวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.3; แบบที่ 1)



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

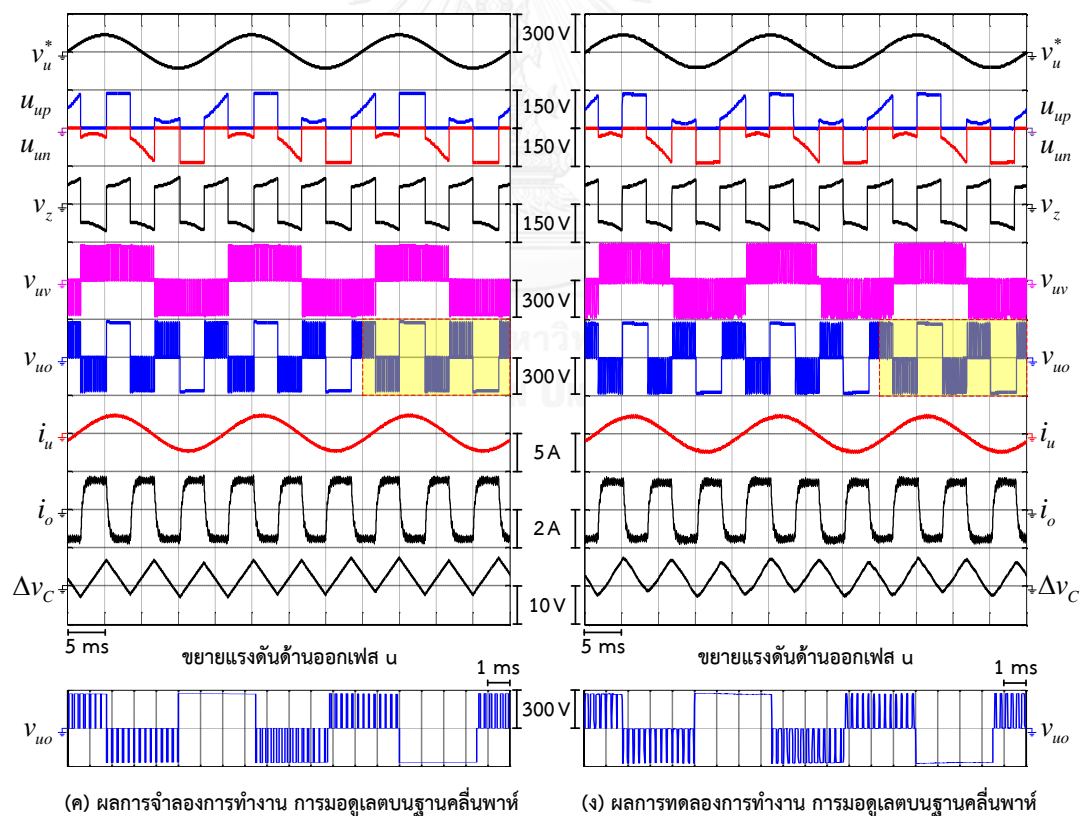
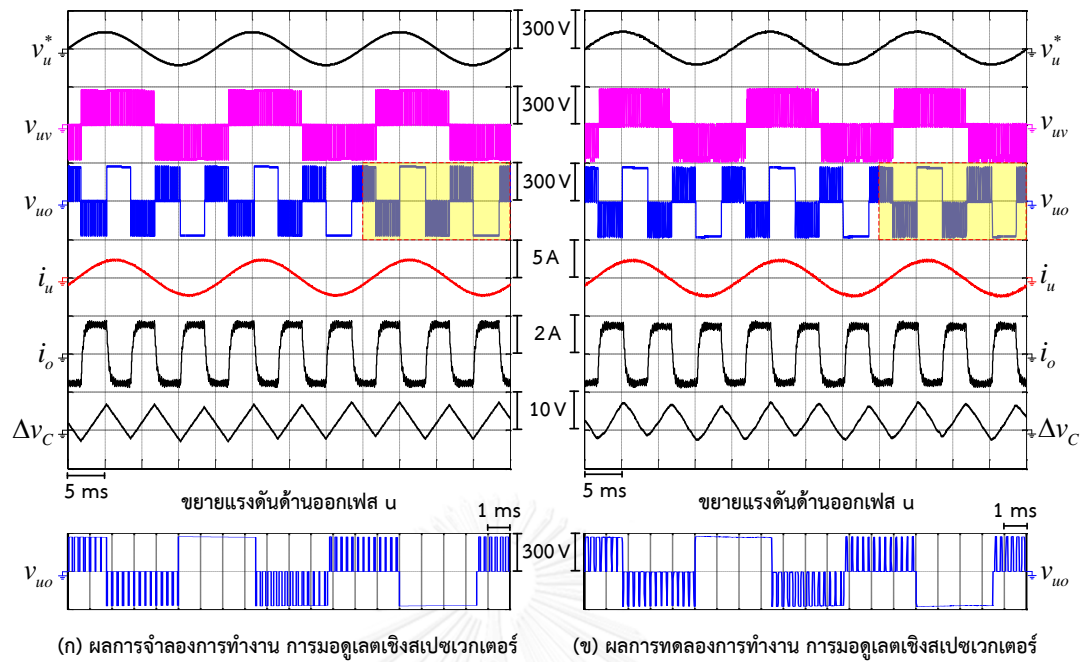
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



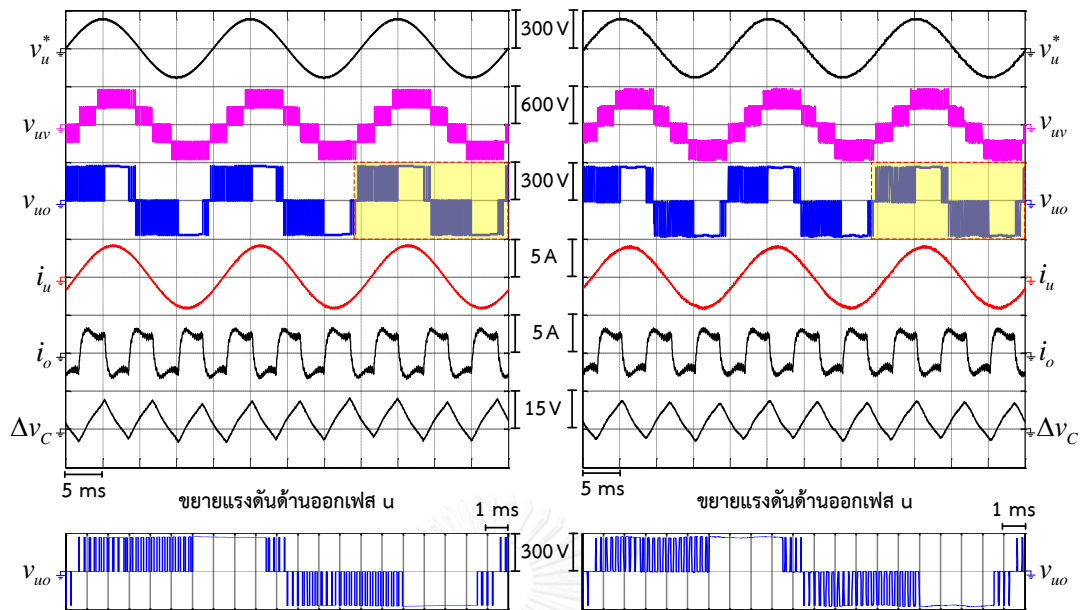
(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.8 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 1, 2L, 2H, 3) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [6] (ตารางที่ 1.5; แบบที่ 1) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วเดียวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.3; แบบที่ 1)

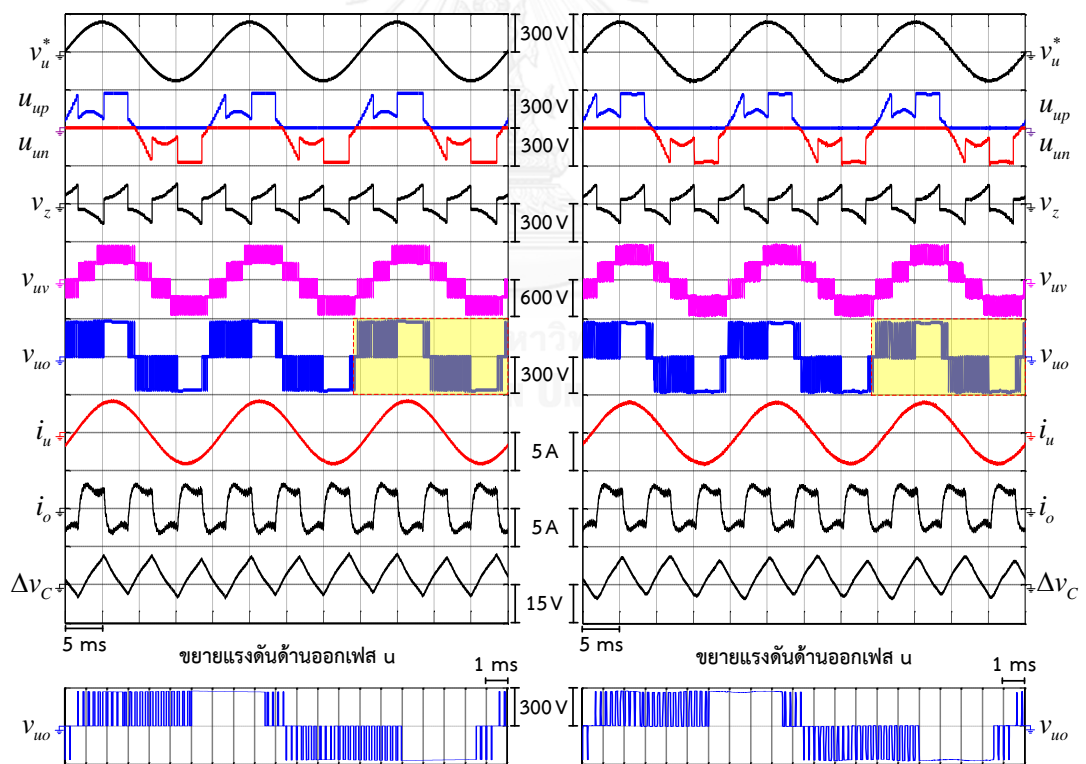


รูปที่ 6.9 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [6] (ตารางที่ 1.5; แบบที่ 2) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วเดียวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.3; แบบที่ 2)



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

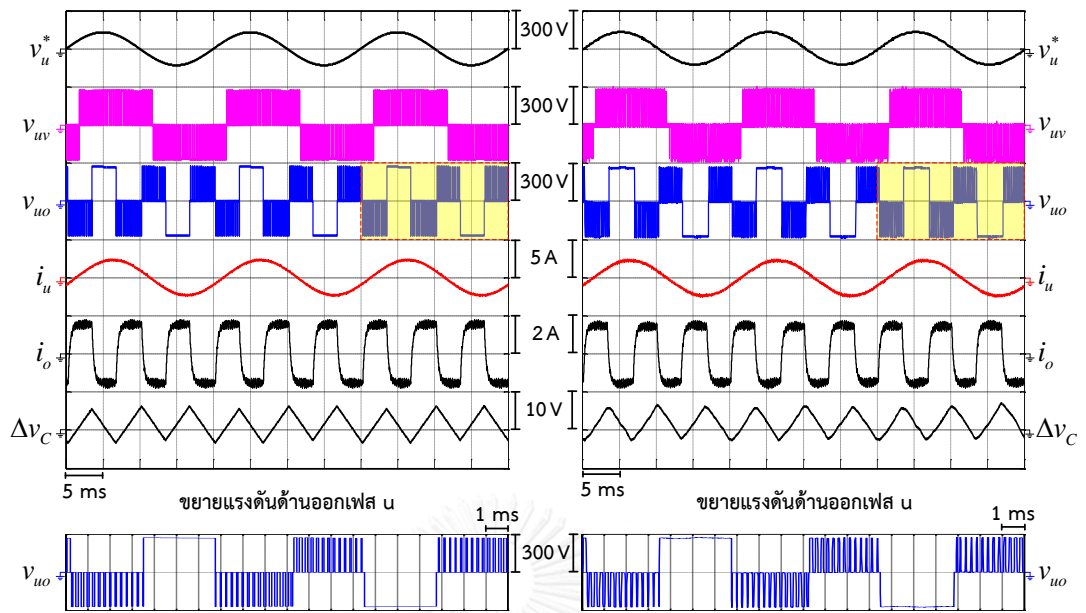
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

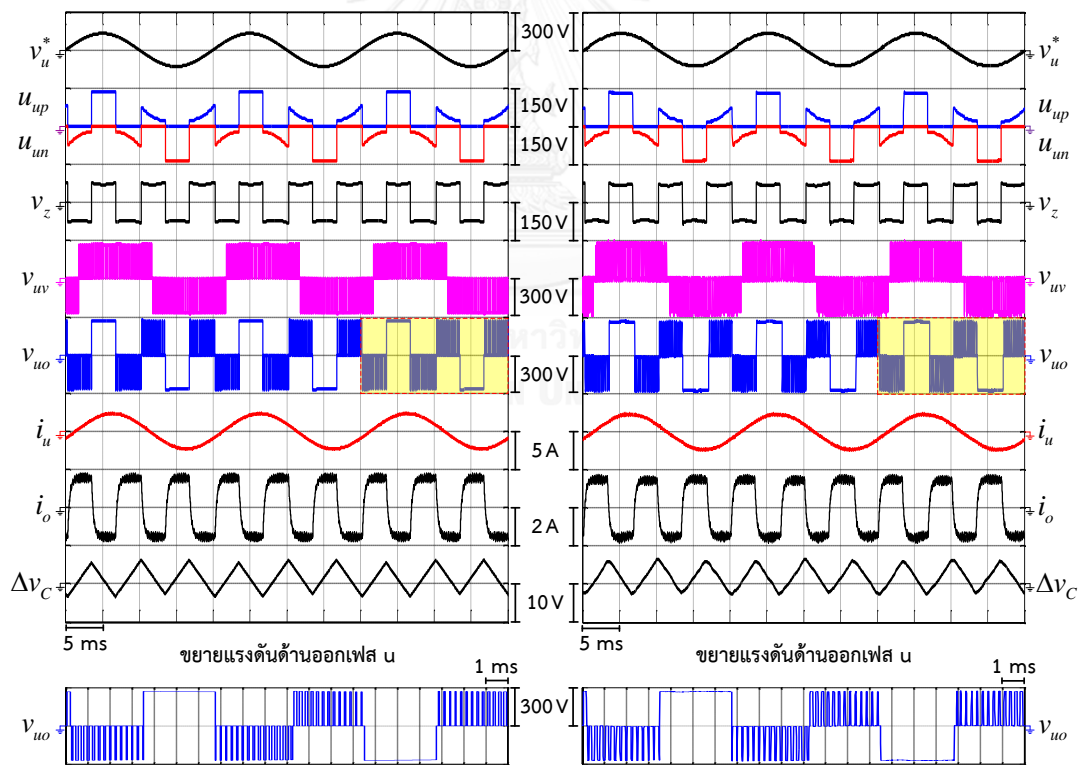
(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.10 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 1, 2L, 2H, 3) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [6] (ตารางที่ 1.5; แบบที่ 2) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบซัวเดี่ยวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.3; แบบที่ 2)



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

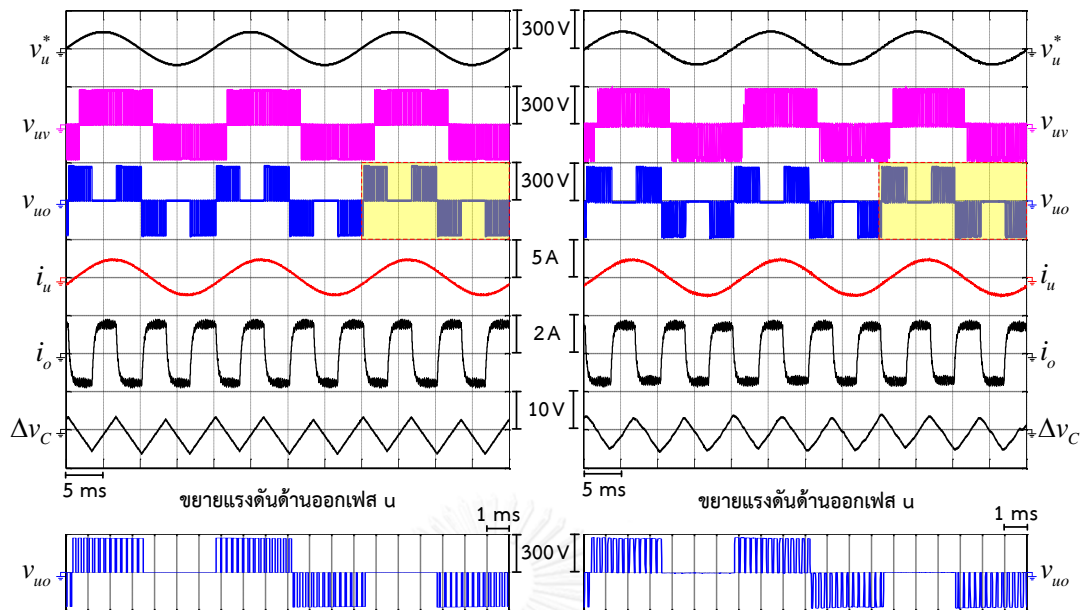
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

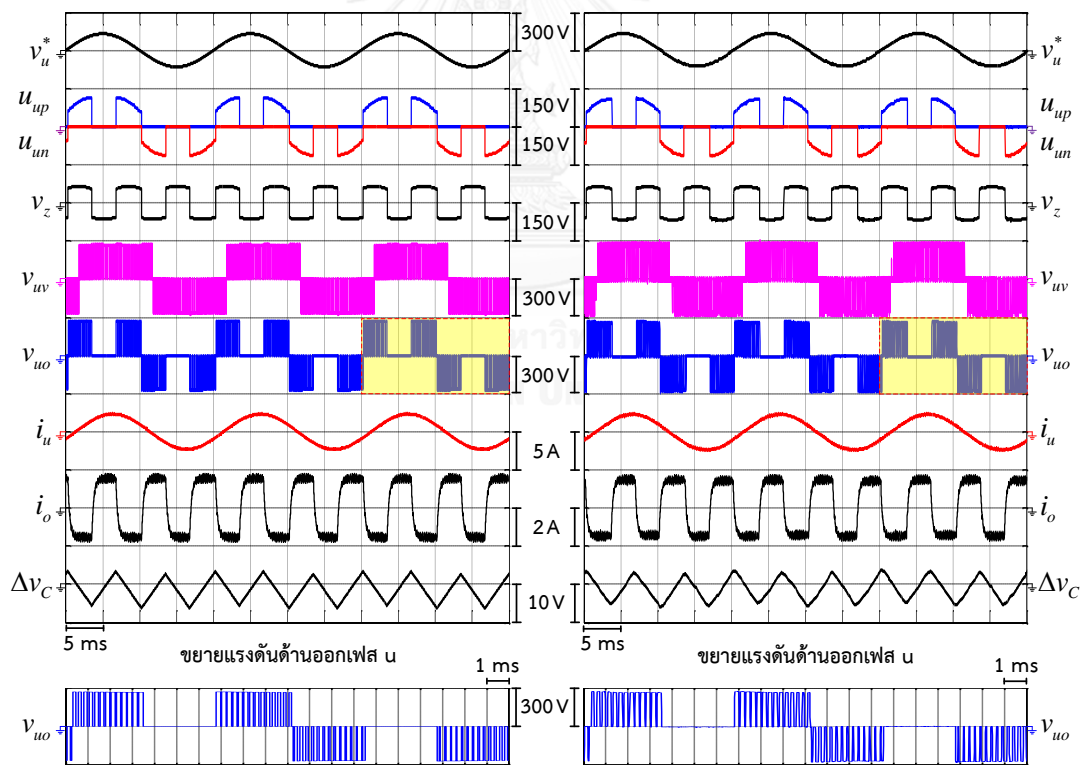
(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.11 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [7] (ตารางที่ 1.6; แบบที่ 1) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วเดียวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.4; แบบที่ 1)



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

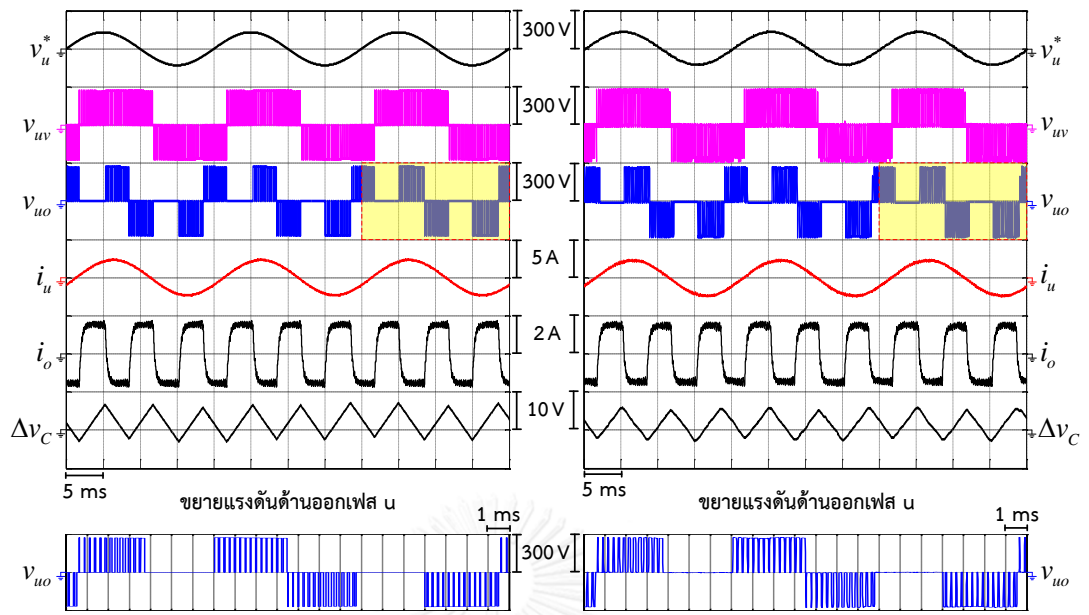
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

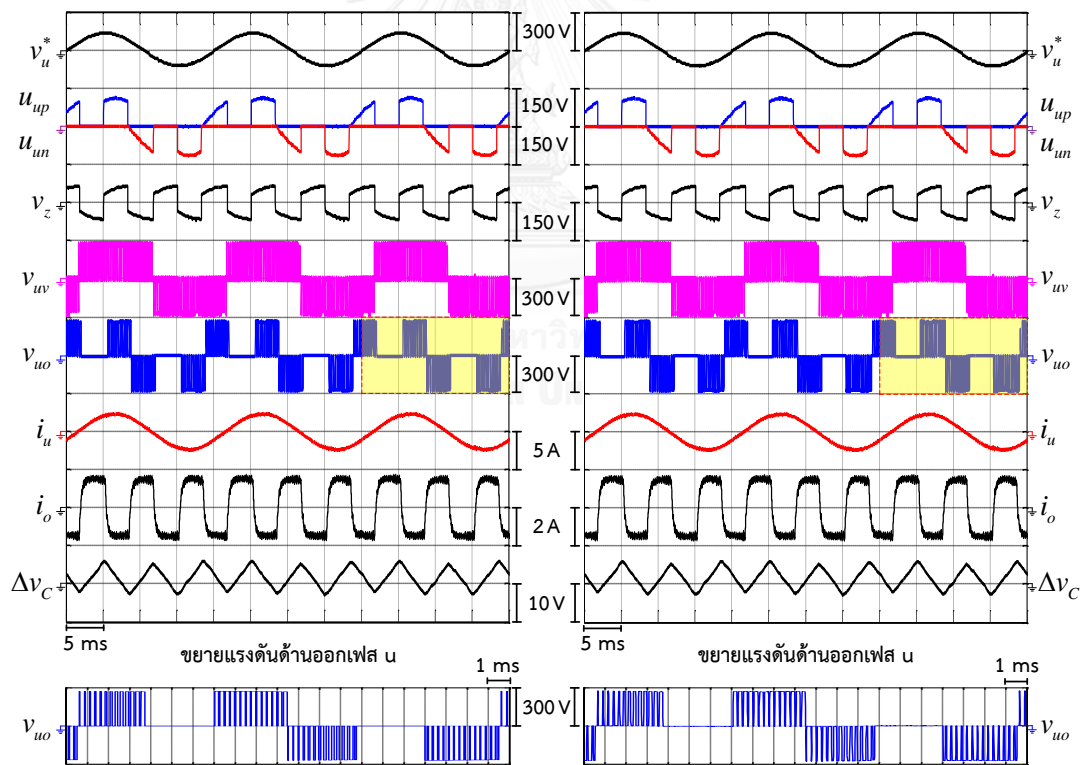
(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.12 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [7] (ตารางที่ 1.6; แบบที่ 2) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบขั้วเดียวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.4; แบบที่ 2)



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

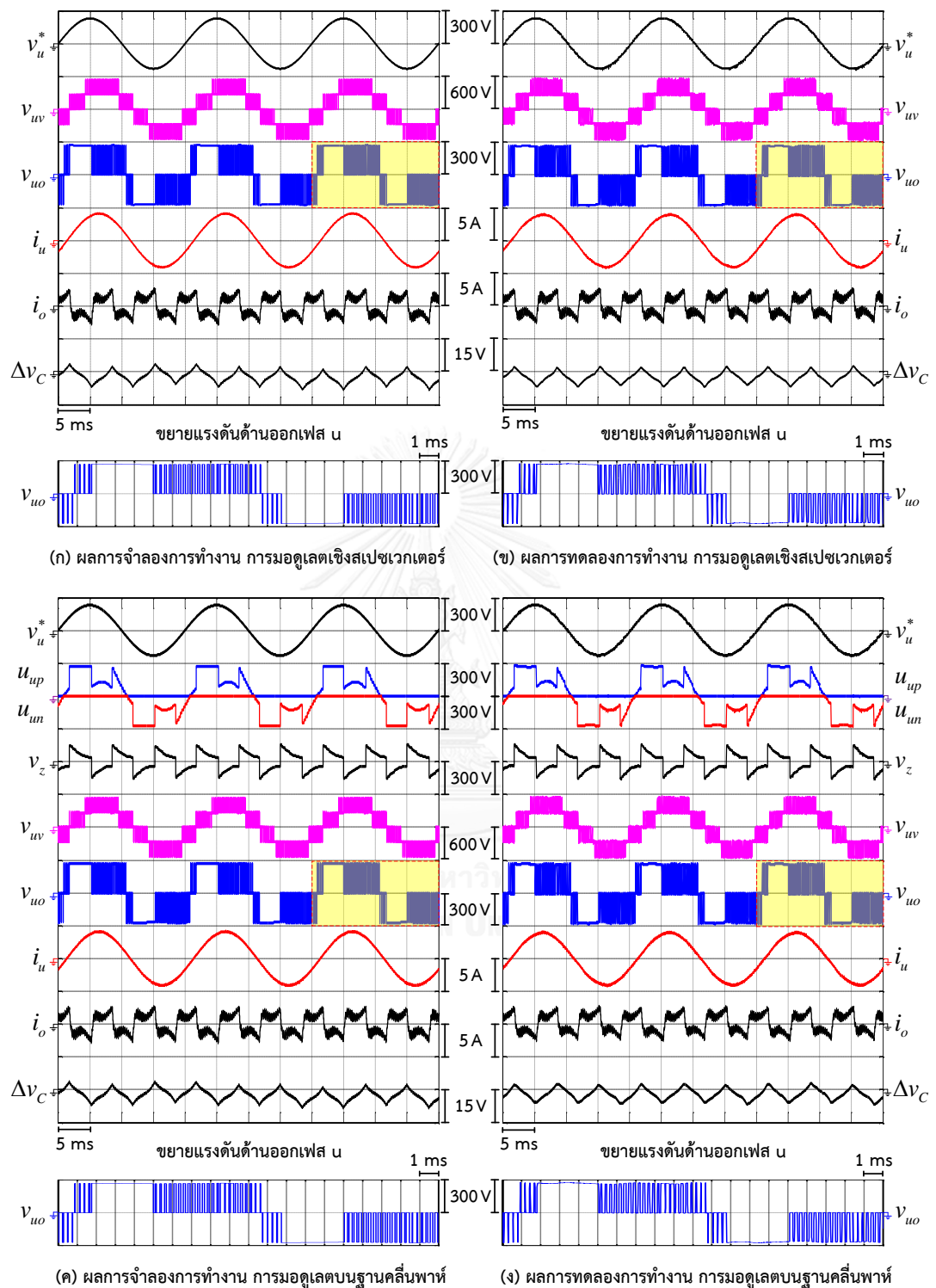
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



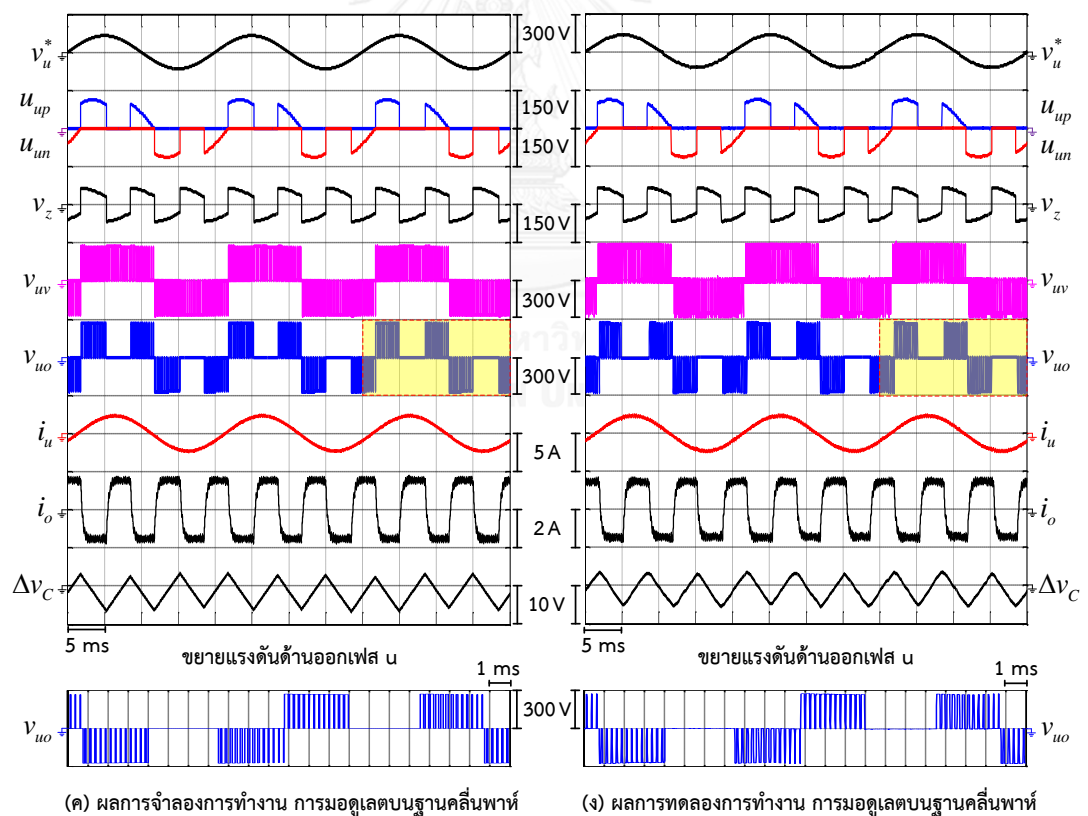
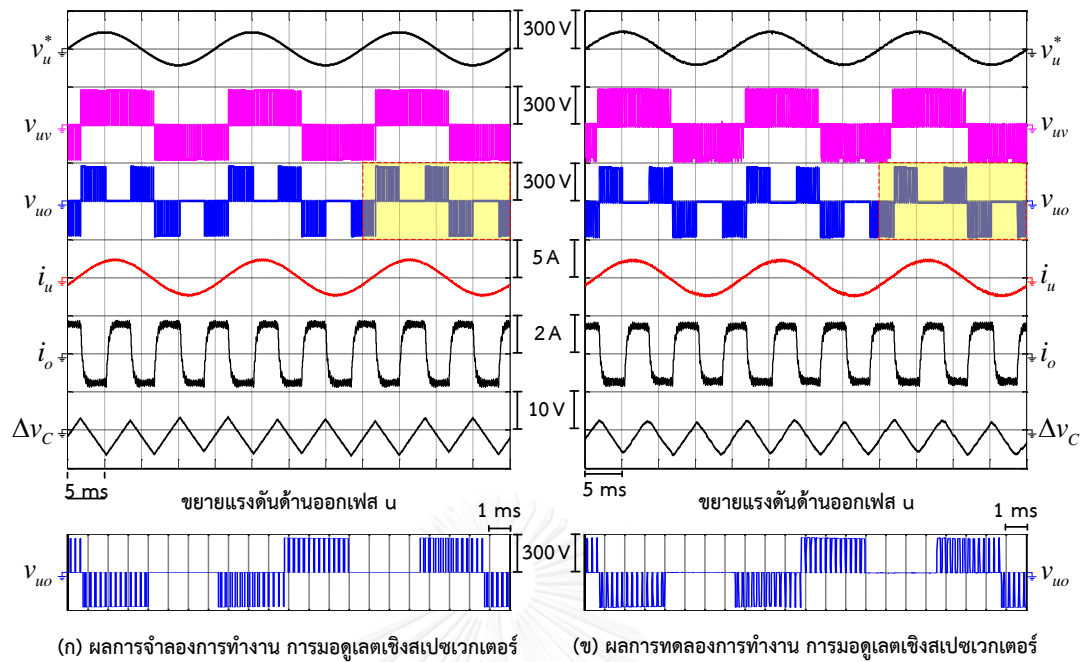
(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

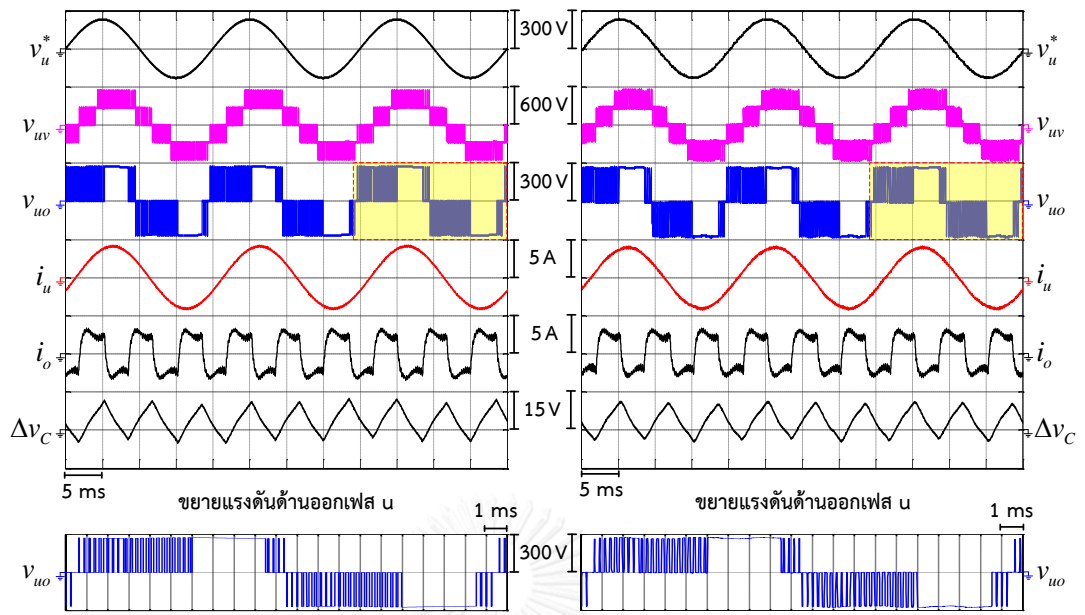
รูปที่ 6.13 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [8] (ตารางที่ 1.7; แบบที่ 1) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วเดียวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.5; แบบที่ 1)



รูปที่ 6.14 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 1, 2L, 2H, 3) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [8] (ตารางที่ 1.7; แบบที่ 1) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วเดียวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.5; แบบที่ 1)

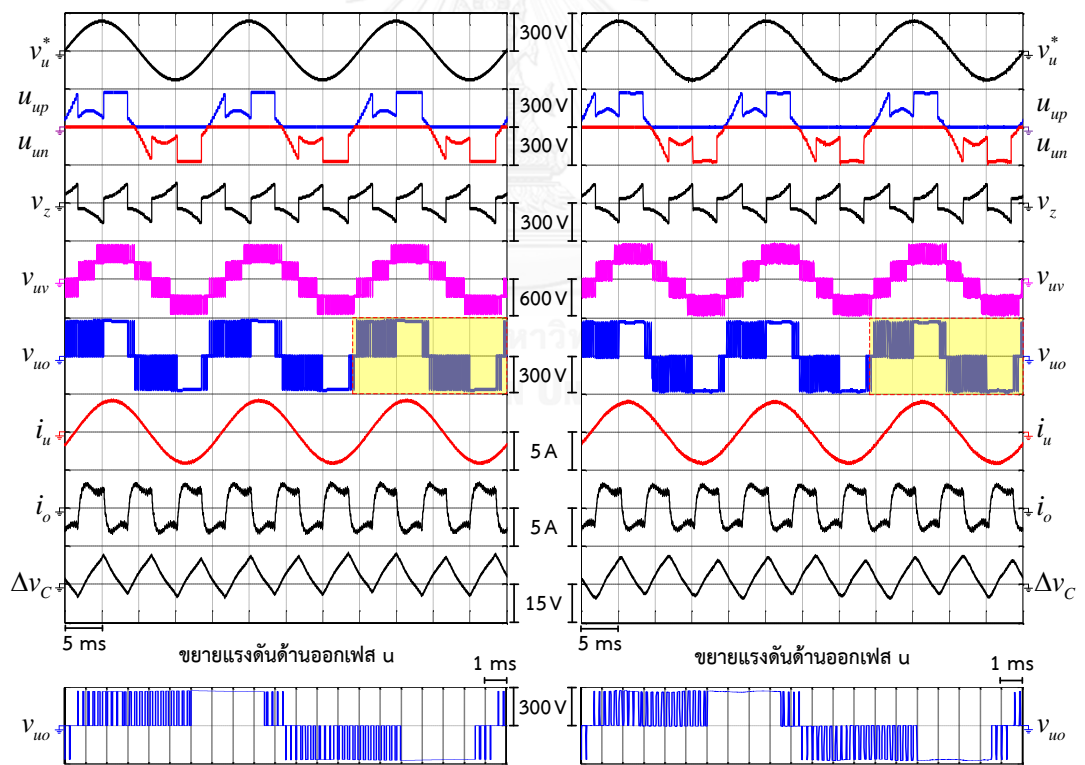


รูปที่ 6.15 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 4L, 4H) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [8] (ตารางที่ 1.7; แบบที่ 2) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วคราวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.5; แบบที่ 2)



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

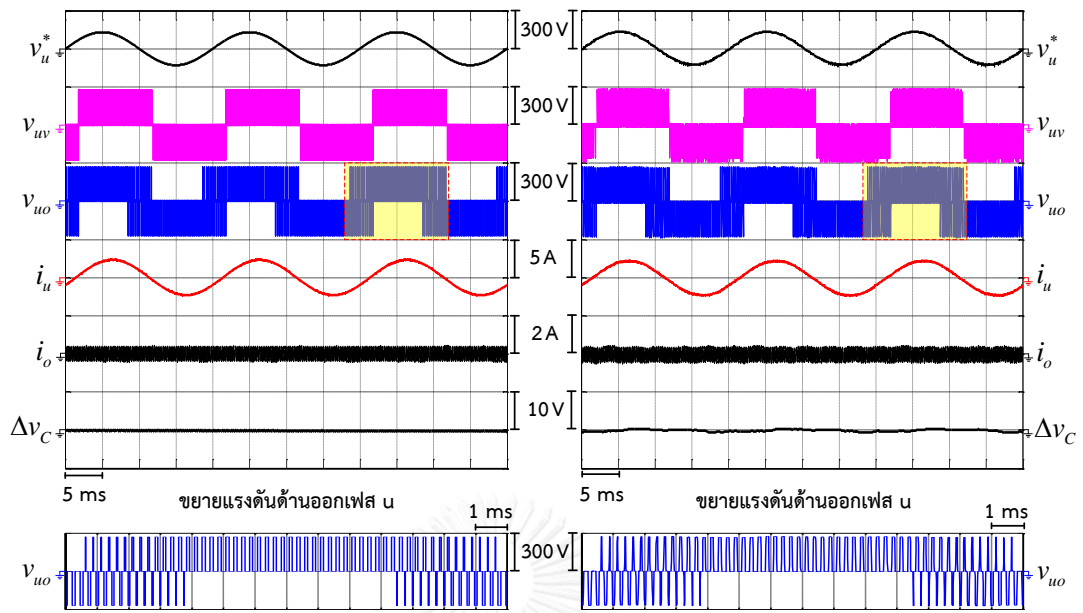
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

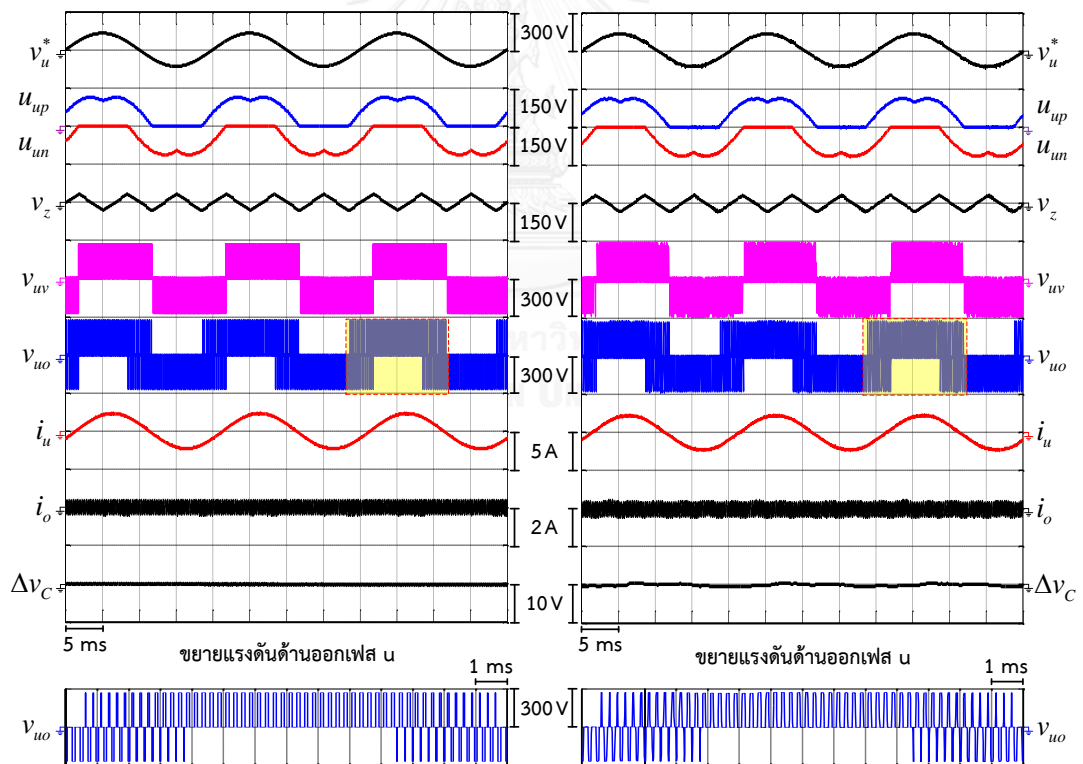
(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.16 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 1, 2L, 2H, 3) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV [8] (ตารางที่ 1.7; แบบที่ 2) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วเดียวทั้ง 3 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ (ตารางที่ 4.5; แบบที่ 2)



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

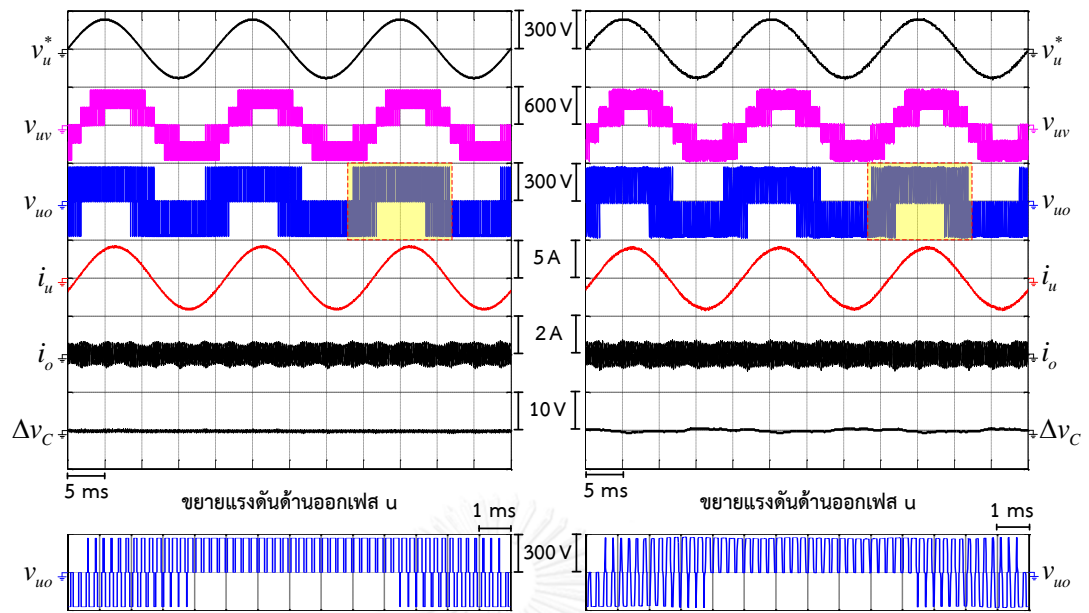
(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์



(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

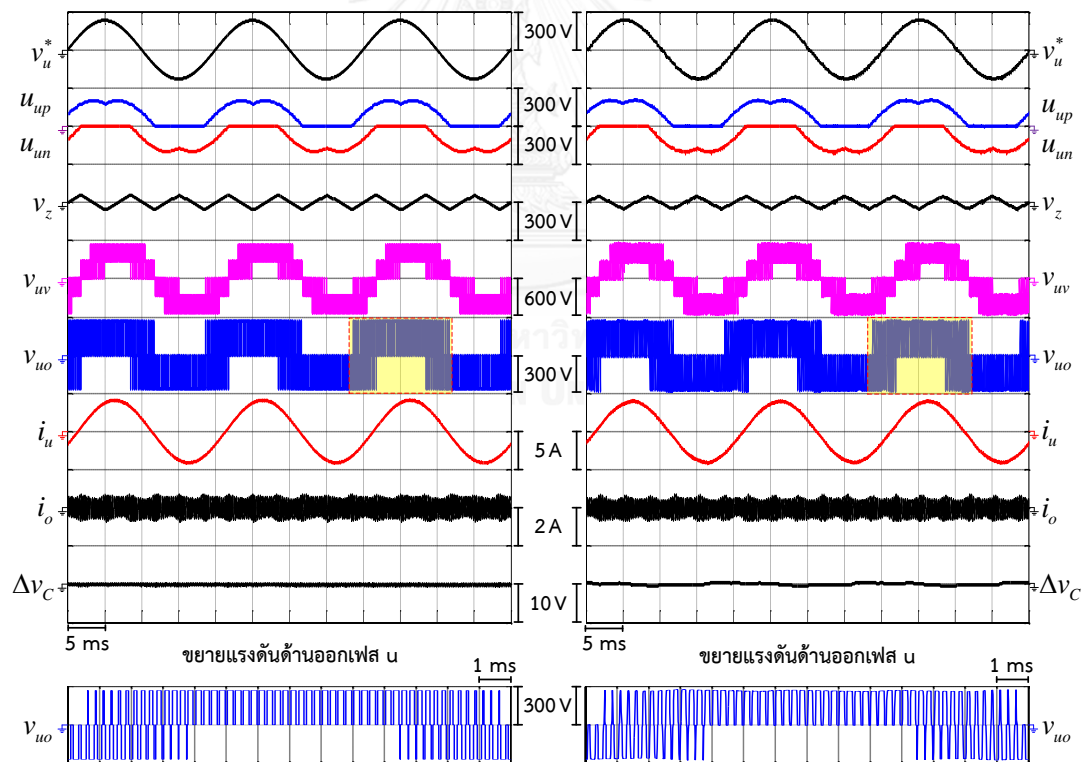
(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.17 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 130 V (พื้นที่ 1) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² [9] (ตารางที่ 1.8) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบชั่วคราว 2 เฟสชั่วคราว 1 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอในสมการ (4.2)-(4.3)



(ก) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

(ข) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

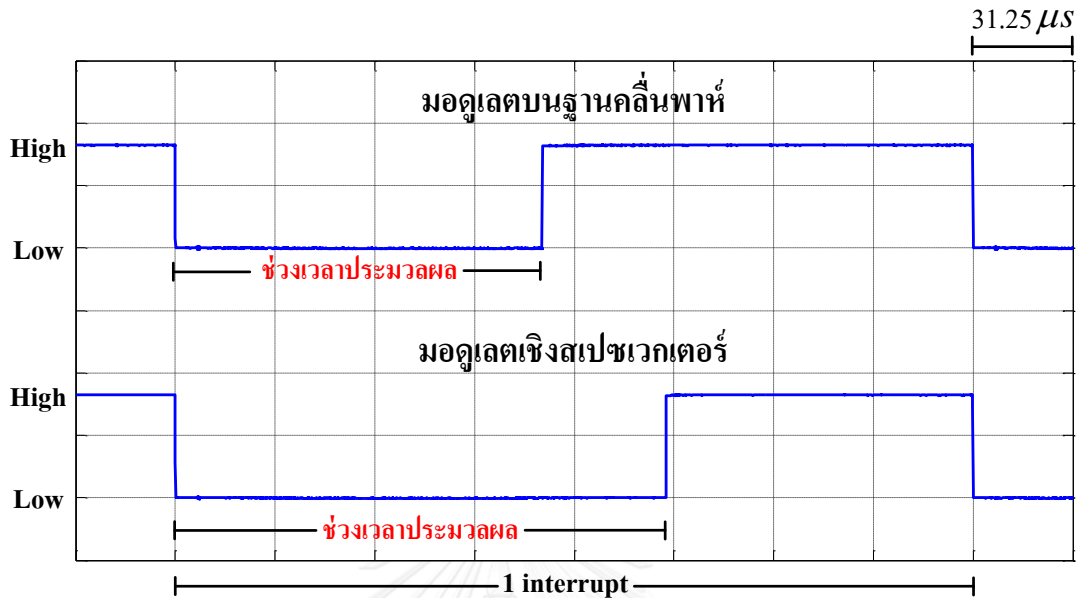


(ค) ผลการจำลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

(ง) ผลการทดลองการทำงาน การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์

รูปที่ 6.18 รูปคลื่นปริมาณในกรณีแรงดันคำสั่ง (V_{peak}) 230 V (พื้นที่ 3, 4, 5) ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV² [9] (ตารางที่ 1.8) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์แบบซัวเดี่ยว 2 เฟสซัวคู่ 1 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ สมการ (4.2)-(4.3)

6.3 ผลการเปรียบเทียบช่วงเวลาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห้



รูปที่ 6.19 แสดงช่วงเวลาการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV^2 [9] (ตารางที่ 1.8) กับการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห้แบบซัวเดี่ยว 2 เฟสซัวคู่ 1 เฟสที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ

จากรูปที่ 6.19 แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบ NTV^2 มากกว่าการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห้ที่สมมูลกันตามทฤษฎีที่นำเสนอ ดังนั้นนอกจากงานวิจัยนี้จะนำเสนอการทำการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห้ ให้สามารถใช้แทนการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ทุกรูปแบบได้ ทำให้การมอดูเลตอินเวอร์เตอร์สามารถง่ายขึ้นทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติแล้ว ยังสามารถช่วยให้อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้เร็วขึ้นอีกด้วย

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการทำการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์รูปแบบต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์สามระดับให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาห์โดยอาศัยทฤษฎีการมอดูเลตแบบซัวคู่และแนวคิดพิกัดจุดศูนย์ถ่วงวิธีการที่นำเสนอสามารถหาค่าแรงดันอ้างอิงที่ใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาห์ได้โดยคำนวณจากค่าแรงดันเพสคำสั่งโดยตรงและมีขั้นตอนการคำนวณที่ง่ายกว่าการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่นิยมใช้อยู่ ณ ปัจจุบัน เมื่อใช้วิธีการที่นำเสนอกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่เป็นที่นิยม 2 รูปแบบ คือ การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ใช้เวกเตอร์สามตัวที่ใกล้ที่สุดและการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ใช้เวกเตอร์เสมือนสามตัวที่ใกล้ที่สุด พบว่าทฤษฎีมีความถูกต้องสอดคล้องกับผลการจำลองและสามารถใช้งานได้จริงในเชิงปฏิบัติ

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัยในลำดับถัดไป

1. จากงานวิจัยนี้พบว่า เวกเตอร์สถานะการสวิตซ์ในพื้นที่สามเหลี่ยมย่อย 2L, 2H, 4L, 4H ของการมอดูเลตแบบ NTV ในงานวิจัยที่ผ่านมา[4]-[8] ยังไม่ครอบคลุมเวกเตอร์สถานะการสวิตซ์ทั้งหมดของการมอดูเลตแบบ NTV นั้นเอง งานวิจัยนี้สามารถแสดงให้เห็นว่าเวกเตอร์สถานะการสวิตซ์ในพื้นที่สามเหลี่ยมย่อย 2L, 2H, 4L, 4H ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 ซึ่งการเลือกใช้เวกเตอร์สถานะการสวิตซ์ที่เพิ่มเติมขึ้นนั้นควรมีการวิจัย ศึกษาและพัฒนาต่อไปว่าคุณสมบัติของการมอดูเลตแต่ละรูปแบบมีข้อดี, ข้อเสีย และผลกระทบต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับอย่างไร

2. ถึงแม้ว่าแนวคิดใหม่ในการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสผ่านกระแสในวรัลที่ไหลออกจากกึ่งกลางบัสที่นำเสนอ จะสามารถควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสเฉลี่ยต่อคาบให้สมดุลได้ โดยไม่ต้องมีลูปควบคุม แต่ยังมีแกว่งของแรงดันกึ่งกลางบัสอยู่ ไม่สามารถควบคุมสมดุลของแรงดันกึ่งกลางบัสได้ตลอดเวลาได้ ซึ่งควรมีการวิจัยและพัฒนาต่อยอด เพื่อให้การทำงานของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] S. Sangwongwanich, "Double-carrier-Based Modulation Theory of Three-Level Inverter and a New Discontinuous PWM for Neutral-Point Voltage Balancing," presented at the IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, QC, 2012.
- [2] M. Koyama and T. F. R. U. T. Kawabata, "Space voltage vector-based new PWM method for large capacity three-level GTO inverter," presented at the Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992. Power Electronics and Motion Control., Proceedings of the 1992 International Conference on, San Diego, CA, 1992.
- [3] A. Kocalmis and S. Sunter, "Simulation of a Space Vector PWM Controller For a Three-Level Voltage-Fed Inverter Motor Drive," presented at the IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on, Paris, 2006.
- [4] J. Pou, R. Pindado, D. Boroyevich, and P. Rodriguez, "Evaluation of the Low-Frequency Neutral-Point Voltage Oscillations in the Three-Level Inverter," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* (Volume:52 , Issue: 6), pp. 1582 - 1588, Dec. 2005 2005.
- [5] C. Da-peng, S. Wen-xiang, X. Hui, C. Guo-cheng, and C. Chen, "Research on Zero-sequence Signal of Space Vector Modulation for Three-level Neutral-point-clamped Inverter Based on Vector Diagram Partition," presented at the Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International, Wuhan, 2009.
- [6] B. Kaku, I. Miyashita, and S. Sone, "Switching loss minimized space vector PWM method for IGBT three-level inverter," presented at the Electric Power Applications, IEE Proceedings, 1997.
- [7] T. Bruckner and D. G. Holmes, "Optimal pulse-width modulation for three-level inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 82 - 89, Jan. 2005 2005.

- [8] L. Helle, S. Munk-Nielsen, and P. Enjeti, "Generalized Discontinuous DC-Link Balancing Modulation Strategy for Three-Level Inverters," presented at the Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the Osaka, 2002.
- [9] S. Busquets-Monge, J. Bordonau, D. Boroyevich, and S. Somavilla, "The Nearest Three Virtual Space Vector PWM-A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter," *Power Electronics Letters, IEEE*, vol. 2, pp. 11 - 15, March 2004 2004.
- [10] J. Pou, J. Zaragoza, P. Rodriguez, S. Ceballos, V. M. Sala, R. P. Burgos, *et al.*, "Fast-Processing Modulation Strategy for the Neutral-Point-Clamped Converter With Total Elimination of Low-Frequency Voltage Oscillations in the Neutral Point," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* vol. 54, pp. 2288 - 2294, Aug. 2007 2007.
- [11] D. Zhou, "A self-balancing space vector switching modulator for three-level motor drives," *Power Electronics, IEEE Transactions on* vol. 17, pp. 1024 - 1031, Nov 2002 2002.
- [12] J. Rodriguez, J. Pontt, P. Cortes, and R. Vargas, "Predictive Control of a Three-Phase Neutral Point Clamped Inverter," presented at the Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th, Recife, 2005.
- [13] K. H. Bhalodi and P. Agrawal, "Space Vector Modulation with DC-Link Voltage Balancing Control for Three-Level Inverters," presented at the Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES '06. International Conference on, New Delhi, 2006.
- [14] E. Du, L. He, X. Li, and Y. Ma, "Neutral point potential balance of three-level inverter based on parameters self-tuning fuzzy logic control strategy," presented at the IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, 2010.
- [15] A. Sadeghi, M. Mohamadian, M. Shahparasti, and A. Fatemi, "A new switching algorithm for voltage balancing of a three-level NPC in DTC drive of a three-phase IM," presented at the Applied Power Electronics Conference and

Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, Long Beach, CA, USA, 2013.

- [16] A. M. Almaktoof, A. K. Raji, and M. T. E. Kahn, "Finite-set model predictive control and DC-link capacitor voltages balancing for three-level NPC inverters," presented at the Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International, Antalya, 2014.
- [17] A. Choudhury, P. Pillay, and S. S. Williamson, "DC-Link Voltage Balancing for a Three-Level Electric Vehicle Traction Inverter Using an Innovative Switching Sequence Control Scheme," *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, vol. 2, pp. 296 - 307, June 2014 2014.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภกร ไพบูลย์ เกิดเมื่อวันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2555 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า(อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

