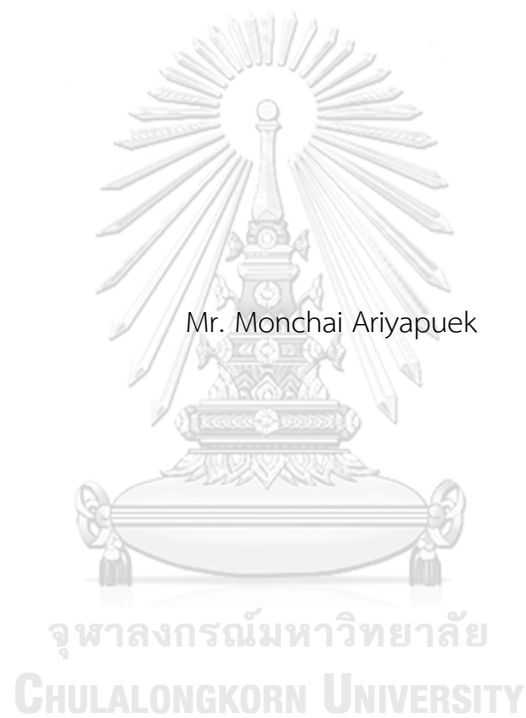


วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาห้ของอินเวอร์เตอร์สามระดับเพื่อแยกการติดตามจุด  
กำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์สองสตรีง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2561  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Carrier-Based PWM Method of Three-Level Inverters for Separate MPPTs of Two  
Photovoltaic Strings



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาห์ของ อินเวอร์เตอร์สามระดับเพื่อแยกการติดตามจุดกำลังสูงสุด ของเซลล์แสงอาทิตย์สองสตรีง
โดย	นายมนต์ชัย อริยพฤกษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์)

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

มนต์ชัย อริยพุกษ์ : วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาร์ชของอินเวอร์เตอร์  
 สามารถปรับเพื่อแยกการติดตามจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์สองสตริง . ( A  
 Carrier-Based PWM Method of Three-Level Inverters for Separate MPPTs of  
 Two Photovoltaic Strings ) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.สมบุญ แสงวงศ์วานิชย์

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการใหม่ในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สาม  
 ระดับเพื่อแยกการติดตามกำลังสูงสุดในแต่ละสตริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับบัสบน  
 และบัสล่างของส่วนไฟตรง วิธีการควบคุมที่นำเสนอประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ 1) วิธีการมอดู  
 เลตบนฐานคลื่นพาร์ชซึ่งสามารถแยกควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากบัสบนและบัสล่างได้อย่างอิสระ  
 2) วงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นและ 3) อัลกอริทึมติดตามกำลังสูงสุดบน  
 ฐานความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื้อหาใน  
 วิทยานิพนธ์ยังแสดงถึงแนวทางการคำนวณหรือออกแบบในแต่ละส่วนอย่างชัดเจนเพื่อให้ง่ายต่อ  
 การนำไปใช้จริง ผลการทดสอบด้วยการจำลองโดยคอมพิวเตอร์และการทดลองจริงกับ  
 อินเวอร์เตอร์สามระดับแบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอสามารถ  
 ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในแต่ละบัสได้อย่างอิสระต่อกัน ทำให้สตริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส  
 บนและบัสล่างสามารถทำงานที่จุดกำลังสูงสุดที่ต่างกันได้โดยไม่มีผลกระทบระหว่างกันทั้งใน  
 สภาวะอยู่ตัวและสภาวะชั่วคราว วิธีการที่นำเสนอจึงช่วยให้ระบบสามารถแยกติดตามการ  
 เปลี่ยนแปลงของจุดกำลังสูงสุดของแต่ละสตริงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ภาวะการ  
 เปลี่ยนแปลงของแสงอาทิตย์หรือการเกิดเงาบังแผงได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กำลังไฟฟ้ารวมที่ผลิต  
 ได้จากอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าสูงขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5870384621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Separate Maximum power point tracking asymmetric control of dc-link voltages three-level inverters two PV strings

Monchai Ariyapuek : A Carrier-Based PWM Method of Three-Level Inverters for Separate MPPTs of Two Photovoltaic Strings . Advisor: Asst. Prof. Somboon Sangwongwanich, Ph.D.

This thesis presents a novel control method of dc-link voltages in a three-level inverter for separate maximum-power-point-tracking (MPPT) of each photovoltaic (PV) string connected to the upper and lower dc buses of the inverter. The proposed method is composed of three main parts: 1) the carrier-based PWM method which independently controls the powers drawn from the upper and lower dc buses, 2) the linear control loop of the dc-bus voltages, and 3) the MPPT algorithm based on the  $P-V^2$  curve of the PV string. Calculation steps and design procedures of each part are also clearly given for simple implementation of the proposed control method. Simulation and experimental results carried out on a three-level grid-connected inverter confirm that the proposed method can control the dc-link voltages of each dc bus independently, and each upper and lower PV string can operate at its own maximum power point without any interference between them both in the steady and transient states. The proposed method thus allows rapid tracking of the changing maximum power point of each string under variation of solar irradiance or shading condition. As a result, the total power production of the inverter fed to the grid is increased.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากการช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่อย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ผู้ที่หมอบความรู้ต่างๆ หลักคิดในการทำงาน การแก้ไขปัญหา ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยและเป็นแบบอย่างที่ดีให้กับข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ไว้ ณ ที่นี้ด้วย ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ.ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน ผู้เป็นอาจารย์และประธานสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำต่างๆในการทำงานวิจัย และอำนวยความสะดวกในด้านระบบอินเทอร์เน็ตที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการรวมทั้งข้อมูลและอุปกรณ์ต้นแบบชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์และเป็นแบบอย่างในการทำงานที่ดีเป็นระเบียบเรียบร้อยให้ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ.ดร.สลิทธิพิศ สินธุสนธิชาติ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้าสมัยเรียนปริญญาตรีที่ได้แนะนำให้ข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและเป็นแบบอย่างในการทำงานที่ดีและกำลังใจให้กับข้าพเจ้าเสมอมา ขอขอบคุณ นาย ศุภษร หมั่นพล (โตม) สำหรับการช่วยเหลือแนะนำในด้านการเขียนโปรแกรม การใช้งานอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการต่างๆ ขอขอบคุณ นาย กิตติศักดิ์ อุดมโชค (พี่ปลาหู) สำหรับความช่วยเหลือข้อมูลต่างๆตลอดจนคำแนะนำในการใช้งานระบบอินเทอร์เน็ตที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณ สำหรับคำแนะนำและกำลังใจจากรุ่นพี่รุ่นน้องทุกคนในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าตลอดมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

มนต์ชัย อริยพุกษ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
นิยามสัญลักษณ์.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความรู้พื้นฐานเบื้องต้น.....	1
1.1.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลาง.....	1
1.1.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบหลายสตรึง.....	2
1.2 ปัญหาในระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบศูนย์กลาง.....	3
1.3 แนวทางการแก้ไขปัญหา.....	6
1.4 วิธีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเพื่อแยกจุดกำลังสูงสุดของแต่ละสตรึงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในระบบอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบศูนย์กลาง.....	9
1.5 สรุปปัญหาและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา.....	15
1.6 เป้าหมายของงานวิจัย.....	16
1.7 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	17
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาทช์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับเพื่อแยกควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้า ในแต่ละบัสไฟตรง.....	18
2.1 วิธีการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สามระดับ.....	18

2.2 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่บัสไฟตรงต่อการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สาม ระดับ.....	22
2.3 การแบ่งสัดส่วนการสร้างแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าในแต่ละ บัสไฟตรง.....	25
2.4 ขั้นตอนวิธีการมอดูเลตเพื่อแยกควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรง.....	27
บทที่ 3 การออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นและทำงานได้อย่างอิสระต่อ กัน.....	29
3.1 แบบจำลองพลวัตของวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง.....	29
3.2 การออกแบบค่าอัตราขยายวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่มีความเป็นเชิงเส้น.....	33
3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบค่าอัตราขยายตัวควบคุม.....	34
3.3 คุณลักษณะวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงและการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	35
บทที่ 4 การติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์.....	37
4.1 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	37
4.2 การติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง.....	39
4.3 การติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองด้วยวิธีรบกวนและ สังเกต (P&O based on $P-V^2$ ).....	44
บทที่ 5 การทดสอบระบบที่น่าเสนอ.....	45
5.1 แหล่งจ่ายไฟตรงที่มีคุณลักษณะแรงดันและกระแสเทียบเคียงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับใช้ ทดสอบ.....	45
5.2 การทดสอบการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์เพื่อแยกควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ ละบัสไฟตรง.....	50
5.2.1 การทดสอบการมอดูเลตเพื่อแบ่งสัดส่วนควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรงกรณี ควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าบัสบนและบัสล่างเท่ากัน.....	51
5.2.2 การทดสอบการมอดูเลตเพื่อแบ่งสัดส่วนควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรงกรณี ควบคุมให้กำลังไฟฟ้าบัสบนจ่ายมากกว่าบัสล่าง.....	54



5.2.3 การทดสอบการมอดูเลตเพื่อแบ่งสัดส่วนควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรงกรณีควบคุมให้กำลังไฟฟ้าบัสล่างจ่ายมากกว่าบัสบน .....	57
5.3 การทดสอบวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรง .....	60
5.3.1 การทดสอบวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมแรงดันบัสบนและล่างเท่ากัน	61
5.3.2 การทดสอบวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแรงดันคำสั่งเฉพาะบัสบน .....	65
5.3.3 การทดสอบวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแรงดันคำสั่งเฉพาะบัสล่าง .....	69
5.4 การทดสอบการติดตามจุดทำงานกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง ..	73
5.4.1 การจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีสตริงบัสบนและล่างได้รับปริมาณความเข้มแสงเท่ากัน .....	74
5.4.2 การจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีจำนวนแผงเซลล์ในแต่ละสตริงไม่เท่ากัน.....	78
5.4.3 การจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีสตริงบัสบนได้รับปริมาณความเข้มแสงลดลง.....	81
5.4.4 การจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีสตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงเพิ่มขึ้น.....	84
5.4.5 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีสตริงบัสบนและล่างได้รับปริมาณความเข้มแสงเท่ากัน.....	87
5.4.6 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีจำนวนแผงเซลล์ในแต่ละสตริงไม่เท่ากัน.....	91
5.4.7 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีสตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงลดลง .....	94
5.4.8 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีสตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงเพิ่มขึ้น.....	97
5.4.9 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีสตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงลดลงอย่างทันทีทันใด .....	100

5.4.10 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง  
 กรณีสตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด ..... 103

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ ..... 106

    6.1 บทสรุปงานวิจัย ..... 106

    6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัยในลำดับถัดไป..... 107

บรรณานุกรม..... 108

ประวัติผู้เขียน..... 110



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการติดตามจุดกำลังสูงสุดระหว่างความสัมพันธ์ของ P-V และ $P-V^2$ ..	43
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.1-5.2.3 .....	50
ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ทดสอบตามหัวข้อที่ 5.3.1-5.3.3 .....	60
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในทุกเงื่อนไขการจำลอง .....	73
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในทุกเงื่อนไขการทดลอง.....	73



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 อินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบศูนย์กลาง [2] .....	2
รูปที่ 1.2 อินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายสตริง [2] .....	3
รูปที่ 1.3 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงกรณิที่ได้รับแสงปกติ (a) สตริงและคุณลักษณะกระแสต่อแรงดันรวมทั้งสตริง,(b) คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันในแต่ละแผงเซลล์และคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันของทั้งสตริง.....	4
รูปที่ 1.4 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงกรณิถูกบังเงาบางส่วน (a) สตริงและคุณลักษณะกระแสต่อแรงดันรวมทั้งสตริง,(b) คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันในแต่ละแผงเซลล์และคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันของทั้งสตริง.....	5
รูปที่ 1.5 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กรณิแผงเซลล์ถูกบังเงาบางส่วนในระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบศูนย์กลาง (a) กำลังไฟฟ้าที่จุด local mpp (b) กำลังไฟฟ้าที่จุด global mpp.....	6
รูปที่ 1.6 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงกรณิพิจารณาแยกจุดกำลังสูงสุดภายใต้การถูกบังเงาบางส่วน (a) สตริงที่ถูกบังและไม่ถูกบังเงา, (b) คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริง.....	7
รูปที่ 1.7 อินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบศูนย์กลาง (a) แบบสองระดับ (b) แบบสามระดับ .....	8
รูปที่ 1.8 อินเวอร์เตอร์สามระดับแบบศูนย์กลางที่มีการเชื่อมต่อจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงกับจุดกึ่งกลางสตริง .....	9
รูปที่ 1.9 วงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับด้วยวิธี DPC [3] .....	10
รูปที่ 1.10 วงจรสมมูลสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับตามงานวิจัย [4] (a) วงจรที่ใช้ในการควบคุมผลรวมแรงดันบัส (b) วงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการควบคุมผลต่างแรงดันบัส.....	11
รูปที่ 1.11 ไดอะแกรมวงรอบควบคุมแรงดันผลต่างบัสไฟตรงป้อนกลับวงปิดในงานวิจัย [4] .....	12
รูปที่ 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไนทรัลและแรงดันลำดับศูนย์ [4].....	12
รูปที่ 1.13 วงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนพื้นฐานการมอดูเลตคลื่นพาร์ตามงานวิจัย [4].....	13
รูปที่ 1.14 วงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนพื้นฐานการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ตามงานวิจัย [5]..	14

รูปที่ 1.15 ตัวอย่างลักษณะการทำงานวงรอบควบคุมช่วงสภาวะชั่วคราวในงานวิจัย [3].....	15
รูปที่ 1.16 แนวคิดการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่งานวิจัยนี้นำเสนอ.....	16
รูปที่ 1.17 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงอินเวอร์เตอร์สามระดับที่นำเสนอในงานวิจัยนี้..	17
รูปที่ 2.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับในมุมมองเชิงหลักการสวิตซ์ในอุดมคติ.....	18
รูปที่ 2.2 กลไกการสร้างแรงดันเฉลี่ยด้านบวกของอินเวอร์เตอร์สามระดับบนฐานคลื่นพาห์ (a) ลักษณะการสวิตซ์ (b) การมอดูเลตสร้างแรงดันเฉลี่ยด้านบวก .....	20
รูปที่ 2.3 กลไกการสร้างแรงดันเฉลี่ยด้านลบของอินเวอร์เตอร์สามระดับบนฐานคลื่นพาห์ (a) ลักษณะการสวิตซ์ (b) การมอดูเลตสร้างแรงดันเฉลี่ยด้านลบ .....	20
รูปที่ 2.4 กลไกการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ .....	21
รูปที่ 2.5 การสร้างแรงดันอ้างอิงสำหรับการมอดูเลตในงานวิจัยนี้ .....	27
รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลตเพื่อแยกควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัลไฟตรง.....	28
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่บัลไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับ .....	29
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมฟังก์ชันโอนย้ายของกำลังบัลไฟตรงต่อแรงดันยกกำลังสอง (a) ฟังก์ชันโอนย้ายบัลบน (b) ฟังก์ชันโอนย้ายบัลล่าง .....	31
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้านบนและบัลไฟตรงด้านล่าง.....	31
รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมวงรอบควบคุมกระแสบนพื้นฐานกรอบอ้างอิงซิงโครนัส .....	32
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงร่วมกับส่วนการมอดูเลต .....	32
รูปที่ 3.6 วงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงวงปิดที่ใช้สำหรับออกแบบค่าอัตราขยาย (a) วงรอบควบคุมฟังก์ชันโอนย้ายวงปิดบัลบน (b) วงรอบควบคุมฟังก์ชันโอนย้ายบัลล่าง .....	33
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งขั้ว (pole) และศูนย์ (zero) วงปิดของระบบควบคุมบัลไฟตรงตามทีออกแบบ ...	35
รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางความถี่เปิดของวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงตามทีออกแบบ .....	36
รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองทางความถี่ปิดของวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงตามทีออกแบบ.....	36
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง (a) บล็อกไดอะแกรมการติดตามจุดกำลังสูงสุดบัลบน (b) บล็อกไดอะแกรมการติดตามจุดกำลังสูงสุดบัลล่าง.....	37

รูปที่ 4.2	คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	38
รูปที่ 4.3	คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	39
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขในการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O .....	40
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขในการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี INC .....	41
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าเชิงพลวัตต่อแรงดันแผงเซลล์ .....	42
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขในการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนฐานตัวแปรแรงดันยกกำลังสอง .	43
รูปที่ 4.8	อัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตบนพื้นฐาน $P-V^2$ curve .....	44
รูปที่ 4.9	ไดอะแกรมระบบการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง .	44
รูปที่ 5.1	คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน .....	45
รูปที่ 5.2	คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	46
รูปที่ 5.3	วงจรเทียบเคียงแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับแต่ละบัสไฟตรง .....	46
รูปที่ 5.4	ระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์สามระดับที่ใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับงานวิจัย นี้ [7] .....	48
รูปที่ 5.5	ไดอะแกรมระบบควบคุมทั้งหมดของอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์สามระดับที่ใช้ในการ จำลองและทดลองในงานวิจัยนี้ .....	49
รูปที่ 5.6	ไดอะแกรมระบบควบคุมสำหรับการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.1-5.2.3 .....	50
รูปที่ 5.7	ผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.1 กรณีแบ่ง $U_p^* = U_n^*$ .....	52
รูปที่ 5.8	ผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.2 กรณีแบ่ง $U_p^* = 0.6U^*$ , $U_n^* = 0.4U^*$ .....	55
รูปที่ 5.9	ผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.3 กรณีแบ่ง $U_p^* = 0.4U^*$ , $U_n^* = 0.6U^*$ .....	58
รูปที่ 5.10	ไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้านบนและล่างสำหรับทดสอบในหัวข้อที่ 5.3.1- 5.3.3 .....	60
รูปที่ 5.11	ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไข 5.3.1 .....	62
รูปที่ 5.12	ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไข 5.3.2 .....	66
รูปที่ 5.13	ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไข 5.3.3 .....	70

รูปที่ 5.14 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.1	74
รูปที่ 5.15 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.1	74
รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.1	75
รูปที่ 5.17 ภาพขยายช่วงสภาวะชั่วครู่ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.1	76
รูปที่ 5.18 ภาพขยายช่วงสภาวะอยู่ตัวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.1	76
รูปที่ 5.19 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองสตรึงบัสบนและล่างในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.1	77
รูปที่ 5.20 สตรึงบัสบนและบัสล่างในการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.2	78
รูปที่ 5.21 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.2	78
รูปที่ 5.22 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.2	79
รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.2	80
รูปที่ 5.24 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองสตรึงบัสบนและล่างในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.2	80
รูปที่ 5.25 สตรึงบัสบนและบัสล่างในการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.3	81
รูปที่ 5.26 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.3	81
รูปที่ 5.27 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.3	82
รูปที่ 5.28 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.3	83

รูปที่ 5.29 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองสตรึงบัสบนและล่างในผลการจำลองตาม เงื่อนไขที่ 5.4.3 .....	83
รูปที่ 5.30 สตรึงบัสบนและบัสล่างในการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.4.....	84
รูปที่ 5.31 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.4 .....	84
รูปที่ 5.32 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการ จำลองเงื่อนไขที่ 5.4.4.....	85
รูปที่ 5.33 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.4	86
รูปที่ 5.34 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองสตรึงบัสบนและล่างในผลการจำลองตาม เงื่อนไขที่ 5.4.4 .....	86
รูปที่ 5.35 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.5 .....	87
รูปที่ 5.36 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.5 .....	87
รูปที่ 5.37 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.5	88
รูปที่ 5.38 ภาพขยายช่วงสภาวะชั่วคราวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.5.....	89
รูปที่ 5.39 ภาพขยายช่วงสภาวะอยู่ตัวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.5.....	89
รูปที่ 5.40 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.5 .....	90
รูปที่ 5.41 สตรึงบัสบนและบัสล่างในเงื่อนไขการทดลองที่ 5.4.6 .....	91
รูปที่ 5.42 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.6 .....	91
รูปที่ 5.43 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.6 .....	92



รูปที่ 5.44 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.6	93
รูปที่ 5.45 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.6 .....	93
รูปที่ 5.46 สตริงบัสบนและบัสล่างในเงื่อนไขทดลองที่ 5.4.7.....	94
รูปที่ 5.47 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.7 .....	94
รูปที่ 5.48 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.7 .....	95
รูปที่ 5.49 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.7	96
รูปที่ 5.50 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.7 .....	96
รูปที่ 5.51 สตริงบัสบนและบัสล่างในเงื่อนไขการทดลองที่ 5.4.8 .....	97
รูปที่ 5.52 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.8 .....	97
รูปที่ 5.53 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.8 .....	98
รูปที่ 5.54 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.8	99
รูปที่ 5.55 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.8 .....	99
รูปที่ 5.56 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.9 .....	100
รูปที่ 5.57 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.9 .....	100
รูปที่ 5.58 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.9 .....	101

รูปที่ 5.59 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.9 .....	102
รูปที่ 5.60 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตรึงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.10.....	103
รูปที่ 5.61 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.10 .....	103
รูปที่ 5.62 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.10 .....	104
รูปที่ 5.63 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลอง เงื่อนไขที่ 5.4.10 .....	105



### นิยามสัญลักษณ์

$V_{dcH}$	:	แรงดันบัสไฟตรงด้านบน (upper dc-bus voltage)
$V_{dcL}$	:	แรงดันบัสไฟตรงด้านล่าง (lower dc-bus voltage)
$P_{pvH}$	:	กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัสบน
$P_{pvL}$	:	กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัสล่าง
$P_{invH}$	:	กำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกจากบัสไฟตรงด้านบน
$P_{invL}$	:	กำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกจากบัสไฟตรงด้านล่าง
$P_{inv}$	:	กำลังไฟฟารวมที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกจากบัสไฟตรง
$P_{out}$	:	กำลังไฟฟ้าต้านออกของอินเวอร์เตอร์
$v_o$	:	สเปซเวกเตอร์แรงดันต้านออกของอินเวอร์เตอร์
$i_o$	:	สเปซเวกเตอร์กระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์
$I_H$	:	กระแสเฉลี่ยในหนึ่งคาบการสวิตช์ที่ไหลออกจากบัสบน
$I_L$	:	กระแสเฉลี่ยในหนึ่งคาบการสวิตช์ที่ไหลออกจากบัสล่าง
$i_d$	:	กระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน d
$i_q$	:	กระแสต้านออกของอินเวอร์เตอร์ในแนวแกน q
$v_{gd}$	:	แรงดันโครงข่ายไฟฟ้าในแนวแกน d
$v_{gq}$	:	แรงดันโครงข่ายไฟฟ้าในแนวแกน q
*	:	ค่าคำสั่ง

## บทที่ 1

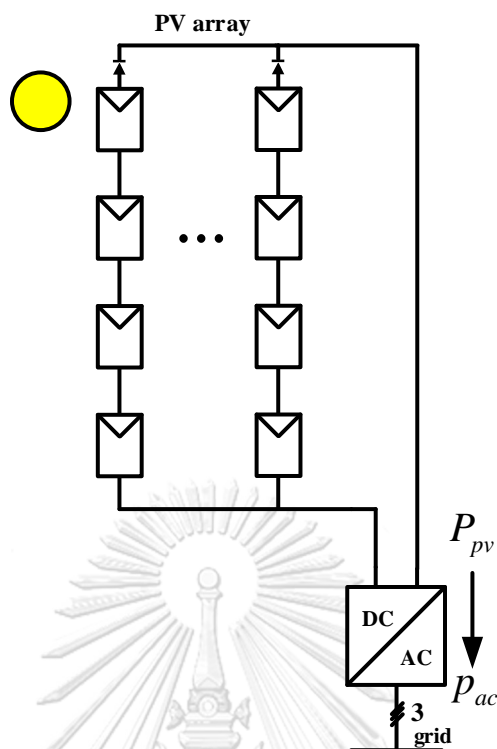
### บทนำ

#### 1.1 ความรู้พื้นฐานเบื้องต้น

ปัจจุบันพลังงานหมุนเวียนถูกนำมาใช้ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการใช้พลังงานจำพวกเชื้อเพลิงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พลังงานหมุนเวียนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิง ด้วยเหตุผลที่พลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานสะอาดและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หนึ่งในรูปแบบพลังงานหมุนเวียนดังกล่าวที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายคือพลังงานแสงอาทิตย์ [1] เป็นที่ทราบกันดีว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง เพราะฉะนั้นการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่เป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่แปลงปริมาณไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นปริมาณไฟฟ้ากระแสสลับเสียก่อน เราเรียกอุปกรณ์นั้นว่าอินเวอร์เตอร์ โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้ากำลังที่มีพิกัดกำลังการผลิตขนาดใหญ่ไปจนถึงระดับปานกลางสามารถแบ่งได้สองลักษณะคือ อินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลาง (central inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบหลายสตริง (multi-string inverter) ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดดังหัวข้อต่อไป

##### 1.1.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลาง

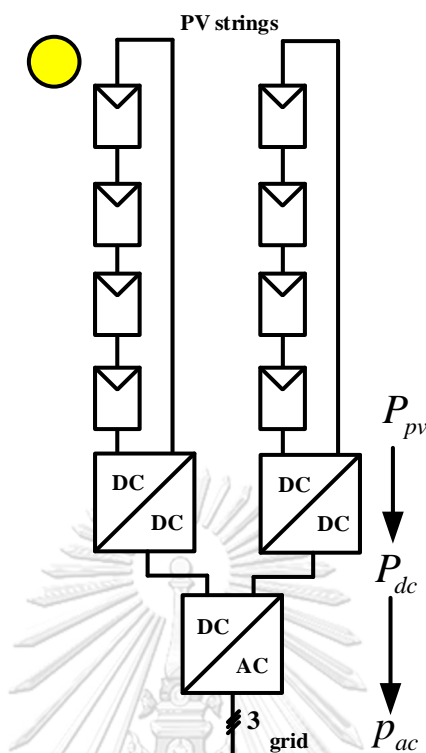
โครงสร้างระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 1.1 เรียกว่าอินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลาง โดยทั่วไปจะมีพิกัดกำลังอยู่ที่ 6kW-1000kW โครงสร้างแบบนี้ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมเรียกว่าสตริงเพื่อเพิ่มขนาดแรงดันเปิดวงจร (open circuit voltage ( $V_{oc}$ )) และแต่ละสตริงจะนำมาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มขนาดกระแสลัดวงจร (short circuit current ( $I_{sc}$ )) ของสตริง ซึ่งแต่ละสตริงที่ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันทั้งหมดนี้ก็เพื่อต้องการเพิ่มขนาดกำลังการผลิตให้สูงขึ้น ลักษณะการต่อดังกล่าวถูกเรียกว่าอาร์เรย์ และถูกเชื่อมต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว เมื่อพิจารณาในด้านการแปลงผันกำลังไฟฟ้า ระบบอินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลางจะมีขั้นตอนการแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพียงขั้นเดียว (single power processing stage) กล่าวคือ อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าแปลงกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์ ( $P_{pv}$ ) เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ( $P_{ac}$ ) จ่ายเข้าโครงข่ายและตัวอินเวอร์เตอร์เองยังทำหน้าที่ติดตามจุดกำลังสูงสุด (maximum power point tracking (MPPT)) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย



รูปที่ 1.1 อินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบศูนย์กลาง [2]

### 1.1.2 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบหลายสตริง

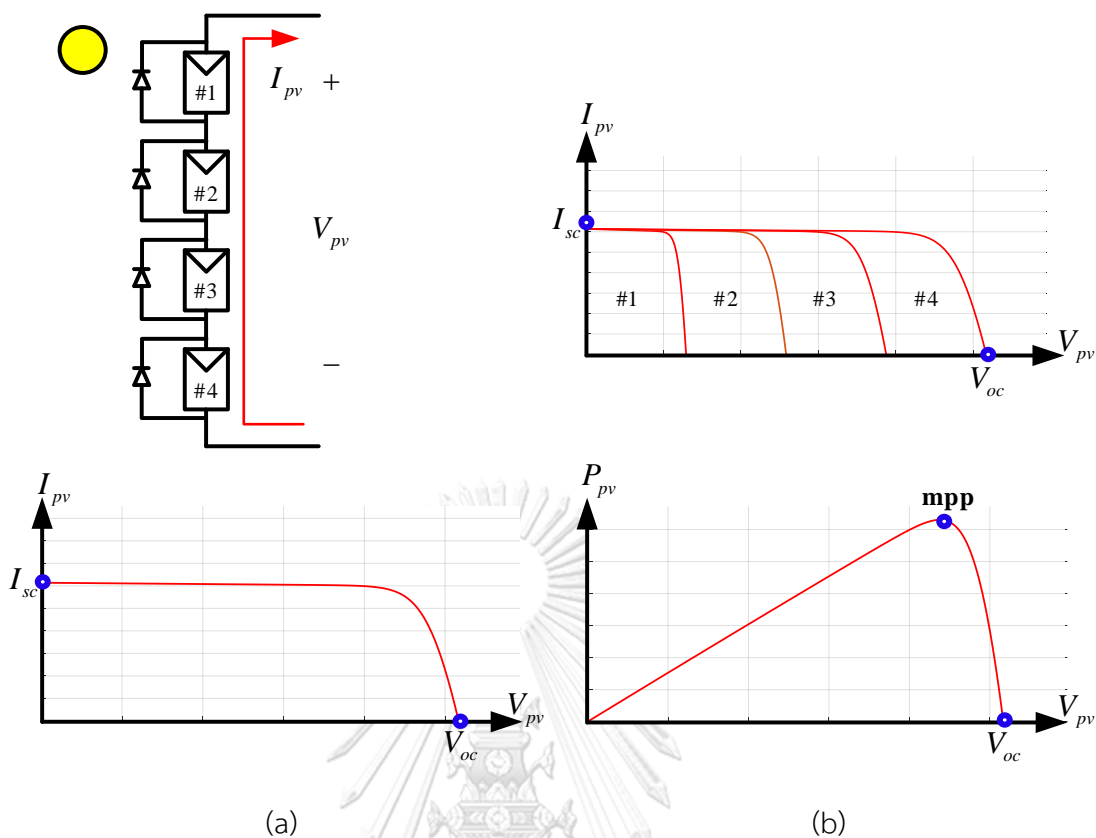
โครงสร้างระบบอินเวอร์เตอร์ตามรูปที่ 1.2 เรียกว่าอินเวอร์เตอร์แบบหลายสตริง ซึ่งแต่ละสตริงจะถูกเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟตรง (dc-dc converter) ก่อนเข้าวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยปกติแล้วโครงสร้างลักษณะนี้จะมีพิกัดกำลังอยู่ที่ประมาณ 1.5-6kW เมื่อพิจารณาในด้านการแปลงผันกำลังไฟฟ้จะพบว่ามีการแปลงผันกำลังไฟฟ้สองชั้น (double power processing stages) กล่าวคือ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้กระแสตรงจะทำหน้าที่ติดตามจุดกำลังสูงสุดของสตริง จากนั้นส่งกำลังไฟฟ้กระแสตรง ( $P_{dc}$ ) ที่ได้ให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการแปลงกำลังไฟฟ้กระแสตรงเป็นกำลังไฟฟ้กระแสสลับจ่ายเข้าโครงข่าย



รูปที่ 1.2 อินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายสตริง [2]

## 1.2 ปัญหาในระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบศูนย์กลาง

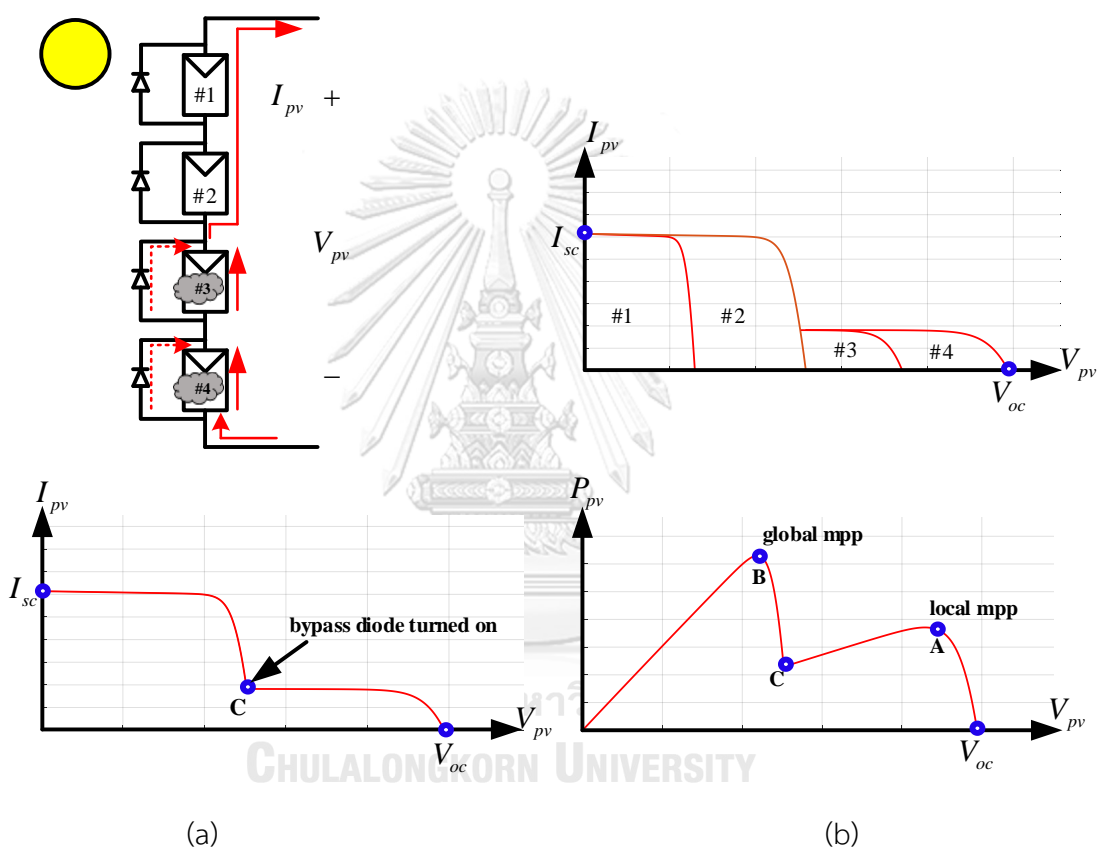
จากระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า แหล่งพลังงานที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ คือปริมาณความเข้มแสงที่แผงเซลล์ได้รับ ดังนั้นปริมาณความเข้มแสงจึงถือว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญ โดยปกติแล้วแผงเซลล์ที่ใช้งานในระบบจะถูกเชื่อมต่อกันในลักษณะสตริง โดยมีคุณลักษณะกระแสต่อแรงดัน ( $I$ - $V$  curve) ในแต่ละแผงที่เหมือนกัน เพื่อที่จะสามารถดึงกำลังการผลิตในแต่ละแผงได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จากรูปที่ 1.3 แสดงถึงสตริงที่ได้รับปริมาณความเข้มแสงสม่ำเสมอ (uniform irradiance) ซึ่งในหนึ่งสตริงจะประกอบไปด้วยแผงเซลล์ย่อยๆ ต่ออนุกรมกันอยู่ (ในที่นี้เราจะกำหนดให้มี 4 แผงเซลล์เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบาย) คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันแต่ละแผงเซลล์เมื่อถูกนำมาต่ออนุกรมกันจะแสดงได้ในรูปที่ 1.3 (b) ด้านขวาบน จากลักษณะการเชื่อมตอดังกล่าวค่าพิกัดกระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) รวมของทั้งสตริงจะยังคงเท่าเดิม โดยมีค่าเท่ากับกระแสลัดวงจรของแต่ละแผงเซลล์และแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ของสตริงจะเท่ากับผลรวมของแรงดันเปิดวงจรในแต่ละแผงเซลล์ คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของทั้งสตริงแสดงได้ตามรูปที่ 1.3 (a) ด้านซ้ายล่าง และจะสังเกตเห็นว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ เกิดจากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุดในแต่ละแผงเซลล์รวมกันแสดงได้ตามรูปที่ 1.3 (b) ด้านขวาล่างและขวาบน



รูปที่ 1.3 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงกรณีที่ได้รับแสงปกติ (a) สตริงและคุณลักษณะกระแสต่อแรงดันรวมทั้งสตริง,(b) คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันในแต่ละแผงเซลล์และคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันของทั้งสตริง

เมื่อพิจารณาในกรณีที่แผงเซลล์ถูกบังเงาบางส่วน (partial shading) ตามรูปที่ 1.4 (a) ด้านซ้ายบน จะเห็นว่าแผงเซลล์ที่สามและสี่ของสตริงถูกบังเงาบางส่วนซึ่งมีผลทำให้คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของแผงที่ถูกบังนี้ มีค่ากระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ได้รับแสงปกติแสดงได้ตามรูปที่ 1.4 (b) ด้านขวาบน เราจะเห็นได้ว่าการกำหนดให้การทำงานเริ่มต้นจากจุดแรงดันเปิดวงจรของสตริงแสดงในรูปที่ 1.4 (b) ด้านขวาล่าง จะเห็นได้ว่าก่อนการทำงานจากจุดแรงดันเปิดวงจรไปจนถึงจุดกำลังสูงสุดที่ตำแหน่ง A เราจะเรียกจุดทำงานนี้ว่าจุดกำลังสูงสุดวงแคบ (local maximum power point) ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ณ จุดทำงานนี้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงที่ไม่โดนบังเงาบวกกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงที่โดนบังเงา ต่อมาหากจุดทำงานเลยจากตำแหน่งจุดกำลังสูงสุดวงแคบแล้ว กำลังไฟฟ้าจะค่อยๆลดลงเมื่อจุดทำงานลดลงจนถึงขีดจำกัดของแผงที่โดนบังเงาที่จุด C ณ ตำแหน่งนี้แรงดันตกคร่อมแผงที่โดนบังเงาจะกลับทิศเป็นลบมีผลทำให้ไดโอดนำกระแส (bypass diode turned on) จะมีกระแสบางส่วนไหลผ่านไดโอด

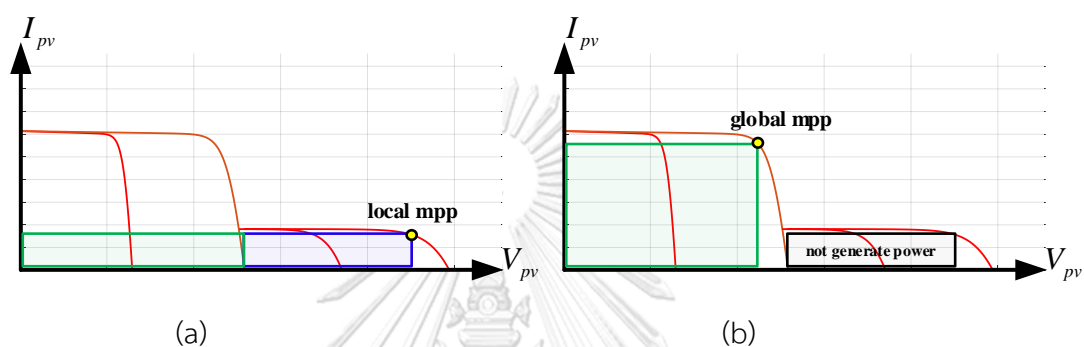
และแรงดันตกคร่อมแผงที่ถูกบังจะเท่ากับแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะนำกระแสโดยมีค่าประมาณ 0.7V ณ จุดทำงานนี้แผงที่ถูกบังจะไม่ผลิตกำลังไฟฟ้า การทำงานในย่านหลังจากนี้จะถูกกำหนดโดยแผงที่ไม่โดนบังเงา เมื่อจุดทำงานเลยตำแหน่งที่ไดโอดเริ่มนำกระแสค่ากำลังไฟฟ้าจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนไปถึงจุดกำลังสูงสุดใหม่ที่ตำแหน่ง B เราเรียกจุดนี้ว่า จุดกำลังสูงสุดวงกว้าง (global maximum power point) แสดงได้ตามรูปที่ 1.4 (b) ด้านขวาล่าง ณ จุดทำงานนี้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จะถูกกำหนดโดยแผงที่ไม่ถูกบังเงาในขณะที่แผงที่ถูกบังเงาจะไม่ผลิตกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 1.4 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงกรณีถูกบังเงาบางส่วน (a) สตริงและคุณลักษณะกระแสต่อแรงดันรวมทั้งสตริง, (b) คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันในแต่ละแผงเซลล์และคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันของทั้งสตริง



จากปัญหาดังกล่าวจะสรุปได้ว่าภายใต้การถูกบังเงาบางส่วนหากจุดทำงานอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด วงแคบแสดงได้ตามรูปที่ 1.5 (a) ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะได้อาจมาจากแผงที่ไม่ถูกบังเงา(พื้นที่แรเงาสีเขียว)บวกกับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงที่ถูกบังเงา ณ จุด mpp ของแผงที่ไม่ถูกบัง(พื้นที่แรเงาสีฟ้า) หรือถ้าจุดทำงานอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดวงกว้างแสดงได้ตามรูปที่ 1.5 (b) ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมาจากแผงที่ไม่ถูกบังเงา ณ จุด mpp ของแผงที่ไม่ถูกบัง(พื้นที่แรเงาสีเขียว)โดยที่แผงที่ถูกบังจะไม่ผลิตกำลังไฟฟ้า ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็ไม่ใช่กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สตริงสามารถผลิตได้

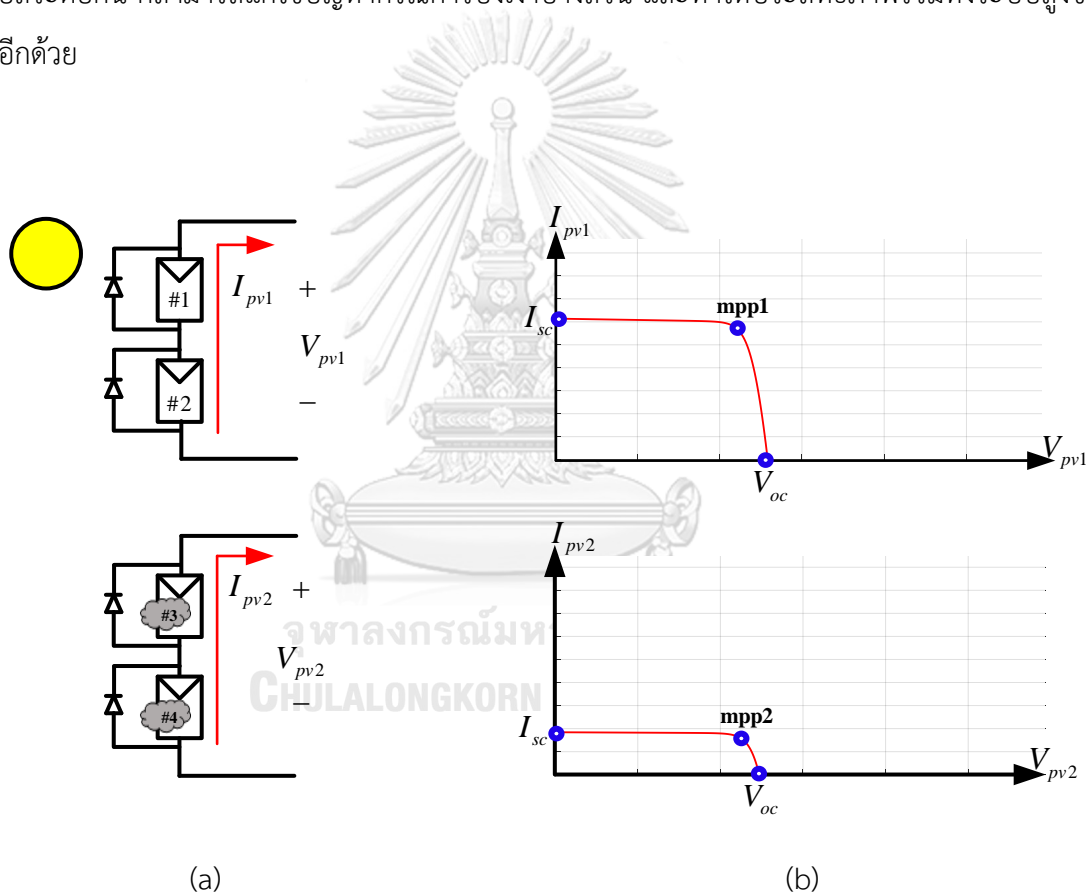


รูปที่ 1.5 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กรณีแผงเซลล์ถูกบังเงาบางส่วนในระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบ ศูนย์กลาง (a) กำลังไฟฟ้าที่จุด local mpp (b) กำลังไฟฟ้าที่จุด global mpp

### 1.3 แนวทางการแก้ไขปัญห

จากปัญหาการบังเงาบางส่วนของสตริงที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา แนวทางการแก้ไขปัญห เพื่อให้ระบบสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เต็มประสิทธิภาพของแต่ละแผงภายในสตริง ดังนั้นหากเราพิจารณาแยกสตริงในรูปที่ 1.4 โดยแยกระหว่างแผงที่ไม่ถูกบังและแผงที่ถูกบังออกจากกันเป็นสอง สตริงตามรูปที่ 1.6 (a) จะทำให้เราสามารถแยกจุดทำงานกำลังสูงสุดในแต่ละสตริงได้อย่างอิสระ โดยที่ กำลังสูงสุดของสตริงที่ไม่ถูกบังจะได้จากจุด mpp1 แสดงได้ตามรูปที่ 1.6 (b) ด้านขวาบน และ กำลังสูงสุดที่ได้จากสตริงที่ถูกบังเงาจะได้จากจุด mpp2 แสดงได้ตามรูปที่ 1.6 (b) ด้านขวาล่าง กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ผลิตได้จะเท่ากับกำลังสูงสุดของทั้งสองสตริงรวมกัน จะเห็นว่าแนวทางการ แก้ไขปัญหาโดยการแยกจุดทำงานกำลังสูงสุดนี้จะทำให้เราสามารถดึงกำลังการผลิตจากสตริงได้อย่าง เต็มประสิทธิภาพตามที่ควรจะเป็น แต่อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดทางโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบ ศูนย์กลางที่มีจุดเชื่อมต่อระหว่างสตริงกับบัสไฟตรงเพียงจุดเดียว ทำให้ไม่สามารถแยกจุดทำงานกำลัง สูงสุดได้ ดังนั้นเพื่อที่จะแยกจุดทำงานกำลังสูงสุดในแต่ละสตริง โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบหลาย สตริงในรูปที่ 1.2 จึงเป็นทางออกสำหรับกรณีนี้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างบัสไฟตรงที่ยอมให้ทั้ง

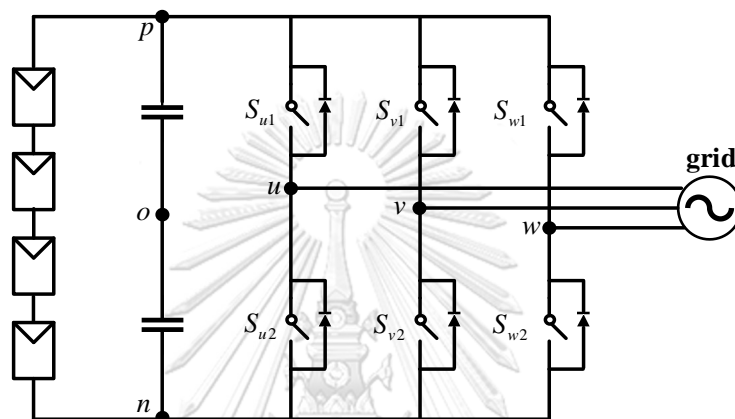
กระแสและแรงดันในแต่ละสตริงมีค่าไม่เท่ากันได้ จึงทำให้สามารถแยกจุดกำลังสูงสุดระหว่างสตริงที่ถูกบังเงาและไม่ถูกบังเงาได้ และมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าด้านออกที่ได้จะมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลางที่ไม่สามารถแยกจุดกำลังสูงสุดภายใต้สภาวะการบังเงาบางส่วน แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าอินเวอร์เตอร์หลายสตริงจะแก้ไขปัญหานี้ได้ แต่ยังคงมีข้อเสียคือประสิทธิภาพรวมของระบบจะต่ำกว่าแบบอินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลางเนื่องจากมีกระบวนการแปลงผันกำลังไฟฟ้าสองชั้น รวมทั้งยังมีโครงสร้างและระบบควบคุมที่ซับซ้อนอีกด้วย ดังนั้นถ้าเราสามารถใช้อินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลางให้สามารถแยกจุดทำงานกำลังสูงสุดในแต่ละสตริงได้อย่างอิสระต่อกัน ก็สามารถแก้ไขปัญหากรณีการบังเงาบางส่วน และทำให้ประสิทธิภาพรวมทั้งระบบสูงขึ้นอีกด้วย



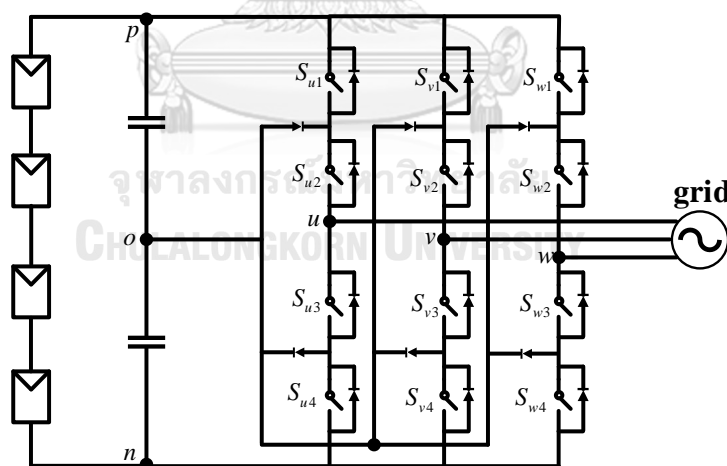
รูปที่ 1.6 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงกรณีพิจารณาแยกจุดกำลังสูงสุดภายใต้การถูกบังเงาบางส่วน (a) สตริงที่ถูกบังและไม่ถูกบังเงา, (b) คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริง

พิจารณาโครงสร้างระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบศูนย์กลางที่แสดงในรูปที่ 1.7 จะสังเกตเห็นว่าถ้าหากมีการเชื่อมต่อจุดกึ่งกลางบัสไฟตรง (o) ของอินเวอร์เตอร์เข้ากับจุดกึ่งกลางของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อแบ่งแผงเซลล์ออกเป็นสองสตริงย่อย จะทำให้บัสไฟตรงมีลักษณะคล้ายกับอิน

เวอร์เตอร์หลายสตรึง สำหรับกรณีรูปที่ 1.7 (a) เป็นอินเวอร์เตอร์ศูนย์กลางแบบสองระดับโดยที่ สวิตช์ในแต่ละเฟสจะไม่ถูกเชื่อมต่อกับจุดกึ่งกลางบัส เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถใช้อินเวอร์เตอร์สอง ระดับเชื่อมต่อในลักษณะนี้ในการควบคุมแต่ละสตรึงให้แยกอิสระต่อกันได้ ต่างจากกรณีรูปที่ 1.7 (b) ที่เป็นอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ซึ่งสวิตช์ในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์สามระดับถูกเชื่อมต่อกับจุด กึ่งกลางบัสอยู่แล้ว ดังนั้นเราจึงสามารถแบ่งสตรึงแยกเชื่อมต่อระหว่างบัสบนและบัสล่างของส่วนบัส ไฟตรงได้

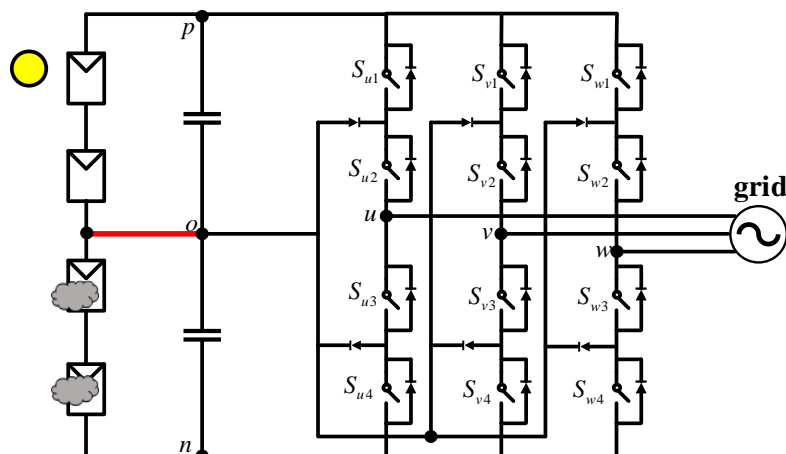


(a)



(b)

รูปที่ 1.7 อินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบศูนย์กลาง (a) แบบสองระดับ (b) แบบสามระดับ



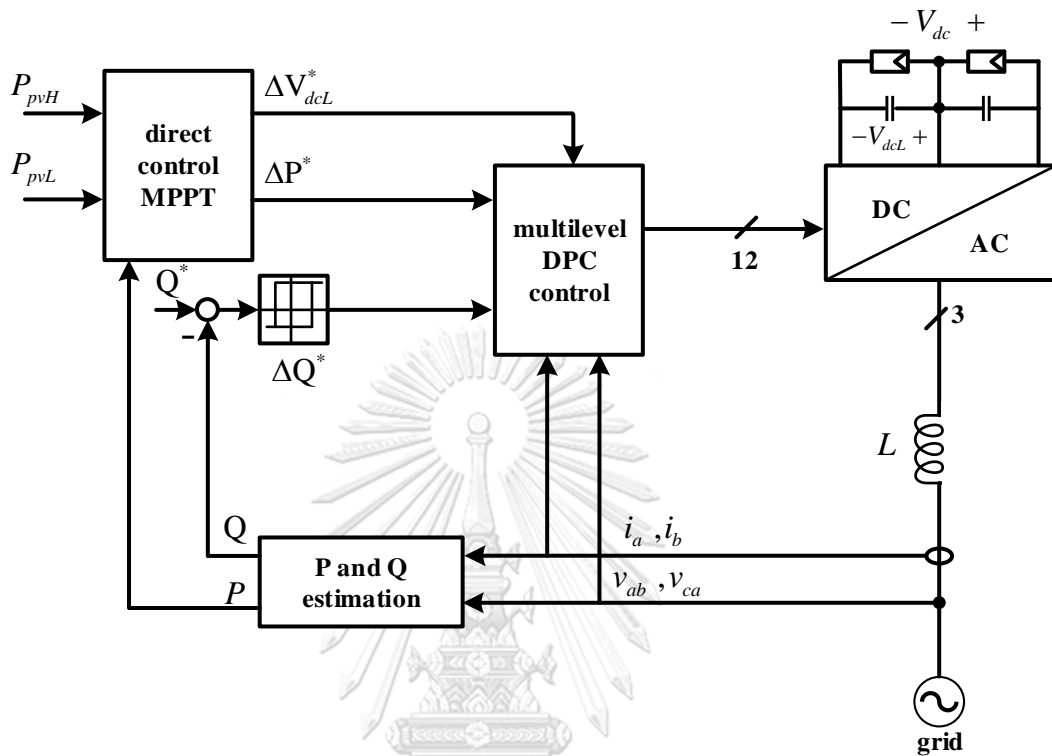
รูปที่ 1.8 อินเวอร์เตอร์สามระดับแบบศูนย์กลางที่มีการเชื่อมต่อจุดกึ่งกลางบัสไฟตรงกับจุดกึ่งกลาง  
สตริง

จากรูปที่ 1.8 จะสังเกตได้ว่าเมื่อแยกสตริงออกเป็นสองส่วนให้เชื่อมต่อกับบัสบนและบัสล่าง จะทำให้อินเวอร์เตอร์แบบศูนย์กลางมีลักษณะการเชื่อมต่อบัสไฟตรงกับสตริงเหมือนกับอินเวอร์เตอร์หลายสตริง แต่มีขั้นตอนการแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพียงขั้นเดียว เพราะฉะนั้นถ้าเราควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามโครงสร้างในรูปที่ 1.8 ให้มีค่าไม่เท่ากันหรือไม่สมมาตรได้ ก็จะสามารถแยกจุดกำลังสูงสุดของแต่ละสตริงได้อย่างอิสระ จากแนวคิดในการแก้ไขปัญหาจึงนำไปสู่เทคนิคต่างๆในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับ เพื่อแยกจุดทำงานกำลังสูงสุดในแต่ละสตริงภายใต้เงื่อนไขการบังเงาบางส่วน

#### 1.4 วิธีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเพื่อแยกจุดกำลังสูงสุดของแต่ละสตริงของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ในระบบอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบศูนย์กลาง

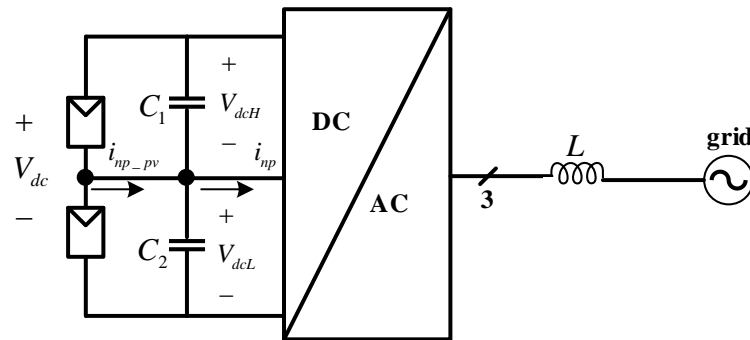
งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้เสนอวิธีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงแบบไม่สมมาตรของอินเวอร์เตอร์สามระดับเพื่อแยกจุดทำงานกำลังสูงสุดในแต่ละสตริงโดยที่งานวิจัย [3] เสนอวิธีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับบนพื้นฐานการควบคุมกำลังโดยตรง (direct power control) แนวคิดการควบคุมคือ การควบคุมแรงดันผลรวมที่บัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) และควบคุมแรงดันบัสล่าง ( $V_{dcl}$ ) ที่ซึ่งแสดงในรูปที่ 1.9 การควบคุมวิธีนี้จะไม่มีส่วนของการมอดูเลตความกว้างพัลส์ แรงดันรวมของบัสจะถูกควบคุมผ่านกำลังไฟฟ้าจริง (active power) ทั้งหมดที่จ่ายไปที่โครงข่ายไฟฟ้า และแรงดันบัสล่างจะถูกควบคุมผ่านกระแสเหนี่ยวนำโดยการเลือกเวกเตอร์แรงดันที่มีผลทำให้กระแสเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลง รูปที่ 1.9 แสดงถึงวงรอบควบคุมที่งานวิจัย [3] นำเสนอ จะสังเกตได้ว่า อัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังสูงสุดถูกรวมเป็นส่วนเดียวกันกับระบบควบคุม ดังนั้นระบบติดตามจุด

กำลังสูงสุดจะเป็นตัวกำหนดการควบคุมกำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ต้องจ่ายโดยตรง เพื่อปรับให้แรงดัน  
 บัสเปลี่ยนแปลง

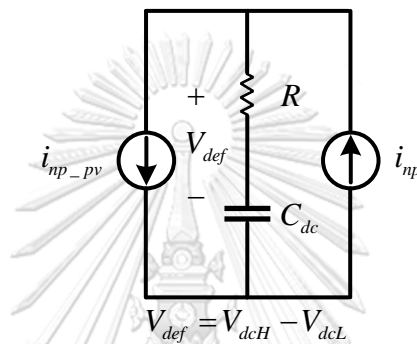


รูปที่ 1.9 วงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับด้วยวิธี DPC [3]

จากเทคนิคการควบคุมในงานวิจัย [3] ที่ได้นำเสนอ นั้น ต่อมาได้มีการนำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบใหม่โดยมองว่าวิธีที่งานวิจัย [3] มีข้อดีคือความถี่สวิตซ์ไม่คงที่เนื่องจากตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบฮิสเตอร์ซิส และการควบคุมในส่วนอัลกอริทึมของการควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรงมีความซับซ้อน [4] การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงแบบไม่สมมาตรด้วยวิธีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ห์ จึงถูกนำมาใช้เพื่อลดความซับซ้อนของระบบและแก้ไขปัญหาความถี่สวิตซ์ไม่คงที่ในงานวิจัย [3] วิธีดังกล่าวถูกเสนอในงานวิจัย [4] โดยมีแนวคิดการควบคุมผลรวมแรงดันบัสไฟตรง ( $V_{dc}$ ) และควบคุมผลต่างของแรงดันบัส ( $v_{def}$ ) แสดงได้ตามรูปที่ 1.10



(a)



(b)

รูปที่ 1.10 วงจรสมมูลสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับตามงานวิจัย [4]  
 (a) วงจรที่ใช้ในการควบคุมผลรวมแรงดันบัส (b) วงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการควบคุมผลต่างแรงดันบัส

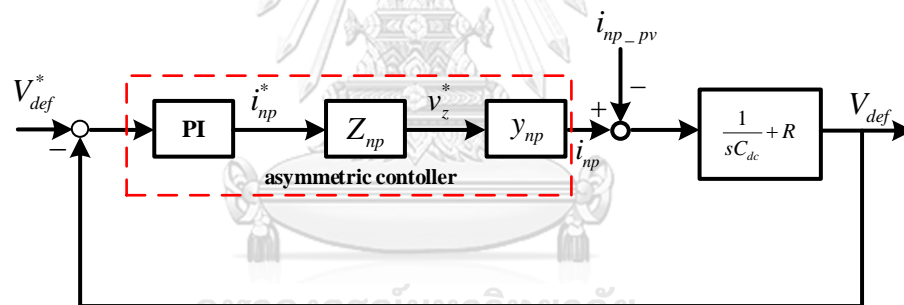
ส่วนวงรอบควบคุมแรงดันผลรวมของบัสไฟตรงใช้วิธีควบคุมแบบทั่วไป (conventional dc-link control) โดยการปรับกำลังไฟฟ้ารวมที่บัสที่จ่ายไปยังโครงข่ายไฟฟ้าผ่านวงรอบควบคุมกระแสในแนวแกน d (d-axis) ลักษณะวงรอบควบคุมจะเป็นแบบเรียงต่อกัน (cascade control structure) สมการที่ (1.1) แสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันผลรวมบัสไฟตรง และส่วนที่สองวงรอบควบคุมแรงดันผลต่าง โดยวงรอบควบคุมนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากวงจรสมมูลในรูปที่ 1.10 (b) ซึ่งสมการแบบจำลองจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ผลต่างแรงดันกับกระแสในวาล์วที่จุดกึ่งกลางบัส ( $i_{np}$ ) แสดงในสมการที่ (1.2)

$$\frac{C_1 + C_2}{2} \frac{dV_{dc}^2(t)}{dt} = P_{pv} - P_{inv} \quad (1.1)$$

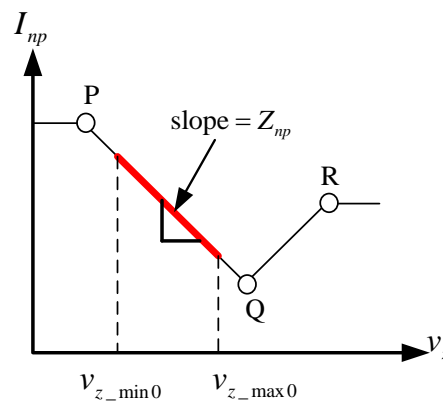
$$V_{def}(t) = R[i_{np}(t) - i_{np-pv}(t)] + \frac{1}{C_{dc}} \int_0^t [i_{np}(t) - i_{np-pv}(t)] dt \quad (1.2)$$

เมื่อ  $C_{dc} = C_1 + C_2$  ,  $i_{np-pv}$  คือกระแสแผงเซลล์ที่จุดนิวทรัล, และ  $i_{np}$  คือกระแสนิวทรัลที่จุดกึ่งกลางบัส

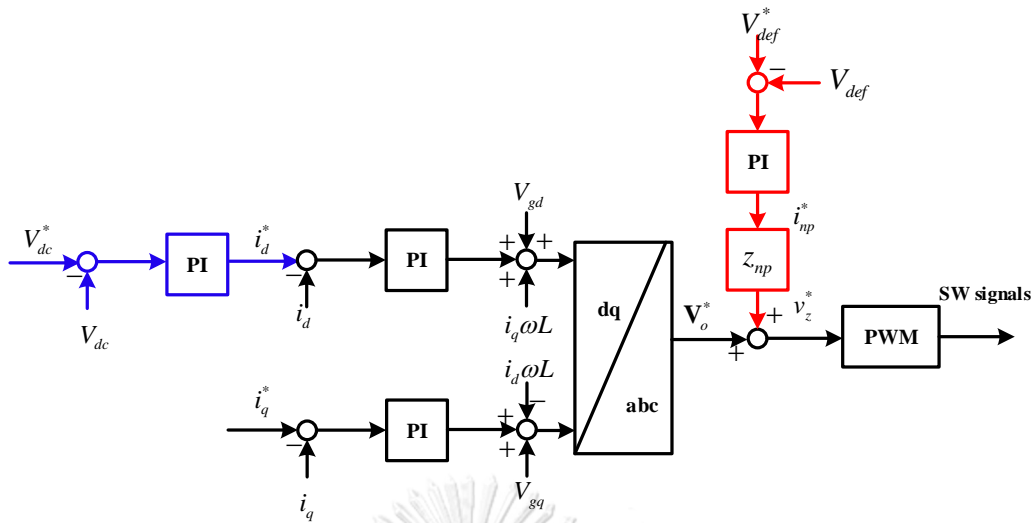
จากแบบจำลองทางพลวัตที่แสดงในสมการที่ (1.2) แสดงให้เห็นถึงการควบคุมแรงดันผลต่าง ( $V_{def}$ ) โดยการปรับกระแสนิวทรัลที่จุดกึ่งกลางบัสไฟตรง ( $i_{np}$ ) ซึ่งสามารถเขียนวงรอบควบคุมวงปิดได้ดังรูปที่ 1.11 อย่างไรก็ตามจากไดอะแกรมการควบคุมจะพบว่าตัวแปรด้านออกของตัวควบคุมพีไอ (PI-controller) เป็นค่ากระแสนิวทรัลคำสั่ง ( $i_{np}^*$ ) แต่เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถสร้างกระแสนิวทรัลได้โดยตรงจากคำสั่งของตัวควบคุม (อินเวอร์เตอร์รับคำสั่งเป็นค่าแรงดันเท่านั้น) ดังนั้นตัวควบคุมจึงไม่สามารถสั่งกระแสนิวทรัลคำสั่งได้อย่างโดยตรง จำเป็นที่ต้องแปลงค่าตัวแปรนี้ให้อยู่ในรูปคำสั่งแรงดันลำดับศูนย์ (zero-voltage ( $v_z^*$ )) เสียก่อน ค่าที่ใช้ในการแปลงจากกระแสนิวทรัลไปเป็นแรงดันลำดับศูนย์ (เนื่องจากแรงดันลำดับศูนย์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสนิวทรัล [4]) เรียกว่า อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (zero-impedance ( $Z_{np}$ )) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนิวทรัลและแรงดันลำดับศูนย์มีลักษณะเชิงเส้นเป็นช่วงๆ (piece-wise linear) แสดงได้ดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.11 ไดอะแกรมวงรอบควบคุมแรงดันผลต่างบัสไฟตรงป้อนกลับวงปิดในงานวิจัย [4]



รูปที่ 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสนิวทรัลและแรงดันลำดับศูนย์ [4]



รูปที่ 1.13 วงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนพื้นฐานการมอดูเลตคลื่นพาร์ตามงานวิจัย [4]

จากวิธีการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในงานวิจัย [3],[4] ที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าวิธีการควบคุมมีความแตกต่างกันออกไปทั้งในด้านการออกแบบวงจรถวลและเทคนิคการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ต่อมางานวิจัย [5] บอกถึงข้อดีของวิธีการควบคุมที่ได้นำเสนอ [3],[4] ว่าการควบคุมดังกล่าวต้องใช้พื้นฐานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาสร้างวงจรถวล ดังนั้นการทำงานของระบบจะขึ้นกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในความเป็นจริงอาจมีความไม่อุดมคติต่างๆที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ในงานวิจัยที่ [5] จึงมีแนวคิดในการออกแบบวงจรถวลบนพื้นฐานของตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด (on-off control) ซึ่งวิธีการนี้จะอยู่บนพื้นฐานระบบควบคุมที่ไม่จำเป็นต้องมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วงจรถวลในงานวิจัย [5] แสดงได้ตามรูปที่ 1.14 และจากรูปที่ 1.14 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะวงจรถวลจะเหมือนกับในงานวิจัย [4] โดยส่วนที่แตกต่างคือเทคนิคการมอดูเลตเพื่อควบคุมแรงดันผลต่าง ( $v_{def}$ ) สำหรับในงานวิจัย [5] ได้นำวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ (space vector modulation) โดยอาศัยคุณลักษณะของเวกเตอร์ขนาดเล็กชนิดบวก (P-type small voltage vector) และเวกเตอร์ขนาดเล็กชนิดลบ (N-type small voltage vector) ที่ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันบัสไฟตรงผ่านการปรับช่วงเวลาในการใช้ในแต่ละเวกเตอร์ที่ซึ่งถูกกำหนดโดย ( $T_{min}$ ) (ช่วงเวลาที่น้อยสุดในการใช้เวกเตอร์ขนาดเล็ก) โดยมีเงื่อนไขว่าเมื่อ  $(V_{def}^* - V_{def}) > 0$  ให้บวก ( $T_{min}$ ) เข้าไปในแต่ละลำดับเวลาในการสวิตช์ ( $T_{x(x=a,b,c)}$ ) ผลของการบวก ( $T_{min}$ ) จะทำให้แรงดันบัสไฟตรงด้านบนลดลงและแรงดันบัสไฟตรงด้านล่างเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้า  $(V_{def}^* - V_{def}) < 0$  ให้ลบ ( $T_{min}$ ) ออกจากช่วงลำดับเวลาในแต่ละสวิตช์ ผลของการลบ ( $T_{min}$ ) จะทำให้แรงดันบัสไฟตรงด้านบนเพิ่มและแรงดันบัสไฟตรงด้านล่างลด สำหรับลำดับเวลาในแต่ละ



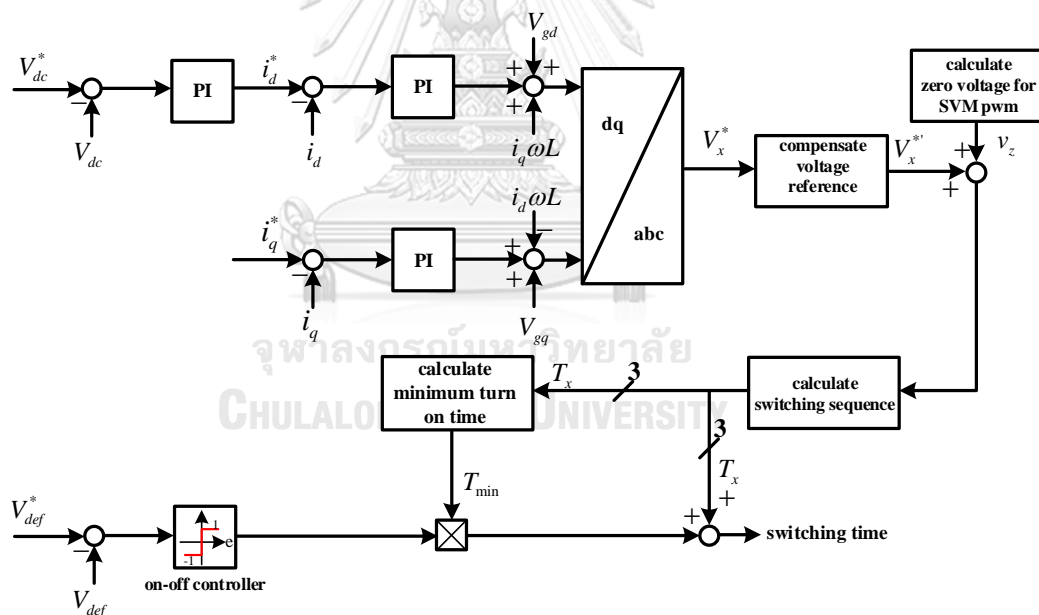
สวิตช์ ( $T_{x(x=a,b,c)}$ ) จะถูกคำนวณได้ตามสมการที่ (1.3) เมื่อ ( $V_x^*$ ) คือแรงดันคำสั่งอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ถูกกำหนดโดยวงรอบควบคุมกระแสและ ( $v_z$ ) คือแรงดันลำดับศูนย์ที่คำนวณได้จากสมการที่ (1.4) อย่างไรก็ตามวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์นั้นอยู่บนพื้นฐานแรงดันบัสไฟตรงสมดุล ดังนั้นสำหรับกรณีนี้จำเป็นต้องปรับชดเชยแรงดันคำสั่งเพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ ซึ่งการชดเชยจะคำนวณได้จากสมการที่ (1.5)-(1.6)

$$T_{x(x=a,b,c)} = \left( \frac{1}{2} - \frac{(V_x^* + v_z)}{(V_{dc}/2)} \right) \frac{T_{SW}}{2} \quad (1.3)$$

$$v_z = -\frac{(V_{max}^* + V_{min}^*)}{2} \quad (1.4)$$

$$V_{x(x=a,b,c)}^* = V_x^* \times \left( \frac{V_{dc}}{2V_{dcH}} \right), V_x^* > 0 \quad (1.5)$$

$$V_{x(x=a,b,c)}^* = V_x^* \times \left( \frac{V_{dc}}{2V_{dcL}} \right), V_x^* < 0 \quad (1.6)$$



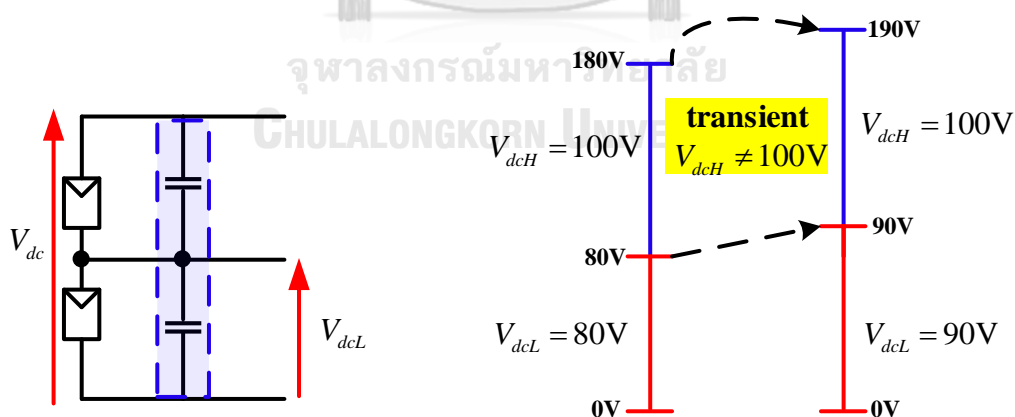
รูปที่ 1.14 วงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนฐานการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ตามงานวิจัย [5]

จากเทคนิคการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับเพื่อแยกจุดทำงานกำลังสูงสุดในแต่ละสตริ่งที่ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมา [3]-[5] จะเห็นได้ว่าแต่ละเทคนิคต่างก็มีจุดที่เหมือนและต่างกันโดยกล่าวสรุปได้ว่า แนวคิดการควบคุมแรงดันบัสไม่สมดุลของงานวิจัย [3] ใช้เทคนิคการควบคุมแรงดันผลรวมและควบคุมแรงดันบัสล่าง ในขณะที่งานวิจัย [4]-[5] ใช้เทคนิคการควบคุมแรงดันผลรวมและควบคุมแรงดันผลต่าง และจุดที่แตกต่างคือเทคนิคการสร้างแรงดันของ

อินเวอร์เตอร์โดยงานวิจัย [3] ใช้เทคนิคควบคุมกำลังโดยตรง งานวิจัย [4] ใช้เทคนิคการสร้างแรงดันโดยวิธีมอดูเลตความกว้างพัลส์ และงานวิจัย [5] ใช้เทคนิคการสร้างแรงดันโดยวิธีมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ โดยเทคนิคที่งานวิจัยทั้งหมดนี้นำเสนอเราสามารถสรุปข้อจำกัดได้ตามหัวข้อถัดไป

### 1.5 สรุปปัญหาและข้อจำกัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

แนวความคิดการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของงานวิจัย [3]-[5] การทำงานของวงรอบควบคุมมีความไม่เป็นอิสระต่อกัน กล่าวคือ จากรูปที่ 1.15 เป็นการยกตัวอย่างการทำงานด้วยวิธีการควบคุมของงานวิจัย [3] กำหนดให้เริ่มต้นแรงดันบัสบน ( $V_{dcH}$ ) ทำงานอยู่ที่จุด mpp ของสตรึงบัสบนเท่ากับ 100V และแรงดันบัสล่าง ( $V_{dcL}$ ) ทำงานอยู่ที่จุด mpp ของสตรึงบัสล่างเท่ากับ 80V ต่อมาสตรึงบัสล่างได้รับแสงเพิ่มขึ้นทำให้จุดทำงานเปลี่ยนเป็น 90V ในขณะที่สตรึงบัสบนยังคงได้รับแสงคงที่ จะเห็นได้ว่าภายใต้เงื่อนไขดังกล่าววงรอบควบคุมผลรวมจะทำงานโดยจะควบคุมเปลี่ยนค่าแรงดันคำสั่งเป็น  $V_{dc}^* = 180V \rightarrow 190V$  และวงรอบควบคุมบัสล่างจะเปลี่ยนค่าแรงดันคำสั่งเป็น  $V_{dcL}^* = 80V \rightarrow 90V$  การเปลี่ยนแปลงของวงรอบควบคุมทั้งสองในช่วงสภาวะชั่วคราวจะทำให้จุดทำงานของสตรึงบัสบนเคลื่อนออกจากจุด mpp (ช่วงสภาวะชั่วคราวแรงดันบัสบนไม่เท่ากับ 100V) ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลงในสภาวะชั่วคราว มีผลทำให้ประสิทธิภาพการแปลงผันกำลังต่ำลง นอกจากนั้นแล้ววิธีการควบคุมยังมีความซับซ้อนอีกด้วย (หมายเหตุ สำหรับวิธีการควบคุมของงานวิจัย [4]-[5] ก็มีพฤติกรรมการทำงานเช่นเดียวกับในรูปที่ 1.15)

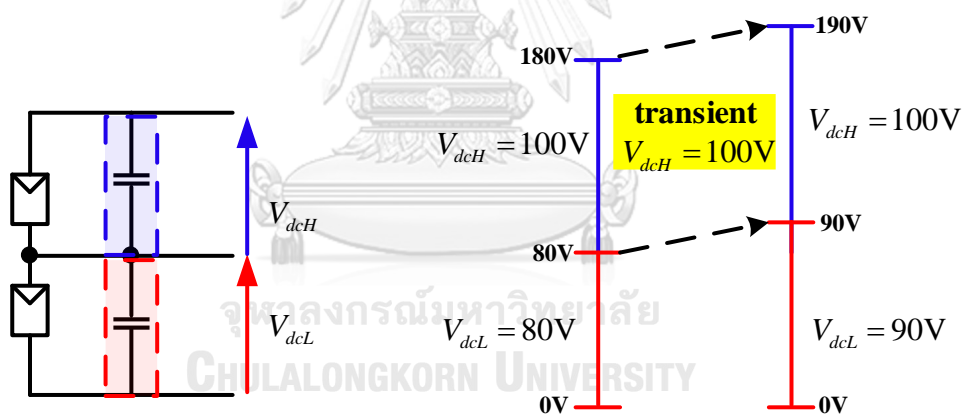


รูปที่ 1.15 ตัวอย่างลักษณะการทำงานของวงรอบควบคุมช่วงสภาวะชั่วคราวในงานวิจัย [3]

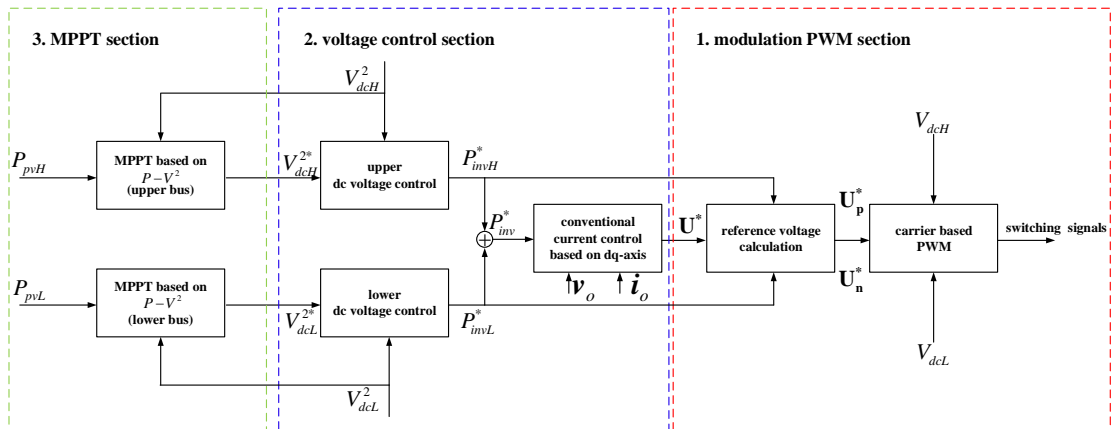
## 1.6 เป้าหมายของงานวิจัย

จากข้อเสียของงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 1.5 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดนำเสนอวิธีการควบคุมแรงดันในแต่ละบัสของอินเวอร์เตอร์สามารถอย่างอิสระต่อกัน โดยแยกควบคุมแรงดันบัสบน ( $V_{dcH}$ ) และควบคุมแรงดันบัสล่าง ( $V_{dcL}$ ) แสดงได้ตามรูปที่ 1.16 โดยอาศัยการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์เซอ รวมทั้งเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นและอัลกอริทึม MPPT เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามจุดกำลังสูงสุดในแต่ละสตรึงที่เชื่อมต่อกับบัสไฟตรงด้านบน(บัสบน)และด้านล่าง(บัสล่าง) โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเด็นหลักๆดังนี้

- การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์เซอเพื่อแบ่งสัดส่วนกำลังไฟฟ้าจากบัสบนและบัสล่างในส่วนไฟตรง
- การออกแบบวงรอบควบคุมบัสไฟตรงที่มีความเป็นเชิงเส้น
- การติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง (MPPT based on  $P-V^2$ )



รูปที่ 1.16 แนวคิดการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่งานวิจัยนี้นำเสนอ



รูปที่ 1.17 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงอินเวอร์เตอร์สามระดับที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

### 1.7 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. เสนอวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์บนฐานคลื่นพาร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับที่สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของบัสบนและของบัสล่างแยกอิสระต่อกันได้
2. เสนอแนวคิดการออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่มีความเป็นเชิงเส้น
3. เสนออัลกอริทึมการติดตามกำลังสูงสุดที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดันยกกำลังสองของเซลล์แสงอาทิตย์
4. ทดสอบความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (matlab/simulink) และการทดลองกับระบบอินเวอร์เตอร์ในห้องปฏิบัติการร่วมกับวงจรเทียบเคียงแผงเซลล์แสงอาทิตย์

### 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

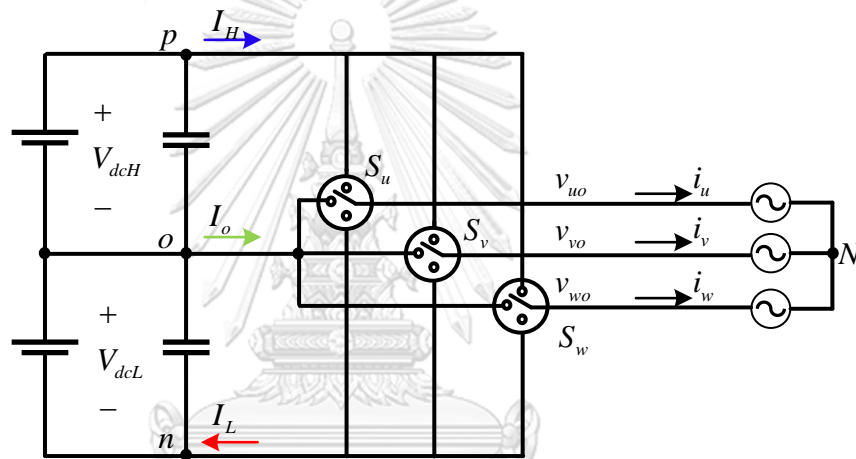
1. สามารถนำวิธีการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบศูนย์กลางที่มีใช้จริงในภาคอุตสาหกรรม เพื่อให้อินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นจากการที่เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละสตรังสามารถทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้
2. สามารถนำความรู้การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงไปประยุกต์ใช้กับระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่นได้

## บทที่ 2

### การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์กของอินเวอร์เตอร์สามระดับเพื่อแยกควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรง

#### 2.1 วิธีการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

สำหรับโครงสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับที่ใช้ในงานวิจัยทั่วไป [6] เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจถึงกลไกการสร้างแรงดันด้านออกเราจะมองโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ให้อยู่ในลักษณะเชิงหลักการสวิตช์ในอุดมคติ (conceptual switches) แสดงได้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับในมุมมองเชิงหลักการสวิตช์ในอุดมคติ

เพื่อให้เห็นที่มาและมุมมองการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สามระดับเราจะอธิบายได้ดังต่อไปนี้ กำหนดให้แรงดันคำสั่งด้านออกที่ต้องการสร้างของอินเวอร์เตอร์ ( $U^*$ ) จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ แรงดันคำสั่งบัสบน ( $U_p^*$ ) และแรงดันคำสั่งบัสล่าง ( $U_n^*$ ) แสดงได้ตามสมการที่ (2.1)-(2.2) ต่อมาเพื่อให้เห็นถึงกลไกการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์จะอธิบายได้ดังนี้ พิจารณาที่สวิตช์ในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.1 จะพบว่า สถานะการสวิตช์ในเฟสใดๆจะเป็นได้สามสถานะคือ ถ้าสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง ( $p$ ) จะได้แรงดันด้านออกเป็นค่าบวกเท่ากับ ( $V_{dcH}$ ) ถ้าสวิตช์อยู่ในตำแหน่ง ( $o$ ) จะได้แรงดันด้านออกเป็นศูนย์ และถ้าสวิตช์อยู่ที่ตำแหน่ง ( $n$ ) จะได้แรงดันด้านออกเป็นค่าลบเท่ากับ ( $-V_{dcL}$ )

$$\mathbf{U}^* = \mathbf{U}_p^* + \mathbf{U}_n^* = \begin{bmatrix} v_{uo}^* \\ v_{vo}^* \\ v_{wo}^* \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{U}_p^* = \begin{bmatrix} v_{up}^* \\ v_{vp}^* \\ v_{wp}^* \end{bmatrix}, \mathbf{U}_n^* = \begin{bmatrix} v_{un}^* \\ v_{vn}^* \\ v_{wn}^* \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

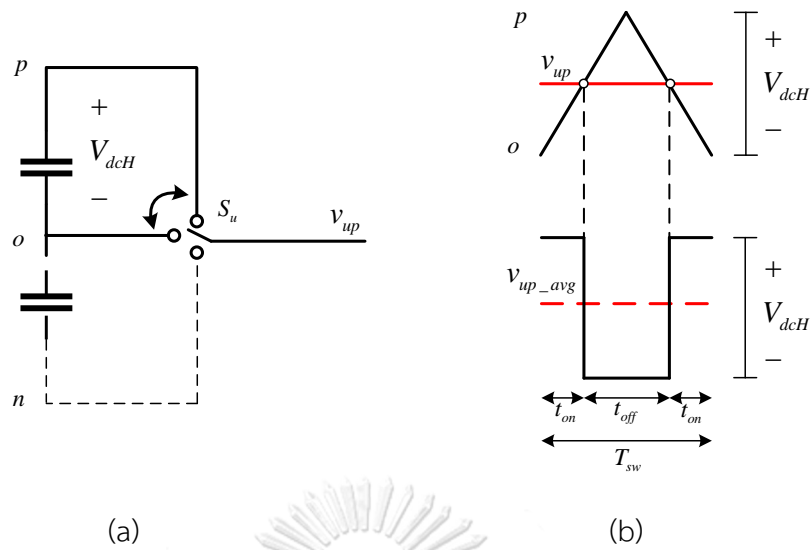
จากสถานะการสวิตช์ดังกล่าวอินเวอร์เตอร์จะอาศัยการสวิตช์สร้างแรงดันเป็นค่าเฉลี่ยใดๆที่ต้องการในหนึ่งคาบเวลาการสวิตช์ ( $T_{sw}$ ) โดยที่ช่วงเวลาในการสั่งให้สวิตช์ on-off นั้นจะได้จากสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันบัสไฟตรงกับค่าแรงดันเฉลี่ยที่ต้องการสร้าง ซึ่งหลักการดังกล่าวถูกเรียกว่าการมอดูเลตปรับความกว้างพัลส์ (PWM) ดังนั้นในกรณีของอินเวอร์เตอร์สามระดับการมอดูเลตสร้างแรงดันด้านออก โดยปกติแล้วค่าแรงดันคำสั่งบัสบนและบัสล่างจะถูกบวกด้วยแรงดันลำดับศูนย์เพื่อใช้เป็นแรงดันอ้างอิง ( $\mathbf{U}$ ) ในการมอดูเลตที่ซึ่ง ( $\mathbf{U}_p$ ) คือแรงดันอ้างอิงบัสบนและ ( $\mathbf{U}_n$ ) แรงดันอ้างอิงบัสล่าง แสดงได้ตามสมการที่ (2.3)-(2.4)

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_p + \mathbf{U}_n = \begin{bmatrix} v_{uo} \\ v_{vo} \\ v_{wo} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{U}_p = \begin{bmatrix} v_{up} \\ v_{vp} \\ v_{wp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{up}^* \\ v_{vp}^* \\ v_{wp}^* \end{bmatrix} + v_{zp} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{U}_n = \begin{bmatrix} v_{un} \\ v_{vn} \\ v_{wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{un}^* \\ v_{vn}^* \\ v_{wn}^* \end{bmatrix} + v_{zn} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

โดยที่  $v_z = v_{zp} + v_{zn}$  เมื่อ  $(v_{zp}), (v_{zn})$  คือแรงดันลำดับศูนย์บัสบนและบัสล่างตามลำดับ

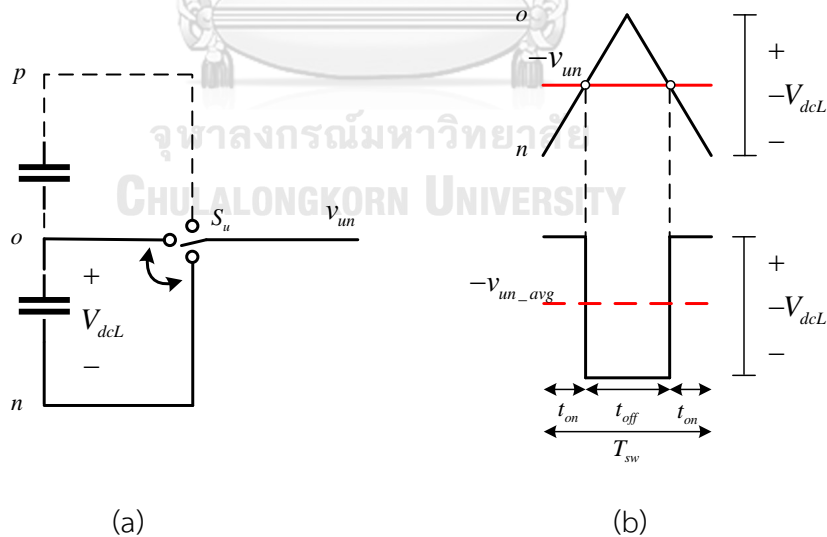
เมื่อต้องการสร้างแรงดันเฉลี่ยที่มีค่าเป็นบวกอินเวอร์เตอร์จะสวิตช์ระหว่างจุด ( $p$ ) กับ ( $o$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (a) (จากรูปที่ 2.2 เป็นการยกตัวอย่างการสร้างแรงดันเฉลี่ยค่าบวกเฟส  $u$ ) รูปที่ 2.2 (b) แสดงถึงการมอดูเลตสร้างแรงดันเฉลี่ยค่าบวก ซึ่งค่าแรงดันเฉลี่ยที่สามารถสร้างได้จะอยู่ในช่วง ( $V_{dcH}$ ) จุดตัดระหว่างสัญญาณคลื่นพาห์ (carrier wave) กับแรงดันอ้างอิงบัสบนเฟส  $u$  ( $v_{up}$ ) ก็คือช่วงเวลาในการ on-off สวิตช์ ( $S_u$ )



รูปที่ 2.2 กลไกการสร้างแรงดันเฉลี่ยด้านบวกของอินเวอร์เตอร์สามระดับบนฐานคลื่นพาห์ (a)

ลักษณะการสวิตช์ (b) การมอดูเลตสร้างแรงดันเฉลี่ยด้านบวก

สำหรับการสร้างแรงดันเฉลี่ยที่มีค่าเป็นลบอินเวอร์เตอร์จะสวิตช์ระหว่างจุด (o) กับ (n) แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 (a) และรูปที่ 2.3 (b) แสดงถึงการมอดูเลตสร้างแรงดันเฉลี่ยค่าลบ ซึ่งค่าแรงดันเฉลี่ยที่สามารถสร้างได้จะอยู่ในช่วง  $(-V_{dcL})$  จุดตัดระหว่างสัญญาณคลื่นพาห์ (carrier wave) กับแรงดันอ้างอิงบัสล่างเฟส u  $(-v_{un})$  ก็คือช่วงเวลาในการ on-off สวิตช์ ( $S_u$ )

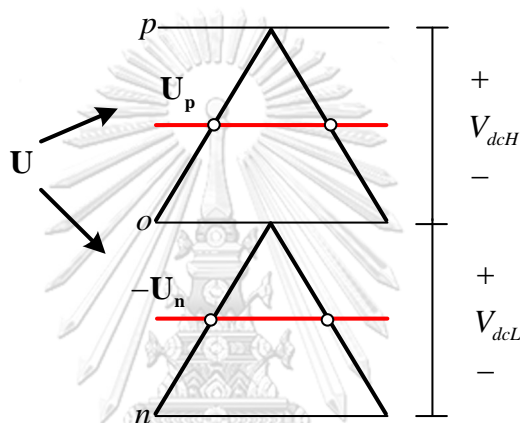


รูปที่ 2.3 กลไกการสร้างแรงดันเฉลี่ยด้านลบของอินเวอร์เตอร์สามระดับบนฐานคลื่นพาห์ (a) ลักษณะ

การสวิตช์ (b) การมอดูเลตสร้างแรงดันเฉลี่ยด้านลบ

จากกลไกการสร้างแรงดันเฉลี่ยทั้งด้านบวกและด้านลบที่ได้อธิบายในข้างต้น เราจะพบว่าทั้งสองกลไกนี้มีความเป็นอิสระต่อกันกล่าวคือ แรงดันเฉลี่ยค่าบวกของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะได้มาจากการสวิตช์เฉพาะบัสไฟตรงด้านบน และในทางกลับกันแรงดันเฉลี่ยค่าลบของอินเวอร์เตอร์สามระดับจะได้มาจากการสวิตช์เฉพาะบัสไฟตรงด้านล่างดังนั้นการมอดูเลตสร้างแรงดันด้านออกเฟสใดๆจะแสดงได้ตามรูปที่ 2.4

สำหรับในหัวข้อถัดไปจะได้อธิบายถึงพฤติกรรมของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับต่อการสร้างแรงดันด้านออก



รูปที่ 2.4 กลไกการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์ของอินเวอร์เตอร์สามระดับ



## 2.2 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่บัสไฟตรงต่อการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

จากหัวข้อที่ 2.1 ได้แสดงให้เห็นถึงกลไกการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับว่าค่าแรงดันด้านออกจะถูกสร้างมาจากแรงดันในแต่ละบัสไฟตรง สำหรับหัวข้อนี้เราจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้านับบัสไฟตรงต่อการสร้างแรงดันในการมอดูเลตของอินเวอร์เตอร์สามระดับ กล่าวคือเมื่อพิจารณากระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในรูปแบบที่ 2.1 คือ  $(i_o = [i_u \ i_v \ i_w]^T)$  และแรงดันด้านออก ( $\mathbf{U}$ ) จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ( $P_{out}$ ) (instantaneous output power) ตามสมการที่ (2.5) และพิจารณาทางด้านบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับในรูปแบบที่ 2.1 จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากแต่ละบัสไฟตรงได้ตามสมการที่ (2.6)

$$P_{out} = \mathbf{U} i_o^T \quad (2.5)$$

$$P_{inv} = P_{invH} + P_{invL} = V_{dcH} I_H + V_{dcL} I_L \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) แสดงถึงกำลังไฟฟ้ารวมที่จ่ายออกจากบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ ( $P_{inv}$ ) โดยเป็นผลรวมระหว่างกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสบนของอินเวอร์เตอร์ ( $P_{invH}$ ) และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสล่างของอินเวอร์เตอร์ ( $P_{invL}$ ) เมื่อพิจารณาทิศทางการไหลของกระแสที่บัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ในรูปแบบที่ 2.1 โดยกำหนดให้กระแสเฉลี่ยในหนึ่งคาบการสวิตช์ทั้งบัสบนและบัสล่าง ( $I_H, I_L$ ) ตามลำดับ ให้มีทิศทางการไหลออกจากบัส จะได้ค่ากระแสเฉลี่ยนิวทรัลเป็น ( $I_o = I_H - I_L$ ) และเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการสร้างแรงดันต่อกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสไฟตรง ดังนั้นเราจะเขียนแรงดันอ้างอิง ( $\mathbf{U}$ ) และกระแสเฉลี่ยที่บัสไฟตรง ( $\mathbf{I}$ ) ให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์การมอดูเลตได้ในสมการที่ (2.7)-(2.8)

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} v_{uo} \\ v_{vo} \\ v_{wo} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{up} & 1-(m_{up}+m_{un}) & m_{un} \\ m_{vp} & 1-(m_{vp}+m_{vn}) & m_{vn} \\ m_{wp} & 1-(m_{wp}+m_{wn}) & m_{wn} \end{bmatrix}}_{\mathbf{m}} \begin{bmatrix} V_{dcH} \\ 0 \\ -V_{dcL} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_H \\ I_o \\ -I_L \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{up} & m_{vp} & m_{wp} \\ 1-(m_{up}+m_{un}) & 1-(m_{vp}+m_{vn}) & 1-(m_{wp}+m_{wn}) \\ m_{un} & m_{vn} & m_{wn} \end{bmatrix}}_{\mathbf{m}^T} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.7)-(2.8)  $\sum_{i=(u,v,w),j=(p,o,n)} m_{ij} = 1$  คือค่าวัฏจักรงาน และสามารถเขียนค่าวัฏจักรงาน บัสบนและบัสล่างได้ตามสมการที่ (2.9)-(2.14)

$$m_{up} = \frac{(v_{up}^* + v_{zp})}{V_{dcH}} \quad (2.9)$$

$$m_{vp} = \frac{(v_{vp}^* + v_{zp})}{V_{dcH}} \quad (2.10)$$

$$m_{wp} = \frac{(v_{wp}^* + v_{zp})}{V_{dcH}} \quad (2.11)$$

$$m_{un} = \frac{(v_{un}^* + v_{zn})}{V_{dcL}} \quad (2.12)$$

$$m_{vn} = \frac{(v_{vn}^* + v_{zn})}{V_{dcL}} \quad (2.13)$$

$$m_{wn} = \frac{(v_{wn}^* + v_{zn})}{V_{dcL}} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.8) เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการผลบวกเชิงเส้นและแทนค่าวัฏจักรงานด้วยสมการที่ (2.9)-(2.14) จะสามารถเขียนสมการกระแสเฉลี่ยที่ไหลออกจากบัสบนและบัสล่าง ( $I_H, I_L$ ) ได้ตามสมการที่ (2.15)-(2.16)

$$I_H = \frac{(v_{up}^* + v_{zp})i_u + (v_{vp}^* + v_{zp})i_v + (v_{wp}^* + v_{zp})i_w}{V_{dcH}} \quad (2.15)$$

$$I_L = \frac{(v_{un}^* + v_{zn})i_u + (v_{vn}^* + v_{zn})i_v + (v_{wn}^* + v_{zn})i_w}{V_{dcL}} \quad (2.16)$$

จากคุณสมบัติของระบบสามเฟสสามสายมีผลทำให้ผลรวมของกระแสด้านออกมีค่าเป็นศูนย์ ( $i_u + i_v + i_w = 0$ ) และจัดรูปสมการที่ (2.15)-(2.16) ได้ใหม่ให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ จะพบว่าการสร้างแรงดันคำสั่งบัสบนและบัสล่างของอินเวอร์เตอร์สามระดับสะท้อนถึงการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากแต่ละบัสไฟตรง โดยที่การสร้างแรงดันบัสบน (ในรูปที่ 2.2) จะสะท้อนถึงการใช้กำลังไฟฟ้าจากบัสบน และการสร้างแรงดันบัสล่าง (ในรูปที่ 2.3) จะสะท้อนถึงการใช้กำลังไฟฟ้าจากบัสล่างแสดงได้ตามสมการที่ (2.17)-(2.19)

$$P_{invH} = V_{dcH} I_H = \begin{bmatrix} v_{up}^* & v_{vp}^* & v_{wp}^* \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \mathbf{U}_p^* \mathbf{i}_o \quad (2.17)$$

$$P_{invL} = V_{dcL} I_L = \begin{bmatrix} v_{un}^* & v_{vn}^* & v_{wn}^* \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \mathbf{U}_n^* \mathbf{i}_o \quad (2.18)$$

$$P_{inv} = P_{invH} + P_{invL} = \mathbf{U}^* \mathbf{i}_o \quad (2.19)$$

จากความสัมพันธ์ของการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์สามระดับต่อกำลังไฟฟ้าที่บัสไฟตรงที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะสรุปได้ว่า ค่าแรงดันคำสั่งบัสบน ( $\mathbf{U}_p^*$ ) แปรผันตรงกับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสบนของอินเวอร์เตอร์ ( $P_{invH}$ ) และค่าแรงดันคำสั่งบัสล่าง ( $\mathbf{U}_n^*$ ) ก็แปรผันตรงกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสไฟตรงด้านล่างของอินเวอร์เตอร์ ( $P_{invL}$ ) เช่นกัน จากความสัมพันธ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการสร้างแรงดันคำสั่งบัสบนและบัสล่างสะท้อนถึงการจ่ายกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรง อีกทั้งกระบวนการสร้างแรงดันระหว่างบัสบนและบัสล่างยังมีความเป็นอิสระต่อกัน และยังชี้ให้เห็นถึงอินเวอร์เตอร์มีพฤติกรรมการจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสบนและบัสล่างที่มีความเป็นอิสระต่อกันอีกด้วย

### 2.3 การแบ่งสัดส่วนการสร้างแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรง

จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่บัสไฟตรงต่อการสร้างแรงดันของอินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวไปข้างต้น เราจะใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในการแบ่งสัดส่วนแรงดันคำสั่งที่ต้องการสร้างเพื่อให้สามารถควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรงได้ อันดับแรกเราจะกำหนดอัตราส่วนที่ใช้ในการแบ่งค่าแรงดันคำสั่งที่ต้องการสร้างในแต่ละบัสไฟตรงตามสมการที่ (2.20)-(2.21) โดยที่  $(k_1)$  คือสัดส่วนที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันคำสั่งบัสบน ( $U_p^*$ ) โดยสัดส่วนดังกล่าวถูกแบ่งตามกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจ่ายออกจากบัสไฟตรงด้านบนต่อกำลังไฟฟารวมทั้งหมดที่จ่ายออกจากบัส และ  $(k_2)$  คือสัดส่วนที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันคำสั่งบัสล่าง ( $U_n^*$ ) โดยสัดส่วนดังกล่าวถูกแบ่งตามกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจ่ายออกจากบัสไฟตรงด้านล่างต่อกำลังไฟฟารวมทั้งหมดที่จ่ายออกจากบัส ผลรวมของสัดส่วนการแบ่งนี้จะเท่ากับหนึ่ง ( $k_1 + k_2 = 1$ )

$$k_1 = \frac{P_{invH}^*}{P_{invH}^* + P_{invL}^*} \quad (2.20)$$

$$k_2 = \frac{P_{invL}^*}{P_{invH}^* + P_{invL}^*} \quad (2.21)$$

จากแรงดันคำสั่งของอินเวอร์เตอร์ ( $U^*$ ) ในสมการที่ (2.1) เมื่อเราแทนค่าสัดส่วนการแบ่งแรงดันคำสั่งด้วยอัตราส่วน  $(k)$  ตามสมการที่ (2.20)-(2.21) จะได้สัดส่วนการสร้างแรงดันคำสั่งในแต่ละบัสตามสมการที่ (2.22)-(2.23)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$U_p^* = k_1 U^* \quad (2.22)$$

$$U_n^* = k_2 U^* \quad (2.23)$$

จากสมการกำลังไฟฟ้าที่บัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ในสมการที่ (2.17)-(2.18) เมื่อแทนค่าแรงดันคำสั่งด้วยสมการที่ (2.22)-(2.23) จะได้

$$P_{invH} = \left( \frac{P_{invH}^*}{P_{invH}^* + P_{invL}^*} \right) \mathbf{U}^T \mathbf{i}_o \quad (2.24)$$

$$P_{invL} = \left( \frac{P_{invL}^*}{P_{invH}^* + P_{invL}^*} \right) \mathbf{U}^T \mathbf{i}_o \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.24)-(2.25) เมื่อพิจารณาเทอมของ  $(\mathbf{U}^T \mathbf{i}_o)$  ที่แสดงถึงกำลังไฟฟ้ารวมที่บัสไฟตรงที่อินเวอร์เตอร์จ่ายซึ่งตรงกับสมการที่ (2.19) ( $P_{inv}$ ) และโดยปกติแล้วแรงดันด้านออกที่สร้างได้จริงของอินเวอร์เตอร์จะเท่ากับแรงดันคำสั่งดังนั้นจึงมีผลทำให้เทอมของกำลังไฟฟ้ารวมที่บัสไฟตรง (ค่าจริง  $(P_{inv} = \mathbf{U}^T \mathbf{i}_o)$ ) ที่อินเวอร์เตอร์จ่ายจะเท่ากับเทอมส่วนของกำลังไฟฟ้ารวมที่บัสไฟตรงคำสั่ง ( $P_{inv}^* = P_{invH}^* + P_{invL}^*$ ) มีผลทำให้สองเทอมนี้หักล้างกันหมด ท้ายสุดเราจะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.24)-(2.25) ค่ากำลังไฟฟ้าคำสั่งที่ต้องการจะเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าที่สร้างได้จริงแสดงได้ตามสมการที่ (2.26)-(2.27)

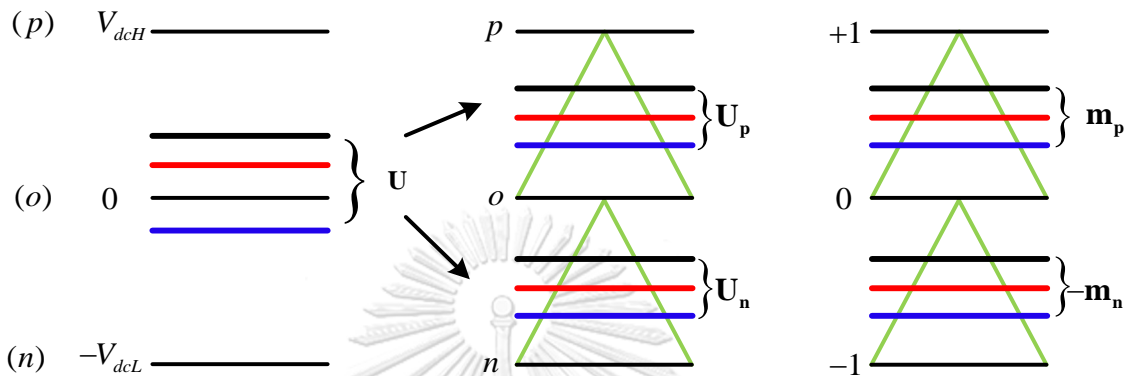
$$P_{invH} = P_{invH}^* \quad (2.26)$$

$$P_{invL} = P_{invL}^* \quad (2.27)$$

จากวิธีการแบ่งสัดส่วนการสร้างแรงดันคำสั่งในแต่ละบัสไฟตรงตามสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายในแต่ละบัสตามสมการที่ (2.22)-(2.23) ที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะได้ข้อสรุปว่า เราสามารถควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจ่ายออกจากบัสไฟตรงด้านบนและด้านล่างของอินเวอร์เตอร์ได้จริง และยังชี้ให้เห็นอีกว่าการควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟาระหว่างบัสบนและล่างมีความเป็นอิสระต่อกัน และในส่วนของเนื้อหาบทถัดไปเราจะอธิบายถึงที่มาของกำลังไฟฟ้าคำสั่ง  $(P_{invH}^*, P_{invL}^*)$  ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการจะถูกกำหนดด้วยกลไกอย่างไร

2.4 ขั้นตอนวิธีการมอดูเลตเพื่อแยกควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรง

จากหัวข้อที่ 2.3 เราสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงได้จากการแบ่งสัดส่วนแรงดันคำสั่งบัสบนและบัสล่างตามสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจ่าย สำหรับในหัวข้อนี้จะพูดถึงถึงวิธีการมอดูเลตสร้าง  $(U_p^*, U_n^*)$  โดยแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 การสร้างแรงดันอ้างอิงสำหรับการมอดูเลตในงานวิจัยนี้

ขั้นตอนที่ 1 : คำนวณแรงดันอ้างอิงบัสบน ( $U_p$ ) และแรงดันอ้างอิงบัสล่าง ( $U_n$ ) ที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบกับคลื่นพาห์ตามสมการที่ (2.28)-(2.29) (ค่า  $U_p^*, U_n^*$  จะได้จากการคำนวณในสมการที่ (2.22)-(2.23)

$$U_p = U_p^* + v_{zp} \tag{2.28}$$

$$U_n = U_n^* + v_{zn} \tag{2.29}$$

ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณค่าแรงดันลำดับศูนย์ตามสมการที่ (2.30)-(2.31) เพื่อไม่ให้เกิดการมอดูเลตเกิน (over modulation)

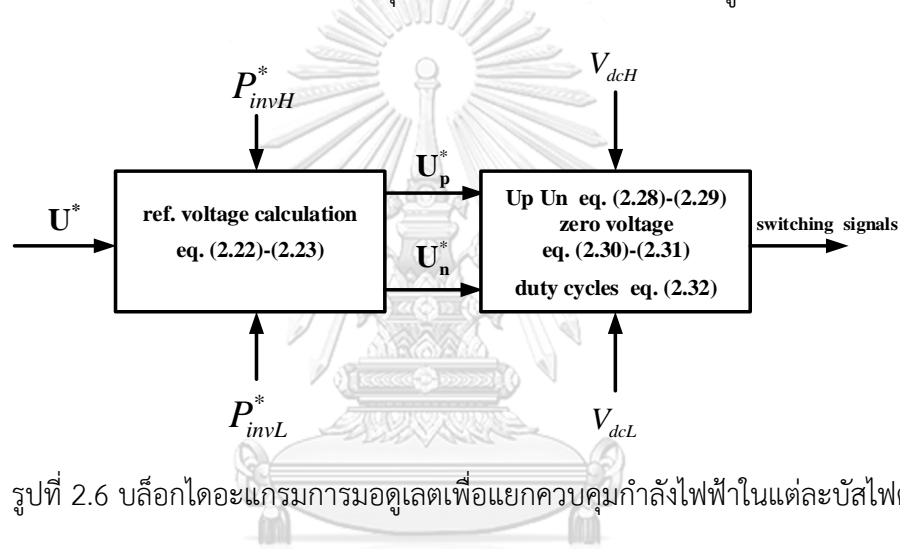
$$v_{zp} = -\min U_p^* = -\min_{j=u,v,w} [v_{jp}^*] \tag{2.30}$$

$$v_{zn} = -\max U_n^* = -\max_{j=u,v,w} [v_{jn}^*] \tag{2.31}$$

ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณค่าวัฏจักรงานตามสมการที่ (2.32) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับคลื่นพาร์ขนาดหนึ่งหน่วย

$$\mathbf{m}_p = \begin{bmatrix} m_{up} \\ m_{vp} \\ m_{wp} \end{bmatrix} = \mathbf{U}_p / V_{dcH}, \quad \mathbf{m}_n = \begin{bmatrix} m_{un} \\ m_{vn} \\ m_{wn} \end{bmatrix} = \mathbf{U}_n / V_{dcL} \quad (2.32)$$

จากวิธีการมอดูเลตเพื่อแยกควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ตามรูปที่ 2.6



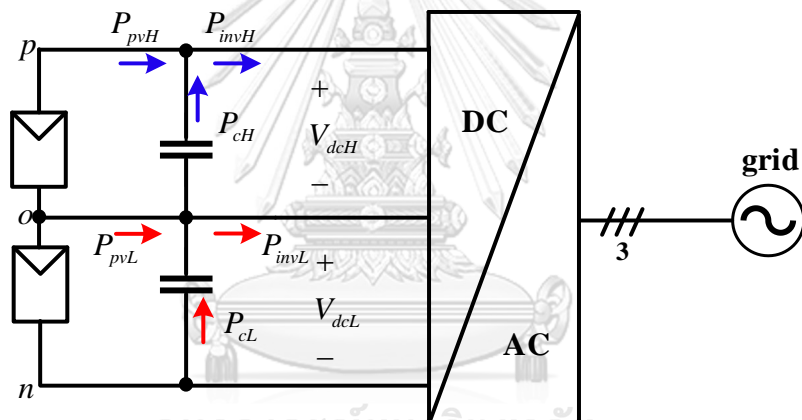
รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลตเพื่อแยกควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรง

### บทที่ 3

## การออกแบบวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่มีความเป็นเชิงเส้นและทำงานได้อย่างอิสระต่อกัน

### 3.1 แบบจำลองพลวัตของวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

จากการแบ่งสัดส่วนการสร้างแรงดันคำสั่งระหว่างบัสบนและบัสล่างตามสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.3 จากสมการที่ (2.20)-(2.21) ค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการจ่ายในแต่ละบัสไฟตรง ( $P_{invH}^*, P_{invL}^*$ ) จะถูกกำหนดโดยการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง โดยที่เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัสไฟตรงและกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสไฟตรงตามรูปที่ 3.1 จะเขียนสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวในช่วงสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ตามสมการที่ (3.1)-(3.2)



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่บัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับ

$$P_{pvH} + P_{cH} = P_{invH} \quad (3.1)$$

$$P_{pvL} + P_{cL} = P_{invL} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.1)-(3.2) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้า-ออกบัสไฟตรง โดยที่กำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกจากบัสบนจะเท่ากับผลรวมระหว่างกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์บัสบน ( $P_{pvH}$ ) กับกำลังไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุบัสบน ( $P_{cH}$ ) และกำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายออกจากบัสล่างจะเท่ากับผลรวมระหว่างกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์บัสล่าง ( $P_{pvL}$ ) กับกำลังไฟฟ้าจากตัวเก็บ



ประจุบัสล่าง ( $P_{cl}$ ) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการพลวัตได้ตามสมการที่ (3.3)-(3.4)

$$-\frac{C}{2} \frac{dV_{dcH}^2}{dt} + P_{pvH} = P_{invH} \quad (3.3)$$

$$-\frac{C}{2} \frac{dV_{dcL}^2}{dt} + P_{pvL} = P_{invL} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.3)-(3.4) แสดงให้เห็นว่าเราสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงพลวัตของแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ได้จากการปรับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัส ( $P_{invH}, P_{invL}$ ) และหากเราพิจารณาให้ตัวแปร ( $V_{dcH}^2, V_{dcL}^2$ ) เป็นตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะทำให้สมการพลวัตต่อกำลังบัสไฟตรงเป็นสมการเชิงเส้นที่ง่ายต่อการออกแบบวงรอบควบคุมป้อนกลับ จากวิธีการมอดูเลตสร้างแรงดันด้านออกที่ทำให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรงได้และจากข้อสรุปในสมการที่ (2.26)-(2.27) จะได้ว่าเราจะกำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าคำสั่งบัสบนและบัสล่างมีการชดเชยตามสมการที่ (3.5)-(3.6) เมื่อแทนสมการที่ (3.5)-(3.6) ลงในแบบจำลองทางพลวัตของบัสไฟตรงในสมการที่ (3.3)-(3.4) จะทำให้สมการแบบจำลองทางพลวัตอยู่ในรูปอย่างง่ายโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบัสไฟตรงต่อแรงดันยกกำลังสองแสดงได้ตามสมการที่ (3.7)-(3.8)

$$P_{invH}^* = P_{dcH}^* + P_{pvH}, \quad P_{invL}^* = P_{dcL}^* + P_{pvL} \quad (3.5)$$

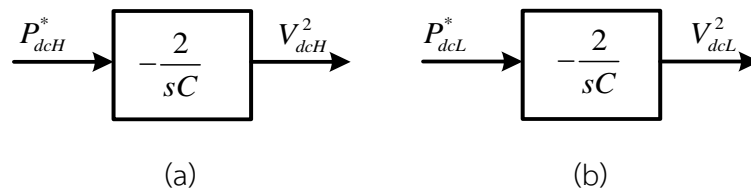
$$P_{inv}^* = P_{invH}^* + P_{invL}^* \quad (3.6)$$

$$-\frac{C}{2} \frac{dV_{dcH}^2}{dt} = P_{dcH}^* \quad (3.7)$$

$$-\frac{C}{2} \frac{dV_{dcL}^2}{dt} = P_{dcL}^* \quad (3.8)$$

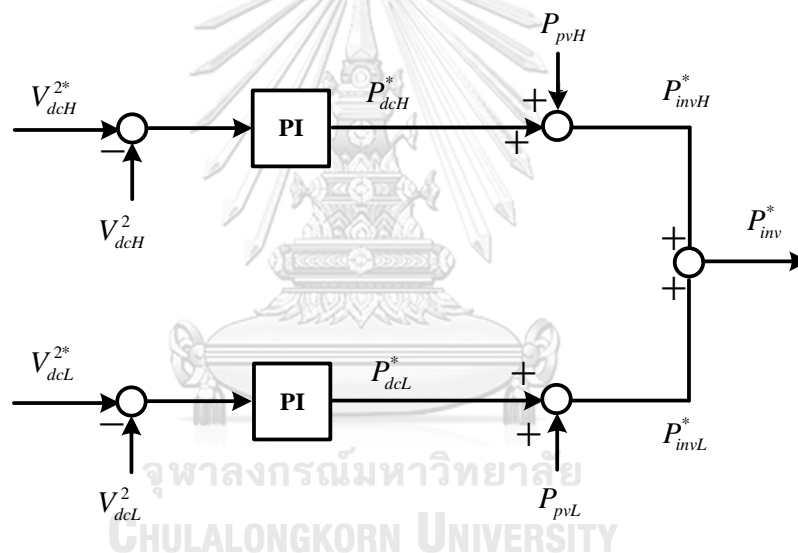
จากแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (3.7)-(3.8) สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันโอนย้ายที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกำลังบัสไฟตรงต่อแรงดันยกกำลังสองได้ตามสมการที่ (3.9) และแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ตามรูปที่ 3.2

$$\frac{V_{dcH}^2(s)}{P_{dcH}^*(s)} = -\frac{2}{sC}, \quad \frac{V_{dcL}^2(s)}{P_{dcL}^*(s)} = -\frac{2}{sC} \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมฟังก์ชันโอนย้ายของกำลังบัลไฟตรงต่อแรงดันยกกำลังสอง (a) ฟังก์ชันโอนย้ายบัลบน (b) ฟังก์ชันโอนย้ายบัลล่าง

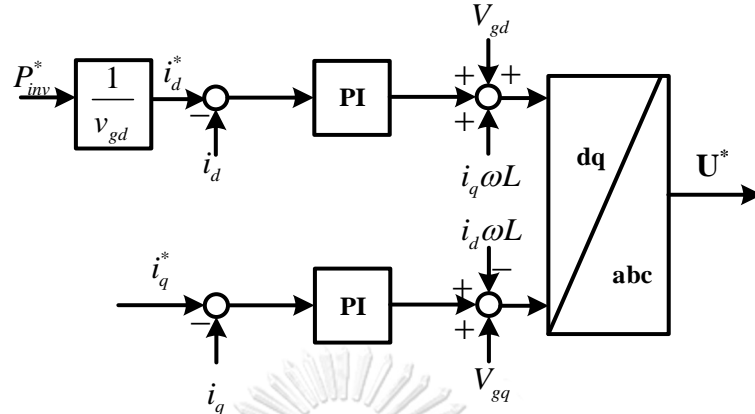
จากสมการที่ (3.7)-(3.8) ซึ่งให้เห็นว่าเราสามารถแยกควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันบัลบนและบัลล่างได้อย่างอิสระต่อกัน และจากการเลือกตัวแปรแรงดันยกกำลังสองเป็นตัวแปรควบคุมซึ่งทำให้สมการแบบจำลองพลวัตมีความเป็นเชิงเส้นจึงทำให้เราสามารถออกแบบวงรอบควบคุมบัลไฟตรงป้อนกลับแบบพีไอ (PI controller) รวมทั้งยังสามารถกำหนดผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ทางเวลาได้โดยง่าย ไดอะแกรมวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้านบนและด้านล่างแสดงได้ตามรูปที่ 3.3



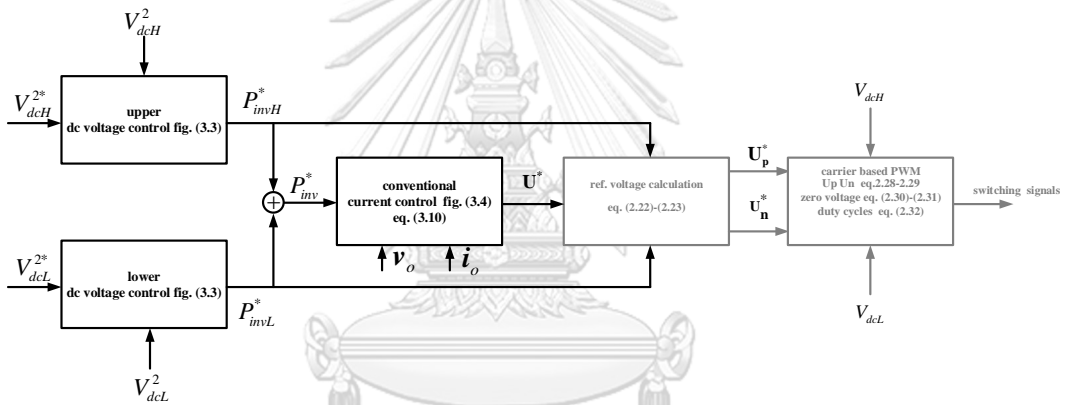
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้านบนและบัลไฟตรงด้านล่าง

จากไดอะแกรมวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงในรูปที่ 3.3 เมื่อพิจารณาค่าคำสั่งของกำลังไฟฟ้ารวมที่บัลไฟตรงที่อินเวอร์เตอร์ต้องจ่าย ( $P^*_{inv}$ ) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้านี้ถูกส่งต่อให้วงรอบควบคุมกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อกำหนดค่าแรงดันคำสั่งด้านออก ( $U^*$ ) ที่ทำให้ได้กระแสหรือกำลังตามต้องการ โดยที่ค่าคำสั่งของกระแสด้านออกในแกน d-q จะกำหนดตามสมการที่ (3.10) (หมายเหตุเนื่องจากวงรอบควบคุมกระแสที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวิธีแบบทั่วไป (conventional current control [1]) ดังนั้นจึงไม่ได้ลงรายละเอียดไว้ ณ ที่นี้ และในส่วนการออกแบบค่าอัตราขยายวงรอบควบคุมกระแสสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีเดียวกับงานวิจัย [7])

$$i_d^* = P_{inv}^* / v_{gd}, \quad i_q^* = 0 \tag{3.10}$$



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมวงรอบควบคุมกระแสบนพื้นฐานกรอบอ้างอิงซิงโครนัส



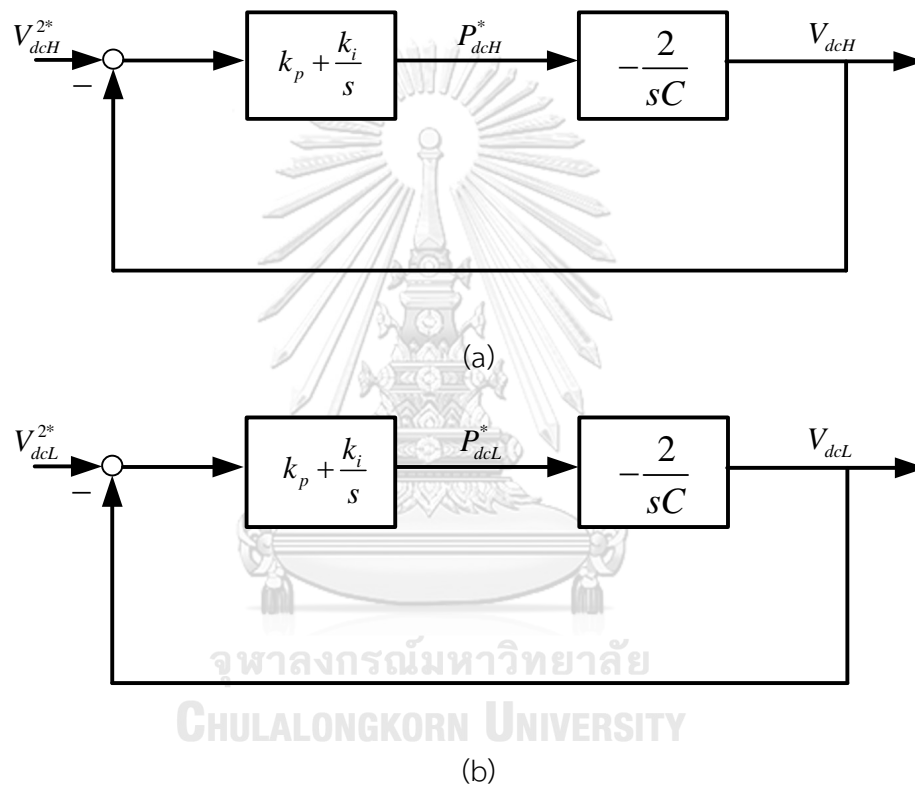
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงร่วมกับส่วนการมอดูเลต

### CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 3.5 จะได้ข้อสรุปว่าเราสามารถแยกควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ได้อย่างอิสระต่อกันและชี้ให้เห็นว่าวงรอบควบคุมแรงดันบัสบนจะเป็นตัวกำหนด ( $P_{invH}^*$ ) ที่ใช้ในการสร้าง ( $U_p^*$ ) และวงรอบควบคุมแรงดันบัสล่างจะเป็นตัวกำหนด ( $P_{invL}^*$ ) ที่ใช้ในการสร้าง ( $U_n^*$ ) และวงรอบควบคุมกระแสจะเป็นตัวกำหนดแรงดันคำสั่งรวมที่ต้องสร้าง ( $U^*$ )

### 3.2 การออกแบบค่าอัตราขยายวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่มีความเป็นเชิงเส้น

จากฟังก์ชันโอนย้ายของระบบในสมการที่ (3.9) สามารถเขียนอยู่ในรูปวงรอบควบคุมวงปิดที่ใช้ในการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวควบคุมได้ตามรูปที่ 3.6 และกำหนดให้  $(G_{cl-x}(s))$  คือฟังก์ชันโอนย้ายวงปิดของวงรอบควบคุมบัลสบนและบัลล่างแสดงได้ตามสมการที่ (3.11) สำหรับระบบควบคุมนี้เราจะเลือกตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) เพื่อให้วงรอบควบคุมมีความคงทนต่อความไม่อุดมคติของระบบทางกายภาพ และสรุปขั้นตอนในการออกแบบค่าอัตราขยายได้ดังหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 วงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงวงปิดที่ใช้สำหรับออกแบบค่าอัตราขยาย (a) วงรอบควบคุมฟังก์ชันโอนย้ายวงปิดบัลสบน (b) วงรอบควบคุมฟังก์ชันโอนย้ายบัลล่าง

$$G_{cl-x}(s) = \frac{s2k_p + 2k_i}{s^2C + 2sk_p + 2k_i} \quad (3.11)$$

เมื่อ  $x=H,L$  โดยที่  $H$  แทนบัลสบนและ  $L$  แทนบัลล่าง

### 3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบค่าอัตราขยายตัวควบคุม

ขั้นตอนที่1 กำหนดให้  $k_i = 0$  ทำให้ฟังก์ชันโอนย้ายวงปิดในสมการที่ (3.9) กลายเป็นระบบอันดับหนึ่ง (first order) แสดงได้ตามสมการที่ (3.12) และเมื่อพิจารณาที่ค่าเวลาคงตัว (time constant ( $\tau$ )) ของฟังก์ชันโอนย้ายในสมการที่ (3.12) จะได้ว่าค่าเวลาคงตัวเป็นไปตามสมการที่ (3.13) สำหรับการเลือกค่าอัตราขยาย ( $k_p$ ) เราจะคำนวณจากช่วงเวลาขาขึ้น (rise time ( $t_r$ )) ของระบบวงปิด ซึ่งโดยทั่วไปเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างเวลาขาขึ้นกับค่าเวลาคงตัว [8] ได้ตามสมการที่ (3.14) เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.13) ลงในสมการที่ (3.14) จะทำให้เราสามารถคำนวณค่า ( $k_p$ ) ได้ตามสมการที่ (3.15) สำหรับค่าเวลาขาขึ้นของวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะเลือกให้ช้ากว่าวงรอบควบคุมกระแสอย่างน้อย 10 เท่า ดังนั้นเราจะเลือกค่าเวลาขาขึ้นเป็น 40ms ( $t_r = 40\text{ms}$ ) เนื่องจากผลตอบสนองวงรอบควบคุมกระแสมีค่าเวลาขาขึ้นเท่ากับ 4ms [7] และค่าตัวเก็บประจุที่บัสไฟตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ  $C = 820\mu\text{F}$  แทนค่าเวลาขาขึ้นและค่าตัวเก็บประจุลงในสมการที่ (3.15) จะได้ค่าอัตราขยายเท่ากับ  $k_p = 0.024 \text{ W/V}^2$

$$G_{cl-x}(s) = \frac{2k_p}{sC + 2k_p} = \frac{1}{s\tau + 1} \quad (3.12)$$

$$\tau = \frac{C}{2k_p} \quad (3.13)$$

$$t_r = 2.2\tau \quad (3.14)$$

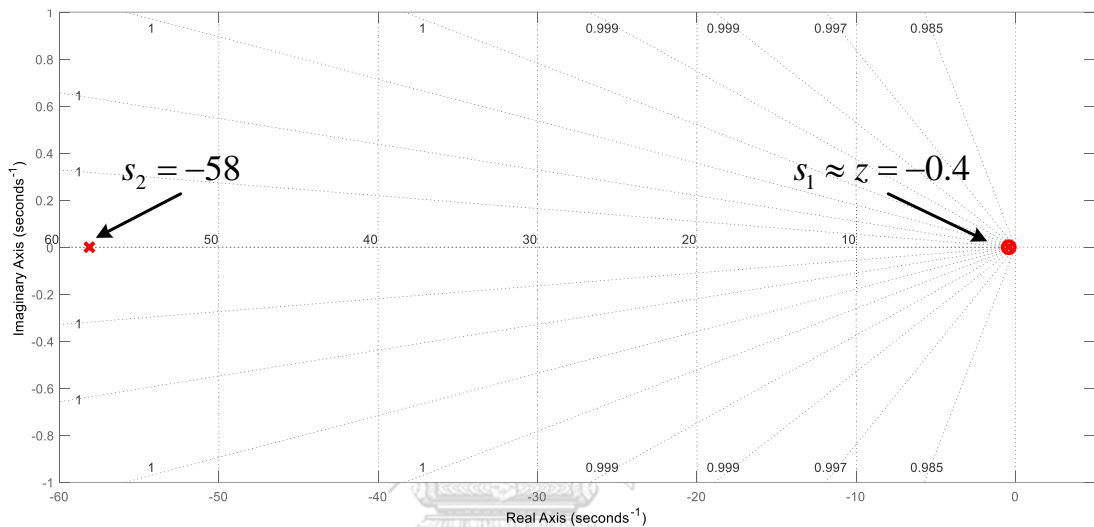
$$k_p = \frac{1.1C}{t_r} \quad (3.15)$$

ขั้นตอนที่2 เลือกค่าอัตราขยายตัวควบคุม (I controller) ซึ่งเราต้องการให้ผลตอบสนองวงปิดยังคงเป็นแบบอันดับหนึ่งเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ 1 ดังนั้นต้องไม่ให้เกิดเฟสล่าช้า (phase lag) ของตัวควบคุมอินทิเกรตเข้ามามีผลทำให้เฟสเหลือ (phase margin) ของระบบวงเปิดลดลง เพราะการที่ค่าเฟสเหลือลดลงจะทำให้ผลตอบสนองวงปิดของระบบมีการแกว่งและเกิดการพุ่งเกิน (over shoot) ซึ่งมีผลทำให้ผลตอบสนองวงปิดไม่ได้อยู่ในรูปแบบอันดับหนึ่ง ดังนั้นเราจะเลือกค่าอัตราขยาย ( $k_i$ ) ที่ทำให้ความถี่หักมุมของตัวควบคุมพีไอ ( $\omega_{c\_pi}$ ) มีค่าน้อยกว่าความถี่หักมุมของฟังก์ชันโอนย้ายระบบวงเปิด ( $\omega_{c\_openloop}$ ) เป็นอย่างน้อย 10 เท่า โดยความสัมพันธ์ความถี่หักมุมของตัวควบคุมพีไอแสดงได้ตามสมการที่ (3.16) ดังนั้นเพื่อให้ผลตอบสนองวงปิดยังคงเป็นระบบอันดับหนึ่ง เราจะเลือกความถี่หักมุมของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ ( $\omega_{c\_pi} = 0.4\text{rad/s}$ ) และแทนค่าอัตราขยาย ( $k_p$ ) จากขั้นตอนที่ 1 ลงในสมการที่ (3.16) จะได้ค่าอัตราขยายเท่ากับ ( $k_i = 0.01 \text{ W/V}^2$ )

$$\omega_{c\_pi} = \frac{k_i}{k_p} \quad (3.16)$$

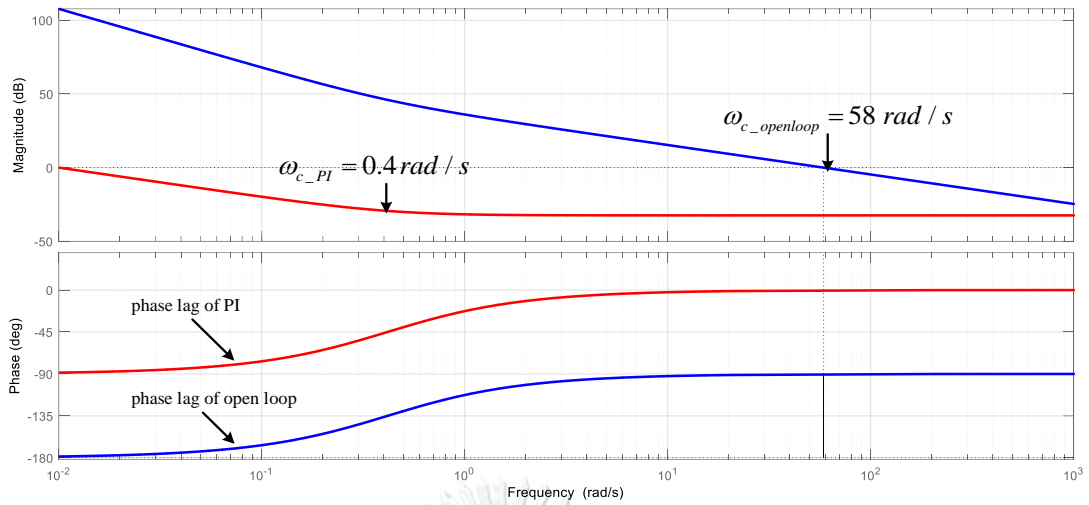
### 3.3 คุณลักษณะวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงและการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากการออกแบบค่าอัตราขยายของวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ค่าอัตราขยายที่คำนวณได้จะทำให้ได้ผลตอบสนองวงปิดของระบบเป็นแบบอันดับหนึ่ง (first order) โดยมีขั้ว (pole) เฉพาะส่วนจริงเท่านั้นซึ่งตรงตามเงื่อนไขที่ออกแบบพิจารณาได้จากรูปที่ 3.7

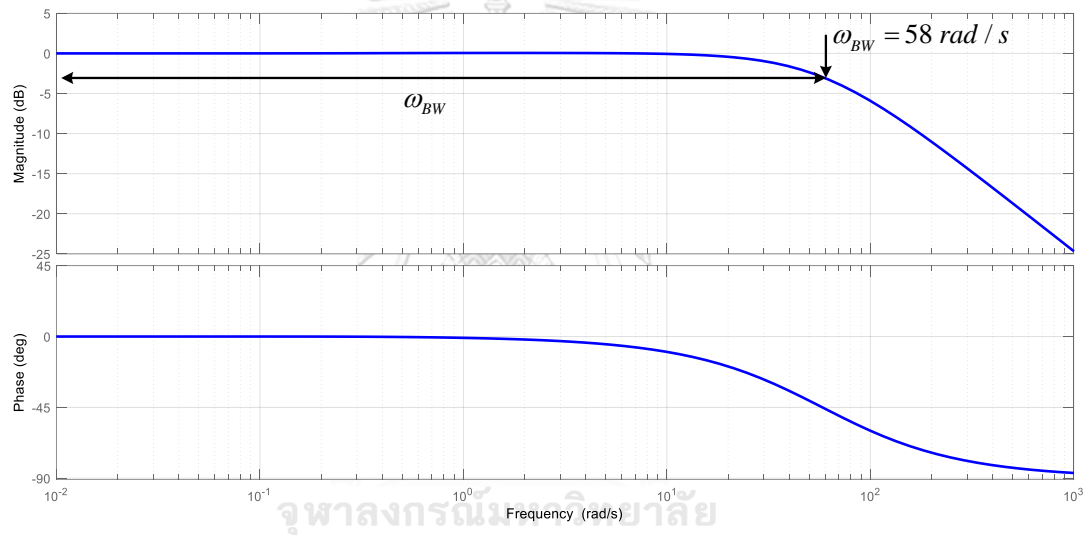


รูปที่ 3.7 ตำแหน่งขั้ว (pole) และศูนย์ (zero) วงปิดของระบบควบคุมบัลไฟตรงตามทีออกแบบ

เมื่อพิจารณาที่ผลตอบสนองทางความถี่เปิดในรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าผลของเฟสล่าช้าของตัวควบคุมพีไอมีค่าเป็นศูนย์ที่ความถี่หักมุมของระบบวงเปิด ( $\omega_{c\_openloop}$ ) และจะสังเกตได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ปิดเป็นแบบ (first order lag) ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ออกแบบไว้ เมื่อพิจารณาในด้านความถี่เสถียรภาพของระบบวงปิด เราจะพิจารณาที่ความถี่หักมุมของระบบวงเปิดซึ่งพบว่ามีค่าเฟสเหลือ (phase margin ( $P_m$ )) เท่ากับ ( $P_m = 89^\circ$ ) ซึ่งให้เห็นว่าระบบวงปิดมีเสถียรภาพ และมีแถบความถี่กว้างความถี่เท่ากับ 58rad/s (band width ( $\omega_{BW}$ )) แสดงได้ในผลตอบสนองทางความถี่ปิดในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางความถี่เปิดของวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงตามที่ออกแบบ



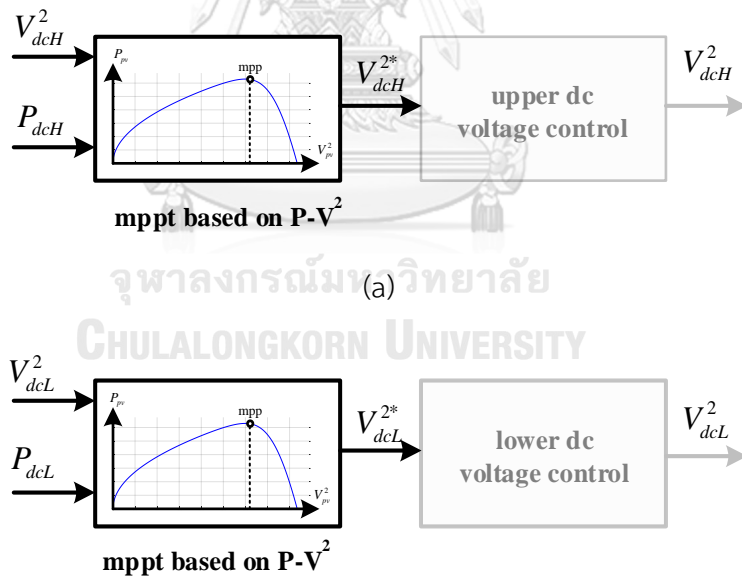
รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองทางความถี่เปิดของวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงตามที่ออกแบบ

## บทที่ 4

### การติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

#### 4.1 คุณสมบัติกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

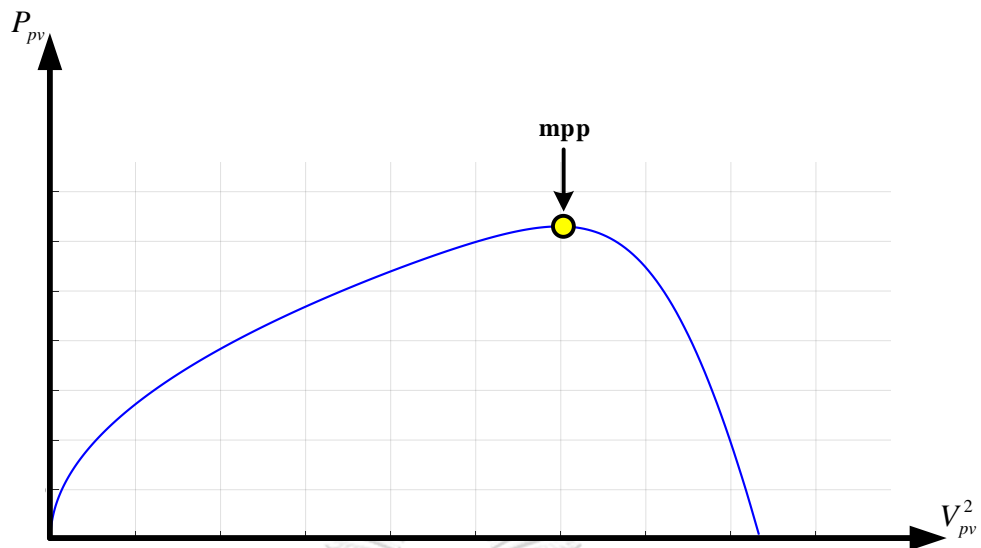
จากการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนตัวแปรแรงดันยกกำลังสองที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าแรงดันคำสั่งยกกำลังสองของวงรอบควบคุมบัสไฟตรงทั้งบัสบนและบัสล่างจะถูกกำหนดโดยส่วนของการติดตามจุดกำลังสูงสุด (MPPT) แสดงได้ตามรูปที่ 4.1 ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับค่าแรงดันคำสั่งยกกำลังสองของวงรอบควบคุมบัสไฟตรง การติดตามจุดกำลังสูงสุดก็ควรที่จะเปลี่ยนจากการพิจารณาบนความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าต่อแรงดันของแผงเซลล์ (P-V curve) มาอยู่บนความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์ (P-V<sup>2</sup>) แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ตามรูปที่ 4.2



(b)

รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง (a) บล็อกไดอะแกรมการติดตามจุดกำลังสูงสุดบัสบน (b) บล็อกไดอะแกรมการติดตามจุดกำลังสูงสุดบัสล่าง





รูปที่ 4.2 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากมุมมองความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.2 หากเราพิจารณานิยามให้ ( $G_{p-v^2}$ ) คือค่าความนำไฟฟ้าบนพื้นฐานความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์ (conductance based on P-V<sup>2</sup> curve) แสดงได้ตามสมการที่ (4.1)

$$G_{p-v^2} \triangleq \frac{P_{pv}}{V_{pv}^2} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) จะทำให้เรานิยามค่าของความชันของกราฟกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองในรูปที่ 4.2 เป็นค่าความนำไฟฟ้าเชิงพลวัต (dynamic conductance) แสดงได้ตามสมการที่ (4.2)

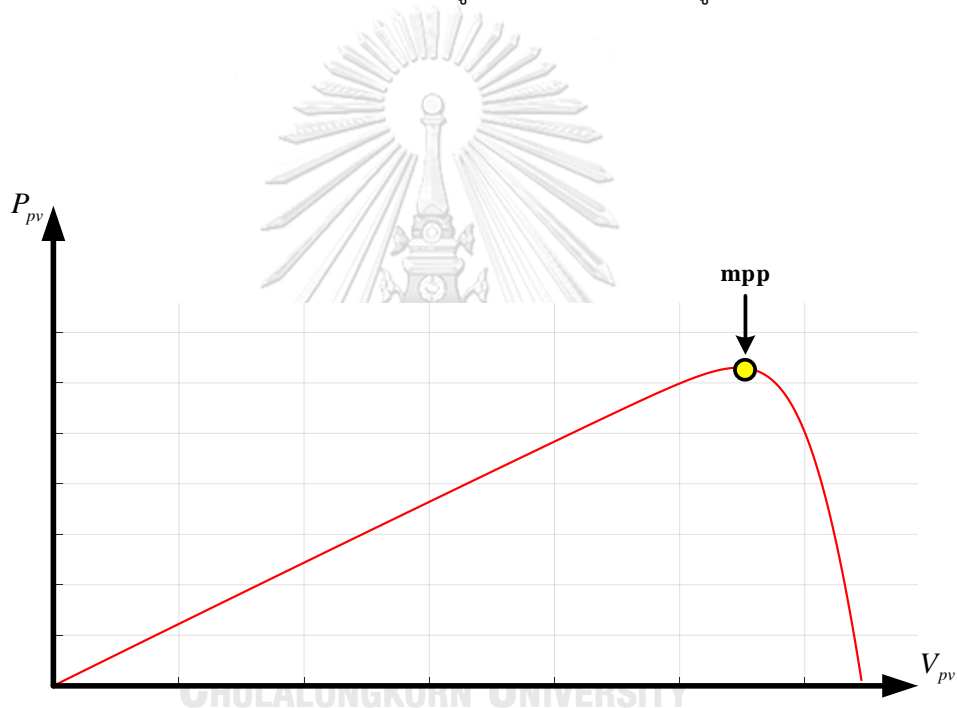
$$\left[ \begin{array}{c} \text{dynamic} \\ \text{conductance} \end{array} \right] \triangleq \left( \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}^2} \right) \quad (4.2)$$

และเมื่อเราพิจารณาที่จุดกำลังสูงสุดบนความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองจะพบว่าที่จุดทำงานนี้ ค่าความนำไฟฟ้าเชิงพลวัตจะมีค่าเท่ากับศูนย์แสดงได้ตามสมการที่ (4.3)

$$\left[ \begin{array}{c} \text{dynamic} \\ \text{conductance} \end{array} \right] = \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}^2} = 0 \quad \text{at mpp} \quad (4.3)$$

#### 4.2 การติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง

จากอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์ โดยทั่วไปแล้วจะมองอยู่บนพื้นฐานความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันที่แผงเซลล์ (P-V curve) แสดงได้ตามรูปที่ 4.3 โดยที่เทคนิคการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ผ่านมานั้นมีหลากหลายวิธี หนึ่งในวิธีเหล่านั้นที่เป็นที่นิยมใช้กันมากคือวิธีการติดตามแบบรบกวนและสังเกต (perturb and observe (P&O)) และวิธีการติดตามแบบค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (incremental conductance (INC)) [9],[10] หากเราพิจารณาการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O เงื่อนไขที่บอกว่าจุดทำงานอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดคือ ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าต่อแรงดันแผงเซลล์ในรูปที่ 4.3 มีค่าเท่ากับศูนย์และแสดงได้ตามสมการที่ (4.4)

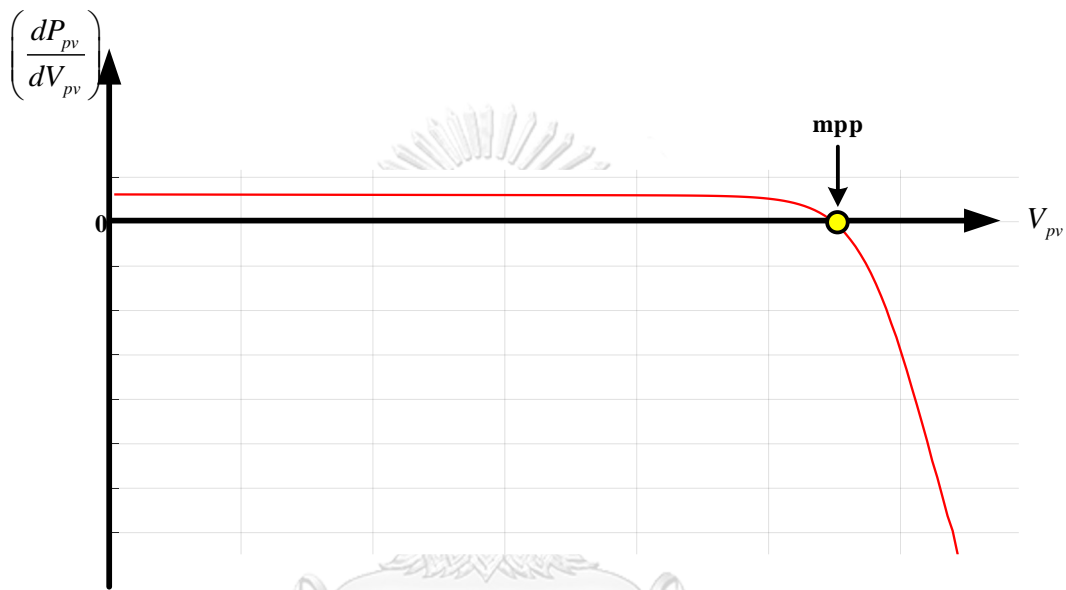


รูปที่ 4.3 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \text{ at mpp} \quad (4.4)$$

สำหรับเงื่อนไขการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O ที่ได้กล่าวไปข้างต้น เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ของเงื่อนไขที่ใช้ในการติดตามจุด mpp ต่อแรงดันแผงเซลล์ได้ตามรูปที่ 4.4 ที่ซึ่งจากรูปที่ 4.4 จะอธิบายได้ว่าวิธี P&O จะอาศัยการปรับแรงดันแผงเซลล์ ( $V_{pv}$ ) โดยหากค่าความชันน้อยกว่า

ศูนย์  $\left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0\right)$  การติดตามจุดกำลังสูงสุดจะสั่งเพิ่มแรงดันที่แผงเซลล์ ในทางกลับกันหากค่าความชันมากกว่าศูนย์  $\left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0\right)$  การติดตามจะสั่งลดแรงดันที่แผงเซลล์ ท้ายสุดแล้วจะสรุปได้ว่าวิธี P&O จะปรับแรงดันที่แผงเซลล์เพื่อให้ค่าความชันเป็นศูนย์  $\left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0\right)$  เมื่อค่าความชันเท่ากับศูนย์ก็แสดงถึงจุดทำงานอยู่ที่จุด mpp



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขในการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี P&O

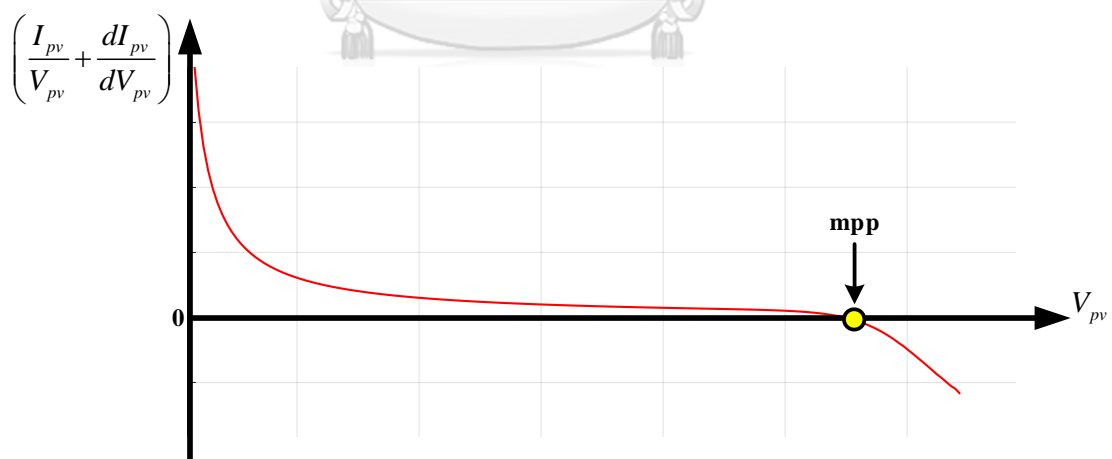
สำหรับกรณีการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี INC วิธีนี้จะอาศัยการปรับแรงดันแผงเซลล์เพื่อให้จุดทำงานเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดโดยมีเงื่อนไขคือ วิธี INC เริ่มต้นด้วยเงื่อนไขที่ว่าที่จุดกำลังสูงสุดค่าความชันของกราฟกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันแผงเซลล์ในรูปที่ 4.3 มีค่าเป็นศูนย์ โดยที่วิธี INC จะเขียนสมการที่ (4.4) ให้อยู่ในรูปตัวแปรของกระแสและแรงดันแผงเซลล์ตามสมการที่ (4.5)

$$\frac{1}{V_{pv}} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{1}{V_{pv}} \frac{d(I_{pv} V_{pv})}{dV_{pv}} = \left[ \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \right] = 0 \text{ at mpp} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.5) แสดงให้เห็นว่าวิธี INC จะนิยามเทอมในวงเล็บ [ ] โดยจะนิยามค่า  $(I_{pv} \triangleq G_{i-v} V_{pv})$  โดยที่  $(G_{i-v})$  คือ ค่าความนำไฟฟ้าบนมุมมองของความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าต่อแรงดันแผงเซลล์ (conductance based on I-V curve) แสดงได้ตามสมการที่ (4.6)

$$G_{i-v} \triangleq \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.6) จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของเทอม  $\left(\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}\right)$  ในสมการที่ (4.5) เป็นค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น  $\left(\left[\text{incremental}\right] \triangleq \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}\right)$  ซึ่งค่านี้จะถูกนิยามจากกราฟความสัมพันธ์ (I-V curve) ในการติดตามจุดกำลังสูงสุดสำหรับวิธีนี้จะใช้การคำนวณผลรวมระหว่างค่าความนำไฟฟ้า  $(G_{i-v})$  และค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น  $\left(\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}\right)$  เงื่อนไขของวิธี INC แสดงได้ตามรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าวิธี INC จะปรับแรงดันแผงเซลล์  $(V_{pv})$  เพื่อให้ผลรวมระหว่างค่าความนำไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามการที่วิธี INC บอกว่าที่จุดกำลังสูงสุดค่าผลรวมระหว่างค่าความนำไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเท่ากับศูนย์ตามสมการที่ (4.5) แต่ปริมาณดังกล่าวนี้ไม่ได้สะท้อนถึงค่าใดๆทางกายภาพบนความสัมพันธ์ของ (P-V curve) จากวิธี P&O และ INC ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีนี้ใช้เงื่อนไขในการหาจุด mpp ที่ต่างกันซึ่งแสดงได้ตามรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขในการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี INC

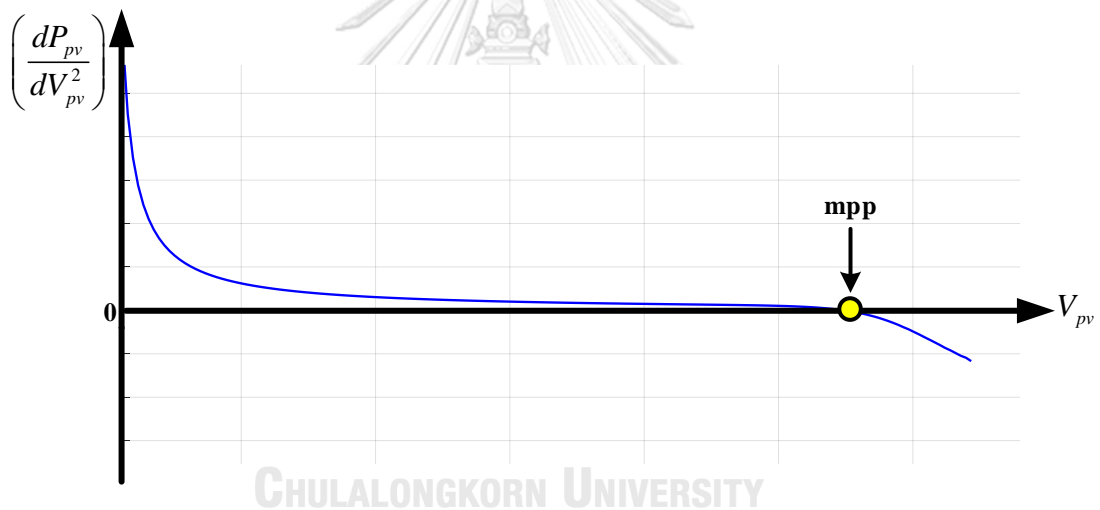
จากวิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ได้กล่าวมาข้างต้นหากเราเปลี่ยนมาพิจารณาโดยใช้ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์ในรูปที่ 4.2 โดยที่เราจะเขียนสมการ

ที่ 4.3 ได้ใหม่ตามสมการที่ (4.7)-(4.9) จะเห็นได้ว่าท้ายสุดแล้วค่าในวงเล็บ [ ] ของสมการที่ (4.9) จะตรงกับผลรวมระหว่างค่าความนำไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าค่าผลรวมดังกล่าวก็คือค่าความนำไฟฟ้าเชิงพลวัต (dynamic conductance) และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้าเชิงพลวัตต่อแรงดันแผงเซลล์ได้ตามรูปที่ 4.6

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}^2} = \frac{(dP_{pv}/dV_{pv})}{(dV_{pv}^2/dV_{pv})} = \frac{1}{2V_{pv}} \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \quad (4.7)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(I_{pv}V_{pv})}{dV_{pv}} = \left[ I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \right] \quad (4.8)$$

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}^2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \right] \quad (4.9)$$



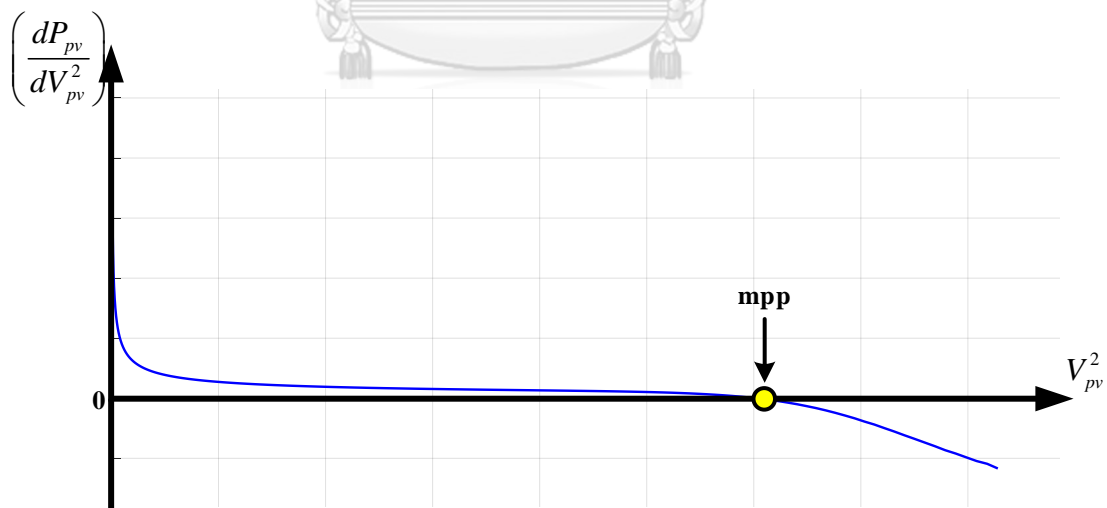
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าเชิงพลวัตต่อแรงดันแผงเซลล์

จากรูปที่ 4.6 และสมการที่ 4.9 ชี้ให้เห็นว่าหากเราใช้เทอมของค่าความนำไฟฟ้าเชิงพลวัต  $\left( \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}^2} \right)$  เป็นเงื่อนไขในการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยการปรับแรงดันแผงเซลล์เพื่อให้ค่าความนำไฟฟ้าเชิงพลวัตเป็นศูนย์จากเงื่อนไขนี้จะพบว่า วิธีนี้จะเทียบเท่ากับการติดตามด้วยวิธี INC เนื่องจากเทอมในวงเล็บ [ ] ของสมการที่ (4.5) เป็นค่าเดียวกันกับค่าความนำไฟฟ้าเชิงพลวัตในสมการที่ (4.9) เพียงแต่จะแตกต่างกันคือค่าคงที่  $\frac{1}{2}$  เท่านั้น นอกจากนี้แล้วรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ก็ยังแสดงให้เห็นว่ากราฟมีลักษณะที่ตรงกันอีกด้วย เราสามารถสรุปความแตกต่างทั้งสองมุมมองนี้ได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการติดตามจุดกำลังสูงสุดระหว่างความสัมพันธ์ของ P-V และ P-V<sup>2</sup>

P-V (Curve)	P-V <sup>2</sup> (Curve)
slope $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ ไม่มีความหมายทางกายภาพ	slope $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}^2}$ เป็นค่า dynamic conductance
เงื่อนไขการติดตามจุด mpp ด้วยวิธี P&O คือ $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$	เงื่อนไขการติดตามจุด mpp ด้วยวิธี P&O คือ $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}^2} = 0$
เงื่อนไขการติดตามจุด mpp ด้วยวิธี INC คือ $\left[ \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \right] = 0$	เงื่อนไขการติดตามจุด mpp $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}^2} = 0$ เทียบเท่ากับวิธีของ INC

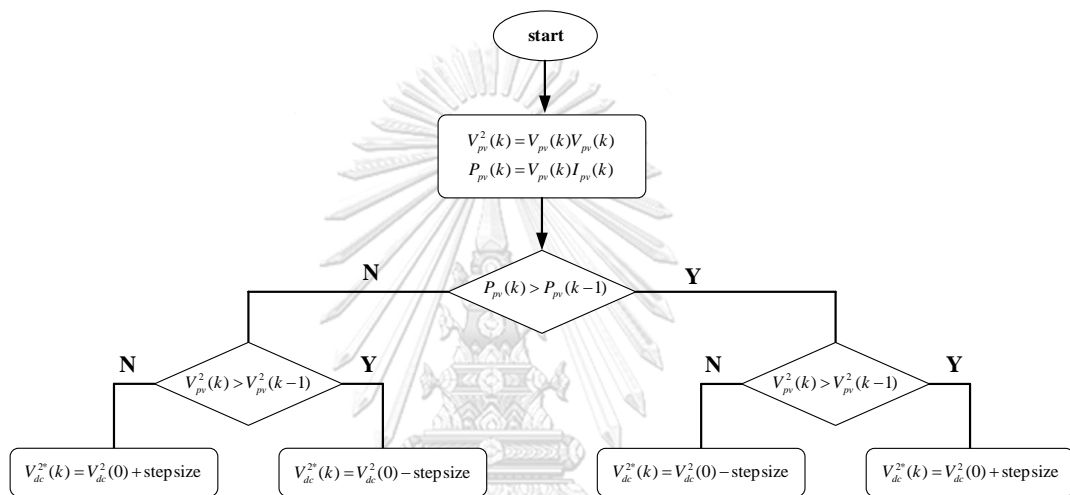
จากมุมมองความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์ ซึ่ให้เห็นถึงความหมายทางกายภาพเชิงวิศวกรรมที่ตรงไปตรงมาในแง่ของค่าความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้า ได้ดีกว่ามุมมองบนความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าต่อแรงดันแผงเซลล์แบบทั่วไป ท้ายสุดเพื่อให้ระบบการติดตามจุดทำงานสอดคล้องกับวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนตัวแปรแรงดันยกกำลังสองตามรูปที่ 4.1 ดังนั้นจากเงื่อนไขในการติดตามจุดทำงานในรูปที่ 4.6 จะถูกเปลี่ยนมาพิจารณาบนฐานแรงดันยกกำลังสองแสดงได้ตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขในการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนฐานตัวแปรแรงดันยกกำลังสอง

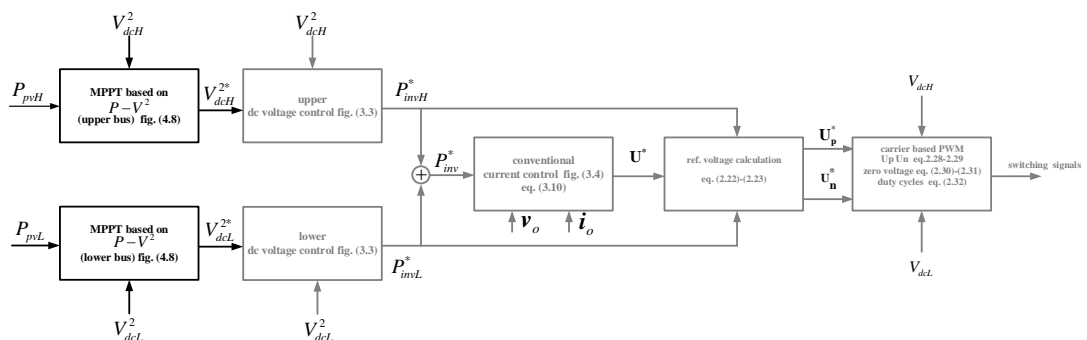
### 4.3 การติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองด้วยวิธีรบกวนและสังเกต (P&O based on P-V<sup>2</sup>)

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าระบบการติดตามจุดกำลังสูงสุดจะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันคำสั่งยกกำลังสองให้วงรอบควบคุมบัสไฟตรงซึ่งวิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุดในงานวิจัยนี้ เราจะเลือกวิธีแบบรบกวนและสังเกตบนพื้นฐานความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองซึ่งสรุปเป็นขั้นตอนของอัลกอริทึมได้ตามไดอะแกรมในรูปที่ 4.8 กำหนดให้  $k$  คือช่วงเวลาการชั่งตัวอย่าง (sampling time)



รูปที่ 4.8 อัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตบนพื้นฐาน P-V<sup>2</sup> curve

ท้ายสุดแล้วเราจะแสดงระบบควบคุมทั้งหมดของอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์สามระดับในงานวิจัยนี้ได้ตามรูปที่ 4.9 โดยที่อัลกอริทึมการติดตาม mppt จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันคำสั่งยกกำลังสองให้กับวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง



รูปที่ 4.9 ไดอะแกรมระบบการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง

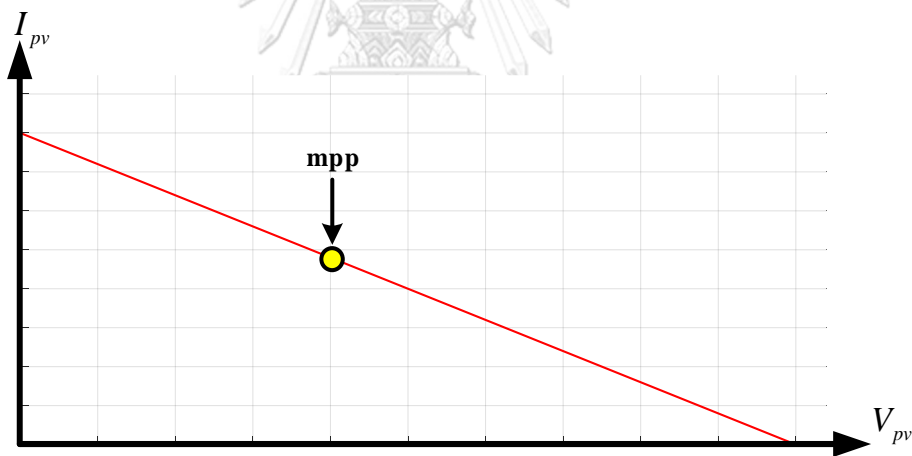
## บทที่ 5

### การทดสอบระบบที่นำเสนอ

#### 5.1 แหล่งจ่ายไฟตรงที่มีคุณลักษณะแรงดันและกระแสเทียบเคียงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับใช้

##### ทดสอบ

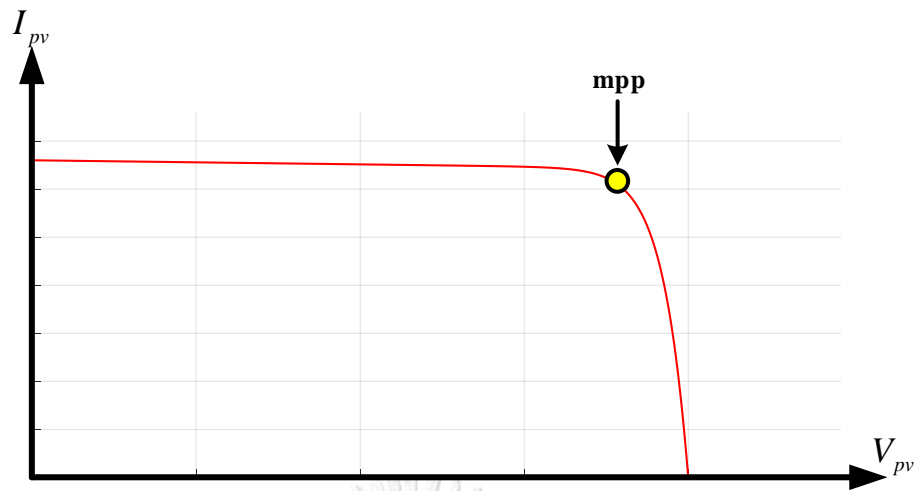
ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ระบบเดียวกับของงานวิจัยที่ [7] โดยมีการปรับเปลี่ยนในส่วนของวงจรด้านบัสไฟตรง เนื่องจากทฤษฎีที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้วงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์สองชุดเพื่อใช้ทดสอบในการควบคุมแยกจุดทำงานกำลังสูงสุดในแต่ละบัสไฟตรง แต่เนื่องจากในห้องปฏิบัติการวงจรจำลองแผงเซลล์ (PV-simulator) ในช่วงกำลังพัฒนาและยังไม่สมบูรณ์พร้อมใช้งาน ดังนั้นเพื่อเป็นการทดสอบแนวคิดที่นำเสนอสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงต่ออนุกรมกับตัวต้านทานแทนวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เราจะได้คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันตามรูปที่ 5.1



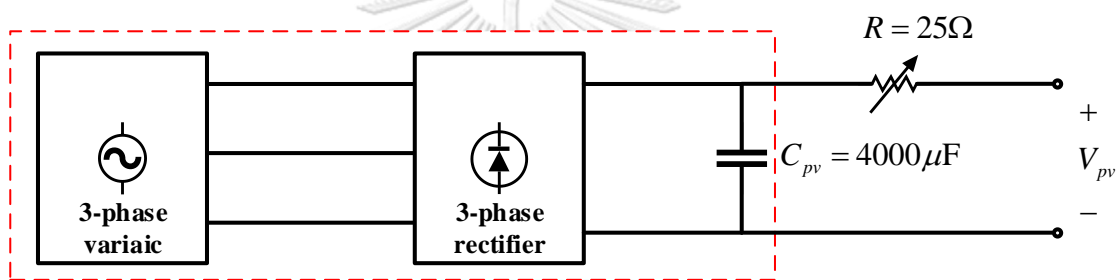
รูปที่ 5.1 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าเราสามารถใช้งานแหล่งจ่ายไฟตรงเชื่อมต่อกับตัวต้านทานแทนวงจรจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยที่คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันที่ได้จากวงจรนี้จะมีจุดกำลังสูงสุด (mpp) ให้ใช้ในการทดสอบเช่นเดียวกับคุณลักษณะกระแสต่อแรงดันแผงเซลล์จริงที่แสดงในรูปที่ 5.2 สำหรับการสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟตรงที่ใช้ทดสอบนี้แสดงได้ตามรูปที่ 5.3





รูปที่ 5.2 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์

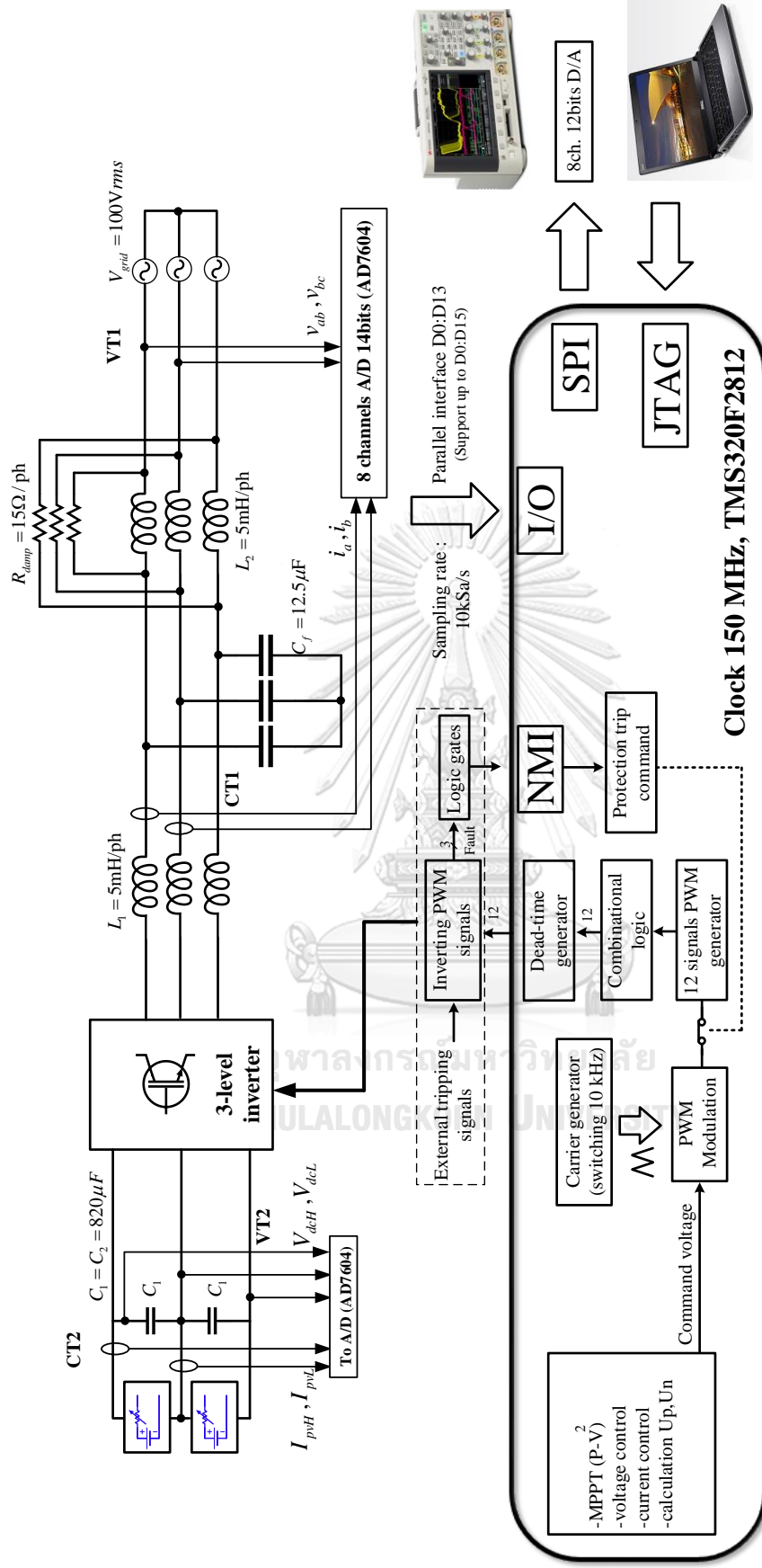


รูปที่ 5.3 วงจรเทียบเคียงแหล่งจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับแต่ละบัสไฟตรง

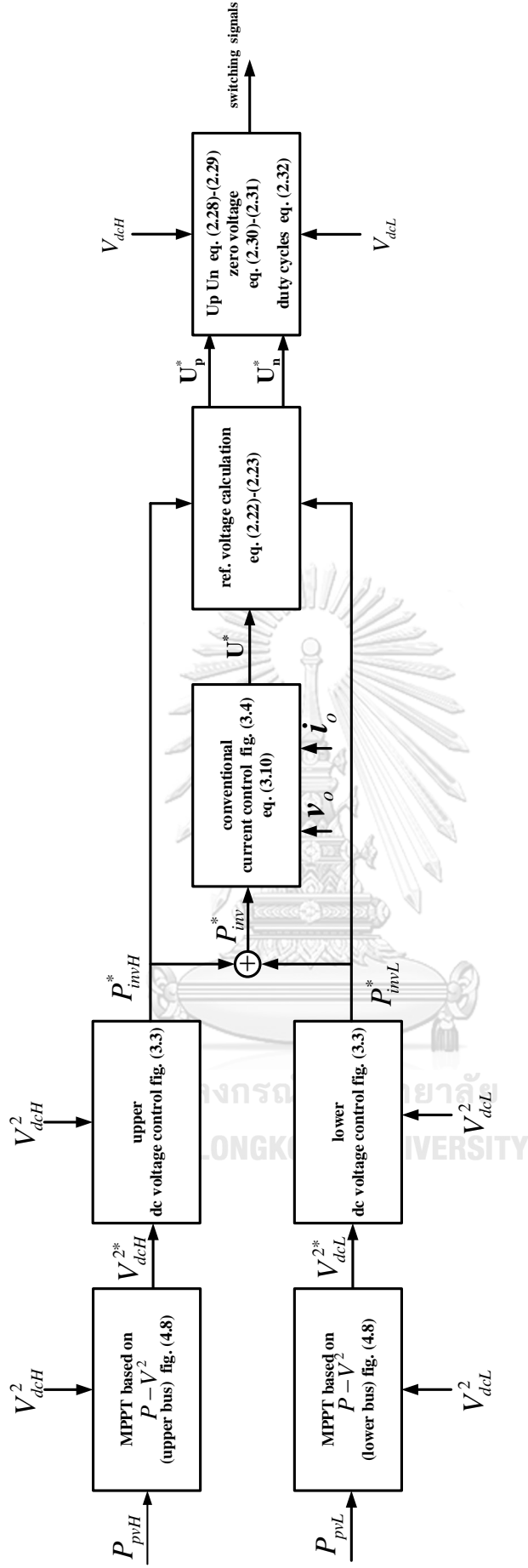
จากรูปที่ 5.3 เราใช้หม้อแปลงปรับค่าได้ต่อกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสเพื่อเรียงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ค่าแรงดันไฟตรงด้านออกของวงจรเรียงกระแสจะมีการกระเพื่อมด้วยความถี่ 300Hz ดังนั้นเพื่อต้องการให้ค่าแรงดันไฟตรงที่ได้เรียบใกล้เคียงแหล่งจ่ายไฟตรงในอุดมคติมากที่สุด เราจึงใส่ตัวเก็บประจุ  $C_{pv}$  เพื่อกรองแรงดันให้เรียบใกล้เคียงไฟตรงในอุดมคติ จากรูปที่ 5.3 ในส่วนของเส้นปะจะเทียบเท่าแหล่งจ่ายไฟตรงที่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งเราใช้เป็นตัวกำหนดค่าแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์ ( $V_{oc}$ ) โดยที่เราสามารถปรับแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์ได้จากการปรับที่ตัวหม้อแปลงปรับค่าได้ และตัวต้านทานปรับค่าได้ถูกนำมาต่ออนุกรมเพื่อเป็นตัวกำหนดกระแสลัดวงจรของแผงเซลล์ที่ต้องการ ( $I_{sc}$ ) ในการทดสอบทุกเงื่อนไขในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรในรูปที่ 5.3 เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงในแต่ละบัสของอินเวอร์เตอร์สามระดับ และภาพรวมของระบบทดสอบและระบบควบคุมทั้งหมดแสดงได้ตามรูปที่ 5.4-5.5

**หมายเหตุ** ข้อจำกัดของวงจรแหล่งจ่ายไฟตรงต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟตรงแทนวงจรจำลองแผงเซลล์คือ เนื่องจากแรงดันต้านออกของวงจรนี้ได้มาจากวงจรเรียงกระแสในกรณีวงจรจ่ายโหลดที่พิกัดหรือวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานกำลังสูงสุด  $mpp$  จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อม  $C_{pv}$  ในรูปที่ 5.3 มีการกระเพื่อมซึ่งแรงดันที่จุดนี้เป็นตัวกำหนดแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์ ดังนั้นจึงมีผลทำให้แรงดันเปิดวงจรแผงเซลล์มีการกระเพื่อมด้วย จากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้แรงดัน ที่จุด  $mpp$  ไม่นิ่งมีการกระเพื่อม จากข้อจำกัดนี้จะทำให้เราเห็นพฤติกรรมการทำงานในช่วงสภาวะอยู่ตัวในผลการทดลองการติดตามจุด  $mpp$  ในบางกรณีมีการแกว่งตามค่าแรงดันเปิดวงจรเช่น ในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.10 เป็นต้น





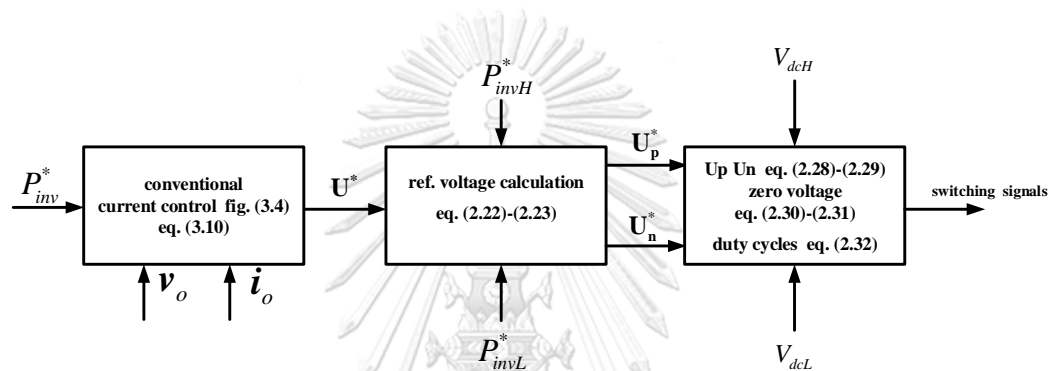
รูปที่ 5.4 ระบบอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์สามระดับที่ใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับงานวิจัยนี้ [7]



รูปที่ 5.5 ไดอะแกรมระบบควบคุมทั้งหมดของอินเวอร์เตอร์เซลล์แสงอาทิตย์สามระดับที่ใช้ในการจำลองและทดลองในงานวิจัยนี้

## 5.2 การทดสอบการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์เพื่อแยกควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรง

สำหรับในหัวข้อนี้เราจะทำการทดสอบเฉพาะส่วนของการมอดูเลตเพื่อแสดงให้เห็นถึงการแบ่งแรงดันคำสั่งในการควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรง ดังนั้นเพื่อให้เห็นกลไกการมอดูเลตเราจะตัดวงจรควบคุมในส่วนแรงดันบัสไฟตรงและการติดตามจุดกำลังสูงสุดออกก่อน วงจรการควบคุมสำหรับการทดสอบนี้จะนำไปตามรูปที่ 5.6 ค่ากำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมด ( $P_{inv}^*$ ) จะถูกสมมุติว่ามาจากวงจรควบคุมแรงดันบัสไฟตรง การทดสอบจะแบ่งออกเป็นสามเงื่อนไขตามหัวข้อย่อยที่ 5.2.1-5.2.3



รูปที่ 5.6 ไดอะแกรมระบบควบคุมสำหรับการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.1-5.2.3

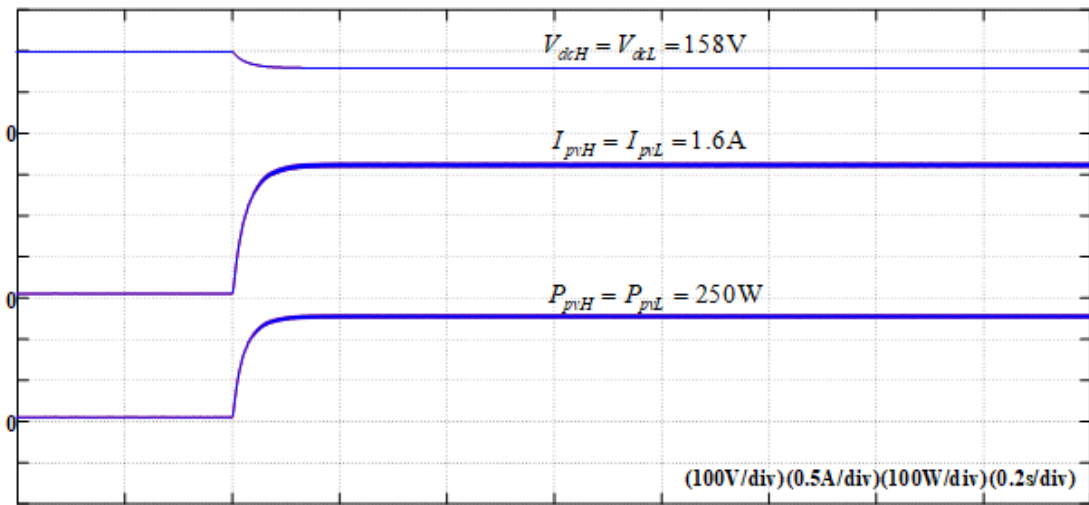
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.1-5.2.3

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
กำลังพิกัดรวมของแต่ละสตริ่ง	400	W/bus
แรงดันที่จุด MPP	100	V/bus
กระแสไฟฟ้าที่จุด MPP	4	A/bus
แรงดันเปิดวงจรของสตริ่ง	200	V/bus
กระแสลัดวงจรของสตริ่ง	8	A/bus
แรงดันที่โครงข่าย	100	$V_{L-L}$

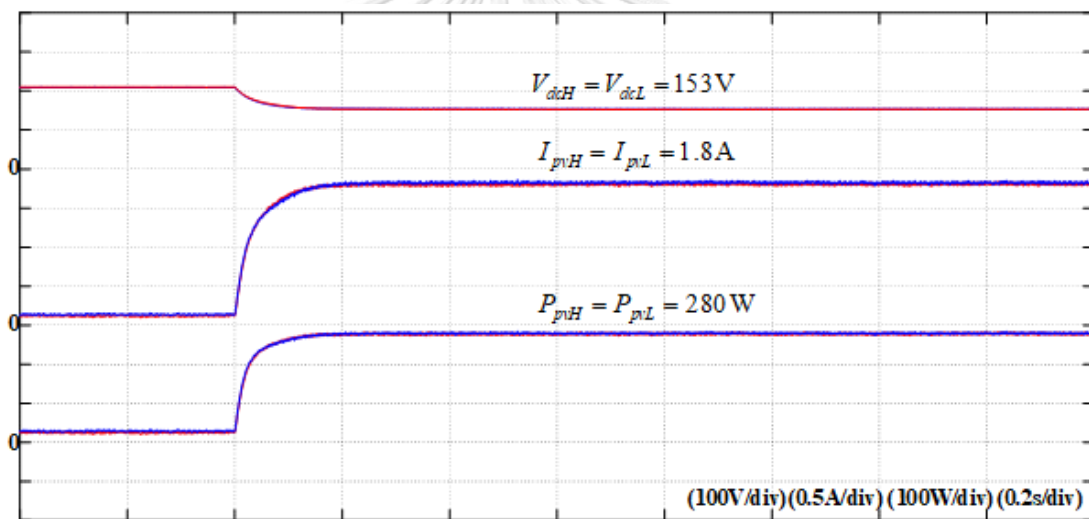
### 5.2.1 การทดสอบการมอดูเลตเพื่อแบ่งสัดส่วนควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรงกรณีควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าบัสบนและบัสล่างเท่ากัน

สำหรับเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสบนและบัสล่างจ่ายออกเท่ากันโดยมีค่าเท่ากับ ( $P_{invH}^* = 250W$  ,  $P_{invL}^* = 250W$ ) และค่ากำลังไฟฟ้ารวมคือ ( $P_{inv}^* = 500W$ ) จะได้ค่ากระแสคำสั่งให้กับวงรอบควบคุมกระแสเท่ากับ ( $i_d^* = \frac{500W}{100V} = 5A$  ,  $i_q^* = 0A$ ) และแบ่งสัดส่วนแรงดันคำสั่งเป็น ( $U_p^* = 0.5U^*$  ,  $U_n^* = 0.5U^*$ ) หมายเหตุ ในการแสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงจะถูกแสดงด้วยค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์จ่ายแทน เนื่องจากว่าในวงจรทดสอบเรามีจำนวนตัวตรวจจับกระแสจำกัด (current sensor) ดังนั้นเราจึงใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.1)-(3.2) โดยมองว่าที่สถานะอยู่ตัวค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสไฟตรง

จากรูปที่ 5.7 (a),(b) แสดงให้เห็นว่าค่าสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงมีค่าสัดส่วนระหว่างบัสบนและบัสล่างที่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัดส่วนแรงดันอ้างอิงที่ใช้สำหรับมอดูเลตที่มีค่าสัดส่วนระหว่างบัสบน ( $U_p$ ) และบัสล่าง ( $U_n$ ) ที่เท่ากันโดยพิจารณาได้จากรูปที่ 5.7 (c),(d) เมื่อพิจารณาเชิงรายละเอียดจะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสในผลจำลองมีค่าตรงตามคำสั่งคือ 250W/bus แต่ในผลทดลองนั้นมีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 280W/bus ค่าที่แตกต่างกันมาจากในระบบทดสอบจริงอินเวอร์เตอร์มีกำลังสูญเสียทำให้อินเวอร์เตอร์จะดึงกำลังไฟฟ้าจากบัสไฟตรงมากกว่าค่าที่เรากำหนด แต่ในด้านสัดส่วนการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากแต่ละบัสยังคงถูกต้องตามการแบ่งแรงดันอ้างอิงในการมอดูเลต

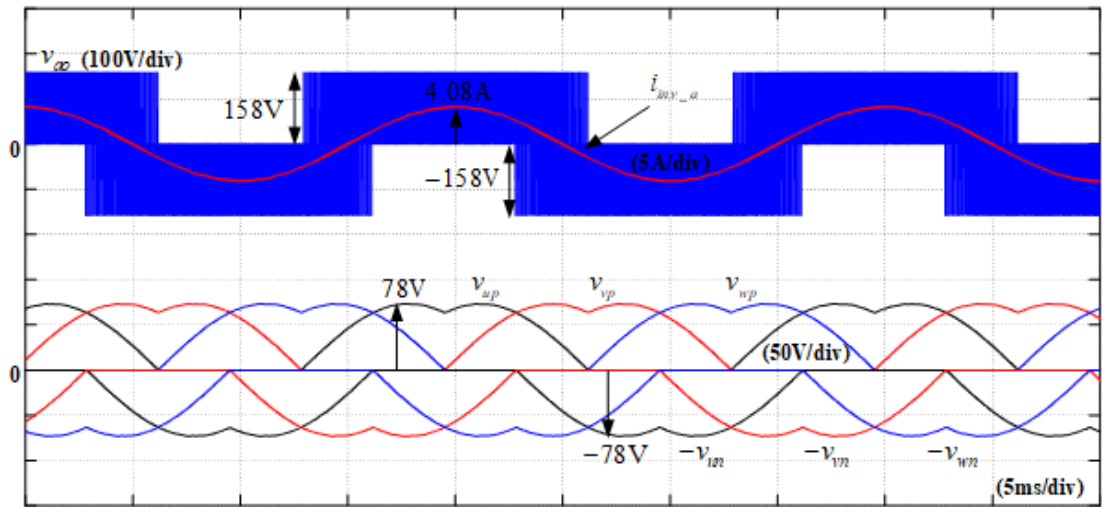


(a) แรงดันบัสไฟตรง, กระแสที่สตริ่ง, และกำลังไฟฟ้าที่สตริ่งในผลจำลองกรณี  $U_p^* = U_n^*$

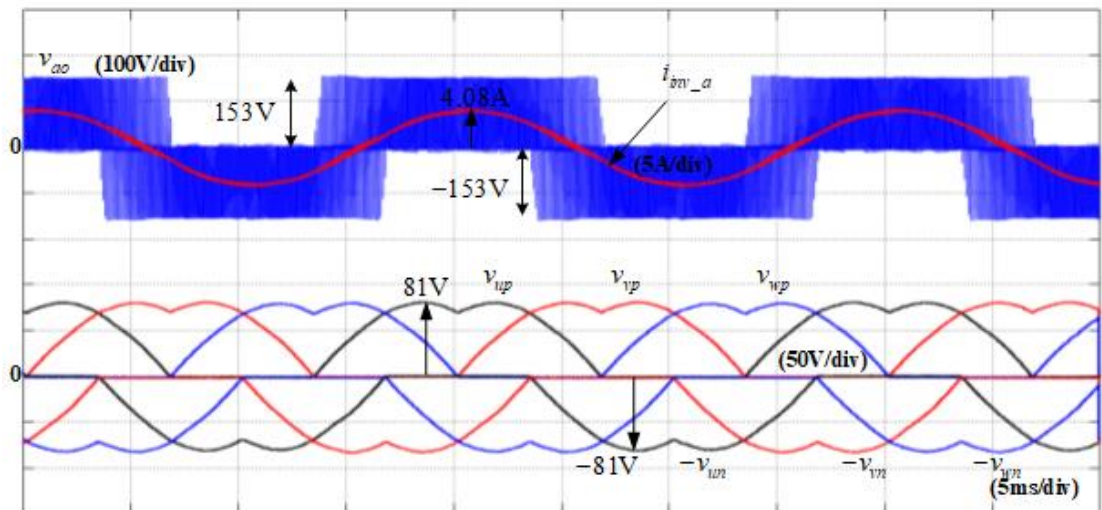


(b) แรงดันบัสไฟตรง, กระแสที่สตริ่ง, และกำลังไฟฟ้าที่สตริ่งในผลทดลองกรณี  $U_p^* = U_n^*$

รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.1 กรณีแบ่ง  $U_p^* = U_n^*$



(c) แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์เฟส a ,กระแสไลน์เฟส a ,และแรงดันอ้างอิงบัสบน-ล่างในผล  
จำลองกรณี  $U_p^* = U_n^*$



(d) แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์เฟส a ,กระแสไลน์เฟส a ,และแรงดันอ้างอิงบัสบน-ล่างในผล  
ทดลองกรณี  $U_p^* = U_n^*$

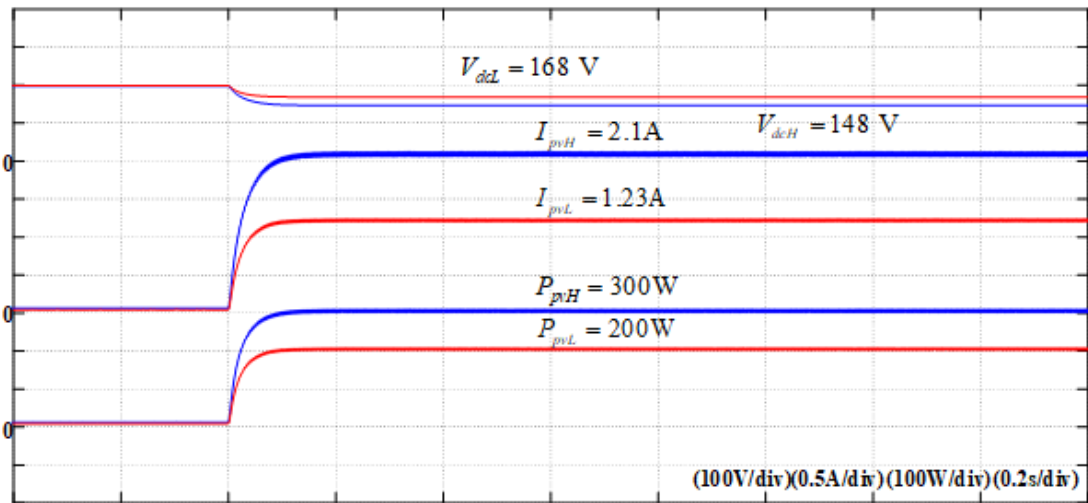
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.1 กรณีแบ่ง  $U_p^* = U_n^*$  (ต่อ)



## 5.2.2 การทดสอบการมอดูเลตเพื่อแบ่งสัดส่วนควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรงกรณีควบคุมให้กำลังไฟฟ้าบัสบนจ่ายมากกว่าบัสล่าง

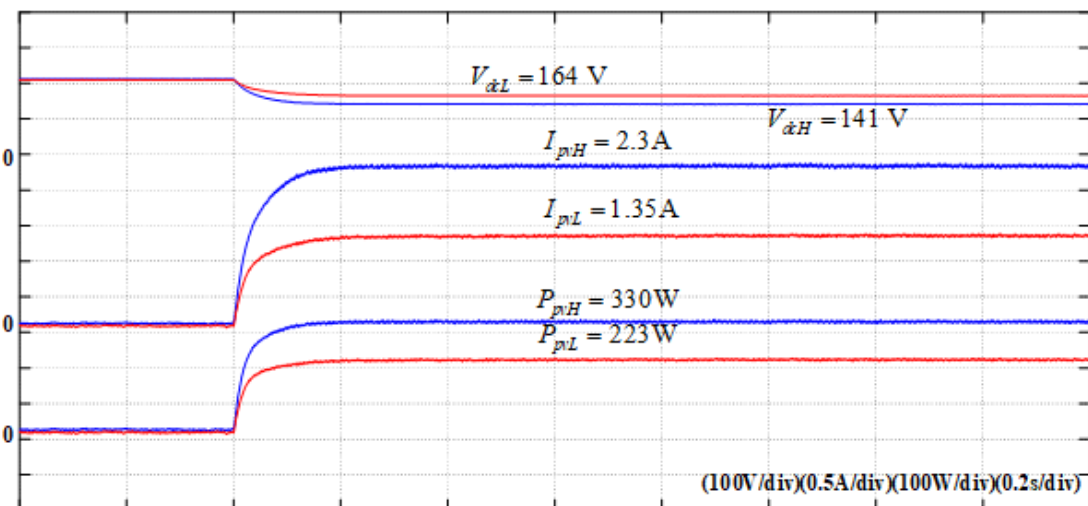
สำหรับเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสบนมีค่ามากกว่าบัสล่างโดยมีค่าเท่ากับ ( $P_{inv}^* = 300\text{W}$  ,  $P_{invL}^* = 200\text{W}$ ) และค่ากำลังไฟฟ้ารวมคือ ( $P_{inv}^* = 500\text{W}$ ) จะได้ค่ากระแสคำสั่งให้กับวงรอบควบคุมกระแสเท่ากับ ( $i_d^* = \frac{500\text{W}}{100\text{V}} = 5\text{A}$  ,  $i_q^* = 0\text{A}$ ) และแบ่งสัดส่วนแรงดันคำสั่งเป็น ( $U_p^* = 0.6U^*$  ,  $U_n^* = 0.4U^*$ ) หมายเหตุ ในการแสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงจะถูกแสดงด้วยค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์จ่ายแทน เนื่องจากว่าในวงจรทดสอบเรามีจำนวนตัวตรวจจับกระแสจำกัด (current sensor) ดังนั้นเราจึงใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.1)-(3.2) โดยมองว่าที่สถานะอยู่ตัวค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสไฟตรง

จากรูปที่ 5.8 (a),(b) แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงเป็นไปตามการแบ่งสัดส่วนแรงดันอ้างอิง โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสบนมีค่าเป็น 60% ของกำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดและค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสล่างมีค่าเป็น 40% ของกำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนแรงดันอ้างอิงที่ใช้สำหรับมอดูเลตที่มีค่าสัดส่วนระหว่างบัสบน ( $U_p$ ) และบัสล่าง ( $U_n$ ) ที่ไม่เท่ากัน โดยที่ค่าแรงดันอ้างอิงบัสบนมีค่าเป็น 60% ของแรงดันอ้างอิงรวม และแรงดันอ้างอิงบัสล่างมีค่าเป็น 40% ของแรงดันอ้างอิงรวมพิจารณาได้จากรูปที่ 5.8 (c),(d)



(a) แรงดันบัสไฟตรง, กระแสที่สตริ่ง, และกำลังไฟฟ้าที่สตริ่งในผลจำลองกรณี

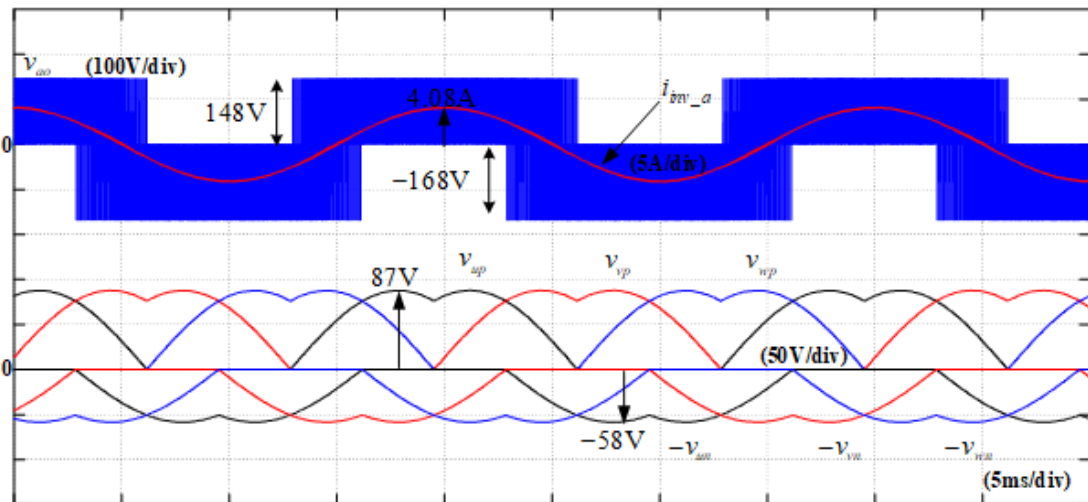
$$U_p^* = 0.6U^*, U_n^* = 0.4U^*$$



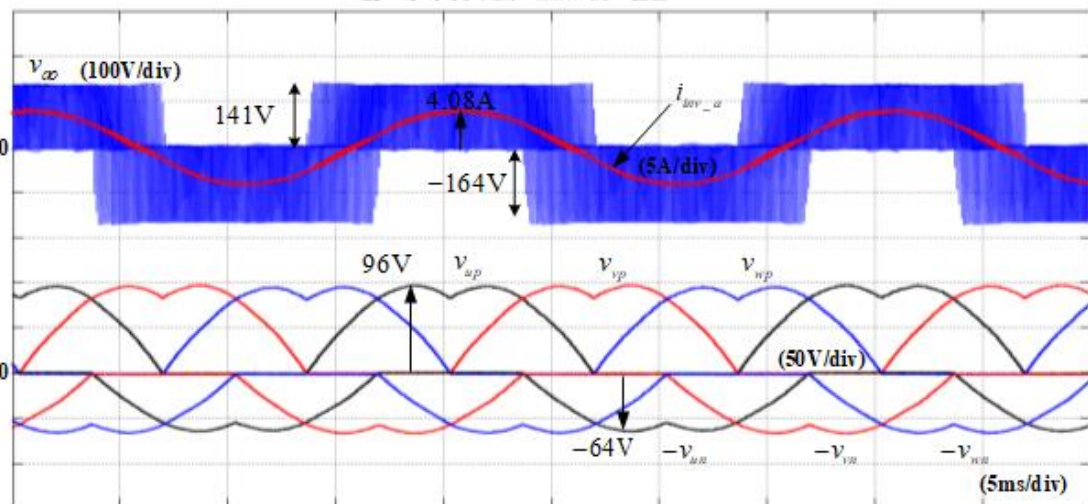
(b) แรงดันบัสไฟตรง, กระแสที่สตริ่ง, และกำลังไฟฟ้าที่สตริ่งในผลทดลองกรณี

$$U_p^* = 0.6U^*, U_n^* = 0.4U^*$$

รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.2 กรณีแบ่ง  $U_p^* = 0.6U^*, U_n^* = 0.4U^*$



(c) แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์เฟส a , กระแสเฟส a , และแรงดันอ้างอิงบัสบน-ล่างในผล  
จำลองกรณี  $U_p^* = 0.6U^*$ ,  $U_n^* = 0.4U^*$



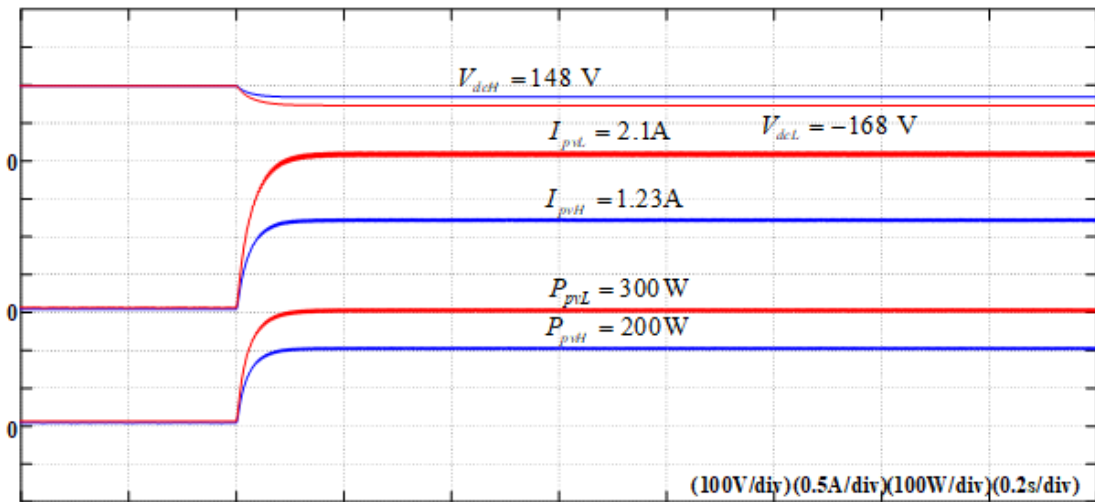
(d) แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์เฟส a , กระแสเฟส a , และแรงดันอ้างอิงบัสบน-ล่างในผล  
ทดลองกรณี  $U_p^* = 0.6U^*$ ,  $U_n^* = 0.4U^*$

รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.2 กรณีแบ่ง  $U_p^* = 0.6U^*$ ,  $U_n^* = 0.4U^*$  (ต่อ)

### 5.2.3 การทดสอบการมอดูเลตเพื่อแบ่งสัดส่วนควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรงกรณีควบคุมให้กำลังไฟฟ้าบัสล่างจ่ายมากกว่าบัสบน

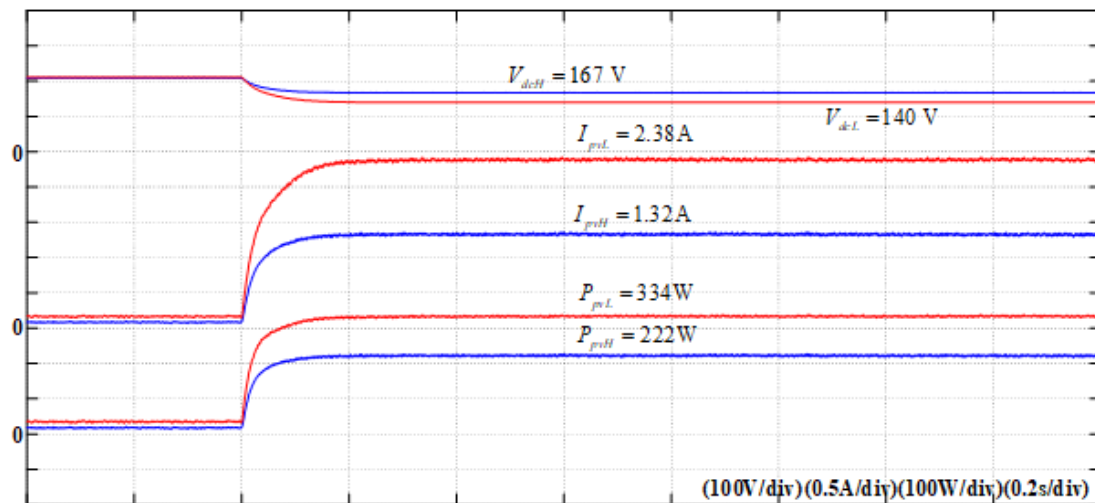
สำหรับเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสบนมีค่ามากกว่าบัสล่างโดยมีค่าเท่ากับ ( $P_{inv}^* = 200\text{W}$  ,  $P_{mvL}^* = 300\text{W}$ ) และค่ากำลังไฟฟ้ารวมคือ ( $P_{inv}^* = 500\text{W}$ ) จะได้ค่ากระแสคำสั่งให้กับวงรอบควบคุมกระแสเท่ากับ ( $i_d^* = \frac{500\text{W}}{100\text{V}} = 5\text{A}$  ,  $i_q^* = 0\text{A}$ ) และแบ่งสัดส่วนแรงดันคำสั่งเป็น ( $U_p^* = 0.4U^*$  ,  $U_n^* = 0.6U^*$ ) หมายเหตุ ในการแสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงจะถูกแสดงด้วยค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์จ่ายแทน เนื่องจากว่าในวงจรทดสอบเรามีจำนวนตัวตรวจจับกระแสจำกัด (current sensor) ดังนั้นเราจึงใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.1)-(3.2) โดยมองว่าที่สถานะอยู่ตัวค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสไฟตรง

จากรูปที่ 5.9 (a),(b) แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงเป็นไปตามการแบ่งแรงดันอ้างอิง โดยค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสบนมีค่าเป็น 40% ของกำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดและค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากบัสล่างมีค่าเป็น 60% ของกำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนแรงดันอ้างอิงที่ใช้สำหรับมอดูเลตที่มีค่าสัดส่วนระหว่างบัสบน ( $U_p$ ) และบัสล่าง ( $U_n$ ) ที่ไม่เท่ากัน โดยที่ค่าแรงดันอ้างอิงบัสบนมีค่าเป็น 40% ของแรงดันอ้างอิงรวม และแรงดันอ้างอิงบัสล่างมีค่าเป็น 40% ของแรงดันอ้างอิงรวมพิจารณาได้จากรูปที่ 5.9 (c),(d)



(a) แรงดันบัสไฟตรง, กระแสที่สตรึง, และกำลังไฟฟ้าที่สตรึงในผลจำลองกรณี

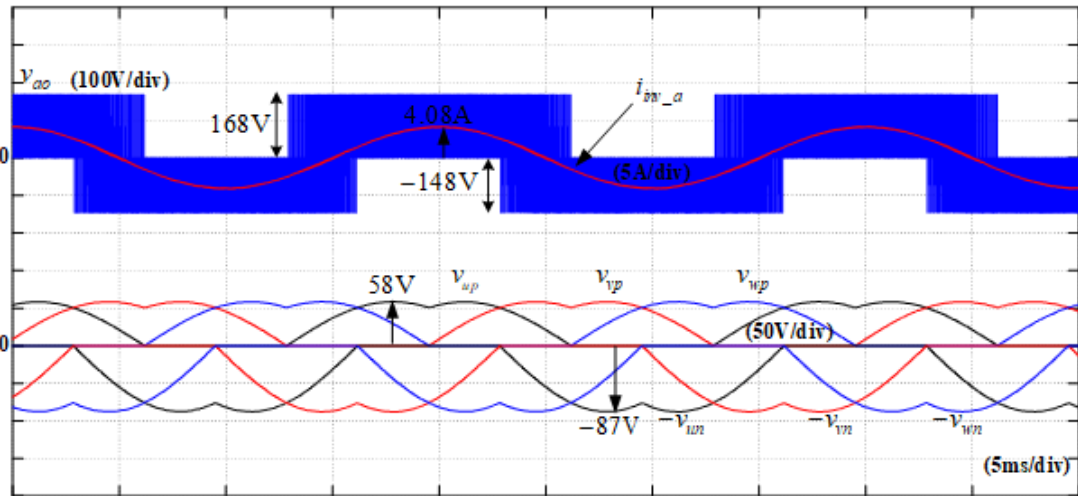
$$U_p^* = 0.4U^*, U_n^* = 0.6U^*$$



(b) แรงดันบัสไฟตรง, กระแสที่สตรึง, และกำลังไฟฟ้าที่สตรึงในผลทดลองกรณี

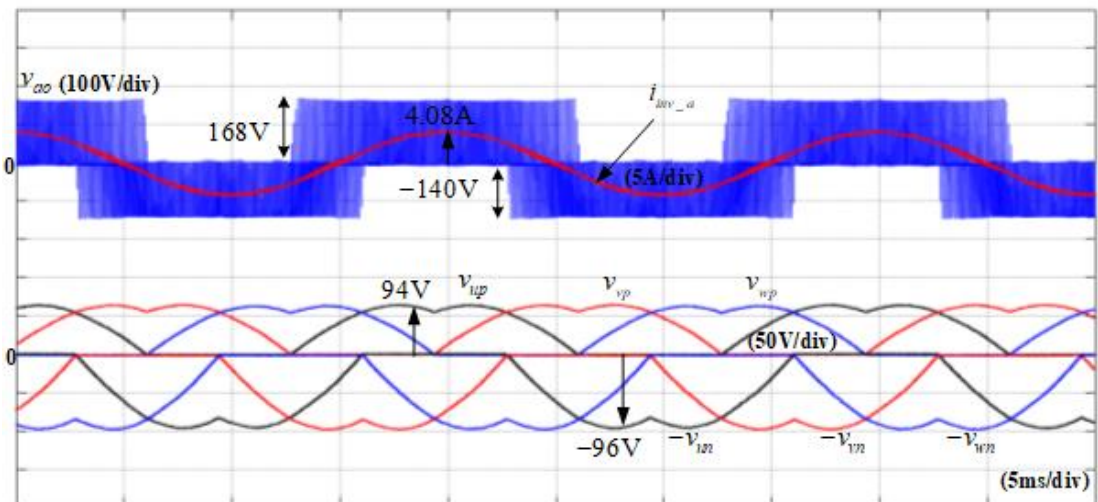
$$U_p^* = 0.4U^*, U_n^* = 0.6U^*$$

รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.3 กรณีแบ่ง  $U_p^* = 0.4U^*, U_n^* = 0.6U^*$



(c) แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์เฟส a , กระแสเฟส a , และแรงดันอ้างอิงบัสบน-ล่างในผล

จำลองกรณี  $U_p^* = 0.4U^*$  ,  $U_n^* = 0.6U^*$



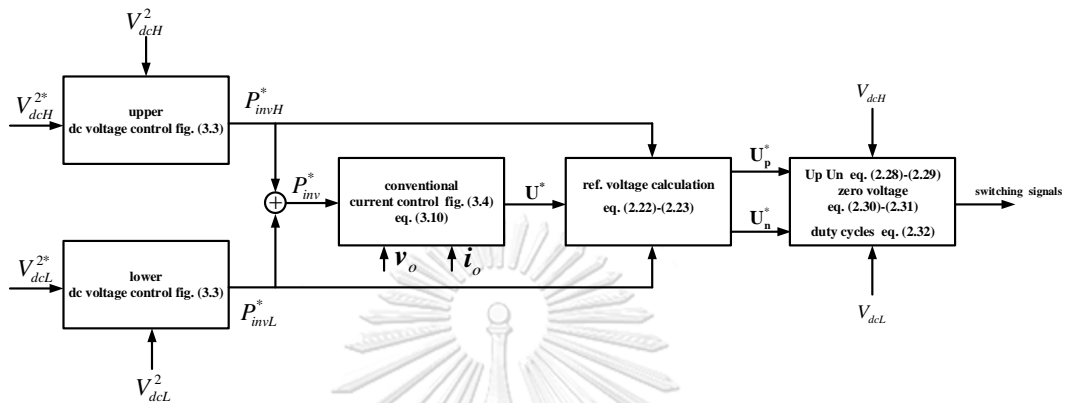
(d) แรงดันด้านออกอินเวอร์เตอร์เฟส a , กระแสเฟส a , และแรงดันอ้างอิงบัสบน-ล่างในผล

ทดลองกรณี  $U_p^* = 0.4U^*$  ,  $U_n^* = 0.6U^*$

รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบตามหัวข้อที่ 5.2.3 กรณีแบ่ง  $U_p^* = 0.4U^*$  ,  $U_n^* = 0.6U^*$  (ต่อ)

### 5.3 การทดสอบวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

สำหรับในหัวข้อการทดสอบนี้เราจะทำการทดสอบวงรอบควบคุมบัสไฟตรงตามที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 3 และเพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบควบคุมแรงดันบัสบนและบัสล่างทำงานได้อย่างอิสระต่อกัน ดังนั้นเราจะแบ่งการทดสอบเป็นกรณีต่างๆได้ตามหัวข้อที่ 5.3.1-5.3.3



รูปที่ 5.10 ไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้านบนและล่างสำหรับทดสอบในหัวข้อที่ 5.3.1-5.3.3

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ทดสอบตามหัวข้อที่ 5.3.1-5.3.3

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
กำลังพิกัดรวมของสตริง	400	W/bus
แรงดันที่จุด MPP	100	V/bus
กระแสไฟฟ้าที่จุด MPP	4	A/bus
แรงดันเปิดวงจรของสตริง	200	V/bus
กระแสลัดวงจรของสตริง	8	A/bus
แรงดันที่โครงข่าย	100	$V_{L-L}$

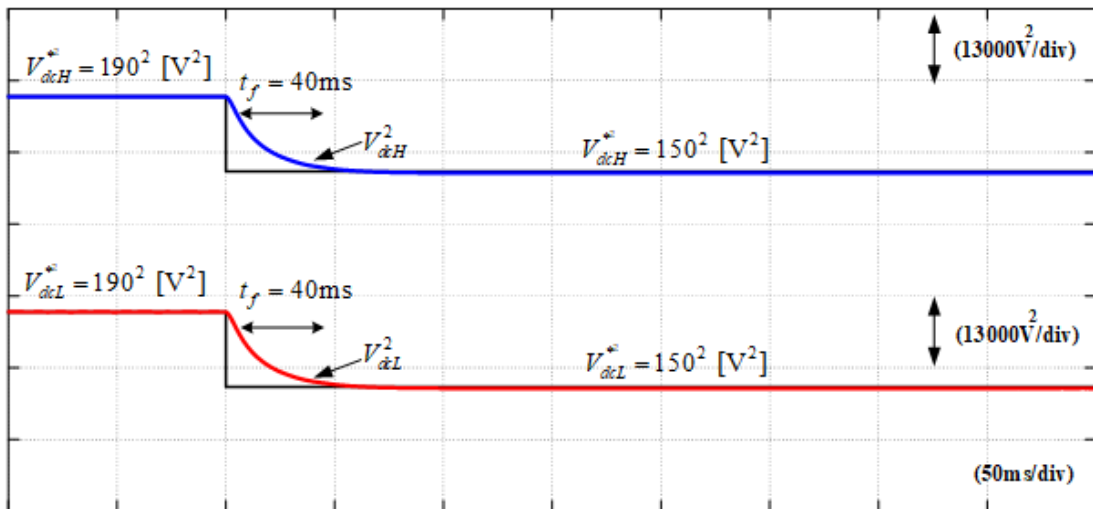
### 5.3.1 การทดสอบวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงกรณีควบคุมแรงดันบัลบนและล่างเท่ากัน

การทดสอบในเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดคำสั่งแรงดันยกกำลังสองบัลบนและบัลล่างมีค่าที่เท่ากันคือ  $190V^2$  จากนั้นเปลี่ยนค่าคำสั่งเป็นแบบขั้นบันไดลดลงเท่ากับ  $150V^2$  จากรูปที่ 5.11 (a),(b) แสดงถึงผลตอบสนองทางเวลาในช่วงสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว เมื่อพิจารณาที่สภาวะชั่วคราวจะเห็นว่าทั้งบัลบนและบัลล่างมีผลตอบสนองที่เหมือนกัน โดยมีคุณลักษณะการตอบสนองแบบอันดับหนึ่ง กล่าวคือไม่มีการแกว่งในช่วงสภาวะชั่วคราวและมีค่าเวลาขาลงเท่ากับ 40ms เมื่อพิจารณาที่เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวจะเห็นว่ามีความล่าช้าประมาณ 100ms จากผลตอบสนองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับค่าอัตราขยายที่ออกแบบในบทที่ 3

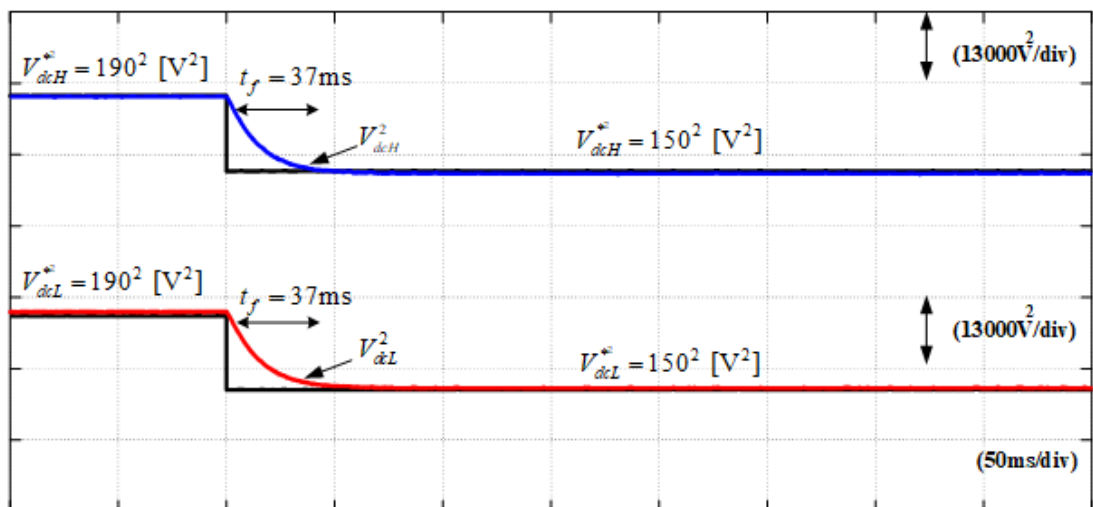
จากรูปที่ 5.11 (c),(d) แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันที่บัลไฟตรงมีคุณลักษณะสอดคล้องกับผลตอบสนองวงรอบควบคุมบัลไฟตรงยกกำลังสอง และยังชี้ให้เห็นว่าการที่เราควบคุมตัวแปรแรงดันยกกำลังสองนั้นสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงแรงดันบัลไฟตรงได้จริง

จากรูปที่ 5.11 (e),(f) จะเห็นว่าสัดส่วนแรงดันอ้างอิงสำหรับมอดูเลเตอร์หว่างบัลบนและบัลล่าง (แสดงเฉพาะเฟส a เท่านั้น) ที่ถูกกำหนดโดยวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงมีสัดส่วนที่เท่ากันทั้งบัลบนและบัลล่าง ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัลที่เท่ากันตามรูปที่ 5.11 (c),(d)



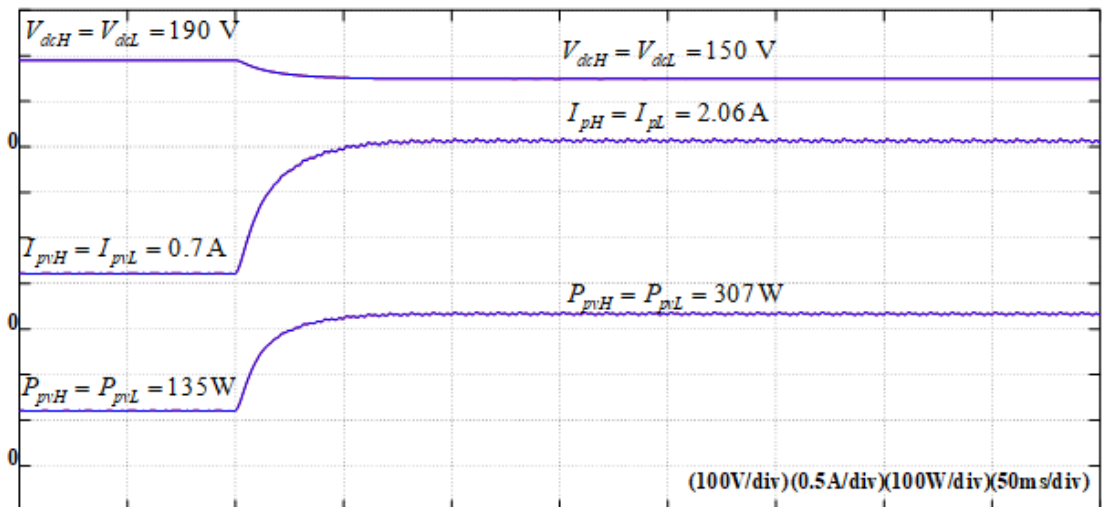


(a) ผลตอบสนองทางเวลาของวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในผลจำลองกรณีควบคุมบัสบน และบัสล่างเท่ากัน

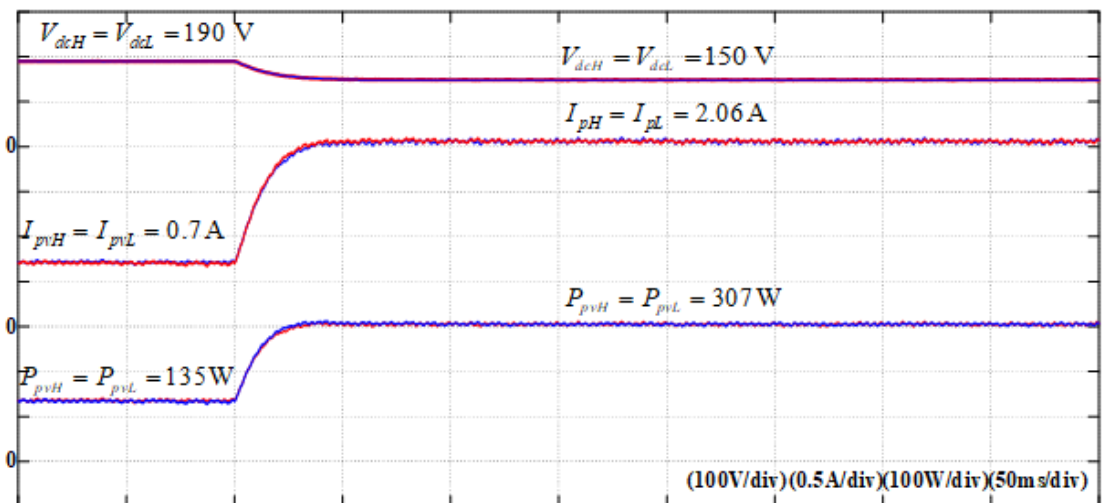


(b) ผลตอบสนองทางเวลาของวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในผลทดลองกรณีควบคุมบัสบน และบัสล่างเท่ากัน

รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไขที่ 5.3.1

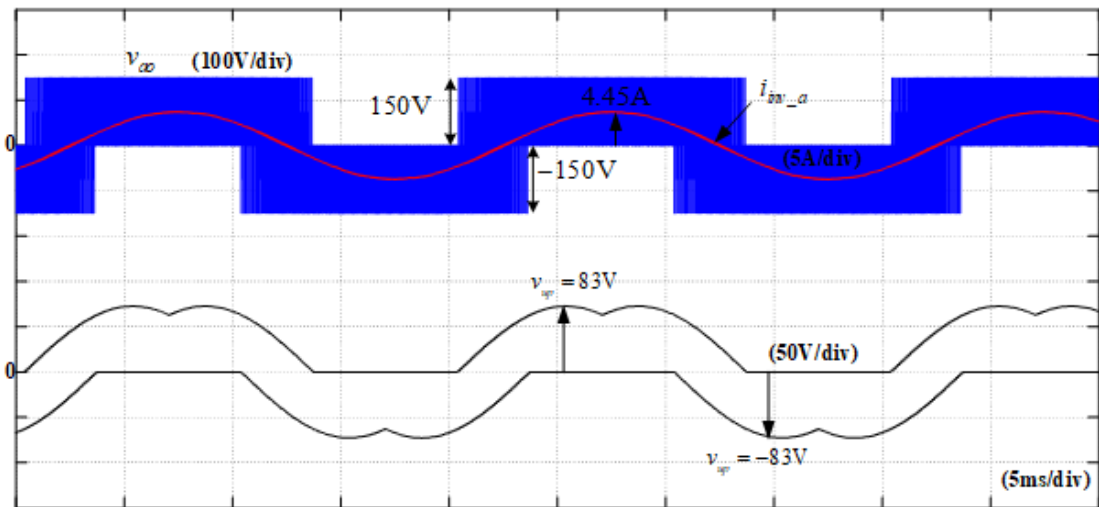


(c) แรงดันบัสบน-ล่าง, กระแสที่แผงเซลล์, และกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์ในผลจำลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมบัสบนและบัสล่างเท่ากัน

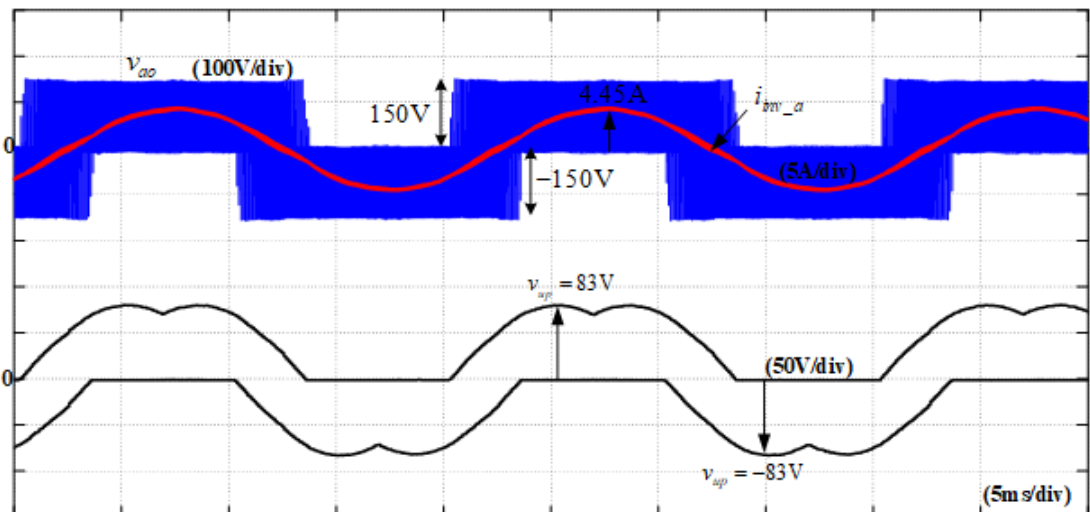


(d) แรงดันบัสบน-ล่าง, กระแสที่แผงเซลล์, และกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์ในผลการทดลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมบัสบนและบัสล่างเท่ากัน

รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไข 5.3.1 (ต่อ)



(e) แรงดันด้านออก, กระแสด้านออก, และแรงดันอ้างอิงเฟส a ของอินเวอร์เตอร์ในผลการจำลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมบัสบนและบัสล่างเท่ากัน



(f) แรงดันด้านออก, กระแสด้านออก, และแรงดันอ้างอิงเฟส a ของอินเวอร์เตอร์ในผลการทดลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมบัสบนและบัสล่างเท่ากัน

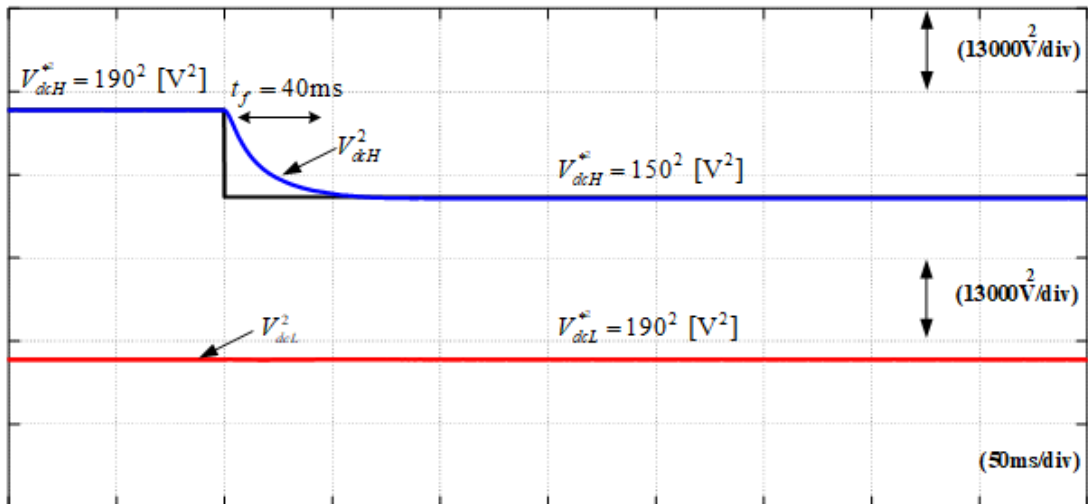
รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไขที่ 5.3.1 (ต่อ)

### 5.3.2 การทดสอบวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแรงดันคำสั่งเฉพาะบัลบน

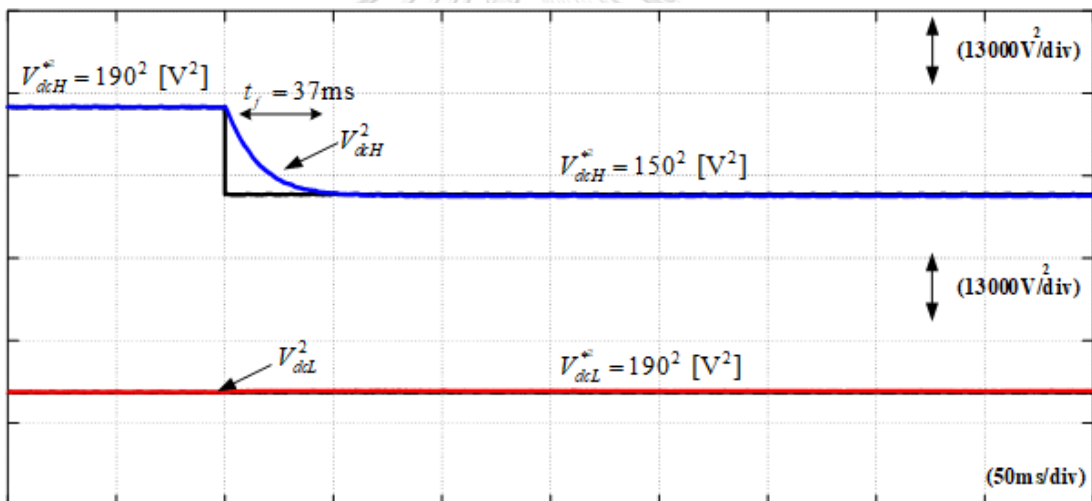
การทดสอบในเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดคำสั่งแรงดันยกกำลังสองบัลบนและบัลล่างในช่วงเริ่มต้นมีค่าที่เท่ากันคือ  $190V^2$  จากนั้นเปลี่ยนค่าคำสั่งเฉพาะบัลบนเป็น  $150V^2$  โดยที่บัลล่างยังคงเท่าเดิม จากรูปที่ 5.12 (a),(b) แสดงถึงผลตอบสนองทางเวลาในช่วงสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว เมื่อพิจารณาที่สภาวะชั่วคราวจะเห็นว่าช่วงที่วงรอบควบคุมบัลบนทำงานเปลี่ยนจากค่า  $190V^2$  ไปเป็น  $150V^2$  การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่มีผลกระทบต่อวงรอบควบคุมบัลล่าง แสดงให้เห็นว่าการทำงานของวงรอบควบคุมทั้งสองนั้นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 5.12 (c),(d) แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันที่บัลไฟตรงนั้นมีคุณลักษณะสอดคล้องกับผลตอบสนองวงรอบควบคุมบัลไฟตรงยกกำลังสอง และยังชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่บัลบนไม่มีผลกระทบต่อแรงดันบัลล่าง

จากรูปที่ 5.12 (e),(f) จะเห็นว่าสัดส่วนแรงดันอ้างอิงสำหรับมอดูเลเตอร์หว่างบัลบนและบัลล่าง(แสดงเฉพาะเฟส a เท่านั้น) ที่ถูกกำหนดโดยวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงมีสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน โดยที่สัดส่วนของบัลบนคิดเป็น 70% ของแรงดันอ้างอิงรวมทั้งหมดและบัลล่างคิดเป็น 30% ของแรงดันอ้างอิงรวมทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัลไฟตรงแสดงได้ในรูปที่ 5.12 (c),(d)

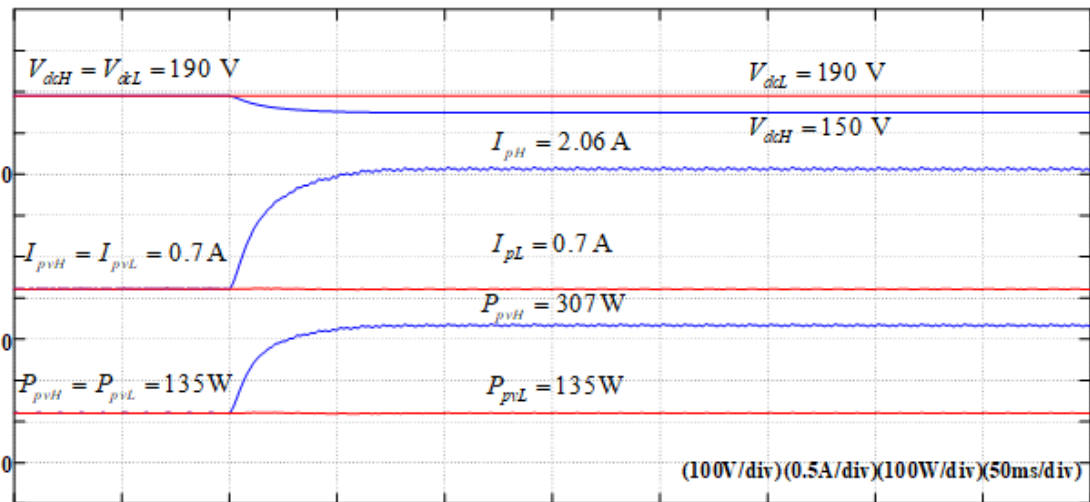


(a) ผลตอบสนองทางเวลาของวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในผลจำลองกรณีควบคุม  
เปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสบนอย่างเดียว

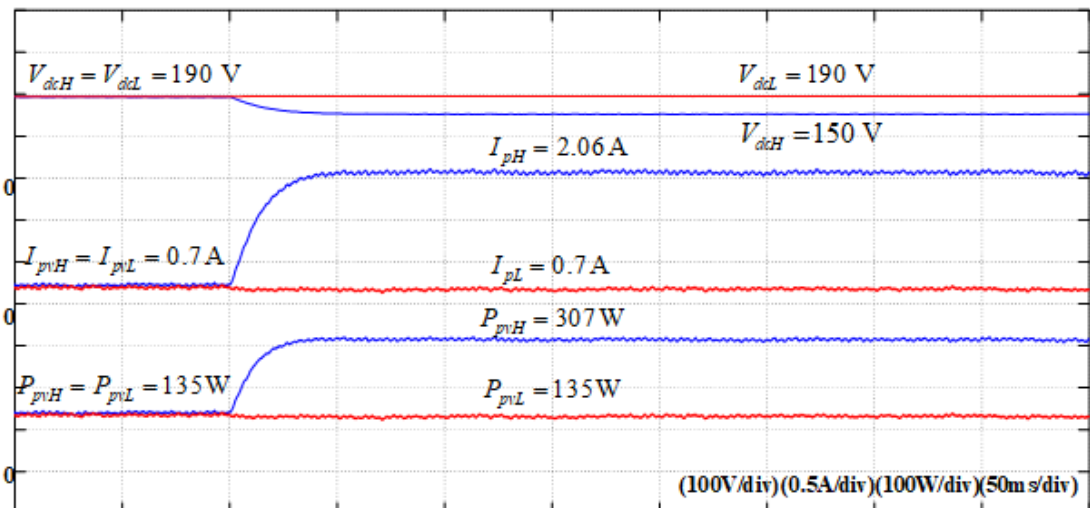


(b) ผลตอบสนองทางเวลาของวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในผลการทดลองกรณีควบคุม  
เปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสบนอย่างเดียว

รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไขที่ 5.3.2

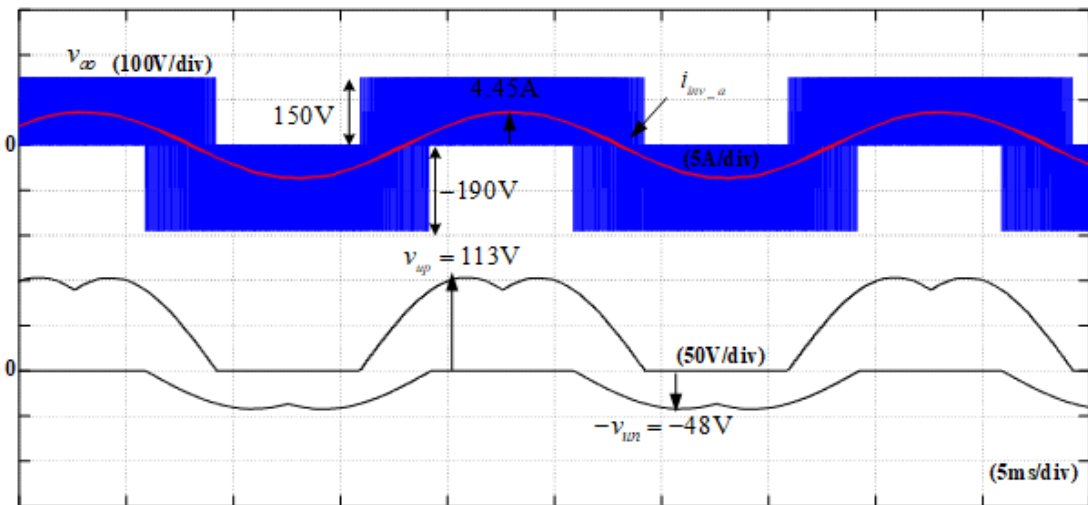


(c) แรงดันบัสบน-ล่าง, กระแสที่แผงเซลล์, และกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์ในผลจำลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสบนอย่างเดียว

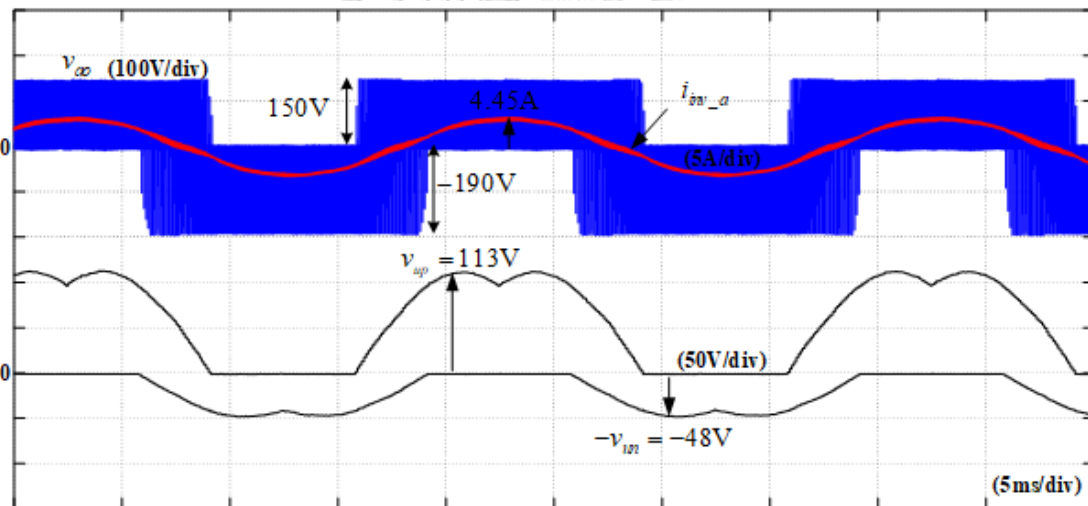


(d) แรงดันบัสบน-ล่าง, กระแสที่แผงเซลล์, และกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์ในผลการทดลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสบนอย่างเดียว

รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไขที่ 5.3.2 (ต่อ)



(e) แรงดันด้านออก, กระแสด้านออก, และแรงดันอ้างอิงเฟสของอินเวอร์เตอร์ในผลการจำลอง การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสบนอย่างเดียว



(f) แรงดันด้านออก, กระแสด้านออก, และแรงดันอ้างอิงเฟสของอินเวอร์เตอร์ในผลการทดลอง การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสบนอย่างเดียว  
รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไข 5.3.2 (ต่อ)

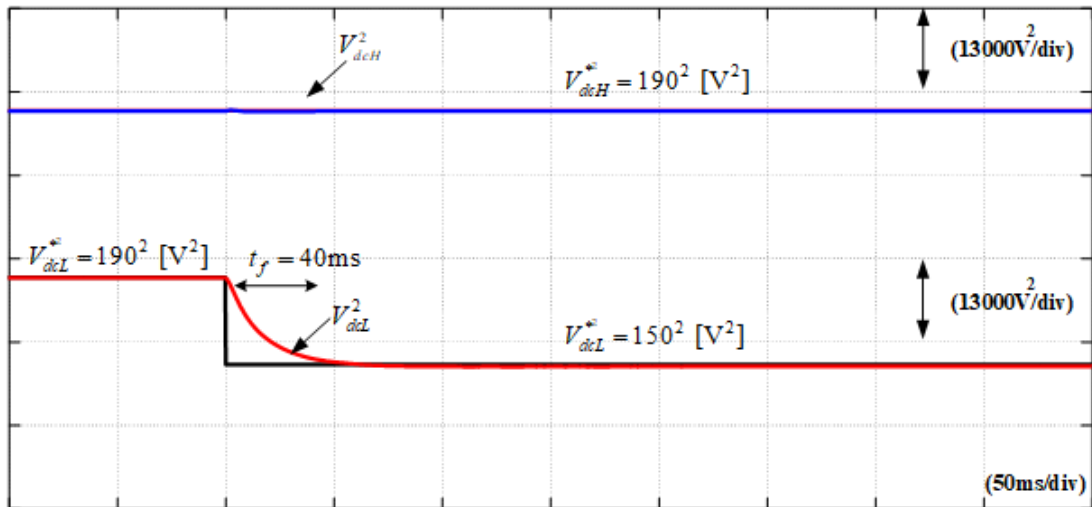
### 5.3.3 การทดสอบวงจรควบคุมแรงดันบัลไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแรงดันคำสั่งเฉพาะบัลล่าง

การทดสอบในเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดคำสั่งแรงดันยกกำลังสองบัลบนและบัลล่างในช่วงเริ่มต้นมีค่าที่เท่ากันคือ  $190V^2$  จากนั้นเปลี่ยนค่าคำสั่งเฉพาะบัลล่างเป็น  $150V^2$  โดยที่บัลบนยังคงเท่าเดิม จากรูปที่ 5.13 (a),(b) แสดงถึงผลตอบสนองทางเวลาในช่วงสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว เมื่อพิจารณาที่สภาวะชั่วคราวจะเห็นว่าช่วงที่วงรอบควบคุมบัลล่างทำงานเปลี่ยนจากค่า  $190V^2$  ไปเป็น  $150V^2$  การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่มีผลกระทบต่อวงรอบควบคุมบัลบน แสดงให้เห็นว่าการทำงานของวงรอบควบคุมทั้งสองนั้นอิสระต่อกัน

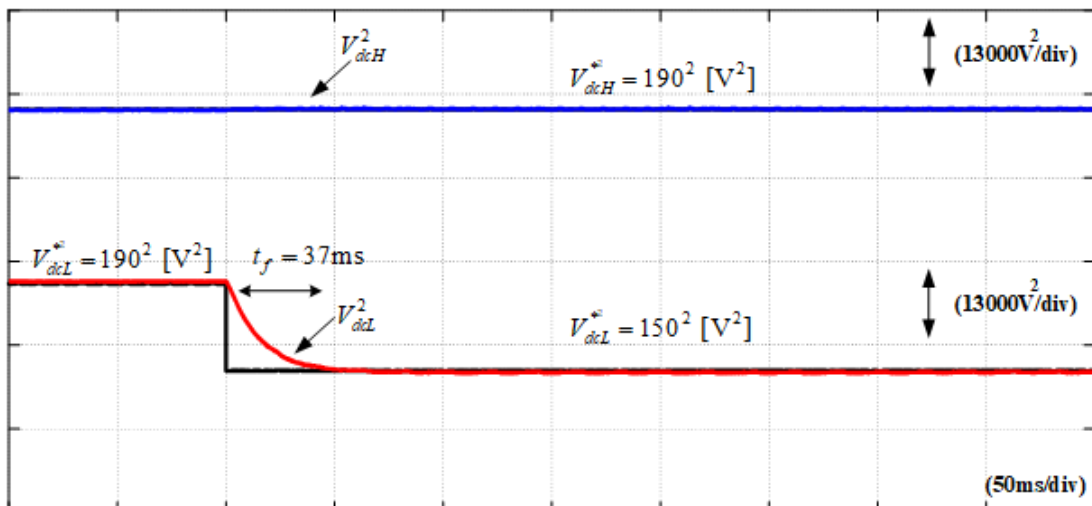
จากรูปที่ 5.13 (c),(d) แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันที่บัลไฟตรงนั้นมีคุณลักษณะสอดคล้องกับผลตอบสนองวงรอบควบคุมบัลไฟตรงยกกำลังสอง และยังชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่บัลล่างไม่มีผลกระทบต่อแรงดันบัลบน

จากรูปที่ 5.13 (e),(f) จะเห็นว่าสัดส่วนแรงดันอ้างอิงสำหรับมอดูเลเตอร์หว่างบัลบนและบัลล่าง(แสดงเฉพาะเฟส a เท่านั้น) ที่ถูกกำหนดโดยวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงมีสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน โดยที่สัดส่วนของบัลบนคิดเป็น 30% ของแรงดันอ้างอิงรวมทั้งหมดและบัลล่างคิดเป็น 70% ของแรงดันอ้างอิงรวมทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัลไฟตรงแสดงได้ในรูปที่ 5.13 (c),(d)



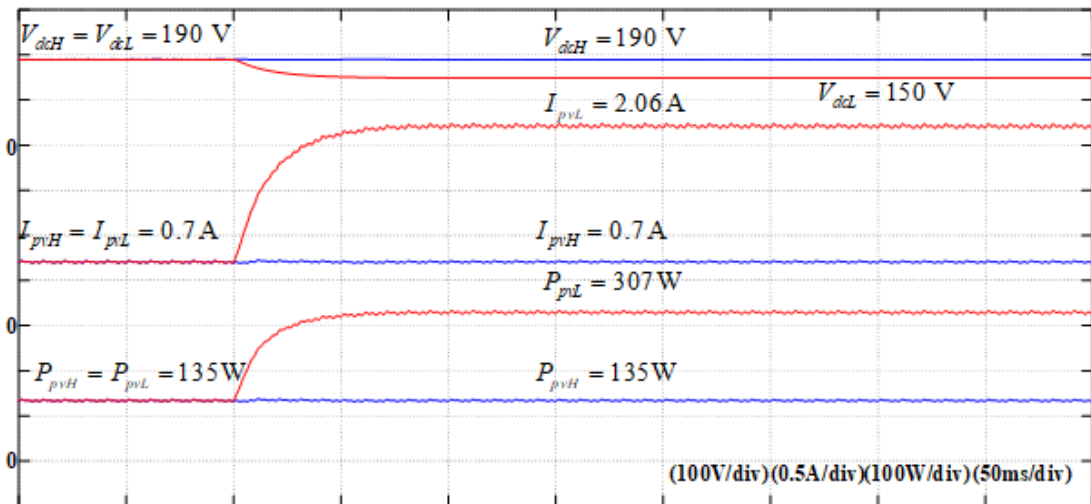


(a) ผลตอบสนองทางเวลาของวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในผลจำลองกรณีควบคุม  
เปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสล่างอย่างเดียว

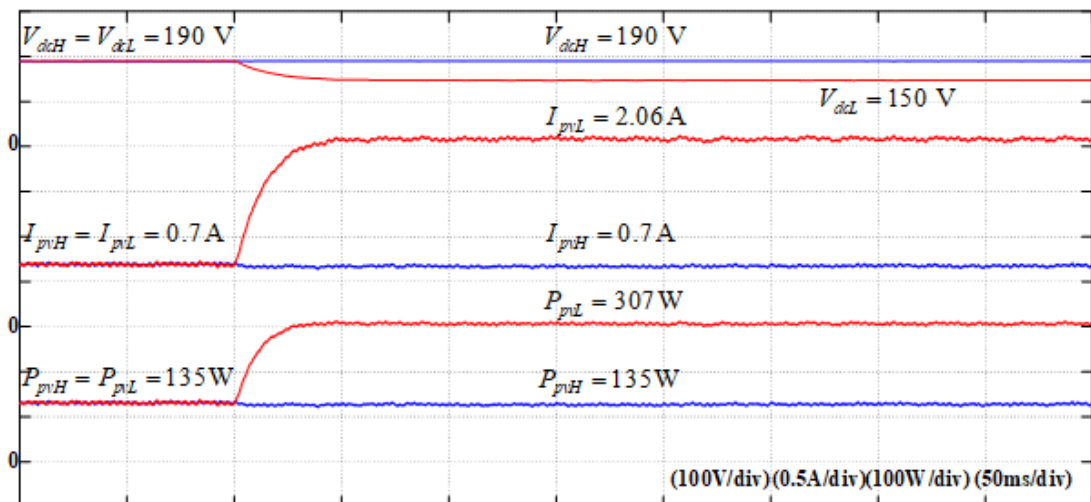


(b) ผลตอบสนองทางเวลาของวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในผลการทดลองกรณีควบคุม  
เปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสล่างอย่างเดียว

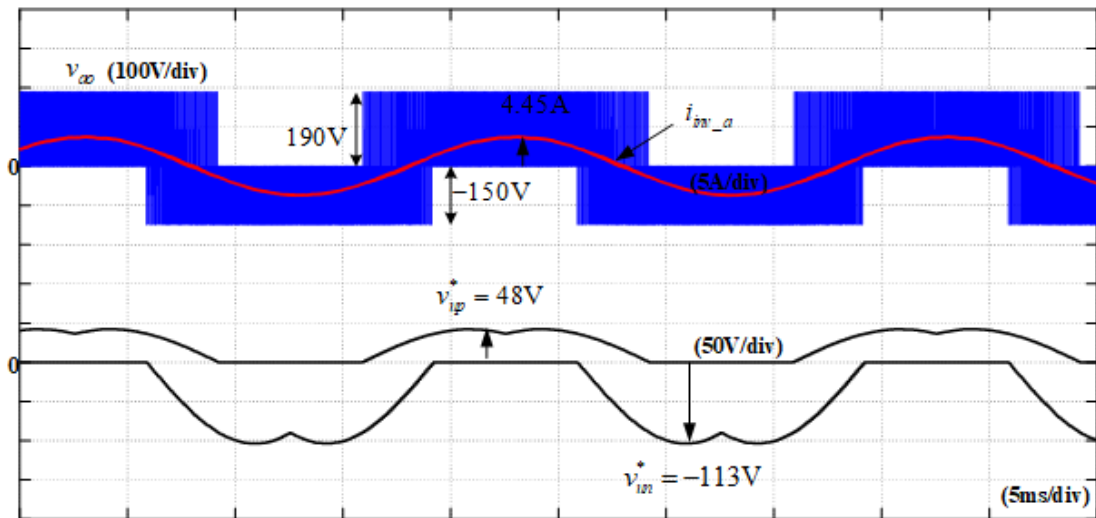
รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไขที่ 5.3.3



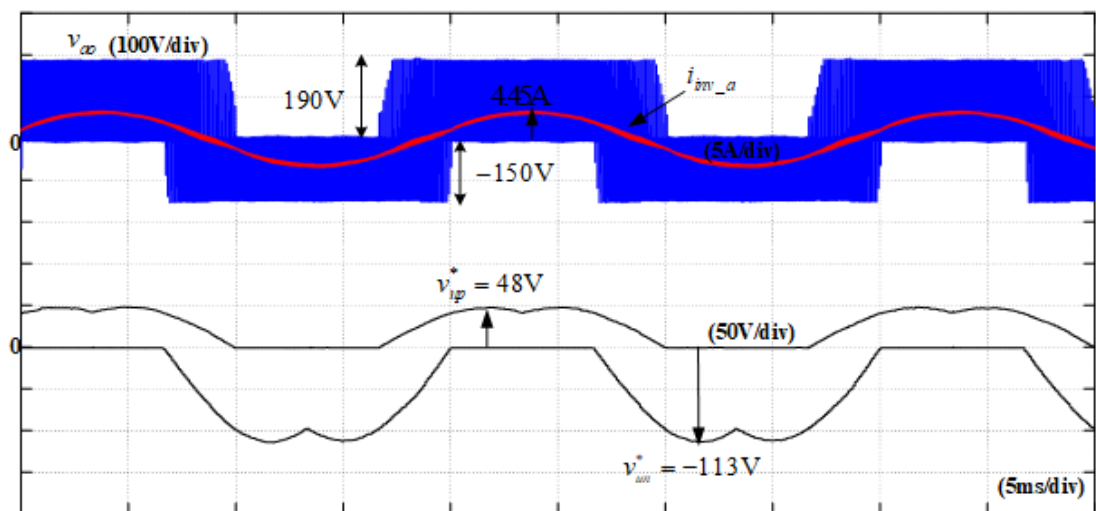
(c) แรงดันบัสบน-ล่าง, กระแสที่แผงเซลล์, และกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์ในผลจำลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสล่างอย่างเดียว



(d) แรงดันบัสบน-ล่าง, กระแสที่แผงเซลล์, และกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์ในผลการทดลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสล่างอย่างเดียว  
รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไขที่ 5.3.3 (ต่อ)



(e) แรงดันด้านออก, กระแสด้านออก, และแรงดันอ้างอิงเฟส a ของอินเวอร์เตอร์ในผลการจำลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสล่างอย่างเดียว



(f) แรงดันด้านออก, กระแสด้านออก, และแรงดันอ้างอิงเฟส a ของอินเวอร์เตอร์ในผลการทดลองการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีควบคุมเปลี่ยนแปลงเฉพาะบัสล่างอย่างเดียว รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตามเงื่อนไขที่ 5.3.3 (ต่อ)

#### 5.4 การทดสอบการติดตามจุดทำงานกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง

สำหรับหัวข้อการทดสอบการติดตามจุดทำงานกำลังสูงสุดเราจะแยกการแสดงผลออกเป็นสองส่วนคือ 1.) การจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2.) การทดลองการติดตามจุดทำงานกำลังสูงสุดร่วมกับวงจรเทียบเคียงคุณลักษณะแรงดันและกระแสของแผงเซลล์ที่แสดงในรูปที่ 5.1 ( หมายถึง เนื่องด้วยในการทดลองระบบจำลองคุณลักษณะกระแสและแรงดันแผงเซลล์ (PV-simulator) ในห้องปฏิบัติการยังอยู่ในช่วงกำลังพัฒนาและยังไม่สมบูรณ์ ) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆแสดงได้ตามตารางที่ 5.3-3.4

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในทุกเงื่อนไขการจำลอง

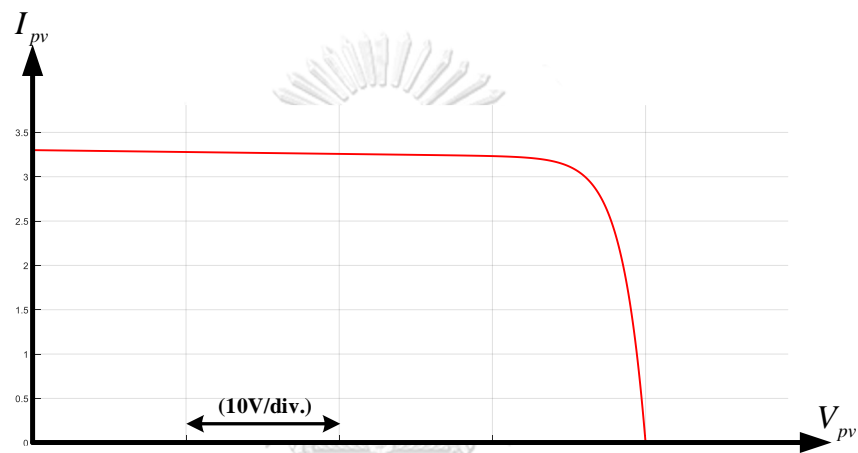
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมของสตริง	545	W/bus
แรงดันที่จุด MPP	176	V/bus
กระแสไฟฟ้าที่จุด MPP	3.1	A/bus
แรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์	200	V/bus
กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์	3.3	A/bus
แรงดันที่โครงข่าย	100	$V_{L-L}$
step-time for mppt	200	ms
step- $V^2$ for mppt	400	$V^2$

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในทุกเงื่อนไขการทดลอง

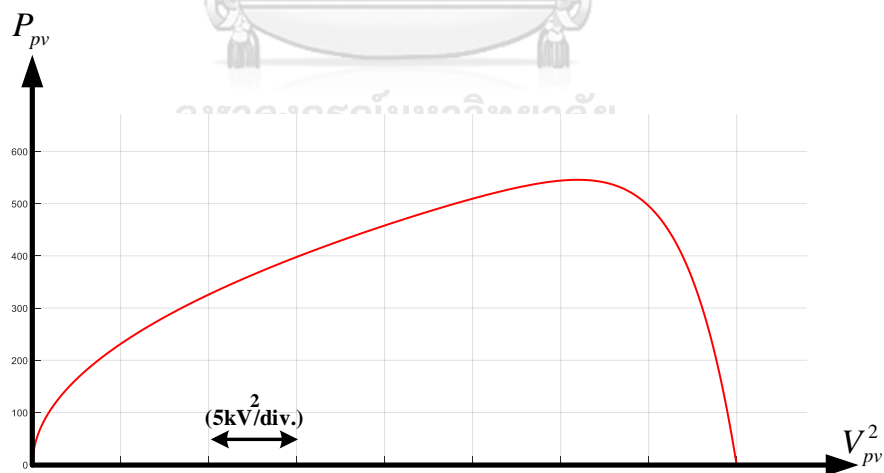
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
พิกัดกำลังไฟฟ้ารวมของสตริง	400	W/bus
แรงดันที่จุด MPP	100	V/bus
กระแสไฟฟ้าที่จุด MPP	4	A/bus
แรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์	200	V/bus
กระแสลัดวงจรของแผงเซลล์	8	A/bus
แรงดันที่โครงข่าย	100	$V_{L-L}$
step-time for mppt	200	ms
step- $V^2$ for mppt	400	$V^2$

#### 5.4.1 การจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณี สตริงบัสบนและล่างได้รับปริมาณความเข้มแสงเท่ากัน

การจำลองในกรณีนี้จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงกลไกการทำงานของ การติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองโดยกำหนดให้สตริงบัสบนและบัสล่างมีจำนวนแผงเซลล์ที่เท่ากันและได้รับปริมาณความเข้มแสงที่เท่ากันคือ  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ซึ่งคุณลักษณะของกระแสต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าของสตริงบัสบนและล่างแสดงได้ตามรูปที่ 5.14-5.15 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองในเงื่อนไขนี้แสดงได้ตามตารางที่ 5.3



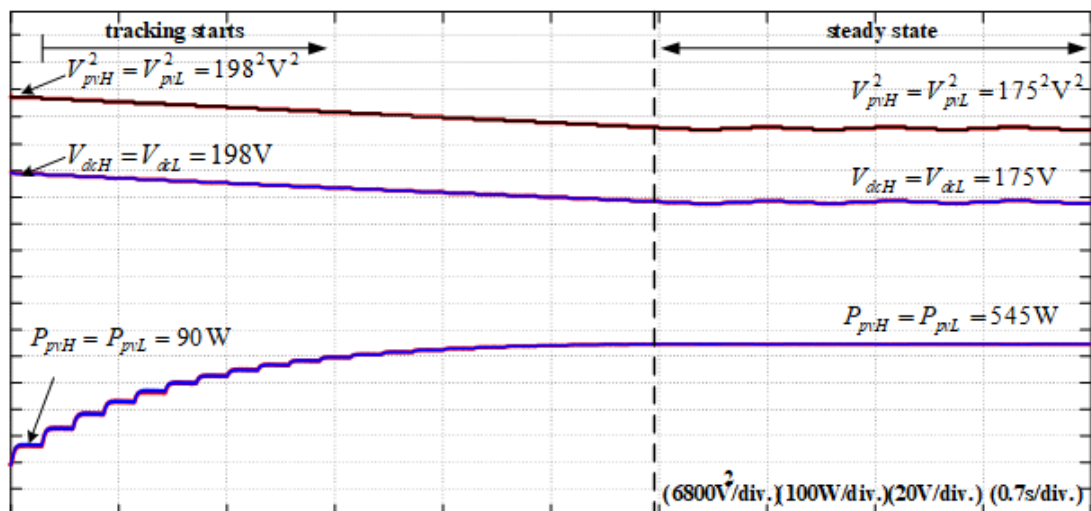
รูปที่ 5.14 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.1



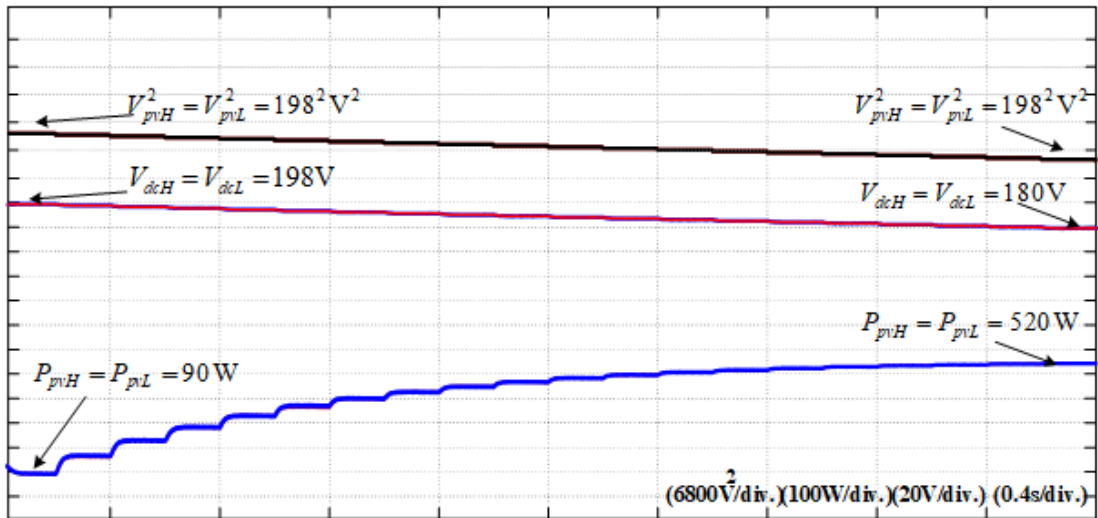
รูปที่ 5.15 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.1

จากรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองทางเวลาของการติดตามจุดกำลังสูงสุดของทั้งสตริง บัสบนและบัสล่าง จะเห็นว่าระบบเริ่มติดตามจากจุดทำงานเปิดวงจรของสตริงและเข้าสู่จุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด พิจารณาช่วงสภาวะชั่วคราวในภาพขยายตามรูปที่ 5.17 จะเห็นว่าแรงดันที่บัสไฟตรงทั้ง บัสบนและล่างจะเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดด้วยคุณลักษณะที่เหมือนกัน จากรูปที่ 5.18 แสดงให้เห็นช่วง ทำงานที่สภาวะอยู่ตัวโดยที่ระบบจะแกว่งรอบๆจุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุด กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ได้ มีค่า 1045W

จากรูปที่ 5.19 แสดงให้เห็นถึงแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองในช่วงการติดตามจุด กำลังสูงสุด ซึ่งจะพบว่าค่าแรงดันยกกำลังสองจะลดลงไปสู่จุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดและแกว่งรอบๆ จุด mpp รูปที่ 5.19 ยังชี้ให้เห็นอีกว่าการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยก กำลังสองนั้นสามารถตามรอยจุดทำงานได้จริงเป็นไปตามทฤษฎีที่นำเสนอ

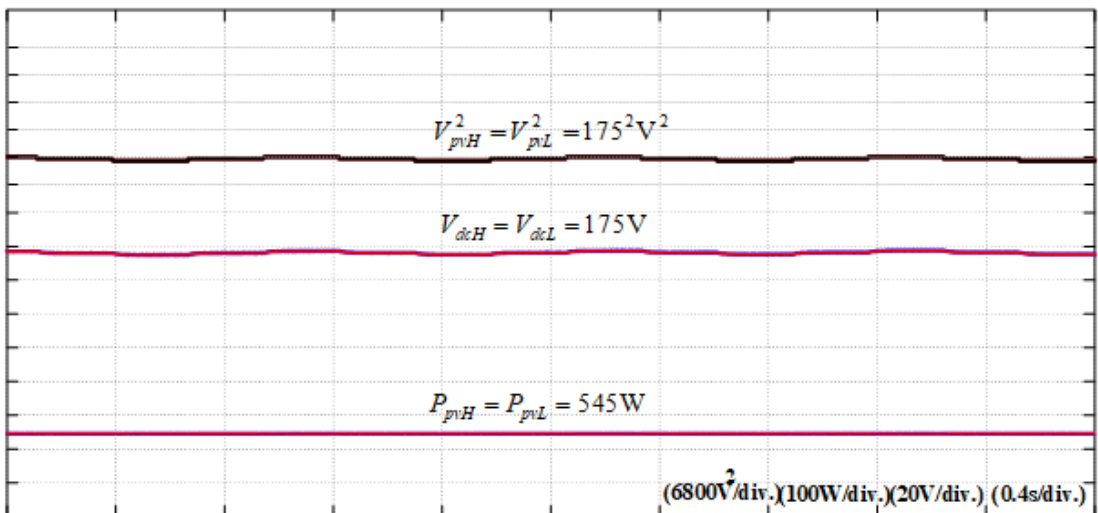


รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.1



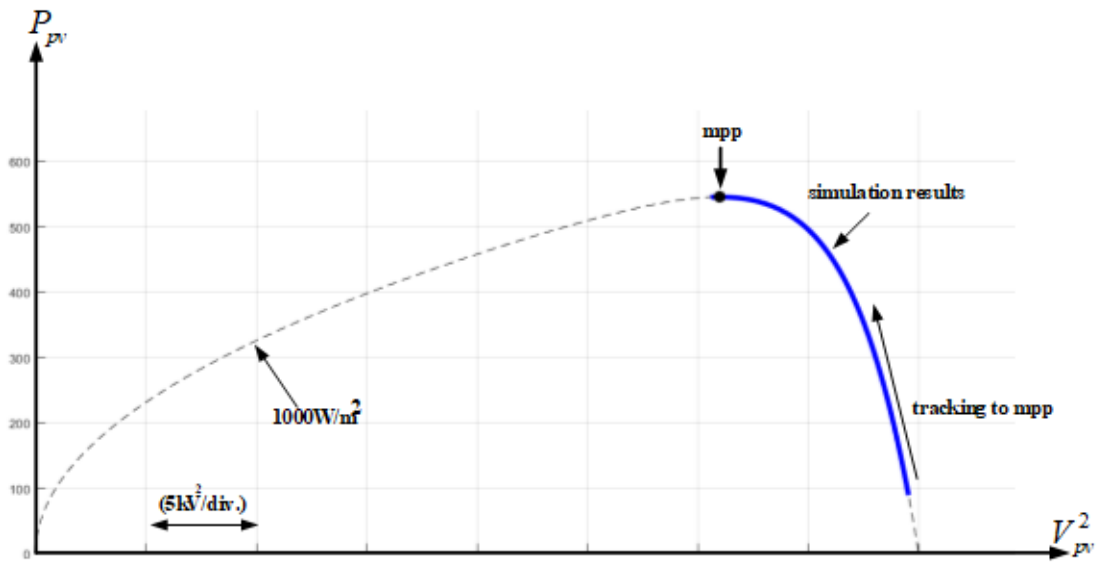
รูปที่ 5.17 ภาพขยายช่วงสภาวะชั่วคราวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่

5.4.1



รูปที่ 5.18 ภาพขยายช่วงสภาวะอยู่ตัวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่

5.4.1



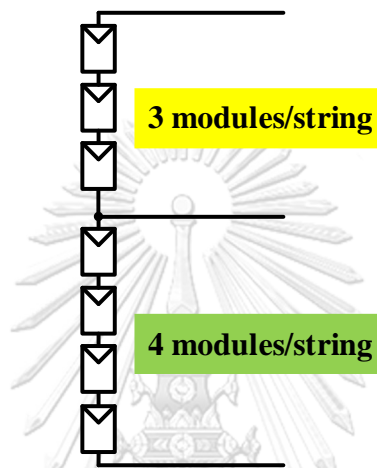
รูปที่ 5.19 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองสตรึงบัสบนและล่างในผลการจำลองตาม  
เงื่อนไขที่ 5.4.1



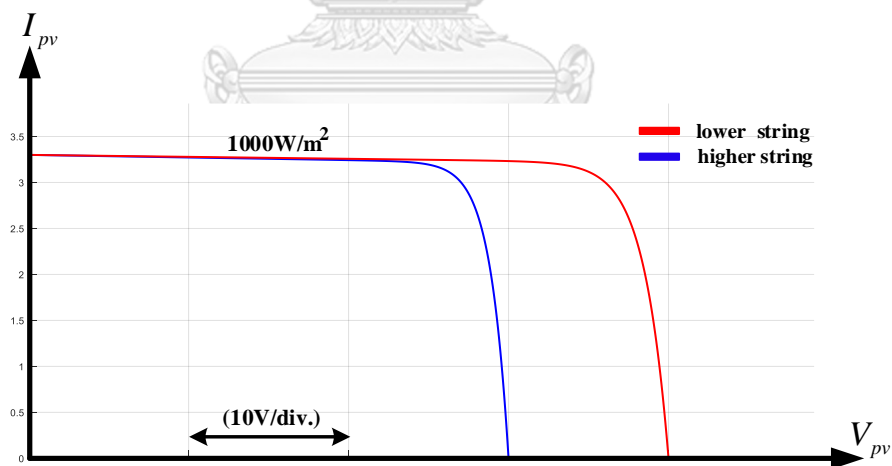


#### 5.4.2 การจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีจำนวนแผงเซลล์ในแต่ละสตริงไม่เท่ากัน

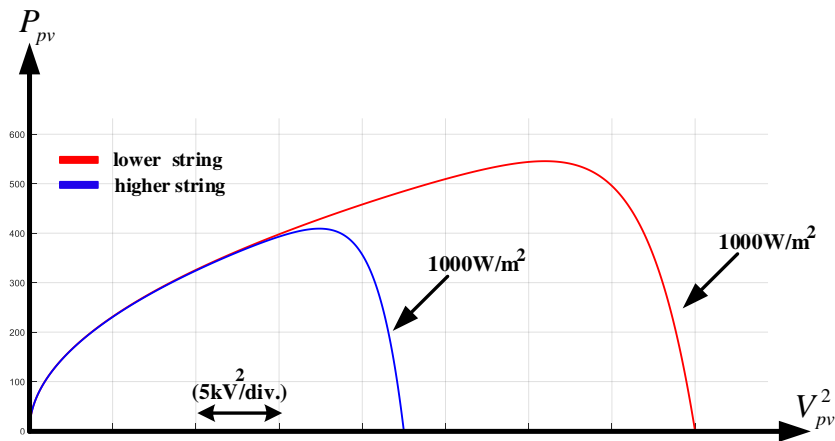
สำหรับในเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้สตริงบัสบนมีจำนวนแผงเซลล์น้อยกว่าสตริงบัสล่างโดยที่ปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับทั้งสองสตริงยังคงเท่ากันมีค่า  $1000\text{W/m}^2$  คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของทั้งสองสตริงบัสบนและล่างแสดงได้ตามรูปที่ 5.21-5.22 ระบบการติดตามจะถูกปรับให้เริ่มทำงานจากจุดทำงานแรงดันเปิดวงจรของแต่ละสตริง



รูปที่ 5.20 สตริงบัสบนและบัสล่างในการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.2

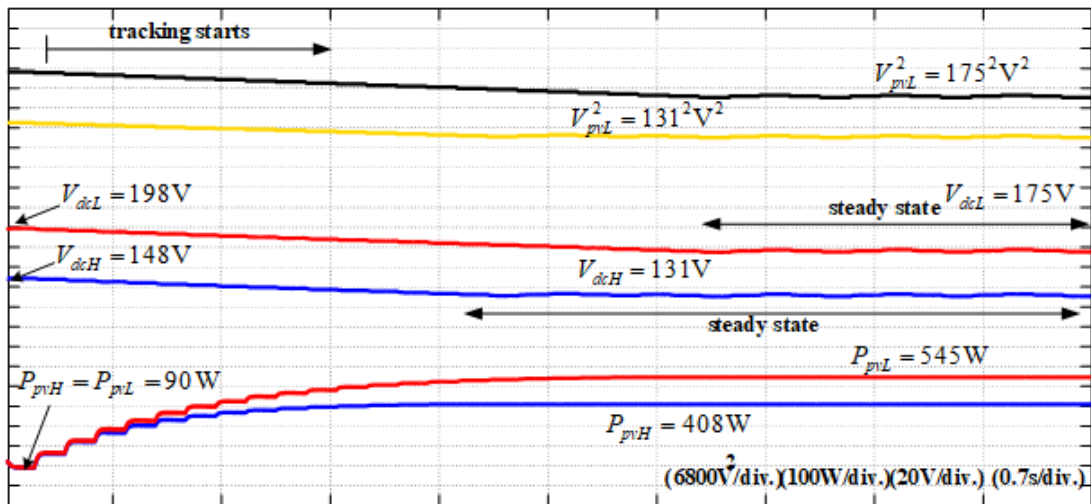


รูปที่ 5.21 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.2

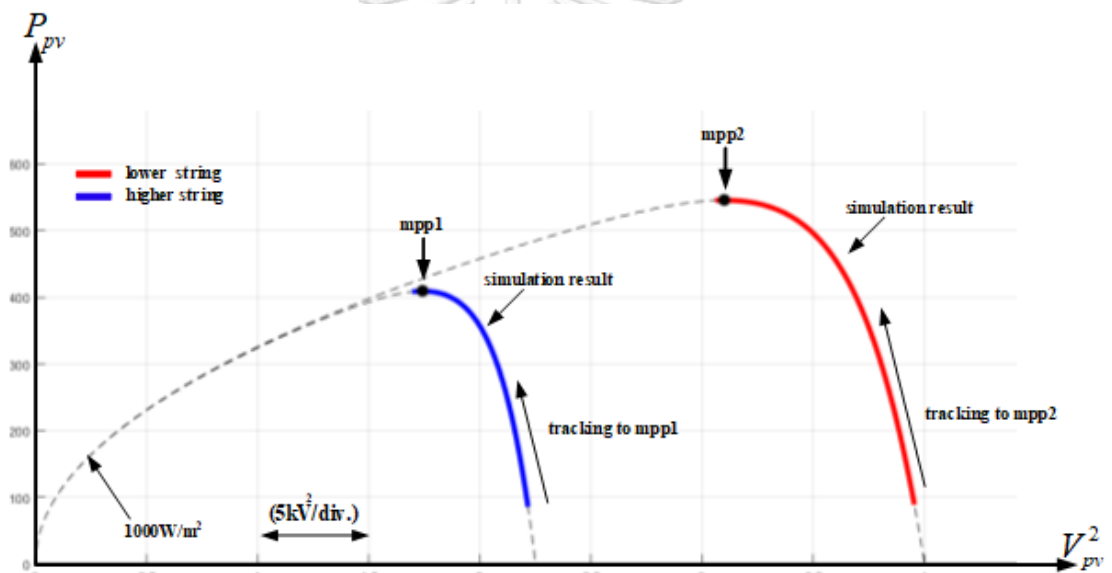


รูปที่ 5.22 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.2

จากรูปที่ 5.23 จะเห็นว่าจุดทำงานของสตริงบัสบนและบัสล่างจะเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของแต่ละสตริง โดยที่การติดตามจุดทำงานของสตริงบัสบนและสตริงบัสล่างต่างก็ทำงานอย่างอิสระต่อกัน เมื่อพิจารณาที่แรงดันของสตริงบัสบนในรูปที่ 5.23 จะเห็นได้ว่าที่เวลา 3.1 วินาทีจุดทำงานของสตริงบัสบนจะเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดและแกว่งรอบจุดกำลังสูงสุดของสตริงบัสบนในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงอยู่ในช่วงสภาวะชั่วคราวและกำลังเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของสตริงบัสล่างและท้ายสุดจุดทำงานของสตริงบัสล่างจะเข้าสู่จุดกำลังสูงสุดที่เวลา 4.5 วินาที จากพฤติกรรมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าระบบการติดตามทั้งบัสบนและบัสล่างทำงานได้อิสระต่อกัน และสามารถแสดงแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงได้ตามรูปที่ 5.24



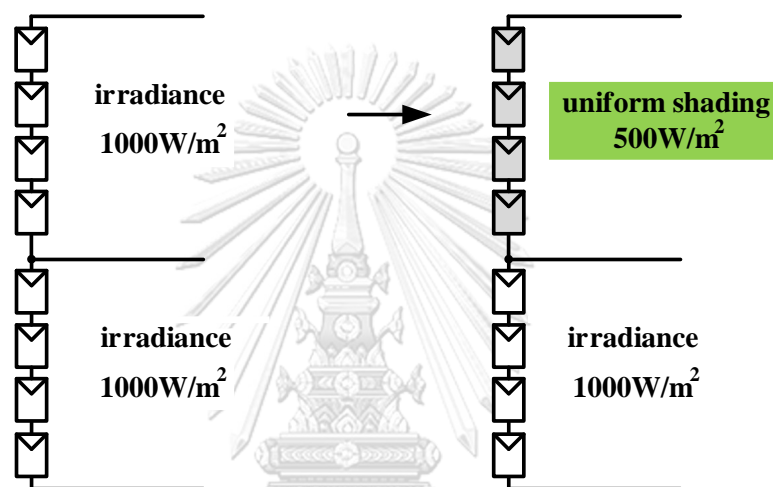
รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.2



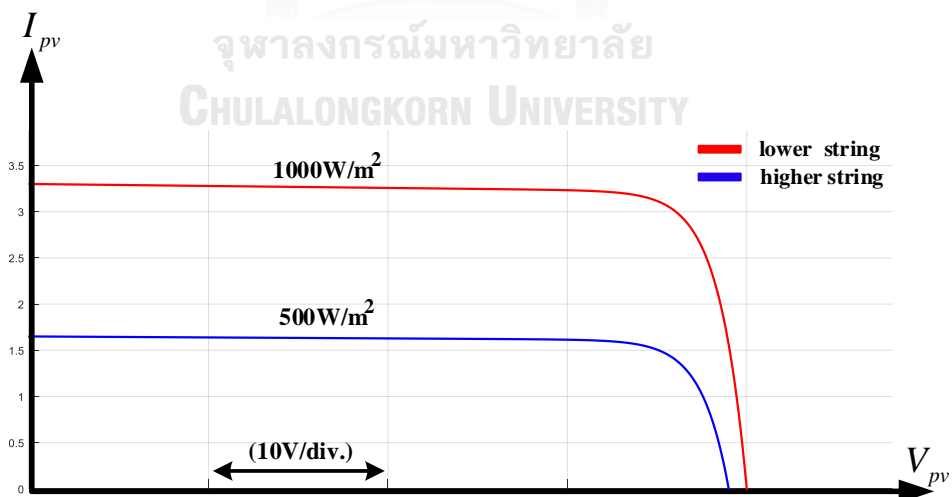
รูปที่ 5.24 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสองสตริงบัสบนและล่างในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.2

### 5.4.3 การจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณี สตริงบัสบนได้รับปริมาณความเข้มแสงลดลง

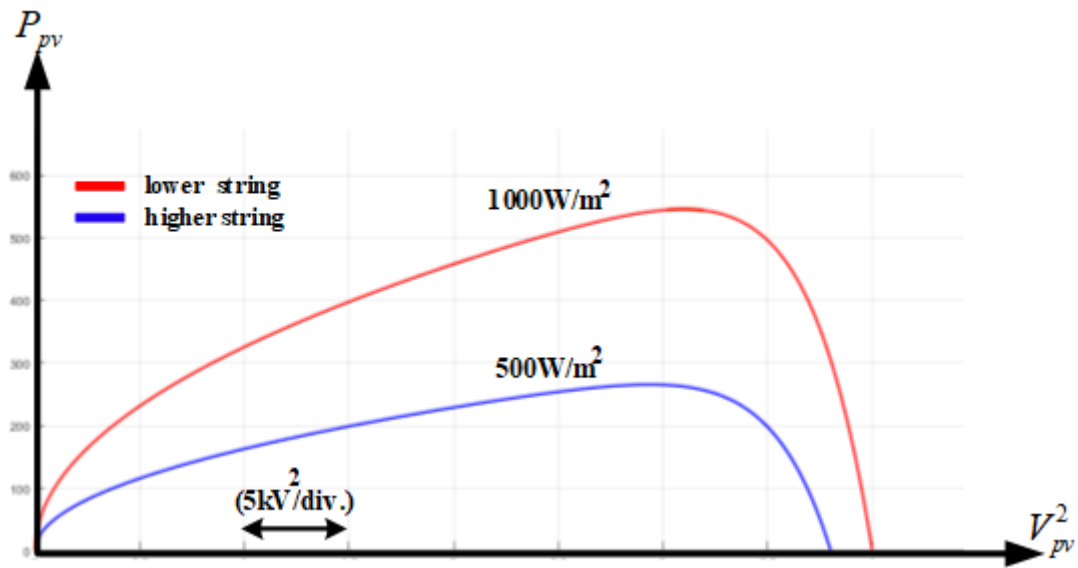
สำหรับเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้สตริงบัสบนและบัสล่างมีจำนวนแผงที่เท่ากันและเริ่มต้นการทำงานโดยได้รับปริมาณความเข้มแสงเท่ากันที่  $1000\text{W/m}^2$  ต่อมากำหนดให้สตริงบัสบนถูกบังเงาสม่ำเสมอทั้งสตริงโดยปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับลดลงจาก  $1000\text{W/m}^2$  เป็น  $500\text{W/m}^2$  ในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงได้รับปริมาณความเข้มแสงเท่าเดิม คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าของสตริงที่ใช้ในการจำลองในเงื่อนไขนี้แสดงได้ตามรูปที่ 5.26-5.27



รูปที่ 5.25 สตริงบัสบนและบัสล่างในการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.3

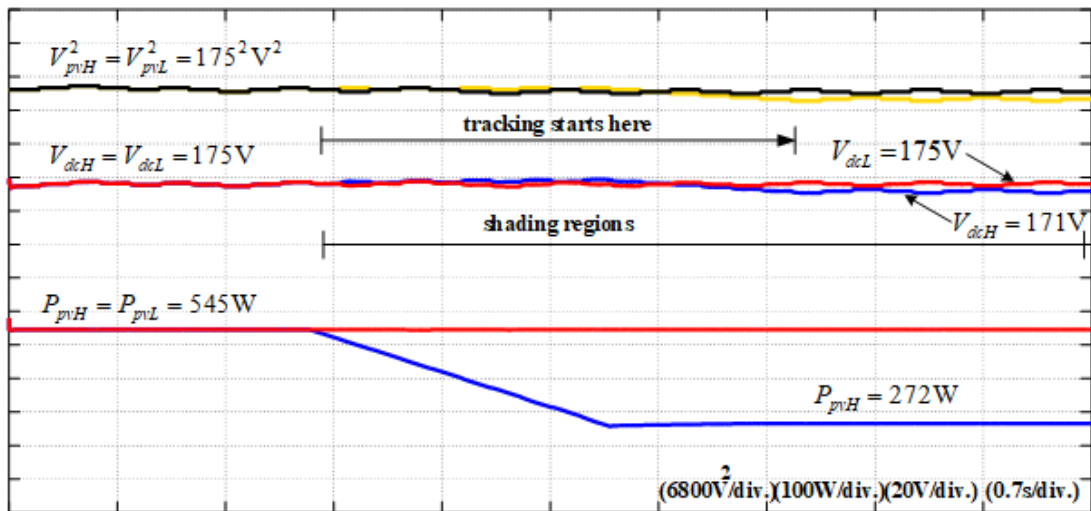


รูปที่ 5.26 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.3

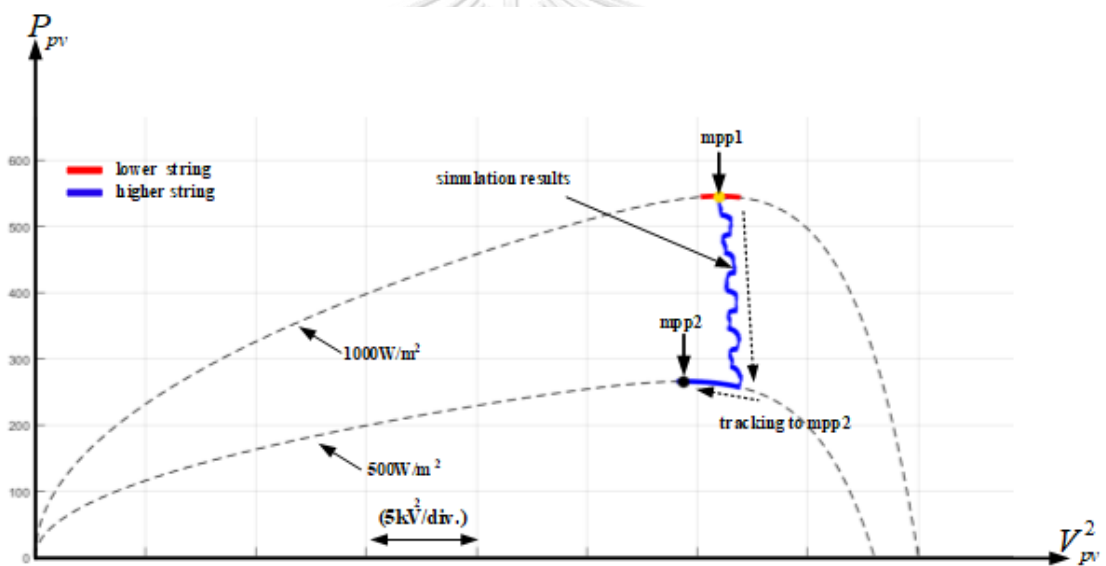


รูปที่ 5.27 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.3

จากรูปที่ 5.28 ช่วงเริ่มต้นจุดทำงานของสตริงบัสบนและบัสล่างจะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดเดียวกันค่ากำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ได้จะเท่ากับ  $1045 \text{ W}$  ต่อมาที่เวลา 2 วินาที สตริงบัสบนเริ่มถูกบังเงาทำให้ปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับค่อยๆลดลงจนท้ายสุดปริมาณความเข้มแสงที่สตริงบัสบนได้รับจะเท่ากับ  $500 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงได้รับแสงเท่าเดิม จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแสงของสตริงบัสบน จุดทำงานของสตริงบัสบนจะลู่เข้าสู่จุดทำงานใหม่ในขณะที่จุดทำงานของสตริงบัสล่างยังคงอยู่ที่เดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่ากำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ได้ภายใต้สภาวะสตริงบัสบนและบัสล่างได้รับปริมาณความเข้มแสงไม่เท่ากันมีค่าเป็น  $817 \text{ W}$  จากพฤติกรรมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างอิสระต่อกันภายใต้สภาวะมีการเปลี่ยนแปลงของแสงที่ลดลง และแสดงแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงได้ตามรูปที่ 5.29



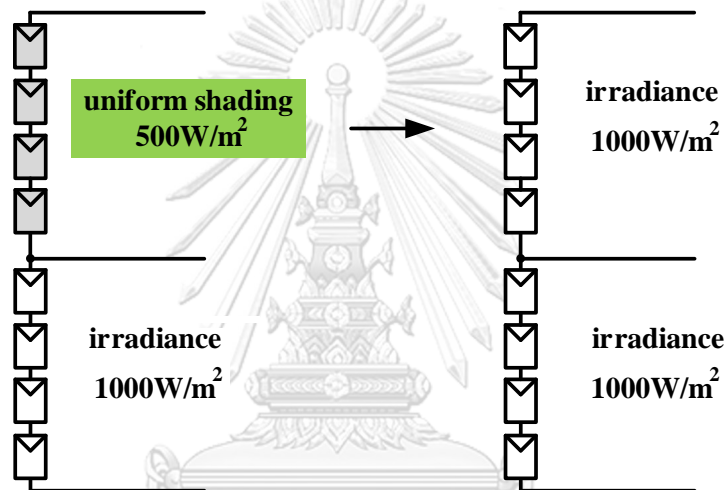
รูปที่ 5.28 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.3



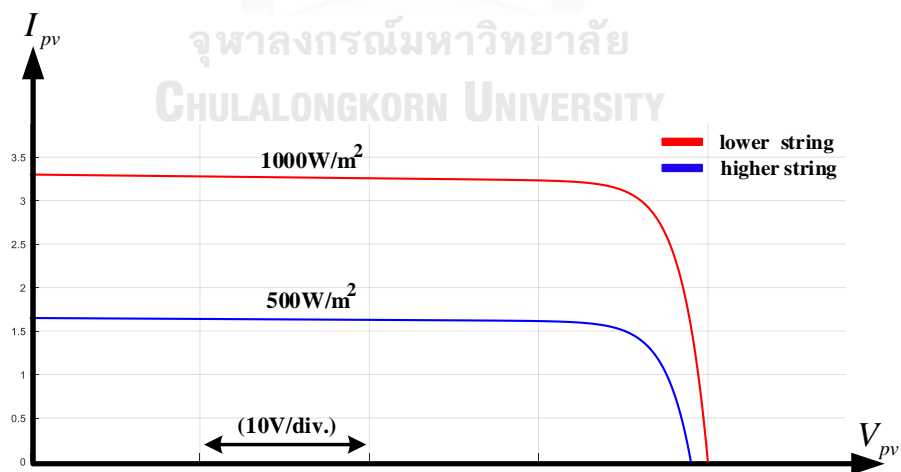
รูปที่ 5.29 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสองสตริงบัสบนและล่างในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.3

#### 5.4.4 การจำลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณี สตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงเพิ่มขึ้น

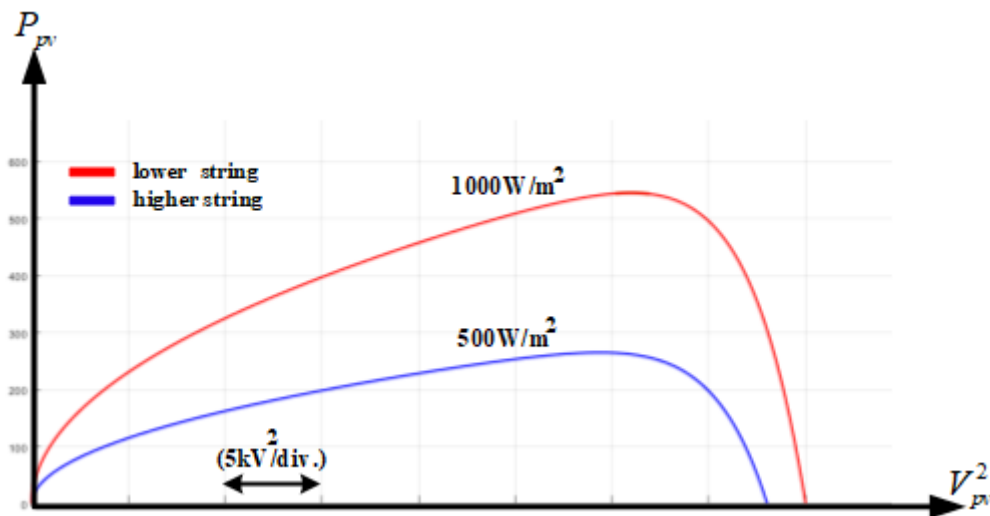
สำหรับเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้สตริงบัสบนและบัสล่างมีจำนวนแผงที่เท่ากันและเริ่มต้นการทำงานโดยสตริงบัสบนถูกบังเงาสม่ำเสมอทั้งสตริงปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับเท่ากับ  $500\text{W/m}^2$  และสตริงบัสล่างไม่ถูกบังเงาปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับเท่ากับ  $1000\text{W/m}^2$  ต่อมากำหนดให้สตริงบัสบนค่อยๆได้รับแสงเพิ่มขึ้นจนท้ายสุดสตริงบัสบนได้รับแสงเท่ากับ  $1000\text{W/m}^2$  ในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงได้รับปริมาณความเข้มแสงเท่าเดิม คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าของสตริงที่ใช้ในการจำลองในเงื่อนไขนี้แสดงได้ตามรูปที่ 5.28-5.29



รูปที่ 5.30 สตริงบัสบนและบัสล่างในการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.4



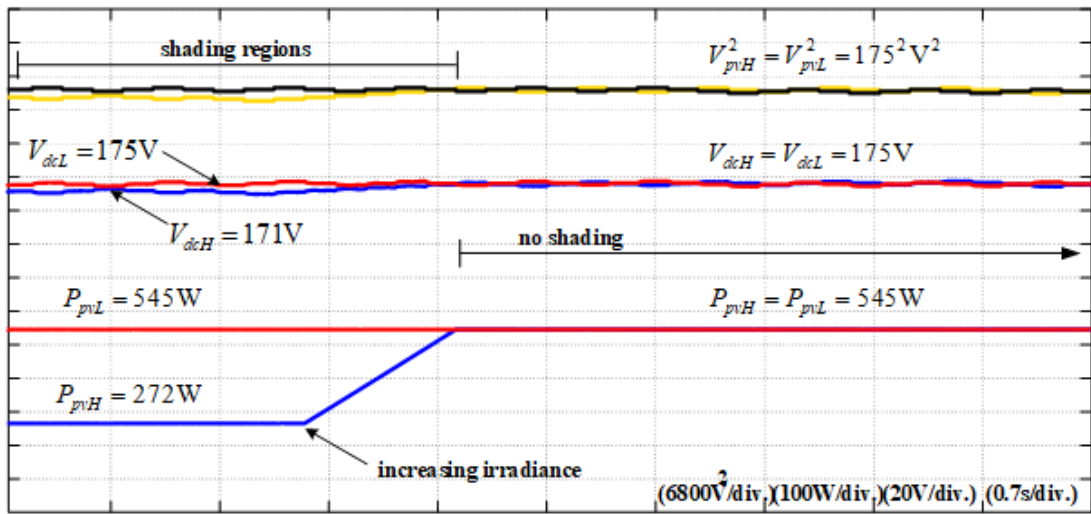
รูปที่ 5.31 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.4



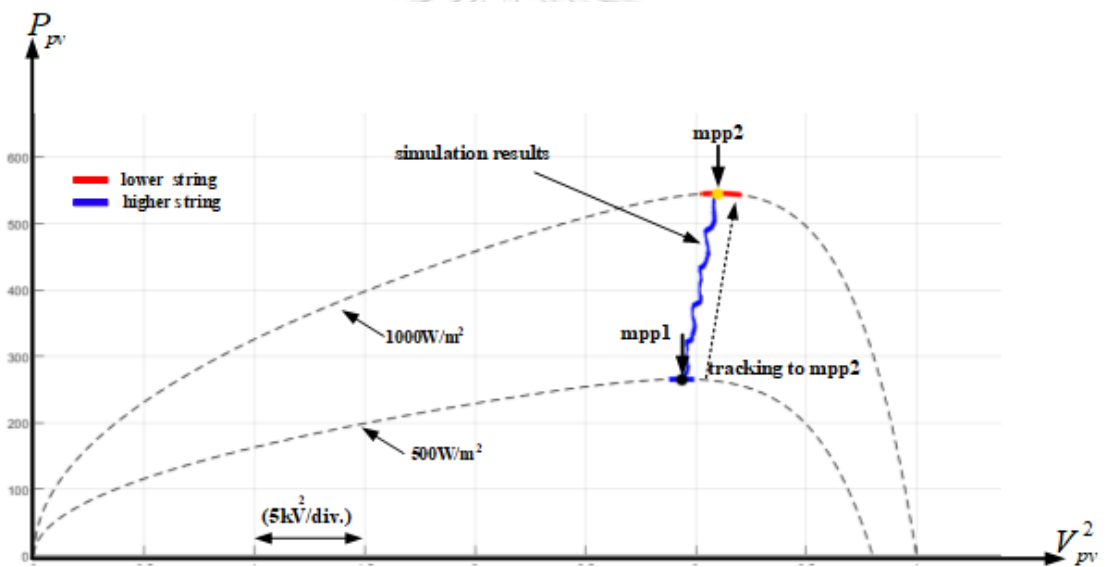
รูปที่ 5.32 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการจำลองเงื่อนไขที่ 5.4.4

จากรูปที่ 5.33 ช่วงเริ่มต้นจุดทำงานของสตริงบัสบนจะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด mpp1 ที่ความเข้มแสง  $500 \text{ W/m}^2$  และจุดทำงานของสตริงบัสล่างจะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด mpp2 ที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  แสดงได้ตามรูปที่ 5.34 กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $817 \text{ W}$  ต่อมาที่เวลา 2 วินาที สตริงบัสบนเริ่มได้รับปริมาณความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจนท้ายสุดปริมาณความเข้มแสงที่สตริงบัสบนได้รับจะเท่ากับ  $1000 \text{ W/m}^2$  ในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงได้รับแสงเท่าเดิม จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแสงของสตริงบัสบน จุดทำงานของสตริงบัสบนจะถ่วงเข้าสู่จุดทำงานใหม่ในขณะที่จุดทำงานของสตริงบัสล่างยังคงอยู่ที่เดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ท้ายสุดค่ากำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดมีค่าเป็น  $1045 \text{ W}$  จากพฤติกรรมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างอิสระต่อกันภายใต้สภาวะมีการเปลี่ยนแปลงของแสงที่เพิ่มขึ้น และสามารถแสดงแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงได้ตามรูปที่ 5.34





รูปที่ 5.33 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.4



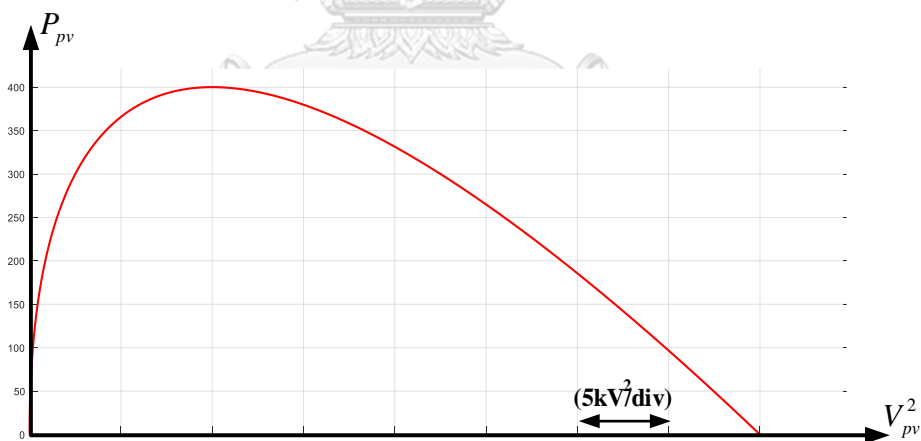
รูปที่ 5.34 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสองสตริงบัสบนและล่างในผลการจำลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.4

#### 5.4.5 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณี สตริงบัสบนและล่างได้รับปริมาณความเข้มแสงเท่ากัน

การทดลองในกรณีนี้จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงกลไกการทำงานของ การติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองโดยกำหนดให้สตริงบัสบนและบัสล่างมีจำนวนแผงเซลล์ที่เท่ากันและได้รับปริมาณความเข้มแสงที่เท่ากันคือ  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ซึ่งคุณลักษณะของกระแสต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าของสตริงบัสบนและล่างแสดงได้ตามรูปที่ 5.35-5.36



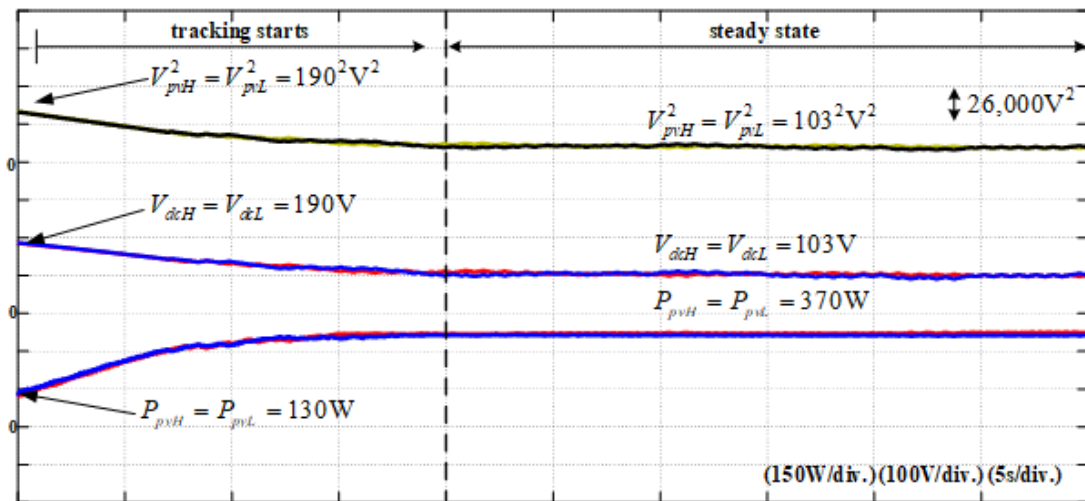
รูปที่ 5.35 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.5



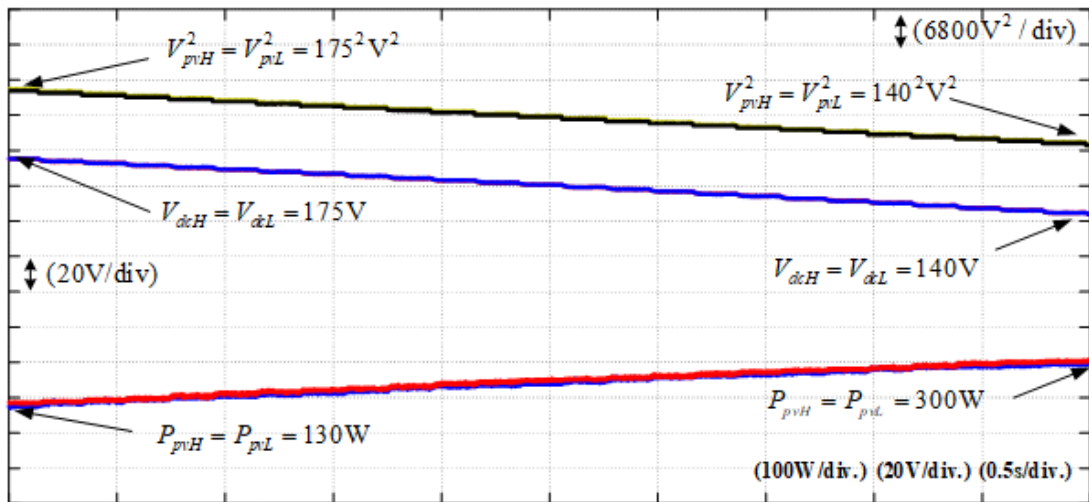
รูปที่ 5.36 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.5

จากรูปที่ 5.37 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองทางเวลาของการติดตามจุดกำลังสูงสุดของทั้งสตริง บัสบนและบัสล่าง จะเห็นว่าระบบเริ่มติดตามจากจุดทำงานเปิดวงจรของสตริงและลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุด พิจารณาช่วงสภาวะชั่วคราวในภาพขยายตามรูปที่ 5.38 จะเห็นว่าแรงดันที่บัสไฟตรงทั้งบัสบนและล่างจะลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุดด้วยคุณลักษณะที่เหมือนกัน จากรูปที่ 5.39 แสดงให้เห็นช่วงทำงานที่สภาวะคงตัวโดยที่ระบบจะแกว่งรอบๆจุดกำลังสูงสุด กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ได้มีค่า 740W

จากรูปที่ 5.40 แสดงแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองในช่วงการติดตามจุดกำลังสูงสุดซึ่งจะพบว่าค่าแรงดันยกกำลังสองจะลดลงไปสู่จุดกำลังสูงสุดและแกว่งรอบๆจุด mpp รูปที่ 5.40 ยังชี้ให้เห็นอีกว่าการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองนั้นสามารถตามรอยจุดทำงานได้จริงเป็นไปตามทฤษฎีที่นำเสนอ

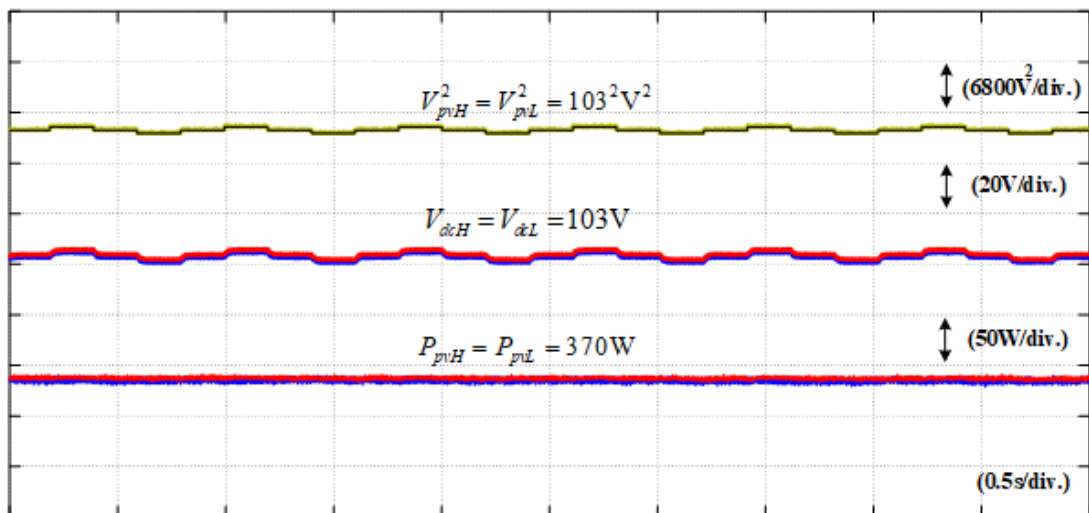


รูปที่ 5.37 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.5



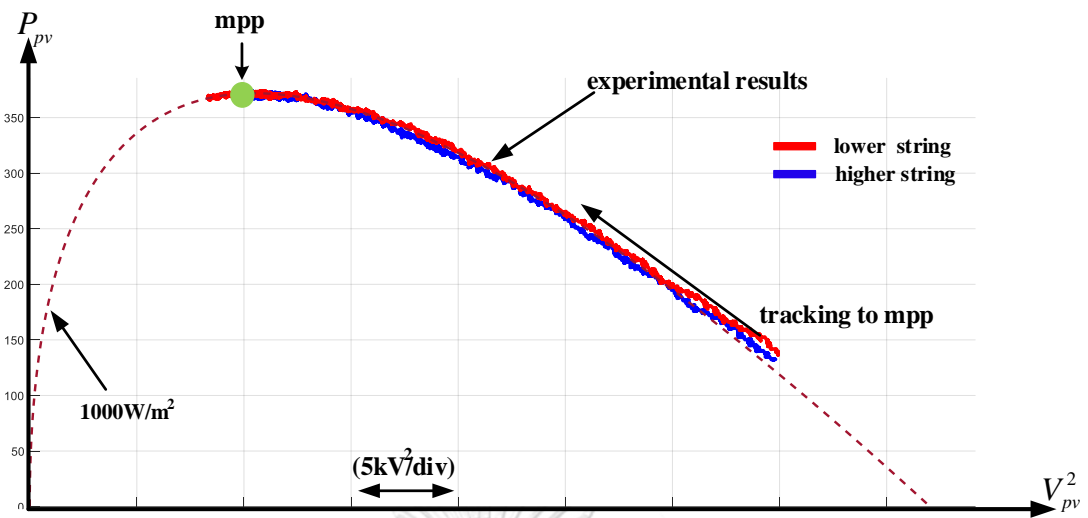
รูปที่ 5.38 ภาพขยายช่วงสภาวะชั่วคราวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่

5.4.5



รูปที่ 5.39 ภาพขยายช่วงสภาวะอยู่ตัวในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่

5.4.5

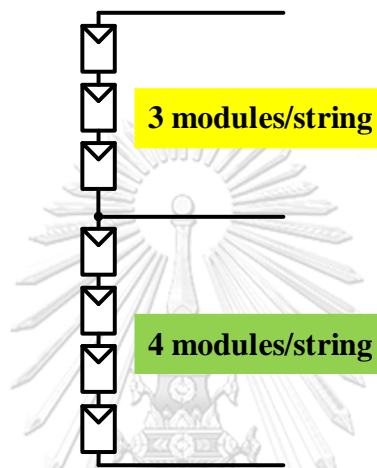


รูปที่ 5.40 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลอง

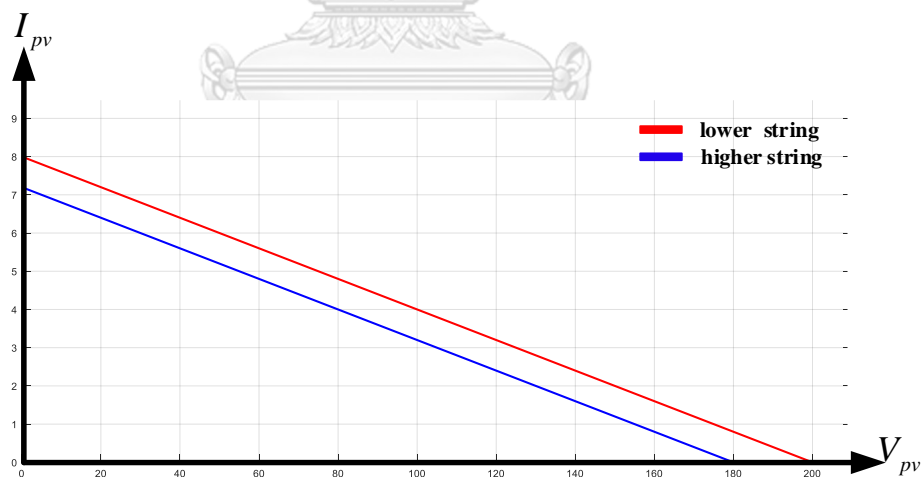
เงื่อนไขที่ 5.4.5

#### 5.4.6 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณีจำนวนแผงเซลล์ในแต่ละสตริงไม่เท่ากัน

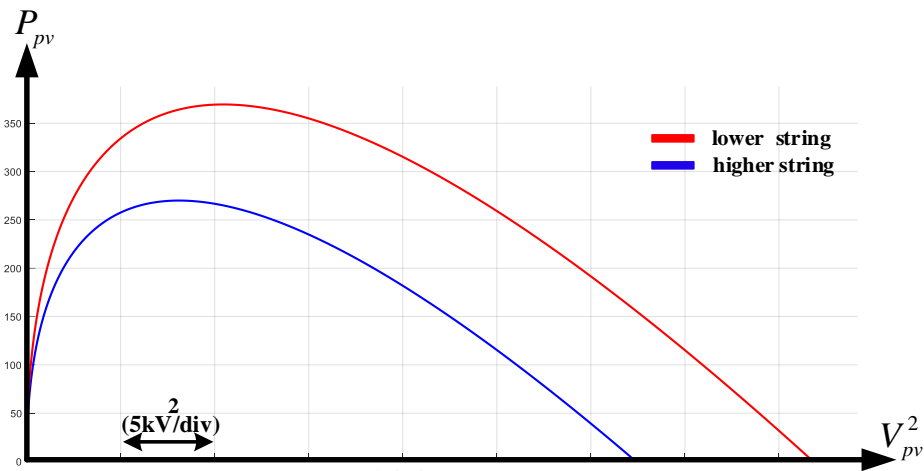
สำหรับในเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้สตริงบัสบนมีจำนวนแผงเซลล์น้อยกว่าสตริงบัสล่างโดยที่ปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับทั้งสองสตริงยังคงเท่ากันมีค่า  $1000\text{W/m}^2$  คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของทั้งสองสตริงบัสบนและล่างแสดงได้ตามรูปที่ 5.42-5.43 ระบบการติดตามจะถูกปรับให้เริ่มทำงานจากจุดทำงานแรงดันเปิดวงจรของแต่ละสตริง



รูปที่ 5.41 สตริงบัสบนและบัสล่างในเงื่อนไขการทดลองที่ 5.4.6

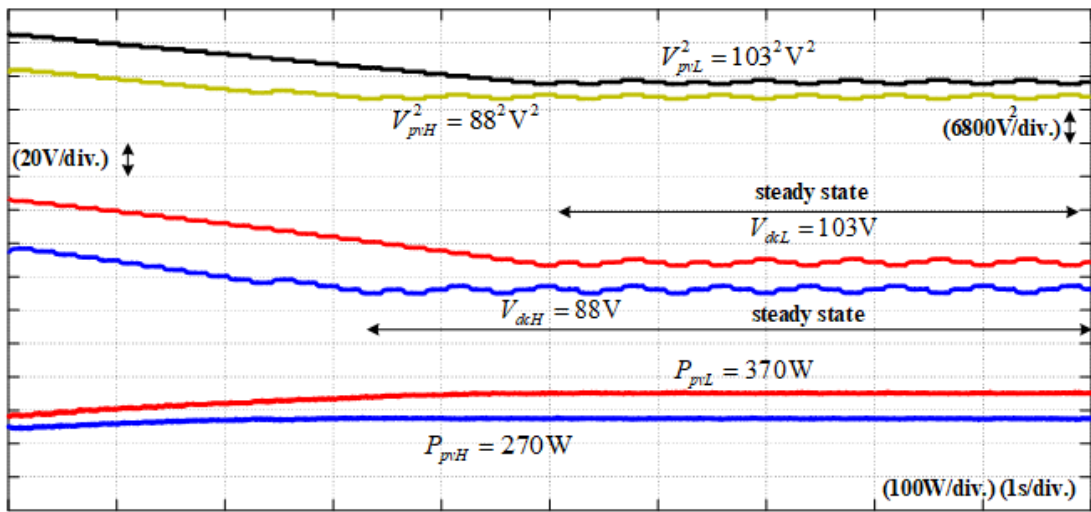


รูปที่ 5.42 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.6

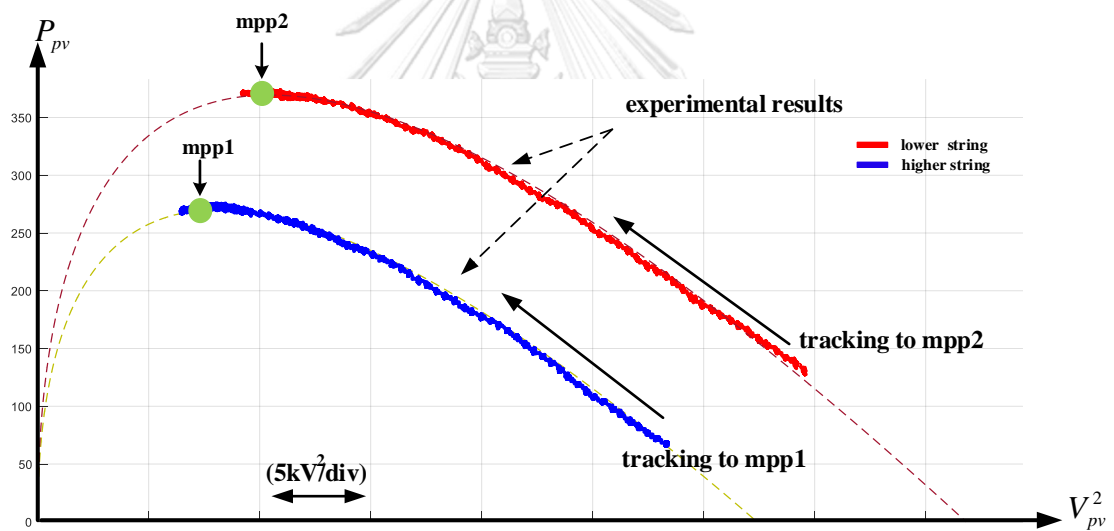


รูปที่ 5.43 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง  
เงื่อนไขที่ 5.4.6

จากรูปที่ 5.44 จะเห็นว่าจุดทำงานของสตริงบัสบนและบัสล่างจะลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของแต่ละสตริง โดยที่การติดตามจุดทำงานของสตริงบัสบนและสตริงบัสล่างต่างก็ทำงานอย่างอิสระต่อกัน เมื่อพิจารณาที่แรงดันของสตริงบัสบนในรูปที่ 5.44 จะเห็นได้ว่าที่เวลา 3.5 วินาที จุดทำงานของสตริงบัสบนจะลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุดและแกว่งรอบจุดกำลังสูงสุดของสตริงบัสบนในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงอยู่ในช่วงสภาวะชั่วคราวและกำลังลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุดของสตริงบัสล่างและท้ายสุดจุดทำงานของสตริงบัสล่างจะลู่เข้าสู่จุดกำลังสูงสุดที่เวลา 5 วินาที จากพฤติกรรมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าระบบการติดตามทั้งบัสบนและบัสล่างทำงานได้อิสระต่อกัน และสามารถแสดงแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงได้ตามรูปที่ 5.45



รูปที่ 5.44 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.6

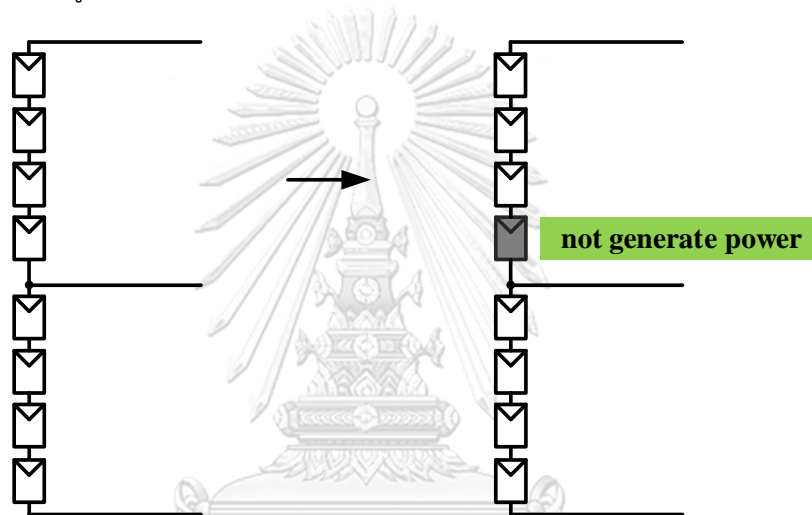


รูปที่ 5.45 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.6

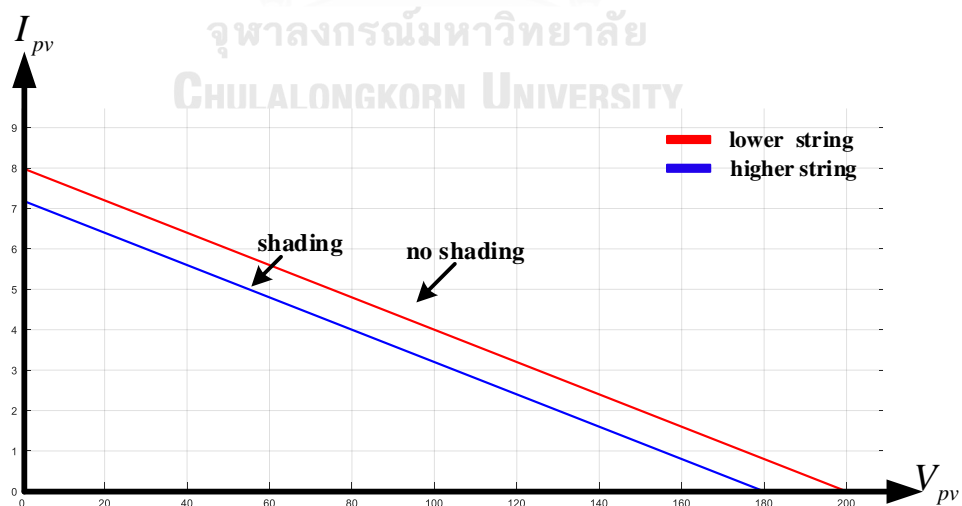


#### 5.4.7 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณี สตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงลดลง

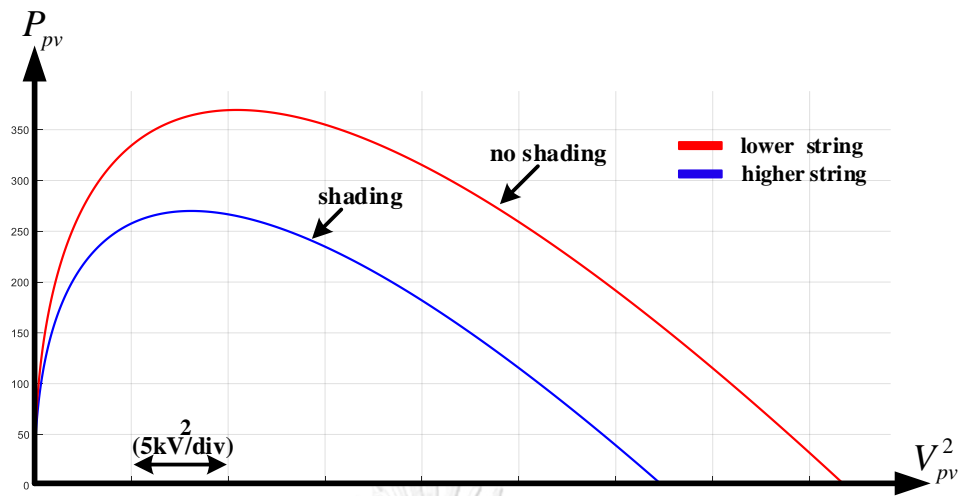
การทดลองในเงื่อนไขนี้จะกำหนดให้สตริงบัสบนและบัสล่างมีจำนวนแผงเซลล์เท่ากัน และกำหนดให้สตริงบัสบนค่อยๆถูกบังเงาจนท้ายที่สุดแผงเซลล์ในสตริงบัสบนถูกบังเต็มแผงจำนวน 1 แผง โดยที่แผงที่โดนบังจะไม่ผลิตกำลังไฟฟ้า การทดสอบช่วงเริ่มต้นทั้งสตริงบัสบนและล่างจะยังคงได้รับปริมาณแสงที่เท่ากัน โดยช่วงเริ่มต้นระบบจะทำงานอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดของแต่ละสตริง ต่อมาเราจะค่อยๆลดแสงที่สตริงบัสบนได้รับลง(ในการทดลองเราจะปรับลดแสงโดยการปรับลดค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายไฟตรงในรูปที่ 5.1)



รูปที่ 5.46 สตริงบัสบนและบัสล่างในเงื่อนไขทดลองที่ 5.4.7

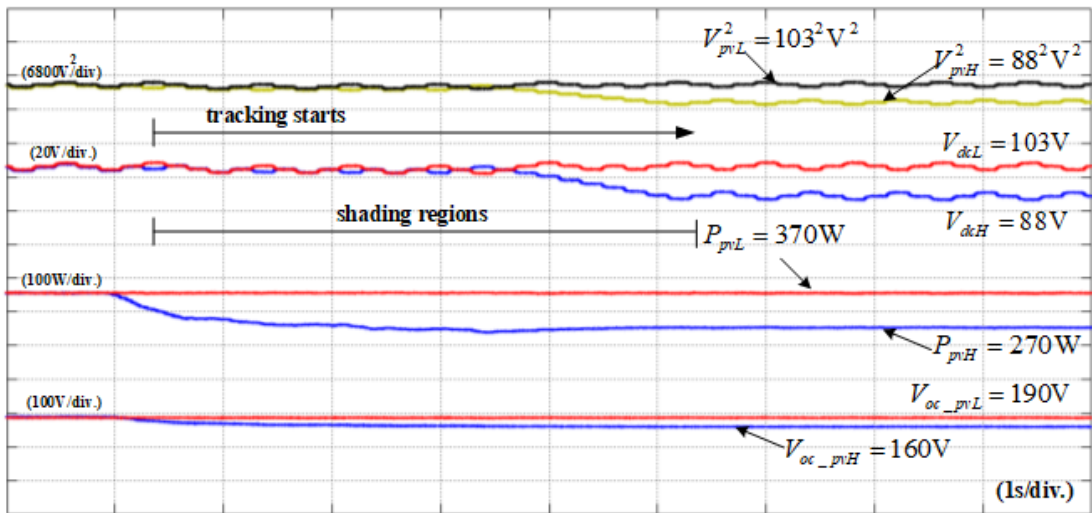


รูปที่ 5.47 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.7

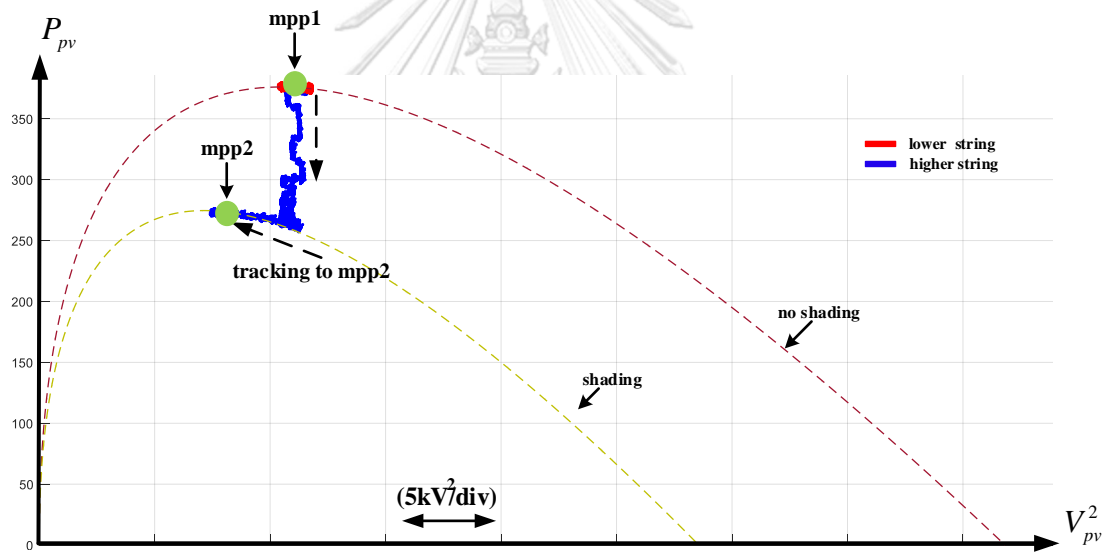


รูปที่ 5.48 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง  
เงื่อนไขที่ 5.4.7

จากรูปที่ 5.49 ช่วงเริ่มต้นจุดทำงานของสตริงบัสบนและบัสล่างจะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุดเดียวกันค่ากำลังไฟฟารวมทั้งหมดที่ได้จะเท่ากับ 740W ต่อมาที่เวลา 1 วินาที สตริงบัสบนเริ่มถูกบังเงาทำให้ปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับค่อยๆลดลงจนท้ายสุดแผงเซลล์ในสตริงบัสบนถูกบังเงาเต็ม 1 แผงส่งผลให้แรงดันเปิดวงจรของสตริงบัสบนมีค่าต่ำกว่าสตริงบัสล่าง ในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงได้รับแสงเท่าเดิม จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแสงของสตริงบัสบน จุดทำงานของสตริงบัสบนจะลู่เข้าสู่จุดทำงานใหม่ในขณะที่จุดทำงานของสตริงบัสล่างยังคงอยู่ที่เดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่ากำลังไฟฟารวมทั้งหมดที่ได้ภายใต้สภาวะสตริงบัสบนและบัสล่างได้รับปริมาณความเข้มแสงไม่เท่ากัน มีค่าเป็น 640W จากพฤติกรรมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างอิสระต่อกันภายใต้สภาวะมีการเปลี่ยนแปลงของแสงที่ลดลง และสามารถแสดงแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงได้ตามรูปที่ 5.50



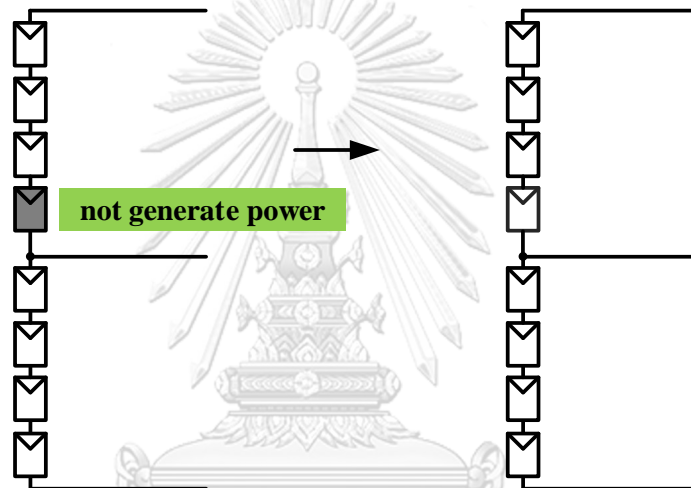
รูปที่ 5.49 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.7



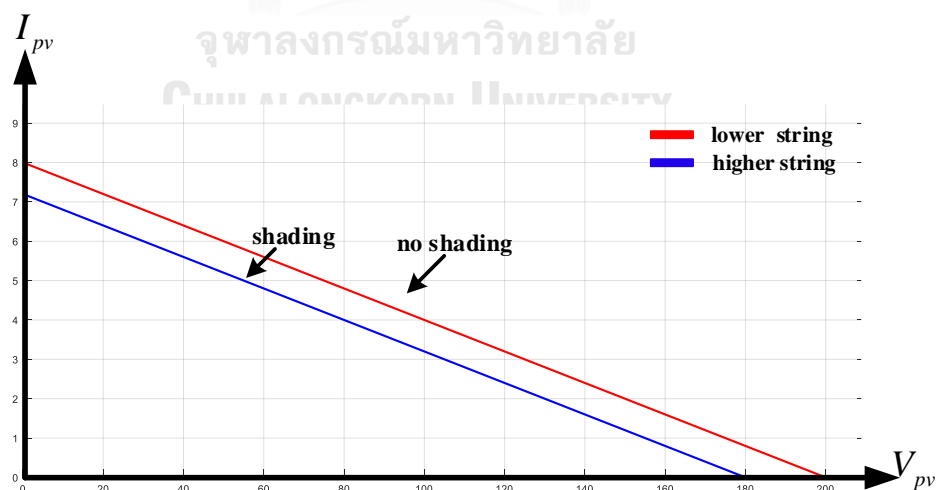
รูปที่ 5.50 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.7

#### 5.4.8 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณี สตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงเพิ่มขึ้น

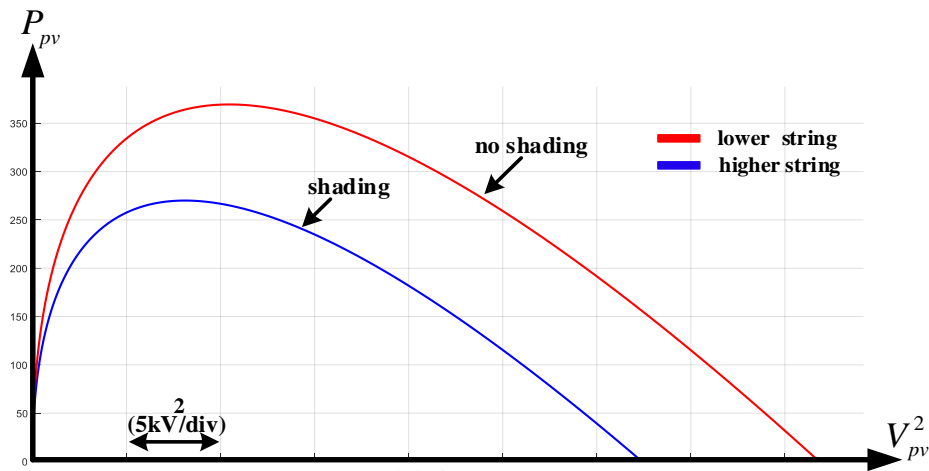
สำหรับเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้สตริงบัสบนและบัสล่างมีจำนวนแผงที่เท่ากันและเริ่มต้นการทำงานโดยสตริงบัสบนถูกบังเงาเต็ม 1 แผง โดยที่แผงที่ถูกบังจะไม่ผลิตกำลังไฟฟ้า และสตริงบัสล่างไม่ถูกบังเงาปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับเท่ากับ  $1000\text{W/m}^2$  ต่อมากำหนดให้สตริงบัสบนค่อยๆ ได้รับแสงเพิ่มขึ้นจนท้ายสุดสตริงบัสบนได้รับแสงเท่ากับ  $1000\text{W/m}^2$  (ไม่โดนบัง) ในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงได้รับปริมาณความเข้มแสงเท่าเดิม คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าของสตริงที่ใช้ในการทดลองในเงื่อนไขนี้แสดงได้ตามรูปที่ 5.52-5.53



รูปที่ 5.51 สตริงบัสบนและบัสล่างในเงื่อนไขการทดลองที่ 5.4.8

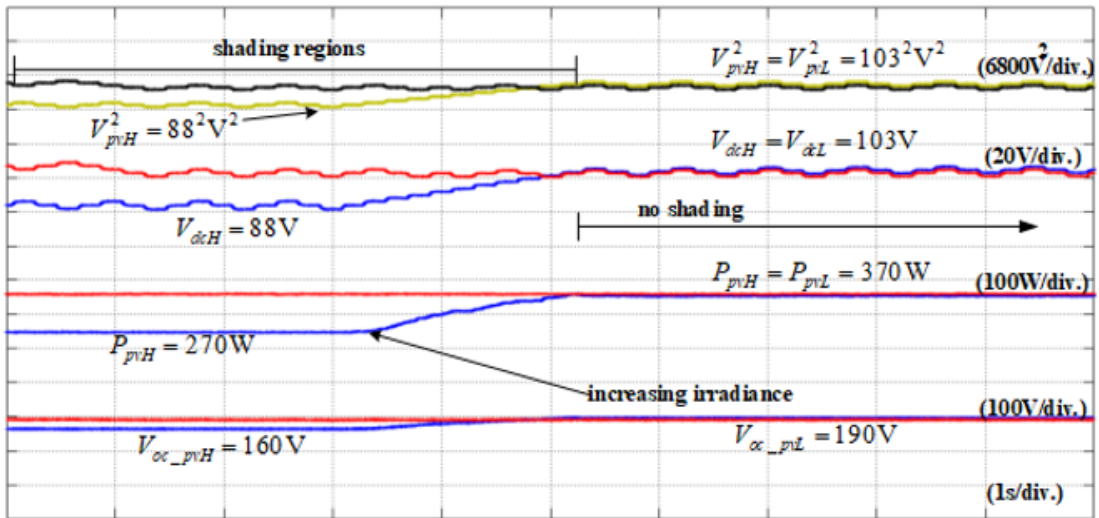


รูปที่ 5.52 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.8

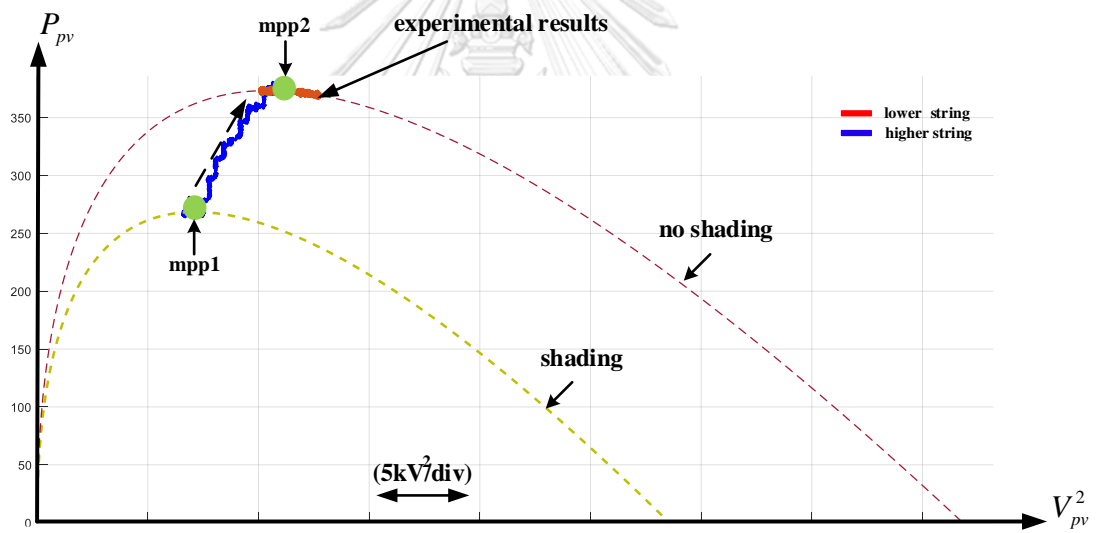


รูปที่ 5.53 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง  
เงื่อนไขที่ 5.4.8

จากรูปที่ 5.54 ช่วงเริ่มต้นแผงเซลล์ในสตริงบัสบนถูกบังเงาเต็มแผงมีผลทำให้แรงดันเปิดวงจรของสตริงบัสบนมีค่าต่ำกว่าสตริงบัสล่างและจุดทำงานของสตริงบัสบนจะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด  $mpp_1$  และจุดทำงานของสตริงบัสล่างจะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด  $mpp_2$  ที่ความเข้มแสง  $1000W/m^2$  (ไม่โดนบัง) แสดงได้ตามรูปที่ 5.55 กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $640W$  ต่อมาที่เวลา  $3.2$  วินาที สตริงบัสบนเริ่มได้รับปริมาณความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจนท้ายสุดปริมาณความเข้มแสงที่สตริงบัสบนได้รับจะเท่ากับ  $1000W/m^2$  ในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงได้รับแสงเท่าเดิม จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแสงของสตริงบัสบน จุดทำงานของสตริงบัสบนจะเลื่อนเข้าสู่จุดทำงานใหม่ที่  $mpp_2$  ในขณะที่จุดทำงานของสตริงบัสล่างยังคงอยู่ที่เดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ท้ายสุดค่ากำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดมีค่าเป็น  $740W$  จากพฤติกรรมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างอิสระต่อกันภายใต้สภาวะมีการเปลี่ยนแปลงของแสงที่เพิ่มขึ้น และสามารถแสดงแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงได้ตามรูปที่ 5.55



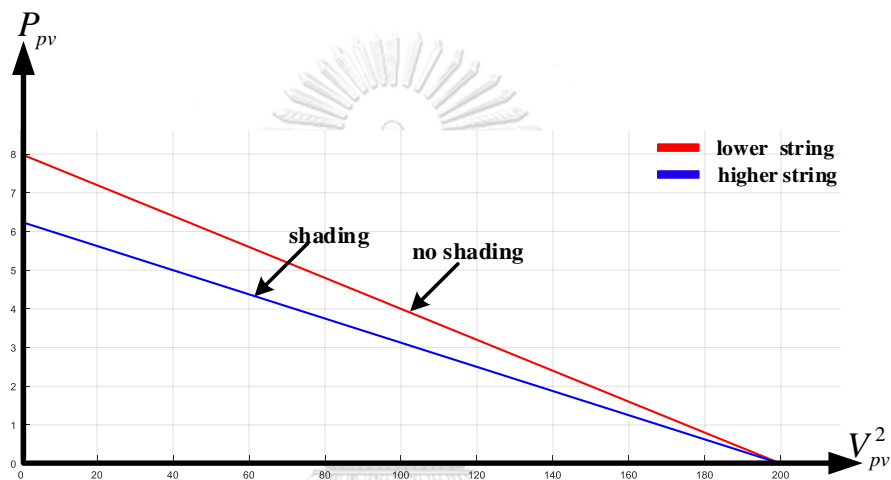
รูปที่ 5.54 ผลตอบสนองทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.8



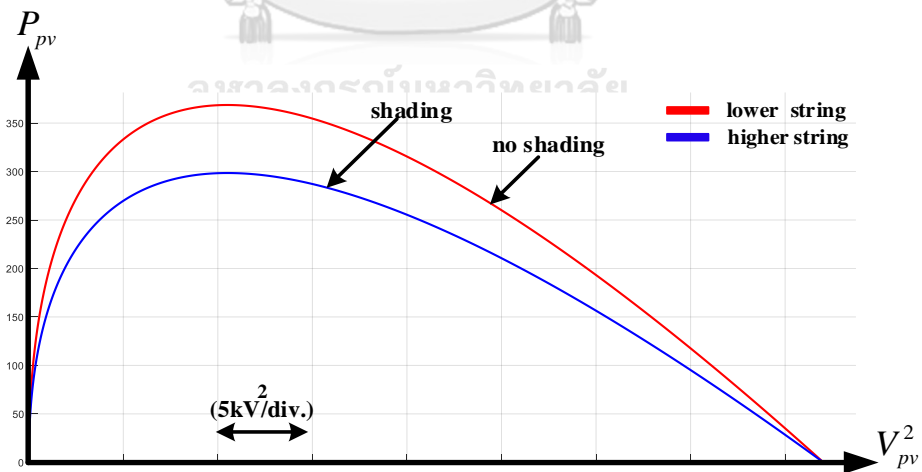
รูปที่ 5.55 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.8

5.4.9 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณี  
สตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงลดลงอย่างทันทีทันใด

สำหรับเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้สตริงบัสบนและบัสล่างมีจำนวนแผงที่เท่ากันและเริ่มต้นการทำงานโดยได้รับปริมาณความเข้มแสงที่เท่ากันคือ  $1000\text{W/m}^2$  ต่อมากำหนดให้สตริงบัสบนได้รับแสงลดลงอย่างทันทีทันใด(ถูกบังเงาบางส่วน) ในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงได้รับปริมาณความเข้มแสงเท่าเดิม คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าของสตริงที่ใช้ในการทดลองในเงื่อนไขนี้แสดงได้ตามรูปที่ 5.56-5.57

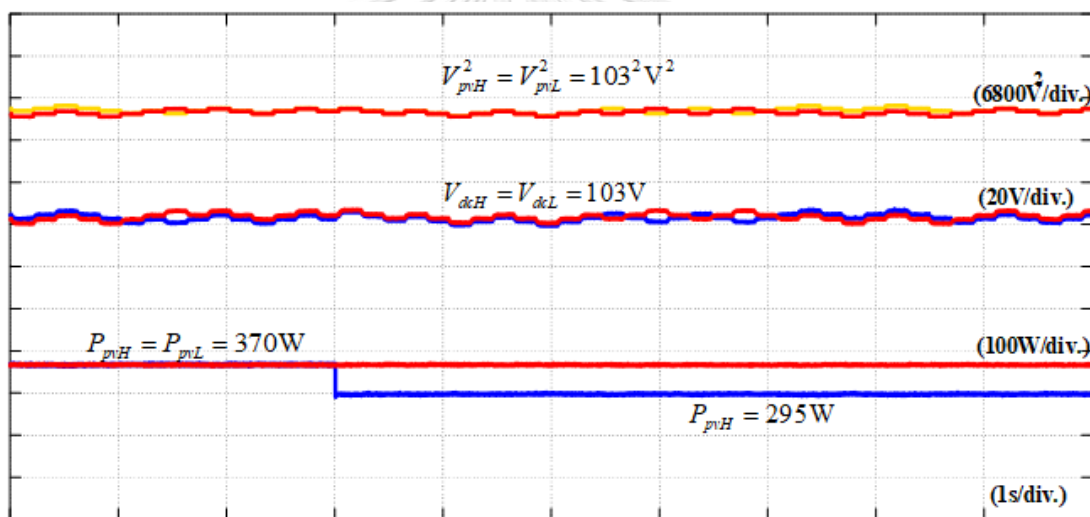


รูปที่ 5.56 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่ 5.4.9



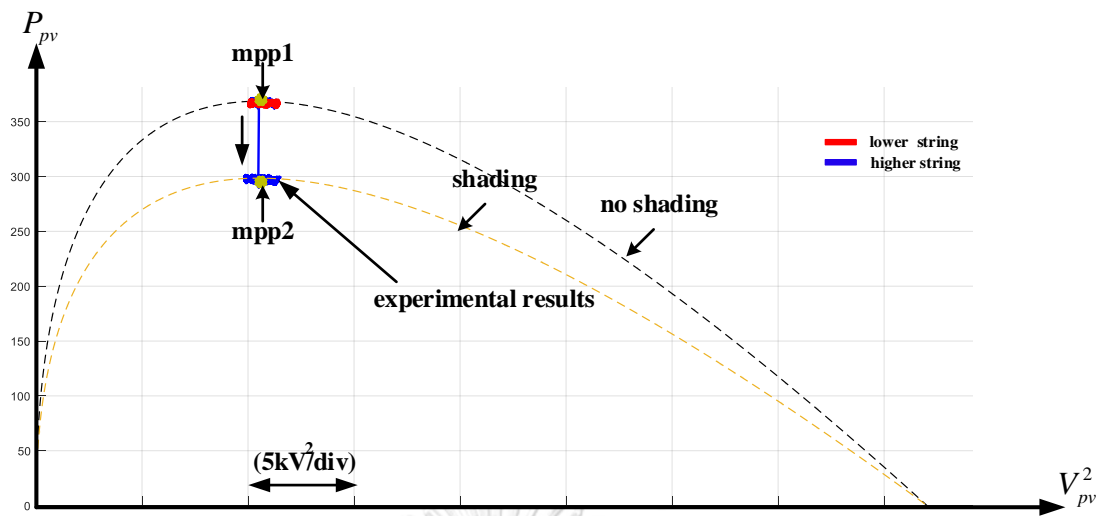
รูปที่ 5.57 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง  
เงื่อนไขที่ 5.4.9

จากรูปที่ 5.58 ช่วงเริ่มต้นจุดทำงานของสตรึงบัสบนและบัสล่างจะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด เดียวกันค่ากำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ได้จะเท่ากับ 740W ต่อมาที่เวลา 3วินาทีสตรึงบัสบนเริ่มถูกบังเงา ทำให้ปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับลดลงอย่างทันทีทันใดจนท้ายสุดสตรึงบัสบนได้รับปริมาณแสงที่ น้อยกว่าบัสล่าง ในขณะที่สตรึงบัสล่างยังคงได้รับแสงเท่าเดิม จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง แสงของสตรึงบัสบน จุดทำงานของสตรึงบัสบนจะลู่เข้าสู่จุดทำงานใหม่ในขณะที่จุดทำงานของสตรึง บัสล่างยังคงอยู่ที่เดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ค่ากำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ได้ภายใต้สภาวะสตรึงบัสบน และบัสล่างได้รับปริมาณความเข้มแสงไม่เท่ากันมีค่าเป็น 670W จากพฤติกรรมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างอิสระต่อกันภายใต้สภาวะมีการเปลี่ยนแปลงของแสงที่ลดลงแบบ ทันทีทันใด และสามารถแสดงแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตรึงได้ตามรูปที่ 5.59



รูปที่ 5.58 ผลตอบสนองของทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.9

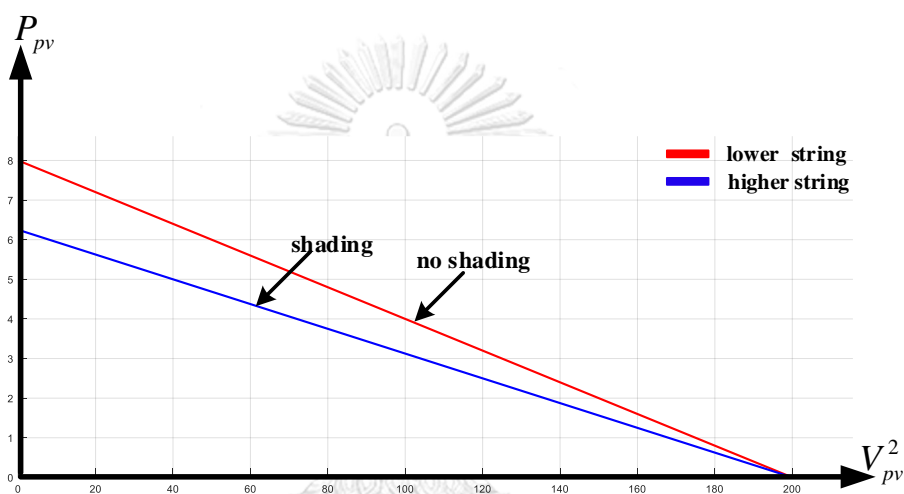




รูปที่ 5.59 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลอง  
เงื่อนไขที่ 5.4.9

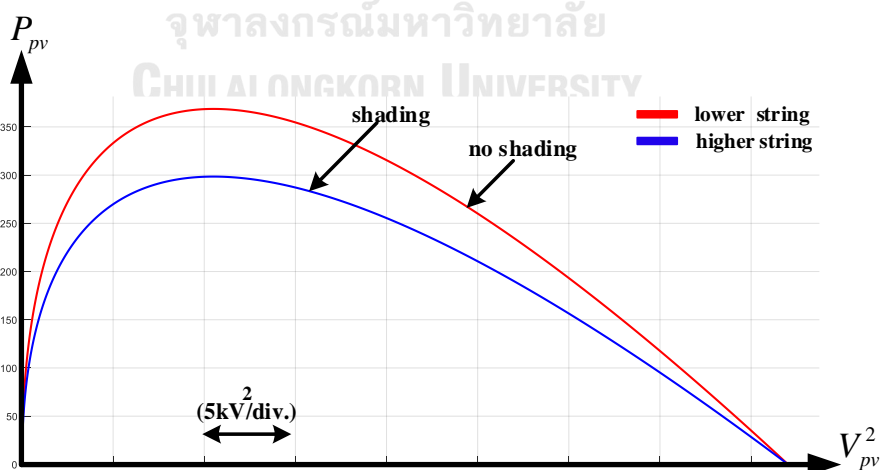
5.4.10 การทดลองการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองกรณี  
 สตริงบัสบนได้รับปริมาณแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด

สำหรับเงื่อนไขนี้เราจะกำหนดให้สตริงบัสบนและบัสล่างมีจำนวนแผงที่เท่ากันและเริ่มต้น  
 การทำงานโดยสตริงบัสบนถูกบังเงาบางส่วนปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับจะต่ำกว่าสตริงบัสล่าง และ  
 สตริงบัสล่างไม่ถูกบังเงาปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับเท่ากับ  $1000\text{W/m}^2$  ต่อมากำหนดให้สตริงบัสบน  
 ได้รับแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดจนท้ายสุดสตริงบัสบนได้รับแสงเท่ากับ  $1000\text{W/m}^2$  คุณลักษณะ  
 กระแสต่อแรงดันและกำลังไฟฟ้าของสตริงที่ใช้ในการทดลองในเงื่อนไขนี้แสดงได้ตามรูปที่ 5.60-5.61



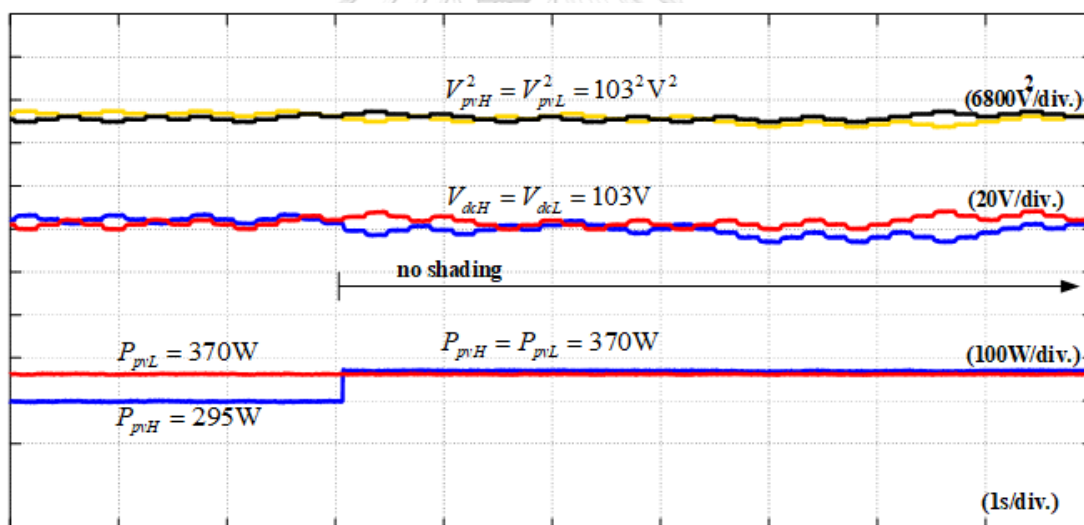
รูปที่ 5.60 คุณลักษณะกระแสต่อแรงดันของสตริงบัสบนและบัสล่างที่ใช้ในการทดลองเงื่อนไขที่

5.4.10

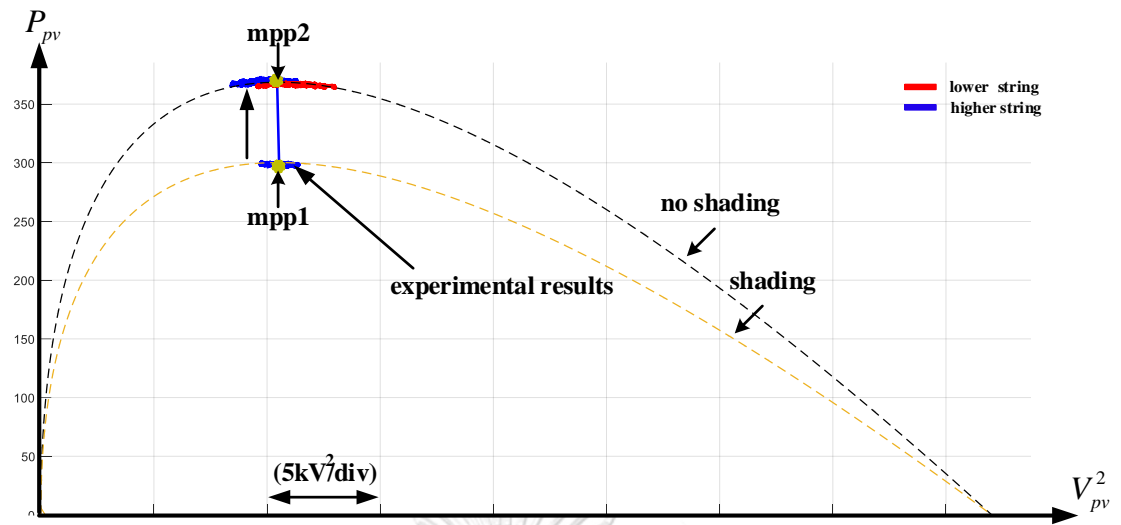


รูปที่ 5.61 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในการทดลอง  
 เงื่อนไขที่ 5.4.10

จากรูปที่ 5.62 ช่วงเริ่มต้นสตริงบัสบนถูกบังเงาบางส่วนมีผลทำให้กระแสลัดวงจรของสตริงบัสบนมีค่าต่ำกว่าสตริงบัสล่าง โดยที่จุดทำงานของสตริงบัสบนจะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด  $mpp1$  และจุดทำงานของสตริงบัสล่างจะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด  $mpp2$  ที่ความเข้มแสง  $1000\text{W/m}^2$  (ไม่โดนบัง) แสดงได้ตามรูปที่ 5.63 กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $670\text{W}$  ต่อมาที่เวลา 3 วินาที สตริงบัสบนได้รับปริมาณความเข้มแสงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดจนท้ายสุดปริมาณความเข้มแสงที่สตริงบัสบนได้รับจะเท่ากับ  $1000\text{W/m}^2$  ในขณะที่สตริงบัสล่างยังคงได้รับแสงเท่าเดิม จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแสงของสตริงบัสบน จุดทำงานของสตริงบัสบนจะเข้าสู่จุดทำงานใหม่ที่  $mpp2$  ในขณะที่จุดทำงานของสตริงบัสล่างยังคงอยู่ที่เดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ท้ายสุดค่ากำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมดมีค่าเป็น  $740\text{W}$  จากพฤติกรรมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างอิสระต่อกันภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของแสงที่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด และสามารถแนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงได้ตามรูปที่ 5.63



รูปที่ 5.62 ผลตอบสนองของทางเวลาในการติดตามจุดกำลังสูงสุดในผลการทดลองตามเงื่อนไขที่ 5.4.10



รูปที่ 5.63 แนววิถีของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของสตริงบัสบนและบัสล่างในผลการทดลอง  
เงื่อนไขที่ 5.4.10

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมแรงดันในแต่ละบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์สามระดับอย่างอิสระต่อกันโดยอาศัยวิธีการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์เซค รวมทั้งเสนอรูปแบบของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงและอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังสูงสุดในแต่ละสตรึงที่เชื่อมต่อกับบัสไฟตรงด้านบนและบัสไฟตรงด้านล่าง โดยวิธีที่นำเสนอแบ่งออกได้ 3 หัวข้อหลักๆคือ

- การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาร์เซคเพื่อแบ่งสัดส่วนควบคุมกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรง
- การออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่มีความเป็นเชิงเส้น
- อัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการจำลองและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการแบ่งสัดส่วนแรงดันคำสั่งบัสบนและบัสล่างตามสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจ่ายออกในแต่ละบัสไฟตรงในการมอดูเลตนั้นสามารถควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกในแต่ละบัสได้จริง และทำให้สามารถแยกควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในแต่ละบัสได้อย่างอิสระต่อกัน

จากผลการจำลองและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมการติดตามจุดกำลังสูงสุดบนพื้นฐานกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันยกกำลังสอง ระบบสามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดได้จริงภายใต้สภาวะสตรึงบัสบนและบัสล่างได้รับปริมาณความเข้มแสงที่เท่ากันและไม่เท่ากัน และยังชี้ให้เห็นอีกว่าภายใต้เงื่อนไขสตรึงบัสบนและบัสล่างได้รับปริมาณแสงที่แตกต่างกันนั้น ระบบสามารถแยกติดตามจุดกำลังสูงสุดในแต่ละสตรึงได้อย่างอิสระต่อกัน

## 6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนางานวิจัยในลำดับถัดไป

จากวิธีการทดสอบในงานวิจัยนี้เราใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟตรงอนุกรมกับตัวต้านทานปรับค่าซึ่งมีข้อจำกัดในด้านการทดสอบกล่าวคือ คุณลักษณะแรงดันต่อกระแสที่ได้จะมีลักษณะเพียงแค่นี้ เทียบเคียงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่านั้น และกรณีที่เราต้องทดสอบเปลี่ยนระดับความเข้มแสง ด้วยคุณลักษณะวงจรดังกล่าวจะทำให้ค่าแรงดันที่จุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดไม่เปลี่ยนซึ่งต่างจากคุณลักษณะแรงดันต่อกระแสของแผงเซลล์จริง ดังนั้นในอนาคตเราควรที่จะทดสอบกับวงจรจำลองคุณลักษณะแรงดันต่อกระแสของแผงเซลล์จริง (PV-simulator)

จากวิธีการมอดูเลตที่นำเสนอแสดงให้เห็นว่าการเลือกรูปแบบการสวิตช์โดยการบวกแรงดันลำดับศูนย์นั้นไม่มีผลต่อการควบคุมสัดส่วนกำลังไฟฟ้าในแต่ละบัสไฟตรง ดังนั้นงานวิจัยภายหน้าอาจลองเปลี่ยนเลือกวิธีการสวิตช์แบบอื่นๆเพื่อทดสอบให้เห็นถึงความแตกต่างเช่น ลดกำลังสูญเสียในการสวิตช์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเป็นต้น

## บรรณานุกรม

1. Remus Teodorescu ML, Pedro Rodr'iguez. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. 1 ed. A John Wiley and Sons 2011. 407 p.
2. Maria Carmela Di Piazza GV. Photovoltaic Sources Modelling and Emulation. 1 ed. Springer 2013. 304 p.
3. Alonso-Mart'inez J, Eloy-Garc'ia Jn, Arnaltes S. Direct power control of grid connected PV systems with three level NPC inverter. Solar Energy. 2010;84(7):1175-86.
4. Park Y, Sul S, Lim C, Kim W, Lee S. Asymmetric Control of DC-Link Voltages for Separate MPPTs in Three-Level Inverters. IEEE Transactions on Power Electronics. 2013;28(6):2760-9.
5. Choi U, Blaabjerg F, Lee K. Control Strategy of Two Capacitor Voltages for Separate MPPTs in Photovoltaic Systems Using Neutral-Point-Clamped Inverters. IEEE Transactions on Industry Applications. 2015;51(4):3295-303.
6. Nabae A, Takahashi I, Akagi H. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. IEEE Transactions on Industry Applications. 1981;IA-17(5):518-23.
7. อุดมโชค ก. การจำลองลักษณะสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสสำหรับอินเวอร์เตอร์ โฟโตวอลเทจิก: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2558.
8. Ellis G. Control System Design Guide. 3 ed 2004. 489 p.
9. Eram T, Chapman PL. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2007;22(2):439-49.
10. Srdjan Srdic ZR. Implementation of The Incremental Conductance MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. IX Symposium Industrial Electronics INDEL. 2012.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายมนต์ชัย อரியพุกษ์
วัน เดือน ปี เกิด	20 พฤศจิกายน 2535
สถานที่เกิด	จังหวัด พระนครศรีอยุธยา
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหา นคร ปีการศึกษา 2557



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY