

วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์และการทำให้เป็นจริง
บนฐานคลื่นพาหะโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบซั้วคู่

นายไพบูลย์ เกียรติสุขคนาธร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

A UNIFIED PWM METHOD FOR MATRIX CONVERTERS
AND ITS CARRIER-BASED REALIZATION USING DIPOLAR MODULATION TECHNIQUE

Mr. Paiboon Kiatsookkanatorn

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอน
เวอร์เตอร์และการทำให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาหะโดยใช้
เทคนิคการมอดูเลตแบบซั้วคู่

โดย

นายไพบุลย์ เกียรติสุขคนธรร

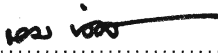
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญรณ์ แสงวงศ์วานิชย์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

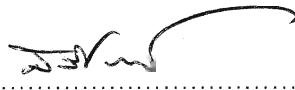

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงศ์)

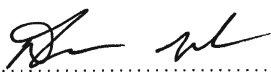
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุธนา กุลวิฑิต)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญรณ์ แสงวงศ์วานิชย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวพงศ์ สุวรรณกวิน)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.สมภพ ผลไม้)

ไพบูลย์ เกียรติสุขคนารธร : วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์และการทำให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาหะโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบซั้วคู่. (A UNIFIED PWM METHOD FOR MATRIX CONVERTERS AND ITS CARRIER-BASED REALIZATION USING DIPOLAR MODULATION TECHNIQUE)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สมบุญรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 142 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งสามารถสร้างการมอดูเลตความกว้างพัลส์ในเชิงเวลาจริงที่หลากหลายและครอบคลุมวิธีการมอดูเลตที่นิยมใช้ในปัจจุบัน วิธีการมอดูเลตที่นำเสนอได้ใช้มุมมองที่พิจารณาการทำงานของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนการแปลงเชิงเรขาคณิต และใช้มุมมองดังกล่าวในการหาคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต รูปคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตที่หาได้จะเขียนอยู่ในรูปแบบทางอ้อมและแสดงอยู่ในรูปปริมาณเฟสขณะหนึ่ง จึงสะดวกในการใช้งานจริง นอกจากนี้วิทยานิพนธ์นี้ยังได้นำเสนอมุมมองใหม่ที่พิจารณาเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับและประยุกต์เทคนิคการมอดูเลตแบบซั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับมาใช้กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ การใช้มุมมองดังกล่าวทำให้การมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามารถสะท้อนให้เห็นแนวคิดการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ในลักษณะเดียวกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับและยังเป็นการต่อยอดองค์ความรู้เดิมจากทฤษฎีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ 2 และ 3 ระดับอีกด้วย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมการมอดูเลตที่ได้นำเสนอสามารถทำให้เป็นจริงได้โดยง่าย และทฤษฎีมีความถูกต้องและใช้งานได้จริงในเชิงปฏิบัติ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

5071874221: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MATRIX CONVERTER / UNIFIED PWM / CARRIER-BASED DIPOLAR MODULATION / GEOMETRIC TRANSFORMATION

PAIBOON KIATSOOKKANATORN : A UNIFIED PWM METHOD FOR MATRIX CONVERTERS AND ITS CARRIER-BASED REALIZATION USING DIPOLAR MODULATION TECHNIQUE. ADVISOR : ASST. PROF. SOMBOON SANGWONGWANICH, D.Eng., 142 pp.

This dissertation presents a unified PWM method for matrix converters and its carrier-based realization using dipolar modulation technique. The proposed PWM strategy can generate various types of PWM methods in real time and encompasses most of the well-known PWM strategies. This research proposes a viewpoint to consider that the matrix converter functions as a geometric transformation. This approach leads to a complete solution of the modulation matrix for the matrix converters. It is derived that every allowable modulation matrix can be expressed as an indirect modulation and in terms of instantaneous phase quantities. And its implementation requires minimal computational effort. Moreover, this dissertation presents a new viewpoint to consider the matrix converter as a generalized three-level inverter and to apply successfully the dipolar modulation technique of the three-level inverters to the matrix converters. The presented modulation technique can be considered as a generalization of the PWM theory of the two- and three-level inverters. The experimental results show that the proposed unified PWM algorithm can be realized very easily, and all the theoretical results are correct and feasible in practice.

Department :ELECTRICAL ENGINEERING.....Student's Signature.....

Field of Study : .ELECTRICAL ENGINEERING..Advisor's Signature.....

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือ พุ่มเทและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำในทุกๆ สิ่ง ตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและการดำเนินชีวิต ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบคุณ ผศ.ดร. สุรพงศ์ สุวรรณภิน ผู้ซึ่งเป็นรุ่นพี่และอาจารย์ที่ได้ช่วยชักนำให้ข้าพเจ้าเข้ามาศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกและให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ รศ.ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต ที่ให้แนวทางการดำเนินชีวิตนอกเหนือจากความรู้ทางด้านวิชาการ ขอขอบคุณ การสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช และทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ และขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มทร.สุวรรณภูมิทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ รศ.นภัทร วัจนเทพินทร์ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ผลักดันและสนับสนุนให้ข้าพเจ้าได้รับทุน “โครงการพัฒนาการจัดการศึกษายุทธศาสตร์การพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี”

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ นางรัตนติยา เกียรติสุขคนาธร ภรรยาของข้าพเจ้าที่ได้ดูแลเอาใจใส่และเป็นกำลังใจอย่างดียิ่ง และขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและญาติพี่น้องของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 โครงสร้างและสมการพื้นฐานของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	1
1.2 วิธีการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์รูปแบบต่างๆ ที่มีการนำเสนอ.....	2
1.2.1 วิธีการมอดูเลตของ Alesina และ Venturini (AV).....	2
1.2.2 วิธีการมอดูเลตแบบสเกลาร์.....	5
1.2.3 วิธีการมอดูเลตทางตรง.....	6
1.2.4 วิธีการมอดูเลตผ่านส่วนเชื่อมต่อโยงไฟตรงเทียม.....	8
1.2.5 วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม.....	9
1.2.5.1 การคำนวณค่าวัฏจักรงานสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	10
1.2.5.2 การเลือกเวกเตอร์ศูนย์และการจัดเรียงลำดับ.....	14
1.2.6 วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง.....	15
1.2.6.1 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับ.....	16
1.2.6.2 การคำนวณค่าวัฏจักรงานบนพื้นฐานของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ แบบทางอ้อม.....	17

บทที่	หน้า
1.2.7 วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงาน	19
1.2.7.1 นิยามของสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงาน (duty-cycle space vector)...	19
1.2.7.2 คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตจากแนวคิดสเปซเวกเตอร์ ค่าวัฏจักรงาน.....	21
1.2.7.3 แนวทางการเลือกสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงานเพื่อการมอดูเลต ในรูปแบบต่างๆ	22
1.3 การแบ่งรูปแบบการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์	23
1.4 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	26
1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	26
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ – ด้านวิชาการและด้านประยุกต์.....	27
1.7 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	27
2 การคำนวณหาเมทริกซ์การมอดูเลตโดยอาศัยการแปลงเชิงเรขาคณิต.....	28
2.1 มุมมองการแปลงเชิงเรขาคณิต	28
2.2 คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต M	30
3 แนวคิดใหม่ในการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซัฟวี่.....	35
3.1 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ.....	35
3.1.1 โครงสร้างและสมการพื้นฐาน.....	35
3.1.2 วิธีการสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์โดยอาศัยคลื่นพาหะ	36
3.1.2 การเลือกแรงดันลำดับศูนย์ v_z	37
3.2 การพัฒนาการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซัฟวี่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ.....	39
3.2.1 โครงสร้างและสมการพื้นฐาน.....	39
3.2.2 แนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซัฟวี่.....	40
3.2.3 การนำรูปสมการทั่วไปของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ มาสร้างแรงดันอ้างอิง ตามแนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซัฟวี่.....	43

บทที่	หน้า
4	วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....47
4.1	การใช้มอดูเลตแบบซัว์คู่กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์..... 47
4.2	การเลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ M_051
4.2.1	การมอดูเลตแบบ <3d> 53
4.2.2	การมอดูเลตแบบ <2u1d>53
4.2.2	การมอดูเลต <1n2d>53
4.2.3	การมอดูเลตแบบ <1b1u1d>54
4.3	การเลือกลำดับการสวิตช์.....54
4.3.1	ลำดับการสวิตช์เมื่อเลือกเฟสกลางเป็นจุดอ้างอิง..... 55
4.3.2	ลำดับการสวิตช์เมื่อเลือกเฟสสูงสุดเป็นจุดอ้างอิง 59
4.3.3	ลำดับการสวิตช์เมื่อเลือกเฟสต่ำสุดเป็นจุดอ้างอิง..... 63
5	ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพกับวิธีการมอดูเลตแบบต่างๆ 64
5.1	วิธีการมอดูเลตของ Alesina และ Venturini (AV) 64
5.2	วิธีการมอดูเลตแบบสเกลาร์ 65
5.3	วิธีการมอดูเลตผ่านส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเทียม 66
5.4	วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม 68
5.5	วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง 71
6	การทดสอบการทำงานของระบบ..... 79
6.1	ผลการจำลองการทำงาน 79
6.2	โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบ 87
6.3	ผลการทดสอบการทำงานของระบบจริง..... 89
6.3.1	ผลการทดสอบการมอดูเลตในรูปแบบต่างๆ 89
6.3.2	ผลการทดสอบการใช้เฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิง 91

บทที่	หน้า
6.3.3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนความถี่ของแรงดันด้านออก	95
6.3.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนดัชนีการมอดูเลต	105
6.3.5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตและเฟสอ้างอิงในเชิงเวลาจริง ..	112
6.3.6 ผลการทดสอบการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้า	114
6.3.6.1 ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง	114
6.3.6.2 ตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้าหลัง	119
6.3.6.3 ตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้า	124
7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	131
7.1 บทสรุป.....	131
7.2 ข้อเสนอแนะ	132
รายการอ้างอิง.....	134
ภาคผนวก.....	137
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	142

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในงานวิจัย [12] กรณีใช้เวกเตอร์ศูนย์“RRR”	14
1.2 การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง.....	16
1.3 การแบ่งรูปแบบของวิธีการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์	23
2.1 การแปลงเชิงเรขาคณิตพื้นฐานสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	29
4.1 ลำดับแรงดันด้านเข้าในแต่ละเซกเตอร์.....	48
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน <i>max</i> , <i>mid</i> , <i>min</i> กับแรงดันด้านเข้า R, S, T.....	49
4.3 การกำหนดตัวแปรและเมทริกซ์การมอดูเลตในแต่ละเซกเตอร์แรงดัน.....	50
5.1 รูปแบบการสวิตซ์ทั้งหมดของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์	68
5.2 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม ในงานวิจัย[12].....	72
5.3 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม ในงานวิจัย[13].....	73
5.4 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม ในงานวิจัย[14].....	74
5.5 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม ในงานวิจัย[15].....	75
5.6 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง ในงานวิจัย[16].....	76
5.7 ความสัมพันธ์กับวิธีการมอดูเลตแบบต่างๆ.....	78

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์	1
1.2 ค่าดัชนีการมอดูเลตสูงสุดเมื่อไม่มีการบวกแรงดันลำดับศูนย์ ($q=0.5$)	4
1.3 ค่าดัชนีการมอดูเลตสูงสุดเมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์ ($q=0.866$)	5
1.4 วงจรสมมูลของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบทางอ้อม โดยอาศัยแนวคิดส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเทียม	8
1.5 การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของส่วนวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์	10
1.6 รูปแบบการสวิตช์ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เทียบกับลักษณะการสวิตช์ ของวงจรเชื่อมโยงไฟตรงเทียม	13
1.7 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์กรณีใช้เวกเตอร์ศูนย์เป็น “RRR”	15
1.8 เวกเตอร์สำหรับสร้างแรงดันด้านออกของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง	15
1.9 รูปแบบการสวิตช์ที่เป็นไปได้ของเซกเตอร์ที่ ①	16
1.10 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ในเซกเตอร์ที่ ①	17
1.11 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรงที่ใช้แรงดันระหว่างเฟส ขนาดสูง กลาง และต่ำ	18
1.12 การแทน m_1 ทางเรขาคณิตในระนาบ $d - q$	19
1.13 ผลขององค์ประกอบศูนย์ m_0 ที่มีต่อตำแหน่งของสเปซเวกเตอร์วัฏจักรงาน m_1, m_2 และ m_3	22
2.1 โครงสร้างอย่างง่ายของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในรูปแบบทางตรง	28
2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิตของเวกเตอร์แรงดันและกระแส	29
2.3 ลักษณะการแปลงของเวกเตอร์แรงดันและกระแส	30
2.4 พฤติกรรมของเมทริกซ์การแปลงต่อลักษณะการแปลงของเวกเตอร์แรงดันและกระแส	33
3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ	35
3.2 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ	36
3.3 รูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับเมื่อเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่แตกต่างกัน	37

ภาพที่	หน้า
3.4 รูปคลื่นการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับที่สมมูลกับ วิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์.....	39
3.5 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ	40
3.6 แนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันด้านออกค่าสั่งในการมอดูเลต โดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั่วคู่.....	41
3.7 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั่วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ	42
3.8 สัญญาณอ้างอิงและคลื่นพาหะในการมอดูเลตแบบซั่วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ	44
3.9 รูปแบบการมอดูเลตที่สอดคล้องกับการเลือกค่า X, Z ตามสมการที่ (3.13).....	44
3.9 รูปคลื่นการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั่วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ	45
4.1 โครงสร้างของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เสมือนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ	47
4.2 รูปหกเหลี่ยมของเวกเตอร์แรงดันด้านเข้าสำหรับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์.....	48
4.3 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั่วคู่สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์	49
4.4 สัญญาณอ้างอิงและคลื่นพาหะในการมอดูเลตแบบซั่วคู่สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์.....	51
4.5 การเลื่อนสัญญาณอ้างอิงขึ้นหรือลงด้วยเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์.....	52
4.6 การใช้เวกเตอร์ศูนย์ของการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั่วคู่.....	53
4.7 ลำดับการสวิตช์เมื่อเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงที่แตกต่างกัน	55
4.8 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงเฟสกลาง	55
4.9 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงเฟสกลาง.....	56
4.10 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<2u1d> อ้างอิงเฟสกลาง	56
4.11 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ<2u1d> อ้างอิงเฟสกลาง กรณีแรงดันด้านออกค่าต่ำ	57
4.12 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ<2u1d> อ้างอิงเฟสกลาง กรณีแรงดันด้านออกค่าสูง.....	57
4.13 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<1n2d> อ้างอิงเฟสกลาง	58
4.14 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<1b1u1d> อ้างอิงเฟสกลาง	58
4.15 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ<1n2d>และ<1b1u1d> อ้างอิงเฟสกลาง	59

ภาพที่	หน้า
4.16 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงเฟสสูงสุด.....	60
4.17 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<2u1d> อ้างอิงเฟสสูงสุด.....	61
4.18 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<1n2d> อ้างอิงเฟสสูงสุด.....	61
4.19 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<1b1u1d> อ้างอิงเฟสสูงสุด.....	62
4.20 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ<3d> <2u1d> <1n2d> และ <1b1u1d> อ้างอิงเฟสสูงสุด	62
5.1 สเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกในแต่ละเซกเตอร์	69
5.2 การใช้เวกเตอร์แรงดันในการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมในงานวิจัย[12-14]	70
5.3 การใช้เวกเตอร์แรงดันในการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรงในงานวิจัย[16].....	71
5.4 อัลกอริทึมของการมอดูเลตเชิงเอกภาพ.....	77
6.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	80
6.2 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงกับเฟสกลาง	81
6.3 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงกับเฟสสูงสุด	82
6.4 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงกับเฟสต่ำสุด	82
6.5 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<2u1d> อ้างอิงกับเฟสกลาง (สมมูลกับวิธีการมอดูเลต[8], [16])	83
6.6 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<2u1d> อ้างอิงกับเฟสสูงสุด (สมมูลกับวิธีการมอดูเลต[14]).....	83
6.7 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<2u1d> อ้างอิงกับเฟสต่ำสุด	84
6.8 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<1n2d> อ้างอิงกับเฟสกลาง	84
6.9 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<1n2d> อ้างอิงกับเฟสสูงสุด (สมมูลกับวิธีการมอดูเลต[11]).....	85
6.10 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<1n2d> อ้างอิงกับเฟสต่ำสุด	85
6.11 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ <1b1u1d> และ <2u1d> อ้างอิงเฟสสูงสุด (สมมูลกับวิธีการมอดูเลต[13]).....	86
6.12 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบผสมโหมดและเฟสอ้างอิง (รูปแบบการสวิตช์ ที่ได้ปรับปรุงวิธีการมอดูเลต[12])	87

ภาพที่	หน้า
6.40 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้าอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 25Hz	104
6.41 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสกลาง ดัชนีการมอดูเลต 0.866 ความถี่ด้านออก 50Hz	106
6.42 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสกลาง ดัชนีการมอดูเลต 0.4 ความถี่ด้านออก 50Hz	106
6.43 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้าอิงเฟสกลาง ดัชนีการมอดูเลต 0.866 ความถี่ด้านออก 50Hz	107
6.44 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้าอิงเฟสกลาง ดัชนีการมอดูเลต 0.4 ความถี่ด้านออก 50Hz	107
6.45 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.866 ความถี่ด้านออก 50Hz	108
6.46 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.4 ความถี่ด้านออก 50Hz	108
6.47 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.866 ความถี่ด้านออก 50Hz	109
6.48 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.4 ความถี่ด้านออก 50Hz	109
6.49 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสต่ำสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.866 ความถี่ด้านออก 50Hz	110
6.50 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสต่ำสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.4 ความถี่ด้านออก 50Hz	110
6.51 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้าอิงเฟสต่ำสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.866 ความถี่ด้านออก 50Hz	111
6.52 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้าอิงเฟสต่ำสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.4 ความถี่ด้านออก 50Hz	111
6.53 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสกลาง เปลี่ยนเป็น $\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสสูงสุด	113

ภาพที่	หน้า
6.67 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$1n2d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า ถ้าหลัง เมื่อ $b=-0.5, d=0$ และ $q=0.8$	121
6.68 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า ถ้าหลัง เมื่อ $b=-0.5, d=0$ และ $q=0.8$	121
6.69 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า ถ้าหลัง เมื่อ $b=-0.5, d=0$ และ $q=0.8$	122
6.70 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า ถ้าหลัง เมื่อ $b=0, d=-0.5$ และ $q=0.6$	122
6.71 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า ถ้าหลัง เมื่อ $b=0, d=-0.5$ และ $q=0.6$	123
6.72 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า ถ้าหลัง เมื่อ $b=-0.5, d=-0.5$ และ $q=0.6$	123
6.73 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า ถ้าหลัง เมื่อ $b=-0.5, d=-0.5$ และ $q=0.6$	124
6.74 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$1n2d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0.5, d=0$ และ $q=0.6$	125
6.75 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0.5, d=0$ และ $q=0.6$	125
6.76 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0.5, d=0$ และ $q=0.6$	126
6.77 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$1n2d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0.5, d=0$ และ $q=0.8$	126
6.78 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0.5, d=0$ และ $q=0.8$	127
6.79 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0.5, d=0$ และ $q=0.8$	127

ภาพที่	หน้า
6.80 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0, d=0.5$ และ $q= 0.6$	128
6.81 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0, d=0.5$ และ $q= 0.6$	128
6.82 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0.5, d=0.5$ และ $q= 0.6$	129
6.80 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า นำหน้า เมื่อ $b=0.5, d=0.5$ และ $q= 0.6$	129

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$*$:	ค่าคำสั่ง
R, S, T :	แรงดันเฟสด้านเข้า ขณะหนึ่ง
u, v, w :	แรงดันเฟสด้านออก ขณะหนึ่ง
uv, vw, wu :	แรงดันระหว่างเฟสด้านออก ขณะหนึ่ง
u^*, v^*, w^* :	แรงดันเฟสด้านออกคำสั่ง ขณะหนึ่ง
v_Z :	แรงดันลำดับศูนย์
$[v_i]$:	เวกเตอร์แรงดันด้านเข้า 3 เฟส
$[v_o]$:	เวกเตอร์แรงดันด้านออก 3 เฟส
V_{im} :	แอมพลิจูดของแรงดันเฟสด้านเข้า
V_{om} :	แอมพลิจูดของแรงดันเฟสด้านออก
$[v_{iQ}]$:	เวกเตอร์ในแนวตั้งฉากกับแรงดันด้านเข้า
$[i_{oQ}]$:	เวกเตอร์ในแนวตั้งฉากกับกระแสด้านออก
\hat{v}_i :	ขนาดของแรงดันเฟสด้านเข้า
v_o^* :	สเปซเวกเตอร์แรงดันด้านออกคำสั่ง
V_x, V_y :	สเปซเวกเตอร์แรงดันในองค์ประกอบแกน x และ y ตามลำดับ
$\ v_o^*\ $:	ขนาดของสเปซเวกเตอร์แรงดันด้านออกคำสั่ง
$\ v_o\ , \ v_i\ $:	ขนาดของเวกเตอร์แรงดันด้านออกและด้านเข้า
V_{DC} :	แรงดันบัสไฟตรง
v_p :	แรงดันบัสไฟตรงบัสบวก
v_0 :	แรงดันกึ่งกลางบัสไฟตรง
v_N :	แรงดันบัสไฟตรงบัสลบ
u_p^*, u_N^* :	แรงดันคำสั่งด้านบัสบวกและบัสลบ
u_p, u_N :	แรงดันอ้างอิงด้านบัสบวกและบัสลบ
v_{ZP}, v_{ZN} :	แรงดันลำดับศูนย์ด้านบัสบวกและบัสลบ

i_R, i_S, i_T :	กระแสเฟสด้านเข้า ขณะหนึ่ง
i_u, i_v, i_w :	กระแสเฟสด้านออก ขณะหนึ่ง
$[i_i]$:	เวกเตอร์กระแสด้านเข้า 3 เฟส
$[i_o]$:	เวกเตอร์กระแสด้านออก 3 เฟส
I_{im} :	แอมพลิจูดของกระแสด้านเข้า
I_{om} :	แอมพลิจูดของกระแสด้านออก
I_{DC} :	กระแสบัลไฟตรง
\hat{i}_{iA} :	ขนาดของกระแสแอกทีฟด้านเข้า
\hat{i}_{iR} :	ขนาดของกระแสรีแอกทีฟด้านเข้า
\hat{i}_o :	ขนาดของกระแสด้านออก
$\ i_i^*\ $:	ขนาดของกระแสสเปซเวกเตอร์ด้านเข้าคำสั่ง
v_o, v_i :	สเปซเวกเตอร์แรงดันด้านออกและด้านเข้า
i_o, i_i :	สเปซเวกเตอร์กระแสด้านออกและด้านเข้า
p_o, p_i :	กำลังไฟฟ้าแอกทีฟด้านออกและด้านเข้า
q_o, q_i :	กำลังไฟฟารีแอกทีฟด้านออกและด้านเข้า
m_{ij} :	ฟังก์ชันการมอดูเลต
S_V :	เมทริกซ์การแปลงสเปซเวกเตอร์
\mathbf{M} :	เมทริกซ์การมอดูเลตขนาด 3x3
$\mathbf{M}_{[2 \times 2]}$:	เมทริกซ์การมอดูเลตขนาด 2x2
$\mathbf{I, J, K, L}$:	ฐานของเมทริกซ์ขนาด 2x2
$\mathbf{M}_u, \mathbf{M}_p, \mathbf{M}_q$:	เมทริกซ์การแปลงขนาด 2x2
$\mathbf{M}_U, \mathbf{M}_P, \mathbf{M}_Q$:	เมทริกซ์การแปลงขนาด 3x3
\mathbf{M}_0 :	เมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ขนาด 3x3
X, Y, Z :	ฟังก์ชันการมอดูเลตลำดับศูนย์
$[U_P], [U_N]$:	สัญญาณอ้างอิงด้านบัสบวกและบัสลบ
q :	ดัชนีการมอดูเลต
ω_i :	ความถี่เชิงมุมด้านเข้า
ω_o :	ความถี่เชิงมุมด้านออก

ϕ_i :	มุมเฟสของกระแสด้านเข้าเทียบกับแรงดันด้านเข้า
ϕ_o :	มุมเฟสของกระแสด้านออกเทียบกับแรงดันด้านออก
α_o :	มุมเฟสของแรงดันด้านออก
β_i :	มุมเฟสของกระแสด้านเข้า
$\cos \phi_i$:	ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
θ_i :	มุมเฟสของเวกเตอร์แรงดันด้านเข้า
θ_o :	มุมเฟสของเวกเตอร์แรงดันด้านออก
d_α, d_β :	ค่าสัมประสิทธิ์การงานของแอกที่เฟวกเตอร์ของแรงดันด้านออก
d_μ, d_ν :	ค่าสัมประสิทธิ์การงานของแอกที่เฟวกเตอร์ของกระแสด้านเข้า
d_{z_o} :	ค่าสัมประสิทธิ์การงานเวกเตอร์ศูนย์ของแรงดันด้านออก
d_{z_i} :	ค่าสัมประสิทธิ์การงานเวกเตอร์ศูนย์ของกระแสด้านเข้า
$d_{\alpha u}, d_{\beta u}, d_{\alpha v}, d_{\beta v}$:	ค่าสัมประสิทธิ์การงานของแอกที่เฟวกเตอร์ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์
d_0 :	ค่าสัมประสิทธิ์การงานของเวกเตอร์ศูนย์ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์
T_S :	คาบการสวิตช์

บทที่ 1

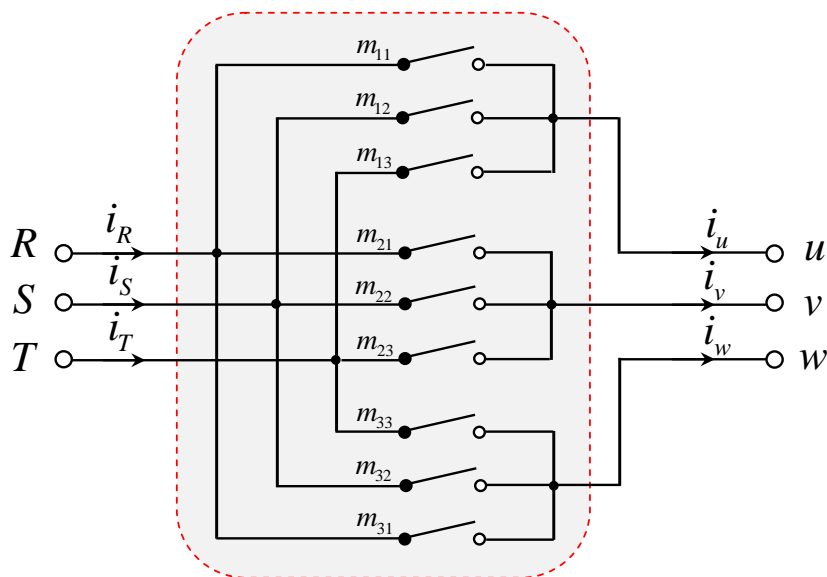
บทนำ

1.1 โครงสร้างและสมการพื้นฐานของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์คือ วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟสลับที่มีความถี่และขนาดแรงดันคงที่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับความถี่เฟสและขนาดของแรงดันได้ การควบคุมความถี่และขนาดของแรงดันที่ต้องการจะอาศัยการควบคุมช่วงเวลาการสวิตช์ด้วยการกำหนดเมทริกซ์การมอดูเลต (Modulation matrix) ที่เหมาะสม เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มีคุณลักษณะที่น่าสนใจดังนี้

1. ไม่ต้องใช้อุปกรณ์สะสมพลังงานทำให้วงจรมีขนาดเล็กและไม่มีข้อจำกัดอายุการใช้งานจากอุปกรณ์สะสมพลังงาน
2. แรงดันด้านออกสามารถปรับทั้งขนาด ความถี่ และเฟสได้อย่างอิสระ
3. กระแสด้านเข้าและด้านออกมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์
4. สามารถควบคุมกระแสหรือตัวประกอบกำลังทางด้านเข้าให้เป็นไปตามต้องการได้
5. ทำงานในโหมดคืนพลังงานได้

โครงสร้างของวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์แสดงได้ดังภาพที่ 1.1 ซึ่งจะประกอบด้วยสวิตช์ 9 ตัวทำหน้าที่ควบคุมการสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการ สมการความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสระหว่างด้านเข้าและด้านออกเป็นดังสมการที่ (1.1)-(1.3)



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}} \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}^T}_{\mathbf{M}^T} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$0 \leq m_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^3 m_{ij} = 1, i = \{1, 2, 3\}, j = \{1, 2, 3\} \quad (1.3)$$

1.2 วิธีการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์รูปแบบต่างๆที่มีการนำเสนอ

วิธีการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน หน้าที่หรือข้อกำหนดที่สำคัญในการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์คือการสร้างแรงดันด้านออกตามที่ต้องการ ในขณะที่เดียวกันจะต้องควบคุมให้กระแสหรือตัวประกอบกำลังด้านเข้าเป็นไปตามที่ต้องการด้วย ในอดีตมีงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีความหลากหลายมาก[1-27] รายละเอียดของวิธีการมอดูเลตแต่ละวิธีสามารถอธิบายได้ดังนี้

1.2.1 วิธีการมอดูเลตของ Alesina และ Venturini (AV) [28]

การวิจัยและพัฒนาเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์อย่างจริงจังเริ่มจาก Venturini ในปี 1980 [2] Venturini ได้นำเสนองจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีโครงสร้างเสมือนเมทริกซ์ของสวิตช์ที่นำกระแสได้สองทิศทางโดยเรียกว่า “เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์” และได้เสนอวิธีการมอดูเลตในรูปแบบทางตรง วิธีการมอดูเลตของ Venturini จะกำหนดให้แรงดันด้านเข้าและกระแสด้านออกของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นดังสมการที่ (1.4) และ (1.5) ตามลำดับ

$$[v_i] = V_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_i t + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

$$[i_o] = I_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t + \phi_o) \\ \cos(\omega_o t + \frac{2\pi}{3} + \phi_o) \\ \cos(\omega_o t + \frac{4\pi}{3} + \phi_o) \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

และกำหนดให้แรงดันด้านออกและกระแสด้านเข้าของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ เป็นดังสมการที่ (1.6) และ (1.7)

$$[v_o] = V_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_o t + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$$[i_i] = I_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t + \phi_i) \\ \cos(\omega_i t + \frac{2\pi}{3} + \phi_i) \\ \cos(\omega_i t + \frac{4\pi}{3} + \phi_i) \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

เมื่อแทนสมการที่ (1.4)-(1.7) ในสมการที่ (1.1) และ (1.2) สามารถหาเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขการสร้างแรงดันตามที่ต้องการได้ โดยเมทริกซ์ดังกล่าวเป็นผลรวมของเมทริกซ์ 2 รูปแบบ คือ

1. เมทริกซ์รูปแบบที่ 1 เป็น เมทริกซ์ที่แสดงได้ดังสมการที่ (1.8) ผลการแปลงแรงดันและกระแสที่เกิดจากการใช้เมทริกซ์นี้ จะทำให้มุมเฟสของกระแสด้านเข้ามีค่าเท่ากับแต่เครื่องหมายตรงข้ามกับมุมเฟสของกระแสด้านออกหรือเขียนได้ว่า $\phi_i = -\phi_o$
2. เมทริกซ์รูปแบบที่ 2 เป็น เมทริกซ์ที่แสดงได้ดังสมการที่ (1.9) ผลการแปลงแรงดันและกระแสที่เกิดจากการใช้เมทริกซ์นี้ จะทำให้มุมเฟสของกระแสด้านเข้ามีค่าเท่ากับมุมเฟสของกระแสด้านออกหรือเขียนได้ว่า $\phi_i = \phi_o$

$$\mathbf{M}_1 = \frac{1}{3} \left(\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} + q \begin{bmatrix} A & C & B \\ C & B & A \\ B & A & C \end{bmatrix} \right) \quad (1.8)$$

$$\mathbf{M}_2 = \frac{1}{3} \left(\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} + q \begin{bmatrix} A & C & B \\ B & A & C \\ C & B & A \end{bmatrix} \right) \quad (1.9)$$

เมื่อ

$$q = \frac{V_{om}}{V_{im}}$$

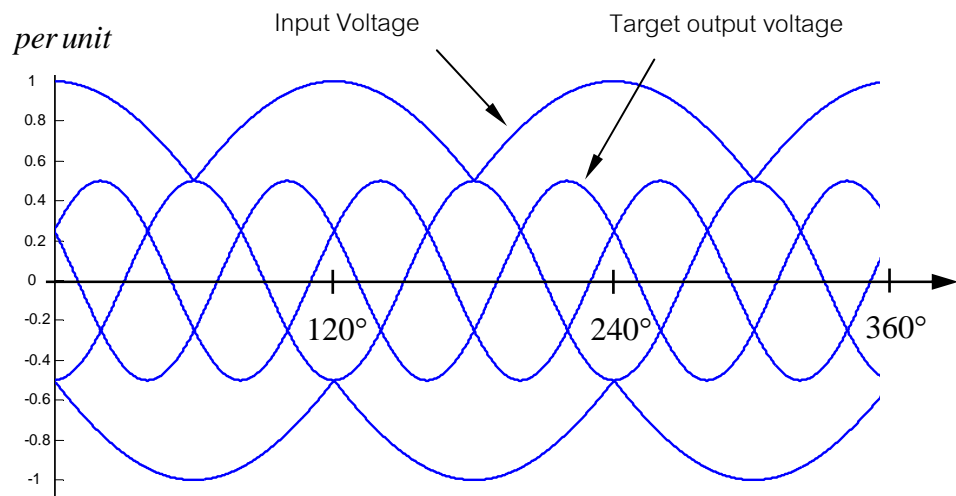
$$A = 2 \cos(\omega_m t) = e^{j\omega_m t} + e^{-j\omega_m t}$$

$$B = 2 \cos(\omega_m t - \frac{4\pi}{3}) = e^{j\omega_m t} e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{-j\omega_m t} e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

$$C = 2 \cos(\omega_m t - \frac{2\pi}{3}) = e^{j\omega_m t} e^{j\frac{4\pi}{3}} + e^{-j\omega_m t} e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\omega_m = -\omega_o - \omega_i \text{ สำหรับสมการที่ (1.8)} \quad \omega_m = \omega_o - \omega_i \text{ สำหรับสมการที่ (1.9)}$$

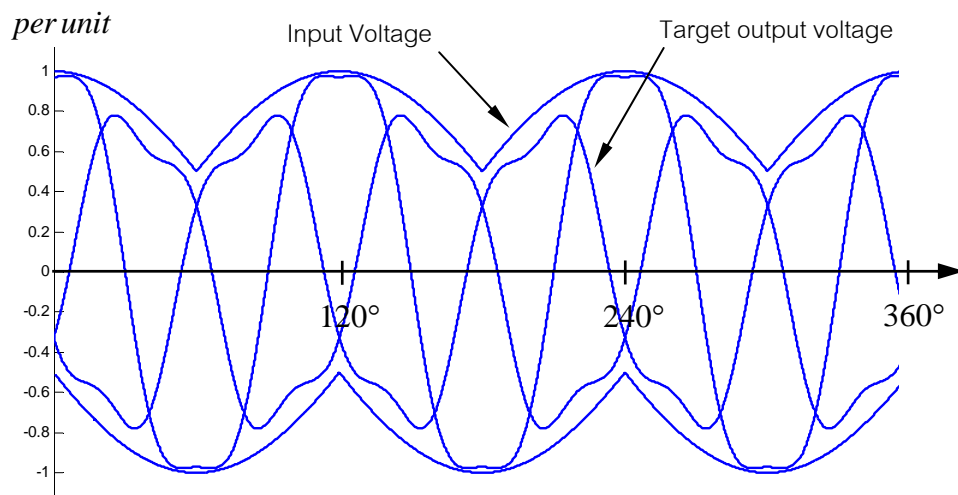
การนำเมทริกซ์การมอดูเลตในสมการที่ (1.8) และ (1.9) มาใช้ร่วมกัน จะทำให้สามารถปรับมุมเฟสของกระแสด้านเข้าในช่วงระหว่าง $-\phi_o$ ถึง ϕ_o ได้อย่างอิสระ รวมทั้งปรับค่าตัวประกอบกำลังให้เท่ากับหนึ่งได้ด้วย



ภาพที่ 1.2 ค่าดัชนีการมอดูเลตสูงสุดเมื่อไม่มีการบวกแรงดันลำดับศูนย์ ($q=0.5$)

จากภาพที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าวิธีการมอดูเลตแบบนี้จะให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกและด้านเข้าสูงสุด (ค่าดัชนีการมอดูเลต) เพียง 50% ต่อมา Alesina และ Venturini [3] ได้ปรับปรุงวิธีการมอดูเลตใหม่โดยบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ฮาร์มอนิกที่ 3 ตามสมการที่ (1.10) เข้าไปในค่าแรงดันด้านออก ทำให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกและด้านเข้าสูงสุดเพิ่มเป็น 86.6% แสดงดังภาพที่ 1.3

$$[v_o] = qV_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) - \frac{1}{6} \cos(3\omega_o t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cos(3\omega_i t) \\ \cos(\omega_o t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{6} \cos(3\omega_o t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cos(3\omega_i t) \\ \cos(\omega_o t + \frac{4\pi}{3}) - \frac{1}{6} \cos(3\omega_o t) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \cos(3\omega_i t) \end{bmatrix} \quad (1.10)$$



ภาพที่ 1.3 ค่าดัชนีการมอดูเลตสูงสุดเมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์ ($q=0.866$)

1.2.2 วิธีการมอดูเลตแบบสเกลาร์

งานวิจัย[4-6] ได้นำเสนอวิธีการมอดูเลตแบบสเกลาร์ การมอดูเลตแบบนี้เป็นวิธีที่พัฒนา มาจากการมอดูเลตของ Alesina และ Venturini การมอดูเลตในงานวิจัย[4] ได้เปลี่ยนมุมมองการ คำนวณค่าวัฏจักรงานจากแรงดันด้านเข้าและด้านออกที่อยู่ในรูปไซน์ฟังก์ชันมาใช้ค่าขณะหนึ่ง แทน ค่าขณะหนึ่งของแรงดันด้านเข้าจะได้จากตรวจจับและนำมาหาแรงดันเฟสที่มีขนาดสูงสุด กลาง และต่ำสุด ตามลำดับ สำหรับคำนวณค่าวัฏจักรงานตามสมการที่ (1.11)

$$\left. \begin{aligned} m_L &= \frac{(v_o^* - v_M)v_L}{1.5V_{im}^2} \\ m_K &= \frac{(v_o^* - v_M)v_K}{1.5V_{im}^2} \\ m_M &= 1 - m_L - m_K \end{aligned} \right\}; v_o^* = u, v, w \quad (1.11)$$

โดยที่ v_M, v_L และ v_K คือ $\max(|R|, |S|, |T|)$, $\min(|R|, |S|, |T|)$ และ $\text{mid}(|R|, |S|, |T|)$ ตามลำดับ สมการที่(1.11) จะให้ดัชนีการมอดูเลตสูงสุดเพียง 50% เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ดัชนีการมอดูเลตเพิ่มขึ้นเป็น 86.6% วิธีการมอดูเลตแบบนี้จะบวกแรงดันลำดับศูนย์ฮาร์โมนิกที่ 3 เข้ากับคำสั่งแรงดันด้านออกเหมือนกับวิธีการมอดูเลตของ Alesina และ Venturini ทำให้เทอมของแรงดันด้านออก v_o^* ในสมการที่ (1.11) เปลี่ยนเป็น v_o ตามสมการที่ (1.12) แทน

$$v_o = v_o^* + 0.25V_{im} \cos(3\omega_i t) - 0.12V_{im} \cos(3\omega_o t) \quad (1.12)$$

แม้ว่าการมอดูเลตแบบนี้จะนำเสนอมุมมองการคำนวณค่าวัฏจักรงานที่ใช้แรงดันด้านเข้าและด้านออกขณะหนึ่ง แต่สมการที่(1.12) ก็ชี้ให้เห็นว่าการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ก็ยังคงอิงกับเงื่อนไขแรงดันด้านเข้าเป็นฟังก์ชันไซน์เหมือนกรณีของ Alesina และ Venturini

1.2.3 วิธีการมอดูเลตทางตรงของ Clos

งานวิจัย[6] ได้นำเสนอการคำนวณค่าวัฏจักรงานโดยตรงและใช้การคำนวณจากค่าแรงดันด้านเข้าและกระแสด้านออกขณะหนึ่ง การมอดูเลตแบบนี้จะหารูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตโดยใช้มุมมองที่พิจารณากระแสด้านเข้าเป็นสององค์ประกอบคือกระแสแอกทีฟและรีแอกทีฟตามสมการที่ (1.13)

$$[i_i] = \underbrace{\hat{i}_{iA} \frac{[v_i]}{\hat{v}_i}}_{\text{Active current}} + \underbrace{\hat{i}_{iR} \frac{[v_{iQ}]}{\hat{v}_i}}_{\text{Reactive current}} \quad (1.13)$$

เมื่อ

$$\hat{v}_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{R^2 + S^2 + T^2}, [v_i] = \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix}, [v_{iQ}] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} S - T \\ T - R \\ R - S \end{bmatrix}, [i_i] = \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix}$$

กำหนดให้

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \frac{[v_i]^T}{\hat{v}_i} + \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \frac{[v_{iQ}]^T}{\hat{v}_i} + \mathbf{M}_0 \quad (1.14)$$

โดยที่ g_i และ q_i คือตัวแปรอิสระที่ทำหน้าที่ควบคุมกระแสแอกทีฟและรีแอกทีฟด้านเข้าตามลำดับ

และจะได้ว่า

$$[v_o^*] = \frac{3}{2} \hat{v}_i \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \text{ หรือ } [g_i] = \frac{2}{3} \frac{[v_o^*]}{\hat{v}_i}$$

จากความสัมพันธ์ของกระแสด้านเข้าและด้านออก

$$\begin{aligned} [i_i] &= \mathbf{M}^T [i_o] \\ &= \frac{[v_i]}{\hat{v}_i} \underbrace{[g_1 \quad g_2 \quad g_3]}_{\hat{i}_{iA}} [i_o] + \frac{[v_{iQ}]}{\hat{v}_i} \underbrace{[q_1 \quad q_2 \quad q_3]}_{\hat{i}_{iR}} [i_o] \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\hat{i}_{iA} = \frac{2}{3} \frac{[v_o^*]^T}{\hat{v}_i} [i_o]$$

ตัวแปรควบคุม $[q_i]$ สามารถเขียนในเทอมกระแสด้านออกได้ดังนี้คือ

$$[q_i] = b \frac{[i_o]}{\hat{i}_o} + n \frac{[i_{oQ}]}{\hat{i}_o}$$

โดยที่ $\hat{i}_o = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{i_u^2 + i_v^2 + i_w^2}$ และ $[i_{oQ}] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} i_v - i_w \\ i_w - i_u \\ i_u - i_v \end{bmatrix}$ ในที่นี้ b และ n คือพารามิเตอร์อิสระ

และจะได้ว่า

$$\hat{i}_{iR} = \frac{3}{2} \hat{i}_o b \text{ หรือ } b = \frac{2}{3} \frac{\hat{i}_{iR}}{\hat{i}_o} \text{ ส่วน พารามิเตอร์ } n \text{ เป็นค่าใดๆ ก็ได้}$$

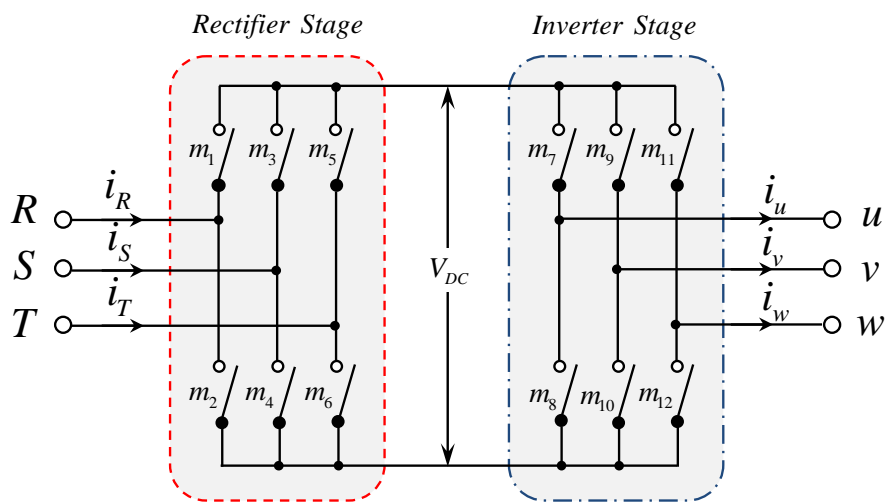
จากสมการที่ (1.14) สามารถหารูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} ได้ตามสมการที่

(1.15)

$$\mathbf{M} = \frac{2}{3} \frac{[v_o^*]}{\hat{v}_i} \frac{[v_i]^T}{\hat{v}_i} + b \frac{[i_o]}{\hat{i}_o} \frac{[v_{iQ}]^T}{\hat{v}_i} + n \frac{[i_{oQ}]}{\hat{i}_o} \frac{[v_{iQ}]^T}{\hat{v}_i} + \mathbf{M}_0 \quad (1.15)$$

1.2.4 วิธีการมอดูเลตผ่านส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเทียม

งานวิจัย[7-11] ได้นำเสนอวิธีการมอดูเลตที่แสดงอยู่ในรูปแบบทางอ้อม วิธีการมอดูเลตแบบนี้จะอาศัยแนวคิดที่มองเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนวงจรเรียงกระแสเชื่อมต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์ผ่านส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเทียม โดยไม่มีตัวเก็บประจุ ดังแสดงในภาพที่ 1.4



ภาพที่ 1.4 วงจรสมมูลของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบทางอ้อมโดยอาศัยแนวคิดส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเทียม

การมอดูเลตแบบนี้สามารถเพิ่มดัชนีการมอดูเลตให้เพิ่มขึ้นมากกว่า 86.6 % โดยงานวิจัย [7] ได้แบ่งขั้นตอนในการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ออกเป็นสองส่วนคือ (1) ส่วนของวงจรเรียงกระแส และ (2) ส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (1.16)

$$[v_o^*] = \mathbf{I}(\mathbf{R}[v_i]) \quad (1.16)$$

จากสมการที่ (1.16) เทอม \mathbf{R} มองได้ว่าเป็นเสมือนเมทริกซ์การมอดูเลตของวงจรเรียงกระแสซึ่งทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟตรงของส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเทียม และเทอม \mathbf{I} มองได้ว่าเป็นเสมือนเมทริกซ์การมอดูเลตของวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟสลับจากแรงดันไฟตรงเทียม กำหนดให้เทอม \mathbf{R} เป็นไปตามสมการที่ (1.17)

$$\mathbf{R} = K_R \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_i t + 4\pi/3) \end{bmatrix}^T \quad (1.17)$$

ดังนั้นส่วนของวงจรวเรียงกระแสจะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{R}[v_i] &= K_R V_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_i t + 4\pi/3) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_i t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \\ &= \frac{3K_R}{2} V_{im} \end{aligned} \quad (1.18)$$

และกำหนดให้ส่วนเทอม \mathbf{I} ของวงจรรินเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการที่ (1.19)

$$\mathbf{I} = K_I \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_o t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

สุดท้ายจะได้แรงดันด้านออกของวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (1.20)

$$[v_o] = [v_o^*] + v_z = (\mathbf{I}R + \mathbf{M}_0)[v_i] = qV_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_o t + 4\pi/3) \end{bmatrix} + v_z \quad (1.20)$$

เมื่อ $q = \frac{3K_R K_I}{2}$ คือ ดัชนีการมอดูเลต และ v_z คือแรงดันลำดับศูนย์

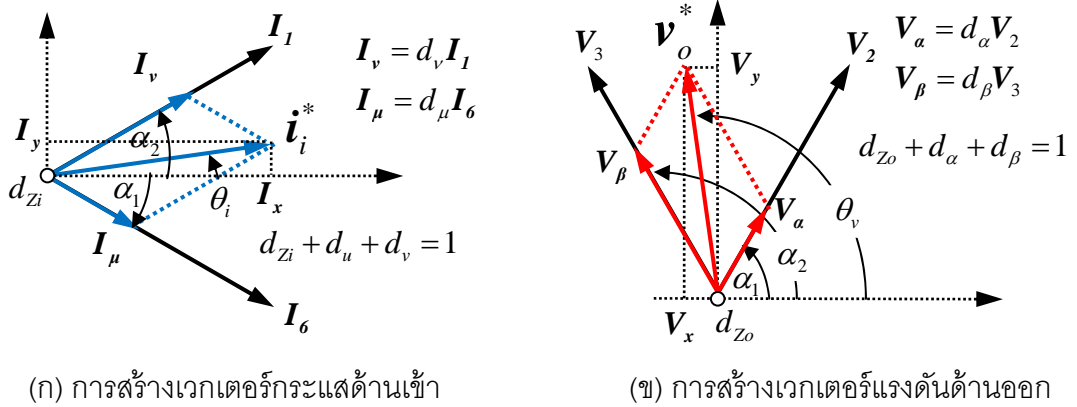
1.2.5 วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม

การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ทั้งในรูปแบบทางตรงและทางอ้อมจะอาศัยสเปซเวกเตอร์แรงดันด้านออกของแต่ละรูปแบบการสวิตช์ ซึ่งจะมีทั้งหมด 27 รูปแบบและสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้คือ

1. กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยเวกเตอร์หมุน (rotating vectors) 6 เวกเตอร์ เวกเตอร์หมุนจะเกิดในกรณีที่แต่ละเฟสของแรงดันด้านออกต่อกับแต่ละเฟสของแรงดันด้านเข้าที่ไม่ซ้ำกัน
2. กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยเวกเตอร์สลับ (alternating vectors) 18 เวกเตอร์ เวกเตอร์สลับจะเกิดในกรณีที่สองเฟสของแรงดันด้านออกต่อกับแรงดันด้านเข้าที่เฟสเดียวกัน
3. กลุ่มที่ 3 เรียกว่า เวกเตอร์ศูนย์ (zero vectors) ซึ่งเป็นกรณีที่ทั้งสามเฟสของแรงดันด้านออกต่อกับแรงดันด้านเข้าที่เฟสเดียวกัน

งานวิจัย[12-15] นำเสนอวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม การมอดูเลตแบบนี้อาศัยแนวคิดสวนเชื่อมโยงไฟตรงเทียม โดยใช้การมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์คำนวณค่าวัฏจักรงานของวงจรวเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์แทนการมอดูเลตแบบสเกลาร์

จากภาพที่ 1.4 ส่วนของวงจรรีขงกระแสจะทำหน้าที่ควบคุมกระแสด้านเข้าและส่วนของวงจรรีขงอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันด้านออก ตัวอย่างของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านเข้าที่อยู่ในเซกเตอร์ที่ ① และแรงดันด้านออกที่อยู่ในเซกเตอร์ที่ ② แสดงได้ดังภาพที่ 1.5(ก) และ 1.5(ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 1.5 การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของส่วนวงจรรีขงกระแสและอินเวอร์เตอร์

1.2.5.1 การคำนวณค่าวัฏจักรงานสำหรับวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม

การหาค่าวัฏจักรงานสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในการมอดูเลตแบบนี้จะอาศัยการคำนวณค่าวัฏจักรงานจากส่วนของวงจรรีขงอินเวอร์เตอร์และวงจรรีขงกระแส และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองส่วนผ่านส่วนเชื่อมโยงแรงดันไฟตรงเสมือน

ก) การคำนวณค่าวัฏจักรงานของวงจรรีขงอินเวอร์เตอร์สำหรับแรงดันด้านออก

แนวทางการหาค่าวัฏจักรงานเพื่อสร้างแรงดันด้านออกตามต้องการจะเริ่มจากการแปลงแรงดันด้านออกค่าสั่งให้อยู่ในรูปของสเปซเวกเตอร์ตามสมการที่ (1.21)

$$v_o^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \tag{1.21}$$

และเมื่อใช้ความสัมพันธ์ในภาพที่ 1.5(ข) จะได้

$$\left. \begin{aligned} V_x &= V_\alpha \cos \alpha_1 + V_\beta \cos \alpha_2 \\ V_y &= V_\alpha \sin \alpha_1 + V_\beta \sin \alpha_2 \end{aligned} \right\} \tag{1.22}$$

โดยที่ตัวห้อย x,y แสดงถึงองค์ประกอบในแนวแกน x และ y ตัวห้อย α, β แสดงองค์ประกอบในแนวเวกเตอร์แยกที่ V_2 และ V_3 ตามลำดับ และ α_1, α_2 คือมุมเฟสของเวกเตอร์ V_2 และ V_3

ค่าวัฏจักรงาน d_α, d_β ของเวกเตอร์แอกทีฟที่สอดคล้องกับสมการที่ (1.22) จะได้ตามสมการที่ (1.23)

$$\begin{bmatrix} d_\alpha \\ d_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_\alpha}{T_s} \\ \frac{T_\beta}{T_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_\alpha}{V_{dc}} \\ \frac{V_\beta}{V_{dc}} \end{bmatrix} = q_v \begin{bmatrix} \sin(\alpha_2 - \theta_v) \\ \sin(\theta_v - \alpha_1) \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

เมื่อ $q_v = \frac{2\|v_o^*\|}{\sqrt{3}V_{dc}}$ คือ ดัชนีการมอดูเลตของวงจรมอเตอร์

เมื่อสเปซเวกเตอร์ของแรงดันด้านออกอยู่ในเซกเตอร์ที่ ② ตามภาพที่ 1.5(ข) เราจะได้มุม $60 \leq \theta_v \leq 120$ และ $\alpha_1 = 60, \alpha_2 = 120$ องศา ดังนั้นค่าวัฏจักรงานจะได้ตามสมการที่ (1.24) โดยจะเลือกใช้ เวกเตอร์แอกทีฟ $V_2(110)$ และ $V_3(010)$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันเฟสด้านออกตามสมการที่ (1.25)

$$\begin{bmatrix} d_\alpha \\ d_\beta \\ d_{0v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_\alpha \\ d_\beta \\ 1 - d_\alpha - d_\beta \end{bmatrix} = q_v \begin{bmatrix} \sin(2\pi/3 - \theta_v) \\ \sin(\theta_v - \pi/3) \\ 1 - \sin(\theta_v) \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_\alpha - d_\beta \\ d_\alpha + d_\beta \\ -(d_\alpha + d_\beta) \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} = q_v \begin{bmatrix} \sqrt{3} \cos(\theta_v) \\ \sin(\theta_v) \\ -\sin(\theta_v) \end{bmatrix} \frac{V_{DC}}{2} \quad (1.25)$$

ข) การคำนวณค่าวัฏจักรงานของวงจรรีแรงกระแสสำหรับกระแสด้านเข้า

ในการทำงานเดียวกัน การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์สำหรับกระแสด้านเข้าจะได้ค่าวัฏจักรงานตามสมการที่ (1.26)

$$\begin{bmatrix} d_\mu \\ d_\nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_\mu}{T_s} \\ \frac{T_\nu}{T_s} \end{bmatrix} = q_i \begin{bmatrix} \sin(\alpha_2 - \theta_i) \\ \sin(\theta_i - \alpha_1) \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

เมื่อ $q_i = \frac{2\|i_i^*\|}{\sqrt{3}I_{DC}}$ คือ ดัชนีการมอดูเลตของวงจรรีแรงกระแส

เมื่อสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านเข้าอยู่ในเซกเตอร์ที่ ① ตามภาพที่ 1.5(ก) เราจะได้ $\alpha_1 = -30$ และ $\alpha_2 = 30$ องศา ดังนั้นค่าวัฏจักรงานจะได้ตามสมการที่ (1.27) โดยมุมเฟสของกระแสด้านเข้าจะอยู่ในช่วง $-30 \leq \theta_i \leq 30$ ในกรณีนี้เราจะเลือกใช้เวกเตอร์แอกทีฟ $I_6(RS)$ และ $I_1(RT)$ ซึ่งจะได้ค่ากระแสด้านเข้าเฉลี่ยตามสมการที่ (1.28)

$$\begin{bmatrix} d_\mu \\ d_\nu \\ d_{0i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_\mu \\ d_\nu \\ 1 - d_\mu - d_\nu \end{bmatrix} = q_i \begin{bmatrix} \sin(\pi/6 - \theta_i) \\ \sin(\pi/6 + \theta_i) \\ 1 - \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

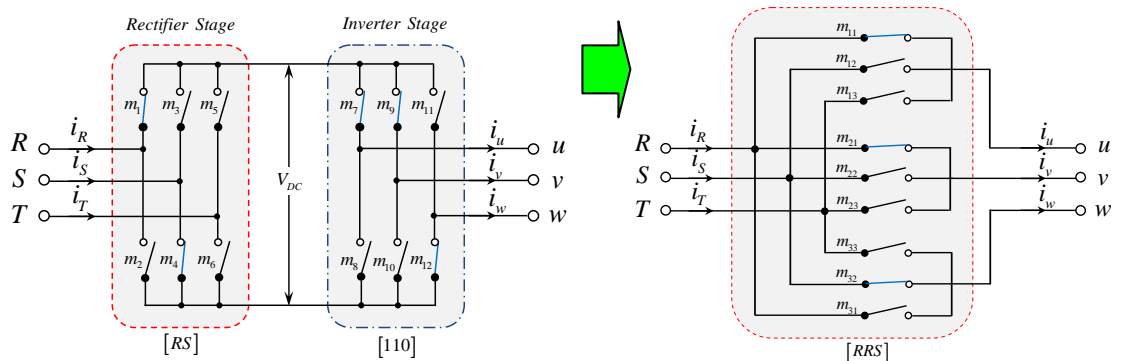
$$\begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} = \mathbf{M}_i I_{DC} = \begin{bmatrix} d_\mu + d_\nu \\ -d_\mu \\ -d_\nu \end{bmatrix} I_{DC} = q_i \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ -\sin(\pi/6 - \theta_i) \\ -\sin(\pi/6 + \theta_i) \end{bmatrix} I_{DC} \quad (1.28)$$

และ

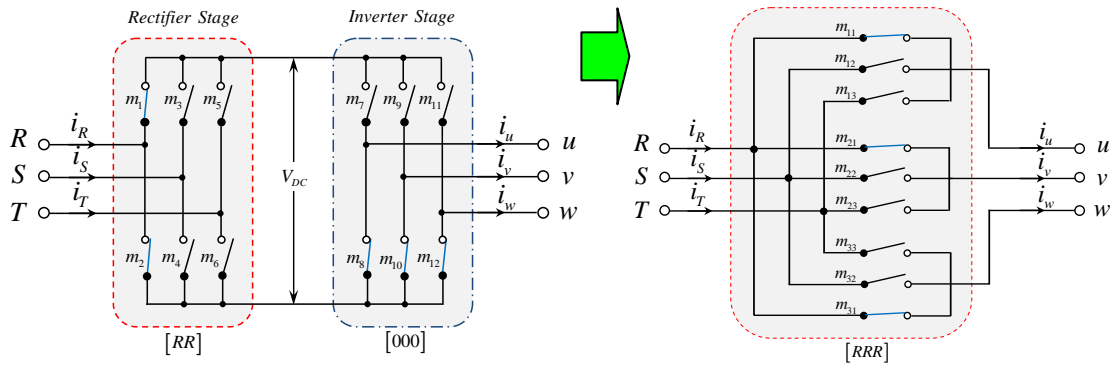
$$V_{DC} = \mathbf{M}_i^T \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_\mu + d_\nu) & -d_\mu & -d_\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

ค) การคำนวณค่าวัฏจักรงานสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

จากแนวคิดการมอดูเลตแบบทางอ้อมที่มองเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนวงจรเรียงกระแสต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์ ลักษณะการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์สามารถแทนด้วยลักษณะการสวิตช์ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ได้ดังภาพที่ 1.6 ซึ่งเป็นกรณีตัวอย่างการสวิตช์เมื่อใช้เวกเตอร์แอกทีฟและเวกเตอร์ศูนย์



(ก) กรณีใช้เวกเตอร์แอกทีฟ



(ข) กรณีใช้เวกเตอร์ศูนย์

ภาพที่ 1.6 รูปแบบการสวิตช์ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เทียบกับลักษณะการสวิตช์ของวงจรเชื่อมโยงไฟตรงเทียม

เมื่อนำสมการการรวมอดุลิตของวงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีแรงดันไฟตรง V_{DC} เป็นตัวเชื่อมโยงมาพิจารณาจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าและด้านออกเป็นดังสมการที่ (1.30)

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_\alpha - d_\beta \\ d_\alpha + d_\beta \\ -(d_\alpha + d_\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (d_\mu + d_\nu) & -d_\mu & -d_\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_{\alpha\mu} - d_{\beta\mu} \\ d_{\alpha\mu} + d_{\beta\mu} \\ -(d_{\alpha\mu} + d_{\beta\mu}) \end{bmatrix} [R - S] + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_{\alpha\nu} - d_{\beta\nu} \\ d_{\alpha\nu} + d_{\beta\nu} \\ -(d_{\alpha\nu} + d_{\beta\nu}) \end{bmatrix} [R - T] \quad (1.31)$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} d_{\alpha\mu} &= d_\alpha d_\mu = q \sin(2\pi/3 - \theta_v) \sin(\pi/6 - \theta_i) = T_{\alpha\mu} / T_S \\ d_{\beta\mu} &= d_\beta d_\mu = q \sin(\theta_v - \pi/3) \sin(\pi/6 - \theta_i) = T_{\beta\mu} / T_S \\ d_{\alpha\nu} &= d_\alpha d_\nu = q \sin(2\pi/3 - \theta_v) \sin(\pi/6 + \theta_i) = T_{\alpha\nu} / T_S \\ d_{\beta\nu} &= d_\beta d_\nu = q \sin(\theta_v - \pi/3) \sin(\pi/6 + \theta_i) = T_{\beta\nu} / T_S \\ d_0 &= 1 - d_{\alpha\mu} - d_{\beta\mu} - d_{\alpha\nu} - d_{\beta\nu} = T_0 / T_S \\ q &= q_v q_i \end{aligned} \right\}$$

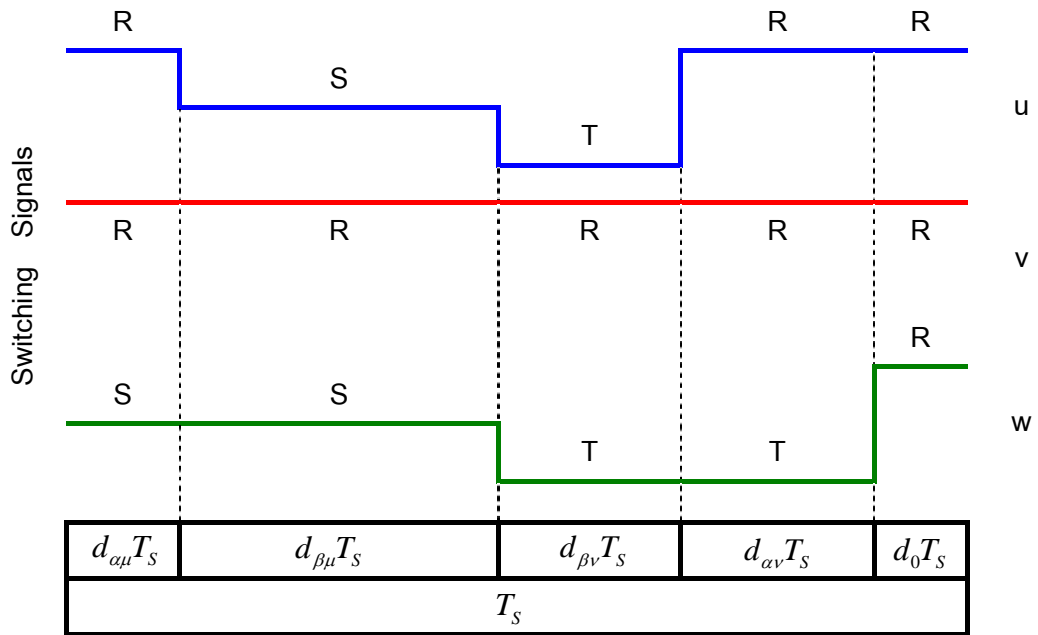
1.2.5.2 การเลือกเวกเตอร์ศูนย์และการจัดเรียงลำดับ

การมอดูเลตแบบนี้นอกจากจะต้องคำนวณค่าวิญจักรงานแล้วยังต้องเลือกเวกเตอร์ศูนย์ และจัดเรียงลำดับด้วย การเลือกเวกเตอร์ศูนย์และการจัดเรียงลำดับจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบการ สวิตช์ ดังนั้นจึงมีเทคนิคในการเลือกเวกเตอร์ศูนย์และการจัดเรียงลำดับมากมาย โดยมีข้อกำหนด หลักๆ คือ ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นการมอดูเลตสูงสุด จำนวนครั้งการสวิตช์น้อย และการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์เกิดขึ้นที่ละเฟส การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในงานวิจัย [12] มีเทคนิคการเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของเวกเตอร์ $d_{\alpha\mu} \rightarrow d_{\beta\mu} \rightarrow d_{\beta\nu} \rightarrow d_{\alpha\nu} \rightarrow d_0$ แสดงดังตารางที่ 1.1 เมื่อสเปซเวกเตอร์ของแรงดันอยู่ในเซกเตอร์ที่ ② และกระแสอยู่ในเซกเตอร์ที่ ① จะได้ $V_\alpha = V_2(110)$, $V_\beta = V_3(010)$, $I_\mu = I_6(RS)$ และ $I_\nu = I_1(RT)$

ตารางที่ 1.1 การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในงานวิจัย [12] กรณีใช้เวกเตอร์ศูนย์“RRR”

Rectifier	RS (I_6)	RS (I_6)	RT (I_1)	RT (I_1)	RR (I_0)
Inverter	110 (V_2)	010 (V_3)	010 (V_3)	110 (V_2)	000,111 ($V_{0,7}$)
Space vector	<i>RRS</i>	<i>SRS</i>	<i>TRT</i>	<i>RRT</i>	<i>RRR</i>
Duty cycle	$d_{\alpha\mu}$	$d_{\beta\mu}$	$d_{\beta\nu}$	$d_{\alpha\nu}$	d_0

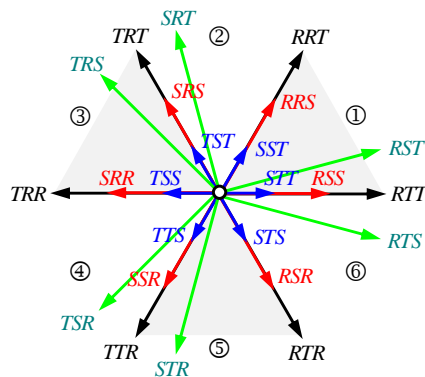
การมอดูเลตแบบนี้จะเลือกเวกเตอร์ศูนย์ที่เชื่อมต่อกับเฟสด้านเข้าที่มีค่าแรงดันสูงสุด(ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า “เฟสสูงสุด”) คือ “RRR” การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ตามตารางที่ 1.1 จะได้รูปแบบการสวิตช์เป็นแบบไม่สวิตช์ 1 เฟส และจะได้จำนวนการสวิตช์ 10 ครั้งต่อคาบการสวิตช์ดังแสดงในภาพที่ 1.7



ภาพที่ 1.7 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์กรณีใช้เวกเตอร์ศูนย์เป็น “RRR”

1.2.6 วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง

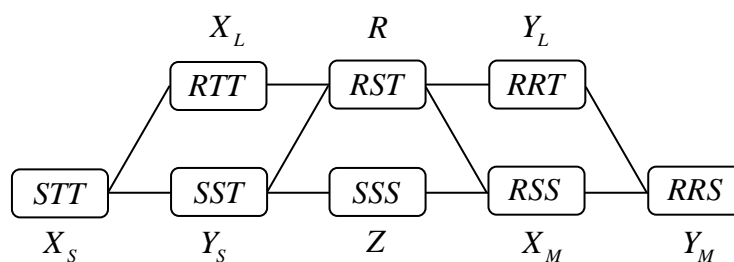
วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ทางอ้อมมองว่าเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยส่วนของวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์โดยมีไฟตรงเทียมเป็นส่วนเชื่อมโยงจึงมีข้อจำกัดในการใช้สเปซเวกเตอร์โดยไม่สามารถใช้กลุ่มของเวกเตอร์หมุนที่แต่ละเฟสของแรงดันด้านออกจะต่อวงจรกับแรงดันด้านเข้าไม่ซ้ำกัน ทำให้เหลือสเปซเวกเตอร์ที่ใช้ได้เพียง 21 เวกเตอร์เท่านั้น งานวิจัย [16] ได้นำเสนอการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรงที่มองเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงไฟสลับจากแหล่งจ่ายไปเป็นไฟสลับที่ต้องการโดยตรง (AC→AC) ทำให้สามารถใช้สเปซเวกเตอร์ครบทั้งหมด 27 เวกเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 1.8



ภาพที่ 1.8 เวกเตอร์สำหรับสร้างแรงดันด้านออกของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง

1.2.6.1 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับ

แม้ว่าวิธีการมอดูเลตแบบนี้จะมีจำนวนเวกเตอร์มากกว่าวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม แต่การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับสำหรับการมอดูเลตแบบนี้ยังคงมีเทคนิคและวิธีการในทำนองเดียวกัน การเลือกเวกเตอร์ในงานวิจัย[16] จะเลือก 5 เวกเตอร์จากทั้งหมด 8 เวกเตอร์ และหากสเปซเวกเตอร์ของแรงดันด้านออกอยู่ในเซกเตอร์ที่ ① รูปแบบการสวิตช์ที่เป็นไปได้จะเป็นไปตามภาพที่ 1.9



ภาพที่ 1.9 รูปแบบการสวิตช์ที่เป็นไปได้ของเซกเตอร์ที่ ①

ภาพที่ 1.9 แสดงเวกเตอร์ทั้งหมดของเซกเตอร์ที่ ① จะเห็นได้ว่าการมอดูเลตแบบนี้จะมีเวกเตอร์ครบทั้งสามกลุ่ม โดยจะมีเวกเตอร์หมุนอยู่ด้วยหนึ่งเวกเตอร์แทนด้วยเวกเตอร์ R และมีเวกเตอร์สลับแทนด้วยสัญลักษณ์ X_s, X_m, X_l และ Y_s, Y_m, Y_l โดยตัวห้อย S, M, L หมายถึงขนาดของแรงดันระหว่างเฟสด้านเข้า ต่ำสุด กลาง และสูงสุด ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีเวกเตอร์ศูนย์แทนด้วยเวกเตอร์ Z ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้เฉพาะเวกเตอร์ศูนย์ที่เชื่อมต่อกับเฟสที่มีขนาดต่ำสุดเพื่อลดแรงดันโหมดร่วม ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่แรงดันด้านเข้า $|R| > |T| > |S|$ เวกเตอร์ศูนย์ที่ใช้คือ “SSS”

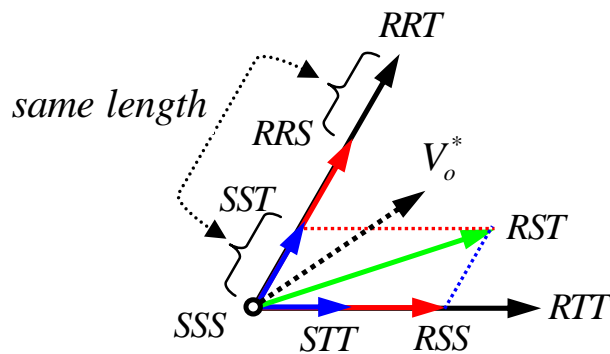
จากเงื่อนไขและข้อกำหนดของงานวิจัย[16] จะได้การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรงตามตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 การจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง

Space vector	RRS	RSS	RST, SSS	SST	STT
Duty cycle	$d_5 / 2$	$d_4 / 2$	$d_3 / 2, d_0 / 2$	$d_2 / 2$	$d_1 / 2$

1.2.6.2 การคำนวณค่าวัฏจักรงานบนฐานของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม

ค่าวัฏจักรงานของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรงสามารถคำนวณได้ 2 ทาง คือการคำนวณโดยตรงและการคำนวณบนฐานของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม แต่การคำนวณโดยตรงมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นในที่นี้จะเลือกแสดงการคำนวณบนฐานของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมโดยอาศัยความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ในภาพที่ 1.10



ภาพที่ 1.10 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ในเซกเตอร์ที่ ①

เมื่ออาศัยความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ต่างๆในภาพที่ 1.10 จะได้

$$\left. \begin{aligned} STT &= RTT - RSS \\ SST &= RRT - RRS \\ RST &= RSS + SST \\ &= RSS + RRT - RRS \end{aligned} \right\} (1.32)$$

ค่าวัฏจักรงาน $d_{\alpha\mu}, d_{\beta\mu}, d_{\beta\nu}, d_{\alpha\nu}$ ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม ในกรณีเซกเตอร์ที่ ① จะใช้เวกเตอร์แอกทีฟ RSS, RRS, RRT, RTT ตามลำดับ เมื่อทราบแล้วว่าเวกเตอร์แอกทีฟตามตารางที่ 1.2 คือ STT, SST, RST, RSS, RRS ดังนั้นจะใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1.32) เพื่อหาค่าวัฏจักรงาน d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 โดยอาศัยการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการที่ (1.33) และ (1.34)

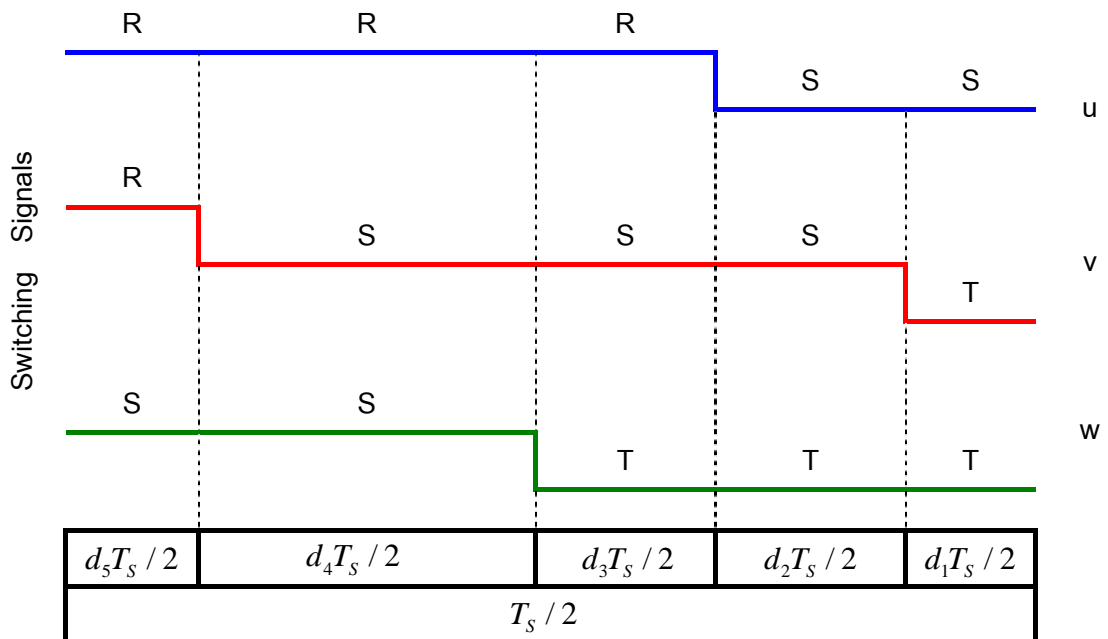
$$\left. \begin{aligned} v_o^* &= RSSd_{\alpha\mu} + RRSd_{\beta\mu} + RRTd_{\beta\nu} + RTTd_{\alpha\nu} \\ &= RSSd_{\alpha\mu} + RRSd_{\beta\mu} + (RSS + STT)d_{\beta\nu} + (RRS + SST)d_{\alpha\nu} \\ &= STTd_{\beta\nu} + SSTd_{\alpha\nu} + RSS(d_{\alpha\mu} + d_{\beta\nu}) + RRS(d_{\beta\mu} + d_{\alpha\nu}) \end{aligned} \right\} (1.33)$$

$$\left. \begin{aligned}
 v_o^* &= STTd_1 + SSTd_2 + RSTd_3 + RSSd_4 + RRSd_5 \\
 &= STTd_1 + SSTd_2 + (RSS + SST)d_3 + RSSd_4 + RRSd_5 \\
 &= STTd_1 + SST(d_2 + d_3) + RSS(d_3 + d_4) + RRSd_5
 \end{aligned} \right\} \quad (1.34)$$

เทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการที่ (1.33) กับ (1.34) จะได้ค่าวิญจักรงาน d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 เป็นดังสมการที่ (1.35)

$$\left. \begin{aligned}
 d_1 &= d_{\beta v} \\
 d_2 &= 1 - 2d_{\beta v} - d_{\alpha u} - d_{\beta u} - d_{\alpha v} \\
 d_3 &= -1 + 2d_{\beta v} + d_{\alpha u} + 2d_{\alpha v} + d_{\beta u} \\
 d_4 &= 1 - d_{\beta v} - 2d_{\alpha v} - d_{\beta u} \\
 d_5 &= d_{\beta u} + d_{\alpha v} \\
 d_0 &= 1 - d_1 - d_2 - d_4 - d_5
 \end{aligned} \right\} \quad (1.35)$$

การมอดูเลตแบบนี้จะได้รูปแบบการสวิตช์ที่มีจำนวนการสวิตช์เท่ากับ 8 ครั้งต่อคาบการสวิตช์ดังแสดงในภาพที่ 1.11



ภาพที่ 1.11 รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรงที่ใช้แรงดันระหว่างเฟสขนาดสูง กลาง และต่ำ

1.2.7 วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงาน

นอกจากแนวคิดการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ต้องอาศัยการเลือกสเปซเวกเตอร์ที่เหมาะสมร่วมกับการคำนวณค่าวัฏจักรงานทั้งในส่วนของวงจรรีขงกระแสและวงจรรีขงอินเวอร์เตอร์แล้ว ยังมีงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการมอดูเลตโดยอาศัยแนวคิดสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงาน[17-21] เพื่อคำนวณค่าวัฏจักรงานโดยตรง

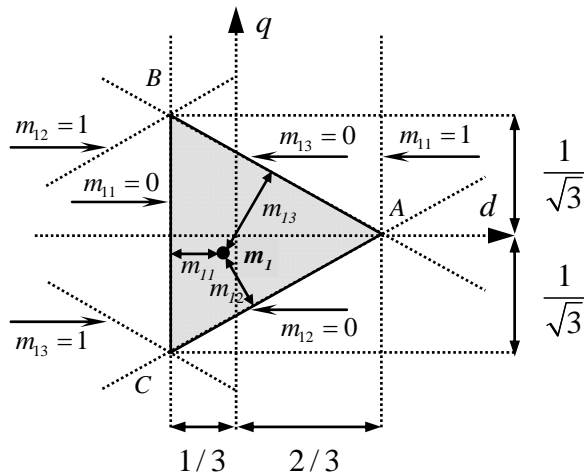
1.2.7.1 นิยามของสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงาน (duty-cycle space vector)

จากสมการที่ (1.1) ฟังก์ชันการมอดูเลตหรือค่าวัฏจักรงานสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสเปซเวกเตอร์ m_1, m_2 และ m_3 ได้ตามสมการที่ (1.36) ทั้งนี้เพื่อความสะดวก เราจะแสดงสเปซเวกเตอร์ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนแทนการแสดงในรูปของเวกเตอร์สองมิติ และสัญลักษณ์ในสมการจำนวนเชิงซ้อน "*" จะหมายถึง ค่าสังยุคของจำนวนเชิงซ้อน

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \triangleq \frac{2}{3} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j0} \\ e^{j2\pi/3} \\ e^{j4\pi/3} \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

และจากข้อกำหนด $\sum_{j=1}^3 m_{ij} = 1$ จะได้

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} + \text{Re} \left(\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j0} & e^{j2\pi/3} & e^{j4\pi/3} \end{bmatrix}^* \right) \quad (1.37)$$



ภาพที่ 1.12 การแทน m_1 ทางเรขาคณิตในระนาบ $d-q$

สเปซเวกเตอร์วัฏจักรงาน m_1 แสดงในเชิงเรขาคณิตในระนาบ $d-q$ ได้ดังภาพที่ 1.12 ตำแหน่งของ เวกเตอร์ m_1 จะอยู่ในบริเวณพื้นที่สามเหลี่ยมด้านเท่า ABC โดยระยะห่างระหว่าง m_1 กับด้านของสามเหลี่ยมแต่ละด้านก็คือค่า m_{11}, m_{12} และ m_{13} ตามลำดับ ถ้า m_1 อยู่ที่จุดยอดของสามเหลี่ยม เช่น ที่มุม A จะได้ว่า $m_{11} = 1$ และ $m_{12} = m_{13} = 0$ ซึ่งหมายความว่า จะไม่มีการสวิตช์เกิดขึ้นในระหว่างคาบการสวิตช์ แต่ถ้า m_1 อยู่ที่ด้านใดด้านหนึ่งของสามเหลี่ยม เช่น ด้าน BC จะได้ $m_{11} = 0$ และ $m_{12} \neq 0, m_{13} \neq 0$ ในกรณีนี้ จะมีการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์ 1 ครั้ง และถ้า m_1 อยู่ภายในพื้นที่สามเหลี่ยม ก็จะได้ $m_{11} \neq 0, m_{12} \neq 0, m_{13} \neq 0$ ซึ่งหมายถึงว่าจะเกิดการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์ 2 ครั้ง

เราสามารถนำสเปซเวกเตอร์วัฏจักรงาน m_1, m_2 และ m_3 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์(สมการที่ (1.1) และ (1.2)) ได้ใหม่เป็นสมการที่ (1.38) และ (1.39) ตามลำดับ

$$v_o = \frac{v_i}{2} (m_1^* + m_2^* e^{j(4\pi/3)} + m_3^* e^{j(2\pi/3)}) + \frac{v_i^*}{2} (m_1 + m_2 e^{j(2\pi/3)} + m_3 e^{j(4\pi/3)}) \quad (1.38)$$

$$i_i = \frac{i_o}{2} (m_1 + m_2 e^{j(4\pi/3)} + m_3 e^{j(2\pi/3)}) + \frac{i_o^*}{2} (m_1 + m_2 e^{j(2\pi/3)} + m_3 e^{j(4\pi/3)}) \quad (1.39)$$

กำหนดให้ m_d, m_i และ m_0 นิยามตามสมการที่ (1.40)-(1.42)

$$m_d \triangleq \frac{1}{3} (m_1 + m_2 e^{j(2\pi/3)} + m_3 e^{j(4\pi/3)}) \quad (1.40)$$

$$m_i \triangleq \frac{1}{3} (m_1 + m_2 e^{j(4\pi/3)} + m_3 e^{j(2\pi/3)}) \quad (1.41)$$

$$m_0 \triangleq \frac{1}{3} (m_1 + m_2 + m_3) \quad (1.42)$$

m_d, m_i และ m_0 คือ องค์ประกอบตรง(direct) องค์ประกอบผกผัน(inverse) และองค์ประกอบศูนย์(zero) ของสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงานตามลำดับ ในทางกลับกันค่าสเปซเวกเตอร์วัฏจักรงาน m_1, m_2 และ m_3 สามารถเขียนในรูปของ m_d, m_i และ m_0 ได้เป็น

$$m_1 = (m_d + m_i + m_0) \quad (1.43)$$

$$m_2 = (m_d e^{j(4\pi/3)} + m_i e^{j(2\pi/3)} + m_0) \quad (1.44)$$

$$m_3 = (m_d e^{j(2\pi/3)} + m_i e^{j(4\pi/3)} + m_0) \quad (1.45)$$

เมื่อนำสมการที่ (1.40)-(1.42) แทนในสมการที่ (1.38)และ(1.39) จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกและกระแสด้านเข้าตามสมการที่(1.46)และ(1.47)

$$v_o = \frac{3}{2}v_i m_i^* + \frac{3}{2}v_i^* m_d \quad (1.46)$$

$$i_i = \frac{3}{2}i_o m_i + \frac{3}{2}i_o^* m_d \quad (1.47)$$

1.2.7.2 คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตจากแนวคิดสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงาน

คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต สามารถแสดงได้ตามสมการที่ (1.48) และ (1.49)

$$v_o = \frac{3}{2}v_i m_i^* + \frac{3}{2}v_i^* m_d \quad (1.48)$$

$$\text{Re}[(i_o m_i + i_o^* m_i) \psi^*] = 0 \quad (1.49)$$

เมื่อ ψ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่กำหนดมุมค่าตัวประกอบกำลังหรือมุมเฟสของกระแสด้านเข้า

สังเกตได้ว่าจะมีเฉพาะตัวแปร m_d และ m_i ที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ (1.48) และ (1.49) ส่วนตัวแปร m_o นั้นจะเลือกโดยพิจารณาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้การมอดูเลตตามที่ต้องการซึ่งจะไม่มีผลต่อแรงดันด้านออกและกระแสด้านเข้า สุดท้ายจะได้คำตอบทั่วไปตามสมการที่ (1.50) และ (1.51)

$$m_d = \frac{v_o \psi}{3 \text{Re}(v_i \psi^*)} + \frac{\lambda}{v_i^* i_o^*} \quad (1.50)$$

$$m_i = \frac{v_o^* \psi}{3 \text{Re}(v_i \psi^*)} + \frac{\lambda}{v_i^* i_o} \quad (1.51)$$

พารามิเตอร์ λ และ m_o คือตัวแปรอิสระซึ่งสามารถใช้ในการกำหนดรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายและครอบคลุมรูปแบบการสวิตช์ของวิธีการมอดูเลตแบบอื่นๆ และเมื่อกำหนดให้ $\lambda = 0$ จะได้

$$m_d = \frac{q}{3 \cos \varphi_i} e^{j\alpha_o} e^{j\beta_i} \quad (1.52)$$

$$m_i = \frac{q}{3 \cos \varphi_i} e^{-j\alpha_o} e^{j\beta_i} \quad (1.53)$$

1.2.7.3 แนวทางการเลือกสเปซเวกเตอร์ค่าวิญจักรงานเพื่อการมอดูเลตในรูปแบบต่าง ๆ

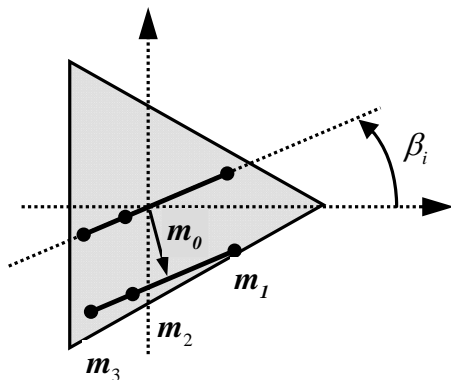
เมื่อนำสมการที่ (1.50) และ (1.51) แทนในสมการที่ (1.43)-(1.45) จะได้

$$m_k = \underbrace{\frac{2 v_o e^{j(k-1)\frac{2\pi}{3}}}{3 \operatorname{Re}(v_i \psi^*)}}_{A_k} \psi + j \underbrace{\frac{2\lambda}{v_i^2 i_o^2} \left[i_o j e^{j(k-1)\frac{2\pi}{3}} \right]}_{\lambda B_k} v_i + m_0, \quad k = 1, 2, 3 \tag{1.54}$$

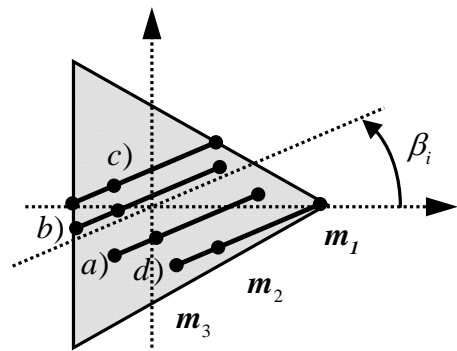
$$= A_k + \lambda B_k + m_0$$

เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายในที่นี้จะกำหนดให้ $\lambda = 0$ ในกรณีนี้ค่าสเปซเวกเตอร์ m_1, m_2 และ m_3 จะอยู่บนเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 1.13(ก) ความยาวของเส้นตรงจะขึ้นอยู่กับขนาดของดัชนีการมอดูเลตและการบวกเวกเตอร์แรงดันลำดับศูนย์ m_0 จะทำให้เส้นตรงดังกล่าวจะเลื่อนไปมาอยู่ภายในสามเหลี่ยม ตำแหน่งของเส้นตรงจะสะท้อนถึงรูปแบบการมอดูเลตซึ่งจะมี 4 รูปแบบแสดงดังในภาพที่ 1.13(ข) คือ

- a) จุดปลายบนเส้นตรงอยู่ภายในสามเหลี่ยม ในกรณีนี้จะเกิดการสวิตช์โดยรวมทั้งสามเฟส 12 ครั้ง
- b) จุดปลายของเส้นตรงปลายหนึ่งอยู่บนด้านหนึ่งของสามเหลี่ยม ในกรณีนี้จะเกิดการสวิตช์ 10 ครั้ง
- c) จุดปลายของเส้นตรงทั้งสองปลายอยู่ด้านหนึ่งของสามเหลี่ยม ในกรณีนี้จะเกิดการสวิตช์ 8 ครั้ง
- d) จุดปลายของเส้นตรงปลายหนึ่งอยู่ที่มุมของสามเหลี่ยม ในกรณีนี้จะเกิดการสวิตช์ 8 ครั้ง



(ก) การเลื่อนตำแหน่งของ m_1, m_2 และ m_3



(ข) รูปแบบการมอดูเลตที่เป็นไปได้

ภาพที่ 1.13 ผลขององค์ประกอบศูนย์ m_0 ที่มีต่อตำแหน่งของสเปซเวกเตอร์วิญจักรงาน m_1, m_2 และ m_3

1.3 การแบ่งรูปแบบการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

การแบ่งรูปแบบการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์อาจแบ่งตามรูปลักษณะของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} ได้เป็นรูปแบบทางตรง (direct modulation) และรูปแบบทางอ้อม (indirect modulation) วิธีการมอดูเลตในรูปแบบทางตรง จะมองวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่แปลงแรงดันไฟสลับด้านเข้าเป็นแรงดันไฟสลับด้านออกโดยตรง (direct ac-ac conversion; AC \rightarrow AC) และรูปลักษณะของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} จะไม่สามารถแยกเป็นส่วนของวงจรเรียงกระแสและส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้ ในขณะที่วิธีการมอดูเลตในรูปแบบทางอ้อมจะมองว่า วงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ทำงานเสมือนวงจรเรียงกระแสต่อร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ผ่านส่วนเชื่อมโยงแรงดันไฟตรงเทียม (ac-dc-ac conversion; AC \rightarrow DC \rightarrow AC) รูปลักษณะของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} ในกรณีนี้สามารถแยกออกเป็นสองส่วนคือส่วนของวงจรเรียงกระแสและส่วนของวงจรอินเวอร์เตอร์ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้การมอดูเลตอาจจะแบ่งตามลักษณะการพิจารณาปริมาณแรงดันและกระแสทั้งสามเฟสหรือองค์ประกอบในเมทริกซ์การมอดูเลตว่าเป็นปริมาณเฟส(สเกลาร์)หรือปริมาณสเปซเวกเตอร์ จากแนวคิดดังกล่าวข้างต้นสามารถแบ่งรูปแบบของวิธีการมอดูเลตที่สำคัญๆ ได้ตามตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 การแบ่งรูปแบบของวิธีการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

	รูปแบบทางตรง (AC \rightarrow AC)	รูปแบบทางอ้อม (AC \rightarrow DC \rightarrow AC)
รูปปริมาณ เฟสหรือสเกลาร์ (scalar modulation)	<ul style="list-style-type: none"> • วิธีการมอดูเลตของ Alesina และ Venturini [2-3] • วิธีการมอดูเลตแบบสเกลาร์ (scalar modulation) [4-6] 	<ul style="list-style-type: none"> • วิธีการมอดูเลตผ่านส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเทียม (fictitious DC link) [7-11]
รูปปริมาณ สเปซเวกเตอร์ (space vector modulation; SVM)	<ul style="list-style-type: none"> • วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง (direct SVM) [16] • วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงาน (duty-cycle space vector) [17-21] 	<ul style="list-style-type: none"> • วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม (indirect SVM) [12-15]

จากวิธีการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์รูปแบบต่างๆที่มีการนำเสนอตามที่ได้ อธิบายไว้ในเบื้องต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

วิธีการมอดูเลตแบบ Alesina และ Venturini [2-3] เป็นวิธีการมอดูเลตที่มีการคำนวณ ค่อนข้างมากและการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าตามที่ต้องการจะต้องรู้มุมเฟสของกระแส ด้านออกเสมอ นอกจากนี้การมอดูเลตแบบนี้ยังมีข้อจำกัดว่าเงื่อนไขของแรงดันด้านเข้าจะต้อง เป็นแบบ 3 เฟสสมดุล และที่สำคัญมีจำนวนการสวิตช์ที่มาก 12 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์ โดยทั่วไปองค์ประกอบของเมทริกซ์การมอดูเลตทางตรงนั้นจะไม่ได้แสดงอยู่ในเทอมขนาดของ แรงดันหรือกระแสขณะหนึ่ง [2-5] ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากในทางปฏิบัติ ถึงแม้ว่างานวิจัย[6] จะนำเสนอการใช้แรงดันด้านเข้าและกระแสด้านออกขณะหนึ่งในการมอดูเลต อย่างไรก็ตาม เมทริกซ์การมอดูเลตที่ได้นำเสนอยังไม่ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าเป็นรูปแบบทั่วไปจริง นอกจากนี้ การมอดูเลตแบบนี้ยังต้องอาศัยข้อมูลกระแสด้านออกจึงอาจมีปัญหาในช่วงการทำงานกรณี ไร้อโหลดและช่วงเริ่มต้นของการทำงานได้

งานวิจัย[7-11]เป็นวิธีการมอดูเลตที่สะท้อนให้เห็นภาพของเมทริกซ์การมอดูเลตในเชิง การแปลงแรงดันและกระแสได้ดีกว่าแบบทางตรง อย่างไรก็ตามการมอดูเลตแบบนี้ยังมีความ ยุ่งยากในการคำนวณค่าวัฏจักรงาน เนื่องจากต้องคำนวณทั้งส่วนวงจรรีเลย์กระแสและวงจรรีเลย์ อินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ข้อจำกัดทางโครงสร้างของเมทริกซ์การมอดูเลตทำให้วิธีการมอดูเลต แบบนี้เป็นเพียงส่วนย่อยหรือไม่ก็ยังคงไม่เป็นที่ชัดเจน ถึงแม้ว่างานวิจัย[9-11]สามารถสร้างวิธีการ มอดูเลตได้หลายรูปแบบ แต่วิธีการมอดูเลตของงานวิจัยดังกล่าวไม่สามารถทำให้เกิดสถานะ การสวิตช์ซึ่งใช้แรงดันทั้งสามเฟสพร้อมกันได้

การมอดูเลตสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม[12-15] เป็นวิธีการมอดูเลตที่ขยายมุมมองส่วน เชื่อมโยงไฟตรงเทียม ดังนั้นการมอดูเลตแบบนี้จึงไม่สามารถใช้กลุ่มเวกเตอร์หมุนได้ ทำให้มี ข้อจำกัดของรูปแบบการสวิตช์เหลือเพียง 21 รูปแบบเท่านั้น โดยทั่วไปการมอดูเลตแบบนี้ จำเป็นต้องอาศัยการเลือกเวกเตอร์แอกทีฟ(Active vector)และเวกเตอร์ศูนย์(Zero vector)ร่วมกับการ จัดเรียงลำดับเวกเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออก ช่วงเวลา การสวิตช์ของสเปซเวกเตอร์นั้นจะได้จากการคำนวณค่าวัฏจักรงานของทั้งส่วนวงจรรีเลย์กระแส และอินเวอร์เตอร์ สุดท้ายจึงได้สัญญาณขับนำของสวิตช์แต่ละตัวจากสถานะการสวิตช์และ ช่วงเวลาการสวิตช์ของสเปซเวกเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้สัญญาณขับนำ สวิตช์ดังกล่าวสำหรับการมอดูเลตสเปซเวกเตอร์แบบนี้จึงต้องการการคำนวณค่าวัฏจักรงานที่มี ความซับซ้อนและต้องใช้ข้อมูลกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกสำหรับเลือกเวกเตอร์ที่ได้

กำหนดไว้(Look-up table) นอกจากนั้นค่าวัฏจักรงานที่คำนวณได้ยังไม่สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเฟสขณะหนึ่ง ด้วยเหตุนี้การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์จึงมีความซับซ้อนมากกว่าอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ การมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ทางอ้อมเป็นวิธีการที่มีงานวิจัย[12-15] ได้นำเสนอรูปแบบการสวิตซ์ที่หลากหลายมากแต่ยังไม่มีวิธีการมอดูเลตของงานวิจัยใดสามารถรวมรูปแบบการสวิตซ์เหล่านี้ในเชิงเอกภาพได้

วิธีการมอดูเลตสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง[16-21] เป็นวิธีที่ใช้สเปซเวกเตอร์ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ครบทั้ง 27 เวกเตอร์ งานวิจัย[17-21] คือการมอดูเลตที่ใช้รูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตโดยอาศัยแนวคิดสเปซเวกเตอร์ค่าวัฏจักรงาน อย่างไรก็ตามการมอดูเลตแบบนี้ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของฟังก์ชันการสวิตซ์ในเชิงการแปลงแรงดันและกระแสได้อย่างชัดเจนและยังไม่สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเฟสด้วย ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงไม่ใช่เรื่องง่ายแม้ว่าวิธีการมอดูเลตแบบนี้จะสามารถสร้างรูปแบบการสวิตซ์ได้หลายรูปแบบ แต่ในงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถจัดลำดับการสวิตซ์ที่หลากหลายและครอบคลุมวิธีการมอดูเลตแบบอื่นๆ ได้ นอกจากนั้นการมอดูเลตแบบนี้ยังไม่สามารถใช้งานได้ในกรณีที่กระแสด้านเข้ามีเพียงกระแสรีแอกทีฟเท่านั้น

วิธีการมอดูเลตที่ได้กล่าวมาทั้งหมดต่างก็เป็นวิธีการที่ใช้การคำนวณค่อนข้างมากและมีความยุ่งยากซับซ้อนทำให้ยากต่อการเข้าใจ นอกจากนี้แต่ละวิธีจะให้รูปแบบการสวิตซ์ที่ต่างกันและมีแนวคิดในการมอดูเลตที่ต่างกันอย่างยิ่งจึงมีความลำบากในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการสวิตซ์จากแบบหนึ่งไปยังอีกแบบหนึ่ง ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีงานวิจัยใดสามารถรวมรูปแบบการสวิตซ์เชิงเอกภาพได้ นอกจากนั้น ทฤษฎีการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในปัจจุบันยังไม่มีคุณสมบัติเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์ 2 หรือ 3 ระดับ ดังนั้นเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์จึงยังต้องการทฤษฎีการมอดูเลตหรืออัลกอริทึมที่ดีซึ่งประกอบด้วย

- ครอบคลุมรูปแบบการสวิตซ์ในการมอดูเลตแบบต่างๆที่นิยมใช้ในปัจจุบัน
- คำนวณง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน
- อยู่บนฐานของการสร้างแรงดันขณะหนึ่ง
- ใช้การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะ
- ทำให้เข้าใจกระบวนการมอดูเลตได้ดีขึ้น
- เป็นรูปแบบทั่วไปของทฤษฎีการมอดูเลตสำหรับอินเวอร์เตอร์ 2 หรือ 3 ระดับ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้บรรลุมหุ้ข้อดังกล่าวข้างต้นด้วยการนำเสนอกรอบงานเชิงเอกภาพสำหรับทฤษฎีการมอดูเลตของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยอาศัยมุมมองการแปลงเชิงเรขาคณิตและมุมมองของคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะมีประเด็นหลักที่นำเสนอ ดังนี้คือ

- เสนออัลกอริทึมการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะเชิงเอกภาพซึ่งครอบคลุมวิธีการมอดูเลตแบบต่างๆที่รู้จักกันดีของการมอดูเลตเชิงสเกลาร์และสเปซเวกเตอร์
- หารูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตโดยอาศัยมุมมองการแปลงเชิงเรขาคณิตเพื่อชี้ให้เห็นว่าเมทริกซ์การมอดูเลตทางตรงทุกอันสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบทางอ้อมได้
- แสดงเมทริกซ์การมอดูเลตในเทอมค่า ณ ขณะหนึ่งของแรงดันด้านเข้าและด้านออกและทำให้เห็นพฤติกรรมในเชิงการแปลงแรงดันและกระแสได้อย่างชัดเจนซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติ
- พัฒนาทฤษฎีวิธีการมอดูเลตแบบขั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับมาใช้กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้สามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายโดยอาศัยคลื่นพาหะได้โดยง่าย

1.4 วัตถุประสงค์การวิจัย

พัฒนาวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่สามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายและครอบคลุมรูปแบบการสวิตช์ในการมอดูเลตแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยวิธีการมอดูเลตที่พัฒนาขึ้นต้องสามารถทำให้เป็นจริงได้บนฐานการมอดูเลตด้วยคลื่นพาหะและมีจำนวนครั้งของการสวิตช์ที่น้อย

1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

พัฒนาวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่สามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายและครอบคลุมรูปแบบการสวิตช์ในการมอดูเลตแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยมีประเด็นที่เกี่ยวข้องคือ

- ก) การหารูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันการมอดูเลตที่ครอบคลุมการมอดูเลตทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์โดยอาศัยการแปลงเชิงเรขาคณิต
- ข) การพัฒนาวิธีการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะที่ให้รูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายได้ด้วยขั้นตอนที่ง่ายโดยอาศัยการเลือกแรงดันลำดับศูนย์และเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงที่เหมาะสม

ค) การหาารูปแบบการมอดูเลตที่มีจำนวนครั้งของการสวิตซ์ที่น้อย

ทั้งนี้ผลทางทฤษฎีในหัวข้อ ก)-ค) จะตรวจสอบโดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และการทดลองจริง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ – ด้านวิชาการและด้านประยุกต์

1. ได้วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ที่ให้รูปแบบการสวิตซ์ที่หลากหลายและครอบคลุมรูปแบบการสวิตซ์ในการมอดูเลตแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน
2. ได้รูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันการมอดูเลตที่ครอบคลุมการมอดูเลตทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์และสามารถอธิบายพฤติกรรมการแปลงเชิงแรงดันและกระแสของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ได้อย่างชัดเจน
3. เกิดการพัฒนาวิธีการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะที่ให้รูปแบบการสวิตซ์ที่หลากหลายได้ด้วยขั้นตอนที่ง่าย
4. ได้รูปแบบการมอดูเลตที่มีจำนวนครั้งของการสวิตซ์ที่น้อยและมีดัชนีการมอดูเลตสูงสุดรวมทั้งตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง

1.7 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการมอดูเลตแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบันและวิเคราะห์รูปแบบการสวิตซ์ของแต่ละวิธี
2. หาารูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันการมอดูเลตที่ครอบคลุมการมอดูเลตทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์
3. พัฒนาการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะที่ให้รูปแบบการสวิตซ์ที่หลากหลาย
4. หาารูปแบบการมอดูเลตที่มีจำนวนครั้งของการสวิตซ์ที่น้อย
5. จำลองการทำงานของวงจรเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อทดสอบแนวคิด
6. ออกแบบระบบทั้งในส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์พร้อมทั้งทดสอบการทำงาน
7. เก็บข้อมูล ประเมินผล และสรุปผล
8. เขียนวิทยานิพนธ์

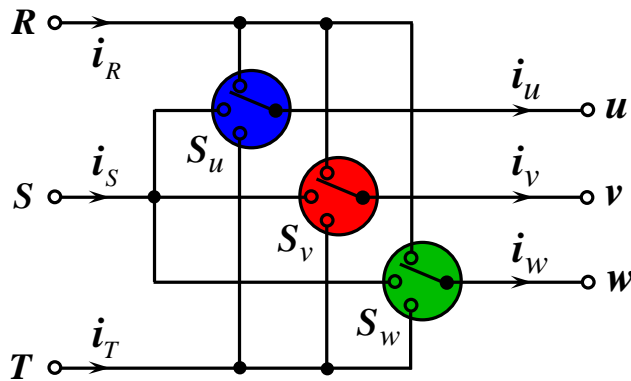
บทที่ 2

การคำนวณหาเมทริกซ์การมอดูเลตโดยอาศัยการแปลงเชิงเรขาคณิต

บทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการหาคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตโดยใช้มุมมองที่พิจารณาเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนการแปลงเชิงเรขาคณิต คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตจะครอบคลุมการมอดูเลตทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ รูปคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตที่หาได้จะแสดงอยู่ในเทอมของแรงดันด้านเข้าและด้านออก ขณะหนึ่ง เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้จริงในเชิงปฏิบัติ

2.1 มุมมองการแปลงเชิงเรขาคณิต

เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างในรูปแบบทางตรงดังแสดงในภาพที่ 1.1 สามารถนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังภาพที่ 2.1 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่อยู่ในรูปแบบทางตรงได้ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างอย่างง่ายของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในรูปแบบทางตรง

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* + v_z \\ v^* + v_z \\ w^* + v_z \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{v}_o = \mathbf{M} \mathbf{v}_i \quad (2.1)$$

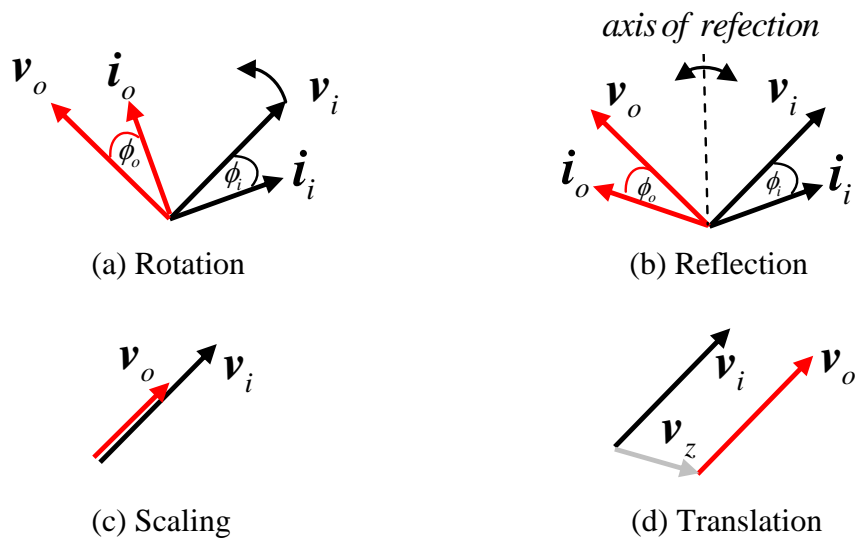
$$\begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{i}_i = \mathbf{M}^T \mathbf{i}_o \quad (2.2)$$

$$0 \leq m_{ij} \leq 1, \quad \sum_{j=1}^3 m_{ij} = 1, \quad i = \{1, 2, 3\}, j = \{1, 2, 3\} \quad (2.3)$$

โดยที่

- R, S, T คือแรงดันด้านเข้า ขณะหนึ่ง
- u, v, w คือแรงดันด้านออก ขณะหนึ่ง
- i_R, i_S, i_T คือกระแสด้านเข้า ขณะหนึ่ง
- i_u, i_v, i_w คือกระแสด้านออก ขณะหนึ่ง

สมการที่ (2.1) สามารถมองได้ว่าการทำงานของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนการแปลงเชิงเรขาคณิตที่แปลงเวกเตอร์ของแรงดันด้านเข้า v_i ไปเป็นเวกเตอร์ของแรงดันด้านออก v_o ตามที่ต้องการ ในขณะที่สมการที่ (2.2) คือการแปลงเวกเตอร์ของกระแสด้านออก i_o ไปเป็นเวกเตอร์ของกระแสด้านเข้า i_i จากทฤษฎีการแปลงเชิงเรขาคณิตสามารถจำแนกประเภทการแปลงได้ดังภาพที่ 2.2 และแสดงคุณสมบัติได้ตามตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิตของเวกเตอร์แรงดันและกระแส

ตารางที่ 2.1 การแปลงเชิงเรขาคณิตพื้นฐานสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

Category	Conditions on matrix	Transformation property
Rotation	$\mathbf{M}\mathbf{M}^T = \mathbf{I}, \det(\mathbf{M}) = 1$	$\phi_i = \phi_o$
Reflection	$\mathbf{M}\mathbf{M} = \mathbf{I}, \mathbf{M}^T = \mathbf{M}$	$\phi_i = -\phi_o$
Scaling	$\mathbf{M} = q\mathbf{I}$	$q = \text{modulation index}$
Translation	$\mathbf{M} = \mathbf{M}' + \mathbf{M}_0$	Injection of zero voltage $\mathbf{v}_z = \mathbf{M}_0 \mathbf{v}_i$

สำหรับการแปลงเชิงเรขาคณิตพื้นฐานสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถ้าเลือกใช้การแปลงแบบหมุน (Rotation) จะได้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับด้านออก ($\phi = \phi_o$) ในทางตรงกันข้ามถ้าเลือกใช้การแปลงแบบสะท้อน (Reflection) จะได้ตัวประกอบกำลังด้านเข้ามีเครื่องหมายตรงข้ามกับด้านออก ($\phi = -\phi_o$) ดังนั้นหากต้องการให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งก็เพียงแค่ใช้การแปลงแบบหมุนและแบบสะท้อนเท่าๆกัน คุณสมบัติการแปลงดังกล่าวไม่มีสมมติฐานใดเกี่ยวกับรูปคลื่นที่ต้องเป็นไซน์ ดังนั้นการแปลงแบบนี้จึงอยู่บนฐานของการสร้างแรงดันขณะหนึ่ง

2.2 คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต M

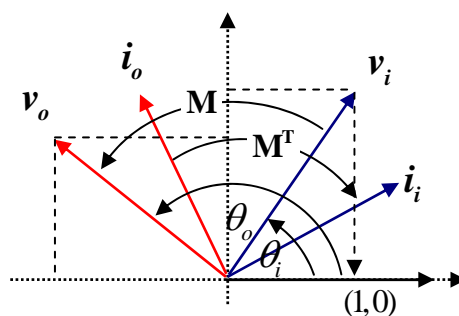
แนวทางในการหาเมทริกซ์การมอดูเลตที่สร้างแรงดันด้านออกได้ตามต้องการจะอาศัยแนวคิดการแปลงเชิงเรขาคณิตเริ่มจากการแปลงแรงดัน กระแส และเมทริกซ์การมอดูเลตให้อยู่ในรูปของสเปซเวกเตอร์และเมทริกซ์ขนาด 2×2 เมื่อใช้เมทริกซ์การแปลงตามสมการที่ (2.4) กับสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์เชิงเวกเตอร์ตามสมการที่ (2.5) และ (2.6) ตามลำดับ

$$S_v = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{xo} \\ v_{yo} \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}}_{M_{[2 \times 2]}} \begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \end{bmatrix} \\ v_o^* &= M_{[2 \times 2]} v_i \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

$$i_i = M_{[2 \times 2]}^T i_o \quad (2.6)$$

โดยตัวห้อย x,y แสดงถึงองค์ประกอบในแนวแกน x และ y ของเวกเตอร์ตามลำดับ



ภาพที่ 2.3 ลักษณะการแปลงของเวกเตอร์แรงดันและกระแส

จากภาพที่ 2.3 สามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.7) โดย θ_o และ θ_i คือมุมของเวกเตอร์แรงดัน \mathbf{v}_i และ \mathbf{v}_o ตามลำดับ และ $\|\cdot\|$ แสดงถึงขนาดเวกเตอร์ รูปแบบของเมทริกซ์การแปลงจะเป็นดังสมการที่ (2.8)

$$\|\mathbf{v}_o^*\| e^{J\theta_o} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{[2 \times 2]} \|\mathbf{v}_i\| e^{J\theta_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\mathbf{v}_o^* = \|\mathbf{v}_o^*\| e^{J\theta_o} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{v}_i = \|\mathbf{v}_i\| e^{J\theta_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{[2 \times 2]} = q e^{J\theta_o} \hat{\mathbf{M}} e^{-J\theta_i}; \quad \text{ดัชนีมอดดูเลต } q = \|\mathbf{v}_o^*\| / \|\mathbf{v}_i\| \quad (2.8)$$

โดยที่เมทริกซ์ $\hat{\mathbf{M}}$ ต้องสอดคล้องตามสมการที่ (2.9)

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{M}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

เพื่อหาคำตอบทั่วไปของสมการที่ (2.9) กำหนดให้

$$\hat{\mathbf{M}} = x_1 \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{I}} + x_2 \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}} + x_3 \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}} + x_4 \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{L}} \quad (2.10)$$

โดย $\mathbf{I}, \mathbf{J}, \mathbf{K}$ และ \mathbf{L} คือฐานของเมทริกซ์ขนาด 2×2 \mathbf{I}, \mathbf{J} คือเมทริกซ์การหมุน 0 และ 90 องศาตามลำดับ ส่วน \mathbf{K}, \mathbf{L} คือ เมทริกซ์การสะท้อนในแนวแกน X และเส้นตรง $X=Y$ ตามลำดับ และ x_i แทนสัมประสิทธิ์พื้นฐาน จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะได้ว่า

$$\hat{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} 1 & b \\ 0 & d \end{bmatrix} = \frac{(\mathbf{I} + \mathbf{K})}{2} + b \frac{(\mathbf{L} - \mathbf{J})}{2} + d \frac{(\mathbf{I} - \mathbf{K})}{2} \quad (2.11)$$

โดยที่ b และ d คือค่าพารามิเตอร์อิสระ

จากสมการที่ (2.8) และ (2.11) สมการคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การแปลงที่สอดคล้องกับสมการที่ (2.1) จะเขียนได้เป็น

$$\mathbf{M} = \mathbf{S}_v^T \mathbf{M}_{[2 \times 2]} \mathbf{S}_v + \mathbf{M}_o \quad (2.12)$$

$$\mathbf{M}_{[2 \times 2]} = q e^{J\theta_o} \left\{ \left(\frac{\mathbf{I} + \mathbf{K}}{2} \right) + b \left(\frac{\mathbf{L} - \mathbf{J}}{2} \right) + d \left(\frac{\mathbf{I} - \mathbf{K}}{2} \right) \right\} e^{-J\theta_i} \quad (2.13)$$

และเพื่อถ่ายต่อความเข้าใจจะเขียนสมการที่ (2.13), (2.5) และ (2.6) ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ ดังสมการที่ (2.14)-(2.16) ตามลำดับ

$$\mathbf{M}_{[2 \times 2]} = \overbrace{\left(\frac{(\mathbf{v}_o^*)(\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right)}^{\mathbf{M}_u} + \overbrace{\left(b \frac{(\mathbf{v}_o^*)(\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right)}^{\mathbf{M}_p} + \overbrace{\left(d \frac{(\mathbf{J}\mathbf{v}_o^*)(\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right)}^{\mathbf{M}_q} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{v}_o = \left\{ \underbrace{\left(\frac{\mathbf{v}_o^* \mathbf{v}_i^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right)}_{=\mathbf{v}_o^*} + \underbrace{\left(b \frac{\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right)}_{=0} + \underbrace{\left(d \frac{(\mathbf{J}\mathbf{v}_o^*) (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right)}_{=0} \right\} \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_o^* \quad (2.15)$$

$$\mathbf{i}_i = \underbrace{\left(\frac{\mathbf{v}_i \left((\mathbf{v}_o^*)^T \mathbf{i}_o \right)}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right)}_{\text{Active current}} + \underbrace{\left(b \frac{(\mathbf{J}\mathbf{v}_i) \left((\mathbf{v}_o^*)^T \mathbf{i}_o \right)}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right)}_{\text{Ractive current}} + \underbrace{\left(d \frac{(\mathbf{J}\mathbf{v}_i) \left((\mathbf{J}\mathbf{v}_o^*)^T \mathbf{i}_o \right)}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right)}_{\text{Reactive current}} \quad (2.16)$$

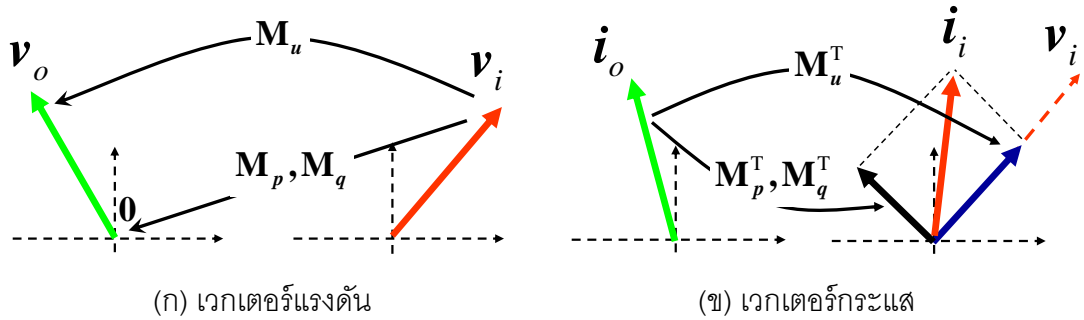
$$= \mathbf{v}_i \frac{p_o}{\|\mathbf{v}_i\|^2} + \mathbf{J}\mathbf{v}_i \left[\frac{b \cdot p_o}{\|\mathbf{v}_i\|^2} - \frac{d \cdot q_o}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right]$$

โดยที่

$$\left. \begin{aligned} p_i(t) &= p_o(t) \\ q_i(t) &= -b \cdot p_o(t) + d \cdot q_o(t) \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.15) และ (2.16) จะพบว่าเมทริกซ์การแปลง \mathbf{M}_u จะทำหน้าที่สร้างแรงดัน ด้านออกคำสั่งในขณะเดียวกันก็จะสร้างกระแสแอกทีฟด้านเข้าด้วย ส่วน \mathbf{M}_p และ \mathbf{M}_q ไม่สร้างแรงดันด้านออกเนื่องจาก $(\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T \cdot \mathbf{v}_i = 0$ เสมอ แต่จะสร้างกระแสรีแอกทีฟด้านเข้าเท่านั้น ดังนั้นค่าพารามิเตอร์อิสระ b และ d จึงสามารถใช้ในการปรับค่าตัวประกอบกำลังด้านเข้าได้โดยไม่กระทบต่อแรงดันด้านออก สมการที่ (2.16) ชี้ให้เห็นพฤติกรรมของเมทริกซ์การแปลงแต่ละส่วนว่าสร้างกระแสด้านเข้าในองค์ประกอบแอกทีฟและรีแอกทีฟอย่างไร และเพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นเราสามารถแสดงพฤติกรรมของการแปลงของแรงดันและกระแสได้ดังภาพที่ 2.4 สมการที่ (2.17) แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมโยงระหว่างกำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟทั้งด้านเข้าและด้านออกอย่างชัดเจน กล่าวคือเทอมของ \mathbf{M}_u จะแปลงกำลังแอกทีฟด้านออกไปเป็นกำลังแอกทีฟด้านเข้า

โดยตรง ในทำนองเดียวกันเทอมของ \mathbf{M}_q ก็จะแปลงกำลังรีแอกทีฟด้านออกไปเป็นกำลังรีแอกทีฟด้านเข้าโดยตรง แต่เทอมของ \mathbf{M}_p จะแปลงกำลังรีแอกทีฟด้านออกไปเป็นกำลังรีแอกทีฟด้านเข้า ลักษณะดังกล่าวจึงมีอิสระเพิ่มมากขึ้นในการควบคุมกำลังรีแอกทีฟด้านเข้าและที่สำคัญในกรณีที่มีเพียงกำลังรีแอกทีฟด้านออกก็สามารถควบคุมกำลังรีแอกทีฟด้านเข้าได้ด้วย



ภาพที่ 2.4 พฤติกรรมของเมทริกซ์การแปลงต่อลักษณะการแปลงของเวกเตอร์แรงดันและกระแส

เพื่อให้สะดวกในการใช้งานจริงที่ปริมาณต่างๆ เป็นปริมาณ 3 เฟส ดังนั้นโดยอาศัยสมการที่ (2.12) สมการที่ (2.14) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตขนาด 3x3 ซึ่งครอบคลุมวิธีการมอดูเลตทั้งหมดตามสมการที่ (2.18)

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_U + \mathbf{M}_P + \mathbf{M}_Q + \mathbf{M}_0 \tag{2.18}$$

$$\mathbf{M}_U = \frac{1}{(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & S & T \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_P = \frac{b}{\sqrt{3}(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T-S & R-T & S-R \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_Q = \frac{d}{3(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} w^* - v^* \\ u^* - w^* \\ v^* - u^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T-S & R-T & S-R \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix} ; \quad \begin{cases} 0 \leq X, Y, Z \leq 1 \\ X + Y + Z = 1 \end{cases}$$

ในที่นี้ \mathbf{M}_0 คือเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ที่สะท้อนการบวกแรงดันลำดับศูนย์ในแรงดันด้านออก ซึ่งเป็นอิสระในการมอดูเลตที่เพิ่มเข้ามา

สมการที่ (2.18) คือรูปคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตที่ครอบคลุมการมอดูเลตทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ และมีลักษณะที่เด่นคือเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์การมอดูเลตแบบทางอ้อมซึ่งเป็นรูปแบบการแปลง $AC \rightarrow DC \rightarrow AC$ จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการมอดูเลตแบบทางตรงกับวิธีการมอดูเลตแบบทางอ้อมมีความสมมูลกัน กล่าวคือ เมทริกซ์การมอดูเลตทางตรงทุกเมทริกซ์สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์การมอดูเลตทางอ้อมได้ นอกจากนี้สมการที่ (2.18) ยังเป็นสมการที่แสดงอยู่ในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายไม่ซับซ้อนและแสดงในรูปค่าแรงดันขณะหนึ่ง ดังนั้นการนำไปใช้จริงในเชิงปฏิบัติจึงใช้การคำนวณที่น้อย

บทที่ 3

แนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่

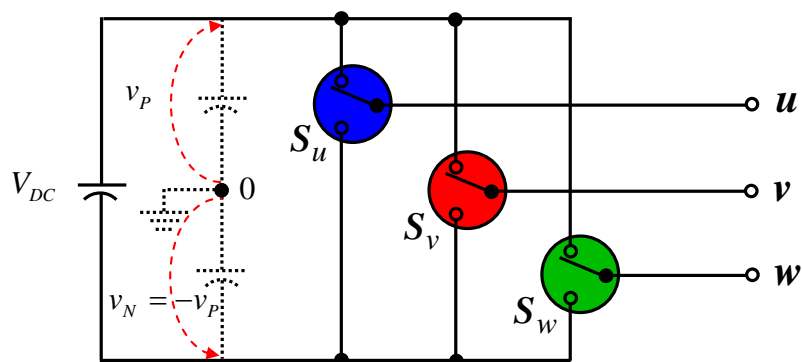
บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์โดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และนำเสนอแนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยจะแสดงให้เห็นถึงแนวคิดในการสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์จากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ เพื่อให้ได้รูปแบบการสวิตช์ตามที่ต้องการ นอกจากนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสมมูลกับวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ด้วยการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสม

3.1 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

เนื่องจากวิธีการสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์โดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ จะอาศัยกรอบความคิดเดียวกันกับในกรณีของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ดังนั้นในเบื้องต้นจะขอกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของวิธีการกำเนิดสัญญาณความกว้างพัลส์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ หลังจากนั้นจึงพัฒนาแนวคิดพื้นฐานดังกล่าวต่อยอดสำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ในหัวข้อต่อไป

3.1.1 โครงสร้างและสมการพื้นฐาน

อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับมีลักษณะโครงสร้างดังภาพที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยสวิตช์ 6 ตัว เชื่อมต่อกับแรงดันบัลไฟตรงด้านเข้า V_{DC} สมการความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกกับด้านเข้าเป็นดังสมการที่ (3.1)



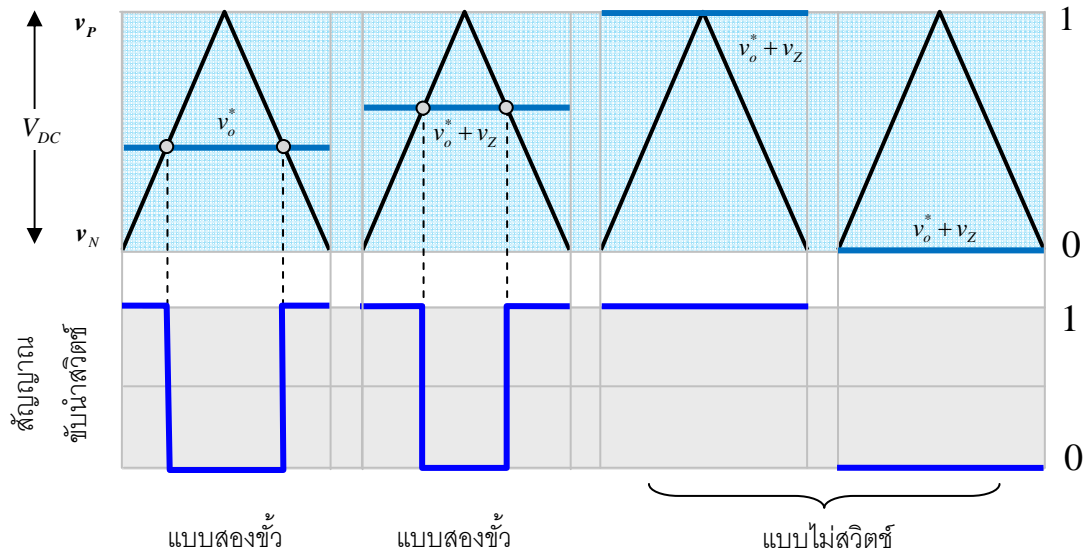
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \\ m_{31} & m_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_P \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* + v_Z \\ v^* + v_Z \\ w^* + v_Z \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

$$0 \leq m_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^2 m_{ij} = 1, i = \{1, 2, 3\}, j = \{1, 2\} \tag{3.2}$$

3.1.2 วิธีการสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์โดยอาศัยคลื่นพาหะ

นอกจากวิธีการมอดูเลตด้วยมุมองเชิงสเปซเวกเตอร์แล้ว การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในอินเวอร์เตอร์ 2 และ 3 ระดับ การมอดูเลตแบบนี้เป็นวิธีการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์โดยอาศัยสัญญาณอ้างอิงเปรียบเทียบกับรูปคลื่นพาหะสามเหลี่ยม โดยทั่วไปรูปคลื่นพาหะมักจะมีขนาดหนึ่งหน่วย แต่ในวิทยานิพนธ์นี้รูปคลื่นพาหะที่ใช้ในการอธิบายแนวคิดการมอดูเลตจะมีค่าสูงสุดและต่ำสุดตามค่าแรงดันด้านเข้าหรือแรงดันบัลไฟตรงและสัญญาณอ้างอิงจะมีค่าเท่ากับแรงดันด้านออกที่ต้องการสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 3.2

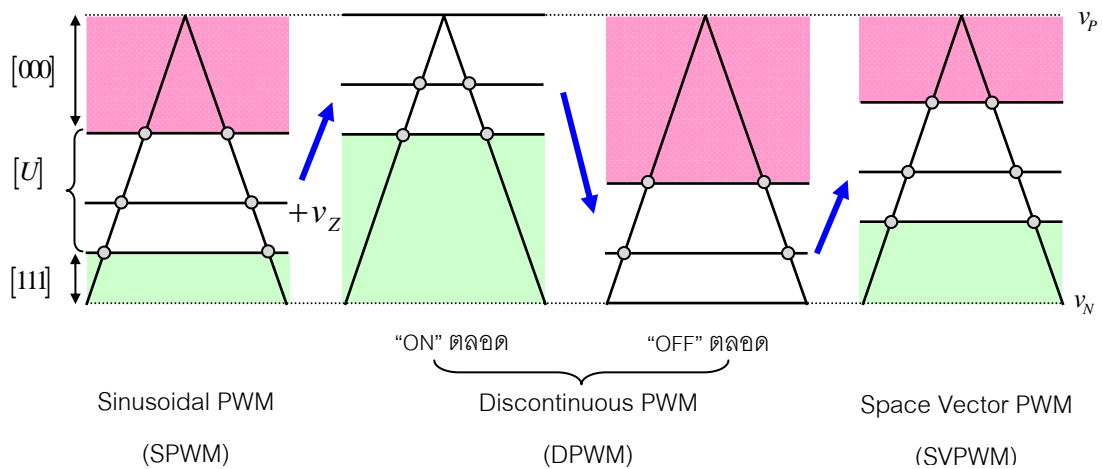


ภาพที่ 3.2 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

การบวกแรงดันลำดับศูนย์ v_Z ที่เหมาะสมจะทำให้ได้รูปแบบการสวิตช์ที่ต้องการดังแสดงในภาพที่ 3.2 ซึ่งจะมีเพียง 2 รูปแบบเท่านั้นที่เป็นไปได้ คือ แบบไม่สวิตช์และแบบสองขั้ว โดยรูปแบบการสวิตช์แบบสองขั้วจะมีการเปลี่ยนสถานะแรงดันจากค่าสูงสุดเป็นค่าต่ำสุดโดยตรง

3.1.3 การเลือกแรงดันลำดับศูนย์ v_z

การบวกแรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมไม่เพียงแต่จะทำให้ได้รูปแบบการสวิตช์ที่ต้องการเท่านั้นยังทำให้ค่าสูงสุดของดัชนีการมอดูเลตที่เป็นไปได้มีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น กรณีการมอดูเลตแบบรูปคลื่นไซน์(Sinusoidal PWM : SPWM) จะมีค่าสูงสุดของดัชนีการมอดูเลตน้อยกว่าการมอดูเลตแบบไม่สวิตช์ 1 เฟส(Discontinuous PWM : DPWM) และแบบสเปซเวกเตอร์(Space-vector PWM : SVPWM) การมอดูเลตในแต่ละรูปแบบแสดงได้ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 รูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับเมื่อเลือกแรงดันลำดับศูนย์ที่แตกต่างกัน

ก) การมอดูเลตแบบไม่สวิตช์ 1 เฟส (DPWM)

เพื่อลดจำนวนครั้งการสวิตช์เราสามารถเลือกแรงดันลำดับศูนย์ตามสมการที่ (3.3-1) หรือ (3.3-2) ซึ่งจะได้การมอดูเลตเป็นแบบที่ไม่มีสวิตช์ 1 เฟส และแบบมีสวิตช์ 2 เฟส ดังภาพที่ 3.3

1. กรณี “ON” ตลอด หมายถึงการให้สวิตช์ตัวบนในแต่ละกิ่งนำกระแสตลอดในหนึ่งคาบการสวิตช์ แรงดันลำดับศูนย์จะเป็นไปตามสมการที่(3.3-1)

$$u = u^* + v_z = v_p, v_z = v_p - \max(u^*, v^*, w^*) \tag{3.3-1}$$

2. กรณี “OFF” ตลอด หมายถึงการให้สวิตช์ตัวล่างในแต่ละกิ่งนำกระแสตลอดในหนึ่งคาบการสวิตช์ แรงดันลำดับศูนย์จะเป็นไปตามสมการที่(3.3-2)

$$w = w^* + v_z = v_n, v_z = v_n - \min(u^*, v^*, w^*) \tag{3.3-2}$$

จากการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ของการมอดูเลตแบบไม่สวิตช์ 1 เฟส หากเราพิจารณาการใช้เวกเตอร์ศูนย์ของการมอดูเลตสเปซเวกเตอร์แบบ DPWM จะได้ว่า การมอดูเลตกรณี “ON” ตลอดจะใช้เวกเตอร์ศูนย์เฉพาะ [111] (สีเขียว) เท่านั้น ในทางตรงกันข้าม กรณี “OFF” ตลอดจะใช้เพียงเวกเตอร์ศูนย์ [000] (สีชมพู) เท่านั้น การมอดูเลตทั้งสองกรณีจะทำให้มีสวิตช์หนึ่งเฟสไม่มีการสวิตช์ทำให้ค่าสูญเสียในการสวิตช์ลดลง 1 ใน 3

ข) การมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ (SVPWM)

การมอดูเลตที่สำคัญอีกแบบหนึ่งคือการเลือกใช้แรงดันลำดับศูนย์ [111] และ [000] ให้มีขนาดเท่าๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 3.3 การมอดูเลตแบบนี้จะสมมูลกับวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ ในกรณีนี้แรงดันลำดับศูนย์จะเป็นไปตามสมการที่ (3.4)

$$v_z = \frac{[v_p - \text{Max}] + [v_N - \text{Min}]}{2} = \frac{\text{Mid}}{2} \quad (3.4)$$

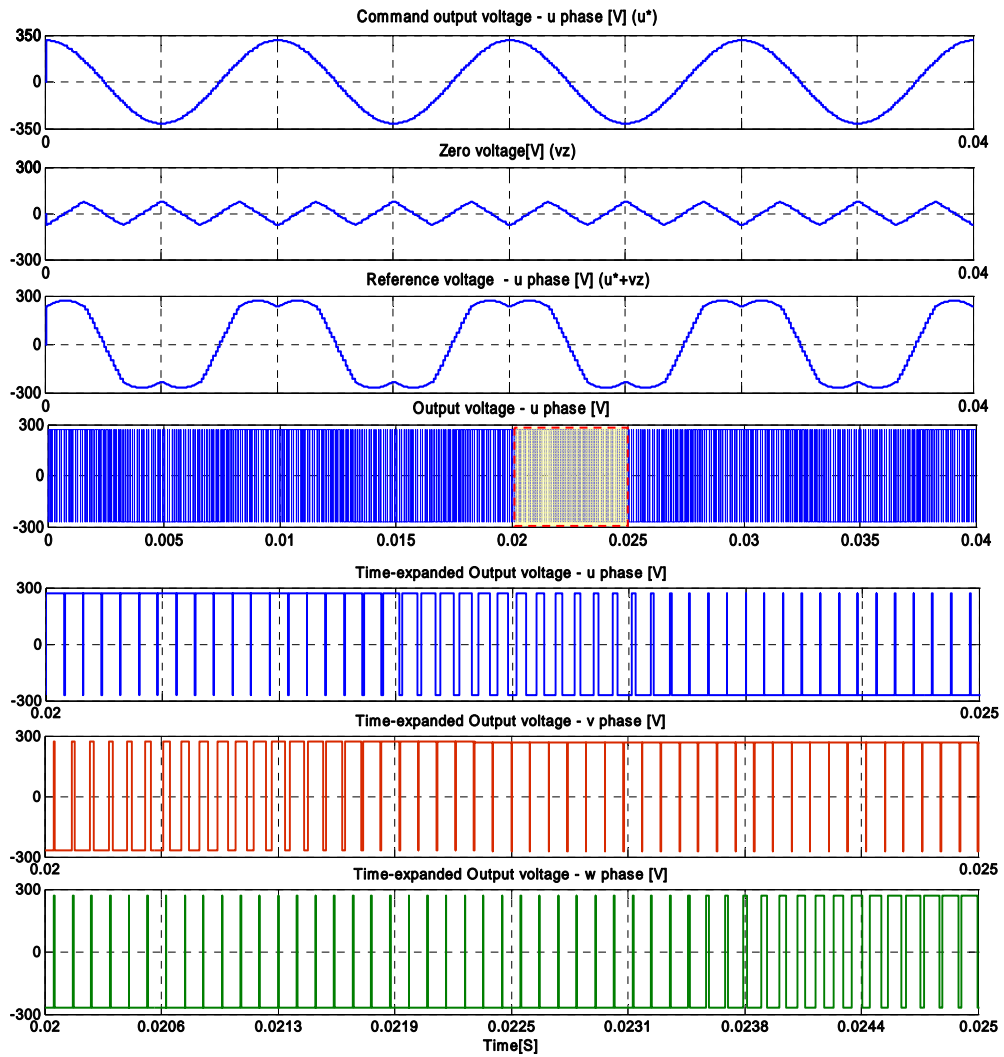
เมื่อ

$$\text{Max} = \max(u^*, v^*, w^*)$$

$$\text{Mid} = \text{mid}(u^*, v^*, w^*)$$

$$\text{Min} = \min(u^*, v^*, w^*)$$

ภาพที่ 3.4 แสดงรูปคลื่นของปริมาณต่างๆ ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะ ด้านบนสุดคือ แรงดันด้านออกคำสั่งเฟส u ถัดลงมาคือ แรงดันลำดับศูนย์ ถัดลงมาคือแรงดันอ้างอิง แรงดันด้านออกเฟส u ที่บวกแรงดันลำดับศูนย์แล้วและสุดท้ายคือส่วนขยายสเกลเวลาของแรงดันด้านออกเฟส u , v และ w ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเราสามารถใช้ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะ ที่ให้ผลเหมือนกับวิธีการมอดูเลตของสเปซเวกเตอร์ ด้วยการบวกแรงดันลำดับศูนย์ตามสมการที่ (3.4) ซึ่งทำให้การคำนวณในทางปฏิบัติง่ายและไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์



ภาพที่ 3.4 รูปคลื่นการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ที่สมมูลกับวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์

3.2 การพัฒนาการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

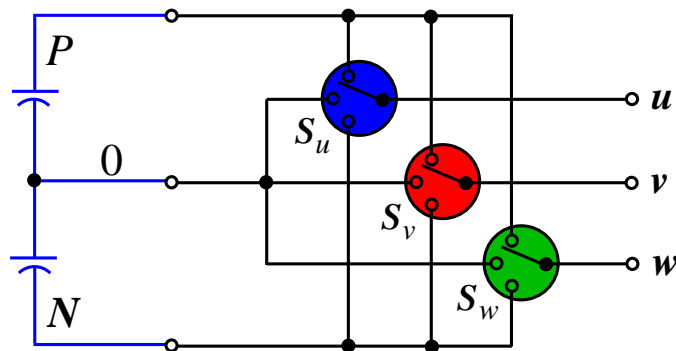
ในหัวข้อนี้จะแสดงการพัฒนาการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ไปเป็นการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ โดยจะแสดงให้เห็นถึงแนวคิดใหม่ในการสร้างสัญญาณอ้างอิงจากค่าแรงดันด้านออกคำสั่งในการมอดูเลตแบบขั้วคู่

3.2.1 โครงสร้างและสมการพื้นฐาน

วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับมีลักษณะคล้ายกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับที่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟตรง แต่มีข้อแตกต่างกันที่อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับจะใช้แรงดันไฟตรง 3 ระดับ ที่ได้จากการนำ

ตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งครึ่งแรงดันบัสไฟตรง วงจรสมมูลของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับแสดงได้ดังภาพที่ 3.5 ซึ่งแรงดันบัสไฟตรง 3 ระดับได้แก่

- 1) แรงดันบัสบวก v_P เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของจุด P ของบัสไฟตรง
- 2) แรงดันจุดกึ่งกลางบัส v_0 เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของจุด O ของบัสไฟตรง
- 3) แรงดันบัสลบ v_N เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของจุด N ของบัสไฟตรง



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

จากภาพที่ 3.5 จะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกกับด้านเข้าในรูปของเมทริกซ์การมอดูเลตดังสมการที่ (3.5)

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} v_P \\ v_0 \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* + v_Z \\ v^* + v_Z \\ w^* + v_Z \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$0 \leq m_{ij} \leq 1, \quad \sum_{j=1}^3 m_{ij} = 1, \quad i = \{1, 2, 3\}, \quad j = \{1, 2, 3\} \quad (3.6)$$

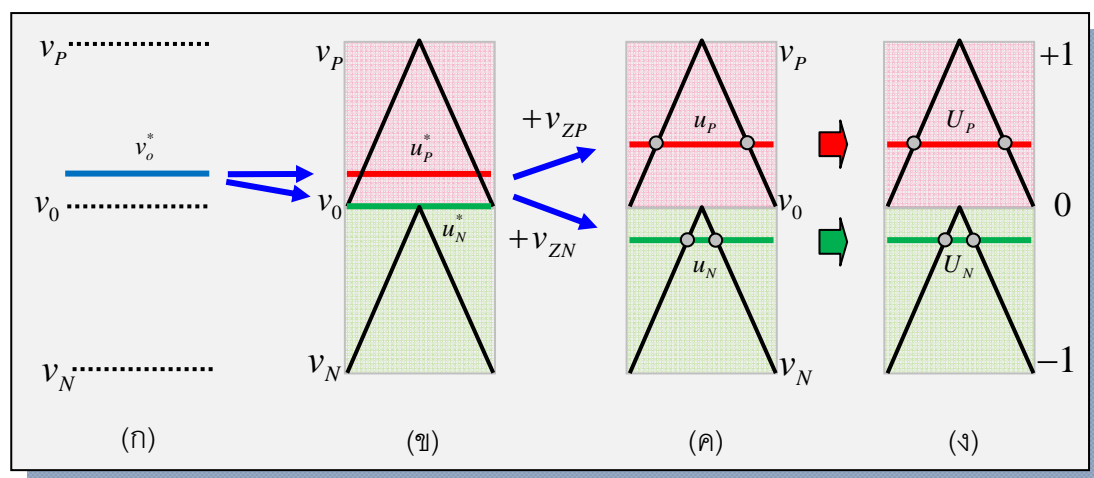
3.2.2 แนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่

วิธีการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะสำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ จะแตกต่างจากในกรณีอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ตรงที่คลื่นพาหะและแรงดันอ้างอิงที่นำมาเปรียบเทียบจะมีสองชุด [29] ซึ่งเราจะเรียกวิธีการมอดูเลตแบบนี้ว่า “การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่” แม้ว่าการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่จะมีผู้นำเสนอมากมายเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ โดยทั่วไปจะมองการมอดูเลตแบบนี้เป็นแค่เทคนิคหรือเครื่องมือในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์เท่านั้น จึงไม่สามารถแสดงให้เห็นพฤติกรรมในเชิงการสร้างแรงดันและความสัมพันธ์ระหว่าง

แรงดันด้านนอกที่ต้องการกับสัญญาณอ้างอิงได้โดยง่าย ดังนั้นหัวข้อนี้จะนำเสนอแนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่ โดยจะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมในเชิงการสร้างแรงดันอ้างอิง u_p, u_N จากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP}, v_{ZN} ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (3.7) และ (3.8)

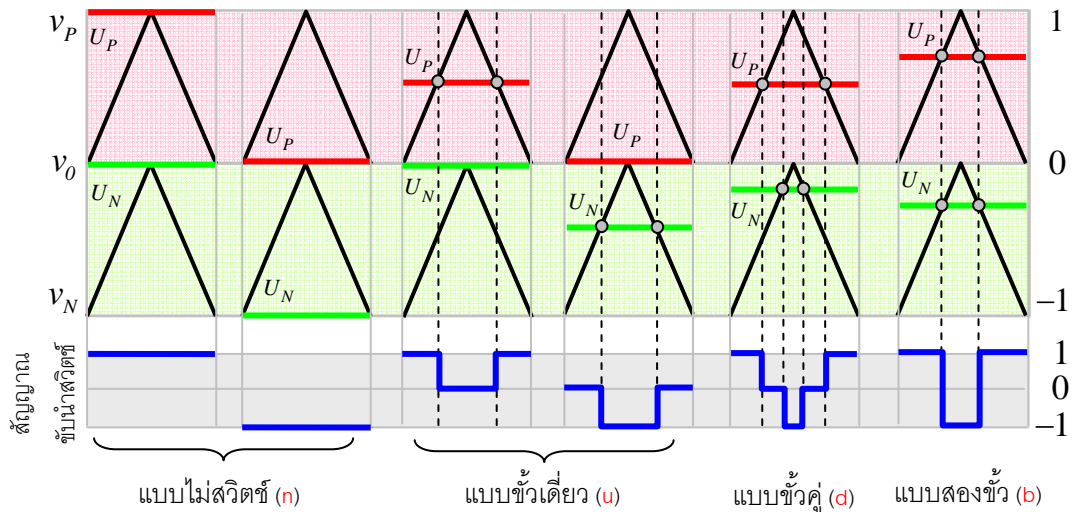
$$v_o^* = u_p^* + u_N^* \quad (3.7)$$

$$v_Z = v_{ZP} + v_{ZN} \quad (3.8)$$



ภาพที่ 3.6 แนวคิดการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันด้านนอกคำสั่งในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่

ภาพที่ 3.6 แสดงการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันด้านนอกคำสั่งในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่ ซึ่งสามารถอธิบายคร่าวๆ ได้ดังนี้ แรงดันด้านนอกคำสั่ง v_o^* ตามภาพที่ 3.6(ก) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือแรงดันคำสั่งค่าบวก u_p^* ซึ่งสร้างจากบัสบวกและแรงดันคำสั่งค่าลบ u_N^* ซึ่งสร้างจากบัสลบ แสดงตามภาพที่ 3.6(ข) เมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP} และ v_{ZN} ที่เหมาะสมตามภาพที่ 3.6(ค) จะทำให้แรงดันอ้างอิง u_p และ u_N เลื่อนขึ้นหรือลงอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและผลรวมของแรงดันทั้งสองค่า ($u_p + u_N$) จะสะท้อนการบวกแรงดันลำดับศูนย์กับแรงดันด้านนอก ($v_o^* + v_Z$) ในลักษณะเดียวกันกับการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และเมื่อนำแรงดันอ้างอิง u_p และ u_N มาทำเป็นค่าปทัสถาน (normalized) จะได้สัญญาณอ้างอิง U_p, U_N ที่ใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาหะแบบซั้วคู่ขนาดหนึ่งหน่วยตามภาพที่ 3.6(ง) การเลื่อน U_p และ U_N ไปยังตำแหน่งต่างๆ จะได้รูปแบบการสวิทช์ที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

ภาพที่ 3.7 แสดงการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ ที่ให้รูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายและครอบคลุมลักษณะการมอดูเลตที่เป็นไปได้ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับซึ่งมีทั้งหมด 4 รูปแบบคือ

- 1) แบบไม่สวิตช์ (Non-Switching) หมายถึง การต่อแรงดันเฟสด้านออกเข้ากับ บัสบวกหรือบัสลบตลอดคาบการสวิตช์ ในกรณีนี้จะไม่มีการสวิตช์และแรงดันด้านออกจะมีค่าเท่ากับ v_p หรือ v_n
- 2) แบบขั้วเดียว (Unipolar Switching) หมายถึง การใช้แรงดันด้านเข้า v_p และ v_0 หรือ v_n และ v_0 ในการสร้างแรงดันด้านออก ในกรณีนี้จะมีจำนวนการสวิตช์ 2 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์
- 3) แบบขั้วคู่ (Dipolar Switching) หมายถึง การใช้แรงดันด้านเข้าทั้ง 3 ระดับ คือ v_p , v_0 และ v_n ในการสร้างแรงดันด้านออก ในกรณีนี้จะมีจำนวนการสวิตช์ 4 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์
- 4) แบบสองขั้ว (Bipolar Switching) หมายถึง การใช้แรงดันด้านเข้า v_p และ v_n ในการสร้างแรงดันด้านออก ในกรณีนี้จะมีจำนวนการสวิตช์ 2 ครั้งในหนึ่งคาบการสวิตช์

จะเห็นได้ว่าการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับจะมีรูปแบบการสวิตช์ที่เพิ่มขึ้นจากการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับคือ การมอดูเลตแบบขั้วเดียว และแบบขั้วคู่ ลักษณะดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับจะมีอิสระมากขึ้นในการใช้แรงดันด้านเข้าเพื่อสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการ หรือกล่าวได้ว่ามีอิสระในการมอดูเลตมากกว่ากรณี 2 ระดับ การมอดูเลตแบบขั้วเดียวจะใช้เพียง

บัสบวกหรือบัสลบกับแรงดันจุดกึ่งกลางบัสในการสร้างแรงดันด้านนอก ทำให้มีค่าระลอกของแรงดันและกระแสต่ำ ส่วนการมอดูเลตแบบชั่วคราวนั้นข้อดีคือมีอิสระในการเลือกใช้ค่าวัฏจักรงานได้หลากหลายไม่จำกัด อย่างไรก็ตามการมอดูเลตแบบชั่วคราวมีจำนวนครั้งการสวิตช์มากกว่าการมอดูเลตแบบชั่วคราว จึงมีการสูญเสียจากการสวิตช์มากกว่า

3.2.3 การนำรูปสมการทั่วไปของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ มาสร้างแรงดันอ้างอิงตามแนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบชั่วคราว

รูปสมการทั่วไปของการมอดูเลต \mathbf{M} สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับในสมการที่ (3.1) หากแยกพจน์ของฟังก์ชันการมอดูเลตแรงดันลำดับศูนย์ออกจากฟังก์ชันการมอดูเลตจะได้

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}' + \mathbf{M}_0 \quad (3.9)$$

โดยที่

$$\mathbf{M}' = \begin{bmatrix} m'_{11} & m'_{12} & m'_{13} \\ m'_{21} & m'_{22} & m'_{23} \\ m'_{31} & m'_{23} & m'_{33} \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ X & Y & Z \\ X & Y & Z \end{bmatrix}$$

เมื่อนำรูปสมการทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} จากสมการที่ (3.9) แทนในสมการที่ (3.1) และนำแรงดันด้านนอกและด้านเข้าเทียบกับจุดกึ่งกลางบัสจะได้

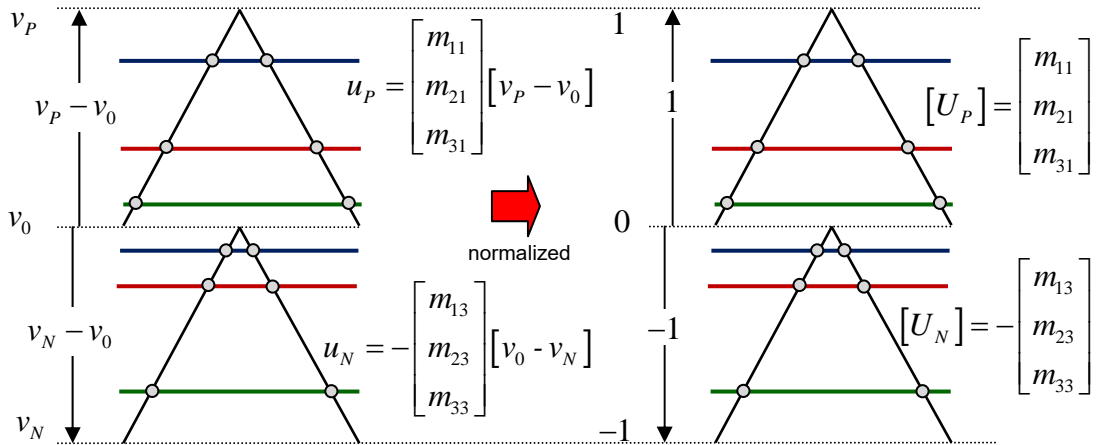
$$\begin{bmatrix} u - v_0 \\ v - v_0 \\ w - v_0 \end{bmatrix} \triangleq \underbrace{\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix}}_{u_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} u_N \\ v_N \\ w_N \end{bmatrix}}_{u_N} \triangleq \underbrace{\begin{bmatrix} m'_{11} + X \\ m'_{21} + X \\ m'_{31} + X \end{bmatrix}}_{u_p} (v_p - v_0) + \underbrace{\begin{bmatrix} m'_{13} + Z \\ m'_{23} + Z \\ m'_{33} + Z \end{bmatrix}}_{u_N} (v_N - v_0) \quad (3.10)$$

สมการที่ (3.10) แสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับจะสร้างแรงดันด้านนอกเป็นผลรวมของแรงดัน u_p และ u_N ซึ่งสร้างจากบัสบวก ($v_p - v_0$) และบัสลบ ($v_N - v_0$) ตามลำดับ ลักษณะดังกล่าวจะสอดคล้องกับภาพที่ 3.6 และแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP}, v_{ZN} ในสมการที่ (3.8) จะได้

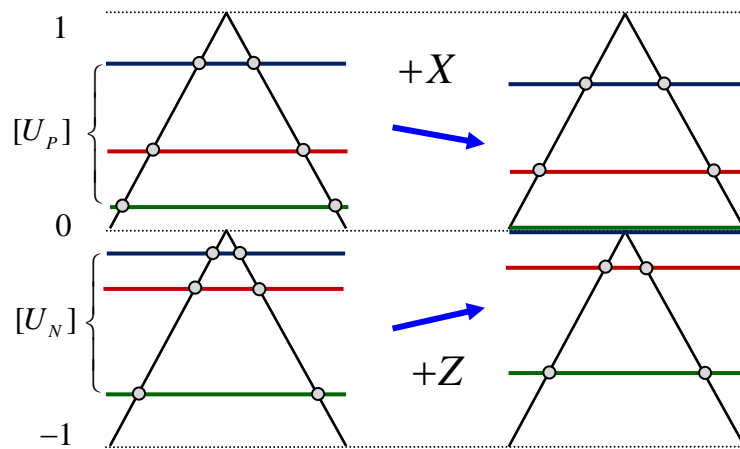
$$v_{ZP} = X[v_p - v_0], \quad v_{ZN} = Z[v_N - v_0] \quad (3.11)$$

สัญญาณอ้างอิง U_p, U_N ที่ใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาหะแบบชั่วคราวขนาดหนึ่งหน่วยจะหาได้ โดยนำค่าแรงดันอ้างอิงของบัสบวกและบัสลบในสมการที่ (3.10) มาทำเป็นค่าปัทสทาน เทียบกับขนาดบัส ($v_p - v_0$) และบัส ($v_0 - v_N$) ตามลำดับ ดังแสดงในสมการที่ (3.12) และสามารถแสดงการมอดูเลตได้ดังภาพที่ 3.8

$$[U_P] = \begin{bmatrix} m'_{11} + X \\ m'_{21} + X \\ m'_{31} + X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} \geq 0, [U_N] = - \begin{bmatrix} m'_{13} + Z \\ m'_{23} + Z \\ m'_{33} + Z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3.12)$$



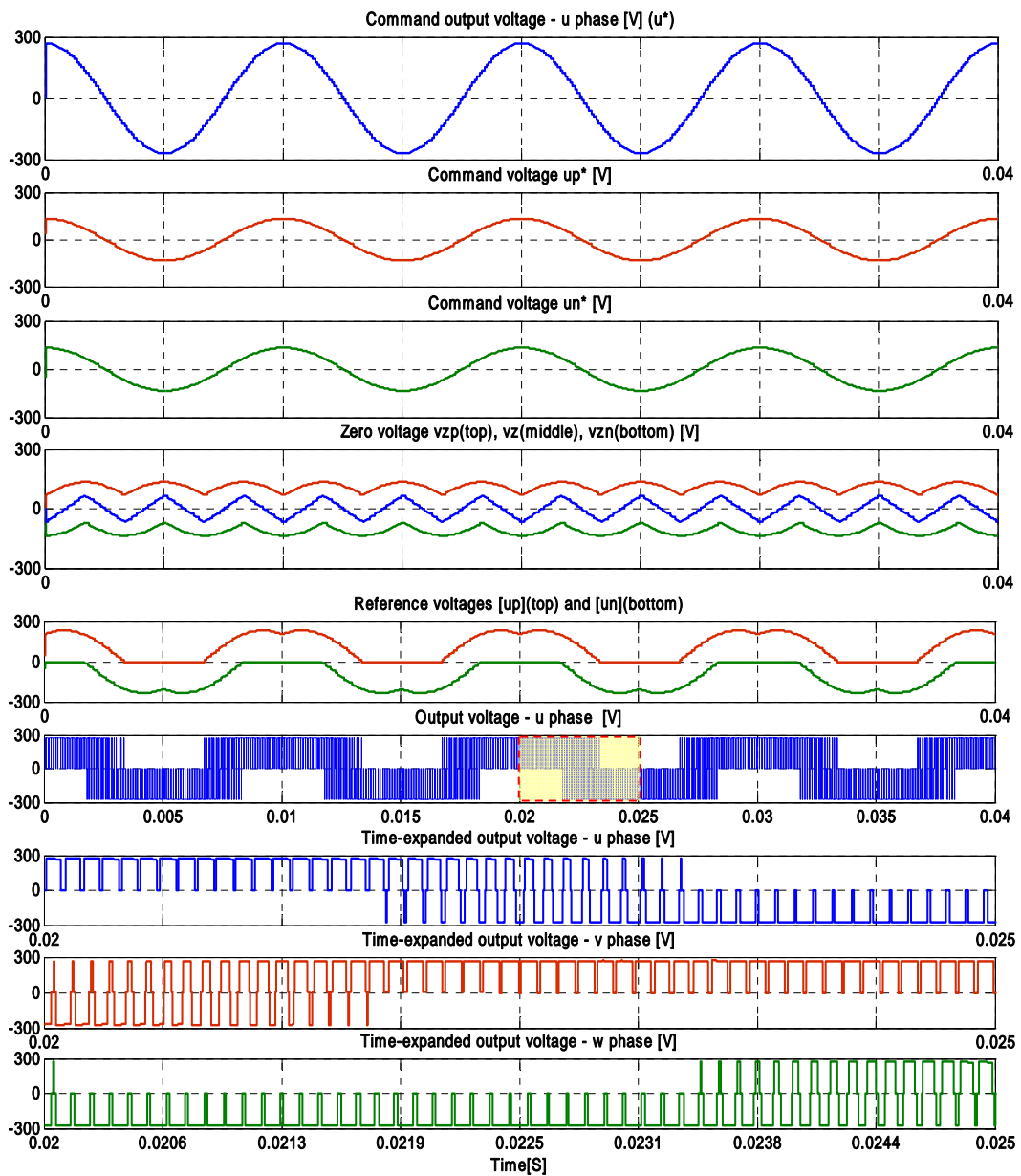
ภาพที่ 3.8 สัญญาณอ้างอิงและคลื่นพาหะในการมอดูเลตแบบซุ่มตัวของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ



ภาพที่ 3.9 รูปแบบการมอดูเลตที่สอดคล้องกับการเลือกค่า X, Z ตามสมการที่ (3.13)

และเพื่อแสดงเป็นกรณีตัวอย่างในการเลือกค่าฟังก์ชันการมอดูเลตลำดับศูนย์ X, Z ในการลดจำนวนครั้งการสวิตช์ให้เหลือเพียง 8 ครั้ง ดังนั้นในที่นี้จะเลือกค่า X, Z น้อยที่สุดที่ทำให้เงื่อนไข $0 \leq m_{ij} \leq 1$ เป็นจริง ซึ่งจะได้ตามสมการที่ (3.13) และสามารถแสดงการมอดูเลตได้ดังภาพที่ 3.9

$$\left. \begin{aligned} X &= -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ Z &= -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$



ภาพที่ 3.10 รูปคลื่นการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

ภาพที่ 3.10 แสดงรูปคลื่นของปริมาณต่างๆในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่ ด้านบนสุดคือ แรงดันด้านออกคำสั่งเฟส u ถัดมาคือแรงดันคำสั่ง u_p^* และ u_n^* ถัดมาคือแรงดันลำดับศูนย์และแรงดันอ้างอิง สุดท้ายคือแรงดันด้านออกและส่วนขยายสเกลเวลาของแรงดันด้านออกเฟส u, v และ w ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงสถานะของแรงดันจะเป็นการสวิตช์ที่เป็นแบบซั้วเดี่ยว 2 เฟสและแบบซั้วคู่ 1 เฟส ซึ่งจะสอดคล้องกับภาพที่ 3.9 เมื่อนำผลการจำลองในภาพที่ 3.10 ไปเปรียบเทียบกับภาพที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าแรงดันลำดับศูนย์ v_z ($v_{zp} + v_{zn}$) จะเหมือนกับกรณีของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และหากนำแรงดันอ้างอิง u_p และ u_n ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

มารวมกันจะได้แรงดันอ้างอิงเหมือนกับกรณีของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับจะสร้างแรงดันด้านออกคล้ายคลึงกับการมอดูเลตแบบซั้วเดี่ยว 2 เฟสและแบบซั้วคู่ 1 เฟส ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับในกรณีที่แรงดันบัลลัสสมดุล ($v_p = -v_N, v_0 = 0$) อย่างไรก็ตามหากสังเกตในส่วนขยายสเกลเวลาจะพบว่าแรงดันในกรณีอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับจะมีค่าระลอกน้อยกว่าเนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนสถานะแรงดันจากค่าสูงสุดเป็นค่าต่ำสุดโดยตรง

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ แนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่ที่นำเสนอได้ขยายทฤษฎีการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ที่ใช้มุมมองการสร้างแรงดันอ้างอิงจากแรงดันคำสั่งและการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ให้สามารถใช้ได้กับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ในการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ แรงดันอ้างอิงจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่สร้างจากบัลลัสบวก u_p และบัลลัสลบ u_N ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมในเชิงการแปลงแรงดันและความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกที่ต้องการกับแรงดันอ้างอิงแบบตรงไปตรงมาในลักษณะเดียวกับการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ และการปรับรูปแบบการสวิตช์ในทำนองเดียวกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ทำได้ด้วยการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์สองตัว v_{ZP} และ v_{ZN} ที่อิสระต่อกัน แนวคิดนี้ไม่เพียงแต่จะนำมาใช้กับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับได้เท่านั้น ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับได้ด้วย และหากเรามองว่าเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มีแรงดันด้านเข้าเป็น 3 ระดับเหมือนกัน ดังนั้นเราจึงสามารถใช้แนวคิดดังกล่าวมาพัฒนาใช้กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ได้ โดยรายละเอียดจะนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 4

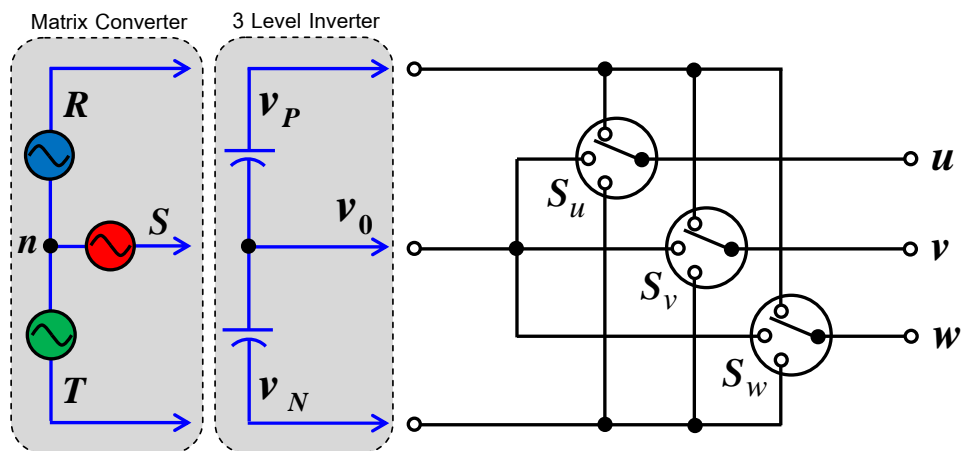
วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

บทนี้จะนำเสนอวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพโดยอาศัยเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} ที่อยู่ในรูปของคำตอบทั่วไปและใช้มุมมองที่พิจารณาเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ และนำแนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ มาพัฒนาใช้กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เพื่อสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายและครอบคลุมรูปแบบการสวิตช์ของวิธีการมอดูเลตแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ซึ่งจะมีขั้นตอนง่าย ๆ 3 ขั้นตอนคือ

1. การกำหนดตัวแปรอิสระ b, d จากเงื่อนไขกระแสด้านเข้า ยกตัวอย่างเช่น $b = d = 0$ จะได้ตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่ง
2. การเลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ \mathbf{M}_0 เพื่อกำหนดลักษณะการสวิตช์ในแต่ละเฟส
3. การจัดลำดับการสวิตช์ด้วยการเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิง

4.1 การใช้มอดูเลตแบบซั้วคู่กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

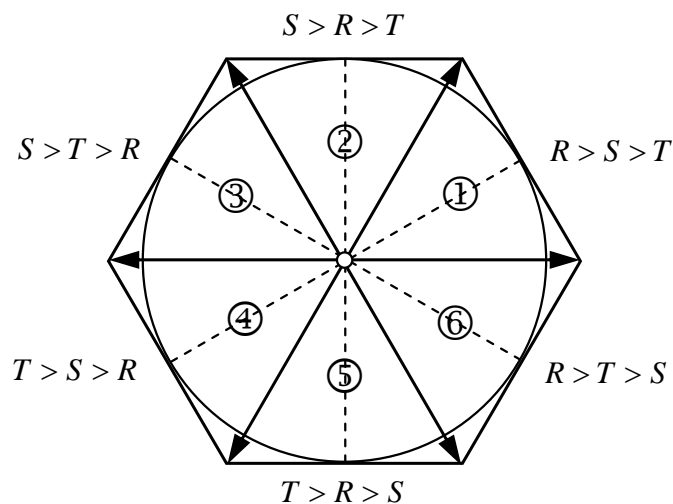
อินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ดังแสดงเปรียบเทียบในภาพที่ 4.1 ต่างกันเฉพาะแรงดันด้านเข้าที่เป็นไฟตรง เทคนิคการมอดูเลตที่นิยมใช้ในอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ คือการมอดูเลตแบบซั้วคู่ เมื่อเรามองว่าเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ดังนั้นเราจึงสามารถพัฒนาวิธีการมอดูเลตแบบซั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ มาใช้กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ได้



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เสมือนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

ตารางที่ 4.1 ลำดับแรงดันด้านเข้าในแต่ละเซกเตอร์

Sector											
1		2		3		4		5		6	
$R > S > T$		$S > R > T$		$S > T > R$		$T > S > R$		$T > R > S$		$R > T > S$	
0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360
Phase angle of input phase voltages											



ภาพที่ 4.2 รูปหกเหลี่ยมของเวกเตอร์แรงดันด้านเข้าสำหรับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์

จากภาพที่ 4.1 แรงดันด้านเข้า v_p, v_o, v_N ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ จะเป็นไฟตรงที่มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงแต่แรงดันด้านเข้า R, S, T ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์จะเป็นไฟสลับที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งเป็นที่น่าพอใจทั้งค่าบวกและลบดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยแรงดันทั้ง 3 เฟส จะแสดงอยู่ในรูปปริมาณเฟสและมีความสัมพันธ์เชิงขนาดสลับกันไปทุก ๆ 60 องศา เมื่อเขียนในปริภูมิสเปซเวกเตอร์จะได้ดังภาพที่ 4.2

หากเราใช้มุมมองที่พิจารณาว่าเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ มีความคล้ายคลึงกับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ โดยแรงดันไฟสลับ 3 เฟสด้านเข้าของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ณ ขณะหนึ่ง จะทำหน้าที่เสมือนแรงดันบัสไฟตรงด้านเข้า v_p, v_o, v_N ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้

เทคนิคการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์จึงต้องอาศัยข้อมูลของแรงดันด้านเข้าเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยเป็น *max*, *mid*, *min* โดยที่

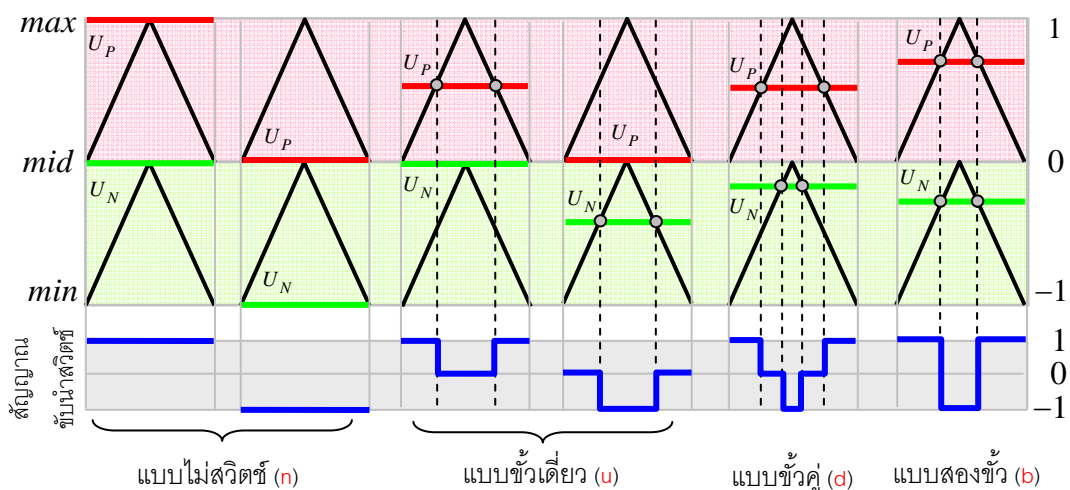
$$\left. \begin{aligned} max &= \max(R, S, T) \\ mid &= \text{mid}(R, S, T) \\ min &= \min(R, S, T) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

เมื่อพิจารณาขนาดของแรงดันด้านเข้าในเซกเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 4.1 จะได้ค่าแรงดัน *max*, *mid*, *min* เป็นดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน *max*, *mid*, *min* กับแรงดันด้านเข้า R, S, T

Sector	Phase angle	Phase sequence	v_P	v_0	v_N
			<i>max</i>	<i>mid</i>	<i>min</i>
1	0-60	R>S>T	R	S	T
2	60-120	S>R>T	S	R	T
3	120-180	S>T>R	S	T	R
4	180-240	T>S>R	T	S	R
5	240-300	T>R>S	T	R	S
6	300-360	R>T>S	R	T	S

ข้อแตกต่างระหว่างการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับกับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์คือขนาดของคลื่นพาหะ กล่าวคือขนาดของคลื่นพาหะในการมอดูเลตแบบซั้วคู่สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ จะขึ้นอยู่กับแรงดันบัสไฟตรง v_P, v_0, v_N ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าคงที่แต่กรณีเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์แรงดัน *max, mid, min* จะมีค่าไม่คงที่ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

ในการพิจารณาต่อไปนี้อย่างง่ายต่อการอธิบาย จะสมมติให้แรงดันด้านเข้าและด้านออก อยู่ในเซกเตอร์ที่ 1 ซึ่งมีค่าดังนี้คือ $R = \max$, $S = \text{mid}$, $T = \min$ และ $u^* > v^* > w^*$ สำหรับในกรณีเซกเตอร์อื่น ๆ ก็สามารถคิดได้ในทำนองเดียวกันเพียงแต่สลับบทบาทของแต่ละเฟสเท่านั้น และตัวห้อยที่แสดงอยู่ในสมการสามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การกำหนดตัวแปรและเมทริกซ์การมอดูเลตในแต่ละเซกเตอร์แรงดัน

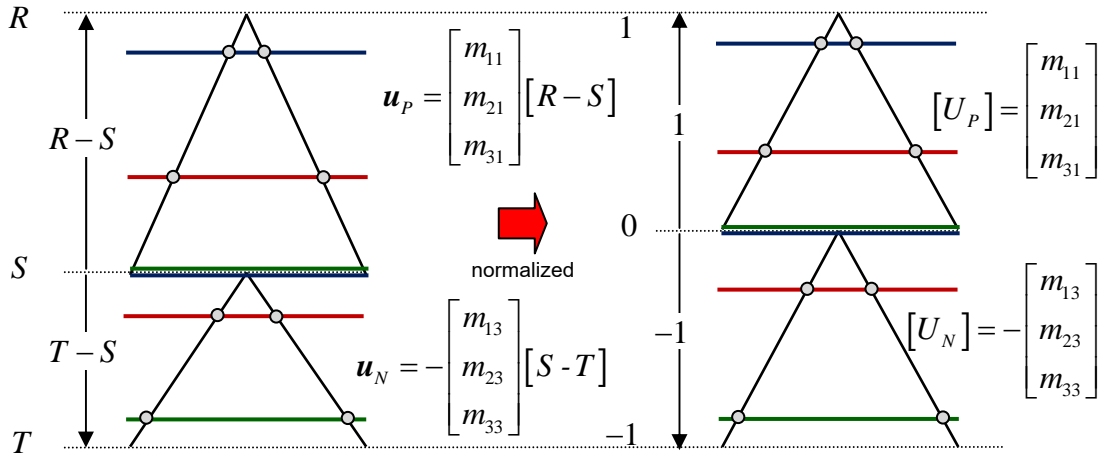
กรณีแรงดันอยู่ในเซกเตอร์ที่ 1	กรณีแรงดันอยู่ในเซกเตอร์อื่น ๆ
R, u, X, ตัวห้อย ₁	เฟสด้านเข้า/ด้านออกสูงสุดและองค์ประกอบของเมทริกซ์การมอดูเลตที่สอดคล้องกัน
S, v, Y, ตัวห้อย ₂	เฟสด้านเข้า/ด้านออกค่ากลางและองค์ประกอบของเมทริกซ์การมอดูเลตที่สอดคล้องกัน
T, w, Z, ตัวห้อย ₃	เฟสด้านเข้า/ด้านออกต่ำสุดและองค์ประกอบของเมทริกซ์การมอดูเลตที่สอดคล้องกัน

เมื่อแทนสมการที่ (2.18) ในสมการที่ (1.1) และจัดรูปสมการใหม่เพื่อให้จุดอ้างอิงของแรงดันในสมการอยู่ที่เฟสกลางซึ่งในกรณีนี้คือเฟส S จะได้ตามสมการที่ (4.2) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ประพจน์ตัวเสมือนวงจรมอดูเลต 3 ระดับที่สร้างแรงดันด้านออกเป็นผลรวมของแรงดัน u_p, u_N ซึ่งสร้างจากบัสบวก $[R - S]$ และบัสลบ $[T - S]$ ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} u - S \\ v - S \\ w - S \end{bmatrix} \triangleq \underbrace{\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix}}_{u_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} u_N \\ v_N \\ w_N \end{bmatrix}}_{u_N} \triangleq \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} [R - S] - \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} [S - T] \quad (4.2)$$

สัญญาณอ้างอิง U_p, U_N ที่ใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาหะขนาดหนึ่งหน่วยหาได้โดยนำค่าแรงดันอ้างอิงของบัสบวกและบัสลบในสมการที่ (4.2) มาทำเป็นค่าปทัสถานเทียบกับขนาดของบัส $[R - S]$ และบัส $[S - T]$ ตามลำดับ สัญญาณอ้างอิงดังกล่าวจะได้จากคอลัมน์ที่หนึ่งและสามของเมทริกซ์การมอดูเลตดังแสดงในสมการที่ (4.3) และสามารถแสดงการมอดูเลตได้ดังภาพที่ 4.4

$$[U_p] = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{11} + X \\ m'_{21} + X \\ m'_{31} + X \end{bmatrix} \geq 0, \quad [U_N] = - \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m'_{13} + Z \\ m'_{23} + Z \\ m'_{33} + Z \end{bmatrix} \leq 0 \quad (4.3)$$



ภาพที่ 4.4 สัญลักษณ์อ้างอิงและคลื่นพาดในการมอดูเลตแบบชั่วคราวสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

เมื่อ $\mathbf{M}' = [m'_{ij}] \triangleq \mathbf{M}_U + \mathbf{M}_P + \mathbf{M}_Q$ สำหรับตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งจะได้

$$[U_P] = \frac{R}{(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ X \\ X \end{bmatrix}, \quad [U_N] = -\frac{T}{(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z \\ Z \\ Z \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

สมการที่ (4.4) ชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะ 2 อย่างที่สำคัญของการมอดูเลตแบบนี้ อย่างแรกคือแรงดันอ้างอิงบนและล่าง $[U_P], [U_N]$ จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันด้านออกที่ต้องการโดยตรง และอย่างที่สองคือแรงดันอ้างอิงของทั้งคู่จะถูกปรับขึ้นลงอย่างอิสระต่อกันด้วยการเลือกใช้แรงดันลำดับศูนย์ ลักษณะดังกล่าวจะคล้ายกับการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ แต่เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์จะมีอิสระมากกว่าในการสร้างแรงดันด้านออกเนื่องจากมีแรงดันด้านเข้า 3 ระดับ ในความเป็นจริงแล้วการมอดูเลตของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ได้ใช้ความอิสระนี้ในการควบคุมกระแสด้านเข้าโดยการกำหนดแรงดันอ้างอิงให้เป็นสัดส่วนกับแรงดันของเฟส R และ T

4.2 การเลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ \mathbf{M}_0

การบวกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP} และ v_{ZN} ดังสมการที่ (4.5) จะทำให้แรงดันอ้างอิง u_p, u_n เลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงอยู่ในบริเวณสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นพาดแสดงดังภาพที่ 4.5

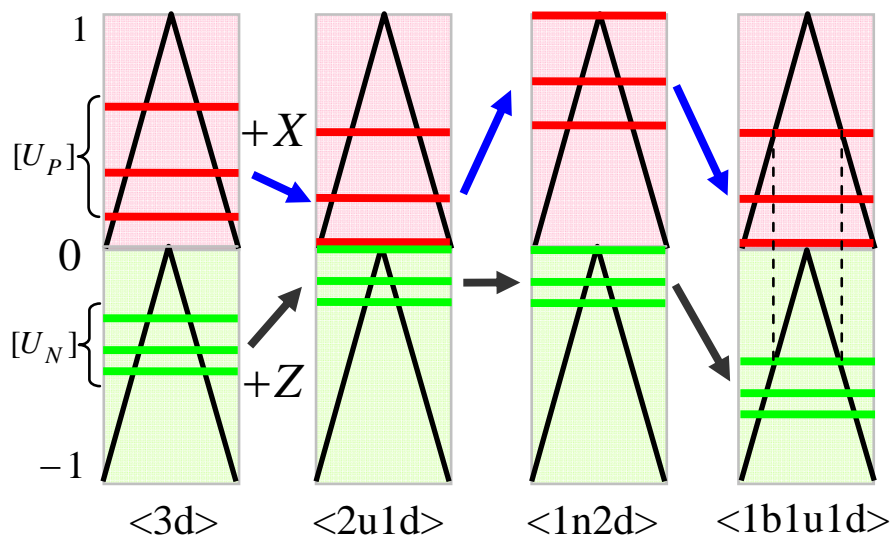
$$v_{ZP} = X[R-S], \quad v_{ZN} = -Z[S-T] \quad (4.5)$$

จากสมการที่(4.3) สามารถหาค่า X และ Z ซึ่งจะอยู่ระหว่างค่าต่ำสุด (ค่าลบ) และค่าสูงสุด (ค่าบวก) ในแต่ละคอลัมน์ เนื่องจากสมาชิกแต่ละตัวของเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} คือค่าวัฏจักรงานจึง

ต้องมีค่าเป็นบวกและต้องมีค่าไม่เกิน 1 เสมอ ดังนั้นค่าที่เป็นไปได้ของเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ จะอยู่ในช่วงตามสมการที่ (4.6)

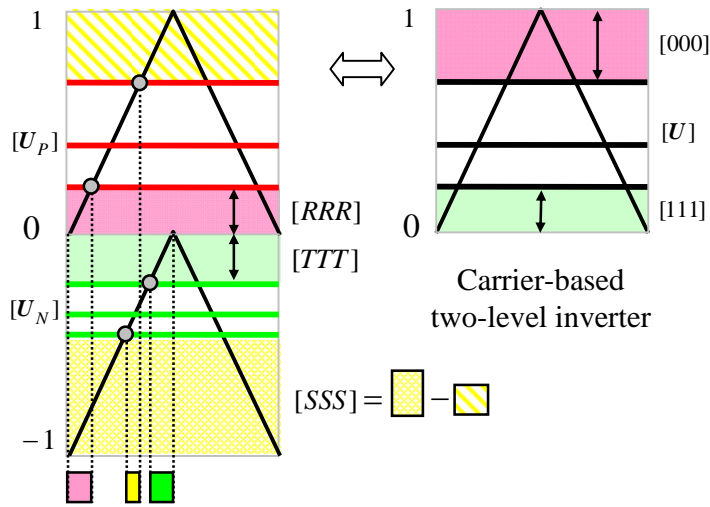
$$\left. \begin{aligned} -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \leq X \leq 1 - \max(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ -\min(m'_{12}, m'_{22}, m'_{32}) \leq Y \leq 1 - \max(m'_{12}, m'_{22}, m'_{32}) \\ -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \leq Z \leq 1 - \max(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \\ X + Y + Z = 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

แรงดันลำดับศูนย์ที่ได้คือผลรวมของแรงดันลำดับศูนย์ทั้งสองค่า $v_Z = v_{ZP} + v_{ZN}$ รูปแบบการสวิตช์ของแต่ละเฟสจะขึ้นอยู่กับทางเลือกแรงดันลำดับศูนย์ v_{ZP}, v_{ZN} และเพื่อให้ง่ายต่อการแสดงรูปแบบการสวิตช์ ในที่นี้จะใช้ตัวอักษร u, d, b, n แทนลักษณะการมอดูเลตแบบชั่วเดี่ยวยแบบชั่วคู่ แบบสองชั่วและแบบไม่มีการสวิตช์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และใช้ตัวเลขแทนจำนวนเฟส เช่น การมอดูเลตแบบ $\langle 1n2d \rangle$ จะหมายถึงการมอดูเลตแบบไม่สวิตช์ 1 เฟสและแบบชั่วคู่ 2 เฟส



ภาพที่ 4.5 การเลื่อนสัญญาณอ้างอิงขึ้นหรือลงด้วยเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์

จากมุมมองการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง U_p, U_N ที่สอดคล้องกับการใช้เวกเตอร์ศูนย์ “RRR”, “SSS” และ “TTT” สามารถเปรียบเทียบกับการใช้เวกเตอร์ศูนย์ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับได้ดังภาพที่ 4.6 การมอดูเลตในแต่ละรูปแบบ $\langle 3d \rangle, \langle 2u1d \rangle, \langle 1n2d \rangle$ และ $\langle 1b1u1d \rangle$ ที่แสดงดังภาพที่ 4.5 จะใช้เวกเตอร์ศูนย์ที่ต่างกัน ยกตัวอย่างเช่นการมอดูเลตแบบ $\langle 3d \rangle$ จะใช้เวกเตอร์ศูนย์ทั้ง 3 ตัว ส่วนการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$ จะใช้เพียง “SSS” เท่านั้น ต่อไปนี้จะอธิบายรายละเอียดของการมอดูเลตทั้ง 4 รูปแบบ



ภาพที่ 4.6 การใช้เวกเตอร์ศูนย์ของการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซั้วคู่

4.2.1 การมอดูเลตแบบ<3d>

เนื่องจากผลรวมของค่าฟังก์ชันการสวิตช์ในแต่ละแถวจะต้องมีค่าเท่ากับ 1 เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นการเลือกค่าเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ที่ง่ายที่สุดคือการเลือกตามสมการที่ (4.7) ซึ่งจะได้รูปแบบการสวิตช์เป็นซั้วคู่ทั้ง 3 เฟส ในกรณีนี้จะได้จำนวนการสวิตช์ 12 ครั้งในหนึ่งคาบ

$$X = Y = Z = \frac{1}{3} \tag{4.7}$$

4.2.2 การมอดูเลตแบบ<2u1d>

เพื่อลดจำนวนครั้งของการสวิตช์ให้เหลือเพียง 8 ครั้ง สามารถเลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ได้ตามสมการที่ (4.8) ในกรณีนี้จะได้การมอดูเลตแบบ <2u1d> ซึ่งจะหมายถึงการมอดูเลตที่ทำให้เกิดการสวิตช์แบบซั้วเดี่ยว 2 เฟสและแบบซั้วคู่ 1 เฟส

$$\left. \begin{aligned} X &= -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ Y &= 1 - X - Z \\ Z &= -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{aligned} \right\} \tag{4.8}$$

4.2.3 การมอดูเลตแบบ<1n2d>

การมอดูเลตที่สำคัญอีกแบบหนึ่งคือ <1n2d> เมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์จะเป็นไปตามสมการที่ (4.9) การมอดูเลตแบบนี้จะให้จำนวนครั้งของการสวิตช์เท่ากับกรณี <2u1d> ในกรณีนี้

จะมีเฟสที่ไม่สวิตช์ 1 เฟสและการเลือกแคลมป์เฟสด้านออกจะพิจารณาจากขนาดของแรงดันด้านเข้าสูงสุดและต่ำสุดดังต่อไปนี้

ถ้า $|R| \geq |T|$ เฟส “u” จะถูกแคลมป์ให้มีค่าเท่ากับเฟส “R”

$$u = u^* + v_{ZP} = R, \quad \begin{cases} X = 1 - \max(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ Y = 1 - X - Z \\ Z = -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{cases} \quad (4.9-1)$$

แต่ถ้า $|R| < |T|$ เฟส “w” จะถูกแคลมป์ให้มีค่าเท่ากับเฟส “T”

$$w = w^* + v_{ZV} = T, \quad \begin{cases} X = -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ Y = 1 - X - Z \\ Z = 1 - \max(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{cases} \quad (4.9-2)$$

4.2.4 การมอดูเลตแบบ<1b1u1d>

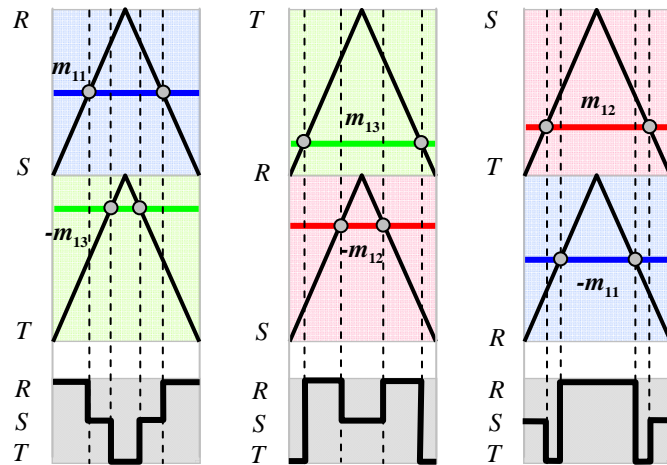
นอกจากการมอดูเลตแบบ<2u1d>และ<1n2d> แล้วสามารถเลือกให้การมอดูเลตเป็นแบบ <1b1u1d> ได้ด้วย โดยการเลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ตามสมการที่ (4.10) การมอดูเลตแบบ<1b1u1d> จะมีลักษณะเหมือนกับ<2u1d> แต่<2u1d>จะเป็นที่พึงประสงค์มากกว่า เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์จากเฟสสูงสุดเป็นต่ำสุดโดยตรง

$$\underbrace{\begin{cases} X = -\min(m'_{11}, m'_{21}, m'_{31}) \\ Y = -\min(m'_{12}, m'_{22}, m'_{32}) \\ Z = 1 - X - Y \end{cases}}_{\text{if } |R| \geq |T|} \quad \text{หรือ} \quad \underbrace{\begin{cases} X = 1 - Y - Z \\ Y = -\min(m'_{12}, m'_{22}, m'_{32}) \\ Z = -\min(m'_{13}, m'_{23}, m'_{33}) \end{cases}}_{\text{if } |R| < |T|} \quad (4.10)$$

สรุปแล้วหน้าที่หลักของเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ \mathbf{M}_0 จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบการมอดูเลตตามที่ต้องการ

4.3 การเลือกลำดับการสวิตช์

ขั้นตอนสุดท้ายของการมอดูเลตคือการจัดลำดับการสวิตช์ซึ่งสามารถทำได้โดยการจัดเรียงลำดับเฟสอย่างเหมาะสม การเปลี่ยนเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบซัฟฟ์จะทำให้ได้ลำดับการสวิตช์ที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.7 ซึ่งมี 3 ลักษณะที่เป็นไปได้ของการจัดลำดับเฟส

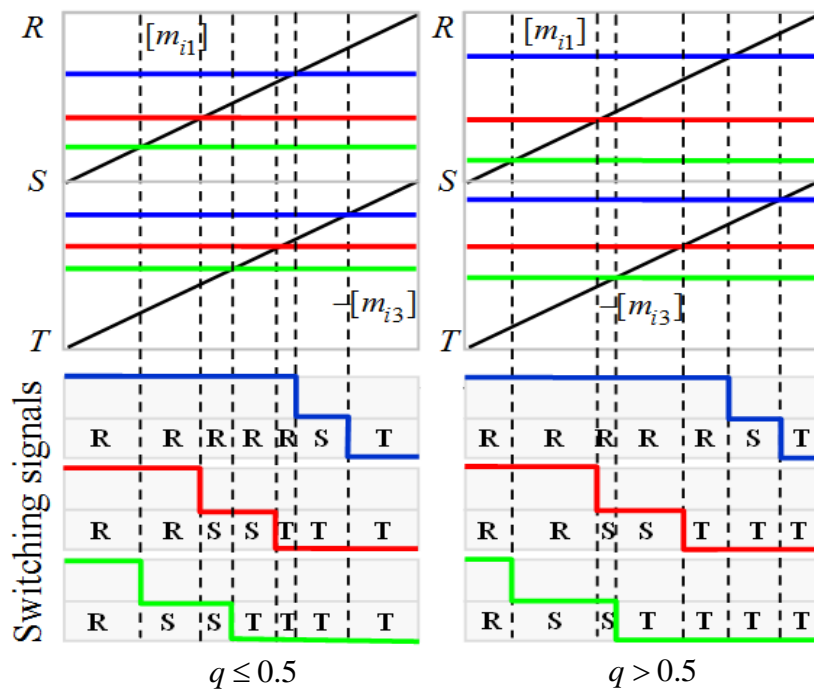


ก) อ่างอิงเฟสกลาง ข) อ่างอิงเฟสสูงสุด ค) อ่างอิงเฟสต่ำสุด

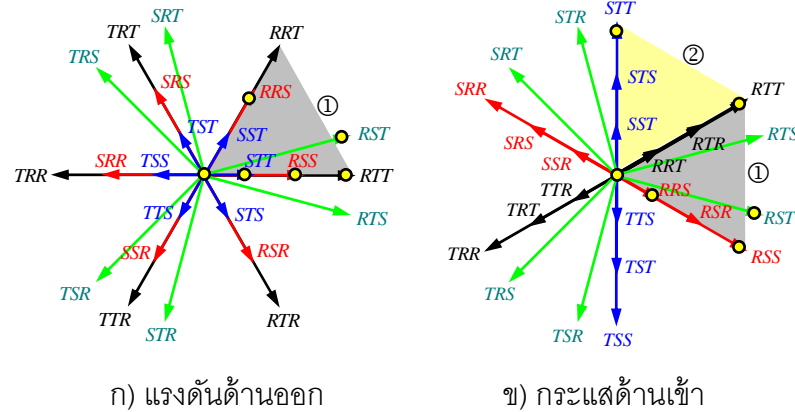
ภาพที่ 4.7 ลำดับการสวิตช์เมื่อเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงที่แตกต่างกัน

4.3.1 ลำดับการสวิตช์เมื่อเลือกเฟสกลางเป็นจุดอ้างอิง

ลำดับการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ<3d>อ้างอิงกับเฟสกลาง เมื่อกำหนดให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง แสดงได้ดังภาพที่ 4.8 ทางด้านซ้ายและด้านขวาคือกรณีแรงดันด้านออกค่าต่ำและค่าสูงตามลำดับ ภาพที่ 4.10 แสดงลำดับการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ<2u1d> ในกรณีนี้ลำดับการสวิตช์จะเหมือนกับวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอใน [8,16]

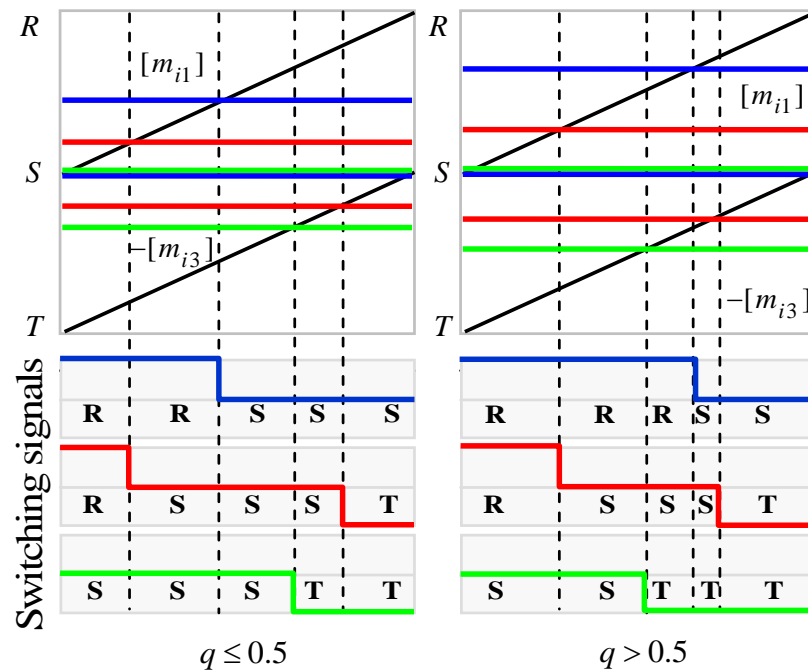


ภาพที่ 4.8 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<3d> อ่างอิงเฟสกลาง

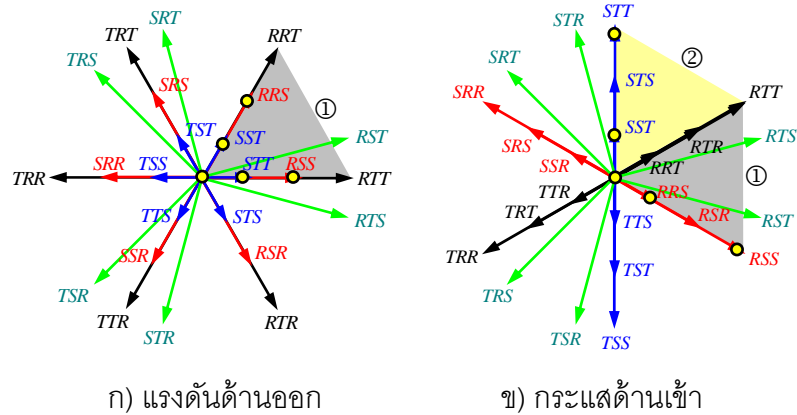


ภาพที่ 4.9 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงเฟสกลาง

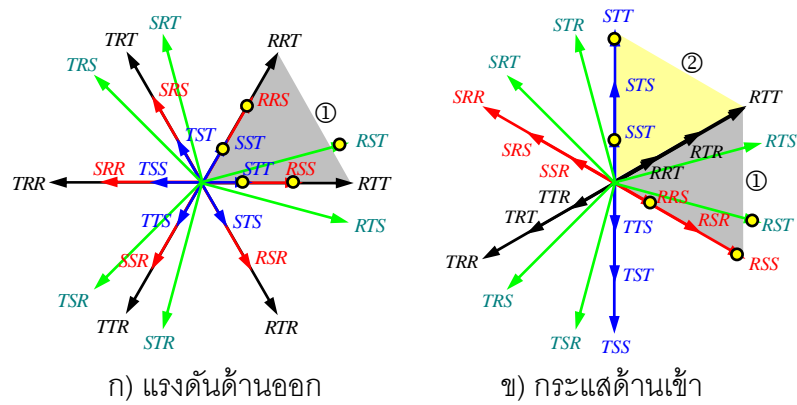
เมื่อพิจารณาการใช้สเปซเวกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงเฟสกลางจะพบว่าเวกเตอร์แรงแดันและกระแสที่เลือกใช้จะแสดงด้วยจุดสีเหลืองตามภาพที่ 4.9 เวกเตอร์ที่สร้างแรงแดันด้านออกจะอยู่ในเซกเตอร์ที่ ① และเวกเตอร์ศูนย์คือ “RRR” และ “TTT” ดังแสดงในภาพที่ 4.9(ก) ในขณะที่เวกเตอร์ที่สร้างกระแสจะอยู่ในเซกเตอร์ที่ ① และ ② ตามภาพที่ 4.9(ข)



ภาพที่ 4.10 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<2u1d> อ้างอิงเฟสกลาง

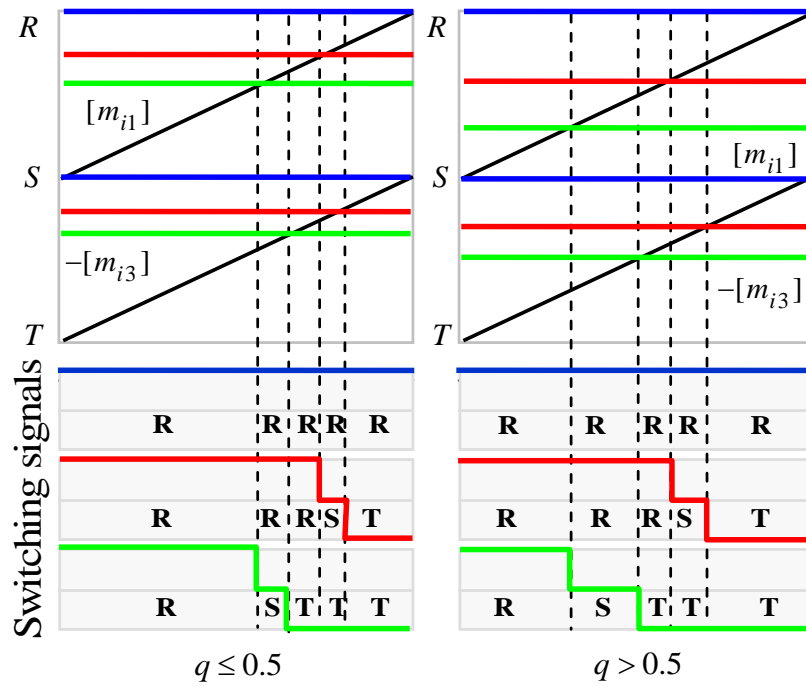


ภาพที่ 4.11 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง กรณีแรงดันด้านออกค่าต่ำ



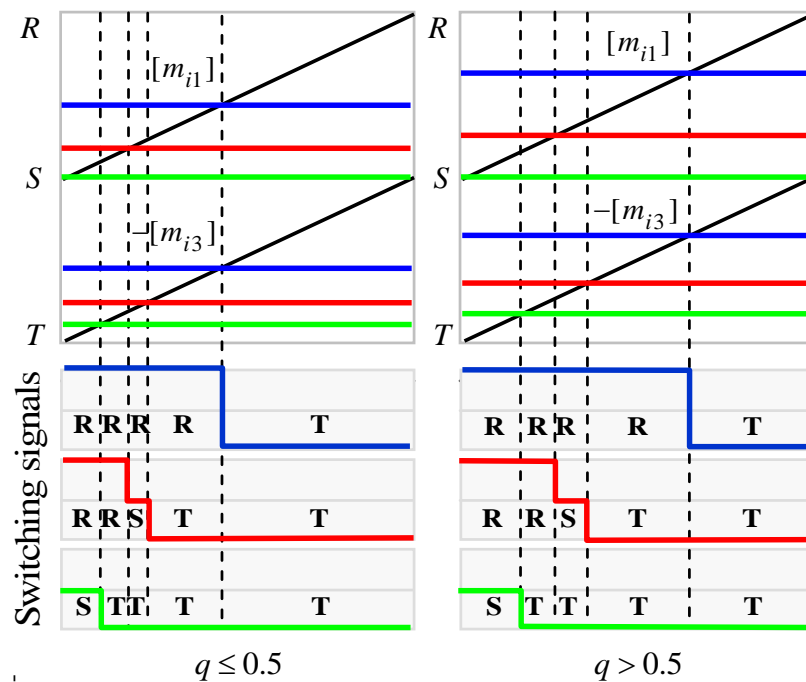
ภาพที่ 4.12 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง กรณีแรงดันด้านออกค่าสูง

ภาพที่ 4.11 และ 4.12 แสดงการใช้สเปซเวกเตอร์ของการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลางกรณีแรงดันด้านออกค่าต่ำและสูง ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าเวกเตอร์ที่สร้างแรงดันด้านออกจะอยู่ในเซกเตอร์ที่ ① ภาพที่ 4.11(ก)แสดงให้เห็นว่ากรณีที่แรงดันด้านออกมีค่าต่ำจะใช้เวกเตอร์ศูนย์ “SSS” แต่ในกรณีที่แรงดันด้านออกมีค่าสูงเวกเตอร์ศูนย์ “SSS” จะเปลี่ยนมาเป็นเวกเตอร์แอกทีฟ “RST” แทน ดังแสดงในภาพที่ 4.12(ก) การมอดูเลตแบบนี้เวกเตอร์ที่สร้างกระแสจะอยู่ในเซกเตอร์ที่ ① และ ② ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับการมอดูเลตแบบ$\langle 3d \rangle$ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาการใช้เวกเตอร์จะน้อยกว่าและแตกต่างกันด้วย

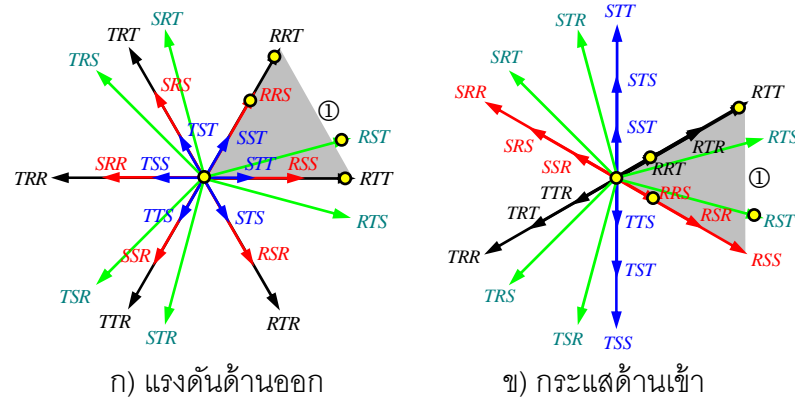


ภาพที่ 4.13 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง

ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ และ $\langle 1b1u1d \rangle$ แสดงได้ดังภาพที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเวกเตอร์แอกทีฟของทั้งสองกรณีจะเหมือนกัน แต่เวกเตอร์ศูนย์ที่ใช้จะแตกต่างกัน โดยเวกเตอร์ศูนย์ “RRR” จะใช้กับการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ ส่วนเวกเตอร์ศูนย์ “TTT” จะใช้กับการมอดูเลตแบบ $\langle 1b1u1d \rangle$ ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ทั้งสองกรณีนี้เวกเตอร์ที่สร้างแรงดันด้านออกค่าต่ำและค่าสูงจะใช้เวกเตอร์เหมือนกัน



ภาพที่ 4.14 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ$\langle 1b1u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง



ภาพที่ 4.15 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ $\langle 1n2d \rangle$ และ $\langle 1b1u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง

แม้ว่าลำดับการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบ $\langle 1b1u1d \rangle$ จะเปลี่ยนสถานะแรงดันจากค่าสูงสุดเป็นค่าต่ำสุดโดยตรงซึ่งเกิดจากการมอดูเลตแบบสองขั้ว แต่ไม่ได้เกิดจากการเลือกเฟสกลางเป็นจุดอ้างอิง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าคุณลักษณะที่ดีของการเลือกเฟสกลางเป็นจุดอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ คือ

- 1) ไม่มีการเปลี่ยนสถานะระหว่างแรงดันค่าสูงสุดกับต่ำสุดโดยตรง
- 2) การเปลี่ยนสถานะของสวิตช์เกิดขึ้นที่ละเฟส
- 3) ฮาร์ดแวร์ทั่วไปมีวงจรสร้างสัญญาณ PWM 2 ตัวรองรับการมอดูเลตแบบขั้วคู่ได้พอดี

4.3.2 ลำดับการสวิตช์เมื่อเลือกเฟสสูงสุดเป็นจุดอ้างอิง

นอกจากการเลือกให้เฟส S เป็นจุดอ้างอิงแล้ว เรายังสามารถเลือกให้เฟส R เป็นจุดอ้างอิงแทนได้ ในกรณีนี้จะได้แรงดัน $v_p = T, v_o = R, v_n = S$ และสมการที่ (4.2) จะเปลี่ยนเป็นสมการที่ (4.11) แทน เมื่อทำเป็นค่าปัดศานเทียบกับขนาดของบัส $[T - R]$ และบัส $[R - S]$ ตามลำดับ จะได้สัญญาณอ้างอิงเป็นค่าในคอลัมน์ที่สามและสองของเมทริกซ์การมอดูเลตตามสมการที่ (4.12)

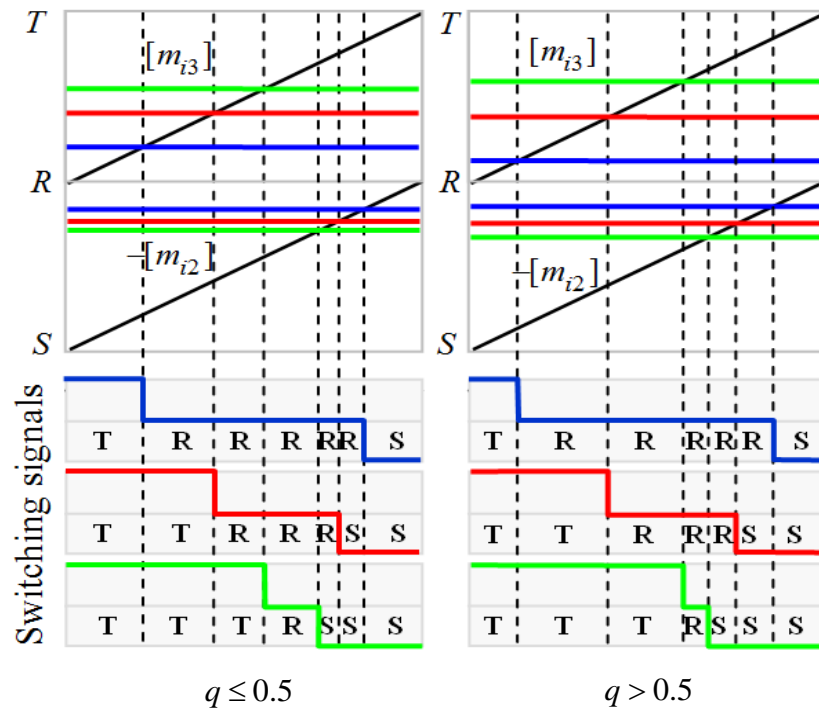
$$\begin{bmatrix} u - R \\ v - R \\ w - R \end{bmatrix} \triangleq \underbrace{\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{bmatrix}}_{u_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} u_n \\ v_n \\ w_n \end{bmatrix}}_{u_n} \triangleq \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} [T - R] - \begin{bmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{bmatrix} [R - S] \quad (4.11)$$

$$[U_p] = [m_{i3}] = \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} \geq 0, \quad [U_n] = -[m_{i2}] = -\begin{bmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (4.12)$$

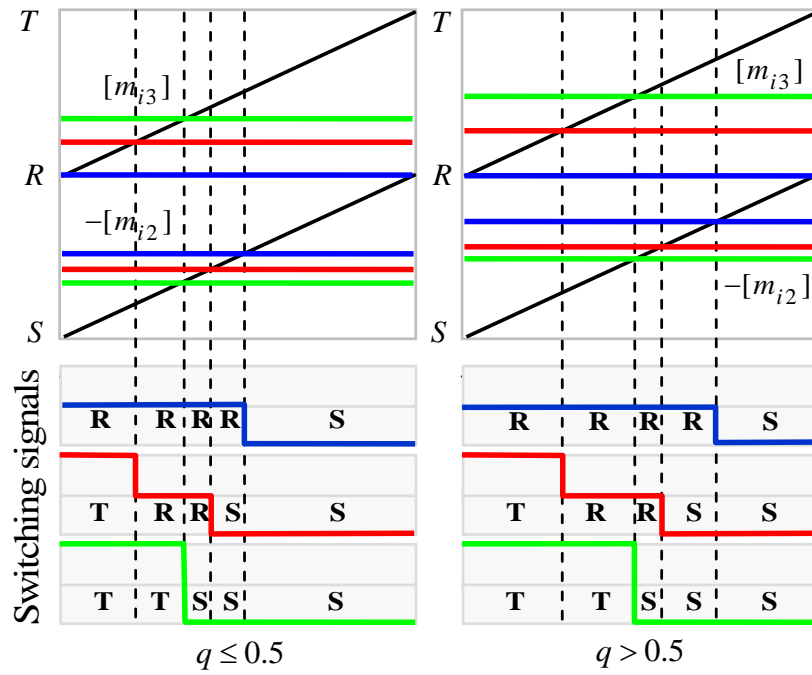
ในกรณีที่ควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งจะได้

$$[U_P] = \frac{T}{(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z \\ Z \\ Z \end{bmatrix}, \quad [U_N] = -\frac{S}{(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y \\ Y \\ Y \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

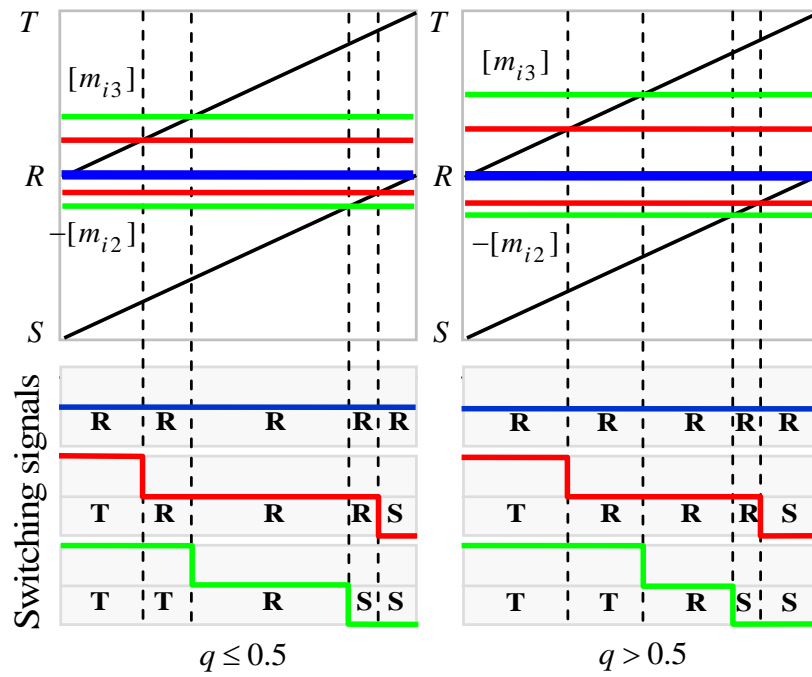
ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<3d> <2u1d> <1n2d>และ<1b1u1d> อ้างอิงเฟสสูงสุดแสดงได้ดังภาพที่ 4.16, 4.17, 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเวกเตอร์แอกทีฟของทั้งสี่กรณีจะเหมือนกันแต่เวกเตอร์ศูนย์ที่ใช้จะแตกต่างกัน โดยการมอดูเลตแบบ <3d> จะใช้เวกเตอร์ศูนย์ “RRR” “SSS” และ “TTT” ทั้งสามตัว ส่วนการมอดูเลตแบบ <1n2d>, <2u1d> และ<1b1u1d> จะใช้เวกเตอร์ศูนย์ “RRR”, “SSS” และ “TTT” ตามลำดับ ทั้งสี่กรณีนี้เวกเตอร์ที่สร้างแรงดันด้านออกค่าต่ำและค่าสูงจะใช้เวกเตอร์เหมือนกัน สังเกตได้ว่าเมื่อเลือกเฟสสูงสุดเป็นจุดอ้างอิงจะมีการเปลี่ยนสถานะระหว่างแรงดันสูงสุดกับต่ำสุดโดยตรง



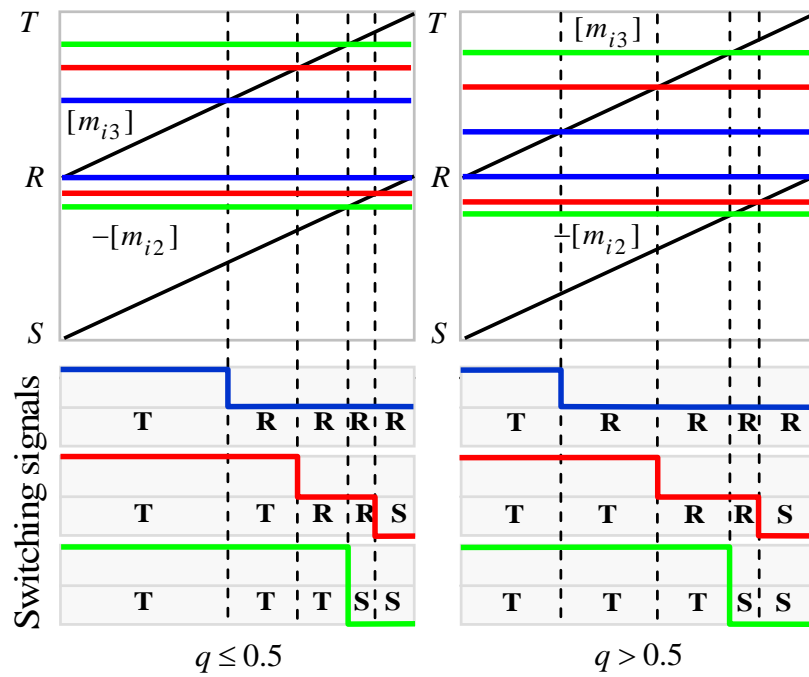
ภาพที่ 4.16 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงเฟสสูงสุด



ภาพที่ 4.17 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด

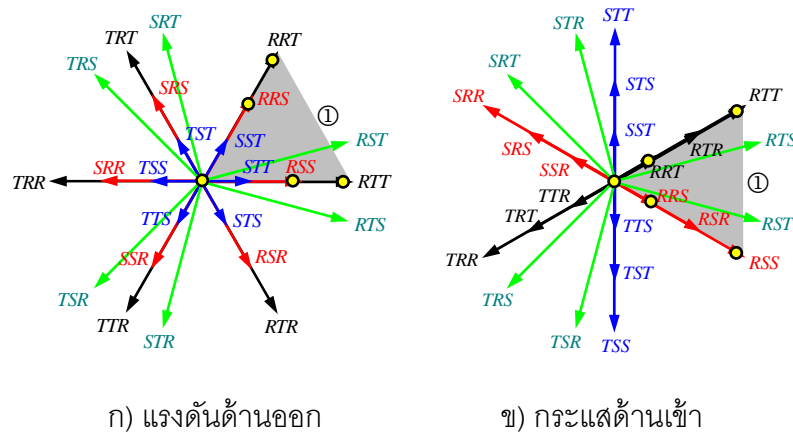


ภาพที่ 4.18 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ $\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด



ภาพที่ 4.19 ลำดับการสวิตช์สำหรับการมอดูเลตแบบ $\langle 1b1u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด

ภาพที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าการเลือกเฟสสูงสุดเป็นจุดอ้างอิง เวกเตอร์ที่สร้างแรงดันด้านออกและกระแสด้านเข้าสำหรับการมอดูเลตแบบ $\langle 3d \rangle$ $\langle 2u1d \rangle$ $\langle 1n2d \rangle$ และ $\langle 1b1u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุดจะอยู่ในเซกเตอร์ที่ ① เหมือนกัน



ภาพที่ 4.20 การใช้เวกเตอร์สำหรับการมอดูเลตแบบ $\langle 3d \rangle$ $\langle 2u1d \rangle$ $\langle 1n2d \rangle$ และ $\langle 1b1u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด

4.3.3 ลำดับการสวิตช์เมื่อเลือกเฟสต่ำสุดเป็นจุดอ้างอิง

ในทำนองเดียวกันเราสามารถเลือกให้เฟส T เป็นจุดอ้างอิง ซึ่งจะได้ลำดับการสวิตช์แตกต่างจากทั้งสองกรณี ในกรณีนี้จะได้แรงดัน $v_P = S, v_0 = T, v_N = R$ และสมการที่ (4.2) จะเปลี่ยนเป็นสมการที่ (4.14) แทน เมื่อทำเป็นค่าปัทมสถานเทียบกับขนาดของบัล $[S - T]$ และบัล $[T - R]$ จะได้สัญญาณอ้างอิงเป็นค่าในคอลัมน์ที่สองและหนึ่งของเมทริกซ์การมอดูเลตตามสมการที่ (4.15)

$$\begin{bmatrix} u - T \\ v - T \\ w - T \end{bmatrix} \triangleq \underbrace{\begin{bmatrix} u_P \\ v_P \\ w_P \end{bmatrix}}_{u_P} + \underbrace{\begin{bmatrix} u_N \\ v_N \\ w_N \end{bmatrix}}_{u_N} \triangleq \begin{bmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{bmatrix} [S - T] - \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} [T - R] \quad (4.14)$$

$$[U_P] = [m_{i2}] = \begin{bmatrix} m_{12} \\ m_{22} \\ m_{32} \end{bmatrix} \geq 0, \quad [U_N] = -[m_{i1}] = -\begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (4.15)$$

ในกรณีที่ควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งจะได้

$$[U_P] = \frac{S}{(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y \\ Y \\ Y \end{bmatrix}, \quad [U_N] = -\frac{R}{(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ X \\ X \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

โดยสรุปจะเห็นว่า การจัดลำดับการสวิตช์แบบต่างๆ สามารถปรับเปลี่ยนได้เพียงแค่เปลี่ยนเฟสด้านเข้าที่จะใช้เป็นเฟสอ้างอิงในการมอดูเลตแบบชั่วคราว

วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพที่น่าเสนอได้อาศัยเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} ที่อยู่ในรูปของคำตอบทั่วไปร่วมกับการใช้มุมมองที่พิจารณาเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ และนำแนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบชั่วคราวของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับมาพัฒนาใช้กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ การนำแนวคิดดังกล่าวมาพัฒนาใช้เป็นวิธีการที่เหมาะสมเนื่องจากสามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ง่ายๆ ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับแรงดันด้านออกที่ต้องการในลักษณะเดียวกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ แรงดันอ้างอิงดังกล่าวสามารถกำหนดได้จากฟังก์ชันการมอดูเลตโดยตรงจึงทำให้เข้าใจการมอดูเลตในเชิงการสร้างแรงดันและกระแสได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้การมอดูเลตแบบนี้ยังสามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลาย ซึ่งมี 3 ขั้นตอนง่ายๆ คือ 1) คำนวณค่าพารามิเตอร์อิสระจากเงื่อนไขของกระแสด้านเข้า 2) บวกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อกำหนดรูปแบบการมอดูเลตที่ต้องการ 3) กำหนดลำดับการสวิตช์ด้วยการเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิง

บทที่ 5

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพกับวิธีการมอดูเลตแบบต่างๆ

วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพที่นำเสนอได้แสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายด้วยขั้นตอนง่ายๆ และเพื่อเป็นการยืนยันว่าวิธีการมอดูเลตที่รู้จักกันดีเป็นกรณีพิเศษของวิธีการมอดูเลตที่ได้นำเสนอ ดังนั้นในบทนี้จะแสดงการเปรียบเทียบวิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพที่นำเสนอกับวิธีการมอดูเลตแบบต่างๆ

5.1 วิธีการมอดูเลตของ Alesina และ Venturini (AV)

เมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} รูปแบบที่ 1 และ 2 ที่ได้แสดงในสมการที่ (1.18) และ (1.19) เมื่อนำมาเขียนใหม่จะเป็นดังสมการที่ (5.1) และ (5.2) ตามลำดับ

$$\mathbf{M}_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1+2q \cos(\omega_o + \omega_i)t & 1+2q \cos\left((\omega_o + \omega_i)t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1+2q \cos\left((\omega_o + \omega_i)t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ 1+2q \cos\left((\omega_o + \omega_i)t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1+2q \cos\left((\omega_o + \omega_i)t - \frac{4\pi}{3}\right) & 1+2q \cos(\omega_o + \omega_i)t \\ 1+2q \cos\left((\omega_o + \omega_i)t - \frac{4\pi}{3}\right) & 1+2q \cos(\omega_o + \omega_i)t & 1+2q \cos\left((\omega_o + \omega_i)t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\mathbf{M}_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1+2q \cos(\omega_o - \omega_i)t & 1+2q \cos\left((\omega_o - \omega_i)t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1+2q \cos\left((\omega_o - \omega_i)t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ 1+2q \cos\left((\omega_o - \omega_i)t - \frac{4\pi}{3}\right) & 1+2q \cos(\omega_o - \omega_i)t & 1+2q \cos\left((\omega_o - \omega_i)t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1+2q \cos\left((\omega_o - \omega_i)t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1+2q \cos\left((\omega_o - \omega_i)t - \frac{4\pi}{3}\right) & 1+2q \cos(\omega_o - \omega_i)t \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

หากเราใช้เมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} รูปแบบที่ 1 และ 2 เท่าๆกันจะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \frac{\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2}{2} \\ &= \frac{2q}{3} \begin{bmatrix} (\cos \omega_o t)(\cos \omega_i t) & (\cos \omega_o t) \left(\cos \omega_i t + \frac{2\pi}{3} \right) & (\cos \omega_o t) \left(\cos \omega_i t + \frac{4\pi}{3} \right) \\ \left(\cos \omega_o t + \frac{2\pi}{3} \right) (\cos \omega_i t) & \left(\cos \omega_o t + \frac{2\pi}{3} \right) \left(\cos \omega_i t + \frac{2\pi}{3} \right) & \left(\cos \omega_o t + \frac{2\pi}{3} \right) \left(\cos \omega_i t + \frac{4\pi}{3} \right) \\ \left(\cos \omega_o t + \frac{4\pi}{3} \right) (\cos \omega_i t) & \left(\cos \omega_o t + \frac{4\pi}{3} \right) \left(\cos \omega_i t + \frac{2\pi}{3} \right) & \left(\cos \omega_o t + \frac{4\pi}{3} \right) \left(\cos \omega_i t + \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (5.3) \\ &+ \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

เมื่อนำมาเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจะได้

$$\mathbf{M} = \frac{2}{3V_{im}^2} \begin{bmatrix} V_{om}(\cos \omega_o t) \\ V_{om}\left(\cos \omega_o t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{om}\left(\cos \omega_o t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{im}(\cos \omega_i t) & V_{im}\left(\cos \omega_i t + \frac{2\pi}{3}\right) & V_{im}\left(\cos \omega_i t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$+ \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์การมอดูเลตในสมการ (5.4) อยู่ในรูปไซน์ฟังก์ชัน เมื่อเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปค่าขณะหนึ่ง จะได้เป็น

$$\mathbf{M} = \underbrace{\frac{1}{R^2 + S^2 + T^2} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_U} \begin{bmatrix} R & S & T \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_0} \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\text{โดยที่ } \frac{3}{2}V_{im}^2 = R^2 + S^2 + T^2$$

เมื่อนำสมการที่ (5.5) ไปเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.18) จะพบว่าเมทริกซ์การมอดูเลตของ Alesina และ Venturini จะเป็นกรณีเฉพาะของเมทริกซ์การมอดูเลตทั่วไปโดยจะใช้เฉพาะเทอมของ \mathbf{M}_U และ \mathbf{M}_0 ($b=d=0$) เท่านั้นและจากเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ \mathbf{M}_0 ในสมการที่ (5.5) จะได้ว่า $X = Y = Z = 1/3$ เหมือนกับสมการที่ (4.6) ซึ่งจะได้การมอดูเลตเป็นแบบ <3d>

5.2 วิธีการมอดูเลตแบบสเกลาร์

ฟังก์ชันการมอดูเลต $[m_L \quad m_K \quad m_M]$ สำหรับการมอดูเลตแบบสเกลาร์ในงานวิจัย[4] แสดงได้ดังสมการที่ (5.6)

$$\left. \begin{aligned} m_L &= \frac{(v_o^* - v_M)v_L}{R^2 + S^2 + T^2} \\ m_K &= \frac{(v_o^* - v_M)v_K}{R^2 + S^2 + T^2} \\ m_M &= 1 - m_L - m_K \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

โดยที่ v_M, v_L และ v_K คือแรงดันของเฟสที่มีขนาดเป็น $\max(|R|, |S|, |T|)$, $\text{mid}(|R|, |S|, |T|)$ และ $\min(|R|, |S|, |T|)$ ตามลำดับ $v_o^* = u^*$ หรือ v^* หรือ w^* และ m_L, m_K และ m_M คือวิถีจักรงานของการใช้แรงดัน v_L, v_K และ v_M ตามลำดับ สมการที่(5.6) เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$\mathbf{M} = \frac{1}{R^2 + S^2 + T^2} \left(\begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_M & v_K & v_L \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_M \\ v_M \\ v_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_M & v_K & v_L \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

หากสมมติให้ $|R| > |T| > |S|$ ดังนั้นจะได้

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M} &= \frac{1}{R^2 + S^2 + T^2} \left(\begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & S & T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ R \\ R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & S & T \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M} &= \frac{1}{R^2 + S^2 + T^2} \left(\begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & S & T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^2 & RS & RT \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

จาก $R^2 + S^2 + T^2 = \|\mathbf{v}_i\|^2$ จะได้

$$\mathbf{M} = \underbrace{\frac{1}{R^2 + S^2 + T^2} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & S & T \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_U} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - R^2 / \|\mathbf{v}_i\|^2 & -RS / \|\mathbf{v}_i\|^2 & -RT / \|\mathbf{v}_i\|^2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_0} \quad (5.9)$$

จากสมการที่ (5.9) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.18) จะพบว่าเมทริกซ์การมอดูเลตแบบนี้จะเป็นกรณีเฉพาะของเมทริกซ์การมอดูเลตทั่วไปที่นำเสนอโดยจะมีเฉพาะเทอมของ \mathbf{M}_U และ \mathbf{M}_0 ($b=d=0$) และ X, Y, Z เท่ากับ $1 - R^2 / \|\mathbf{v}_i\|^2, -RS / \|\mathbf{v}_i\|^2, -RT / \|\mathbf{v}_i\|^2$ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า m_L, m_K และ m_M จะพบว่าทุกๆ ค่าฟังก์ชันการมอดูเลต $0 < m_{ij} < 1$ ดังนั้นจะได้ข้อสรุปว่าวิถีการมอดูเลตแบบนี้จะเป็นแบบ <3d>

5.3 วิธีการมอดูเลตผ่านส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเทียม

จากสมการความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกตามสมการที่ (1.26) นำมาเขียนใหม่อีกครั้งได้ตามสมการที่ (5.10)

$$[\mathbf{v}_o^*] = \mathbf{I}(\mathbf{R}[\mathbf{v}_i]) \quad (5.10)$$

โดยที่เทอมของ \mathbf{R} และเทอมของ \mathbf{I} จะเขียนอยู่ในรูปของไซน์ฟังก์ชันแสดงดังสมการที่ (1.28) และ (1.29) ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของค่าขณะหนึ่ง ได้ตามสมการที่ (5.11) และ (5.12) ตามลำดับ

$$\mathbf{R} = \frac{K_R}{V_{im}} \begin{bmatrix} V_{im} \cos(\omega_i t) \\ V_{im} \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \\ V_{im} \cos(\omega_i t + 4\pi/3) \end{bmatrix}^T \quad (5.11)$$

$$= \frac{K_R}{V_{im}} [R \quad S \quad T]$$

$$\mathbf{I} = \frac{K_I}{V_{om}} \begin{bmatrix} V_{om} \cos(\omega_o t) \\ V_{om} \cos(\omega_o t + 2\pi/3) \\ V_{om} \cos(\omega_o t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$= \frac{K_I}{V_{om}} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix}$$

และเมื่อนำสมการที่ (5.11) และ (5.12) แทนในสมการที่ (5.10) จะได้

$$\mathbf{M} = \frac{K_I K_R}{V_{om} V_{im}} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} [R \quad S \quad T] + \mathbf{M}_0 \quad (5.13)$$

$$= \frac{2}{3V_{im}^2} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} [R \quad S \quad T] + \mathbf{M}_0$$

$$= \frac{1}{R^2 + S^2 + T^2} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} [R \quad S \quad T] + \mathbf{M}_0$$

$$\text{โดยที่ } q = \frac{V_{om}}{V_{im}} = \frac{3K_R K_I}{2}$$

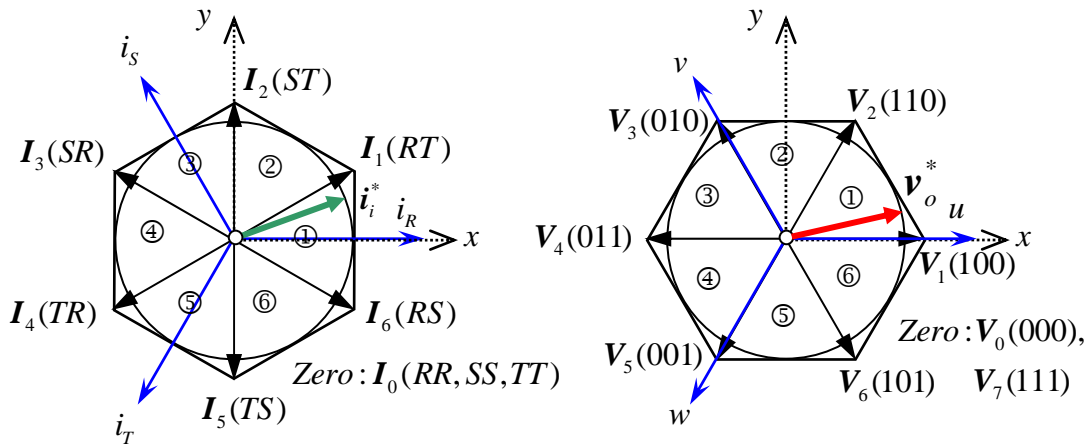
เมื่อพิจารณาสมการที่(5.13) จะเห็นได้ว่าเมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} เป็นกรณีเฉพาะของเมทริกซ์การมอดูเลตทั่วไปที่ใช้เพียงเทอมของ \mathbf{M}_U

5.4 วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อม

รูปแบบการสวิตช์ทั้งหมดของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งจะมีทั้งหมด 27 รูปแบบ แต่รูปแบบการสวิตช์ที่ใช้ในวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมจะมีเพียง 21 รูปแบบเท่านั้น เนื่องจากวิธีการมอดูเลตแบบนี้ไม่สามารถทำให้เกิดสถานะการสวิตช์ที่ใช้แรงดันทั้ง 3 เฟส พร้อมกันได้ เพราะทุกๆ ขณะของส่วนเชื่อมโยงไฟตรงเทียบนั้นจะเป็นเสมือนแรงดันระหว่างเฟสด้านเข้า 2 ระดับ รูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมจะขึ้นอยู่กับกรเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับในแต่ละเซกเตอร์ของแรงดันด้านออกและกระแสด้านเข้าตามภาพที่ 5.1 ซึ่งมีเทคนิคในการเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับมากมาย

ตารางที่ 5.1 รูปแบบการสวิตช์ทั้งหมดของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

Groups	Switching pattern	Output-Input Connection		
		u	v	w
Group I Rotating vectors	1	R	S	T
	2	T	R	S
	3	S	T	R
	4	R	T	S
	5	S	R	T
	6	T	S	R
Group II Alternating vectors	7	R	T	T
	8	S	T	T
	9	S	R	R
	10	T	R	R
	11	T	S	S
	12	R	S	S
	13	R	R	T
	14	S	S	T
	15	S	S	R
	16	T	T	R
	17	T	T	S
	18	R	R	S
	19	R	T	R
	20	S	T	S
	21	S	R	S
	22	T	R	T
	23	T	S	T
	24	R	S	R
Group III Zero vectors	25	R	R	R
	26	S	S	S
	27	T	T	T



(a) สเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านเข้า (b) สเปซเวกเตอร์ของแรงดันด้านออก

ภาพที่ 5.1 สเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านเข้าและแรงดันด้านออกในแต่ละเซกเตอร์

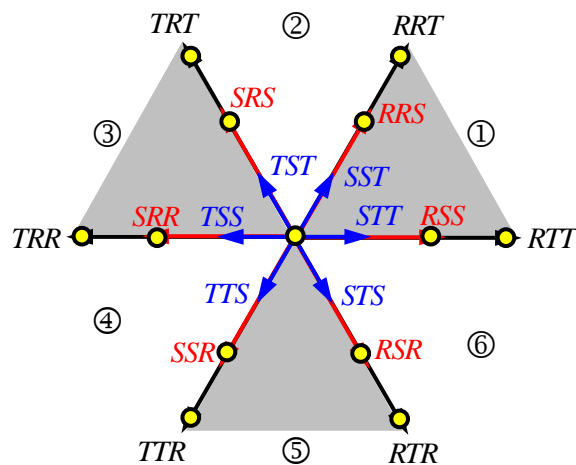
งานวิจัย[12] ได้นำเสนอการเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับโดยมีเทคนิคดังนี้

1. จัดลำดับการสวิตช์โดยเรียงจากเวกเตอร์แรงดันระหว่างเฟสค่ากลาง → ค่าสูงสุด → เวกเตอร์ศูนย์เสมอ
2. เลือกเวกเตอร์ศูนย์ที่ให้จำนวนการสวิตช์น้อยที่สุดสำหรับแต่ละเซกเตอร์ของกระแสและแรงดัน

รูปแบบการสวิตช์ในตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับดังกล่าวจะได้รับการมอดูเลตเป็นแบบ $\langle 2u1d \rangle$ และ $\langle 1b1u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด และแบบ $\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลางและเฟสต่ำสุด ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการกำหนดให้ลำดับเวกเตอร์แรงดันระหว่างเฟสค่ากลางอยู่ก่อนค่าสูงสุดเสมอทั้ง 36 รูปแบบผสมของเซกเตอร์แรงดันและกระแสจะทำให้กรณีที่มีการมอดูเลตเป็นแบบ $\langle 1n2d \rangle$ มีจำนวนการสวิตช์ 10 ครั้งในหนึ่งคาบ เนื่องจากมีการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์พร้อมกันสองเฟส(แสดงเป็นสีแดงในตาราง) ดังนั้นงานวิจัย [13] ได้นำเสนอการลดจำนวนครั้งการสวิตช์ดังกล่าวโดยจัดเรียงลำดับเวกเตอร์ใหม่ และเลือกเวกเตอร์ศูนย์ใหม่ให้สอดคล้องกันด้วยทำให้การเปลี่ยนสถานะการสวิตช์เกิดขึ้นที่ละเฟส และจำนวนการสวิตช์ลดลงเหลือ 8 ครั้ง นอกจากนั้นผลของการเลือกเวกเตอร์และจัดเรียงลำดับใหม่ทำให้การมอดูเลตแบบ $\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลางและเฟสต่ำสุดจะเปลี่ยนเป็น $\langle 2u1d \rangle$ และ $\langle 1b1u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุดแทน ดังแสดงในตารางที่ 5.3

การมอดูเลตในงานวิจัย[12]และ[13] จะเป็นกรณีที่เลือกเวกเตอร์ศูนย์ที่เชื่อมต่อกับเฟสด้านเข้าที่มีขนาดแรงแดันค่าสูงสุดหรือค่ากลางทำให้แรงแดันโหมดร่วมสูง ดังนั้นงานวิจัย[14] ได้นำเสนอการเลือกใช้เวกเตอร์ศูนย์ที่เชื่อมต่อกับเฟสด้านเข้าที่มีขนาดแรงแดันค่าต่ำสุดเพื่อลดแรงแดันโหมดร่วม การจัดเรียงลำดับการสวิตช์ในกรณีนี้เป็นดังตารางที่ 5.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจะได้การมอดูเลตแบบ $<2u1d>$ อ้างอิงเฟสสูงสุดเท่านั้นและมีจำนวนการสวิตช์ 8 ครั้งเท่าเดิม

เมื่อพิจารณาการใช้เวกเตอร์ในตารางที่ 5.2-5.4 จะพบว่าการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ [12-14] จะเป็นกรณีที่ใช้เวกเตอร์แรงแดันซึ่งแทนด้วยจุดสีเหลืองในภาพที่ 5.2 โดยเวกเตอร์ สีดำ สีแดงและสีน้ำเงิน แทนเวกเตอร์แรงแดันขนาดสูงสุด กลาง และต่ำสุด ตามลำดับ วิธีการมอดูเลตในงานวิจัย[12-14] จะสร้างแรงแดันด้านนอกโดยใช้แรงแดันด้านเข้าระหว่างเฟสขนาดสูงสุดและ ขนาดกลางจึงทำให้การสูญเสียที่สวิตช์มีค่าสูง ดังนั้นงานวิจัย[15] จึงนำเสนอการมอดูเลตที่สร้างแรงแดันด้านนอกโดยใช้แรงแดันด้านเข้าระหว่างเฟสขนาดกลางและขนาดต่ำสุดแทน แต่ยังคงเลือกใช้เวกเตอร์ศูนย์ที่เชื่อมต่อกับเฟสด้านเข้าที่มีขนาดแรงแดันค่าต่ำสุดในทำนองเดียวกับงานวิจัย[14] รูปแบบการสวิตช์ในกรณีนี้จะเป็นไปตามตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตจะเป็นแบบ $<2u1d>$ อ้างอิงเฟสกลาง จำนวนการสวิตช์ 8 ครั้ง แม้ว่าวิธีการมอดูเลตแบบนี้จะสามารถลดการสูญเสียที่สวิตช์ 15-35% อย่างไรก็ตามการมอดูเลตดังกล่าวจะทำให้ค่าสูงสุดของดัชนีการมอดูเลตน้อยลง เนื่องจากแรงแดันด้านเข้าที่ใช้สร้างแรงแดันด้านนอกจะมีขนาดต่ำลง



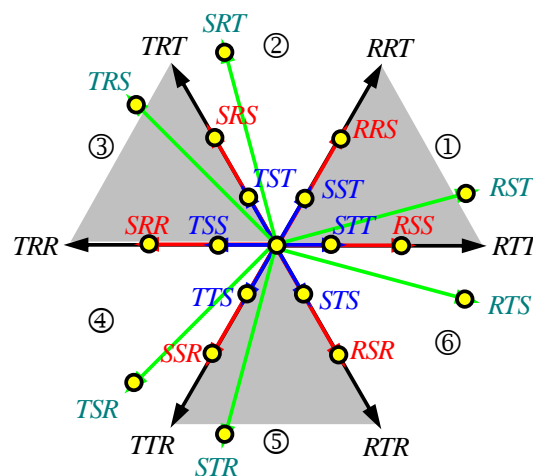
ภาพที่ 5.2 การใช้เวกเตอร์แรงแดันในการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมในงานวิจัย[12-14]

5.5 วิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรง

การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรงสามารถเลือกใช้สเปซเวกเตอร์ได้ครบทั้ง 27 เวกเตอร์โดยมีเวกเตอร์หมุนเพิ่มเข้ามา ทำให้มีอิสระในการเลือกใช้เวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัย[16] ได้นำเสนอการเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับโดยมีข้อกำหนดหลายข้อดังนี้

1. กระแสด้านเข้าและด้านออกมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์
2. เลือกใช้แรงดันระหว่างเฟสด้านเข้าขนาดต่ำสุดและขนาดกลาง หลีกเลี่ยงการใช้แรงดันระหว่างเฟสขนาดสูงสุด
3. การเปลี่ยนสถานะการสวิตช์เกิดขึ้นที่ละเฟส
4. ไม่มีการเปลี่ยนสถานะระหว่างค่าแรงดันสูงสุดกับต่ำสุดโดยตรง
5. เลือกใช้เวกเตอร์ศูนย์ที่มีขนาดต่ำสุด

จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้นจะบังคับให้ต้องเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับเป็นไปตามตารางที่ 5.5 ซึ่งจะได้การมอดูเลตเป็นแบบ $<2u1d>$ อ้างอิงเฟสกลาง จำนวนการสวิตช์ 8 ครั้ง ลักษณะดังกล่าวจะมีความสอดคล้องกับวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมในงานวิจัย [15] อย่างไรก็ตามหากพิจารณาการใช้เวกเตอร์ในตารางที่ 5.6 จะพบว่าวิธีการมอดูเลตแบบนี้จะใช้กลุ่มของเวกเตอร์หมุนร่วมในการมอดูเลตด้วย โดยจะใช้เวกเตอร์ดังกล่าวแทนเวกเตอร์ศูนย์ในกรณีที่แรงดันด้านออกมีค่าสูง ดังนั้นการมอดูเลตแบบนี้จะให้ค่าสูงสุดของดัชนีการมอดูเลตเพิ่มขึ้นเป็น 86.6% ซึ่งสูงกว่าในงานวิจัย[15] การใช้เวกเตอร์ในแต่ละเซกเตอร์ของการมอดูเลตแบบนี้สามารถแทนด้วยจุดสีเหลืองในภาพที่ 5.3



ภาพที่ 5.3 การใช้เวกเตอร์แรงดันของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรงในงานวิจัย[16]

ตารางที่ 5.2 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมในงานวิจัย[12]

Borojevic[12]	Input-current space vector																							
Current sequence	R>T>S		R>S>T		S>R>T		S>T>R		T>S>R		T>R>S		R>T>S											
Zero vector(max_abs)	RRR		TTT		SSS		RRR		TTT		SSS													
Phase angle	330-360		0-30		30-60		60-90		90-120		120-150		150-180		180-210		210-240		240-270		270-300		300-330	
Max ,Mid bus	RS,RT		RT,ST		ST,SR		SR,TR		TR,TS		TS,RS													
Sector	I		II		III		IV		V		VI													
I 100,110,000,111	RSS		RTT		STT		SRR		TRR		TSS													
	RRS		RRT		SST		SSR		TTR		TTS													
	RRT		SST		SSR		TTR		TTS		RRS													
	RTT		STT		SRR		TRR		TSS		RSS													
	TTT		TTT		RRR		RRR		SSS		SSS													
	<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>							
max		mid		max		max		mid		max		max		mid		max								
II 110, 010, 000,111	RRS		RRT		SST		SSR		TTR		TTS													
	SRS		TRT		TST		RSR		RTR		STS													
	TRT		TST		RSR		RTR		STS		SRS													
	RRT		SST		SSR		TTR		TTS		RRS													
	RRR		SSS		SSS		TTT		TTT		RRR													
	<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>							
mid		min		min		mid		min		min		mid		min		min								
III 010,011,000,111	SRS		TRT		TST		RSR		RTR		STS													
	SRR		TRR		TSS		RSS		RTT		STT													
	TRR		TSS		RSS		RTT		STT		SRR													
	TRT		TST		RSR		RTR		STS		SRS													
	TTT		TTT		RRR		RRR		SSS		SSS													
	<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>							
IV 011, 001, 000,111	SRR		TRR		TSS		RSS		RTT		STT													
	SSR		TTR		TTS		RRS		RRT		SST													
	TTR		TTS		RRS		RTT		STT		SRR													
	TRR		TSS		RSS		RTT		STT		SRR													
	RRR		SSS		SSS		TTT		TTT		RRR													
	<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>							
V 001,101,000,111	SSR		TTR		TTS		RRS		RRT		SST													
	RSR		RTR		STS		SRS		TRT		TST													
	RTR		STS		SRS		TRT		TST		RRS													
	TTR		TTS		RRS		RTT		STT		SSR													
	TTT		TTT		RRR		RRR		SSS		SSS													
	<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>							
VI 101, 100, 000,111	RSR		RTR		STS		SRS		TRT		TST													
	RSS		RTT		STT		SRR		TRR		TSS													
	RTT		STT		SRR		TRR		TSS		RSS													
	RTR		STS		SRS		TRT		TST		RRS													
	RRR		SSS		SSS		TTT		TTT		RRR													
	<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>		<2u1d>		<1b1u1d>		<1n2d>							

หมายเหตุ รูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์แรงดันที่ III และ V จะเหมือนกับ I และรูปแบบการสวิตช์ของเซกเตอร์แรงดันที่ IV และ VI จะเหมือนกับ II

ตารางที่ 5.3 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมในงานวิจัย[13]

Nielsen[13]	Input-current space vector											
Current sequence	R>T>S		R>S>T		S>R>T		S>T>R		T>S>R		T>R>S	
Zero vector(max_abs)	RRR		TTT		SSS		RRR		TTT		SSS	
Phase angle	330-360	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330
Max ,Mid bus	RS,RT		RT,ST		ST,SR		SR,TR		TR,TS		TS,RS	
Sector	I		II		III		IV		V		VI	
I 100,110,000,111	RSS	RRT	STT	SSR	TRR	TTS						
	RRS	RTT	SST	SRR	TTR	TSS						
	RRT	STT	SSR	TRR	TTS	RSS						
	RTT	SST	SRR	TTR	TSS	RRS						
II 110, 010, 000,111	TTT	SSS	RRR	TTT	SSS	RRR						
	SRS	RRT	TST	SSR	RTR	TST						
	RRS	TRT	SST	RSR	TTR	TSS						
	RRT	TST	SSR	RTR	TTS	RSS						
III 010,011,000,111	TRT	SST	RSR	TTR	STS	RSR						
	TTT	SSS	RRR	TTT	SSS	RRR						
	SRS	TRR	TST	RSS	RTR	STT						
	SRR	TRT	TSS	RSR	RTT	STS						
IV 011, 001, 000,111	TRR	TST	RSS	RTR	STT	SRS						
	TTT	SSS	RRR	TTT	SSS	RRR						
	SSR	TRR	TTS	RSS	RRT	STT						
	SRR	TTR	TSS	RRS	RTT	SST						
V 001,101,000,111	TRR	TTS	RSS	RRT	STT	SSR						
	TTR	TSS	RRS	RTT	SST	RSR						
	TTT	SSS	RRR	TTT	SSS	RRR						
	SSR	RTR	TTS	SRS	RRT	TST						
VI 101, 100, 000,111	RSR	TTR	STS	RRS	TRT	SST						
	RTR	TTS	SRS	RRT	TST	SSR						
	TTT	SSS	RRR	TTT	SSS	RRR						
	RRT	STT	SRR	TRT	TSS	RSS						
	RTR	STT	SRS	TRR	TST	RSS						
	RTT	STS	SRR	TRT	TSS	RSR						
	TTT	SSS	RRR	TTT	SSS	RRR						
	RSS	RTR	STT	SRS	TRR	TST						
max,min												

ตารางที่ 5.4 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมในงานวิจัย[14]

Enjeti[14]	Input-current space vector											
Current sequence	R>T>S	R>S>T	S>R>T		S>T>R		T>S>R		T>R>S		R>T>S	
Zero vector(max_abs)	RRR		TTT		SSS		RRR		TTT		SSS	
Phase angle	330-360	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330
Max ,Mid bus	RS,RT		RT,ST		ST,SR		SR,TR		TR,TS		TS,RS	
Sector	I		II		III		IV		V		VI	
I 100,110,000,111	RSS	SSS	RRT	RRR	STT	TTT	SSR	SSS	TRR	RRR	TTS	TTT
	RRS	RSS	RTT	RRT	SST	STT	SRR	SSR	TTR	TRR	TSS	TTS
	RRT	RRS	STT	RTT	SSR	SST	TRR	SRR	TTS	TTR	RSS	TSS
	RTT	RRT	SST	STT	SRR	SSR	TTR	TRR	TSS	TTS	RRS	RSS
II 110, 010, 000,111	TTT	RTT	SSS	SST	RRR	SRR	TTT	TTR	SSS	TSS	RRR	RRS
	SRS	SSS	RRT	RRR	TST	TTT	SSR	SSS	RTR	RRR	TST	TTT
	RRS	SRS	TRT	RRT	SST	TST	RSR	SSR	TTR	RTR	TSS	TST
	RRT	RRS	TST	TRT	SSR	SST	RTR	RSR	TTS	TTR	RSS	TSS
III 010,011,000,111	TRT	RRT	SST	TST	RSR	SSR	TTR	RTR	STS	TTS	RSR	RSS
	TTT	TRT	SSS	SST	RRR	RSR	TTT	TTR	SSS	STS	RRR	RSR
	SRS	SSS	TRR	RRR	TST	TTT	RSS	SSS	RTR	RRR	STT	TTT
	SRR	SRS	TRT	TRR	TSS	TST	RSR	RSS	RTT	RTR	STS	STT
IV 011, 001, 000,111	TRR	SRR	TST	TRT	RSS	TSS	RTR	RSR	STT	RTT	SRS	STS
	TRT	TRR	TSS	TST	RSR	RSS	RTT	RTR	STS	STT	SRR	SRS
	TTT	TRT	SSS	TSS	RRR	RSR	TTT	RTT	SSS	STS	RRR	SRR
	SSR	SSS	TRR	RRR	TTS	TTT	RSS	SSS	RRT	RRR	STT	TTT
V 001,101,000,111	SRR	SSR	TTR	TRR	TSS	TTS	RRS	RSS	RTT	RRT	SST	STT
	TRR	SRR	TTS	TTR	RSS	TSS	RRT	RRS	STT	RTT	SSR	SST
	TTR	TRR	TSS	TTS	RRS	RSS	RTT	RRT	SST	STT	SRR	SSR
	TTT	TTR	SSS	STS	RRR	RRS	TTT	TRT	SSS	SST	RRR	RSR
VI 101, 100, 000,111	RSS	SSS	RTR	RRR	STT	TTT	SRS	SSS	TRR	RRR	TST	TTT
	RSR	RSS	RTT	RTR	STS	STT	SRR	SRS	TRT	TRR	TSS	TST
	RTR	RSR	STT	RTT	SRS	STS	TRR	SRR	TST	TRT	RSS	TSS
	RTT	RTR	STS	STT	SRR	SRS	TRT	TRR	TSS	TST	RSR	RSS
	TTT	RTT	SSS	STS	RRR	SRR	TTT	TRT	SSS	TSS	RRR	RSR
<2u1d>												
max,min												

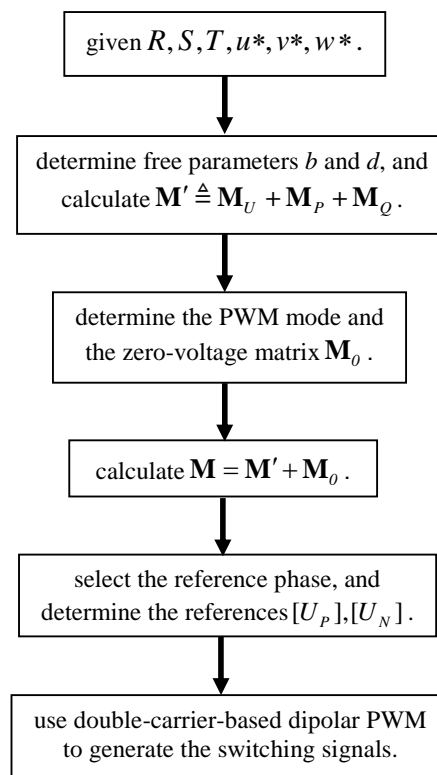
ตารางที่ 5.5 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางอ้อมในงานวิจัย[15]

Helle[15]	Input-current space vector												
Current sequence	R>T>S		R>S>T		S>R>T		S>T>R		T>S>R		T>R>S		R>T>S
Zero vector(min_abs)	TTT		SSS		RRR		TTT		SSS		RRR		TTT
Phase angle	330-360	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	
Mid ,Min bus	RT,TS	RS,ST		SR ,RT		ST,TR		TS,SR		TR,RS		RT,TS	
Sector	I		II		III		IV		V		VI		
I 100,110,000,111	TSS	RRS		RTT		SST		SRR		TTR		TSS	
	TTS	RSS		RRT		STT		SSR		TRR		TTS	
	TTT	SSS		RRR		TTT		SSS		RRR		TTT	
	RTT	SST		SRR		TTR		TSS		RRS		RTT	
	RRT	STT		SSR		TRR		TTS		RSS		RRT	
II 110, 010, 000,111	STS	RRS		TRT		SST		RSR		TTR		STS	
	TTS	SRS		RRT		TST		SSR		RTR		TTS	
	TTT	SSS		RRR		TTT		SSS		RRR		TTT	
	TRT	SST		RSR		TTR		STS		RRS		TRT	
	RRT	TST		SSR		RTR		TTS		SRS		RRT	
III 010,011,000,111	STS	SRR		TRT		TSS		RSR		RTT		STS	
	STT	SRS		TRR		TST		RSS		RTR		STT	
	TTT	SSS		RRR		TTT		SSS		RRR		TTT	
	TRT	TSS		RSR		RTT		STS		SRR		TRT	
	TRR	TST		RSS		RTR		STT		SRS		TRR	
IV 011, 001, 000,111	SST	SRR		TTR		TSS		RRS		RTT		SST	
	STT	SSR		TRR		TTS		RSS		RRT		STT	
	TTT	SSS		RRR		TTT		SSS		RRR		TTT	
	TTR	TSS		RRS		RTT		SST		SRR		TTR	
	TRR	TTS		RSS		RRT		STT		SSR		TRR	
V 001,101,000,111	SST	RSR		TTR		STS		RRS		TRT		SST	
	TST	SSR		RTR		TTS		SRS		RRT		TST	
	TTT	SSS		RRR		TTT		SSS		RRR		TTT	
	TTR	STS		RRS		TRT		SST		RSR		TTR	
	RTR	TTS		SRS		RRT		TST		SSR		RTR	
VI 101, 100, 000,111	TSS	RSR		RTT		STS		SRR		TRT		TSS	
	TST	RSS		RTR		STT		SRS		TRR		TST	
	TTT	SSS		RRR		TTT		SSS		RRR		TTT	
	RTT	STS		SRR		TRT		TSS		RSR		RTT	
	RTR	STT		SRS		TRR		TST		RSS		RTR	
<2u1d>													
mid													

ตารางที่ 5.6 การเลือกเวกเตอร์และการจัดเรียงลำดับของการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์แบบทางตรงในงานวิจัย[16]

Sato[16]	Input-current space vector													
Current sequence	R>T>S		R>S>T		S>R>T		S>T>R		T>S>R		T>R>S		R>T>S	
Zero vector(min_abs)	TTT		SSS		RRR		TTT		SSS		RRR		TTT	
Phase angle	330-360		0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	
Max, Mid, Min bus	RS,RT,TS		RT,RS,ST		ST,SR,RT		SR,ST,TR		TR,TS,SR		TS,TR,RS		RS,RT,TS	
Sector	I		II		III		IV		V		VI			
I 100,110,000,111	TSS		RRS		RTT		SST		SRR		TTR		TSS	
	TTS		RSS		RRT		STT		SSR		TRR		TTS	
	TTT,RTS		SSS,RST		RRR,SRT		TTT,STR		SSS,TSR		RRR,TRS		TTT,RTS	
	RTT		SST		SRR		TTR		TSS		RRS		RRT	
II 110, 010, 000,111	STS		RRS		TRT		SST		RSR		TTR		STS	
	TTS		SRS		RRT		TST		SSR		RTR		TTS	
	TTT,TRS		SSS,SRT		RRR,RST		TTT,TSR		SSS,STR		RRR,RTS		TTT,TRS	
	TRT		SST		RSR		TTR		STS		RRS		TRT	
III 010,011,000,111	STS		SRR		TRT		TSS		RSR		RTT		STS	
	STT		SRS		TRR		TST		RSS		RTR		STT	
	TTT,SRT		SSS,TRS		RRR,TSR		TTT,RST		SSS,RTS		RRR,STR		TTT,SRT	
	TRT		TSS		RSR		RTT		STS		SRR		TRT	
IV 011, 001, 000,111	SST		SRR		TTR		TSS		RRS		RTT		SST	
	STT		SSR		TRR		TTS		RSS		RRT		STT	
	TTT,STR		SSS,TSR		RRR,TRS		TTT,RTS		SSS,RST		RRR,SRT		TTT,STR	
	TTR		TSS		RRS		RTT		SST		SRR		TTR	
V 001,101,000,111	SST		RSR		TTR		STS		RRS		TRT		SST	
	TST		SSR		RTR		TTS		SRS		RRT		TST	
	TTT,TSR		SSS,STR		RRR,RTS		TTT,TRS		SSS,SRT		RRR,RST		TTT,TSR	
	TTR		STS		RRS		TRT		SST		RSR		TTR	
VI 101, 100, 000,111	TSS		RSR		RTT		STS		SRR		TRT		TSS	
	TST		RSS		RTR		STT		SRS		TRR		TST	
	TTT,RST		SSS,RTS		RRR,STR		TTT,SRT		SSS,TRS		RRR,TSR		TTT,RST	
	RTT		STS		SRR		TRT		TSS		RSR		RTT	
	RTR		STT		SRS		TRR		TST		SSR		RTR	
	<2u1d>													
	mid													

ตารางที่ 5.2-5.6 มีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะเป็นข้อมูลที่ทำให้เราทราบว่ากรรมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ในแต่ละวิธีจะให้รูปแบบการสวิตช์เป็นอย่างไร ดังนั้นเราจึงสามารถสร้างกรรมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ได้โดยใช้กรรมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ที่นำเสนอแทนการคำนวณเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ซับซ้อน ด้วยการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์และเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงที่เหมาะสม ลักษณะดังกล่าวจะมีความคล้ายคลึงกับการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ ที่สามารถใช้กรรมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแทนกรรมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ได้



ภาพที่ 5.4 อัลกอริทึมของการมอดูเลตเชิงเอกภาพ

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลตที่รู้จักกันดีกับวิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพที่แสดงอัลกอริทึมของการมอดูเลตได้ดังภาพที่ 5.4 สามารถสรุปได้ว่าวิธีการมอดูเลตที่รู้จักกันดีเป็นกรณีพิเศษของวิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.7 เนื่องจากวิธีการมอดูเลตส่วนใหญ่ต้องการตัวประกอบกำลังด้านเข้าเป็นหนึ่งซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (2.16) และจะสอดคล้องกันกับการเลือก $b=d=0$

ตารางที่ 5.7 ความสัมพันธ์กับวิธีการมอดูเลตแบบต่างๆ

PWM method	Free Parameters		PWM mode	Switching number	Reference phase
	<i>b</i>	<i>d</i>			
Venturini[2,3], Chang[5]	0	0	<3d>	12	NA
Roy[4], Ziogas[7], Cavalcanti[9,10]	0	0	<3d>	12	max+min
Cavalcanti[11]	0	0	<1n2d>	8	max+min
Borojevic[12]	0	0	<1b1u1d> + <2u1d>	8	max+min
			<1n2d>	10	max+mid+min
Nielsen[13]	0	0	<1b1u1d> + <2u1d>	8	max+min
Enjeti[14]	0	0	<2u1d>	8	max+min
Odaka[8], Helle[15], Sato[16]	0	0	<2u1d>	8	mid

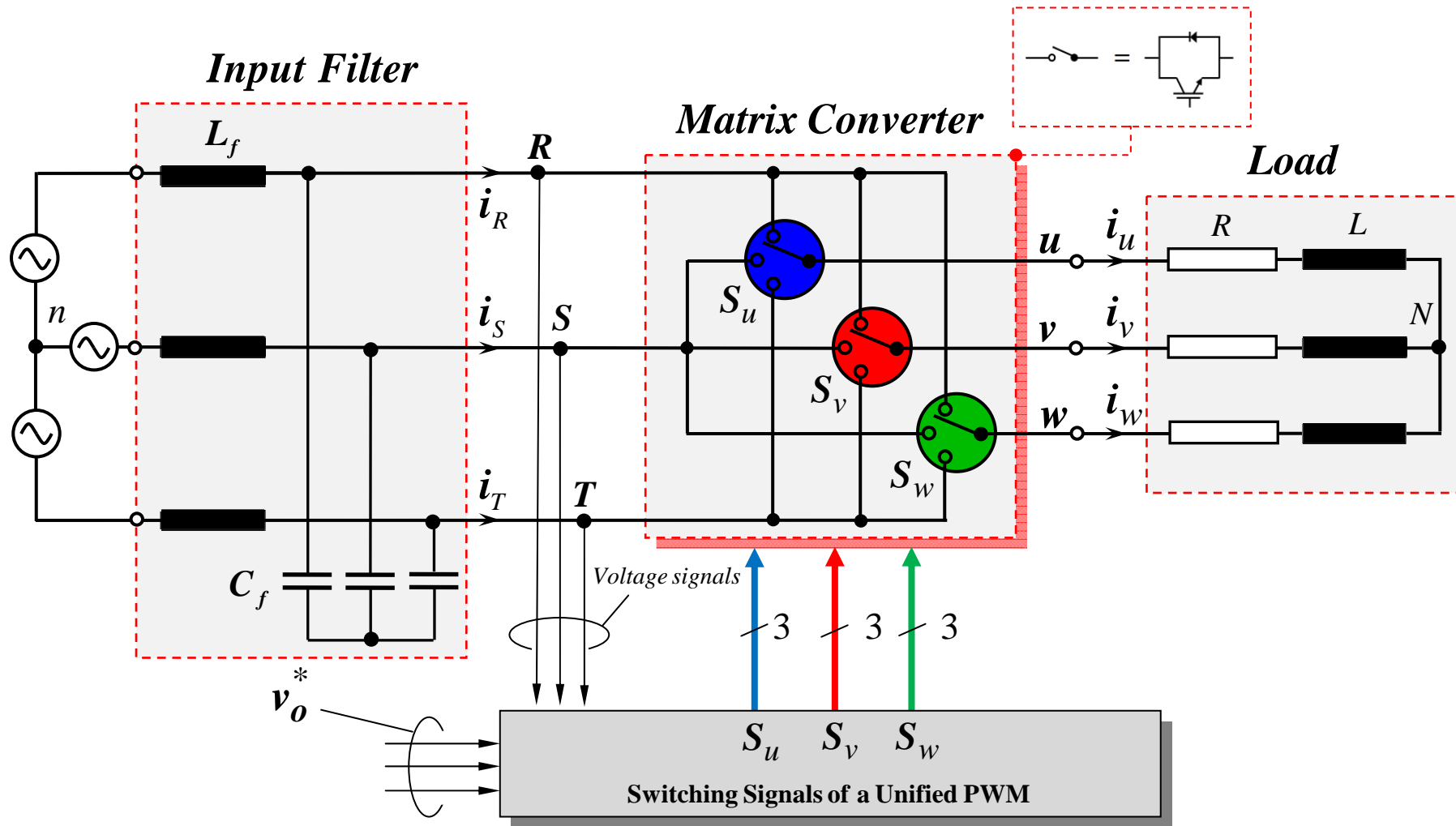
บทที่ 6

การทดสอบการทำงานของระบบ

บทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ โดยจะแสดงการสร้างวิธีการมอดูเลตแบบต่าง ๆ ด้วยการกำหนดค่า $b=d=0$ และเลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ร่วมกับการเปลี่ยนเฟสอ้างอิง นอกจากนี้จะทดสอบการปรับค่าพารามิเตอร์อิสระ b และ d เพื่อควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้า ผลการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่าวิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพที่ได้นำเสนอสามารถทำให้เป็นจริงได้โดยง่ายและทฤษฎีมีความถูกต้องใช้งานได้จริงในเชิงปฏิบัติ

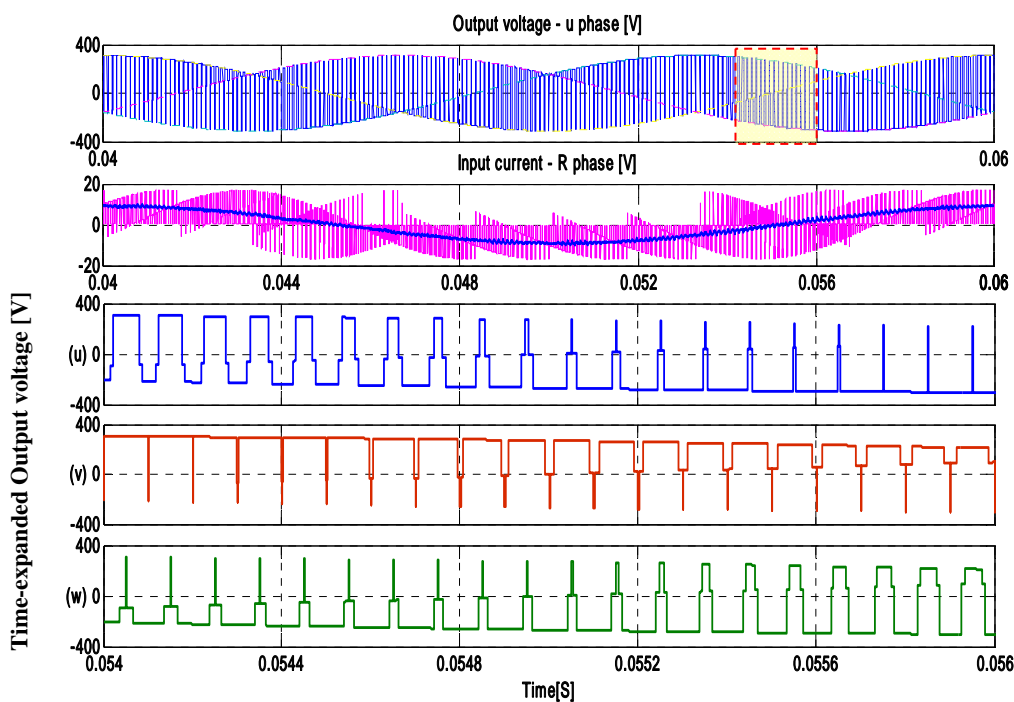
6.1 ผลการจำลองการทำงาน

ภาพที่ 6.1 คือโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ การจำลองการทำงานเพื่อทดสอบทฤษฎีที่ได้นำเสนอจะกำหนดให้โหลดมีค่า $R = 10\Omega$, $L = 20mH$ ความถี่ด้านออก 100 Hz ดัชนีการมอดูเลตสูงสุด ($q=0.866$) และตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์อิสระ $b=d=0$ ในการจำลองจะเลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมเพื่อสร้างรูปแบบการมอดูเลตแบบต่าง ๆ ร่วมกับการเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิง

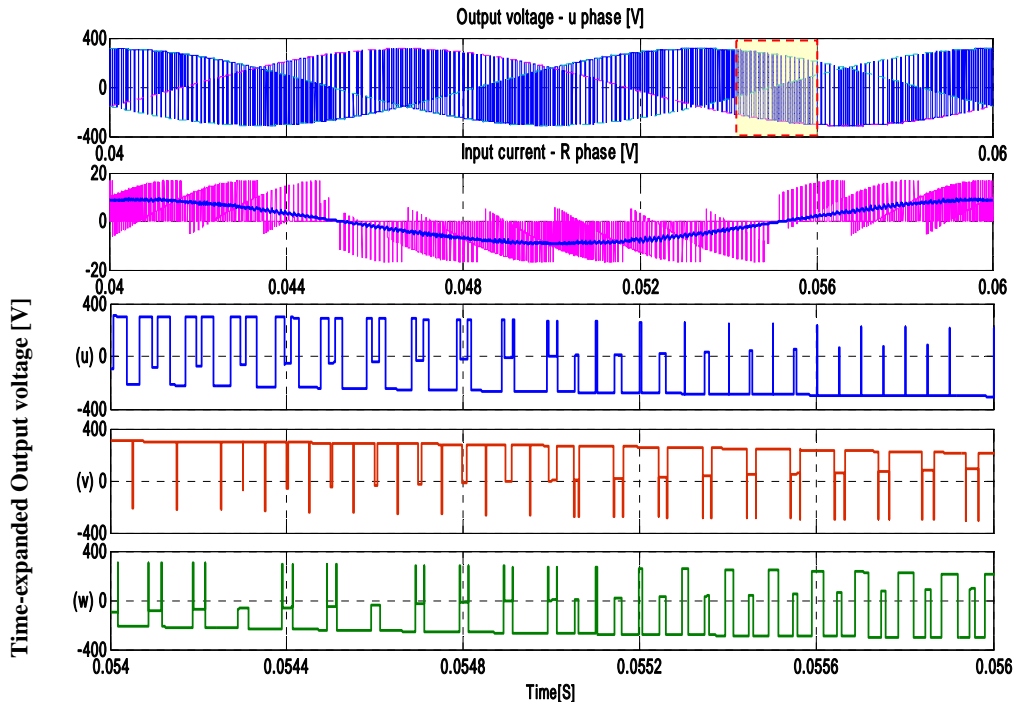


ภาพที่ 6.1 โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

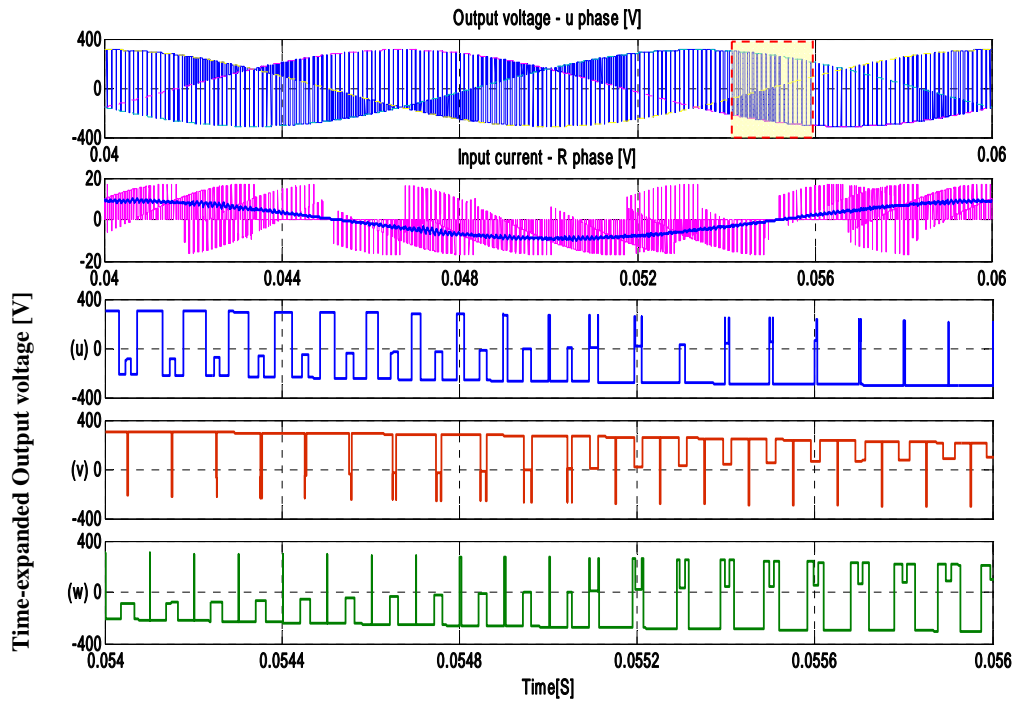
ภาพที่ 6.2-6.10 คือผลการจำลองการทำงานของมอเตอร์แบบ <3d> <2u1d> และ <1n2d> ตามลำดับ ที่ใช้เฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงทั้งเฟสกลาง สูงสุดและต่ำสุด ผลการจำลองรูปแบบต่างๆ แสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมให้การมอดูเลตเป็นไปตามที่กำหนด ทุกๆช่วงเวลาได้ ผลการจำลองดังกล่าวยังชี้ให้เห็นด้วยว่าเราสามารถเปลี่ยนการมอดูเลตในรูปแบบต่างๆได้โดยการเปลี่ยนเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์และการเปลี่ยนเฟสอ้างอิง ซึ่งมีความสอดคล้องตามทฤษฎีที่ได้นำเสนอ ในทุกๆกรณีกระแสด้านเข้าจะถูกควบคุมให้มีรูปคลื่นไซน์และมีเฟสตรงกับแรงดันด้านเข้าซึ่งสามารถสังเกตได้จากลักษณะของรูปคลื่นแรงดันด้านออก นอกจากนั้นผลการจำลองยังแสดงให้เห็นด้วยว่าค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกและกระแสด้านเข้าเหมือนกันทั้งกรณีการมอดูเลตแบบ<3> <2u1d> และ<1n2d> อย่างไรก็ตามรายละเอียดของรูปคลื่นหรือลำดับการสวิตช์ในส่วนขยายสเกลเวลาจะต่างกันเมื่อเฟสที่ใช้อ้างอิงต่างกัน กรณีอ้างอิงเฟสกลางจะได้รับการเปลี่ยนสถานะจากค่าแรงดันสูงสุดเป็นค่ากลางและต่ำสุดตามลำดับ แต่ในกรณีอ้างอิงเฟสสูงสุดหรือต่ำสุดจะได้รับการเปลี่ยนสถานะค่าแรงดันสูงสุดเป็นต่ำสุดโดยตรงซึ่งเราไม่พึงประสงค์



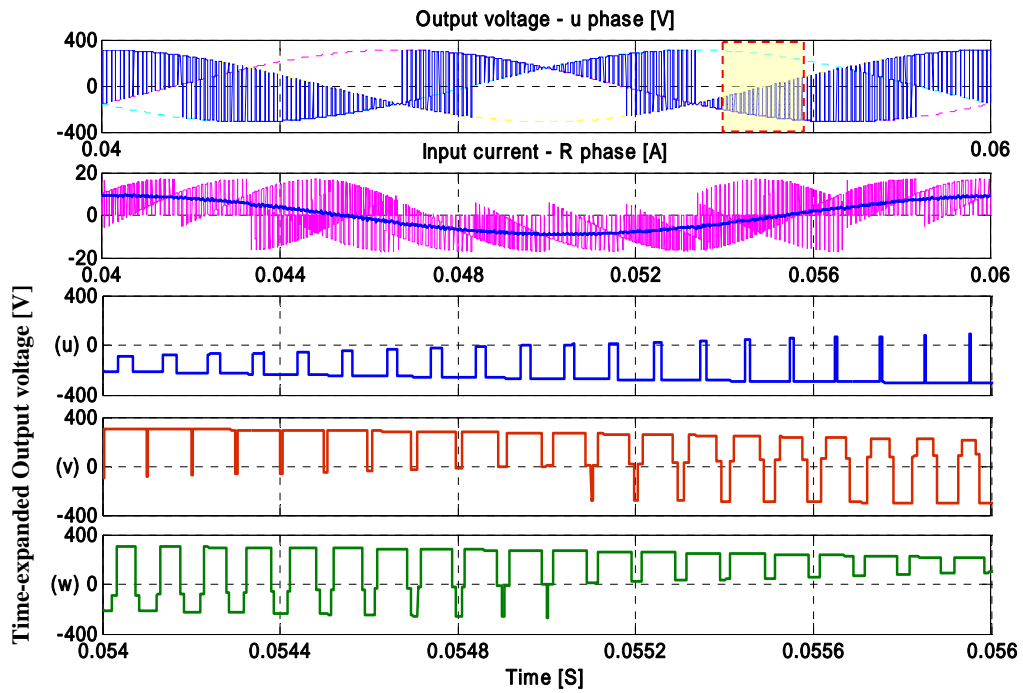
ภาพที่ 6.2 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงกับเฟสกลาง



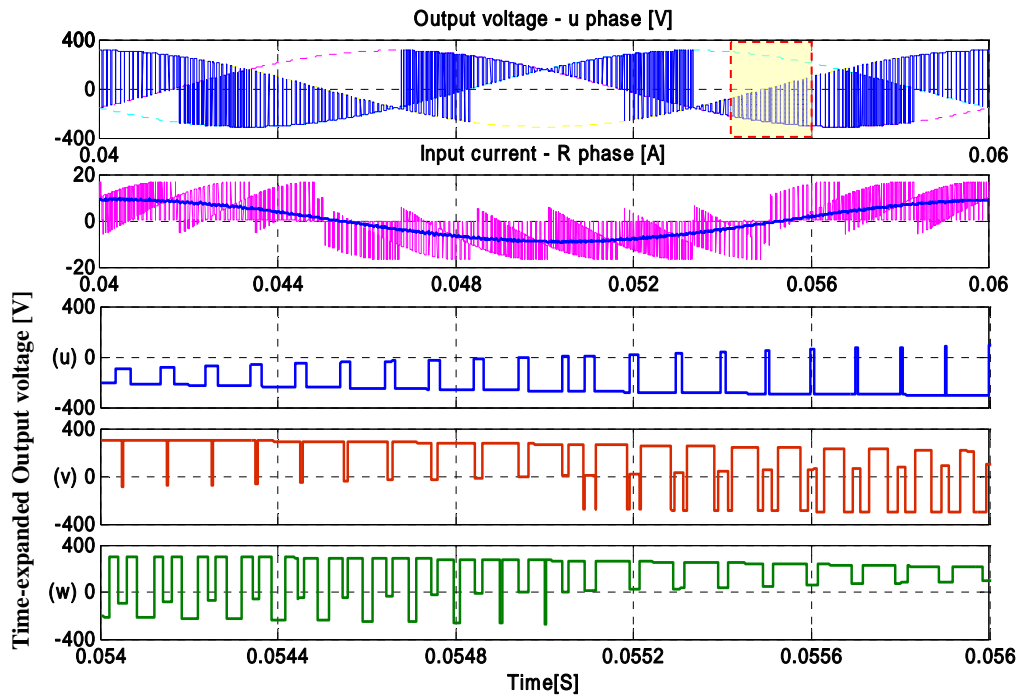
ภาพที่ 6.3 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงกับเฟสสูงสุด (สมมูลกับวิธีการมอดูเลต [4], [7], [9,10])



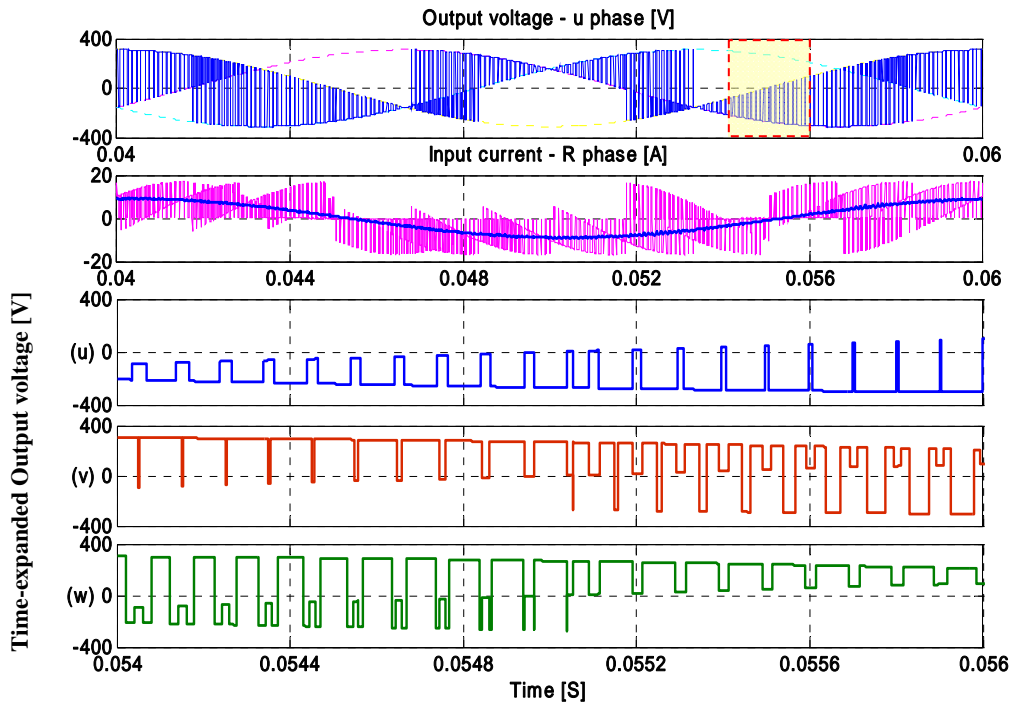
ภาพที่ 6.4 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ<3d> อ้างอิงกับเฟสต่ำสุด



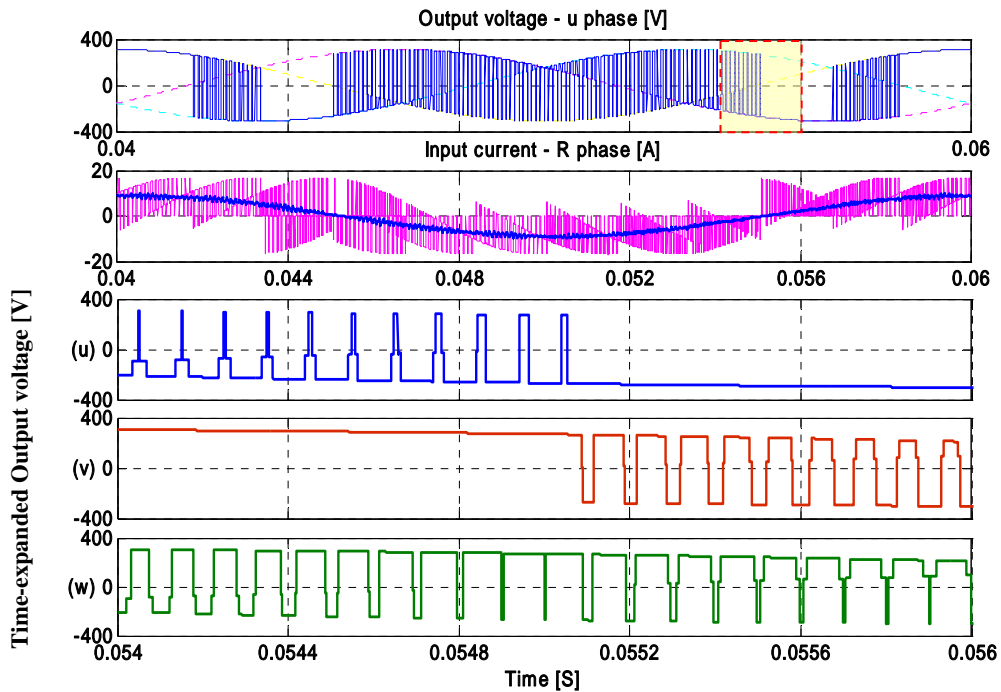
ภาพที่ 6.5 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้างอิงกับเฟสกลาง (สมมูลกับวิธีการมอดูเลต [8], [16])



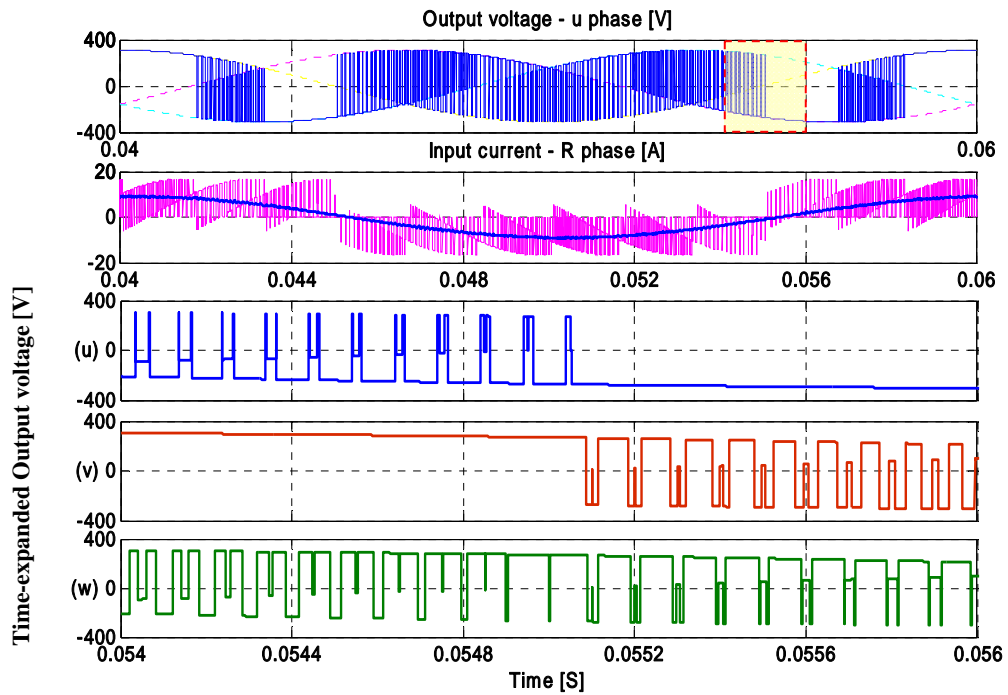
ภาพที่ 6.6 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้างอิงกับเฟสสูงสุด (สมมูลกับวิธีการมอดูเลต [14])



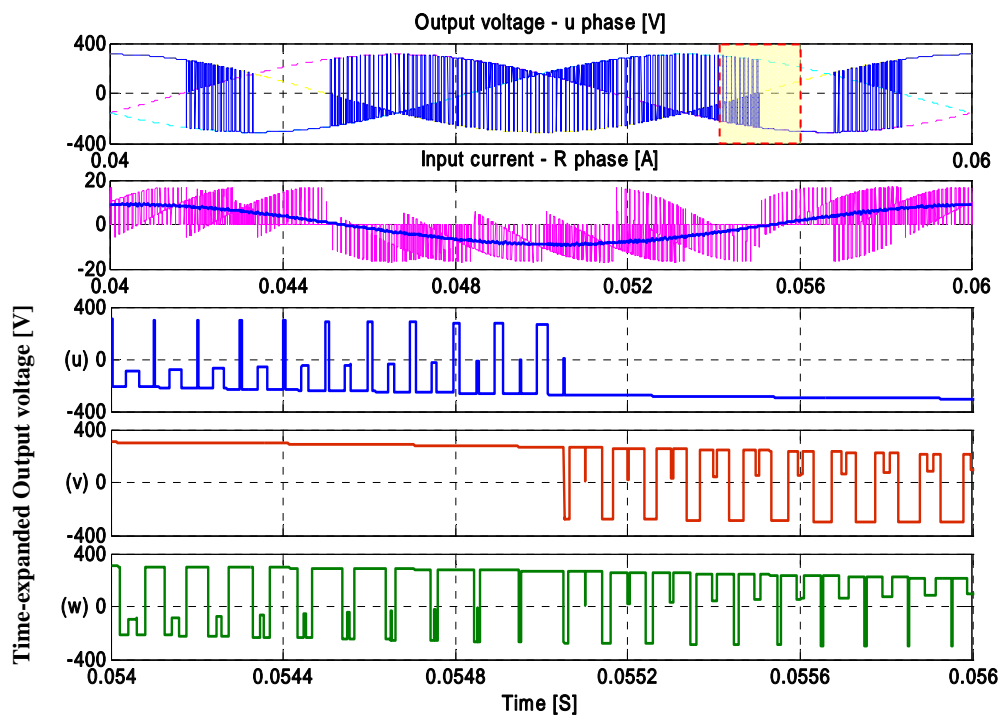
ภาพที่ 6.7 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้างอิงกับเฟสต่ำสุด (วิธีการมอดูเลตแบบใหม่)



ภาพที่ 6.8 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ$1n2d$ อ้างอิงกับเฟสกลาง (วิธีการมอดูเลตแบบใหม่)

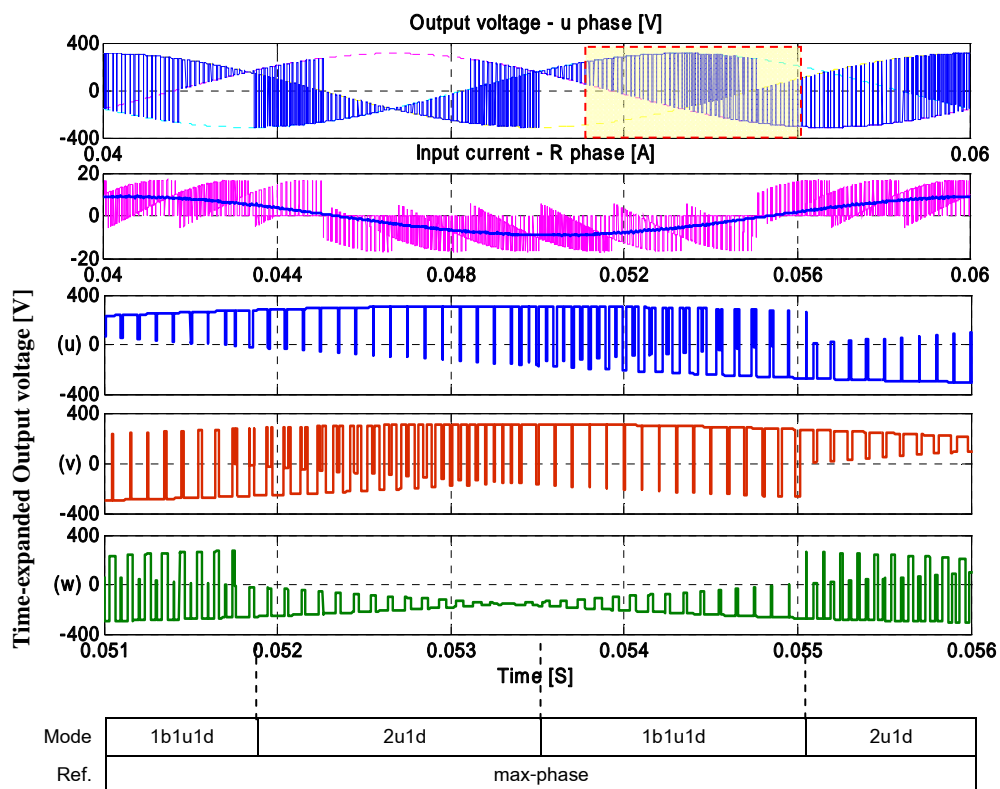


ภาพที่ 6.9 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงกับเฟสสูงสุด (สมมูลกับวิธีการมอดูเลต [11])

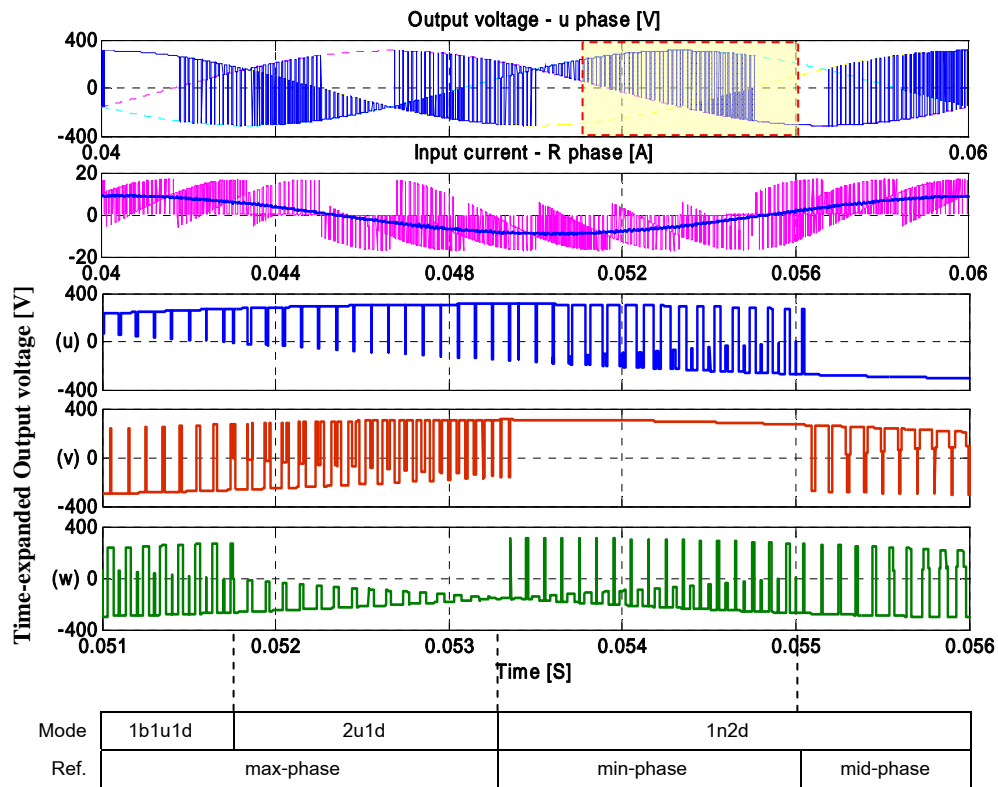


ภาพที่ 6.10 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงกับเฟสต่ำสุด (วิธีการมอดูเลตแบบใหม่)

ภาพที่ 6.11 เป็นผลการจำลองเพื่อแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการมอดูเลตสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในเชิงเวลาจริงโดยง่าย หากพิจารณา ณ ช่วงการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลต จะพบว่าลักษณะรูปคลื่น PWM ของแรงดันด้านออกเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วตามรูปแบบที่กำหนดแต่ค่าเฉลี่ยของแรงดันยังคงเป็นรูปคลื่นไซน์เหมือนเดิมจึงไม่เกิดภาวะชั่วคราวในกระแสไหลแต่อย่างใด ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการมอดูเลตแบบนี้เป็นวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ได้นำเสนอในงานวิจัย [13] ภาพที่ 6.12 เป็นผลการจำลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าทั้งรูปแบบการมอดูเลตและเฟสอ้างอิงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในเชิงเวลาจริงอย่างราบรื่นตามที่ต้องการ ผลของการจำลองในภาพที่ 6.12 คือรูปแบบการสวิตช์ที่ได้จากการปรับปรุงวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ของงานวิจัย [12] โดยการรักษาจำนวนการสวิตช์ไว้ที่ 8 ครั้ง จากผลการจำลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการมอดูเลตและเฟสอ้างอิงเกิดขึ้นอย่างทันที โดยที่ค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกไม่ได้เปลี่ยนแปลง ผลการจำลองในภาพที่ 6.11 และ 6.12 ยังแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์สามารถทำได้โดยอาศัยคลื่นพาหะแบบชั่วคราวแทนการคำนวณเชิงสเปซเวกเตอร์ที่ยุ่งยากซับซ้อน



ภาพที่ 6.11 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบ <1b1u1d> และ <2u1d> อ้างอิงเฟสสูงสุด (สมมูลกับวิธีการมอดูเลต[13])

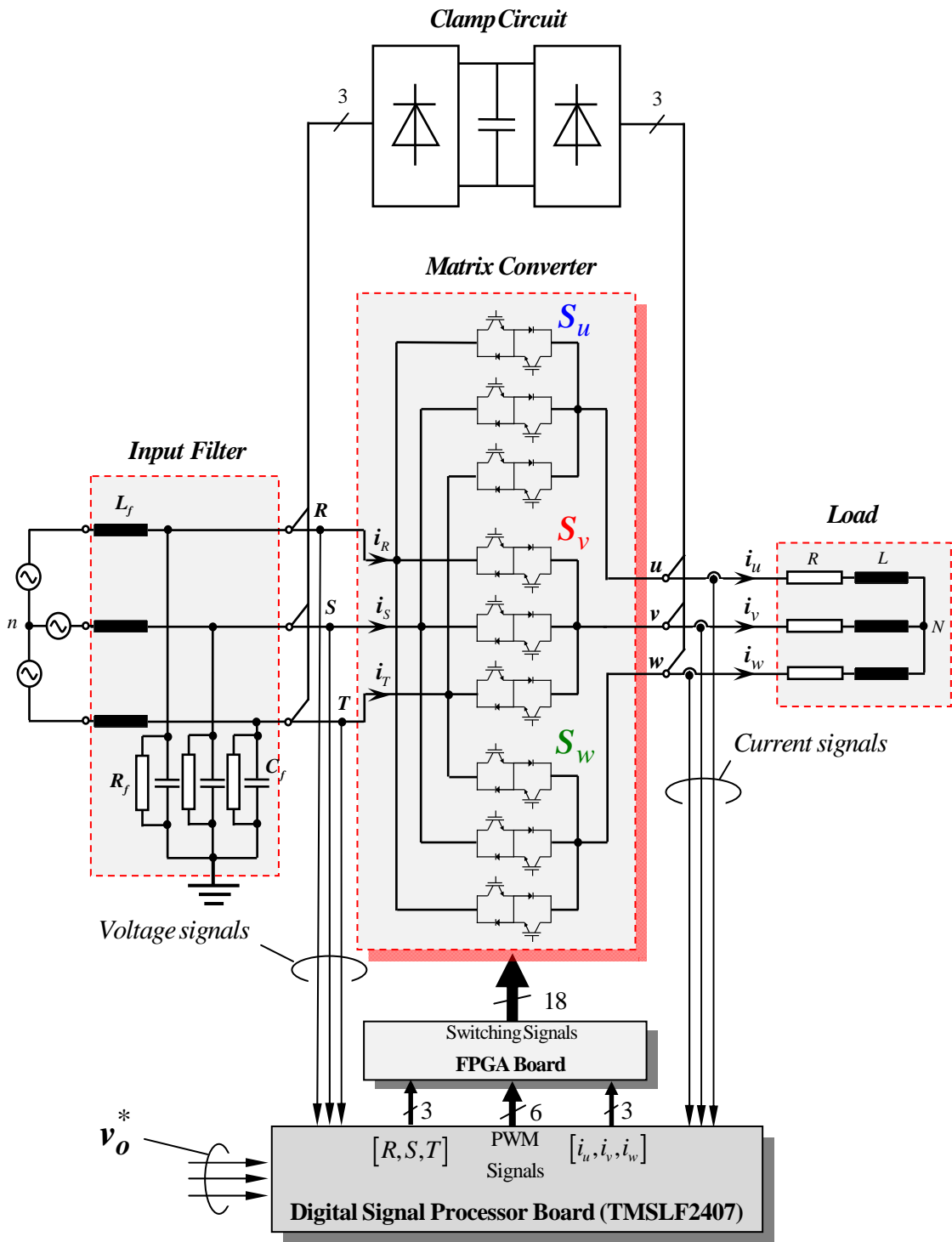


ภาพที่ 6.12 ผลการจำลองการมอดูเลตแบบผสมโหมดและเฟสอ้างอิง (การมอดูเลตที่ได้จากการปรับปรุงวิธีการมอดูเลต[12])

ตัวอย่างผลการจำลองที่นำเสนอ ยืนยันว่าวิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพที่นำเสนอสามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ของวิธีการมอดูเลตแบบต่างๆได้ วิธีการมอดูเลตที่รู้จักกันดีจึงถือได้ว่าเป็นเพียงกรณีพิเศษของวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพที่ได้นำเสนอ ผลการจำลองยังแสดงให้เห็นด้วยว่าวิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพช่วยให้การเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตทำได้ในเชิงเวลาจริงโดยง่ายเพียงแค่เปลี่ยนค่าเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์และเปลี่ยนเฟสอ้างอิงเท่านั้น

6.2 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบ

อัลกอริทึมของการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพที่นำไปใช้จริงจะใช้บอร์ด DSP รุ่น TMSLF2407 ซึ่งมีวงจรสร้างสัญญาณ PWM 2 ตัว รองรับการมอดูเลตแบบซั้วคู่ การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์ด้านออกของ DSP จะใช้บอร์ด FPGA โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบแสดงได้ดังภาพที่ 6.13



ภาพที่ 6.13 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ใช้ในการทดสอบ

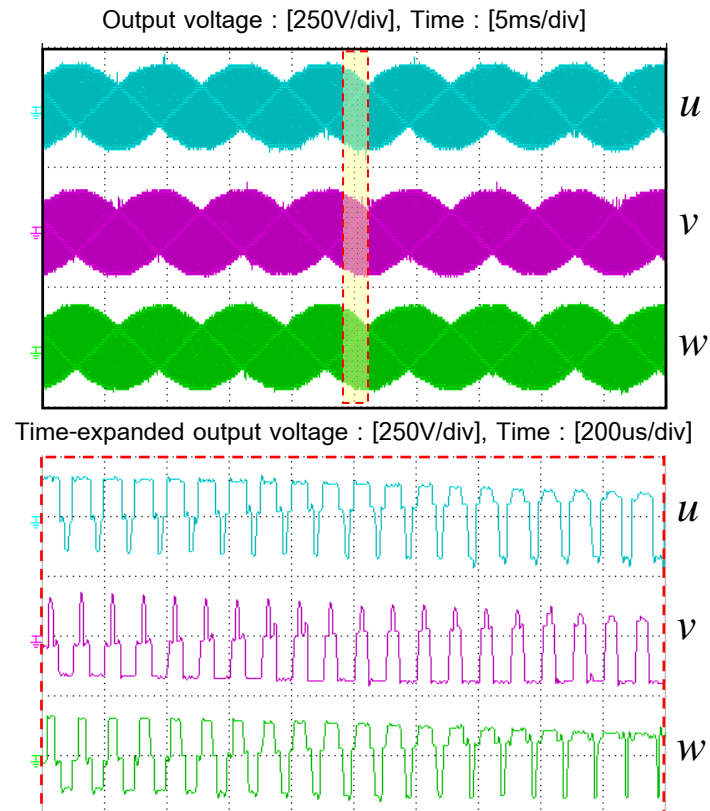
จากภาพที่ 6.13 สามารถอธิบายหน้าที่การทำงานอย่างคร่าวๆ ได้ดังนี้ บอร์ด DSP ใช้วิธีการมอดูเลตแบบซัว์คู่จะสร้างสัญญาณ PWM จากคลื่นพาหะสองตัวสำหรับเฟสที่เป็นค่า $\max[|R|,|S|,|T|]$ และ $\min[|R|,|S|,|T|]$ โดยค่าสัญญาณอ้างอิง $[U_p]$ และ $[U_N]$ จะคำนวณจากข้อมูลคำสั่งแรงดันด้านออก u^*, v^*, w^* และแรงดันด้านเข้า R, S, T จากนั้นบอร์ด FPGA จะรับสัญญาณ PWM ดังกล่าวไปสร้างสัญญาณ PWM สำหรับเฟสที่เป็นค่า $\text{mid}[|R|,|S|,|T|]$ และท้ายที่สุดจะนำสัญญาณ PWM ทั้งสามเฟสมาสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์สำหรับ IGBT 18 ตัว โดยมีการปรับค่าเวลาประวิง(Dead time)อย่างเหมาะสม การสับเปลี่ยนกระแสระหว่างสวิตช์(Commutation) จะอาศัยข้อมูลทิศทางของกระแสด้านออก ทั้งนี้ได้มีการแก้ปัญหาการไม่เข้าจังหวะของการส่งสัญญาณ PWM จากบอร์ด DSP ไปยังบอร์ด FPGA เพื่อป้องกันความผิดเพี้ยนของสัญญาณด้วย

6.3 ผลการทดสอบการทำงานของระบบจริง

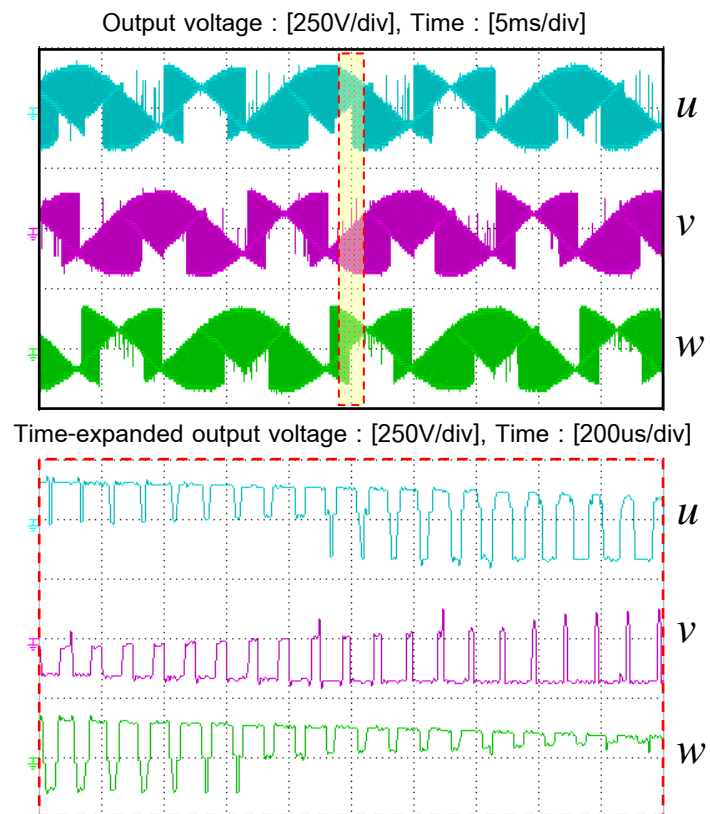
การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้และสมรรถนะของอัลกอริทึมการมอดูเลตเชิงเอกภาพที่นำเสนอ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบซึ่งจะประกอบด้วย 1) การเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลต 2) การเปลี่ยนเฟสอ้างอิง 3) การเปลี่ยนความถี่ของแรงดันด้านออก 4) การเปลี่ยนดัชนีการมอดูเลต 5) การเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตและเฟสอ้างอิงในเชิงเวลาจริง และ 6) การควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้า ในการทดสอบจะสร้างวิธีการมอดูเลตรูปแบบต่างๆ ในเชิงเวลาจริง โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์อิสระ b และ d เลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์และเปลี่ยนเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิง ในที่นี้จะกำหนดให้โหลดมีค่า $R=50\Omega$, $L=34mH$ แรงดันด้านเข้า 115 V ความถี่ 50 Hz และความถี่การสวิตช์ 10 kHz

6.3.1 ผลการทดสอบการมอดูเลตในรูปแบบต่างๆ

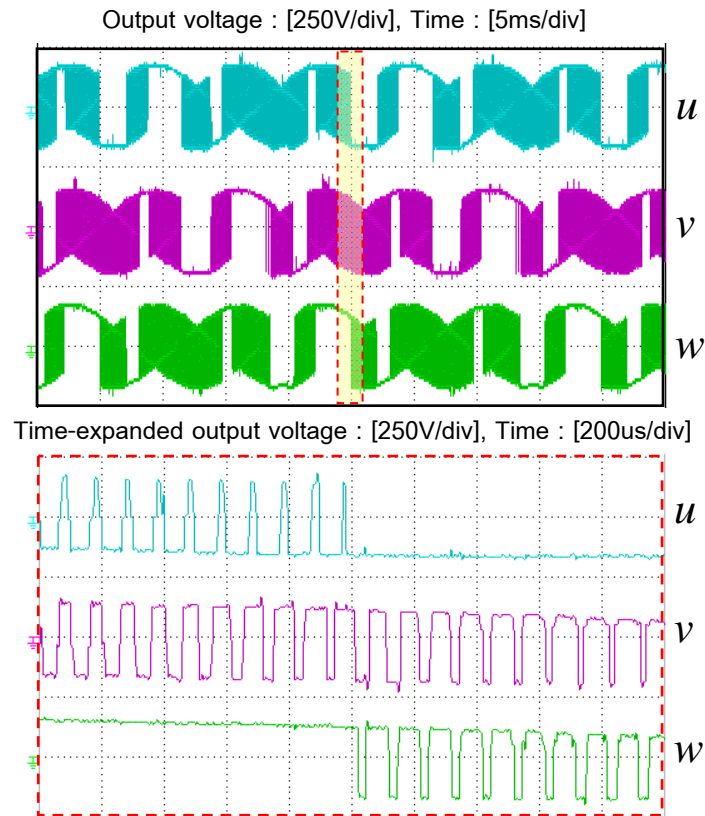
การทดสอบการมอดูเลตในรูปแบบต่างๆจะอาศัยการเลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ที่สอดคล้องกับรูปแบบนั้นๆเพื่อให้การมอดูเลตเป็นไปตามที่ต้องการ ภาพที่ 6.14-6.16 คือ ผลการทดลองของการมอดูเลตแบบ $\langle 3d \rangle$, $\langle 2u1d \rangle$ และ $\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ตามลำดับรูปคลื่นในกรอบสีดำ ด้านบนคือแรงดันด้านออกเฟส u (สีฟ้า) ถัดมาคือแรงดันด้านออกเฟส v (สีม่วง) และท้ายที่สุดคือแรงดันด้านออกเฟส w (สีเขียว) ส่วนในกรอบเส้นปะสีแดงคือรูปคลื่นในส่วนขยายสเกลเวลาของแรงดันด้านออกเฟส u, v, w ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเราสามารถสร้างการมอดูเลตในรูปแบบต่างๆได้โดยการเปลี่ยนเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ นอกจากนั้น ผลการทดลองในส่วนของการขยายสเกลเวลายังแสดงให้เห็นด้วยว่าทุกๆ ช่วงเวลาของการมอดูเลตทั้ง 3 กรณีจะได้รูปแบบการสวิตช์เป็นไปตามที่กำหนด



ภาพที่ 6.14 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 3d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ความถี่ด้านออก 100 Hz



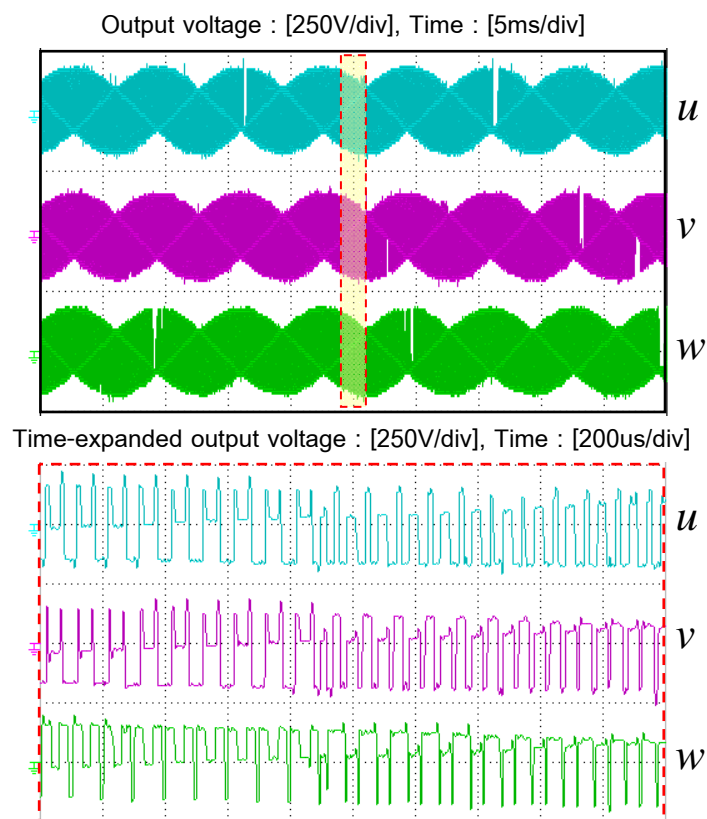
ภาพที่ 6.15 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ความถี่ด้านออก 100Hz



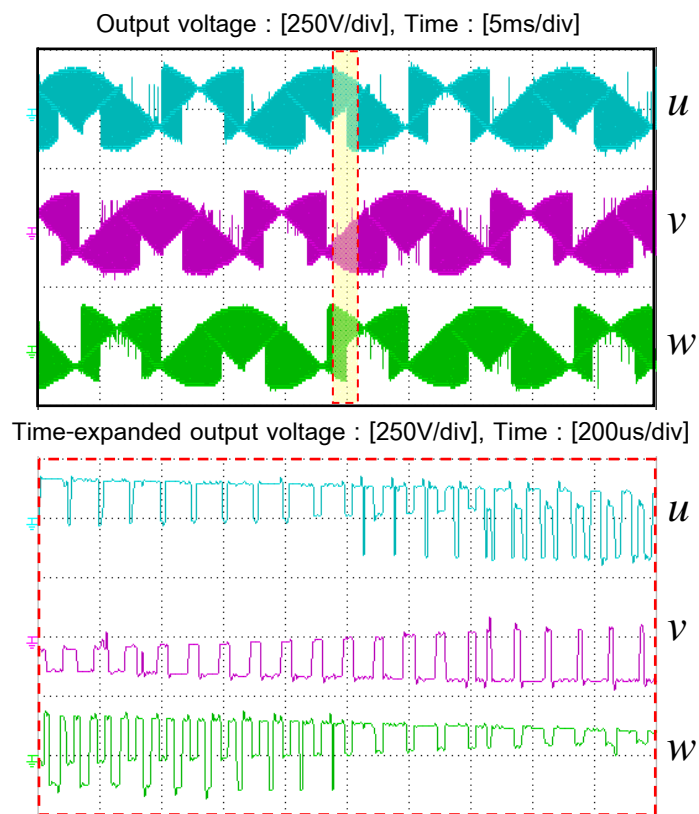
ภาพที่ 6.16 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $<1n2d>$ อ้างอิงเฟสกลาง ความถี่ด้านออก 100Hz

6.3.2 ผลการทดสอบการใช้เฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิง

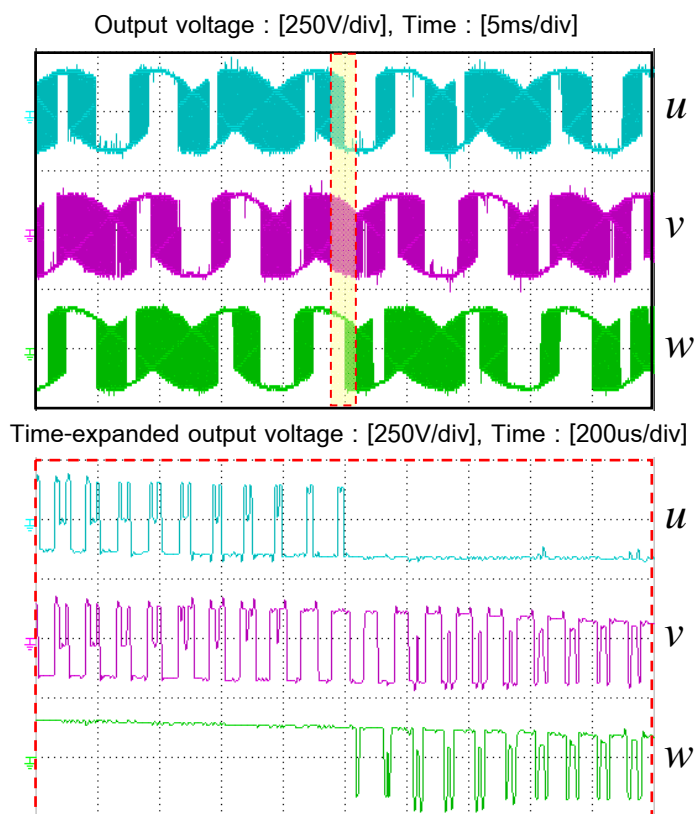
การทดสอบการเปลี่ยนเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนลำดับการสวิตช์ ในที่นี้จะเปลี่ยนจากเฟสกลางมาใช้เฟสสูงสุดและเฟสต่ำสุดเป็นจุดอ้างอิงแทน เมื่อกำหนดให้การมอดูเลตเป็นแบบ $<3d>$, $<2u1d>$ และ $<1n2d>$ ตามลำดับ ผลการทดลองในภาพที่ 6.14-6.22 แสดงให้เห็นว่าเราสามารถเปลี่ยนการมอดูเลตในรูปแบบต่างๆได้โดยการเปลี่ยนเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์และการเปลี่ยนเฟสอ้างอิง และผลการทดลองดังกล่าวยังชี้ให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของแรงดันด้านออกเหมือนกันทั้งกรณีการมอดูเลตแบบ $<3d>$ $<2u1d>$ และ $<1n2d>$ อย่างไรก็ตามรายละเอียดของรูปคลื่นหรือลำดับการเปลี่ยนสถานะค่าแรงดันในส่วนขยายสเกลเวลาจะต่างกันเมื่อเฟสที่ใช้อ้างอิงต่างกัน ผลการทดลองในภาพที่ 6.14-6.16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเลือกเฟสกลางเป็นจุดอ้างอิงจะได้รับการเปลี่ยนสถานะของแรงดันจากค่าสูงเป็นค่ากลางและค่าต่ำสุดตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามผลการทดลองในภาพที่ 6.17-6.22 เป็นกรณีที่ใช้เฟสสูงสุดและเฟสต่ำสุดเป็นจุดอ้างอิงซึ่งจะได้รับการเปลี่ยนสถานะของแรงดันจากค่าสูงสุดเป็นต่ำสุดโดยตรงซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง



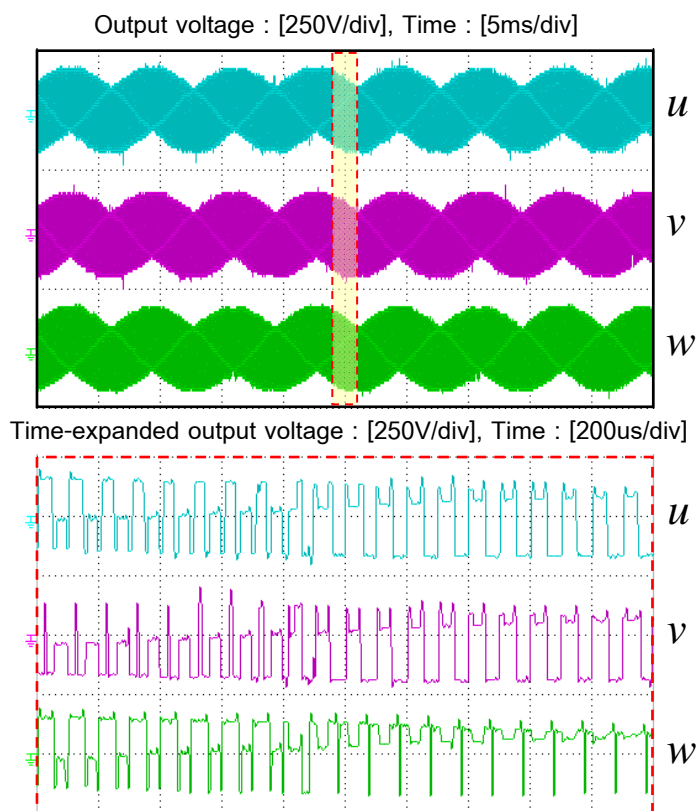
ภาพที่ 6.17 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 3d \rangle$ อังอิงเฟสสูงสุด ความถี่ด้านออก 100Hz



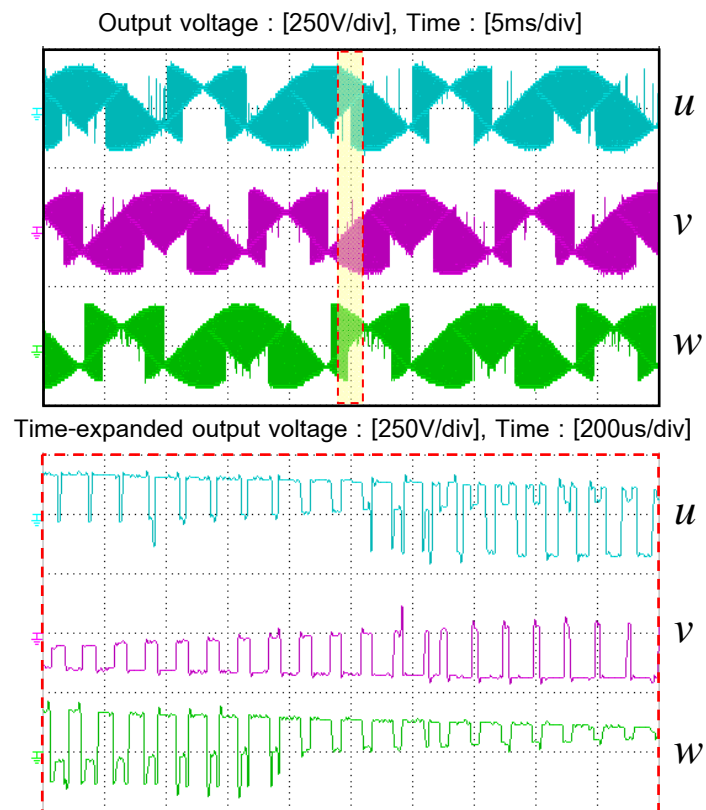
ภาพที่ 6.18 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสสูงสุด ความถี่ด้านออก 100Hz



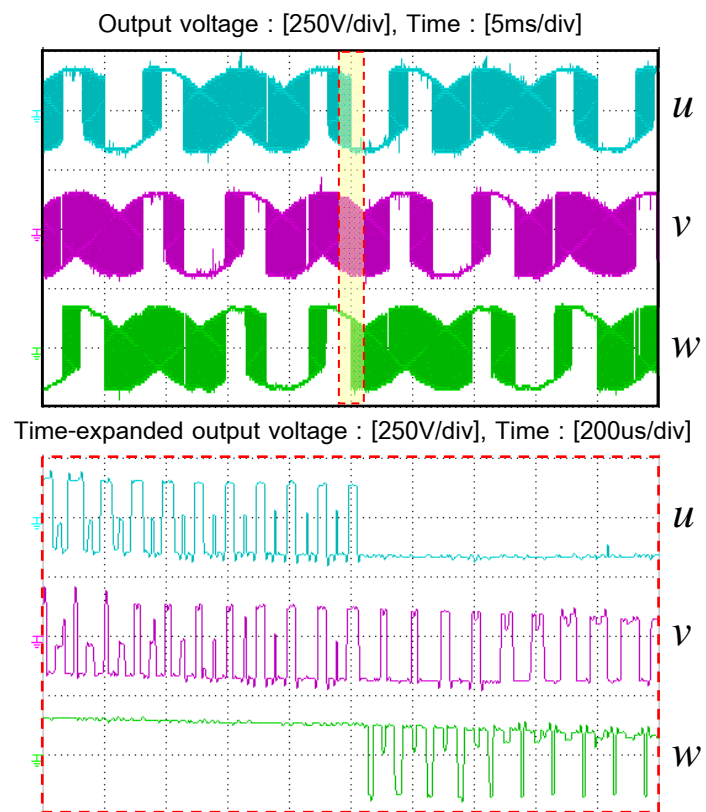
ภาพที่ 6.19 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด ความถี่ด้านออก 100Hz



ภาพที่ 6.20 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 3d \rangle$ อ้างอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 100Hz



ภาพที่ 6.21 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ ขั้วอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 100Hz

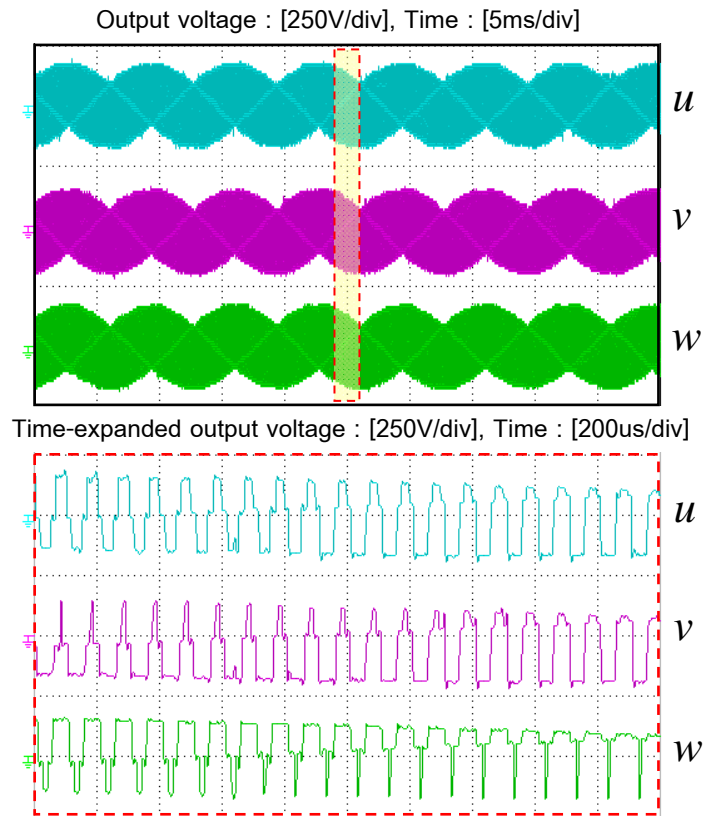


ภาพที่ 6.22 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$1n2d$ ขั้วอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 100Hz

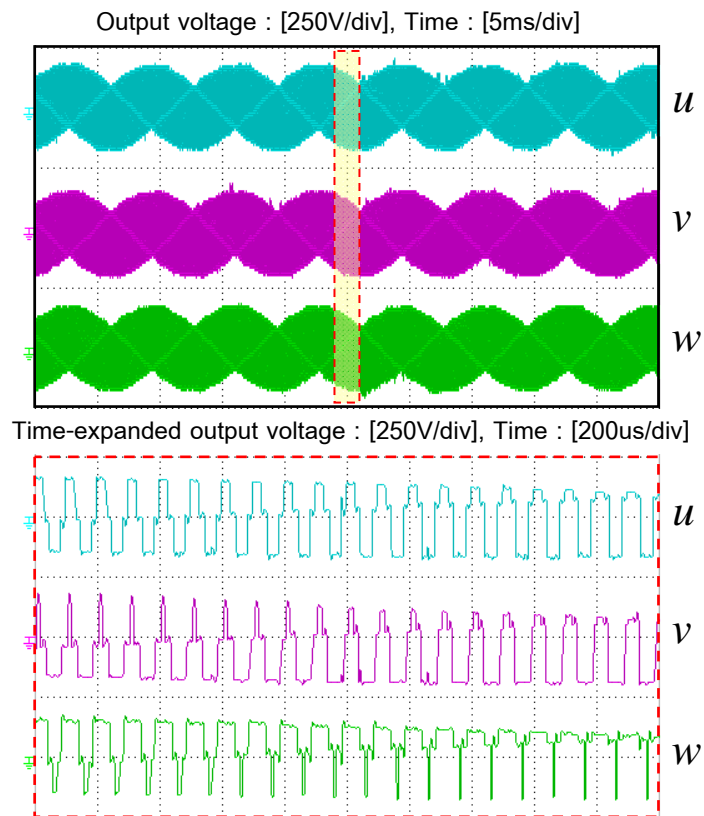
6.3.3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนความถี่ของแรงดันด้านออก

หัวข้อนี้จะทดสอบการเปลี่ยนความถี่ของแรงดันด้านออกจากเดิม 100 Hz เป็นความถี่ 50 Hz และ 25 Hz เพื่อดูว่ามีผลกระทบต่อควบคุมให้การมอดูเลตเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ เมื่อกำหนดให้เฟสกลาง สูงสุด และต่ำสุด เป็นจุดอ้างอิงและกำหนดให้การมอดูเลตเป็นแบบ $3d$ $2u1d$ และ $1n2d$ ตามลำดับ

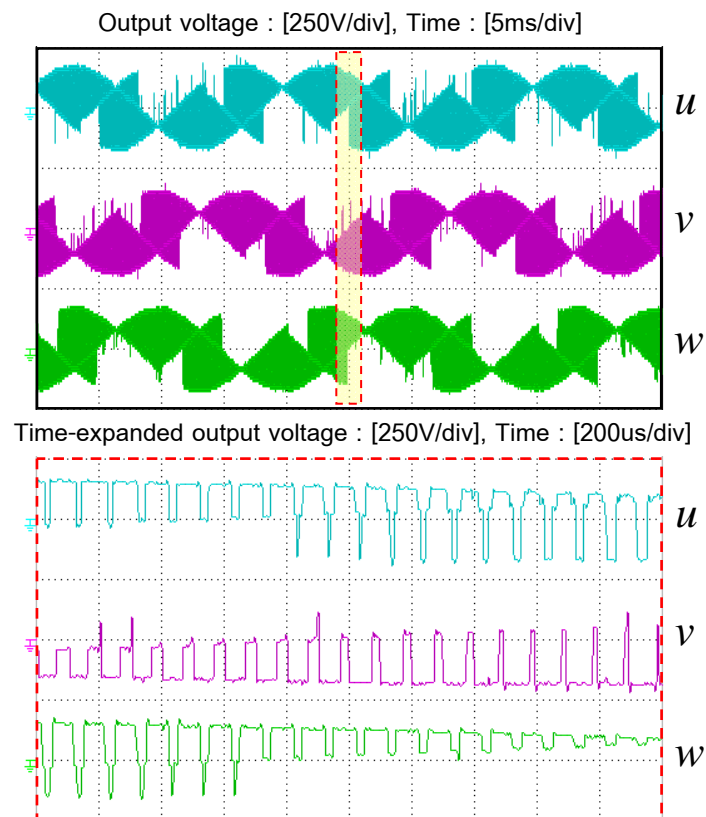
ผลการทดลองในภาพที่ 6.23-6.40 แสดงให้เห็นว่าแม้จะเปลี่ยนความถี่ด้านออกจาก 100Hz มาเป็น 50Hz และ 25Hz ทุกๆ ช่วงเวลาของการมอดูเลตในรูปแบบต่าง ๆ ยังคงให้รูปแบบการมอดูเลตเป็นไปตามที่กำหนด นอกจากนั้นการเปลี่ยนเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิงยังคงให้ลำดับการเปลี่ยนสถานะค่าแรงดันสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อัลกอริทึมเชิงเอกภาพที่นำเสนอสามารถทำงานได้ดีในทุกๆ ย่านความถี่



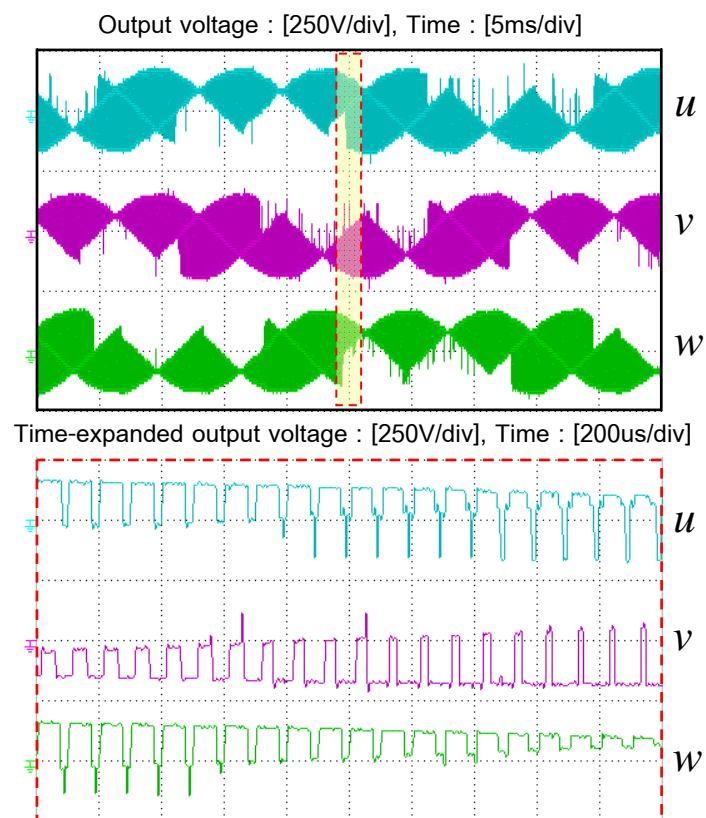
ภาพที่ 6.23 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 3d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ความถี่ด้้านออก 50 Hz



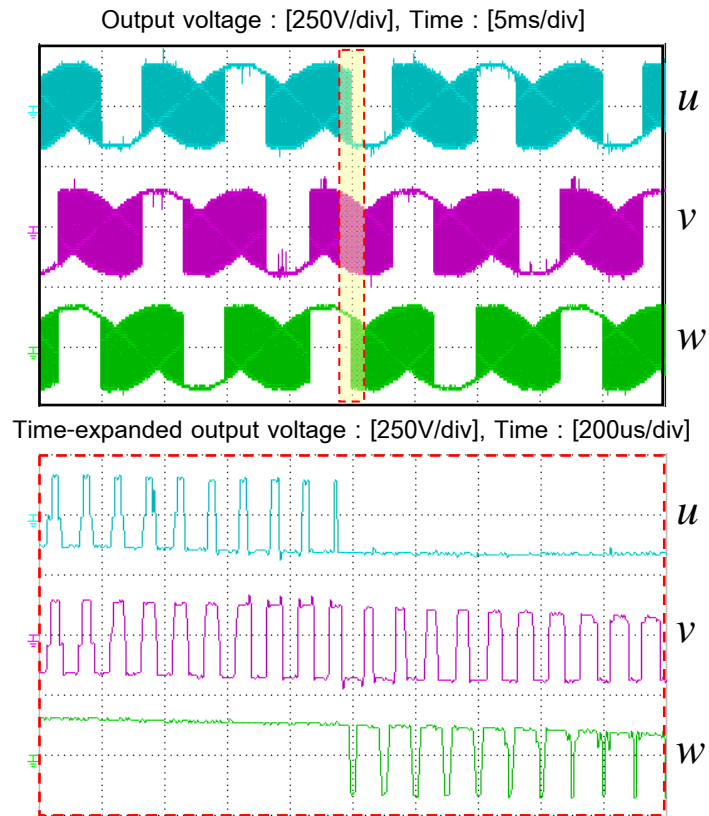
ภาพที่ 6.24 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 3d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ความถี่ด้้านออก 25 Hz



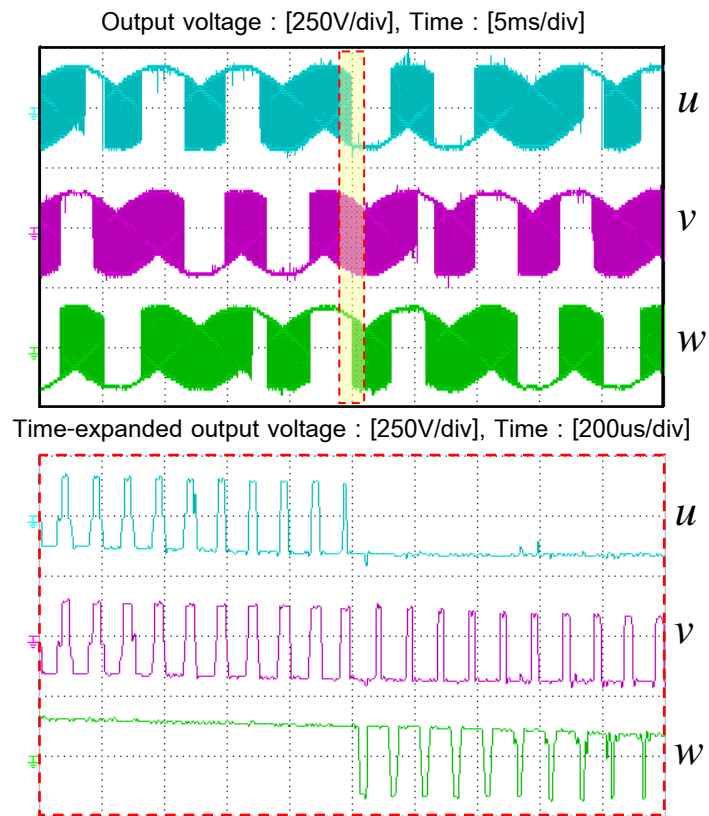
ภาพที่ 6.25 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ความถี่ด้านออก 50Hz



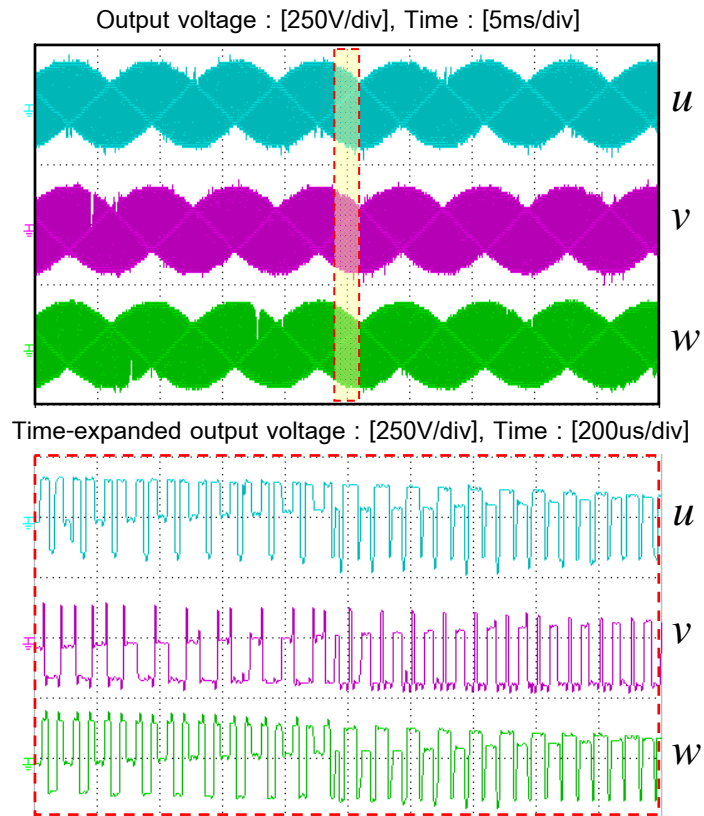
ภาพที่ 6.26 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ความถี่ด้านออก 25Hz



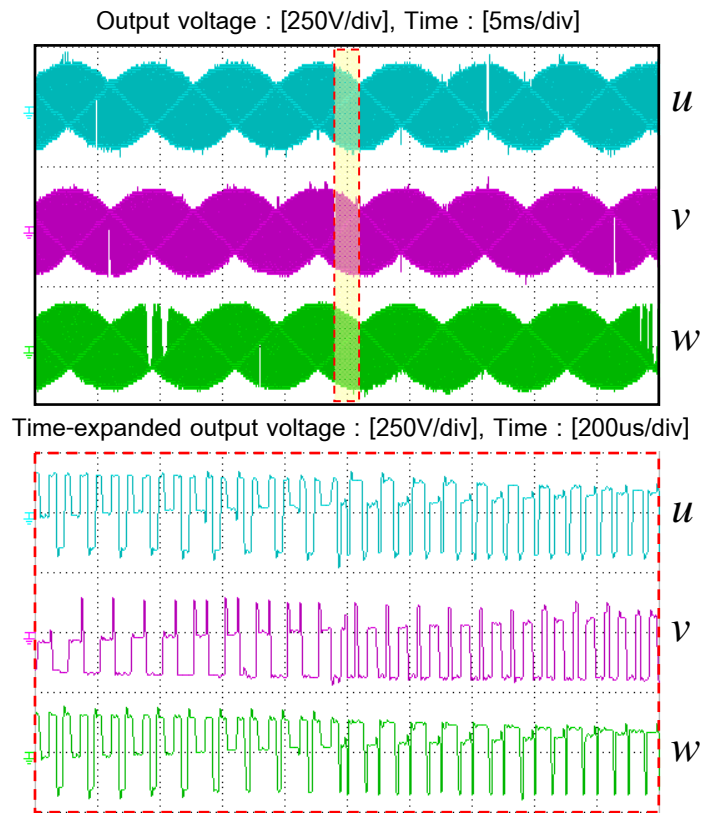
ภาพที่ 6.27 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ ข้างอิงเฟสกลาง ความถี่ด้านออก 50Hz



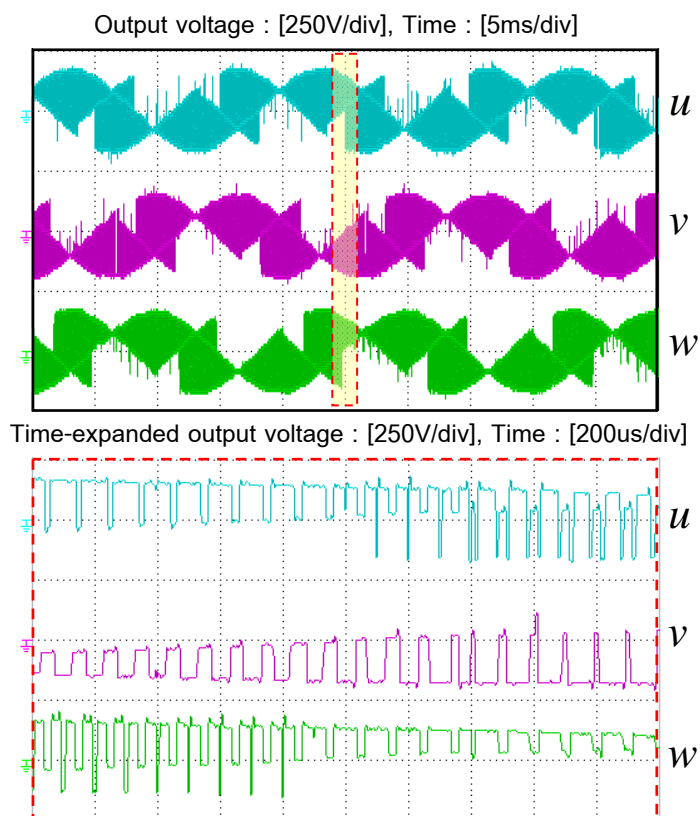
ภาพที่ 6.28 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ ข้างอิงเฟสกลาง ความถี่ด้านออก 25Hz



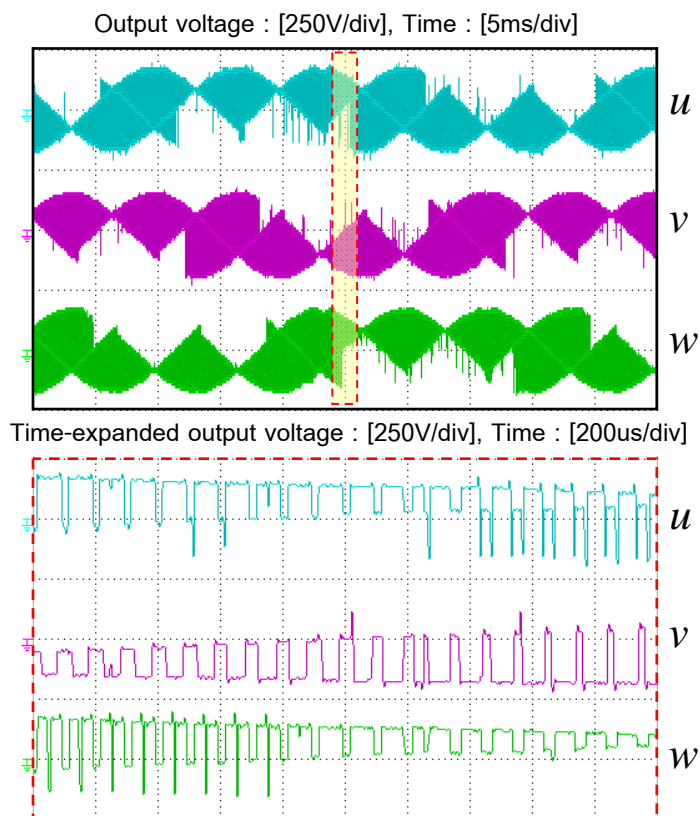
ภาพที่ 6.29 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ<3d> อ้าางอิงเฟสสูงสุด ความถี่ด้้านออก 50Hz



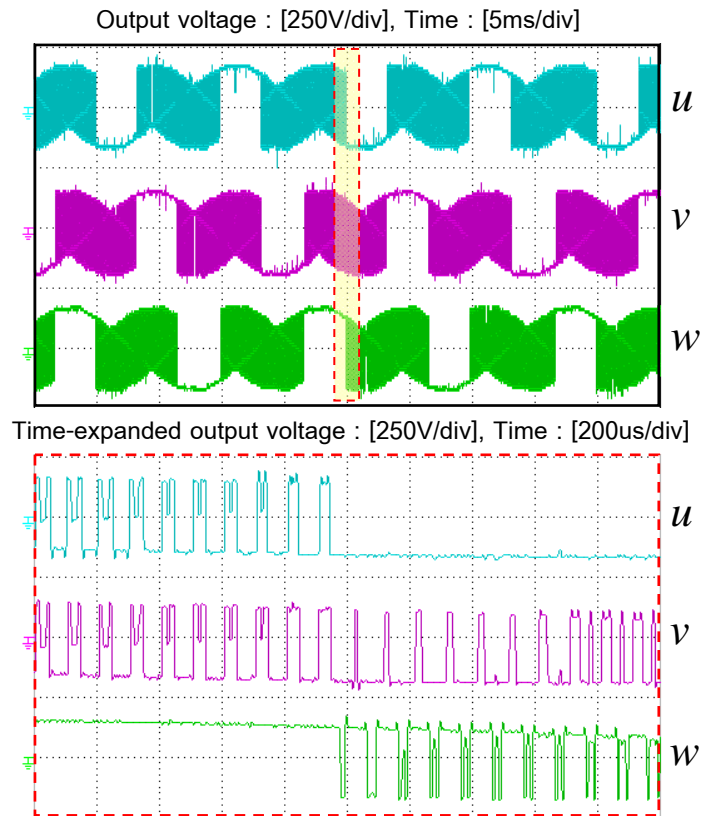
ภาพที่ 6.30 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ<3d> อ้าางอิงเฟสสูงสุด ความถี่ด้้านออก 25Hz



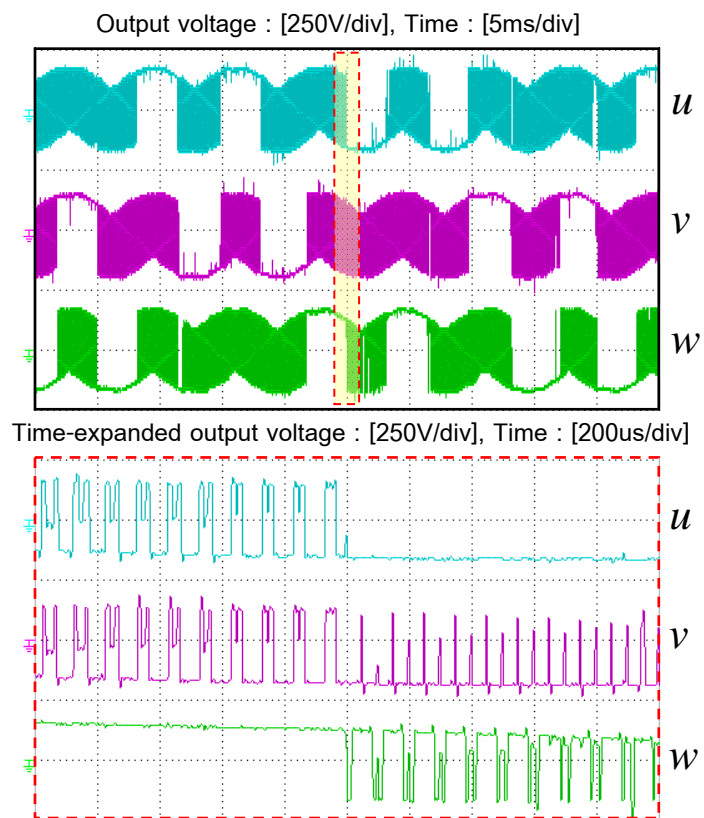
ภาพที่ 6.31 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ความถี่ด้านออก 50Hz



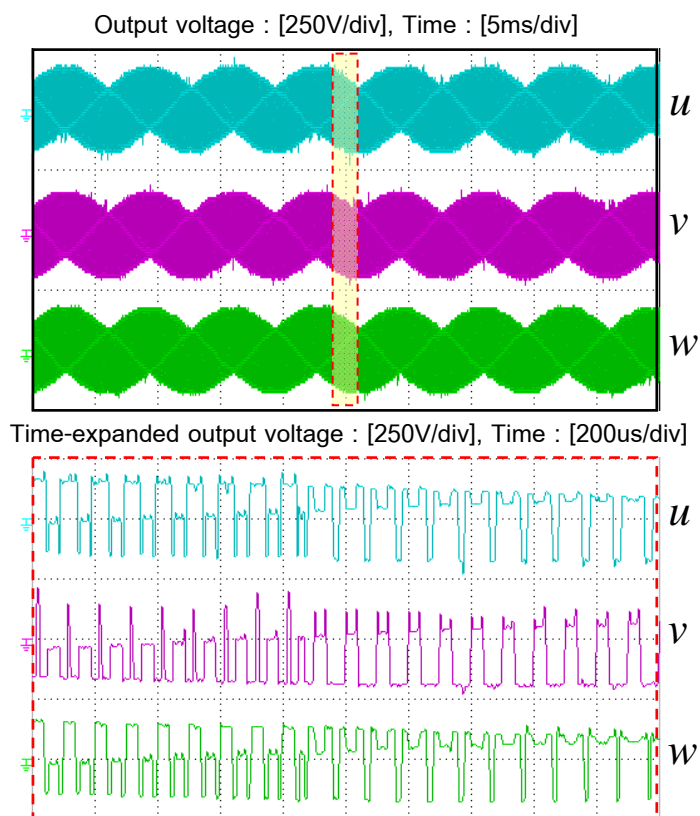
ภาพที่ 6.32 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ความถี่ด้านออก 25Hz



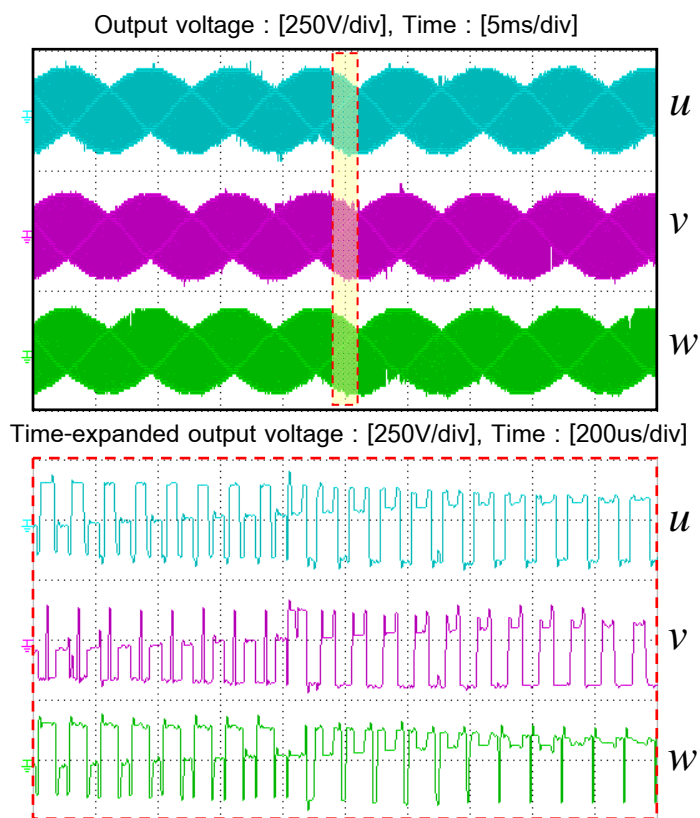
ภาพที่ 6.33 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด ความถี่ด้านออก 50Hz



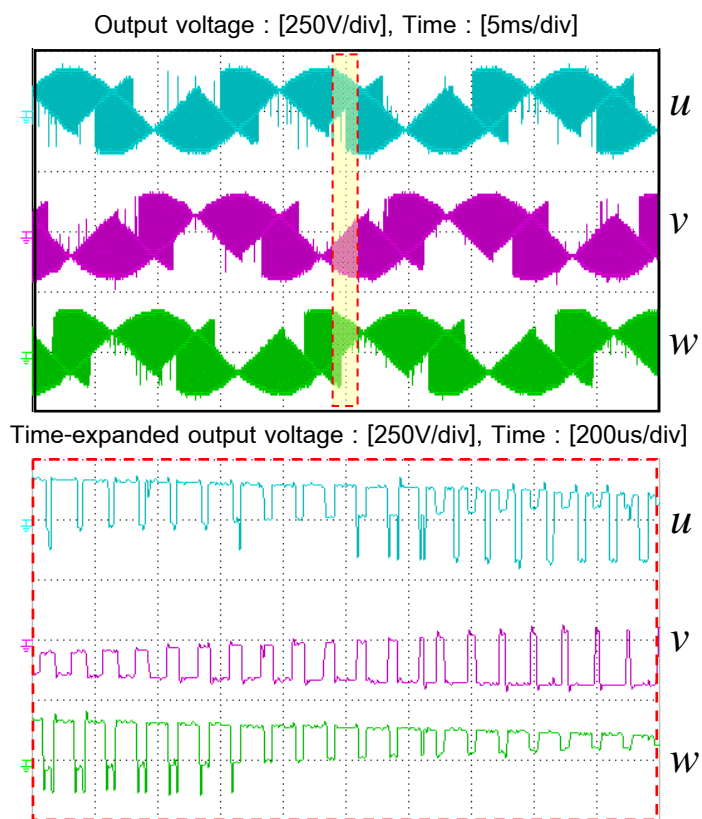
ภาพที่ 6.34 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด ความถี่ด้านออก 25Hz



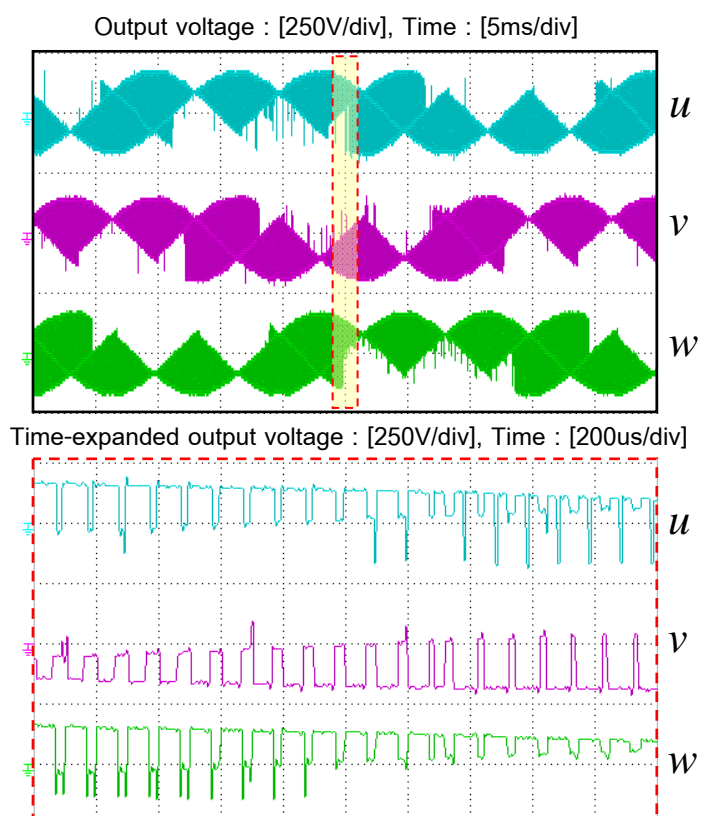
ภาพที่ 6.35 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 3d \rangle$ อ้างอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 50Hz



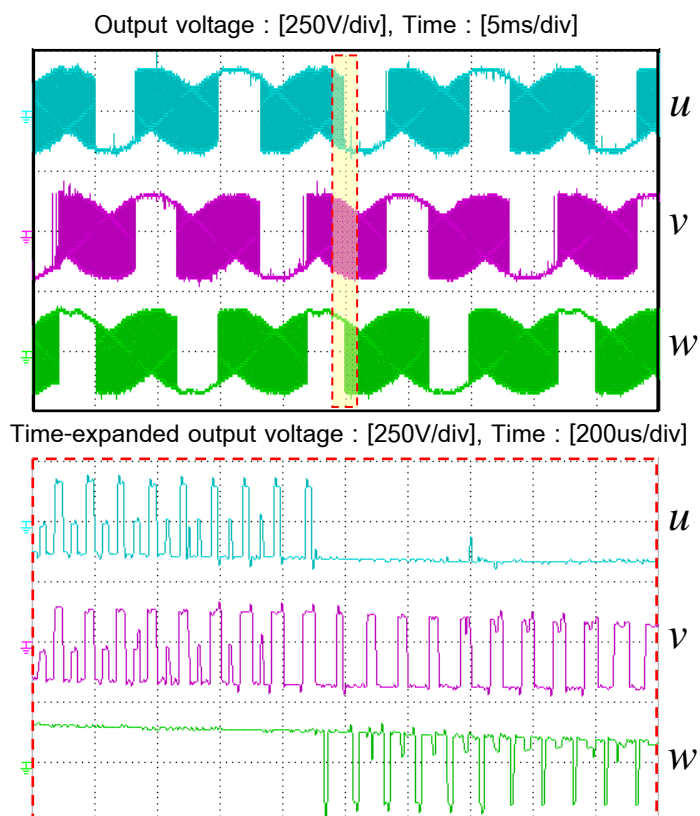
ภาพที่ 6.36 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 3d \rangle$ อ้างอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 25Hz



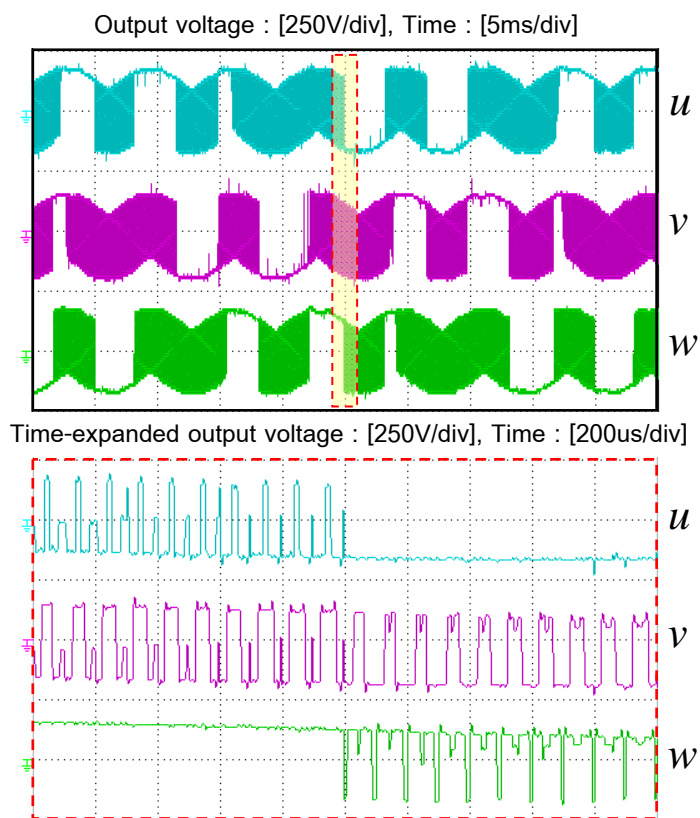
ภาพที่ 6.37 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 50Hz



ภาพที่ 6.38 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อ้าอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 25Hz



ภาพที่ 6.39 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle n2d \rangle$ อ้าอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 50Hz



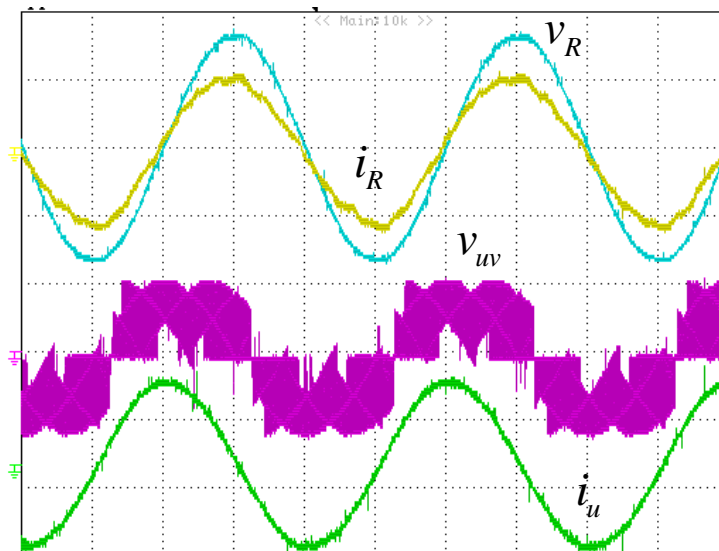
ภาพที่ 6.40 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle n2d \rangle$ อ้าอิงเฟสต่ำสุด ความถี่ด้านออก 25Hz

6.3.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนดัชนีการมอดูเลต

การทดสอบการเปลี่ยนดัชนีการมอดูเลตมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการใช้แรงดันระหว่างเฟสด้านเข้าเพื่อสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีดัชนีการมอดูเลตค่าสูง ($q=0.866$) และค่าต่ำ ($q=0.4$) การทดสอบในหัวข้อนี้จะกำหนดให้การมอดูเลตเป็นแบบ $\langle 2u1d \rangle$ และ $\langle 1n2d \rangle$ โดยใช้เฟสกลางและเฟสสูงสุดเป็นจุดอ้างอิง ตามลำดับ

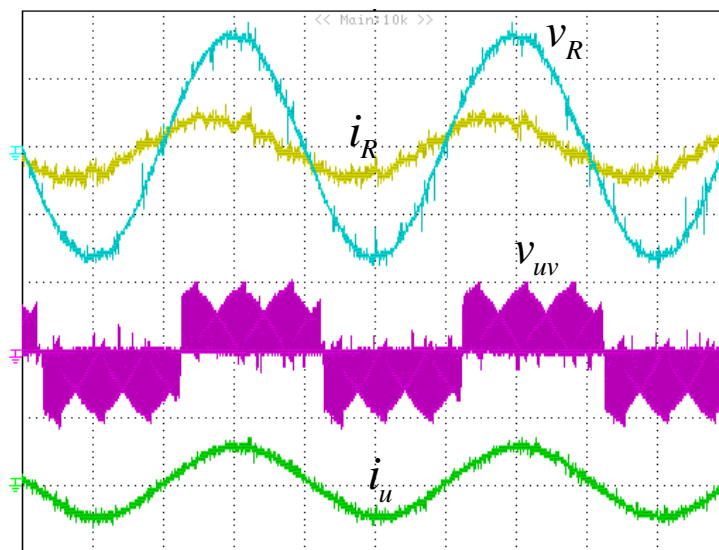
ภาพที่ 6.41-6.52 แสดงการเปรียบเทียบการใช้ดัชนีการมอดูเลตค่าสูงและค่าต่ำของการมอดูเลตรูปแบบต่างๆ รูปคลื่นด้านบนคือแรงดัน(สีฟ้า)และกระแสด้านเข้า(สีเหลือง) ถัดมาคือรูปคลื่นแรงดันด้านออกระหว่างเฟส(สีม่วง) และสุดท้ายคือรูปคลื่นกระแสด้านออก(สีเขียว) ภาพที่ 6.41-6.42 คือการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง กรณีแรงดันด้านออกค่าสูง และค่าต่ำตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตแบบนี้เป็นการมอดูเลตแบบเดียวที่ใช้แรงดันระหว่างเฟสด้านเข้าหรือแรงดันบัสต่างกันหากแรงดันด้านออกมีค่าต่างกัน กล่าวคือ กรณีแรงดันด้านออกค่าต่ำจะใช้เฉพาะแรงดันระหว่างเฟสค่าต่ำและค่ากลางสำหรับสร้างแรงดันด้านออก แต่เมื่อแรงดันด้านออกมีค่าสูงขึ้น ก็จะใช้แรงดันระหว่างเฟสค่าสูงร่วมด้วยซึ่งจะสอดคล้องกับทฤษฎีในภาพที่ 4.10 ลักษณะดังกล่าวหากแรงดันด้านออกที่ต้องการมีค่าต่ำจะทำให้ค่าระลอกของแรงดันด้านออกและค่าสูญเสียที่สวิตช์มีค่าต่ำ นอกจากนั้นยังทำให้แรงดันโหมดผลต่างมีค่าต่ำอีกด้วย

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



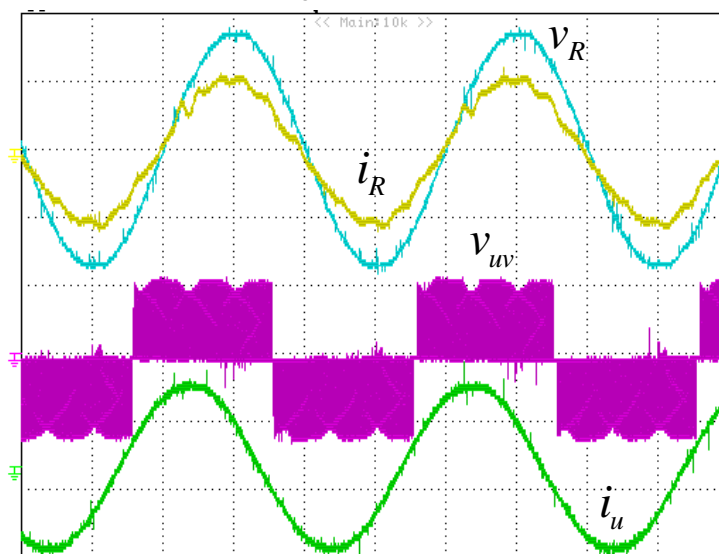
ภาพที่ 6.41 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ ข้างอิงเฟสกลาง ดัชนีการมอดูเลต 0.866
ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



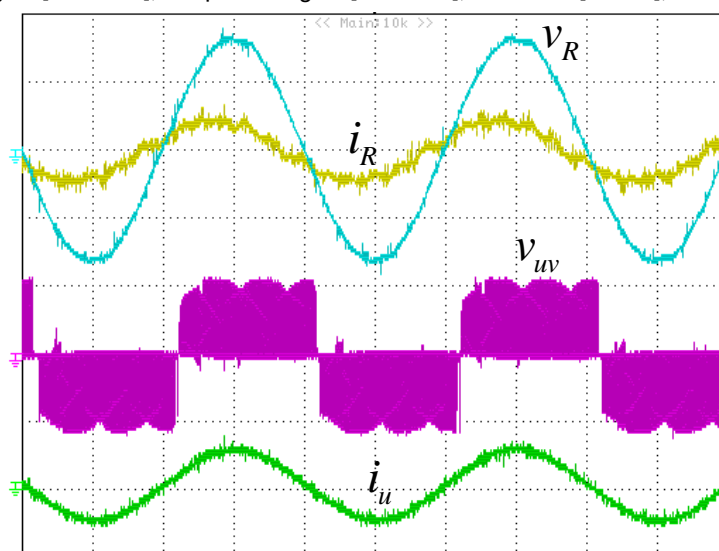
ภาพที่ 6.42 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ ข้างอิงเฟสกลาง ดัชนีการมอดูเลต 0.4
ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



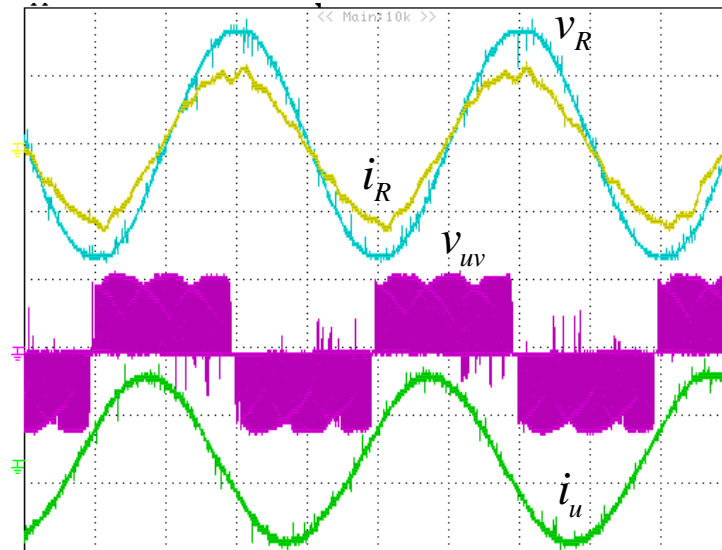
ภาพที่ 6.43 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ ข้างอิงเฟสกลาง ดัชนีการมอดูเลต 0.866 ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



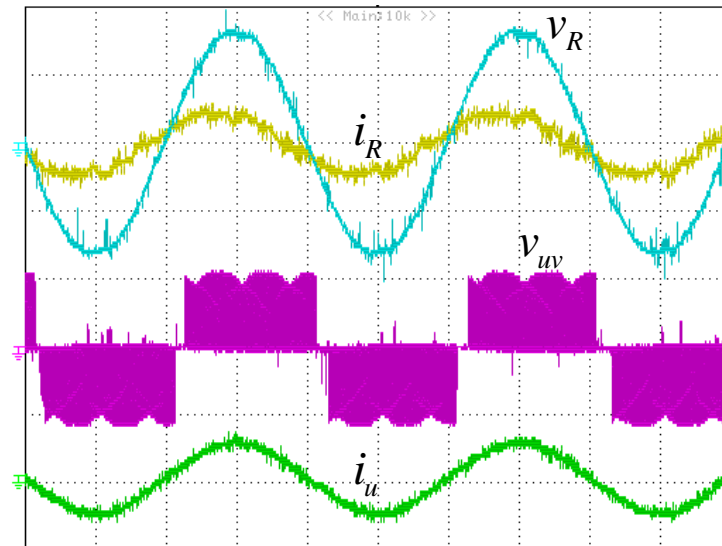
ภาพที่ 6.44 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ ข้างอิงเฟสกลาง ดัชนีการมอดูเลต 0.4 ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



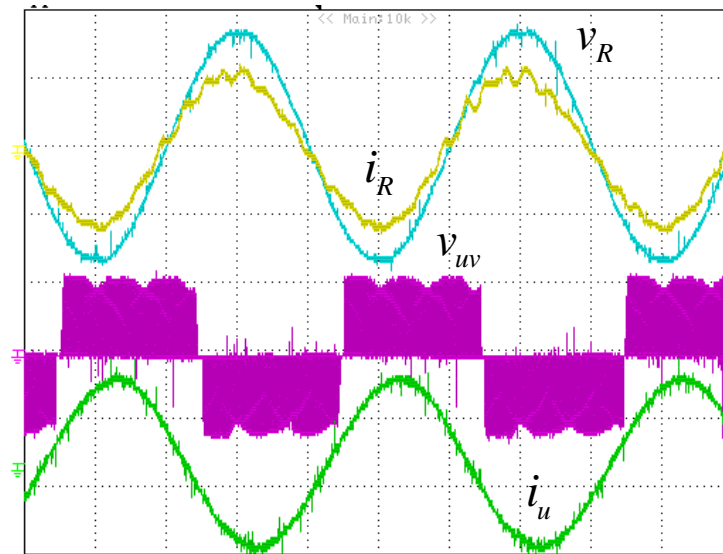
ภาพที่ 6.45 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ ข้างอิงเฟสสูงสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.866
ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



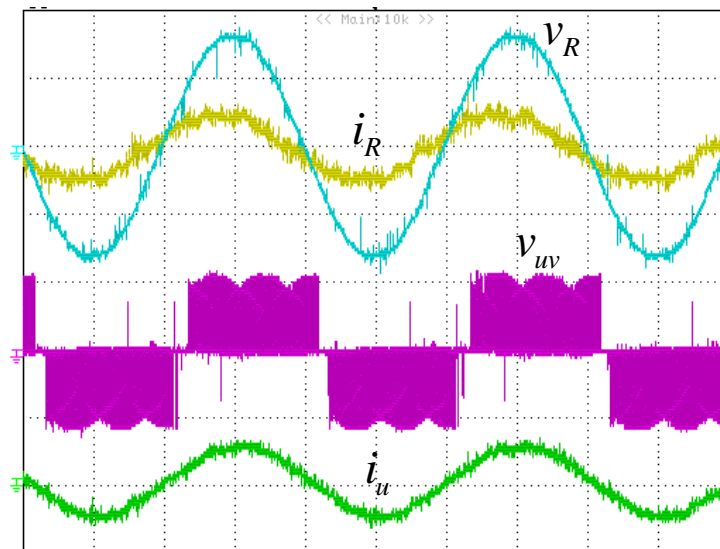
ภาพที่ 6.46 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ ข้างอิงเฟสสูงสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.4
ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



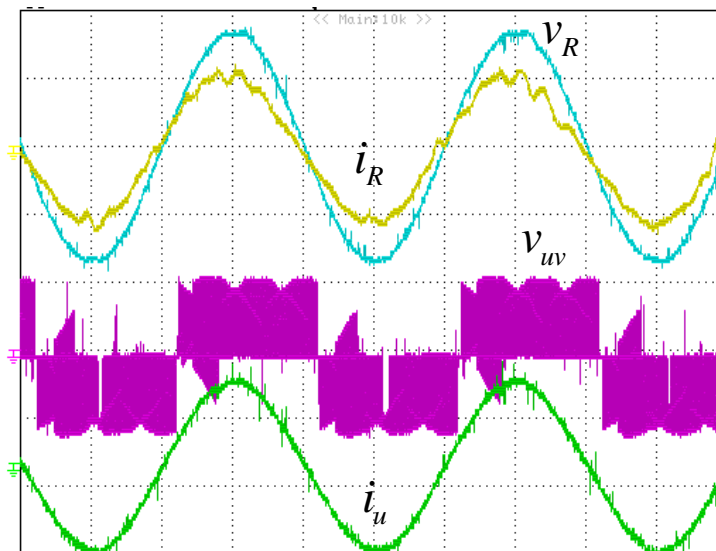
ภาพที่ 6.47 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.866 ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



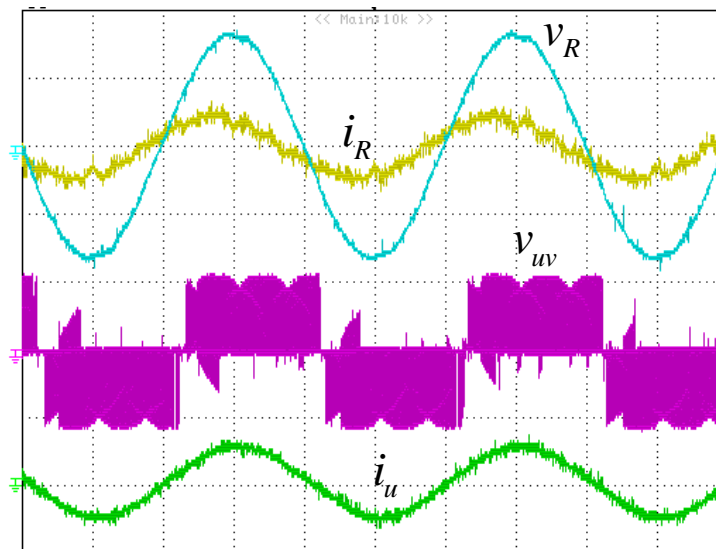
ภาพที่ 6.48 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสสูงสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.4 ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



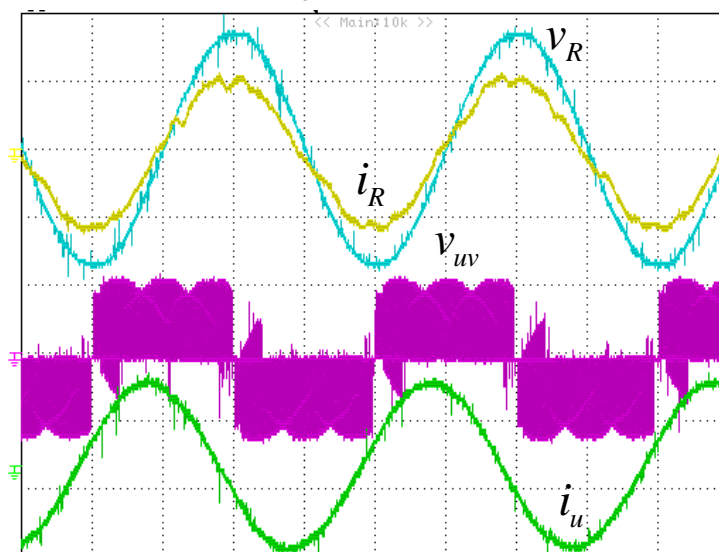
ภาพที่ 6.49 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสต่ำสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.866 ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



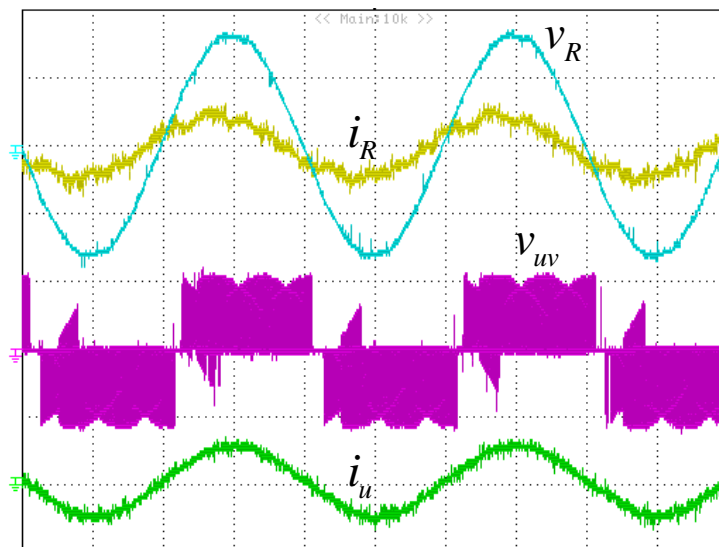
ภาพที่ 6.50 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสต่ำสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.4 ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



ภาพที่ 6.51 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ<n2d> อ้างอิงเฟสต่ำสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.866
ความถี่ด้านออก 50Hz

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]

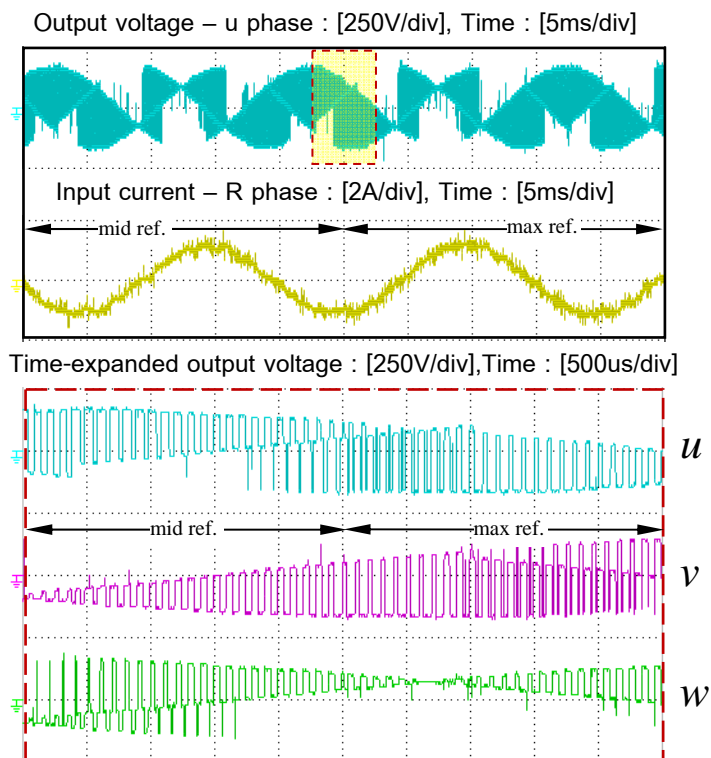


ภาพที่ 6.52 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ<n2d> อ้างอิงเฟสต่ำสุด ดัชนีการมอดูเลต 0.4
ความถี่ด้านออก 50Hz

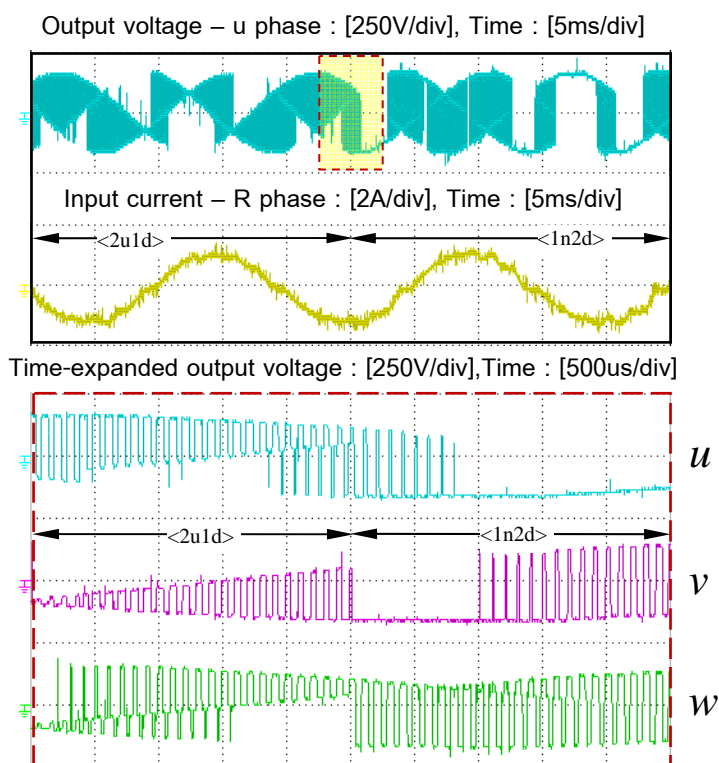
6.3.5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตและเฟสอ้างอิงในเชิงเวลาจริง

การทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตและการเปลี่ยนเฟสอ้างอิงในเชิงเวลาจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบการมอดูเลตและลำดับการสวิตช์ได้หลากหลายในเชิงเวลาจริงซึ่งอาจจะจำเป็นในการเปลี่ยนการมอดูเลตจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์บางวิธีมีการมอดูเลตหลายรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 5.7 การสูญเสียที่สวิตช์และฮาร์มอนิกของการมอดูเลตในแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทำงาน ดังนั้นวิธีการมอดูเลตจึงจำเป็นต้องสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเงื่อนไขการทำงานเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด

ภาพที่ 6.53 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนวิธีการมอดูเลตในเชิงเวลาจริงด้วยการเปลี่ยนเฟสอ้างอิง ในที่นี้การมอดูเลตแบบ $<2u1d>$ จะเปลี่ยนจากอ้างอิงกับเฟสกลางไปเป็นอ้างอิงเฟสสูงสุดแทนอย่างทันทีทันใด จากรูปคลื่นในส่วนขยายสเกลเวลาแสดงให้เห็นว่าลำดับการเปลี่ยนสถานะค่าแรงดันสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสอ้างอิงที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ยังไม่มีผลกระทบของกระแส ณ จุดที่เปลี่ยนเฟสอ้างอิงอีกด้วย ลักษณะดังกล่าวจึงยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนเฟสอ้างอิงในเชิงเวลาจริงสามารถทำได้โดยไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ในทำนองเดียวกัน ภาพที่ 6.54 แสดงผลการทดลองเมื่อต้องการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตจาก $<2u1d>$ ไปเป็น $<1n2d>$ อย่างทันทีทันใด รูปคลื่นในส่วนขยายสเกลเวลาแสดงให้เห็นถึงความราบเรียบของการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลตและรูปคลื่นกระแสด้านเข้าแสดงให้เห็นด้วยว่าไม่มีกระแสกระชากเกิดขึ้นในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว



ภาพที่ 6.53 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$ ขั้วอิงเฟสกลาง เปลี่ยนเป็น $\langle 2u1d \rangle$ ขั้วอิงเฟสสูงสุด



ภาพที่ 6.54 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$ ขั้วอิงเฟสกลาง เปลี่ยนเป็น $\langle 1n2d \rangle$ ขั้วอิงเฟสกลาง

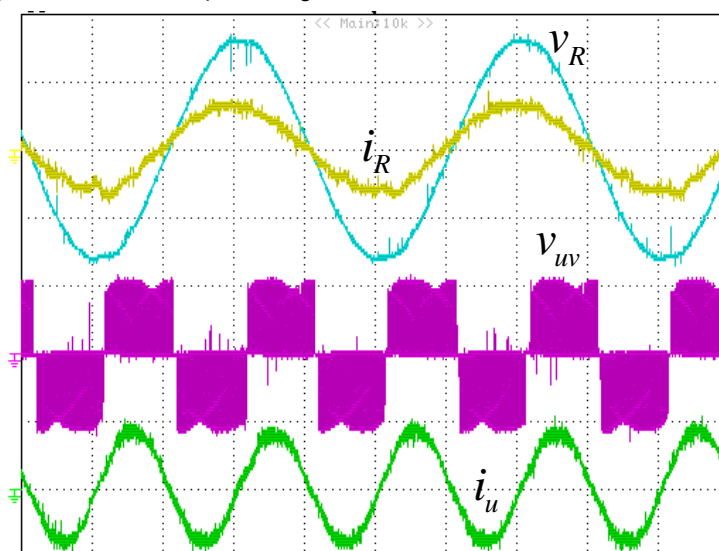
6.3.6 ผลการทดสอบการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้า

แม้ว่าจุดประสงค์ของวิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพที่นำเสนอจะมุ่งไปที่การสร้างรูปแบบการสวิตช์ให้ครอบคลุมกับวิธีการมอดูเลตแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แต่การทดสอบในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตที่ได้นำเสนอสามารถควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าด้านหลังหรือนำหน้ารวมทั้งตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งได้ โดยอาศัยการควบคุมผ่านพารามิเตอร์อิสระ b และ d

6.3.6.1 ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง

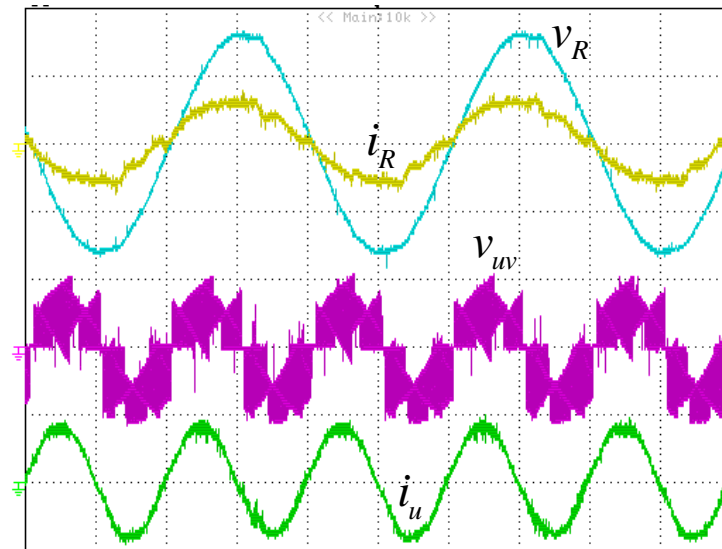
การทดสอบการมอดูเลตเพื่อควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งจะกำหนดให้พารามิเตอร์ $b=d=0$ และจะกำหนดให้ตัวประกอบกำลังด้านออกมีค่าแตกต่างกัน ภาพที่ 6.55-6.63 แสดงผลการทดลองในการควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก (ϕ_o) เท่ากับ 10, 20 และ 30 องศา ตามลำดับ รูปคลื่นด้านบนคือแรงดันด้านเข้า (สีฟ้า) และกระแสด้านเข้า (สีเหลือง) ถัดมาคือรูปคลื่นแรงดันด้านออกระหว่างเฟส (สีม่วง) และสุดท้ายคือรูปคลื่นกระแสด้านออก (สีเขียว) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตทั้งสามกรณีให้ผลที่สอดคล้องกันโดยกระแสด้านเข้ามีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์และมีเฟสตรงกับแรงดันด้านเข้า แม้ว่าตัวประกอบกำลังด้านออกจะแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามหากสังเกตรูปคลื่นกระแสด้านเข้าจะมีเฟสนำหน้าแรงดันด้านเข้าอยู่เล็กน้อยซึ่งมีผลมาจากตัวเก็บประจุของวงจรกรองผ่านต่ำด้านเข้า

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



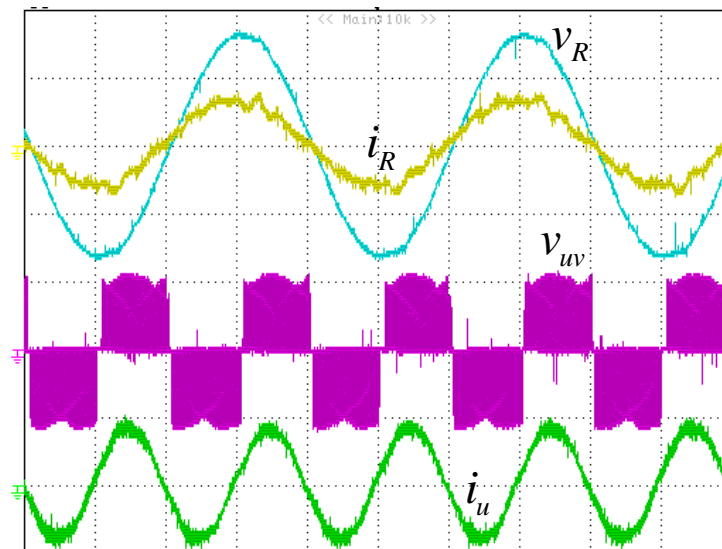
ภาพที่ 6.55 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $<n2d>$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก $\phi_o = 10^\circ$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



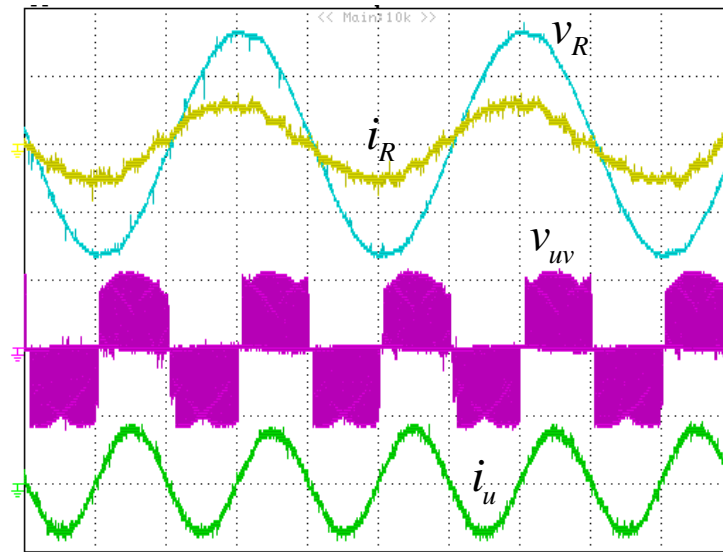
ภาพที่ 6.56 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก $\phi_o = 10^\circ$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



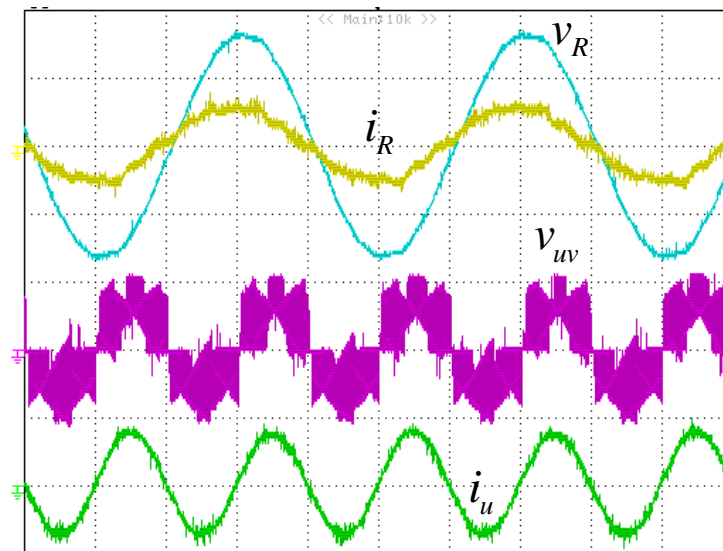
ภาพที่ 6.57 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก $\phi_o = 10^\circ$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



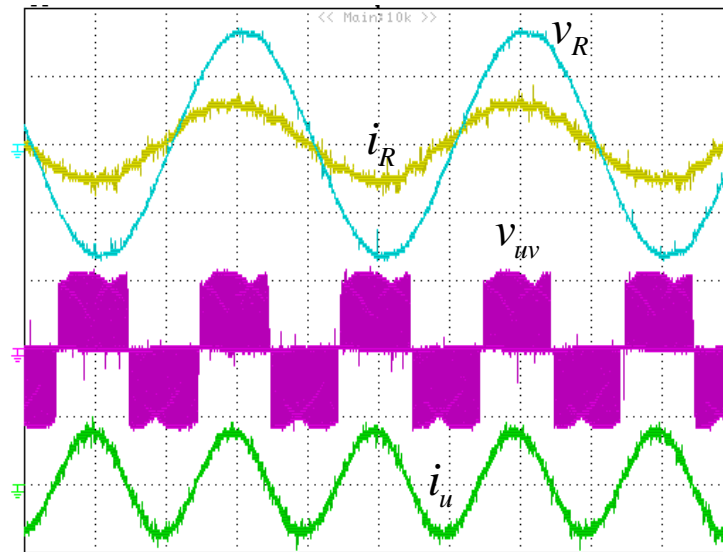
ภาพที่ 6.58 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 1n2d \rangle$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก $\phi_o = 20^\circ$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



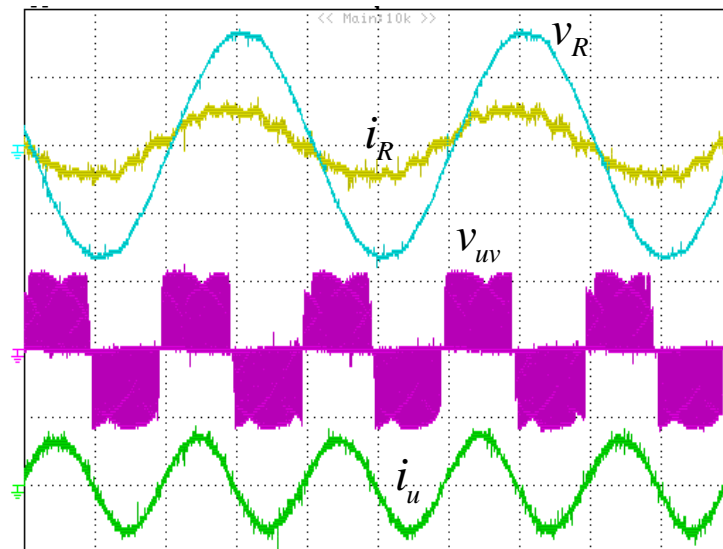
ภาพที่ 6.59 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก $\phi_o = 20^\circ$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



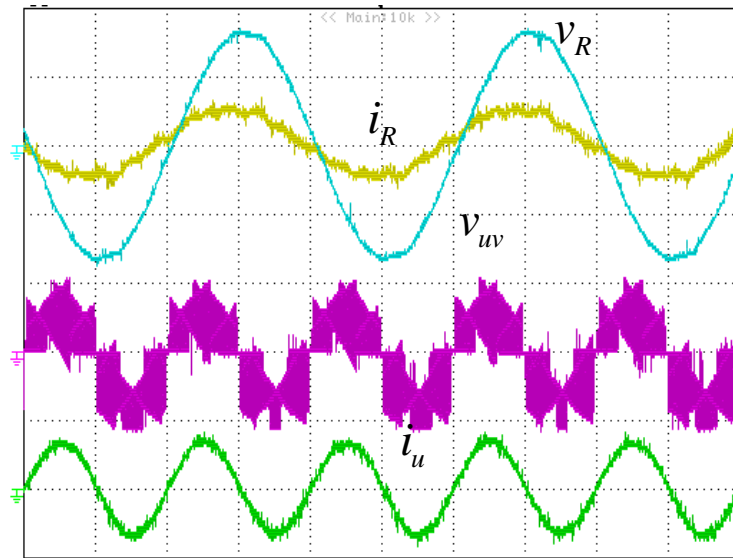
ภาพที่ 6.60 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก $\phi_o = 20^\circ$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



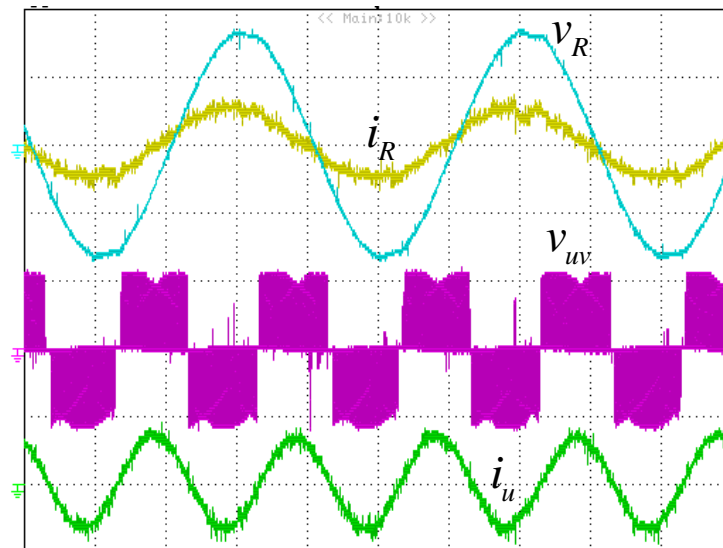
ภาพที่ 6.61 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 1n2d \rangle$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก $\phi_o = 30^\circ$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



ภาพที่ 6.62 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ<2u1d> อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก $\phi_o = 30^\circ$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



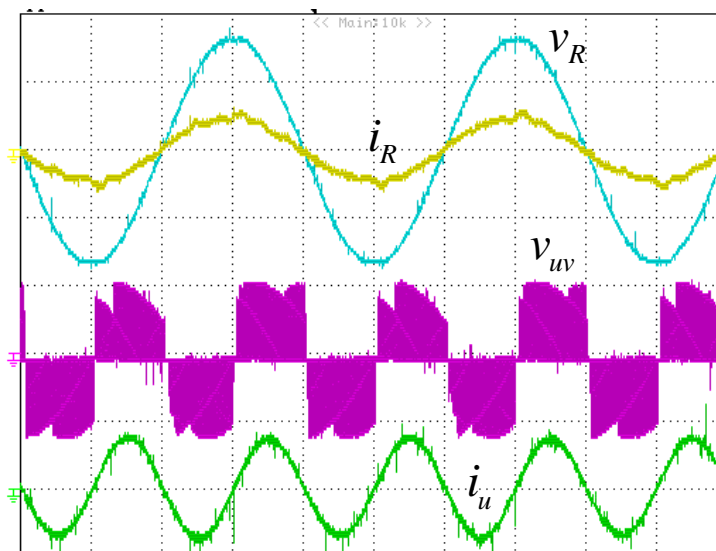
ภาพที่ 6.63 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ<2u1d> อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง เมื่อมุมเฟสกระแสด้านออก $\phi_o = 30^\circ$

6.3.6.2 ตัวประกอบกำลังด้านเข้าด้านหลัง

การทดสอบการมอดูเลตเพื่อควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าด้านหลังจะอาศัยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ b และ d โดยจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ 1) ใช้เฉพาะพารามิเตอร์ b 2) ใช้เฉพาะพารามิเตอร์ d และ 3) ใช้ทั้ง b และ d เงื่อนไขของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ b และ d จะใช้ค่าที่ทำให้กระแสด้านเข้าด้านหลังโดยไม่เกิดการมอดูเลตเกิน ในที่นี้จะกำหนดให้มุมเฟสของกระแสด้านออก $\phi_o = 20^\circ$

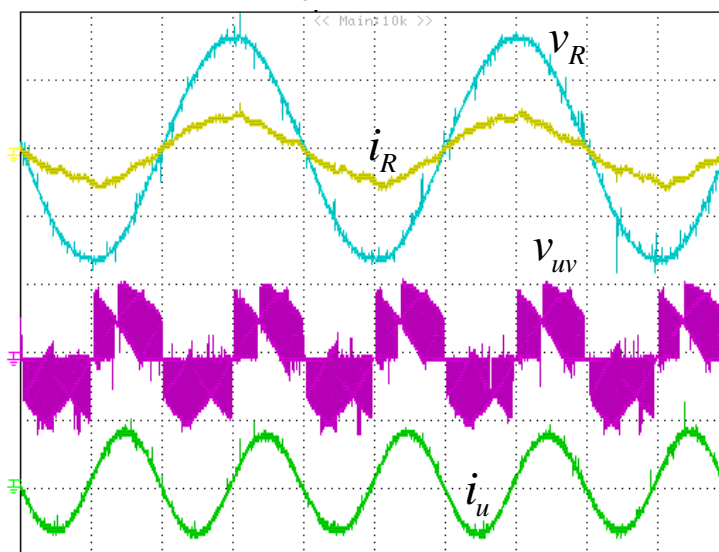
ภาพที่ 6.64-6.73 คือผลการทดลองการควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าด้านหลัง เมื่อกำหนดให้ $(b=-0.5, d=0)$, $(b=0, d=-0.5)$ และ $(b=-0.5, d=-0.5)$ ตามลำดับ รูปคลื่นด้านบนคือแรงดันด้านเข้า(สีฟ้า)และกระแสด้านเข้า(สีเหลือง) ถัดมาคือรูปคลื่นแรงดันด้านออกระหว่างเฟส(สีม่วง)และสุดท้ายคือรูปคลื่นกระแสด้านออก(สีเขียว) จะเห็นได้ว่ากระแสด้านเข้าจะนำหน้าเล็กน้อยกว่ากรณีตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งเนื่องจากกรณีนี้กระแสด้านเข้าจะมีทั้งกระแสแอกทีฟและรีแอกทีฟ ผลของกระแสรีแอกทีฟจะทำให้กระแสและแรงดันด้านเข้ามีเฟสตรงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในภาพที่ 6.58-6.60 ลักษณะดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการมอดูเลตที่ได้ นำเสนอสามารถควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าด้านหลังได้ นอกจากนี้ภาพที่ 6.67-6.69 แสดงให้เห็นด้วยว่าการเพิ่มค่าดัชนีการมอดูเลตเป็น 0.8 ($q=0.8$) ยังคงสามารถควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าด้านหลังได้เหมือนเดิม

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



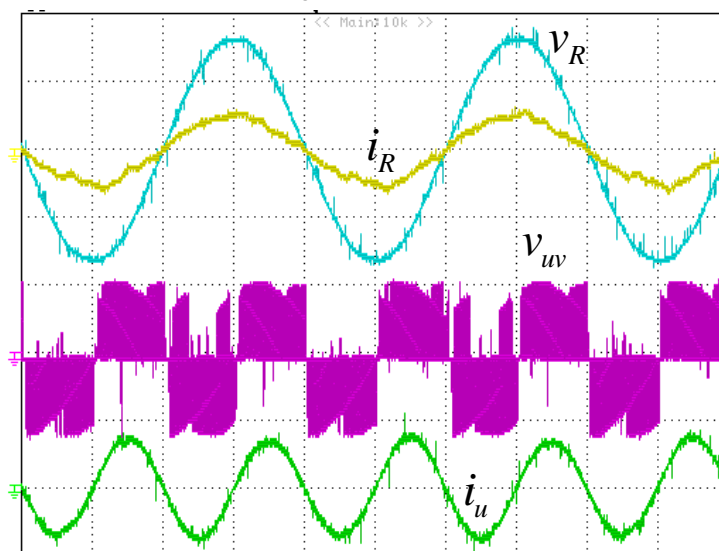
ภาพที่ 6.64 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $<1n2d>$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้าด้านหลัง เมื่อ $b=-0.5, d=0$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



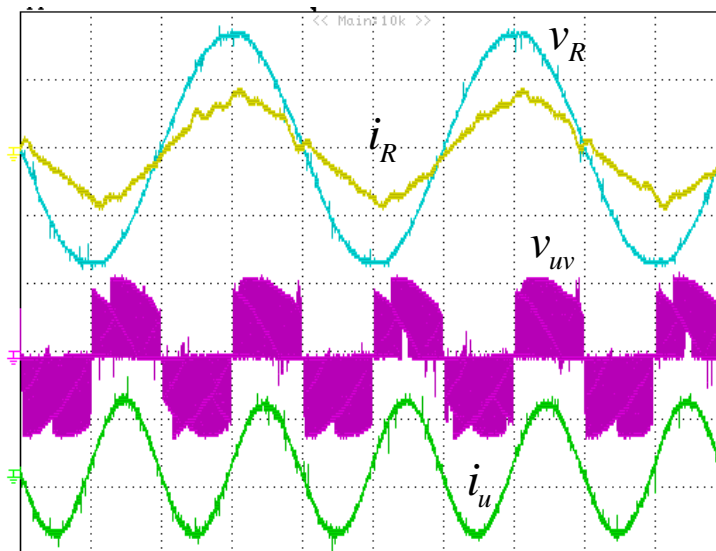
ภาพที่ 6.65 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
ล้าหลัง เมื่อ $b=-0.5$, $d=0$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



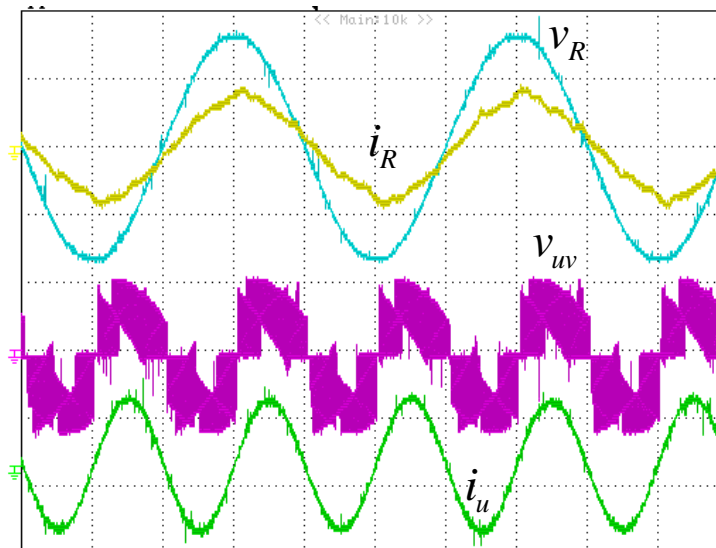
ภาพที่ 6.66 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
ล้าหลัง เมื่อ $b=-0.5$, $d=0$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



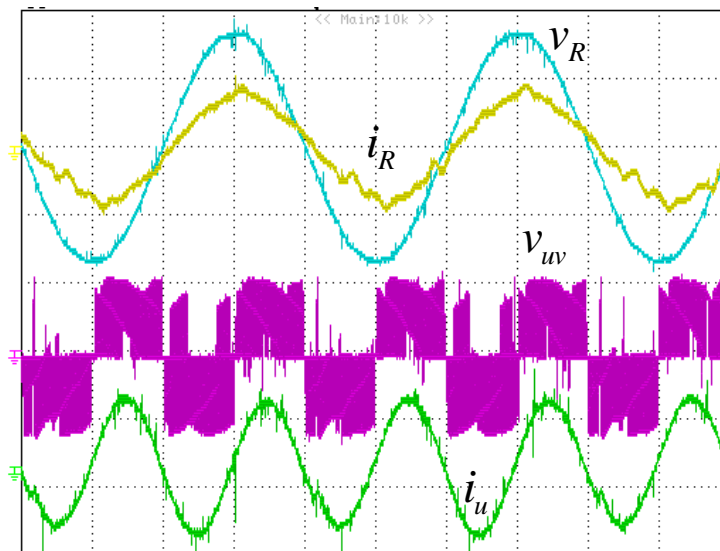
ภาพที่ 6.67 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
ด้านหลั้ เมื่อ $b=-0.5$, $d=0$ และ $q=0.8$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



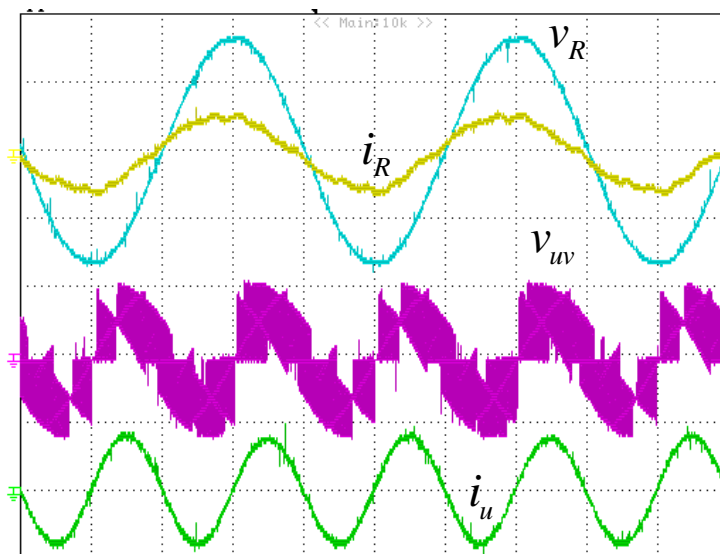
ภาพที่ 6.68 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
ด้านหลั้ เมื่อ $b=-0.5$, $d=0$ และ $q=0.8$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



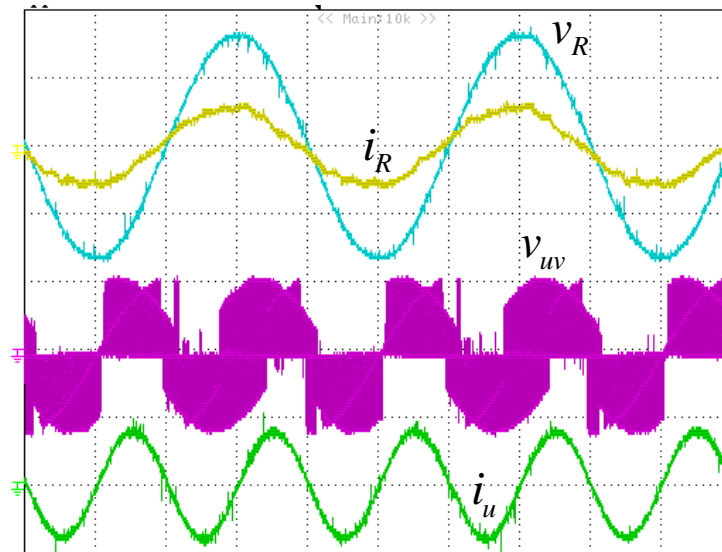
ภาพที่ 6.69 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
ด้านหล้ง เมื่อ $b=-0.5$, $d=0$ และ $q=0.8$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



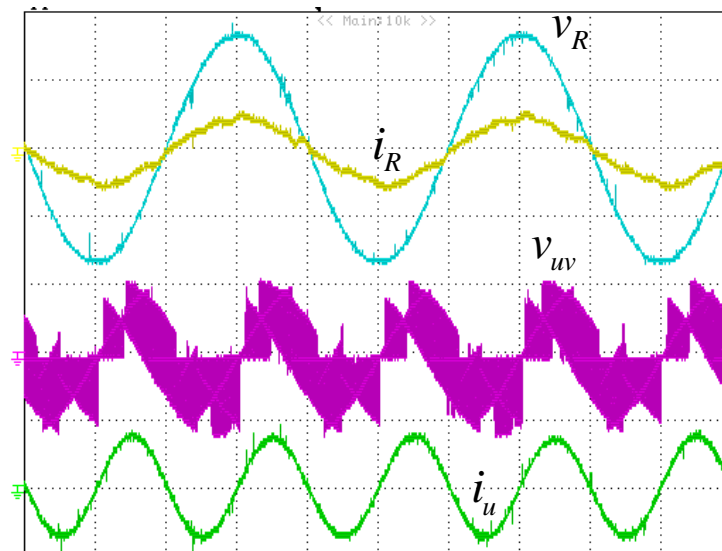
ภาพที่ 6.70 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
ด้านหล้ง เมื่อ $b=0$, $d=-0.5$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



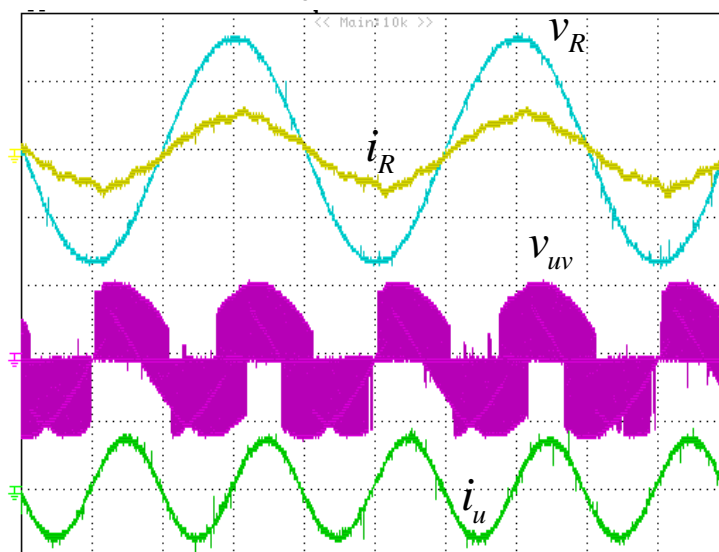
ภาพที่ 6.71 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
ด้านหลั้ เมื่อ $b=0$, $d=-0.5$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



ภาพที่ 6.72 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
ด้านหลั้ เมื่อ $b=-0.5$, $d=-0.5$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



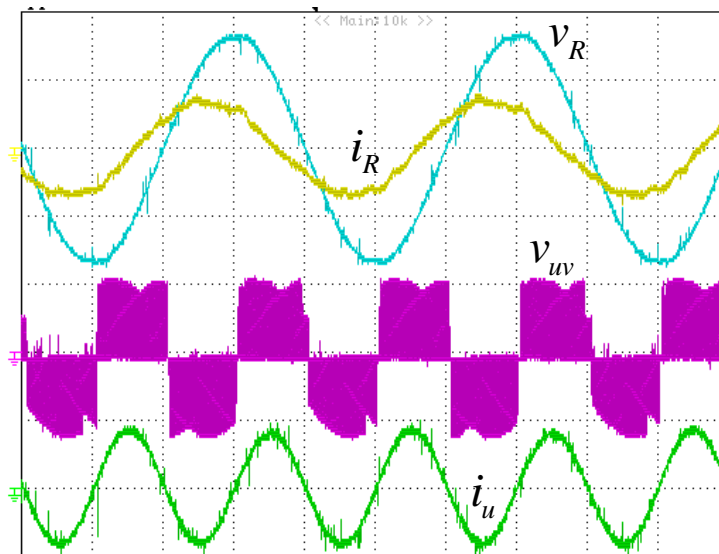
ภาพที่ 6.73 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $<2u1d>$ อ้าอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
 ล้าหลัง เมื่อ $b=-0.5$, $d=-0.5$ และ $q=0.6$

6.3.6.3 ตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้า

การทดสอบการมอดูเลตให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้าจะกำหนดเงื่อนไขการทดสอบในทำนองเดียวกันกับกรณีตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้าหลัง แต่ในกรณีนี้จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ b และ d มีเครื่องหมายตรงกันข้าม การกำหนดค่า b และ d จะใช้ค่าที่ให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้าโดยไม่เกิดการมอดูเลตเกินเช่นเดียวกัน

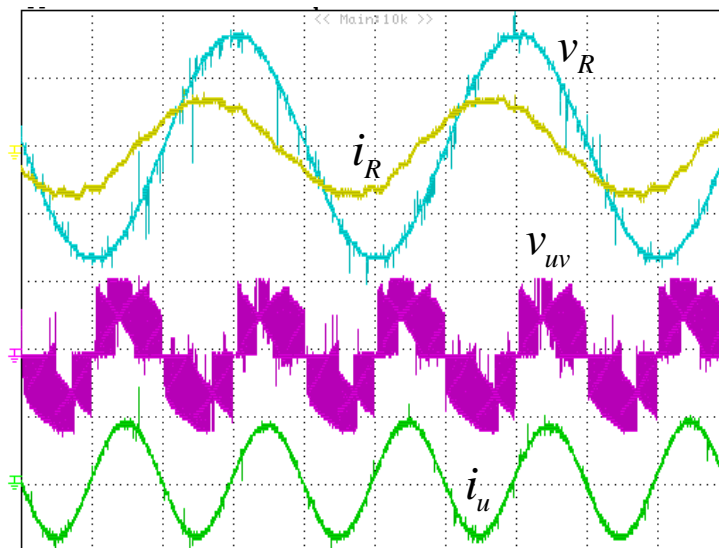
ผลการทดลองในภาพที่ 6.74-6.83 แสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมให้ตัวประกอบกำลังนำหน้าได้ โดยสังเกตจากกระแสด้านเข้าจะนำหน้ามากกว่ากรณีตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่งในภาพที่ 6.58-6.60 ผลการทดลองแสดงให้เห็นด้วยว่ากรณีที่ $b=0.5$, $d=0$ จะเป็นกรณีที่ให้กระแสนำหน้ามากกว่าในกรณีที่ $b=0$, $d=0.5$ เนื่องจากการควบคุมกระแสแอกทีฟด้านเข้าเพื่อปรับค่าตัวประกอบกำลังผ่านพารามิเตอร์ d จะอาศัยกระแสแอกทีฟด้านออกเป็นตัวควบคุมแต่ถ้ากระแสแอกทีฟด้านออกมีค่าน้อยจึงไม่สามารถควบคุมกระแสแอกทีฟด้านเข้าได้มากเหมือนการใช้พารามิเตอร์ b ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้กระแสแอกทีฟเป็นตัวควบคุม นอกจากนี้ภาพที่ 6.77-6.79 ยังแสดงให้เห็นด้วยว่าการเพิ่มค่าดัชนีการมอดูเลตเป็น 0.8 ($q=0.8$) ไม่มีผลกระทบต่อการควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้า

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



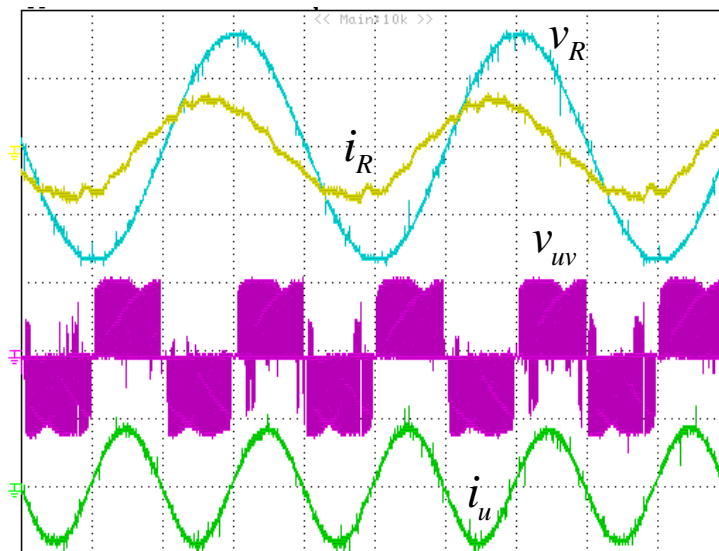
ภาพที่ 6.74 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 1n2d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0.5$, $d=0$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



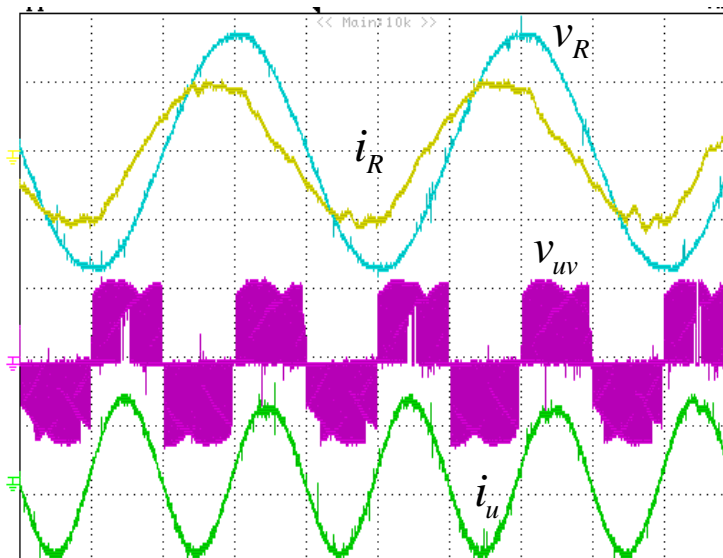
ภาพที่ 6.75 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$ อ้างอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0.5$, $d=0$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



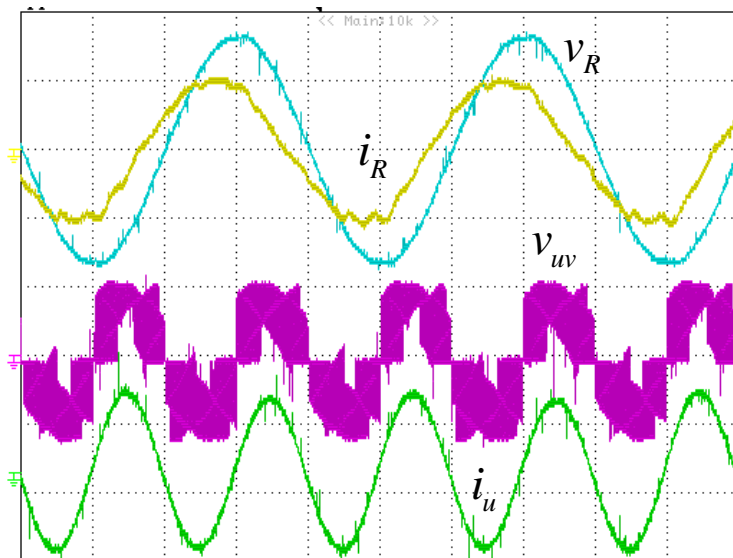
ภาพที่ 6.76 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0.5$, $d=0$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



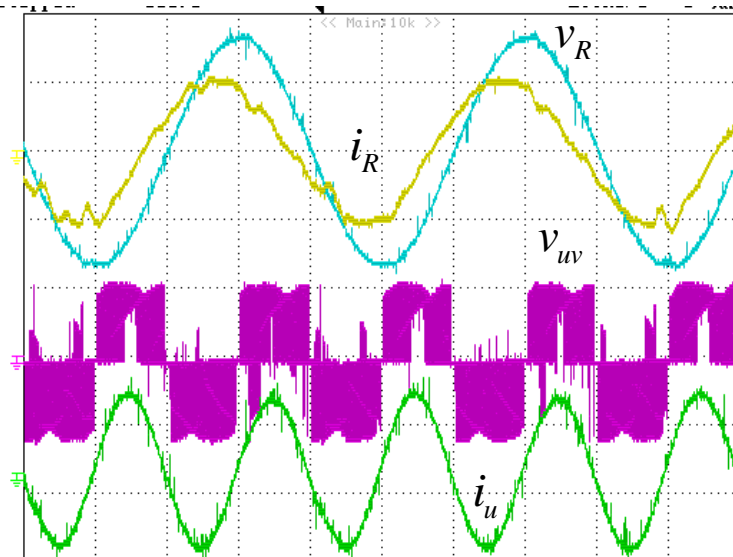
ภาพที่ 6.77 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $\langle 1n2d \rangle$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0.5$, $d=0$ และ $q=0.8$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



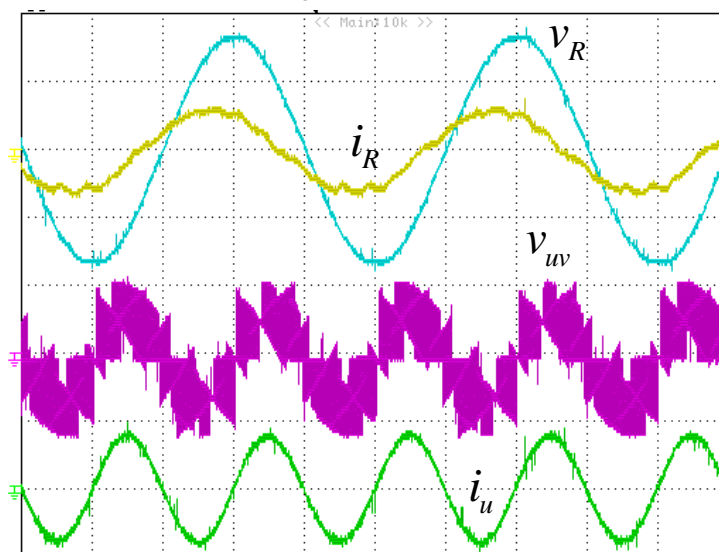
ภาพที่ 6.78 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0.5$, $d=0$ และ $q=0.8$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



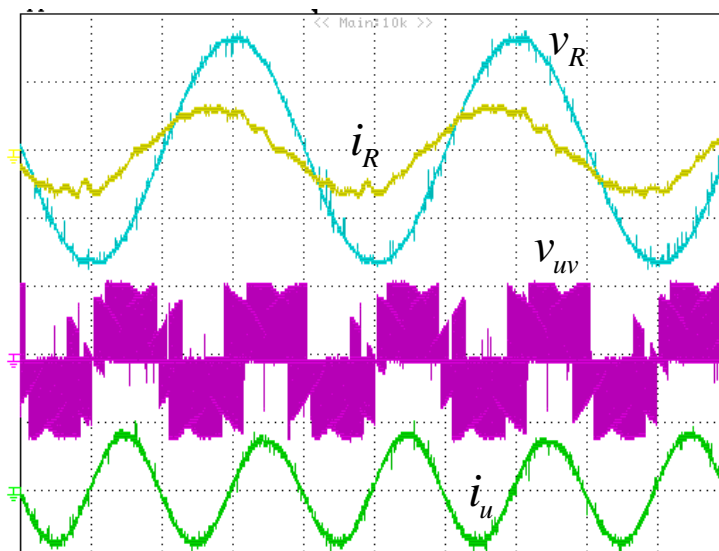
ภาพที่ 6.79 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$\langle 2u1d \rangle$ อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0.5$, $d=0$ และ $q=0.8$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



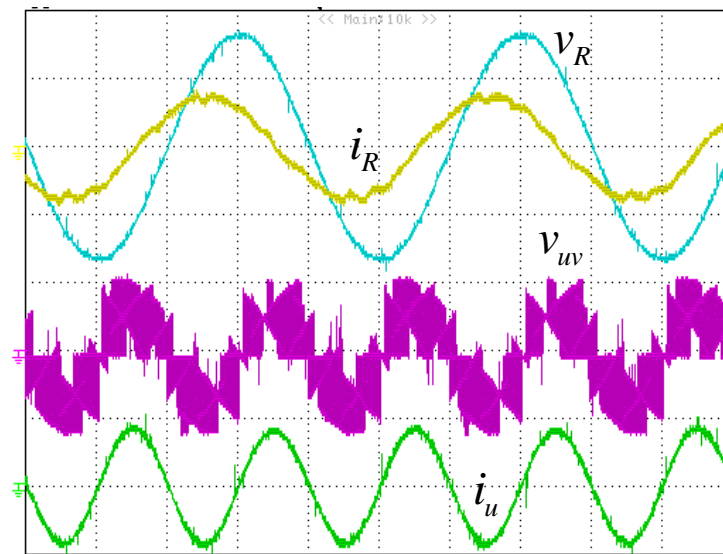
ภาพที่ 6.80 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $<2u1d>$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0$, $d=0.5$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



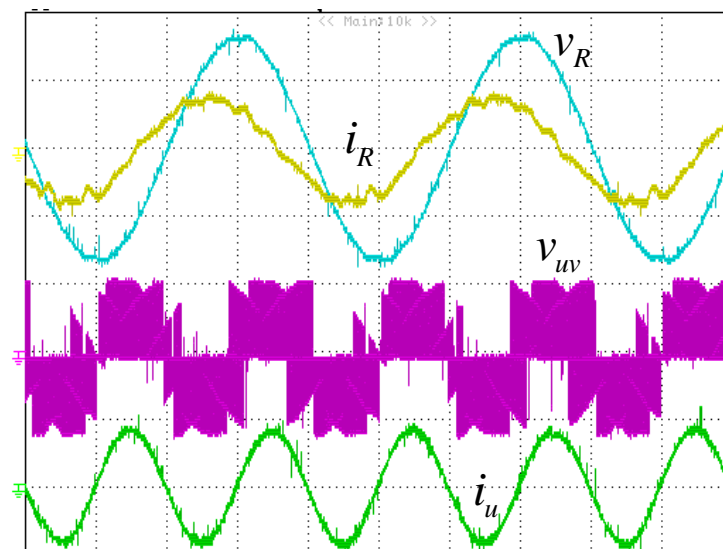
ภาพที่ 6.81 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ $<2u1d>$ อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0$, $d=0.5$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



ภาพที่ 6.82 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อังอิงเฟสกลาง ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0.5$, $d=0.5$ และ $q=0.6$

Input voltage : [100V/div], Output voltage : [250V/div], Current : [2A/div], Time : [5ms/div]



ภาพที่ 6.83 ผลการทดลองการมอดูเลตแบบ$2u1d$ อังอิงเฟสสูงสุด ตัวประกอบกำลังด้านเข้า
นำหน้า เมื่อ $b=0.5$, $d=0.5$ และ $q=0.6$

ภาพที่ 6.55-6.83 คือผลการทดลองการมอดูเลตในการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้า โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ b และ d ที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของการมอดูเลตที่ได้นำเสนอสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าได้ตามที่ต้องการและได้ข้อสรุปในการควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าผ่านพารามิเตอร์อิสระ b และ d ดังนี้ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ $b=d=0$ จะได้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าเท่ากับหนึ่ง และถ้ากำหนด $b<0$ หรือ/และ $d<0$ จะได้ตัวประกอบกำลังด้านเข้าล้าหลัง แต่ถ้ากำหนดให้ $b>0$ หรือ/และ $d>0$ จะได้ตัวประกอบกำลังด้านเข้านำหน้า ลักษณะดังกล่าวจะมีความสอดคล้องกับสมการที่ (2.17)

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์และการทำให้เป็นจริงบนฐานคลื่นพาหะโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบขั้วคู่ การมอดูเลตแบบนี้จะอาศัยรูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตที่คำนวณจากมุมมองการแปลงเชิงเรขาคณิตและพิจารณาเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ วิทยานิพนธ์นี้ยังได้พัฒนาวิธีการมอดูเลตแบบขั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ ให้ใช้ร่วมกับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ รวมทั้งได้ขยายแนวคิดเรื่องการสร้างสัญญาณอ้างอิงและการบวกแรงดันลำดับศูนย์สำหรับการมอดูเลตแบบขั้วคู่อีกด้วย วิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพสามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายและครอบคลุมรูปแบบการสวิตช์ของการมอดูเลตแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้ โดยอาศัยการกำหนดค่าตัวแปรอิสระ b, d การเลือกเมทริกซ์แรงดันลำดับศูนย์ที่เหมาะสมร่วมกับการจัดลำดับการสวิตช์ด้วยการเลือกเฟสด้านเข้าที่สอดคล้องเป็นจุดอ้างอิง ผลจากการวิจัยสามารถสรุปเป็นประเด็นต่างๆได้ดังนี้

7.1 บทสรุป

- วิธีการมอดูเลตที่นำเสนอได้ใช้มุมมองที่พิจารณาเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนการแปลงเชิงเรขาคณิต และใช้มุมมองดังกล่าวในการหาคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต รูปคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตที่หาได้จะแสดงอยู่ในเทอมของแรงดันด้านเข้าและด้านออกขงหนึ่ง จึงสะดวกในการใช้งานจริง และผลจากการวิจัยชี้ให้เห็นว่าเมทริกซ์การมอดูเลตดังกล่าวครอบคลุมการมอดูเลตทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ นอกจากนี้ยังมีลักษณะเด่นคือเขียนอยู่ในรูปแบบทางอ้อมซึ่งเป็นรูปแบบการแปลง $AC \rightarrow DC \rightarrow AC$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการมอดูเลตแบบทางตรงมีความสมมูลกับวิธีการมอดูเลตแบบทางอ้อม
- การมองเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นเสมือนอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับและนำแนวคิดใหม่ในการมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาหะแบบขั้วคู่ของอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับมาประยุกต์ใช้กับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เป็นวิธีการที่เหมาะสม เนื่องจากการมอดูเลตดังกล่าวไม่เพียงแต่จะให้รูปแบบการสวิตช์ที่ครอบคลุมทุกๆ รูปแบบที่เป็นไปได้ของเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์เท่านั้นยังสามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่าง

แรงดันอ้างอิงกับแรงดันด้านออกที่ต้องการอีกด้วย แรงดันอ้างอิงดังกล่าวสามารถกำหนดได้จากฟังก์ชันการมอดูเลตโดยตรงจึงทำให้เห็นพฤติกรรมของการมอดูเลตในเชิงการสร้างแรงดันและกระแสได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้การมอดูเลตแบบนี้ยังสามารถสะท้อนให้เห็นการสร้างสัญญาณอ้างอิงในลักษณะที่คล้ายคลึงกับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับซึ่งเป็นการพัฒนาขยายองค์ความรู้เดิมจากทฤษฎีการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับไปยังอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ และเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์

- วิธีการมอดูเลตเชิงเอกภาพสามารถสร้างการมอดูเลตความกว้างพัลส์ในเชิงเวลาจริงที่หลากหลายและครอบคลุมวิธีการมอดูเลตที่นิยมใช้ในปัจจุบัน อัลกอริทึมการมอดูเลตเชิงเอกภาพที่ได้นำเสนอจะมี 3 ขั้นตอน คือ 1) คำนวณค่าพารามิเตอร์อิสระจากเงื่อนไขของกระแสด้านเข้า 2) บวกแรงดันลำดับศูนย์เพื่อกำหนดรูปแบบการมอดูเลตที่ต้องการ 3) กำหนดลำดับการสวิตช์ด้วยการเลือกเฟสด้านเข้าเป็นจุดอ้างอิง การสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์จะใช้ FPGA ร่วมกับบอร์ดประมวลผลเชิงดิจิทัล TMSLF2407 ซึ่งมีวงจรสร้างสัญญาณ PWM 2 ตัวรองรับการมอดูเลตแบบชั่วครู่ได้พอดี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมการมอดูเลตที่ได้นำเสนอสามารถทำให้เป็นจริงได้โดยง่าย และทฤษฎีมีความถูกต้องใช้งานได้จริงในเชิงปฏิบัติ

7.2 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าผลการจำลองและการทดลองการทำงานจะแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพที่ได้นำเสนอสามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่หลากหลายและครอบคลุมรูปแบบการสวิตช์ในการมอดูเลตแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย อย่างไรก็ตามยังมีสิ่งที่จะต้องปรับปรุงบางประการที่ควรพิจารณาศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาให้ทฤษฎีการมอดูเลตสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นดังนี้

- การมอดูเลตที่นำเสนอได้ลดจำนวนการสวิตช์จาก 12 ครั้ง ในการมอดูเลตแบบ $\langle 3d \rangle$ ให้เหลือเพียง 8 ครั้งในการมอดูเลตแบบ $\langle 2u1d \rangle$, $\langle 1n2d \rangle$ และ $\langle 1b1u1d \rangle$ โดยอาศัยเฉพาะการบวกค่าแรงดันลำดับศูนย์ M_0 เท่านั้น และแม้ว่าการมอดูเลตดังกล่าวจะมีจำนวนการสวิตช์ที่น้อยแล้วก็ตาม แต่เราสามารถพัฒนาวิธีการมอดูเลตเพื่อลดจำนวนครั้งการสวิตช์ให้เหลือเพียง 6 ครั้งได้ โดยอาศัยเมทริกซ์การมอดูเลต M_p และ M_Q ร่วมในการมอดูเลตและคำนวณค่าพารามิเตอร์ b และ d ที่เหมาะสม

- การมอดูเลตในรูปแบบต่างๆ ที่ได้นำเสนอจะทำงานที่ค่าดัชนีการมอดูเลตน้อยกว่า $0.866 (q \leq 0.866)$ ซึ่งอยู่ในย่านที่ไม่เกิดการมอดูเลตเกิน ดังนั้นจึงควรศึกษาแนวทางการมอดูเลตในย่านการมอดูเลตเกินด้วย เพื่อขยายย่านการทำงานให้กว้างขึ้น
- การควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าจะอาศัยการปรับค่าพารามิเตอร์อิสระ b และ d ที่เหมาะสมโดยจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟด้านออก จึงไม่สะดวกในการใช้งานจริงกับระบบที่ย่านการทำงานมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นถ้าต้องการควบคุมให้ตัวประกอบกำลังด้านเข้ามีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เราควรจะควบคุมแบบวงรอบปิด

รายการอ้างอิง

- [1] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham, and A. Weinstein. Matrix converters: A technology review. IEEE Trans. Ind. Electron. 49, 2 (Apr. 2002) : 276-288.
- [2] M. Venturini. A new sine wave in sine wave out, conversion technique which eliminates reactive elements. Proc. POWERCON 7. (1980) : E3_1-E3_15.
- [3] A. Alesina and M. G. B. Venturini. Analysis and design of optimum amplitude nine-switch direct ac-ac converters. IEEE Trans. Power Electron. 4, 1 (Jan. 1989) : 101-112.
- [4] G. Roy and G. E. April. Cycloconverter operation under a new scalar control algorithm. Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (1989) : 368-375.
- [5] H. Hojabri, H. Mokhtari, and L. Chang. A generalized technique of modeling, analysis, and control of a matrix converter using SVD. IEEE Trans. Ind. Electron. 58, 3 (Mar. 2011) : 949-959.
- [6] G. Clos. Straight forward control of the matrix converter. Proc. EPE Conf. (2005) : P.1-P.8.
- [7] P. Ziogas, S. Khan, and M. Rashid. Some improved forced commutated cycloconverter structures. IEEE Trans. Ind. Appl. 1A-21, 5 (Sep./Oct. 1985) : 1242-1253,.
- [8] A. Odaka, I. Sato, H. Ohguchi, Y. Tamai, H. Mine, and J.-I. Itoh. A PAM control method for matrix converter based on virtual AC/DC/AC conversion method. IEEE Trans. Ind. Appl. 126, 9 (2006) : 1185-1192.
- [9] A. G. H. Accioly, F. Bradaschia, M. C. Cavalcanti, F. A. S. Neves, and V. N. Lima. Generalized modulation strategy for matrix converters—Part I. Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (Jun. 2007) : 645-652.
- [10] F. Bradaschia, M. C. Cavalcanti, F. A. S. Neves, V. N. Lima, and A. G. H. Accioly. Generalized modulation strategy for matrix converters—Part II. Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (Jun. 2007) : 665-671.
- [11] F. Bradaschia, M. C. Cavalcanti, F. Neves, and H. de Souza. A modulation technique to reduce switching losses in matrix converters. IEEE Trans. Ind. Electron. 56, 4 (Apr. 2009) : 1186-1195.

- [12] L. Huber and D. Borojevic. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction. IEEE Trans. Ind. Appl. 31, 6 (Nov./Dec. 1995) : 1234–1246.
- [13] P. Nielsen, F. Blaabjerg, and J. K. Pedersen. Space vector modulated matrix converter with minimized number of switchings and a feed forward compensation of input voltage unbalance. Proc. PEDES. (1996) : 833–839.
- [14] H. J. Cha and P. N. Enjeti. An approach to reduce common-mode voltage in matrix converter. IEEE Trans. Ind. Appl. 39, 4 (Jul./Aug. 2003) : 1151–1159.
- [15] L. Helle, K. B. Larsen, A. H. Jorgensen, S. Munk-Nielsen, and F. Blaabjerg. Evaluation of modulation schemes for three-phase to three-phase matrix converters. IEEE Trans. Ind. Electron. 51, 1 (Feb. 2004) : 158–171.
- [16] Y. Tadano, S. Urushibata, M. Nomura, Y. Sato, and M. Ishida. Direct space vector PWM strategies for three-phase to three-phase matrix converter. Proc. PCC-Nagoya. (2007) : 1064–1071.
- [17] M. Braun. Ein dreiphasiger direktumrichter mit pulsbreitenmodulation zur getrennten steuerung der ausgangsspannung und der eingangsblindleistung. Ph.D. dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, Germany, 1983.
- [18] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, and L. Zarri. Matrix converter modulation strategies: A new general approach based on space-vector representation of the switch state. IEEE Trans. Ind. Electron. 49, 2 (Apr. 2002) : 370–381.
- [19] J. Igney and M. Braun. A new matrix converter modulation strategy maximizing the control range. Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (2004) : 2875–2880.
- [20] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, and L. Zarri. A novel modulation strategy for matrix converter with reduced switching frequency based on output current sensing. Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (2004) : 2373–2379.
- [21] J. Igney and M. Braun. Space vector modulation strategy for conventional and indirect matrix converters. Proc. EPE Conf. (2005) : P.1–P.10.
- [22] P. Kiatsookkanatorn and S. Sangwongwanich. A Unified PWM Strategy for Matrix Converters and Its Dipolar PWM Realization. Proc. IPEC. (Jun. 2010) : 3072–3079.
- [23] P. Kiatsookkanatorn and S. Sangwongwanich. A Unified PWM Method for Matrix Converters and Its Carrier-Based Realization Using Dipolar Modulation Technique. IEEE Trans. Ind. Electron. 59, 1 (Jan. 2012) : 80–92.

- [24] ไพบูลย์ เกียรติสุขคนธาธร, สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. วิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์โดยอาศัยการแปลงเชิงเรขาคณิต. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 1(2551) : 513-516.
- [25] ไพบูลย์ เกียรติสุขคนธาธร, สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. การมอดูเลตแบบขั้นคู่เพื่อลดจำนวนครั้งของการสวิตช์สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 1(2552) : 551-554.
- [26] ไพบูลย์ เกียรติสุขคนธาธร, สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. การจัดลำดับการสวิตช์ในการมอดูเลตแบบขั้นคู่สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 1(2553) : 537-540.
- [27] ไพบูลย์ เกียรติสุขคนธาธร, สุภาพร เซาวรัตน์, สิริธร ทีชกุล และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. ผลการทดสอบวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 1(2554) : 417-420.
- [28] นันททัต กลิ่นจำปา. การแปลงอิมพีแดนซ์โดยใช้เมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [29] B. Velaerts, P. Mathys, E. Tatakis, and G. Bingen. A novel approach to the generation and optimization of three-level PWM waveforms for three-level inverters. Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. (1988) : 1255–1262.

ภาคผนวก

การพิสูจน์คำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลต

เมทริกซ์การมอดูเลต \mathbf{M} ที่แสดงอยู่ในสมการที่ (2.1) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้เป็น

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}' + \mathbf{M}_0 = [m'_{ij}] + \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ X & Y & Z \\ X & Y & Z \end{bmatrix}$$

เมื่อ

$$X = \frac{1}{3} \sum_i m_{i1}, \quad Y = \frac{1}{3} \sum_i m_{i2}, \quad Z = \frac{1}{3} \sum_i m_{i3}$$

$$\sum_i m'_{ij} = \sum_j m'_{ij} = 0, \quad 0 \leq X, Y, Z \leq 1, \quad X + Y + Z = 1$$

การหาเมทริกซ์การมอดูเลตโดยอาศัยแนวคิดการแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformations) จะเริ่มจากการแปลงแรงดันให้อยู่ในรูปของสเปซเวกเตอร์และเมทริกซ์ขนาด 2x2 โดยใช้เมทริกซ์การแปลงตามสมการด้านล่าง

$$\mathbf{S}_V = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นสมการที่ (2.1) จะได้ตามสมการที่ (ก.1)

$$\begin{aligned} \underbrace{\mathbf{S}_V \mathbf{v}_o}_{\mathbf{v}_o^*} &= \mathbf{S}_V \mathbf{M} \mathbf{v}_i = \mathbf{S}_V [\mathbf{M}' + \mathbf{M}_0] \mathbf{v}_i = \mathbf{S}_V \mathbf{M}' \mathbf{v}_i \\ &= \underbrace{\mathbf{S}_V \mathbf{M}' \mathbf{S}_V^T}_{\mathbf{M}_{2 \times 2}} \underbrace{\mathbf{S}_V \mathbf{v}_i}_{\mathbf{v}_i} \end{aligned}$$

$$\mathbf{v}_o^* = \mathbf{M}_{2 \times 2} \mathbf{v}_i \quad (\text{ก.1})$$

ในที่นี้เราใช้สัญลักษณ์ \mathbf{v}_i เหมือนกันทั้งกรณีเวกเตอร์แรงดัน $\mathbf{v}_i = [R \ S \ T]^T$ และสเปซเวกเตอร์แรงดัน $\mathbf{v}_i = [v_x \ v_y]^T$ ในทางตรงกันข้ามหากู้ $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ เราสามารถคำนวณหา \mathbf{M} ได้จาก

$$\mathbf{M} = \mathbf{S}_V \mathbf{M}_{2 \times 2} \mathbf{S}_V^T + \mathbf{M}_0$$

ดังนั้นแทนที่เราจะหาคำตอบของแรงดันด้านออกที่เป็นปริมาณเฟสตามสมการที่ (2.1) เราจะหาคำตอบของเมทริกซ์การมอดูเลต $\mathbf{M}_{2 \times 2}$ ที่เป็นปริมาณสเปซเวกเตอร์ตามสมการที่ (ก.1) แทน

โดยกำหนดให้ $\mathbf{v}_o^* = \|\mathbf{v}_o^*\| e^{J\theta_o} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{v}_i = \|\mathbf{v}_i\| e^{J\theta_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ สมการที่ (ก.1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\|\mathbf{v}_o^*\| e^{J\theta_o} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{2 \times 2} \|\mathbf{v}_i\| e^{J\theta_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} &= \frac{\|\mathbf{v}_i\|}{\|\mathbf{v}_o^*\|} e^{-J\theta_o} \mathbf{M}_{2 \times 2} e^{J\theta_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \underbrace{\frac{1}{q} e^{-J\theta_o} \mathbf{M}_{2 \times 2} e^{J\theta_i}}_{\hat{\mathbf{M}}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ในที่นี้จะกำหนดให้ $\hat{\mathbf{M}} = \frac{1}{q} e^{-J\theta_o} \mathbf{M}_{2 \times 2} e^{J\theta_i}$ ดังนั้นจะได้

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{M}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ก.2})$$

เนื่องจาก $\mathbf{I}, \mathbf{J}, \mathbf{K}, \mathbf{L}$ คือฐานของเมทริกซ์ขนาด 2×2

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเราสามารถเขียน $\hat{\mathbf{M}}$ ได้เป็น

$$\hat{\mathbf{M}} = a_1 \mathbf{I} + a_2 \mathbf{J} + a_3 \mathbf{K} + a_4 \mathbf{L}$$

เพื่อให้สมการที่ (ก.2) เป็นจริง เราจะกำหนดให้ $a_1 + a_3 = 1$ และ $a_2 + a_4 = 0$ และทำที่สุดท้ายจะได้คำตอบทั่วไปคือ

$$\hat{\mathbf{M}} = \frac{1}{2} (\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \frac{b}{2} (\mathbf{L} - \mathbf{J}) + \frac{d}{2} (\mathbf{I} - \mathbf{K}) \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ

$$b/2 = a_4 = -a_2, \quad d = a_1 - a_3$$

จากสมการที่ (ก.3) เราสามารถเขียนสมการของคำตอบทั่วไปของเมทริกซ์การแปลงได้เป็น

$$\mathbf{M}_{2 \times 2} = q e^{\mathbf{J}\theta_0} \left\{ \frac{1}{2}(\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \frac{b}{2}(\mathbf{L} - \mathbf{J}) + \frac{d}{2}(\mathbf{I} - \mathbf{K}) \right\} e^{-\mathbf{J}\theta_1} \quad (\text{ก.4})$$

สมการที่ (ก.4) แสดงให้เห็นว่าเราสามารถพิสูจน์สมการที่ (2.13) ได้ สังเกตว่า

$$\frac{1}{2}(\mathbf{I} + \mathbf{K}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{2}(\mathbf{L} - \mathbf{J}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{2}(\mathbf{I} - \mathbf{K}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นสมการที่ (ก.4) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{2 \times 2} &= q e^{\mathbf{J}\theta_0} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} e^{-\mathbf{J}\theta_1} \\ &= q e^{\mathbf{J}\theta_0} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left(\mathbf{J} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^T + d \mathbf{J} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left(\mathbf{J} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^T \right\} \left(e^{\mathbf{J}\theta_1} \right)^T \\ &= q \left\{ e^{\mathbf{J}\theta_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^T \left(e^{\mathbf{J}\theta_1} \right)^T + b e^{\mathbf{J}\theta_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left(\mathbf{J} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^T \left(e^{\mathbf{J}\theta_1} \right)^T + d \mathbf{J} e^{\mathbf{J}\theta_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left(\mathbf{J} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^T \left(e^{\mathbf{J}\theta_1} \right)^T \right\} \\ &= q \left\{ \left(e^{\mathbf{J}\theta_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \left(e^{\mathbf{J}\theta_1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^T + b \left(e^{\mathbf{J}\theta_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \left(\mathbf{J} e^{\mathbf{J}\theta_1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^T + d \left(\mathbf{J} e^{\mathbf{J}\theta_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \left(\mathbf{J} e^{\mathbf{J}\theta_1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^T \right\} \end{aligned}$$

และจากข้อกำหนดในเบื้องต้น $\frac{\mathbf{v}_o^*}{\|\mathbf{v}_o^*\|} = e^{\mathbf{J}\theta_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\frac{\mathbf{v}_i}{\|\mathbf{v}_i\|} = e^{\mathbf{J}\theta_1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{2 \times 2} &= q \left\{ \frac{\mathbf{v}_o^* \mathbf{v}_i^T}{\|\mathbf{v}_o^*\| \|\mathbf{v}_i\|} + b \frac{\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_o^*\| \|\mathbf{v}_i\|} + d \frac{\mathbf{J}\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_o^*\| \|\mathbf{v}_i\|} \right\} \\ &= \frac{\|\mathbf{v}_o^*\|}{\|\mathbf{v}_i\|} \left\{ \frac{\mathbf{v}_o^* \mathbf{v}_i^T}{\|\mathbf{v}_o^*\| \|\mathbf{v}_i\|} + b \frac{\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_o^*\| \|\mathbf{v}_i\|} + d \frac{\mathbf{J}\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_o^*\| \|\mathbf{v}_i\|} \right\} \\ \mathbf{M}_{2 \times 2} &= \frac{\mathbf{v}_o^* \mathbf{v}_i^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} + b \frac{\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} + d \frac{\mathbf{J}\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \quad (\text{ก.5}) \end{aligned}$$

สมการที่ (ก.5) สามารถแปลงกลับไปอยู่ในรูปปริมาตรเฟสได้ตามสมการด้านล่าง

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} &= \mathbf{S}_V \mathbf{M}_{2 \times 2} \mathbf{S}_V^T + \mathbf{M}_0 \\
 &= \mathbf{S}_V \left[\frac{\mathbf{v}_o^* \mathbf{v}_i^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} + b \frac{\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} + d \frac{\mathbf{J}\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right] \mathbf{S}_V^T + \mathbf{M}_0 \\
 &= \left[\frac{\mathbf{S}_V \mathbf{v}_o^* \mathbf{v}_i^T \mathbf{S}_V^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} + b \frac{\mathbf{S}_V \mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T \mathbf{S}_V^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} + d \frac{\mathbf{S}_V \mathbf{J}\mathbf{v}_o^* (\mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T \mathbf{S}_V^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right] + \mathbf{M}_0 \\
 &= \left[\frac{(\mathbf{S}_V \mathbf{v}_o^*) (\mathbf{S}_V \mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} + b \frac{(\mathbf{S}_V \mathbf{v}_o^*) (\mathbf{S}_V \mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} + d \frac{(\mathbf{S}_V \mathbf{J}\mathbf{v}_o^*) (\mathbf{S}_V \mathbf{J}\mathbf{v}_i)^T}{\|\mathbf{v}_i\|^2} \right] + \mathbf{M}_0
 \end{aligned}$$

ดังนั้นสมการที่ (2.14) จึงสามารถพิสูจน์ได้ตามสมการด้านบน และจากความสัมพันธ์

$$\mathbf{S}_V \mathbf{v}_o^* = \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix}, \mathbf{S}_V \mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix}, \mathbf{S}_V \mathbf{J}\mathbf{v}_o^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} w^* - v^* \\ u^* - w^* \\ v^* - u^* \end{bmatrix}, \mathbf{S}_V \mathbf{J}\mathbf{v}_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} T - S \\ R - T \\ S - R \end{bmatrix}, \|\mathbf{v}_i\|^2 = R^2 + S^2 + T^2$$

สุดท้ายเราจึงได้รูปแบบทั่วไปของเมทริกซ์การมอดูเลตขนาด 3×3

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_U + \mathbf{M}_P + \mathbf{M}_Q + \mathbf{M}_0$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_U &= \frac{1}{(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & S & T \end{bmatrix} \\
 \mathbf{M}_P &= \frac{b}{\sqrt{3}(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T - S & R - T & S - R \end{bmatrix} \\
 \mathbf{M}_Q &= \frac{d}{3(R^2 + S^2 + T^2)} \begin{bmatrix} w^* - v^* \\ u^* - w^* \\ v^* - u^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T - S & R - T & S - R \end{bmatrix} \\
 \mathbf{M}_0 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}; \quad \begin{cases} 0 \leq X, Y, Z \leq 1 \\ X + Y + Z = 1 \end{cases}
 \end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไพบูลย์ เกียรติสุขคนาทร เกิดเมื่อวันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ. 2517 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาครุศาสตร์และวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปีการศึกษา 2541 และ 2545 ตามลำดับ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

บทความวิจัย

- 1) ไพบูลย์ เกียรติสุขคนาทร, สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. วิธีการมอดูเลตแบบใหม่สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์โดยอาศัยการแปลงเชิงเรขาคณิต. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 1(2551) : 513-516.
- 2) ไพบูลย์ เกียรติสุขคนาทร, สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. การมอดูเลตแบบชั่วคราวเพื่อลดจำนวนครั้งของการสวิตช์สำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 1(2552) : 551-554.
- 3) P. Kiatsookkanatorn and S. Sangwongwanich. A Unified PWM Strategy for Matrix Converters and Its Dipolar PWM Realization. Proc. IPEC. (Jun. 2010) : 3072–3079.
- 4) ไพบูลย์ เกียรติสุขคนาทร, สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. การจัดลำดับการสวิตช์ในการมอดูเลตแบบชั่วคราวสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 1(2553) : 537-540.
- 5) ไพบูลย์ เกียรติสุขคนาทร, สุภาพร เขาวรัตน์, สิริธร ทีชกุล และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์. ผลการทดสอบวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เชิงเอกภาพสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 1(2554) : 417-420.
- 6) P. Kiatsookkanatorn and S. Sangwongwanich. A Unified PWM Method for Matrix Converters and Its Carrier-Based Realization Using Dipolar Modulation Technique. IEEE Trans. Ind. Electron. 59, 1 (Jan. 2012) : 80-92.