

วงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้  
สำหรับการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์

BUCK CONVERTERS CONTROLLED BY H INFINITY LOOP SHAPING FOR  
PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-020-057

วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้  
สำหรับการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์

BUCK CONVERTERS CONTROLLED BY H INFINITY LOOP SHAPING FOR  
PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-020-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BUCK CONVERTERS CONTROLLED BY H INFINITY LOOP SHAPING FOR  
PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019

KMITL-2019-EN-M-020-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วงจรถอบเอชอินฟินิตี้สำหรับการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์  
นายพีรวิชญ์ ดิถีสวัสดิ์เวทย์

นักศึกษา

58601259

รหัสนักศึกษา

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2562

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)

รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทน (Robust Control) ด้วยเทคนิคการจัด  
สัณฐานวงจรถอบเอชอินฟินิตี้ (H Infinity Loop Shaping) สำหรับวงจรถอบระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีการ  
ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแรงดันด้านอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่แรงดันทางด้านเอาต์พุตคงที่  
ซึ่งโหลดภาระทางไฟฟ้าเป็นตัวต้านทาน นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบความสามารถในการรักษา  
เสถียรภาพของตัวควบคุมแบบการจัดสัณฐานวงจรถอบเอชอินฟินิตี้กับตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูน  
โดยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols tuning method) โดยใช้เครื่องจำลองเซลล์  
แสงอาทิตย์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่ดีของตัวควบคุมที่นำเสนอในวงจรถอบระดับ  
แรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Buck converters controlled by H infinity loop shaping for photovoltaic applications
Student	Mr. Phirawit Dithisawatwet
Student ID.	58601259
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Worachat Suwan-ngam
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai

### Abstract

This research work aims to design the H Infinity loop shaping technique for the robust control system in buck converter with photovoltaic applications, where the input voltage is focused as the uncertain variable while the output voltage is constant and the load is a resistor. Furthermore, the performance and stability of the system embedded with H infinity loop shaping controller and PID Ziegler–Nichols tuning method controller were compared using solar cell simulator. The results show the effectiveness of the proposed robust controller applied in the buck converter with photovoltaic applications.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นอย่างดีได้ด้วยการชี้แนะคำปรึกษาและการเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม และรศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ่งในความกรุณา และความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณกองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หมายเลขทุนวิจัย KREF055706

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการ ECC305 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ คอยให้การช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อรรถพล เก้าพิทักษ์กุล และพี่ๆ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการ ECC404 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่คอยให้การช่วยเหลือ และเอื้ออำนวยความสะดวกและอุปกรณ์การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือเรื่องงานและเวลาในการปฏิบัติงานตลอดจนอำนวยความสะดวกเรื่องต่าง ๆ เป็นอย่างมาก

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พีริวิชญ์ ดิถีสวัสดิ์เวทย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell).....	5
2.1.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์.....	5
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.1.3 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.2 วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter).....	9
2.2.1 หลักการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	10
2.2.2 การหาค่าอัตราการขยายแรงดันของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	12
2.2.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรทอนระดับแรงดัน.....	12
2.2.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก.....	15
2.3 การควบคุมแบบคงทน (Robust Control).....	16
2.3.1 แผนภาพโบเดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด.....	19
2.3.2 ผลตอบสนองแบบวงรอบปิด.....	20
2.3.3 การกำหนดเงื่อนไขบังคับบนผลตอบสนองความถี่.....	21
2.3.4 การควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้.....	24
2.4 เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification).....	25
2.4.1 การประมาณค่ากำลังสองต่ำสุด (least squares estimation).....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุมคงทน.....	30
3.1 โครงสร้างวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า .....	30
3.1.1 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดของวงจรถอนแรงดันไฟฟ้า (Inductance).....	31
3.1.2 การหาค่าตัวเก็บประจุต่ำสุดของวงจรถอนแรงดันไฟฟ้า (Capacitance).....	31
3.2 วงจรป้อนกลับแรงดัน (Voltage Feedback Circuit) .....	32
3.3 การออกแบบตัวควบคุม.....	34
3.4 สรุปผลการออกแบบ .....	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	44
4.1 การทดลองและผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	44
4.1.1 วงจรและขั้นตอนการทดลอง .....	44
4.2 การปรับจูนโดยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols tuning method).....	46
4.3 การแปลงตัวควบคุมจากสัญญาณต่อเนื่องทางเวลา (Continuous Time) เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discontinuous Time).....	47
4.4 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์.....	48
4.5 ผลการทดลองเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์ แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงคงที่ .....	51
4.5.1 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสรรฐาน วงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง 1000 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	51
4.5.2 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสรรฐาน วงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง 700 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	53
4.5.3 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสรรฐาน วงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง 400 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	54
4.5.4 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสรรฐาน วงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง 100 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	56
4.5.5 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสรรฐาน วงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง 1000 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.6 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณ วงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง 700 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	60
4.5.7 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณ วงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง 400 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	61
4.5.8 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณ วงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง 100 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	63
4.6 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง มีการเปลี่ยนแปลง .....	65
4.6.1 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง จาก 1000 เป็น 700 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	65
4.6.2 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง จาก 1000 เป็น 400 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	67
4.6.3 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง จาก 1000 เป็น 100 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	69
4.6.4 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง จาก 1000 เป็น 700 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	71
4.6.5 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง จาก 1000 เป็น 400 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	73
4.6.6 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง จาก 1000 เป็น 100 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	75
4.7 สรุปผลการทดลอง .....	77

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	78
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	78
5.1 ข้อเสนอแนะ.....	79
เอกสารอ้างอิง .....	80
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เงื่อนไขบังคับของ $S(j\omega)$ และ $T(j\omega)$ .....	22
2.2 เงื่อนไขบังคับของ $L(j\omega)$ .....	22
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรการทดลอง .....	45
4.2 ตารางการปรับค่าเกณฑ์วิธีซิกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols tuning method) .....	46
4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะชั่วคราวระหว่างตัวควบคุมแบบ จัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ กับ ตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ความเข้มแสง 1000, 700, 400 และ 100 วัตต์/ตารางเมตร และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	57
4.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะชั่วคราวระหว่างตัวควบคุมแบบ จัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ กับ ตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ความเข้มแสง 1000, 700, 400 และ 100 วัตต์/ตารางเมตร และ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	64
4.5 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง ระหว่างตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ กับ ตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ความ เข้มแสง 1000-700, 1000-400, และ 1000-100 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	70
4.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง ระหว่างตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ กับ ตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ความ เข้มแสง 1000-700, 1000-400, และ 1000-100 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	76

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ.....	6
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	6
2.4 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ .....	7
2.5 วงจรสมมูลของเทวินินของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานในโหมดแหล่งจ่ายกระแส .....	8
2.6 วงจรทอนระดับแรงดัน .....	10
2.7 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส .....	10
2.8 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส .....	11
2.9 แรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ.....	13
2.10 กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุและอัตราเคลื่อนที่ของแรงดันด้านออก .....	15
2.11 การรบกวนรูปแบบต่าง ๆ .....	17
2.12 ระบบที่มีความไม่แน่นอนและการควบคุมแบบวงรอบปิด.....	18
2.13 บล็อกไดอะแกรมของระบบ .....	18
2.14 ระบบป้อนกลับหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต.....	21
2.15 เงื่อนไขบังคับบน $ S(j\omega) $ และ $ T(j\omega) $ .....	23
2.16 เงื่อนไขบังคับบนแผนภาพโพลของ $L(s)$ .....	23
2.17 การควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบปิด.....	24
2.18 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง OE.....	27
2.19 เวกเตอร์ของค่าเอาต์พุตและค่าความผิดพลาดใน Column space ของ $\varphi^T$ .....	29
3.1 โครงสร้างวงจรถอนระดับแรงดัน.....	30
3.2 วงจรถอนแรงดันไฟฟ้า.....	32
3.3 วงจรป้อนกลับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Feedback Circuit).....	33
3.4 การควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบปิด.....	34
3.5 หน้าต่างของฟังก์ชันการหาพารามิเตอร์ระบบ .....	35
3.6 ข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์.....	36
3.7 หน้าต่างการประมาณแบบจำลองแบบ OE (Output Error).....	37
3.8 หน้าต่างแสดงความเข้ากันได้ระหว่างเอาต์พุตของแบบจำลองกับเอาต์พุตจริง .....	38
3.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ.....	38
3.10 แผนภาพโพลของระบบวงรอบเปิด .....	40
3.11 แผนภาพโพลของระบบวงรอบปิด .....	42
4.1 แผนภาพวงจรถจริงที่ใช้ในการทดลอง.....	44
4.2 เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง.....	45
4.3 อุปกรณ์ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ .....	45
4.4 การแปลงสัญญาณตัวควบคุมจากสัญญาณต่อเนื่องเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง .....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แผนภาพไดอะแกรมของตัวควบคุมคงทนแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง .....	46
4.6 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า (I-V curve) ของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น Kyocera Solar ks20 ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	49
4.7 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1000 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	52
4.8 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	53
4.9 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 400 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	55
4.10 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 100 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	56
4.11 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1000 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	58
4.12 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 700 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	60
4.13 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 400 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	62
4.14 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 100 วัตต์/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	63
4.15 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมี การเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 700 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	66
4.16 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมี การเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 400 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	67
4.17 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมี การเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 100 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส .....	69
4.18 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมี การเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 700 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	71
4.19 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมี การเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 400 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	73
4.20 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมี การเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 100 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันพลังงานถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของคนในประเทศ และพลังงานกำลังเป็นที่นิยมในขณะนี้คือพลังงานทดแทน เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและเป็นพลังงานที่มีเหลืออยู่มากมายซึ่งพลังงานเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ด้วยตัวเอง เช่น ลม น้ำ แสงแดด ขณะนี้ประเทศของเรามีพลังงานหมุนเวียนคิดเป็น 22.46% [1] ของพลังงานที่ใช้ภายในประเทศและกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

ประเทศไทยเริ่มที่จะให้ความสนใจกับพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้นเพราะว่าสภาพภูมิประเทศของประเทศไทยที่ตั้งอยู่ในเขตร้อน [2] นอกจากนี้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในหลายภาคในประเทศและมีความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้แก่คนในประเทศใช้ประโยชน์มากมาย เช่น การนำระบบพลังงานแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับการใช้โรงจักรดีเซลในการผลิตกระแสไฟฟ้าในอินเดียพบว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์เหมาะสมในการใช้และมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่า [3] เป็นต้น ทุกวันนี้มีการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้กับวงจรแปลงผันกระแสตรง-กระแสตรงอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น วงจรติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด วงจรชาร์จแบตเตอรี่ เป็นต้น วงจรดังกล่าวมีหลายประเภท เช่น วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (buck converter) วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (boost converter) วงจรทอน-ทอนระดับแรงดัน (buck-boost converter) เป็นต้น การที่จะนำวงจรดังกล่าวข้างต้นไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีผลตอบสนองที่ดีทั้งในช่วงสภาวะคงตัวและในสภาวะชั่วขณะ นอกจากนี้ระบบที่ดีจะต้องมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมหรือพารามิเตอร์ในระบบที่เปลี่ยนไป เช่น ค่าความเหนี่ยวนำในวงจร ค่าตัวเก็บประจุ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ ณ ขณะใช้งาน เป็นต้น เนื่องจากแรงดันที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จึงถือว่าการปรับจูนระบบดังนั้นก็อาจเกิดอาการโอเวอร์ชอต (overshoot) ในระหว่างที่ระบบถูกรบกวน ซึ่งสามารถทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นวงจรแปลงผันที่ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ต้องมีระบบควบคุมที่ประสิทธิภาพในการทำงาน เหมาะสม และมีความคงทน

การที่จะหาตัวควบคุมที่ใช้งานกับวงจรแปลงผันกระแสตรง-กระแสตรง จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกระแสตรง-กระแสตรงเสียก่อน การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system Identification) เป็นวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยข้อมูลความสัมพันธ์ของอินพุตกับเอาต์พุตของระบบงานนั้น ๆ มาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบงาน ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ 3 รูปแบบ คือ เทคนิคกล่องขาว (white box) เทคนิคกล่องเทา (grey box) และเทคนิคกล่องดำ (black box) งานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคกล่องดำในการวิเคราะห์หาฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (buck converter) เนื่องจากสามารถลดความซับซ้อนในการหาค่าพารามิเตอร์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ ทำให้การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ง่ายขึ้น และมีความแม่นยำเพราะใช้ข้อมูลจริงในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หลังจากที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว ลำดับถัดมาเป็นการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดี เหมาะสมกับวงจร และมีความคงทน ปัจจุบันการออกแบบตัวควบคุมใช้ในวงจรแปลงผันกระแสตรง-กระแสตรงมีมากมายหลายวิธี เช่น การควบคุมแบบวิเคราะห์ห้วงรอบปิด [5] ตัวควบคุมแบบหนึ่งไซเคิล (one-cycle controller) [6] ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอดีก็ยังมีเทคนิคการปรับจูนเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น การปรับจูนด้วยวิธีซิกเลอร์-นิโกล (Zeigler-Nichole tuning) [7] การปรับจูนด้วยวิธีอินทิกรัลของค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (Integral of Squared Error , ISE) [8] วิธีการที่กล่าวข้างต้น [5-8] วิเคราะห์ระบบด้วยการออกแบบการควบคุมแบบดั้งเดิม (classical) ซึ่งไม่ได้กล่าวถึงการรับประกันเสถียรภาพ ระบบควบคุมที่มีการกล่าวถึงการรับประกันเสถียรภาพ คือ ระบบควบคุมแบบคงทน ระบบควบคุมแบบคงทนออกแบบมาเพื่อให้ระบบเกิดสมรรถนะความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและต่อตัวรบกวน วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในวงจรแปลงผันกระแสตรง-กระแสตรงที่กล่าวถึงความคงทน คือ วิธีการออกแบบชุดควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ( $H^\infty$  loop shaping) ซึ่งมีความคงทนสูง ค่อนข้างใช้งานได้สะดวก และออกแบบได้ง่าย

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองวงจรทอนระดับแรงดันโดยใช้วิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และกำหนดให้แรงดันด้านเอาต์พุตคงที่ (แรงดันด้านเอาต์พุตต่อกับแบตเตอรี่หรือวงจรแปลงผันกระแสตรง-กระแสตรง) หลังจากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน (robust controller) โดยอาศัยเทคนิคการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ( $H$  infinity loop shaping) ให้ตัวควบคุมมีประสิทธิภาพในการทำงานและเหมาะสมสูงสุด เมื่อมีการก่อกวนเกิดขึ้นจากทางด้านอินพุต

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาและออกแบบ สร้างวงจรทอนแรงดันที่ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบคงทน

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของตัวควบคุมแบบคงทน กับตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูนด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโกลส์

1.2.3 ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบคงทนกับวงจรทอนแรงดันที่ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ได้จริง

### 1.3 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบจัดสรรพื้นฐานของวงรอบเอชอินฟินิตี้ โดยวิธีการที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมสามารถรับประกันความคงทนของระบบได้ ผลของการเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมคงทนแบบจัดสรรพื้นฐานของวงรอบเอชอินฟินิตี้และระบบควบคุมพีไอดีที่มีการปรับจูนด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ พบว่าตัวควบคุมแบบคงทนมีความคงทนกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี สามารถดูได้จากค่าแอมพลิจูดต่ำที่สุดที่สามารถยอมรับได้ และผลตอบสนองทางเวลาเมื่อมีการรบกวนในระบบกล่าวโดยสรุปวิธีการที่นำเสนอดีกว่าเทคนิคแบบเดิมที่ทำการทบทวนวรรณกรรมมาดังนี้

- ก. ตัวควบคุมคงทนแบบจัดสรรพื้นฐานของวงรอบเอชอินฟินิตี้มีการยืนยันความคงทนของระบบ
- ข. เมื่อมีการรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนความเข้มแสง ผลตอบสนองทางเวลาของตัวควบคุมคงทนแบบจัดสรรพื้นฐานของวงรอบเอชอินฟินิตี้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูนด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์

### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมคงทนแบบจัดสรรพื้นฐานของวงรอบเอชอินฟินิตี้ สำหรับวงจรทอนแรงดันที่ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ และภาระทางไฟฟ้าเป็นตัวต้านทานขนาด 10 โอห์ม โดยวงจรทอนแรงดันที่ใช้กำหนดให้มีการทำงาน เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันอินพุตตามที่ต้องการ คือ 17.6 โวลต์(ดีวตี้ไซเคิลเท่ากับ 0.34) ระบบที่ทดลองมีตัวควบคุมคงทนที่ออกแบบโดยการจัดสรรพื้นฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้และตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูนด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ การทดสอบจะทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ ความเหมาะสม และความคงทนของระบบ

### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาไว้โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ก. ศึกษาและหาแนวทางในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม กำหนดวัตถุประสงค์การควบคุม
- ข. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อให้สะดวกและเหมาะสม งานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบสัญญาณขนาดเล็กในการหาแบบจำลอง
- ค. ออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนแบบจัดสรรพื้นฐานของวงรอบเอชอินฟินิตี้เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง
- ง. ตรวจสอบผลและสรุปผลการทดลองเปรียบเทียบกับเทคนิคเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความมาเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย วัตถุประสงค์สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวงจรถอนแรงดัน ได้แก่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) ระบบควบคุมแบบคงทน (Robust Control System) ตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ( $H^\infty$  loop Shaping)

บทที่ 3 กล่าวถึงผลการออกแบบพารามิเตอร์ที่ใช้ในวงจร อธิบายถึงวิธีการ ขั้นตอนและผล ออกแบบตัวควบคุมคงทนด้วยวิธีจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองตัวควบคุมที่ได้ออกแบบและผลการทดลองที่นำตัวควบคุมคงทนที่ ออกแบบมาใช้กับวงจรถอนแรงดันเพื่อศึกษาผลที่ได้ของระบบในกรณีต่าง ๆ

บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึง หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานของวงจรถอนระดับแรงดัน การควบคุมแบบคงทน ผลตอบสนองของวงรอบเปิด ผลตอบสนองของวงรอบปิด การควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ของสมการสถานะ

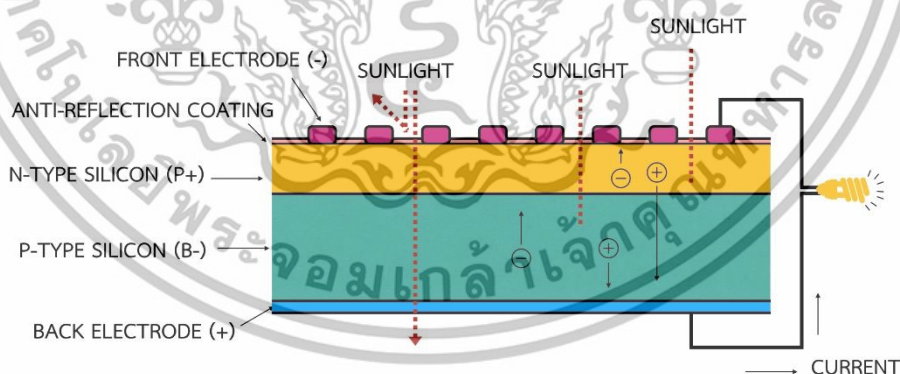
### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell)

#### 2.1.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ [9]

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกัน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ

ซิลิคอน (สารกึ่งตัวนำชนิด N-type) คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้จากการโด๊ปกับสารฟอสฟอรัส มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์

ซิลิคอน (สารกึ่งตัวนำชนิด P-type) คือ สารกึ่งตัวนำที่ได้การโด๊ปกับสารโบรอน ทำให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอน (โฮล) เมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าง่ายๆได้ ตามรูปที่ 2.1



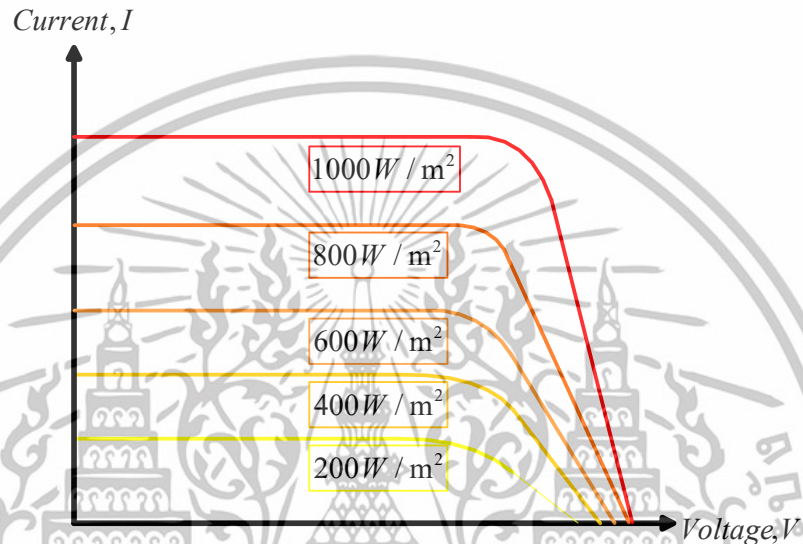
รูปที่ 2.1 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [10]

#### 1. ความเข้มแสง

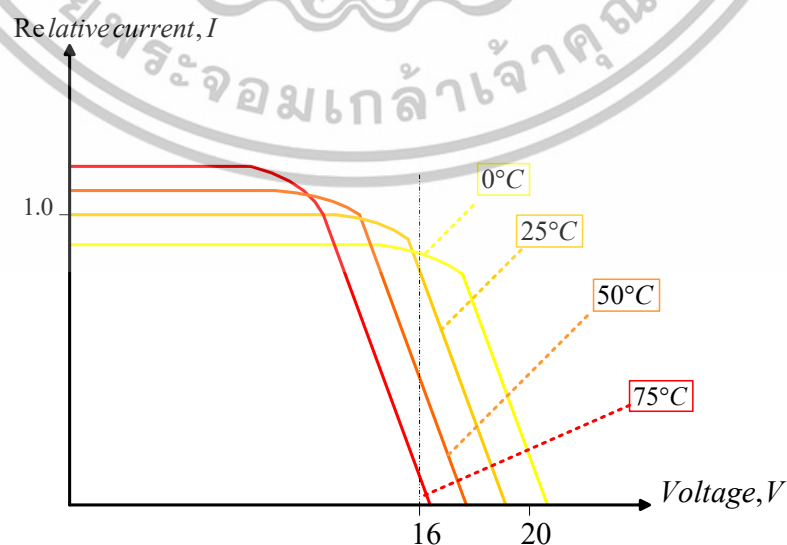
กระแสไฟฟ้า (Current) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง หมายความว่า เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์สูง กระแสที่ไฟฟ้าได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงขึ้นด้วย แต่แรงดันไฟฟ้าจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งผลลัพธ์ของกระแส และแรงดันจะส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ดัง รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

#### 2. อุณหภูมิ

กระแสไฟฟ้าจะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แปรผกผันกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงด้วย



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

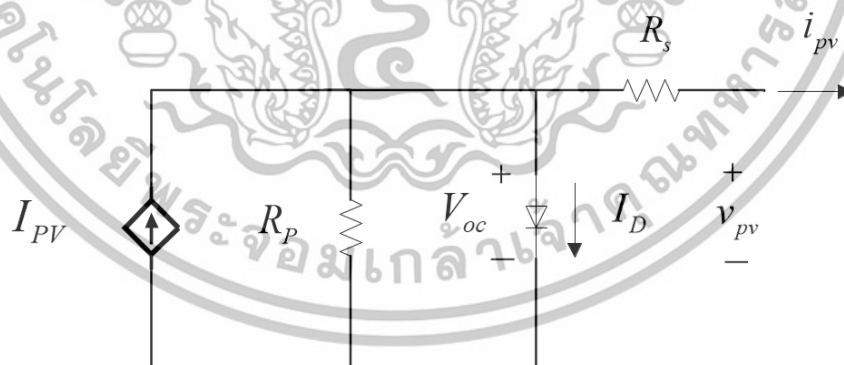
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จำนวนเซลล์ในแต่ละโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์  
การเพิ่มจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์มักจะเพิ่มในลักษณะที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่กระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่
4. พื้นที่ของแต่ละเซลล์  
การเพิ่มพื้นที่บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น
5. ชนิดของสารที่ใช้ทำแผงเซลล์แสงอาทิตย์  
ชนิดของสารที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลต่อความสามารถในการรับพลังงานของแสงอาทิตย์ กล่าวคือชนิดของสารที่มีราคาแพงทำให้สามารถรับพลังงานได้สูงขึ้นแต่ต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงตามไปด้วย

### 2.1.3 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ [11]

จากรูปที่ 2.4 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกจำลองเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่โดยประกอบไปด้วยกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $I_{PV}$ ) ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ความต้านทานขนาน ( $R_p$ ) และรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด

กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงอาทิตย์ ( $I_{PV}$ ) นี้จะถูกแบ่งไหลผ่านไดโอดและ  $R_p$  ก่อนแล้วจึงไหลมายังโหลด ( $R_L$ ) และ ( $R_s$ ) ที่ต่ออนุกรมกันอยู่ และให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน  $R_s$  และ  $R_L$  มีค่าเป็น  $I_0$  จากวงจรสมมูลสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าอย่างง่ายเมื่อไม่พิจารณาค่าความต้านทานขนาน ( $R_p$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ซึ่งแสดงในสมการ (2.2), (2.3) และ (2.4)



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์

$$V_{OC} = V_D \quad (2.1)$$

$$0 = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} \quad (2.2)$$

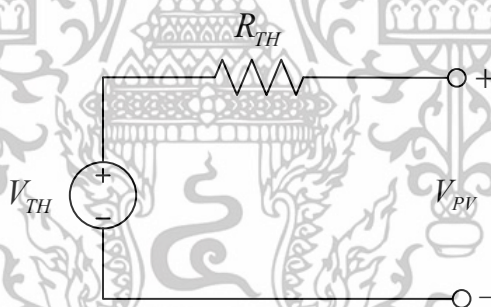
$$I_D = I_0(e^{V_D/V_T} - 1) \quad (2.3)$$

$$V_{PV} = V_D - R_s I_{PV} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$I_{PV}$	คือ	กระแสเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
	$I_{ph}$	คือ	กระแสสัมพันธ์กับความเข้มแสง (A)
	$I_D$	คือ	กระแสอิ่มตัวของไดโอด (A)
	$I_0$	คือ	กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)
	$R_s$	คือ	ตัวต้านทานอนุกรมเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Omega$ )
	$R_p$	คือ	ตัวต้านทานขนานเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Omega$ )
	$V_D$	คือ	แรงดันไดโอด (V)
	$V_T$	คือ	แรงดันสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (V)
	$v_{PV}$	คือ	แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

วงจรไฟฟ้าทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.4 แต่เมื่อใช้วงจรสมมูลของเทวินิน ทำให้การคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรทอนระดับแรงดันที่ต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสามารถลดตัวแปรของตัวต้านทานอนุกรมและตัวต้านทานขนานให้เหลือตัวต้านทานตัวเดียว คือ ตัวต้านทานเทวินิน ( $R_{TH}$ ) ในงานวิจัยนี้จึงเลือกพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์ในโหมดแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลเทวินินได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของเทวินินของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานในโหมดแหล่งจ่ายกระแส

จากรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเทวินิน ( $V_{TH}$ ) และความต้านทานเทวินิน ( $R_{TH}$ ) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R_{TH} = R_s + R_{SH} \quad (2.5)$$

$$V_{TH} = I_{PV} \times R_{SH} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck Converter) [12]

วงจรทอนระดับแรงดัน คือ วงจรที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีค่าต่ำกว่า แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า และเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกที่มีความเป็นกระแสตรงมากๆ จะนิยมใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ซึ่งโดยมากจะเลือกใช้วงจรกรองแบบ LC เพราะมีอัตราการลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการผกผันกับกำลังสองของความถี่

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันในช่วงที่เป็นสภาวะอยู่ตัว (Steady State) จะมีการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันดังนี้

- 1) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากัน

$$i_L(t+T) = i_L(t) \quad (2.7)$$

หมายถึง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากัน ณ ตำแหน่งเดียวกันในทุกคาบเวลา

- 2) แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.8)$$

หมายถึง ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับเวลาในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

- 3) กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$I_c = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} I_c(t) dt = 0 \quad (2.9)$$

หมายถึง ประจุที่ถูกเก็บ (Charged) และที่คาย (Discharged) ของตัวเก็บประจุในแต่ละคาบเวลาจะต้องเท่ากัน

- 4) กำลังไฟฟ้าด้านเข้าเท่ากับกำลังไฟฟ้าด้านออก

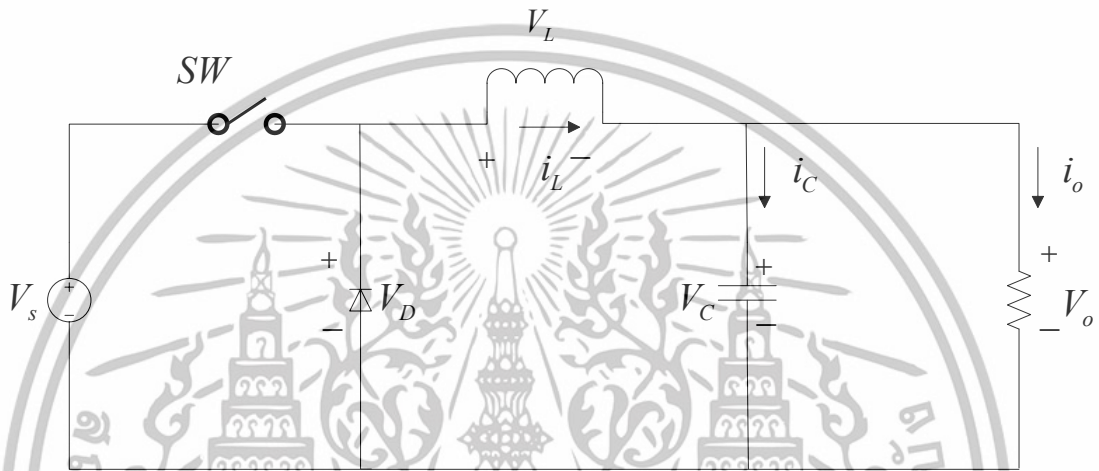
$$P_s = P_o \quad (2.10)$$

กรณีนี้กำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวเป็นอุดมคติ ทำให้ไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการทำงานของวงจรประสิทธิภาพของวงจรจึงเท่ากับร้อยเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 หลักการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน

หลักการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดัน : เพื่อจะออกแบบให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกตามที่ต้องการ ต้องเริ่มจากเงื่อนไขที่ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในแต่ละคาบเวลามีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นก็จะสามารถหากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้ดังสมการ (2.9) การวิเคราะห์การทำงานของสวิตช์ ในแต่ละโหมด จะต้องวิเคราะห์ในสภาวะอยู่ตัวดังนี้

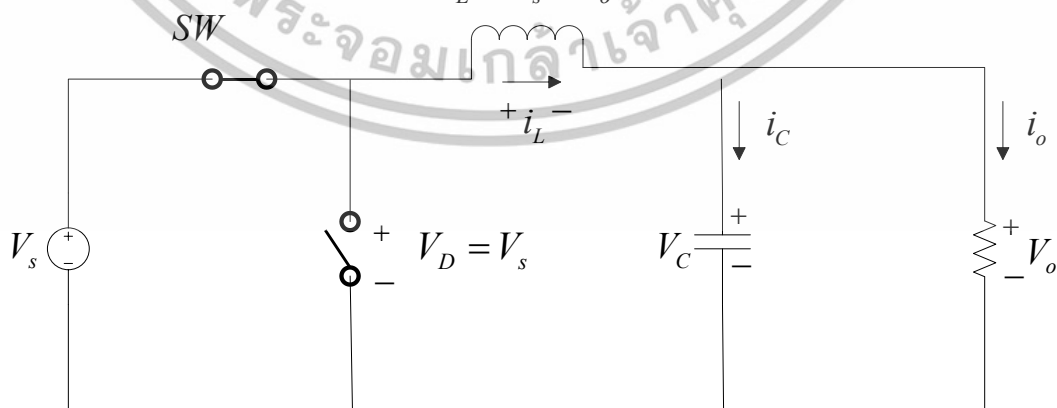


รูปที่ 2.6 วงจรทอนระดับแรงดัน

ขณะสวิตช์นำกระแส

จากรูป 2.6 กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะไหลผ่านสวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไปเก็บที่ตัวเก็บประจุ จากกฎของ เคอร์ชอฟฟ์ สามารถเขียนเป็นสมการของแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$V_L = V_s - V_o$$



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์นำกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-V_s + V_L + V_o = 0$$

$$V_L = V_s - V_o$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

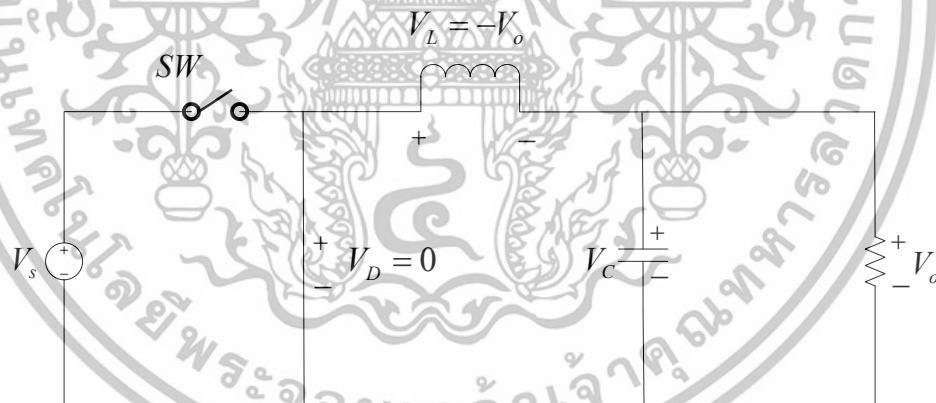
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L}$$

ช่วงนำกระแส  $dt = DT$

$$\Delta i_{L,on} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (2.11)$$

ขณะสวิตช์ไม่นำกระแส

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส ไดโอดจะถูกไบอัสไปข้างหน้า (Forward bias) ให้นำกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเกิดการไหลอย่างต่อเนื่อง และจากกฎของเคอร์ชอฟฟ์จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้าดังนี้



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลเมื่อสวิตช์ไม่นำกระแส

$$V_L = -V_o$$

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_{L,off}}{\Delta t} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของสมการที่ (2.12) คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะค่อยๆมีค่าลดลง เพราะการเปลี่ยนแปลงกระแสตัวเหนี่ยวนำต่อเวลาเป็นค่าเป็นลบ

ช่วงไม่นำกระแส  $dt = (1-D)T$  ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\Delta i_{L,off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.13)$$

## 2.2.2 การหาค่าอัตราการขยายแรงดันของวงจรถอนระดับแรงดัน

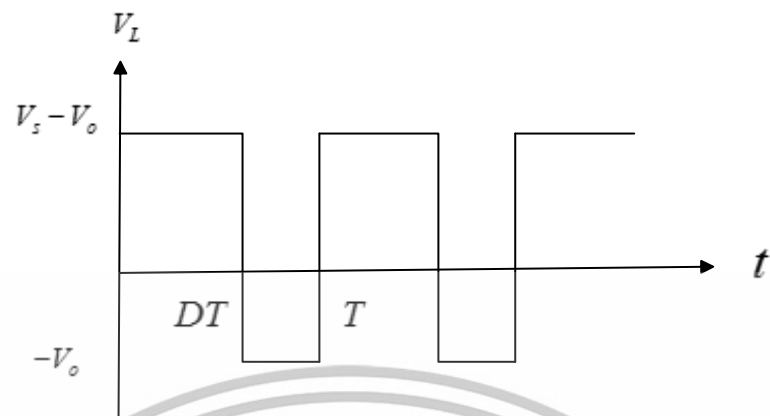
จากเงื่อนไขกำหนดไว้ในสมการที่ (2.7) กล่าวคือ ในช่วงสภาวะอยู่ตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่สวิตช์นำกระแส จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเท่ากับการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในขณะที่สวิตช์ไม่นำกระแส หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ 2.11 กับสมการที่ 2.13 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta i_{L,off} + \Delta i_{L,on} &= 0 \\ \left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT + \left(-\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T\right) &= 0 \\ (V_s - V_o)D - V_o(1-D) &= 0 \\ V_s D - V_o D - V_o + V_o D &= 0 \\ \frac{V_o}{V_s} &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

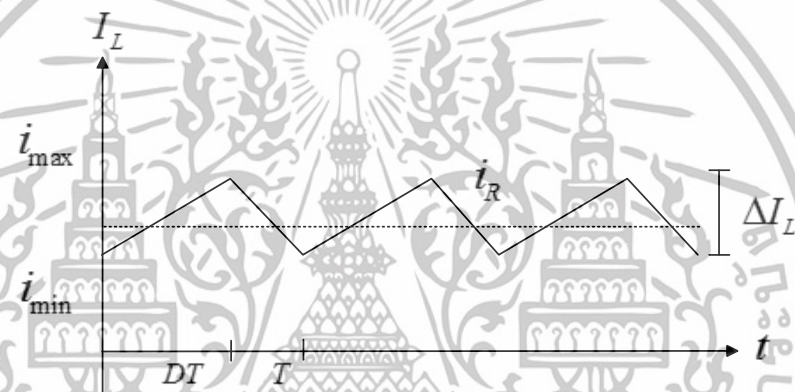
## 2.2.3 การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรถอนระดับแรงดัน

การหาค่าความเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดจะทำให้วงจรถอนระดับแรงดันทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง โดยเริ่มต้นจากการหากระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเท่ากับกระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านโหลด เนื่องจากขณะที่อยู่ในสภาวะการทำงานอยู่ตัว กระแสเฉลี่ยที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$I_L = I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.15)$$



(ก) แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ



(ข) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ



(ค) กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ

รูปที่ 2.9 แรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 2.9(ข) จะสามารถหาค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด ได้จากสมการในช่วงที่สวิตช์ไม่นำกระแสดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 I_{L,\max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\
 I_{L,\max} &= \frac{V_o}{R} + \frac{1}{2} \left( \frac{V_o}{L} (1-D) T \right) \\
 I_{L,\max} &= V_o \left( \frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right)
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

ดังนั้นกระแสตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด คือ

$$\begin{aligned}
 I_{L,\min} &= I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \\
 I_{L,\min} &= \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left( \frac{V_o}{L} (1-D) T \right) \\
 I_{L,\min} &= V_o \left( \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right)
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

เงื่อนไขที่สำคัญสำหรับการทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบต่อเนื่อง คือกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะต้องเป็นกระแสบวกเสมอ สมการ (2.17) สามารถนำมาใช้ในการหาค่าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำแบบไม่ต่อเนื่อง และหาก  $I_{L,\min}$  เท่ากับศูนย์พอดี คือเป็นช่วงต่อระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

$$I_{L,\min} = V_o \left( \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right) = 0 \tag{2.18}$$

$$\left( \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right) = 0 \tag{2.19}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{(1-D)}{2Lf} \tag{2.20}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

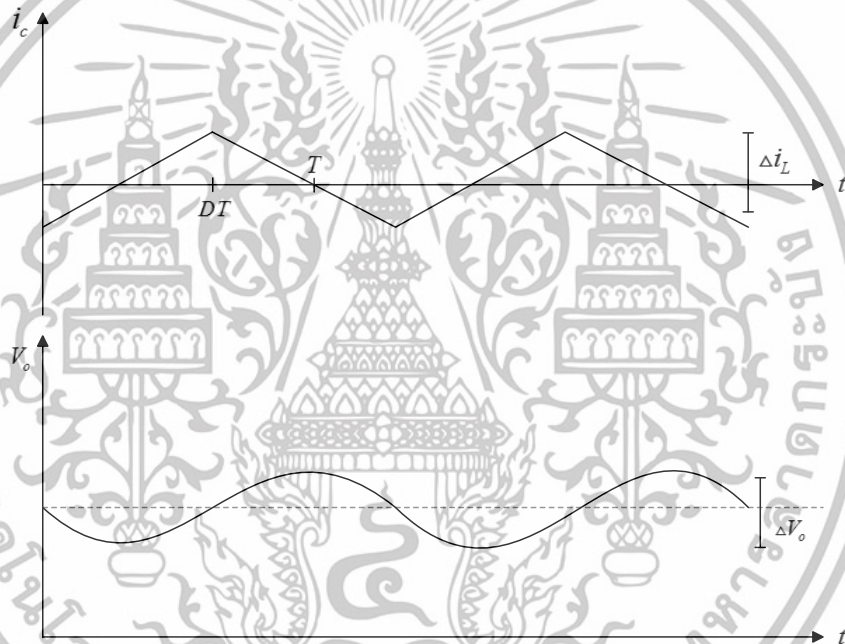
$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \frac{(1-D)R}{2L_{\min}} \quad (2.22)$$

## 2.2.4 ค่าระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก

การที่มีตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะสามารถรักษาให้แรงดันไฟฟ้าด้านออกคงที่ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ ได้ เนื่องจากมีราคาแพงและใช้พื้นที่มาก จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดพอเหมาะ และค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ การคำนวณหาค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจากยอดถึงยอด สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระแสไหลผ่านตัวเก็บประจุและอัตราระลอกคลื่นของแรงดันด้านออก

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีค่าเป็นบวก ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตัวเก็บประจุจะสะสมประจุ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \Delta Q &= C\Delta V_o \\ \Delta V_o &= \frac{\Delta Q}{C} \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left( \frac{T}{2} \right) \left( \frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T\Delta i_L}{8} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2.24) ลงในสมการ (2.23) จะได้

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (2.25)$$

แทนค่าสมการ (2.13) ลงในสมการ (2.25) จะได้

$$\Delta V_o = \frac{TV_o(1-D)T}{8CL} \quad (2.26)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{T^2(1-D)}{8CL} \quad (2.27)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D)}{8CLf^2} \quad (2.28)$$

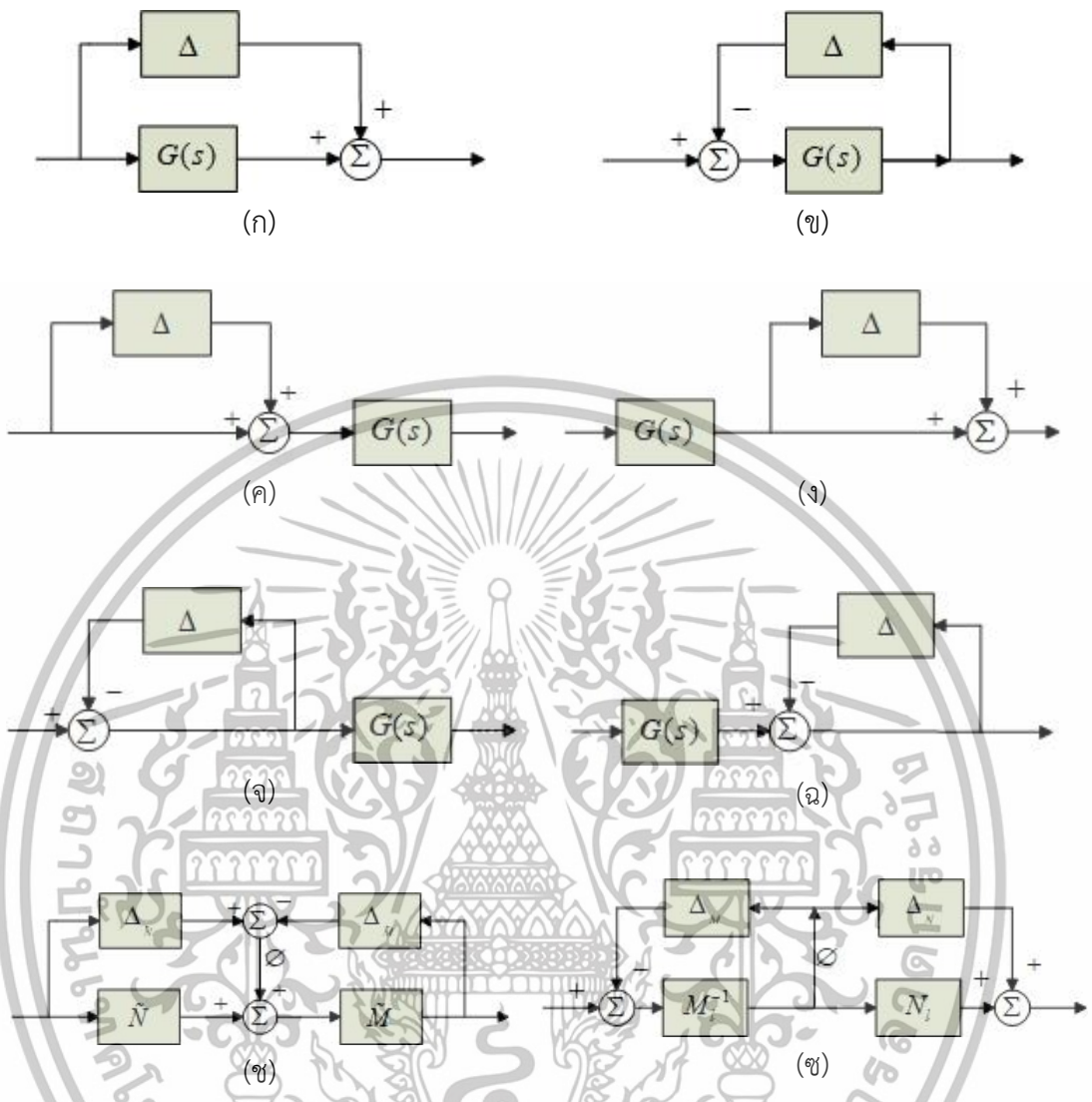
เมื่อต้องการจะลดอัตราระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก จะทำได้โดยการลดค่า D ให้เข้าใกล้หนึ่ง หรือการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ หรือเพิ่มค่าความถี่ในการสวิตซ์ให้สูงขึ้น

### 2.3 การควบคุมแบบคงทน (Robust Control) [13]

การควบคุมแบบคงทน คือ ระบบที่มีการทำงานอย่างมีเสถียรภาพ แม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบหรือพารามิเตอร์ภายในระบบมีการเปลี่ยนแปลงก็ตาม แล้วระบบยังสามารถคงทนในการทำงานต่อได้ สามารถพิจารณาการออกแบบระบบควบคุมได้ 2 แบบ คือ

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)
2. ระบบจริง (Real Process)

การรบกวนทางพลวัต (Dynamic perturbations) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากพารามิเตอร์ภายในระบบมีการเปลี่ยนแปลง การจำลองการรบกวนที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้เช่น ความไม่แน่นอนอาจเกิดขึ้นได้และไม่สามารถกำหนดโครงสร้างได้ในที่นี้ใช้สัญลักษณ์  $\Delta$ ,  $G_p(s)$  ซึ่งหมายถึงระบบที่มีการก่อกวนทางพลวัตและ  $G(s)$  หมายถึงระบบปกติ โดยแบบจำลองความไม่แน่นอนแสดงตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.11 การรบกวนรูปแบบต่าง ๆ

(ก) การรบกวนด้านเอาต์พุตของระบบ,  $G_p(s) = G(s) + \Delta$

(ข) การรบกวนด้านอินพุตของระบบ,  $(G_p(s))^{-1} = (G(s))^{-1} + \Delta$

(ค) การรบกวนเชิงผลคูณด้านอินพุตของระบบ,  $G_p(s) = G(s)[I + \Delta]$

(ง) การรบกวนเชิงผลคูณด้านเอาต์พุตของระบบ,  $G_p(s) = [I + \Delta]G(s)$

(จ) การรบกวนเชิงผลคูณด้านอินพุตผกผัน,  $(G_p(s))^{-1} = [I + \Delta](G(s))^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ฉ) การรบกวนเชิงผลคูณด้านเอาต์พุตผกผัน,  $(G_p(s))^{-1} = (G(s))^{-1}[I + \Delta]$

(ช) การรบกวนตัวประกอบเฉพาะร่วมทางซ้าย,  $G_p(s) = (\tilde{M} + \Delta_{\tilde{M}})^{-1}(\tilde{N} + \Delta_{\tilde{N}})$

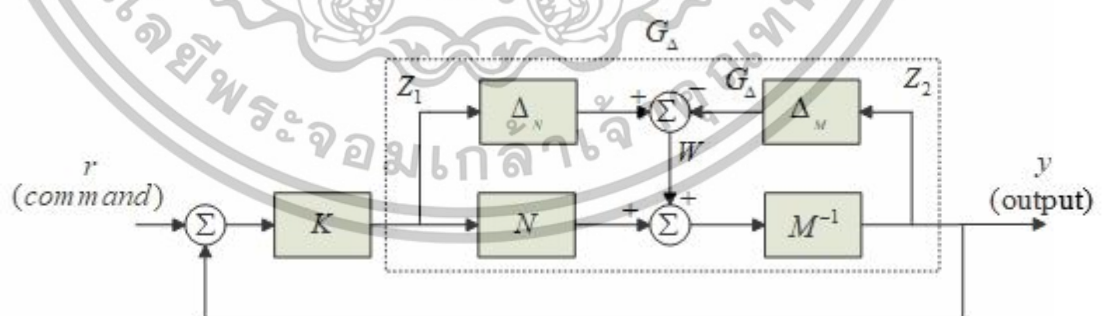
(ซ) การรบกวนตัวประกอบเฉพาะร่วมทางขวา,  $G_p(s) = (N + \Delta_N)(M + \Delta_M)^{-1}$

โดยที่

$(\tilde{M}, \tilde{N})$	คือ ตัวประกอบเฉพาะร่วมทางซ้าย
$(M, N)$	คือ ตัวประกอบเฉพาะร่วมทางขวา
$G(s)$	คือ ระบบปกติ
$(\Delta_{\tilde{M}}, \Delta_{\tilde{N}}), (\Delta_M, \Delta_N)$	คือ การรบกวนบนตัวประกอบเฉพาะร่วม (coprime factor) หรือ การรบกวนต่อระบบสำหรับใช้เป็นขอบเขตนอร์ม
$\omega$	คือ ความถี่
$\delta$	คือ ฟังก์ชันสเกลาร์
$\sigma[\cdot]$	คือ ค่าเอกฐาน (Singular Value)

ระบบที่รวมความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับตัวเศษ ( $\Delta_N$ ) และตัวส่วน ( $\Delta_M$ ) ของฟังก์ชันถ่ายโอน สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.29) จากรูปที่ 2.12 แสดงระบบที่มีความไม่แน่นอนและการควบคุมแบบวงรอบปิด ซึ่งในการออกแบบระบบควบคุมจะเริ่มพิจารณาจากความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับตัวเศษ (Normalized Nominator :  $N$ ) และตัวส่วน (Normalized Denominator :  $M$ ) ของระบบ

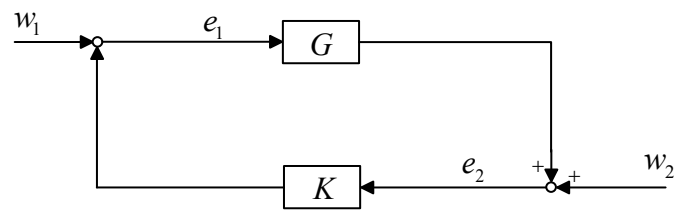
$$G_\Delta = \{(M + \Delta_M)^{-1}(N + \Delta_N) : \|\begin{bmatrix} \Delta_N & \Delta_M \end{bmatrix}\|_\infty < \varepsilon\} \quad (2.29)$$



รูปที่2.12 ระบบที่มีความไม่แน่นอนและการควบคุมแบบวงรอบปิด

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ค่าส่วนเผื่อเสถียรภาพ (Stability Margin) การออกแบบระบบควบคุมคงทน จากสมการที่ 2.29 จะต้องทำการออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้ส่วนเผื่อเสถียรภาพมีค่าสูงที่สุด (Maximize the Stability Margin) เพื่อรับประกันความไม่แน่นอนของระบบ (Uncertainty Model)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

จากรูปที่ 2.13 ประกอบไปด้วย

G	คือ ระบบ
K	คือ ตัวควบคุม
$w_1, w_2$	คือ สัญญาณอินพุตจากภายนอก
$e_1$	คือ อินพุตของระบบ
$e_2$	คือ อินพุตของตัวควบคุม

จากรูปที่ 2.13 จำเป็นต้องหาค่านอร์มอินฟินิตี้ ( $\infty$ -norm) ของตัวควบคุม (K) เพื่อตรวจสอบว่าตัวควบคุมที่เราออกแบบนั้นมีความเสถียรหรือไม่ เราสามารถหาค่านอร์มอินฟินิตี้ของตัวควบคุมได้จากสมการต่อไปนี้

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} M^{-1} \right\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} \begin{bmatrix} I & G \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \leq \epsilon^{-1} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\|T_{zw}\|_{\infty}$  คือ ค่านอร์มอินฟินิตี้ ( $\infty$ -norm) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจากตัวรบกวนไปยังสแตจซึ่งจุดประสงค์ของตัวควบคุมแบบคงทนคือการออกให้มีส่วนเพื่อเสถียรภาพให้มีค่าสูงที่สุดเท่าที่จะทำได้

### 2.3.1 แผนภาพโบเดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบเปิด [14]

แผนภาพโบเดของวงรอบเปิดมีประโยชน์อย่างมากในการนำมาออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักในระบบวงรอบปิดใด ๆ อัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตของระบบ (y) และสิ่งที่ต้องการให้ระบบตอบสนอง (r) เมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนที่ตรวจจับและการรบกวน (disturbance) ได้ดังสมการ (2.31)

$$\frac{y}{r} = \frac{\overbrace{KG}^1}{1+KG} + \frac{\overbrace{KGn}^2}{r(1+KG)} + \frac{\overbrace{d}^3}{r(1+KG)} \quad (2.31)$$

ระบบควบคุมที่สมบูรณ์ในอุดมคติคือระบบที่เอาต์พุตเป็นไปตามสัญญาณอ้างอิง จากสมการ (2.31) พบการออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้ใกล้เคียงกับระบบควบคุมที่สมบูรณ์พิจารณาในแต่ละเทอมคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าค่า KG มีค่าสูงมากในเทอมที่ 1 ทำให้เทอมนี้มีค่าประมาณ 1 ส่งผลให้ระบบมีผลตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิงได้ดี

ถ้า KG มีค่าต่ำมากในเทอมที่ 2 ทำให้เทอมนี้มีค่าประมาณ 0 ซึ่งเป็นการลดสัญญาณรบกวนจากการวัด

ถ้า KG มีค่าสูงมากในเทอมที่ 3 ทำให้เทอมนี้มีค่าประมาณ 0 ซึ่งเป็นการลดสัญญาณการรบกวนระบบ

อย่างไรก็ตามการเกิดขึ้นของการรบกวนระบบและสัญญาณรบกวนที่ตัวตรวจจับมักเกิดขึ้นที่ความถี่ต่างกัน โดยส่วนมากการตามรอยสัญญาณอ้างอิงและความต้องการลดผลของการรบกวนระบบจะเกิดขึ้นในย่านความถี่ต่ำ ส่วนความต้องการลดผลของสัญญาณรบกวนที่ตรวจจับนั้นเกิดที่ย่านความถี่สูง ซึ่งเป็นย่านที่สัญญาณรบกวนที่ตัวตรวจจับมักเกิดขึ้น

### 2.3.2 ผลตอบสนองแบบวงรอบปิด [15]

รูปที่ 2.14 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์ (G) และตัวควบคุม (K) สัญญาณต่าง ๆ ประกอบด้วย อินพุต (r) เอาต์พุตของระบบ (y) อินพุตควบคุม (u) ความผิดพลาดที่วัดได้ (e) สัญญาณรบกวนที่อินพุต ( $d_i$ ) และเอาต์พุต ( $d_o$ ) และสัญญาณการรบกวนจากการวัด (n)

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด (open loop transfer function) แสดงดังสมการ (2.32)

$$L(s) = G(s) \times K(s) \quad (2.32)$$

ฟังก์ชันความไว (sensitivity function) แสดงดังสมการ (2.33)

$$S(s) = (1 + L(s))^{-1} \quad (2.33)$$

ฟังก์ชันเติมเต็มความไว (complementary sensitivity function) แสดงดังสมการ (2.34)

$$T(s) = L(s) \times (1 + L(s))^{-1} \quad (2.34)$$

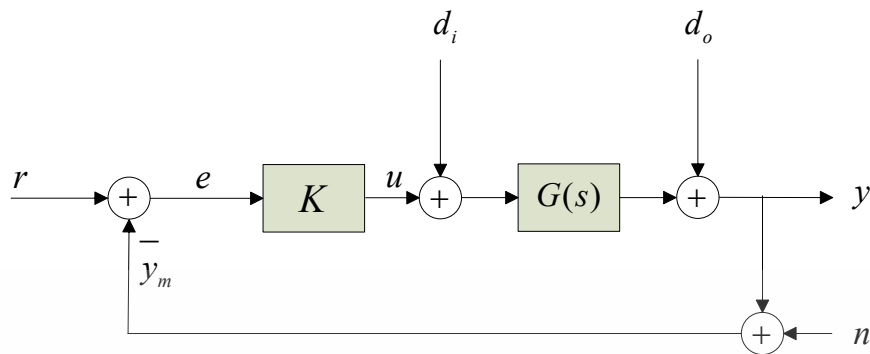
จากนิยามข้างต้น สามารถหาผลตอบสนองวงปิดได้เป็น

$$Y(s) = S(s)D_o(s) + T(s)(R(s) - N(s)) + S(s)G(s)D_i(s) \quad (2.35)$$

$$E(s) = S(s)(R(s) - N(s) - D_o(s) - G(s)D_i(s)) \quad (2.36)$$

$$U(s) = K(s)S(s)(R(s) - N(s) - D_o(s)) + T(s)D_i(s) \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ระบบป้อนกลับหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต

จากสมการ (2.14) ถ้าต้องการทำให้ระบบตามรอยคำสั่งมีประสิทธิภาพต้องพยายามทำให้  $S(s)$  เข้าใกล้ศูนย์ และในขณะเดียวกันไม่ต้องการสัญญาณการรบกวนจากการวัด ( $n$ ) ซึ่งมีผลต่อเอาต์พุต ( $y$ ) ดังนั้นต้องพยายามทำให้  $T(s)$  เข้าสู่ศูนย์เช่นกัน อย่างไรก็ตามไม่สามารถทำให้  $S(s)$  และ  $T(s)$  เข้าสู่ศูนย์ในเวลาเดียวกันได้ เนื่องจากมีเงื่อนไขที่มีชื่อว่า เงื่อนไขบังคับเชิงพีชคณิต (algebraic constraint) วิธีแก้ไขก็คือต้องให้ฟังก์ชันทั้งสองมีค่าน้อยที่ความถี่ต่างกัน โดยทำให้  $|S(j\omega)|$  มีขนาดเล็กในช่วงความถี่ต่ำ เนื่องจากช่วงสัญญาณความถี่ของสัญญาณ ( $r$ ) และสัญญาณรบกวน ( $d$ ) อยู่ในช่วงความถี่ต่ำและทำให้  $|T(j\omega)|$  มีขนาดเล็กในช่วงความถี่สูง เพราะเป็นช่วงที่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจากการวัด ( $n$ ) มากที่สุด เงื่อนไขที่มีชื่อว่า เงื่อนไขบังคับเชิงพีชคณิต

$$S(s) + T(s) = 1 \tag{2.38}$$

### 2.3.3 การกำหนดเงื่อนไขบังคับบนผลตอบสนองความถี่ [15]

จากรูปที่ 2.14 เป็นระบบป้อนกลับหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต ซึ่งระบบป้อนกลับที่ดีควรมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. สมรรถนะในการตามรอยคำสั่ง ให้ค่าแตกต่างในการตามรอยมีค่าน้อยที่สุด
2. สมรรถนะในการขจัดการรบกวน
3. สมรรถนะในการขจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด
4. ระบบต้องมีค่าเผื่อของเสถียรภาพที่ดี

เมื่อพิจารณาจากสมการ (2.34) และ (2.35) สามารถแปลงความต้องการเหล่านี้เป็นเงื่อนไขบังคับสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอน  $S(s)$  และ  $T(s)$  แต่ไม่สามารถทำให้  $S(s)$  และ  $T(s)$  มีค่าน้อยพร้อมกันได้ เนื่องจากเงื่อนไขบังคับทางพีชคณิต จึงแก้ปัญหาโดยการแบ่งย่านความถี่ออกเป็นสามช่วงคือ LOW MID และ HIGH ดังนั้นเงื่อนไขบังคับที่สามารถเป็นไปได้คือ

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขบังคับของ  $S(j\omega)$  และ  $T(j\omega)$ 

ความต้องการ	เงื่อนไขบังคับ
สมรรถนะในการตามรอยคำสั่ง	$ S(j\omega)  < 1$ มาก ๆ ในย่าน LOW
สมรรถนะในการจัดการรบกวน	$ S(j\omega)  < 1$ มาก ๆ ในย่าน LOW
สมรรถนะในการขจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด	$ T(j\omega)  < 1$ มาก ๆ ในย่าน HIGH
ระบบต้องมีค่าเผื่อของเสถียรภาพที่ดี	ไม่ต้องการให้ $ S(j\omega) $ หรือ $ T(j\omega)  > 1$ มาก ๆ ในย่าน MID

ถ้าให้  $\omega_c$  และ  $\omega_n$  เป็นความถี่ที่แบ่งเขตระหว่างทั้งสามย่านความถี่ กล่าวคือ ย่าน LOW คือช่วง 0 ถึง  $\omega_c$  ย่าน MID คือช่วง  $\omega_c$  ถึง  $\omega_n$  และย่าน HIGH คือช่วงตั้งแต่  $\omega_n$  เป็นต้นไป สามารถเขียนวัตถุประสงค์เชิงคุณภาพสำหรับ  $|S(j\omega)|$  และ  $|T(j\omega)|$  ได้ดังรูปที่ 2.15 โดยพื้นที่แรเงาเป็นเงื่อนไขบังคับที่  $|S(j\omega)|$  และ  $|T(j\omega)|$  ไม่สามารถผ่านเข้าไปได้ หลังจากนั้นทำการแปลงเงื่อนไขบังคับทั้งหมดให้เป็นเงื่อนไขบังคับของ  $L(s)$  โดยสามารถกระทำดังนี้

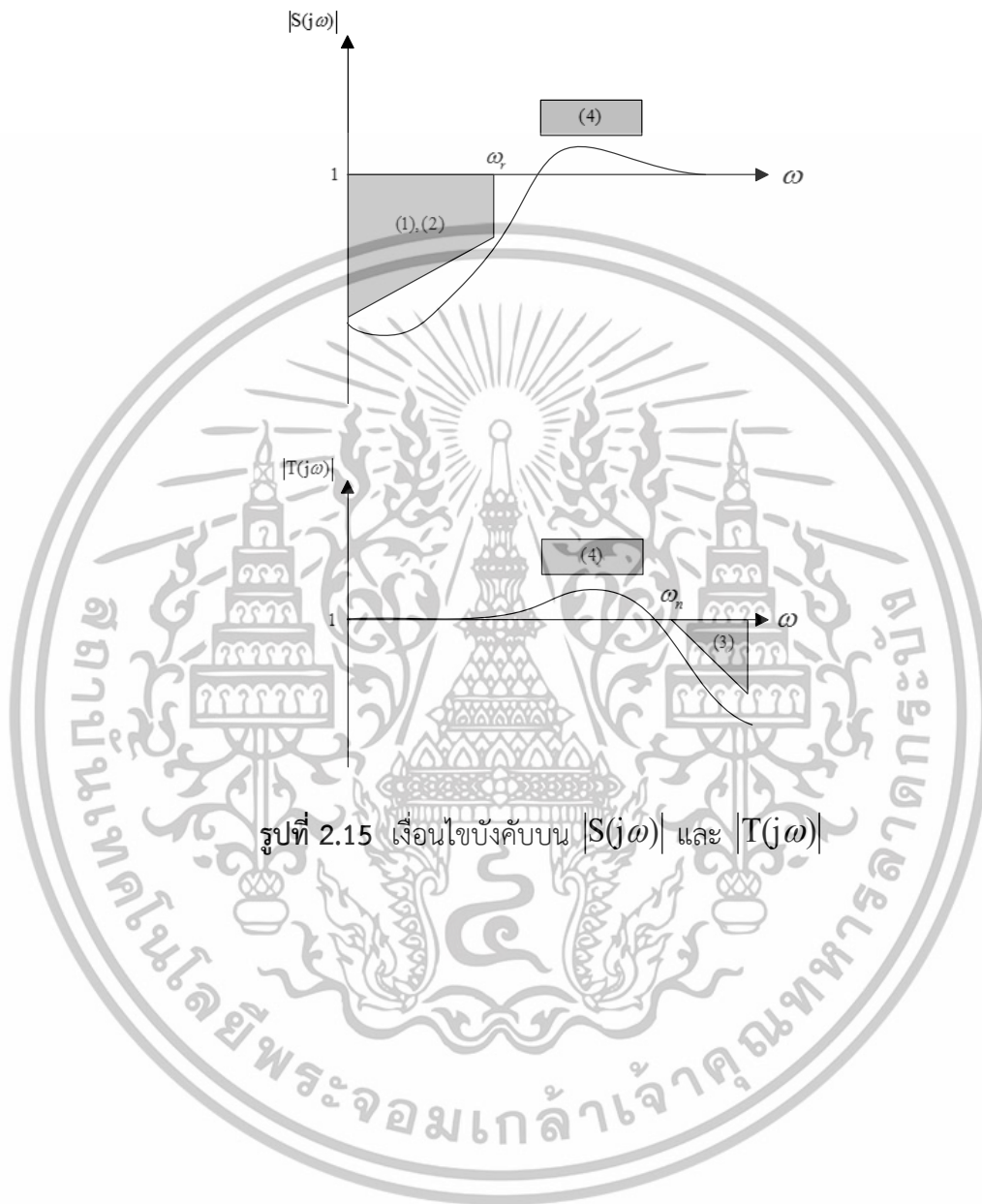
- ย่านความถี่ LOW : เนื่องจาก  $S(j\omega) = \frac{1}{1+L(j\omega)} \approx \frac{1}{L(j\omega)}$  เมื่อ  $S(j\omega)$  มีค่าน้อย ดังนั้น  $|S(j\omega)|$  มีอัตราการขยายน้อยกว่า 1 มาก ๆ จะสัมพันธ์กับ  $|L(j\omega)|$  ที่มีอัตราการขยายมากกว่า 1 มาก ๆ
- ย่านความถี่ HIGH : เนื่องจาก  $T(j\omega) = \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \approx L(j\omega)$  เมื่อ  $T(j\omega)$  มีค่าน้อย ดังนั้น  $|T(j\omega)|$  มีอัตราการขยายน้อยกว่า 1 มาก ๆ จะสัมพันธ์กับ  $|L(j\omega)|$  ที่มีอัตราการขยายน้อยกว่า 1 มาก ๆ
- ย่านความถี่ MID : เนื่องจากขนาดของ  $S(j\omega)$  เป็นส่วนกลับของระยะห่างระหว่างจุดกับกราฟในควิสท์ของ  $L(j\omega)$  ดังนั้นเงื่อนไขบังคับบน  $L(s)$  คือต้องการส่วนเผื่อเสถียรภาพที่ดี ซึ่งระบบต่างๆไปจะกำหนดให้เงื่อนไขบังคับบนส่วนเผื่อเฟส สามารถสรุปเงื่อนไขบังคับบน  $L(s)$  ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขบังคับของ  $L(j\omega)$ 

ความต้องการ	เงื่อนไขบังคับ
สมรรถนะในการตามรอยคำสั่ง	$ L(j\omega)  > 1$ มาก ๆ ในย่าน LOW
สมรรถนะในการจัดการรบกวน	$ L(j\omega)  > 1$ มาก ๆ ในย่าน LOW
สมรรถนะในการขจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด	$ L(j\omega)  < 1$ มาก ๆ ในย่าน HIGH
ระบบต้องมีค่าเผื่อของเสถียรภาพที่ดี	$L(j\omega)$ มีส่วนเผื่อเฟสที่ดี

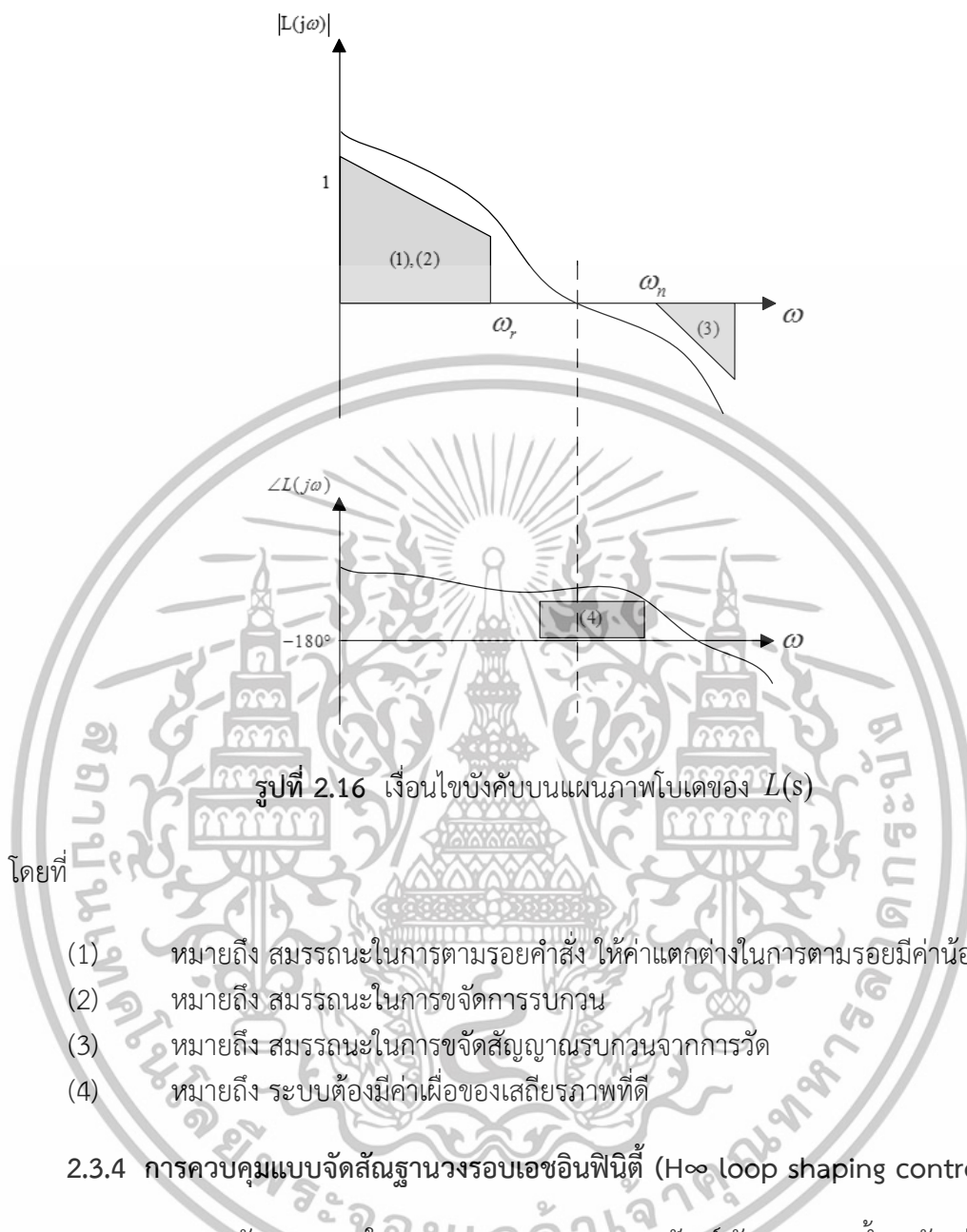
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 แสดงภาพของเงื่อนไขบังคับ (ส่วนแรง) บนขนาดและเฟสของ  $L(s)$  ซึ่งต้องออกแบบตัวควบคุมให้  $L(s)$  มีขนาดและเฟสอยู่ในเกณฑ์ที่บังคับไว้



รูปที่ 2.15 เงื่อนไขบังคับบน  $|S(j\omega)|$  และ  $|T(j\omega)|$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 เงื่อนไขบังคับบนแผนภาพโบลเดของ  $L(s)$

โดยที่

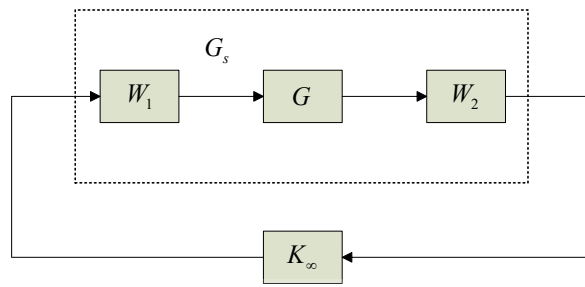
- (1) หมายถึง สมรรถนะในการตามรอยคำสั่ง ให้ค่าแตกต่างในการตามรอยมีค่าน้อยที่สุด
- (2) หมายถึง สมรรถนะในการขจัดกรรบกวน
- (3) หมายถึง สมรรถนะในการขจัดสัญญาณรบกวนจากการวัด
- (4) หมายถึง ระบบต้องมีค่าเผื่อของเสถียรภาพที่ดี

### 2.3.4 การควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ( $H_\infty$ loop shaping control) [16]

การออกแบบตัวควบคุมในระบบ  $G$  จะออกแบบฟังก์ชันชดเชยนำหน้า (pre-compensation) หรือ  $W_1$  และออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักร่วมหลัง (post-compensation) หรือ  $W_2$  ก่อนเป็นอันดับแรก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แค่เพียงฟังก์ชันชดเชยนำหน้าเท่านั้น ระบบที่ถูกจัดสัญญาณ ( $G_s$ ) จะสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.39 และรูปการควบคุมแบบจัดสัญญาณถูกแสดงในรูปที่ 2.17

$$G_s = W_1 G W_2 \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การควบคุมแบบจัดสรรฐานวงรอบปิด

ลำดับถัดมาหลังจากที่ออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักเสร็จแล้ว ต้องตรวจสอบความเหมาะสมของฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักจากค่าที่เรียกว่าค่านอร์มอนันต์ที่มีค่าต่ำที่สุด ( $\gamma_{\min}$ ) โดยสามารถหาค่านอร์มอนันต์ที่มีค่าต่ำที่สุดได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\gamma_{\min} = \varepsilon_{\max}^{-1} = \left\{ 1 - \|[N \ M]\|_H^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = (1 + \rho(XZ))^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

โดยที่

$\rho$  คือ ตัวกำหนดรัศมีของค่าเจาะจงสูงสุด (maximum eigenvalue)  
 $X, Z$  คือ ตัวแปรในการหาค่าตอบของสมการพีชคณิตรีคาติ (Algebraic Riccati equation)

การตรวจสอบความเหมาะสมของฟังก์ชันชดเชยน้ำหนัก ถ้า  $\gamma_{\min}$  มีค่ามากกว่า 4 จะถือว่าฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักที่ออกแบบมานั้นไม่เหมาะสมต้องออกแบบฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักใหม่ พอเราได้ฟังก์ชันชดเชยที่เหมาะสมแล้วให้เลือกราค่านอร์มอนันต์ให้มีค่ามากกว่านอร์มอนันต์ที่มีค่าต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ หลังจากนั้นทำการสังเคราะห์ตัวควบคุม ( $K_{\infty}$ ) จากสมการ (2.41)

$$K_{\infty} = \begin{bmatrix} A + BF + \gamma^2 (L^T)^{-1} ZC^T (C + DF) & \gamma^2 (L^T)^{-1} ZC^T \\ B^T X & -D^T \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

หลังจากที่สังเคราะห์ตัวควบคุม ( $K_{\infty}$ ) ได้แล้วจะต้องนำไปคูณกับฟังก์ชันชดเชยน้ำหนัก ( $W_1, W_2$ ) ก่อน ดังนั้นตัวควบคุม ( $K$ ) ที่เรานำไปใช้ควบคุมระบบ ( $G$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.42)

$$K = W_1 K_{\infty} W_2 \quad (2.42)$$

## 2.4 เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) [16]

เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ เป็นเทคนิคที่ใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมา เพื่อใช้อธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ โดยการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบ รูปแบบที่ใช้จำลองจะมีหลายรูปแบบ ซึ่งการหาพฤติกรรมของระบบจะมีวิธีประมาณการหรือแบบจำลองหลายแบบ ซึ่งแต่ละแบบจะเหมาะที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะมีหลักการหาแบบจำลองได้ 3 วิธีคือ

1. White-box model เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รู้ทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ คือจะรู้ทั้งจำนวนโพลและซีโรของระบบ ซึ่งสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของระบบได้จากความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุต ลำดับถัดมาแทนค่าพารามิเตอร์ที่ทราบแล้วเข้าไปก็จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการ

2. Gray-box model เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รู้โครงสร้างของระบบแต่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ อย่างแน่ชัด ดังนั้นจะมีการประมาณค่าพารามิเตอร์ขึ้นมา โดยค่าพารามิเตอร์ที่หาจะมาจาก การหาค่าความเหมาะสมของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนจากอินพุตไปยังเอาต์พุตของระบบ หลังจากนั้นหาความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเทียบกับระบบจริง เพื่อดูความเหมาะสมของพารามิเตอร์

3. Black-box model เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่ไม่รู้ทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ ดังนั้นวิธีการนี้จะต้องทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเปลี่ยนโครงสร้างของฟังก์ชันถ่ายโอน และค่าพารามิเตอร์ของระบบจนกระทั่งได้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเทียบกับระบบจริงน้อยที่สุด

โครงสร้างของระบบที่เป็นเชิงเส้น (linear structure) : จากวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น ทั้งแบบที่รู้พารามิเตอร์และไม่รู้พารามิเตอร์ภายในระบบ วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปในระบบ แล้วทำการเก็บเอาต์พุตเพื่อนำมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้รูปแบบการประมาณค่าแบบจำลองแบบ OE (output error)

การประมาณโดยใช้รูปแบบ OE (output error) : แบบจำลองนี้อาศัยการประมาณค่าความผิดพลาดในการสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบซึ่งรูปแบบโครงสร้างของการประมาณการแบบ OE จะเป็นดังนี้

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - n_k) + e(t) \quad (2.43)$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1} \quad (2.44)$$

$$F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf} \quad (2.45)$$

โดยที่  $y(t)$  คือ ค่าเอาต์พุต ณ เวลา  $t$   
 $u(t)$  คือ ค่าอินพุต ณ เวลา  $t$   
 $n_b$  คือ จำนวนซีโรบวกหนึ่งของระบบบวกหนึ่ง  
 $n_f$  คือ จำนวนโพลของระบบ  
 $n_k$  คือ จำนวนการสุ่มข้อมูล ก่อนที่อินพุตจะมีผลต่อเอาต์พุตของระบบ  
 $e(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด  
 $b_1, \dots, b_{n_b}$  และ  $f_1, \dots, f_{n_f}$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เราต้องการทราบ

จากสมการที่ (2.45) เป็นสมการที่อยู่ในรูปของสมการไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) ต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปสมการต่อเนื่องทางเวลา (continuous time) เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบได้ดังนี้

$$G(s) = \frac{B(s)}{F(s)} = \frac{b_{n_b}s^{(n_b-1)} + b_{n_b-1}s^{(n_b-2)} + \dots + b_1}{s^{n_f} + f_{n_f}s^{(n_f-1)} + \dots + f_1} \quad (2.46)$$

จากสมการ (2.46) เขียนในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง OE

วิธีการดังกล่าวทำการป้อนสัญญาณอินพุตและเก็บค่าสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่ได้ของระบบ เนื่องจากระบบที่ใช้เป็นวงจรมุมอันดับสอง โดยเก็บสัญญาณเอาต์พุตครบคร่อมดิน ดังนั้นจะทำให้เราสามารถรู้ค่าโพลและซีโรบวกหนึ่งของระบบ ซึ่งในการใส่ค่า  $n_f$  (จำนวนโพล)  $n_b$  (จำนวนซีโร+1) และ  $n_k$  (จำนวนการสุ่มข้อมูล) นั้นจะอาศัยการสุ่มค่าตามแบบของโมเดลกล่องดำ (black box model) คือ ไม่ทราบทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ของระบบ จึงใช้การสุ่มค่าต่าง ๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งคำตอบที่ออกมา นั่นคือค่าพารามิเตอร์  $f_1, \dots, f_{n_f}$  และ  $b_1, \dots, b_{n_b}$  ของสมการระบบที่ต้องการ

จากรูปแบบการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เป็นเชิงเส้นของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (Buck converter) และเลือกการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้รูปแบบ OE (output error) เพื่อประมาณการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบ อาศัยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่องดำ ซึ่งการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำโดยการเปลี่ยนโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ จนกว่าจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเทียบกับระบบจริงให้น้อยที่สุด วิธีการที่ใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของระบบที่กำหนด คือ การประมาณค่ากำลังสองต่ำสุด (least squares estimate)

### 2.4.1 การประมาณค่ากำลังสองต่ำสุด (least squares estimation)

ในการสร้างแบบจำลองของระบบด้วยวิธีการหาพารามิเตอร์ระบบ จะสร้างโดยใช้เกณฑ์ทางสถิติ เพื่อลดค่าความแปรปรวน (noise dynamic) หรือค่าความผิดพลาด (error) ให้ต่ำที่สุดโดยจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ออกมาใช้สร้างแบบจำลองที่ดีที่สุดนั่นเอง เมื่อค่าความผิดพลาดเท่ากับ

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (2.47)$$

โดยที่  $y(t)$  คือ ค่าเอาต์พุตจริงที่วัดมาจากระบบ  
 $\hat{y}(t)$  คือ ค่าเอาต์พุตที่สร้างขึ้นจากการประมาณการในแบบจำลอง  
 จากสมการ (2.43) และ (2.47)

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - n_k) + (y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.48)$$

$$\hat{y}(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - n_k) \quad (2.49)$$

กำหนดให้

$$\varphi = [-y(t-1), \dots, -y(t-n_a), u(t-n_k), \dots, u(t-n_k-n_b+1)]^T \quad (2.50)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} a_1, \dots, a_{n_a} \\ b_1, \dots, b_{n_b} \end{bmatrix}$$

โดยที่  $\varphi$  คือ ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่เราวัดมาจากระบบ  
 $\theta$  คือ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่เราต้องการทราบค่า

จากสมการ (2.48) ถึง (2.50)

$$\hat{y}(t) = \varphi^T \theta \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าจากสมการที่ (2.51) แทนลงในสมการ (2.47)

$$e = y - \varphi^T \theta \quad (2.52)$$

จากสมการ (2.52) เขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 2.19 เวกเตอร์ของค่าเอาต์พุตและค่าความผิดพลาดใน Column space ของ  $\varphi^T$

โดยที่  $e_1$  คือ เวกเตอร์ของค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

$e_2$  คือ ค่าความผิดพลาดใน Column space ของ  $\varphi^T$

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าที่ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเวกเตอร์ของค่าความผิดพลาด ( $e_1$ ) จะต้องตั้งฉากกันกับ column space ของ  $\varphi^T$  จากนั้นใช้สมบัติของเวกเตอร์ตั้งฉาก (orthogonal vector)

จากสมการ (2.52) นำ  $(\varphi^T)^T$  มาคูณทั้งสมการ จะได้

$$(\varphi^T)^T \cdot e = \varphi \cdot y - \varphi \cdot \varphi^T \theta \quad (2.53)$$

$$0 = \varphi \cdot y - \varphi \cdot \varphi^T \theta \quad (2.54)$$

$$\hat{\theta} = (\varphi \cdot \varphi^T)^{-1} \cdot \varphi \cdot y \quad (2.55)$$

จากสมการ (2.55) จะได้ค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยการประมาณออกมา ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณจะทำให้ค่าเอาต์พุตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับเอาต์พุตของระบบจริงมากที่สุด

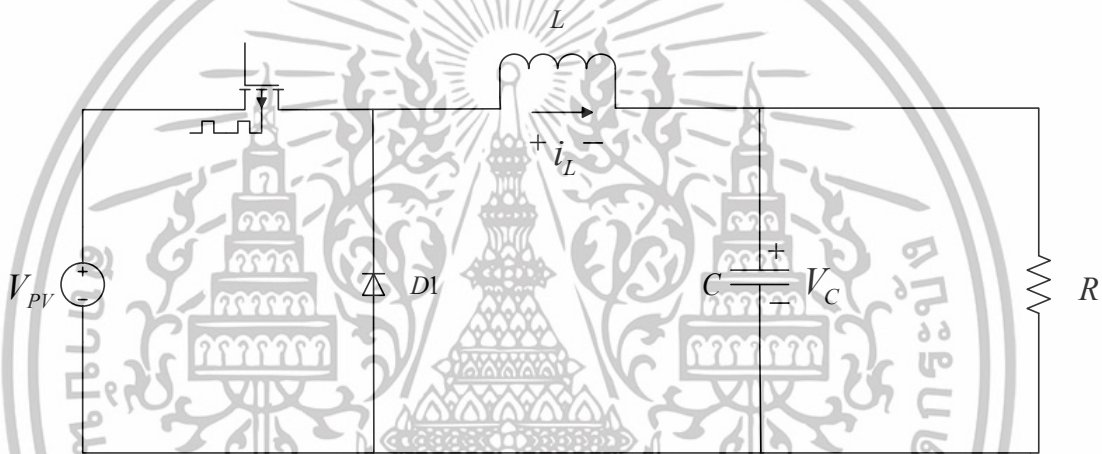
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบตัวควบคุมคงทน

บทนี้แสดงโครงสร้างวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า วิธีการคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำที่ต่ำสุดในวงจรถอนแรงดัน การคำนวณค่าตัวเก็บประจุต่ำสุดในวงจรถอนแรงดัน การออกแบบวงจรถอนกลับแรงดัน และการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทนด้วยเทคนิคการจัดสรรฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้

### 3.1 โครงสร้างวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจรถอนระดับแรงดัน

รูปที่ 3.1 เป็นโครงสร้างวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าประกอบไปด้วย อุปกรณ์สวิตชิง ตัวเหนี่ยวนำ (L) ตัวเก็บประจุ (C) และไดโอด (D) การทำงานของวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าจำเป็นต้องคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดที่จะทำให้กระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไหลได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังต้องคำนวณตัวเก็บประจุต่ำสุดที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตไม่เกิดแรงดันกระเพื่อม ซึ่งสามารถคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด ( $L_{min}$ ) และค่าตัวเก็บประจุต่ำสุด ( $C_{min}$ ) ได้ตามหัวข้อที่ 3.1.1 และ 3.1.2 ตามลำดับ

### 3.1.1 การหาค่าตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้า (Inductance)

ในการหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้าต้องคำนึงถึงความต่อเนื่องของกระแสด้วย โดยสามารถหาค่าตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการ (3.1)

$$L_{\min} = \frac{(1-D)^2 \times R}{2f_s} \quad (3.1)$$

โดยที่

$f_s$	คือ ความถี่การสวิตชิง (Hz)
$D$	คือ ดิวตี้ไซเคิล
$R$	คือ ความต้านทานของโหลด ( $\Omega$ )

หาค่าตัวเหนี่ยวนำโดยใช้สมการ (3.1) โดยกำหนดให้ค่าความถี่สวิตชิง ( $f_s$ ) เท่ากับ 25 kHz และค่าดิวตี้ไซเคิล ( $D$ ) เท่ากับ 0.34 และความต้านทานของโหลดเท่ากับ 10 โอห์ม จากการคำนวณจะได้ค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดเท่ากับ 87.12 ไมโครเฮนรี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำ 100 ไมโครเฮนรี

### 3.1.2 การหาค่าตัวเก็บประจุต่ำสุดของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้า

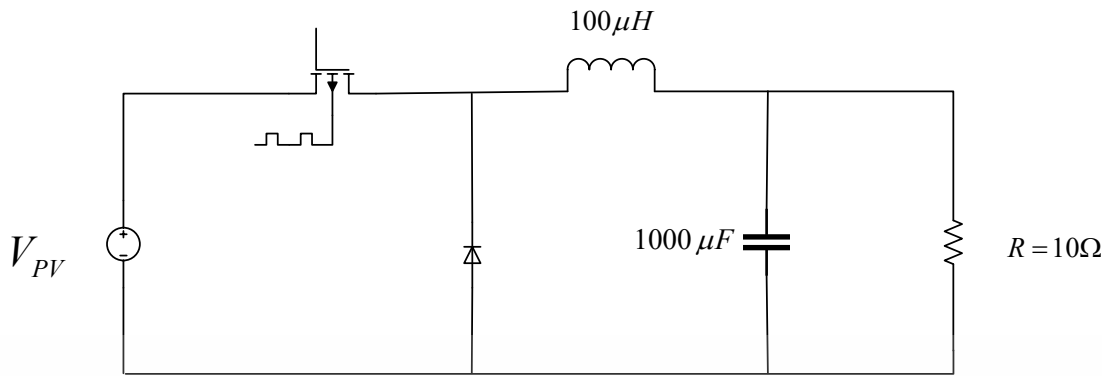
การหาค่าตัวเก็บประจุในส่วนของวงจรทอนแรงดันสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C = \frac{1-D}{8rLf_s^2} \quad (3.2)$$

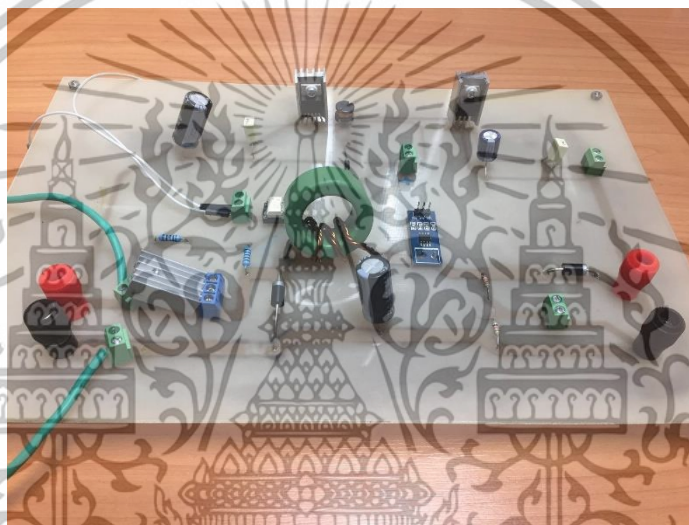
โดยที่

$r$	คือ ค่าแฟกเตอร์คลื่นระลอก (ปกติแล้ว $r < 2$ เปอร์เซนต์)
$f_s$	คือ ความถี่การสวิตชิง
$D$	คือ ดิวตี้ไซเคิล

ในการหาค่าตัวเก็บประจุใช้สมการ (3.2) โดยกำหนดให้ค่าแฟกเตอร์คลื่นระลอก ( $r$ ) เท่ากับ 1 % ค่าความถี่สวิตชิง ( $f_s$ ) เท่ากับ 25 kHz และค่าดิวตี้ไซเคิล ( $D$ ) เท่ากับ 0.34 จากการคำนวณจะได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 680  $\mu F$  ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุ 1000  $\mu F$



(ก) ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรทอนแรงดันไฟฟ้า



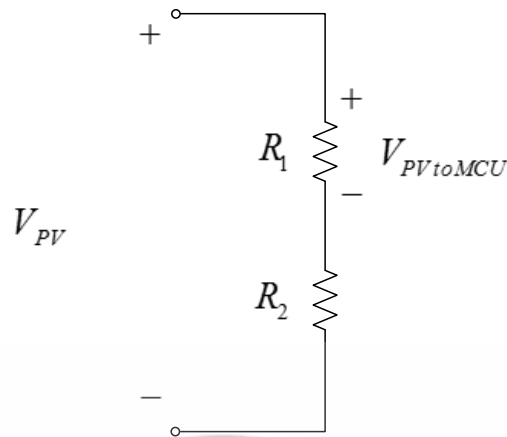
(ข) วงจรทอนแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จริง

### รูปที่ 3.2 วงจรทอนแรงดันไฟฟ้า

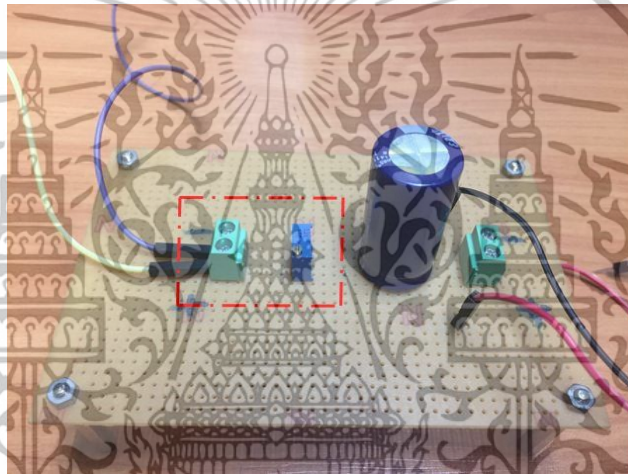
จากรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข) แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในวงจรทอนแรงดัน และวงจรทอนแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองตามลำดับ โดยอุปกรณ์สวิตซิ่งที่ใช้ คือ มอสเฟต (IRF510) มีค่าความเหนี่ยวนำ (L) เท่ากับ 100 ไมโครเฮนรี ค่าตัวเก็บประจุ (C) เท่ากับ 1000 ไมโครฟารัด และแรงดันขาออกของวงจรทอนแรงดันไฟฟ้าต่อกับแบตเตอรี่

### 3.2 วงจรป้อนกลับแรงดัน (Voltage Feedback Circuit)

วงจรป้อนกลับแรงดันใช้สำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งวงจรป้อนกลับแรงดันเป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์กับแรงดันอ้างอิง โดยการเปรียบเทียบจะทำการเปรียบเทียบในไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับแรงดันได้ไม่เกิน 5 โวลต์ ดังนั้นเราต้องสร้างวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้เปรียบเทียบมีค่าไม่เกิน 5 โวลต์ โดยที่วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3.4



(ก) แผนผังวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider)



(ข) วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) ที่ใช้จริง

## รูปที่ 3.3 วงจรป้อนกลับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Feedback Circuit)

จากรูปที่ 3.3 (ก) กำหนดให้  $V_{PV}$  แทนแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 40 โวลต์  $V_{PVtoMCU}$  แทนแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่บอร์ดประมวลผลมีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ หลังจากนั้นนำค่า  $V_{PV}$  และ  $V_{PVtoMCU}$  มาแทนสมการ (3.3) สามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทาน  $R_1$ ,  $R_2$  ได้จากสมการ (3.4)

$$\frac{V_{PVtoMCU}}{V_{PV}} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{5}{40} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (3.4)$$

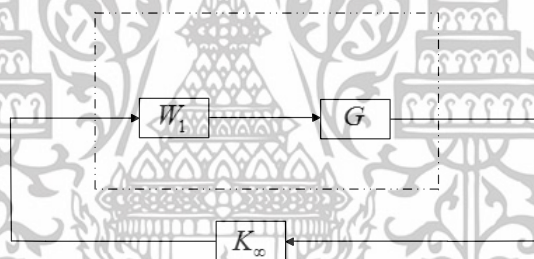
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.4) สามารถคำนวณหาค่าตัวต้านทานออกมาโดยตัวต้านทานที่นำมาใช้คือ  $20\text{ k}\Omega$  ในงานวิจัยนี้เลือกใช้  $R_1 = 2500\ \Omega$  และ  $R_2 = 17500\ \Omega$

จากรูปที่ 3.3 (ข) แสดงตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด  $20\text{ k}\Omega$  จากวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider) แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $V_{PV}$ ) ที่ต้องการควบคุมคือ 17.6 โวลต์ แต่ในความเป็นจริงแล้วเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งถ้าใช้แรงดันไฟฟ้า 17.6 โวลต์ในการคำนวณค่าตัวต้านทาน ( $R_1, R_2$ ) ทำให้แรงดันไฟฟ้า ( $V_{PV\text{ to }MCU}$ ) ที่เข้าบอร์ดประมวลผลมีค่าเกิน 5 โวลต์ส่งผลให้บอร์ดเสียหายได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าที่เข้าเซลล์แสงอาทิตย์เป็น  $40\text{ V}$  ในการคำนวณตัวต้านทาน

### 3.3 การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบชุดควบคุมนี้ต้องการจัดสัญญาณวงรอบด้วยฟังก์ชันชดเชยนำหน้า โดยในงานวิจัยนี้จัดสัญญาณโดยใช้ฟังก์ชันนำหน้าส่วนหน้า (pre-compensator) เท่านั้น ซึ่งมีโครงสร้างการควบคุมดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.4 การควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบปิด

ขั้นตอนที่ 1 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรทอนระดับแรงดัน

#### 3.3.1 ผลจากวิธีการหาพารามิเตอร์ของระบบ

ขั้นตอนการบันทึกข้อมูล

ขั้นตอนการบันทึกข้อมูลกราฟสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบตามทฤษฎีการหาค่าพารามิเตอร์ระบบอย่างเหมาะสมของวงจรทอนระดับแรงดันมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) สร้างสัญญาณพัลส์เทรนที่มีความถี่  $25\text{ kHz}$  และค่าดิวตี้ที่จุดการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันมีค่าเท่ากับ 0.34

2) นำสัญญาณพัลส์เทรนที่สร้างในขั้นตอนที่ 1 ไปขับขาเกตของมอสเฟตในวงจรทอนระดับแรงดัน

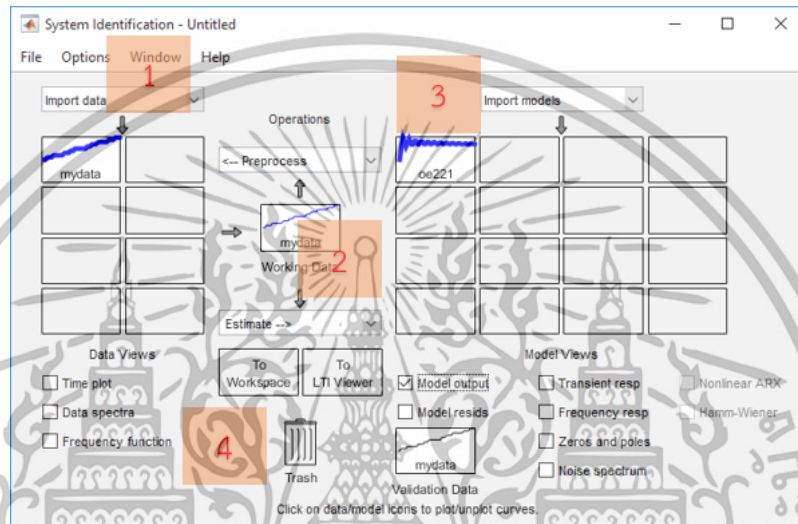
3) นำออสซิลโลสโคปบันทึกข้อมูลอินพุต (สัญญาณพัลส์เทรน) และข้อมูลเอาต์พุต (แรงดันไฟฟ้าอินพุต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) นำข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคปไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม MATLAB

### 3.3.2 การประมวลผลด้วยทฤษฎีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)

เมื่อทำการบันทึกอินพุตและเอาต์พุตเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนถัดไปจะเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยใช้ฟังก์ชันการหาพารามิเตอร์ระบบ (System Identification Tool) ในโปรแกรม MATLAB โดยหน้าต่างของฟังก์ชันการหาพารามิเตอร์ระบบจะเป็นดังรูปที่ 3.5

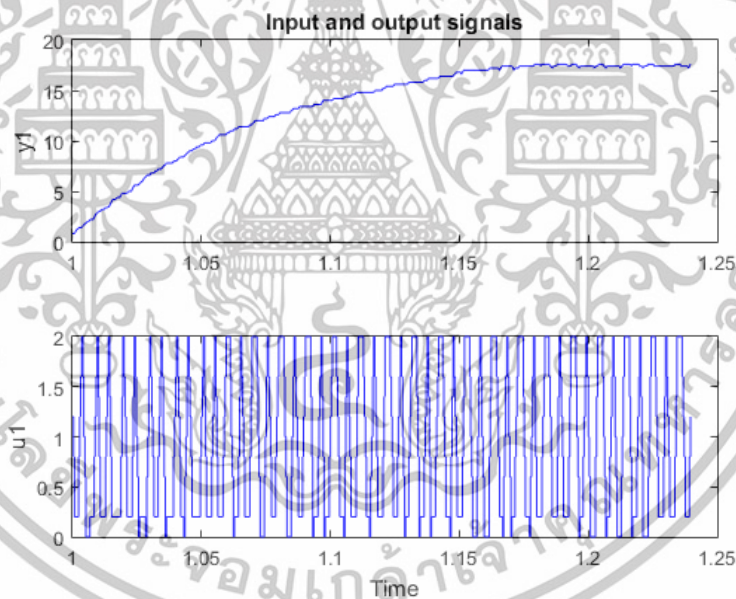


รูปที่ 3.5 หน้าต่างของฟังก์ชันการหาพารามิเตอร์ระบบ

สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรทอนระดับแรงดันมีตัวแปรคือ Volt, Volt1 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการหาพารามิเตอร์ระบบดังนี้

1) ป้อนข้อมูลให้กับเครื่องมือการหาพารามิเตอร์ระบบโดยมีอินพุต (พัลส์เทรน) ใช้ตัวแปรคือ Volt และเอาต์พุต (แรงดันอินพุต) ใช้ตัวแปรคือ Volt1 โดยมีความถี่ในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 0.4 มิลลิวินาทีต่อ 1 ครั้ง ซึ่งหน้าต่างการนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์แสดงดังรูป 3.6(ก) และค่าอินพุต เอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 3.6(ข)

รูปที่ 3.6(ก) หน้าต่างการนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์

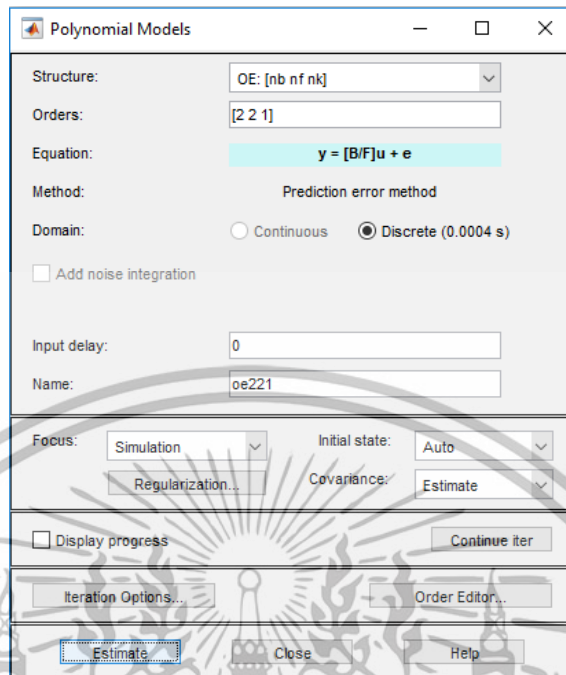


รูปที่ 3.6(ข) กราฟอินพุตและเอาต์พุตของระบบ

รูปที่ 3.6 ข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เลือกรูปแบบการประมาณแบบจำลองเป็นแบบ OE (Output Error) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 หน้าต่างการประมาณแบบจำลองแบบ OE (Output Error)

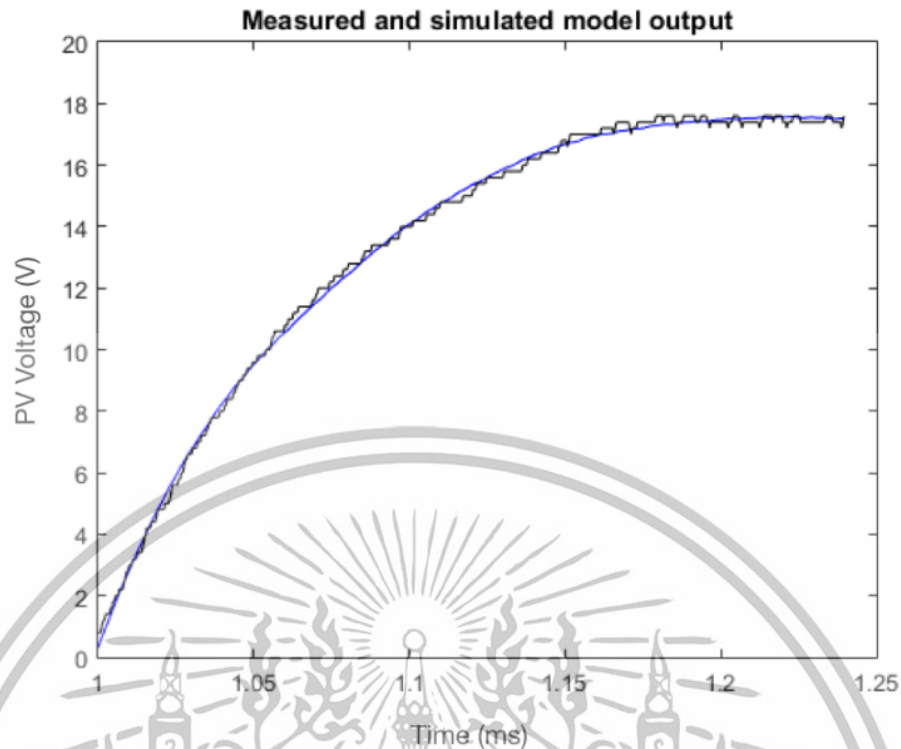
โดยที่ nb คือ จำนวนซีโร่ของระบบบวกหนึ่ง

nf คือ จำนวนโพลของระบบ

nk คือ จำนวนการสุ่มข้อมูลก่อนที่ค่าอินพุตจะมีผลต่อค่าเอาต์พุตของระบบ

โมเดลที่ใช้ในการหาพารามิเตอร์เป็นแบบกล่องดำ (Black Box Model) คือไม่ทราบทั้งโครงสร้างและพารามิเตอร์ของระบบ ดังนั้นจึงทำการสุ่มตัวแปรแบบจำลองของทฤษฎีการหาพารามิเตอร์จนกว่าจะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยจนสามารถยอมรับได้

3) เมื่อเลือกรูปแบบการประมาณแบบจำลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว เครื่องมือจะทำการสร้างแบบจำลองของระบบที่มีชื่อว่า oe221 แสดงรูปที่ 3.8 ซึ่งมีความเข้ากันได้ (Best Fits) อยู่ที่ 96.15 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นเราจะได้ค่าเอาต์พุตของแบบจำลองเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่วัดจากระบบจริงของวงจรทอนระดับแรงดัน หากเปอร์เซ็นต์ความเข้ากันได้มีค่าสูงหมายความว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความคล้ายคลึงกับระบบจริง



รูปที่ 3.8 หน้าต่างแสดงความเข้ากันได้ระหว่างเอาต์พุตของแบบจำลองกับเอาต์พุตจริง

4) สร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องทางเวลา (Continuous Time) โดยนำแบบจำลองของระบบ oe221 ไปยังพื้นที่การทำงาน (Work Space) ของโปรแกรม MATLAB หลังจากนั้นใช้คำสั่ง `sys = d2c(oe221)` ก็จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังรูปที่ 3.9

```
sys =
Continuous-time OE model: y(t) = [B(s)/F(s)]u(t) + e(t)
B(s) = -31.37 s + 9081
F(s) = s^2 + 37.64 s + 504.5
```

รูปที่ 3.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถอนระดับแรงดันแสดงดังสมการ (3.5)

$$G_V(s) = \frac{-31.37s + 9081}{s^2 + 37.64s + 504.5} \quad (3.5)$$

## ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาฟังก์ชันน้ำหนัก ( $W$ )

การหาฟังก์ชันน้ำหนักต้องพิจารณาจากสมการ (3.9)

$$\frac{y}{r} = \frac{KG}{1+KG} + \frac{KGn}{r(1+KG)} + \frac{d}{r(1+KG)} \quad (3.6)$$

จากสมการจะเห็นว่าถ้าอยากให้ระบบเป็นระบบควบคุมในอุดมคติต้องทำให้ค่า  $\frac{y}{r} = 1$  โดยค่า

$KG$  มีค่าสูงจะทำให้ผลตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิงทำได้ดีและผลของการรบกวนระบบน้อยลง แต่ทำให้ผลของสัญญาณรบกวนที่ตรวจจับมีมากขึ้น ในทางกลับกันถ้า  $KG$  มีค่าต่ำจะให้ผลตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิงทำได้ไม่ดีและผลของการรบกวนระบบมากขึ้นลง แต่ทำให้ผลของสัญญาณรบกวนที่ตรวจจับมีน้อยลง

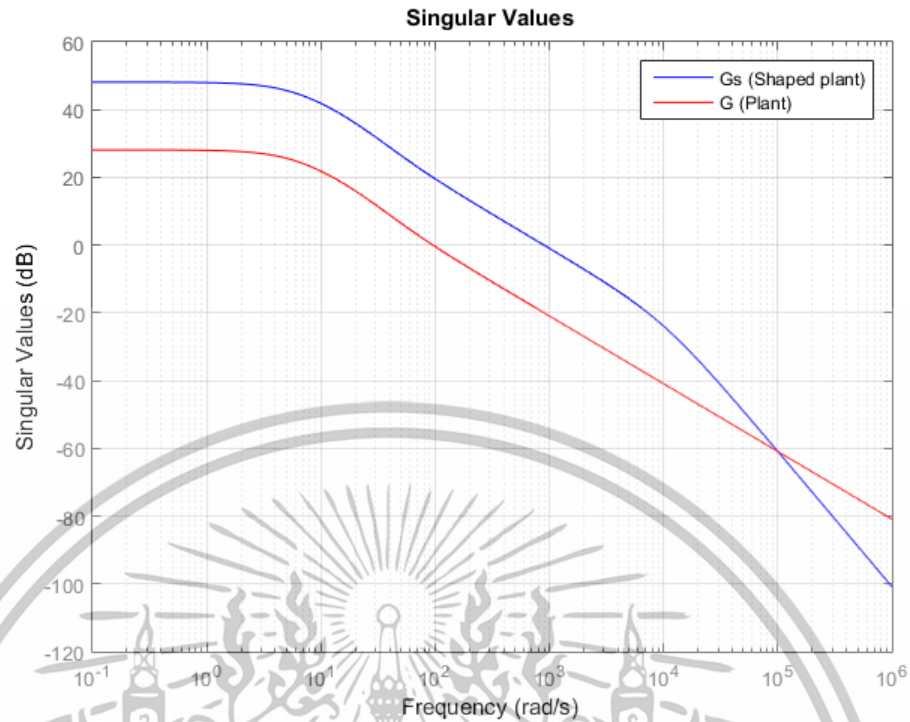
ดังนั้นเมื่อนำฟังก์ชันน้ำหนักที่ออกแบบมาอนุกรมกับระบบควบคุมจะมีลักษณะของแผนภาพโพลเดของวงรอบเปิดตามลักษณะต่อไปนี้

- 1 อัตราการขยายสูงที่ความถี่ต่ำ เพื่อลดผลที่เกิดจากการรบกวนและความไม่แน่นอนของระบบ และทำให้การตามรอยคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิงทำได้ดี
- 2 อัตราการขยายต่ำที่ความถี่สูง เพื่อลดสัญญาณการรบกวนที่ตรวจจับ
- 3 ค่าแบนวิดท์สูงเพื่อความไวในการตอบ

จากข้อกำหนดที่กล่าวมาฟังก์ชันน้ำหนักแสดงในสมการ (3.7)

$$W = \frac{1.005 \times 10^5}{s + 1.005 \times 10^4} \quad (3.7)$$

จากนั้นทำการพล็อตแผนภาพโพลเดวงรอบเปิดของระบบเปรียบเทียบกับระบบหลังจากจัดสัญญาณแล้วดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภาพโบเดของระบบวงรอบเปิด

จากรูปที่ 3.10 พบว่าระบบที่ยังไม่ได้จัดสรรฐานวงรอบ(เส้นสีแดง) มีค่าอัตราการขยายเท่ากับ 30 dB มีค่าอัตราการขยายน้อยกว่าระบบที่จัดสรรฐานวงรอบแล้ว(เส้นสีน้ำเงิน) ที่มีค่าอัตราการขยายเท่ากับ 50 dB ทำให้ระบบที่จัดสรรฐานวงรอบแล้วมีผลตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิงได้ดีกว่าระบบที่ยังไม่ได้จัดสรรฐานวงรอบ และที่ความถี่สูงระบบที่ยังไม่ได้จัดสรรฐานวงรอบมีค่าอัตราการขยายเท่ากับ -80 dB ระบบที่จัดสรรฐานวงรอบแล้วมีค่าอัตราการขยายเท่ากับ -100 dB ค่าอัตราการขยายที่ความถี่สูงของระบบที่ยังไม่ได้จัดสรรฐานวงรอบมีค่ามากกว่าของระบบที่จัดสรรฐานวงรอบแล้ว ซึ่งทำให้ระบบที่จัดสรรฐานวงรอบแล้วมีสัญญาณการรบกวนที่ตัวตรวจจับน้อยกว่าระบบที่ยังไม่ได้จัดสรรฐานวงรอบ นอกจากนี้ระบบที่ยังไม่ได้จัดสรรฐานวงรอบมีค่าแบนวิดท์เท่ากับ 90 rad/s มีค่าน้อยกว่าแบนวิดท์ของระบบที่มีการจัดสรรฐานวงรอบแล้วที่มีค่าแบนวิดท์เท่ากับ 890 rad/s ซึ่งทำให้ระบบที่จัดสรรฐานวงรอบแล้วมีความไวในการตอบสนองของระบบดีกว่าของระบบที่ยังไม่ได้จัดสรรฐานวงรอบ

### ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบความเหมาะสมของฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักร

หลังจากที่ได้ฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักรแล้วต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมของฟังก์ชัน โดยที่ค่า  $\gamma_{\min}$  ของฟังก์ชันชดเชยน้ำหนักรต้องมีค่าไม่เกิน 4 สามารถหาค่า  $\gamma_{\min}$  ได้จากสมการ (3.8)

$$\gamma_{\min} = \varepsilon_{\max}^{-1} = \left\{ 1 - \|[N \ M]\|_H^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} = (1 + \rho(XZ))^{-\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

- $\rho$  คือ ตัวกำหนดรัศมีของค่าเจาะจงสูงสุด (maximum eigenvalue)  
 $X, Z$  คือ ตัวแปรในการหาคำตอบของสมการพีชคณิตรีคาติ (Algebraic Riccati equation)

$X, Z$  สามารถหาได้จากสมการรีคาติดังแสดงไว้ในสมการ (3.9) และสมการ (3.10)

$$(A - BS^{-1}D^T C)Z + Z(A - BS^{-1}D^T C)^T - ZC^T R^{-1} CZ + BS^{-1}B^T = 0 \quad (3.9)$$

$$(A - BS^{-1}D^T C)^T X + X(A - BS^{-1}D^T C) - XBS^{-1}B^T X + C^T R^{-1} C = 0 \quad (3.10)$$

จากสมการ (3.8) - (3.10) ได้ค่า  $\gamma_{\min} = 1.4811$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 4 เพราะฉะนั้นฟังก์ชันชดเชย  
 น้ำหนักก็มีความเหมาะสม

ขั้นตอนที่ 4 ทำการสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้ ( $K$ )

หาค่า  $K_{\infty}$  จากสมการ (3.9) - (3.13) โดยที่ค่า  $\gamma$  ในสมการ (3.11) แทนด้วยค่า  
 $\gamma_{\min} = 1.4811$

$$K_{\infty} = \begin{bmatrix} A + BF + \gamma^2 (L^T)^{-1} ZC^T (C + DF) & \gamma^2 (L^T)^{-1} ZC^T \\ B^T X & -D^T \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$F = -S^{-1} (D^T C + B^T X) \quad (3.12)$$

$$L = (1 - \gamma^2) I + XZ \quad (3.13)$$

เมื่อพิจารณาความคงทนหาค่า  $\|T_{zw}\|_{\infty}$  ได้เท่ากับค่า  $\gamma_{\min}$  ตามเงื่อนไขของสมการ (3.14) แสดง  
 ว่าระบบมีความคงทน

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} I \\ K_{\infty} \end{bmatrix} (I - G_s K_{\infty})^{-1} \begin{bmatrix} I & G_s \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \leq \varepsilon^{-1} \quad (3.14)$$

หลังจากที่สังเคราะห์ตัวควบคุม ( $K_{\infty}$ ) ได้แล้วจะต้องนำไปคูณกับฟังก์ชันชดเชยน้ำหนัก ( $W_1$ ) ก่อน  
 ดังนั้นตัวควบคุม ( $K$ ) ที่เรานำไปใช้ควบคุมระบบ ( $G$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ (3.15)

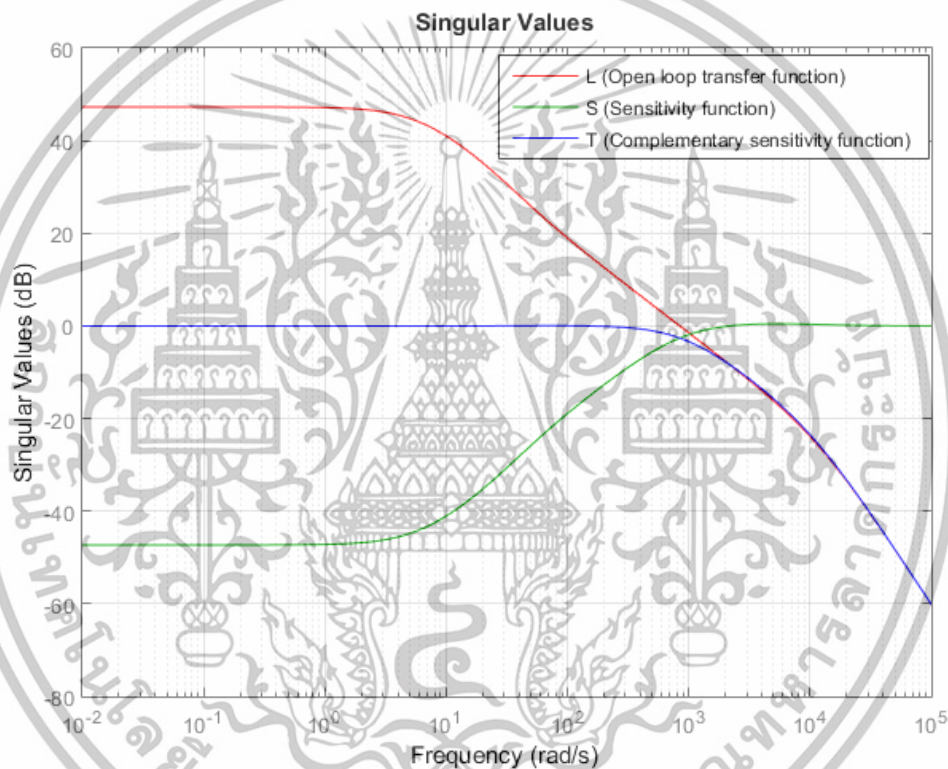
$$K = W \times K_{\infty} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ค่าตัวควบคุมดังนี้

$$K = \frac{1.098 \times 10^5 s^2 + 1.112 \times 10^9 s + 4.928 \times 10^{10}}{s^3 + 2.184 \times 10^4 s^2 + 1.99 \times 10^8 s + 5.426 \times 10^9} \quad (3.16)$$

หลังจากนั้นทำการปิดวงรอบแล้วนำไปพล็อตแผนภาพโบเดของวงรอบปิดที่ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนภาพโบเดของระบบวงรอบปิด

จากรูปที่ 3.11 เห็นว่าฟังก์ชันความไว (S, Sensitivity function) มีค่าอัตราการขยายน้อยมาก ในย่านความถี่ต่ำเพื่อลดผลของสัญญาณรบกวน และสมรรถนะในการตามรอยคำสั่งที่ดี ฟังก์ชันเติมเต็มความไว (T, Complementary sensitivity function) มีค่าอัตราการขยายประมาณ 1 ที่ความถี่ต่ำเพื่อสมรรถนะตามรอยคำสั่งที่ดีและมีค่าอัตราการขยายต่ำที่ย่านความถี่สูงเพื่อลดการรบกวนจากเครื่องมือวัด

### 3.4 สรุปผลการออกแบบ

บทที่ 3 เป็นการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำต่ำสุดที่ทำให้กระแสต่อเนื่องและค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้แรงดันไม่มีการกระเพื่อมของแรงดัน โดยค่าตัวเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในงานวิจัยเท่ากับ  $100 \mu H$   $1000 \mu F$  ตามลำดับ หลังจากนั้นออกแบบฟังก์ชันน้ำหนักที่มีความเหมาะสมกับ

ระบบที่ต้องการควบคุม ฟังก์ชันน้ำหนักส่วนหน้าที่ได้จากการออกแบบเป็นดังนี้  $W = \frac{1.005 \times 10^5}{s + 1.005 \times 10^4}$

ลำดับต่อมาทำการสังเคราะห์ตัวควบคุมคงทนด้วยเทคนิคจัตววงรอบสัญญาณแบบเฮซอินฟินิตี้ ได้ตัวควบคุมคงทนดังนี้  $K = \frac{1.098 \times 10^5 s^2 + 1.112 \times 10^9 s + 4.928 \times 10^{10}}{s^3 + 2.184 \times 10^4 s^2 + 1.99 \times 10^8 s + 5.426 \times 10^9}$  หลังจากนั้นทำการ

ทดสอบความคงทนของตัวควบคุมโดยค่า  $\|T_{zw}\|_\infty$  ต้องมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับค่า  $\gamma_{\min}$  ผลปรากฏว่าค่า  $\|T_{zw}\|_\infty$  มีค่าเท่ากับ  $\gamma_{\min}$  เพราะฉะนั้นตัวควบคุมที่ออกแบบมาถือว่ามีความคงทน

ส่วนในหัวข้อถัดไปเป็นผลการทดลองของตัวควบคุมคงทนแบบจัตววงรอบสัญญาณแบบเฮซอินฟินิตี้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีที่มีการปรับจูนโดยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึง วงจรการทดลองและขั้นตอนการทดลอง การปรับจูนโดยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ การแปลงตัวควบคุมจากสัญญาณต่อเนื่องทางเวลาเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลา คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ผลเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้การจัดสัญญาณวงรอบเอชอินพีนี้ต์และการควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูนโดยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์

#### 4.1 การทดลองและผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้การออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินพีนี้ต์และระบบควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูนโดยวิธีการของซิกเลอร์-นิโคลส์ ซึ่งทำการทดลองที่ 4 สภาวะ คือ สภาวะความเข้มแสงคงที่ ณ อุณหภูมิ 25 และ 50 °C และที่สภาวะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง ณ อุณหภูมิ 25 และ 50 °C

##### 4.1.1 วงจรและขั้นตอนการทดลอง

การทดลองควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 วิธีนั้นมีขั้นตอนการทดลองเหมือนกัน หลังจากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาทำการเปรียบเทียบ โดยใช้วงจรดังรูปที่



รูปที่ 4.1 แผนภาพวงจรจริงที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรการทดลอง

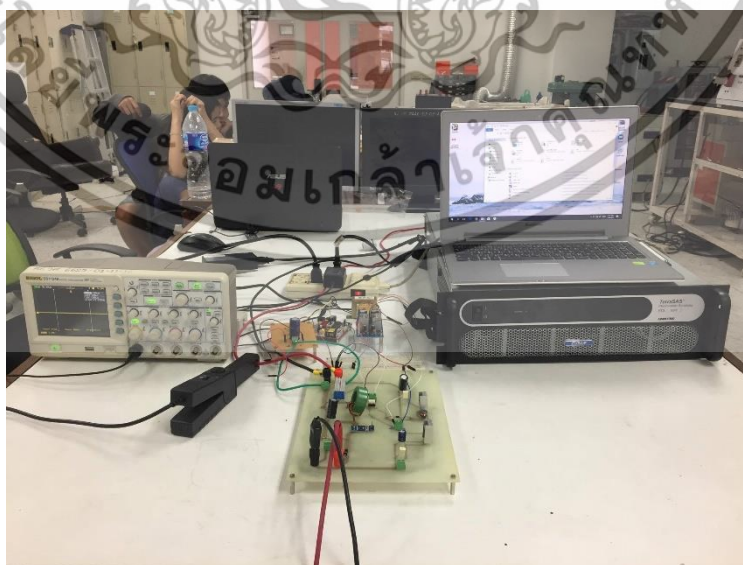
1. วงจรไฟเลี้ยงออปโต (Opto Power Circuit)	2. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro Controller)
3. วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage DiVider)	4. วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (Buck ConVerter)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับชุดควบคุม



รูปที่ 4.2 เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการควบคุมแบบจัด  
สัณฐานวงรอบเอชอินพีนี้ที่ความเข้มแสงคงที่ ณ อุณหภูมิ 25 °C
3. ทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการควบคุมแบบจัด  
สัณฐานวงรอบเอชอินพีนี้ที่ความเข้มแสงคงที่ ณ อุณหภูมิ 50 °C
4. ทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดีที่  
ความเข้มแสงคงที่ ณ อุณหภูมิ 25 °C
5. ทำการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการควบคุมแบบพีไอดีที่  
ความเข้มแสงคงที่ ณ อุณหภูมิ 50 °C

#### 4.2 การปรับจูนโดยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler–Nichols tuning method)

วิธีการของซิกเลอร์-นิโคลส์ที่ใช้ในการปรับค่าเกนตัวควบคุมนี้สามารถทำให้การตอบสนองของ  
ระบบเมื่อมีอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย มีลักษณะการแกว่งแบบลดลงด้วยอัตราหนึ่งในสี่

ขั้นตอนการปรับจูนโดยวิธีการของซิกเลอร์-นิโคลส์

- 1) เริ่มจากทำให้ระบบและตัวควบคุมเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ
- 2) เพิ่มค่าเกนตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control) โดยที่ค่าเกนตัวควบคุมแบบอิน  
ติกรัล (Integral Control) และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control) มีค่าเป็นศูนย์  
จนกระทั่งระบบเริ่มมีการแกว่ง (Oscillate)
- 3) ทำการบันทึกค่าเกนตัวควบคุมแบบสัดส่วนตรงตำแหน่งนี้ไว้ สมมุติให้มีค่าเท่ากับ  $K_u$
- 4) ทำการวัดคาบเวลาการแกว่งไว้ด้วยสมมุติให้มีค่าเป็น  $T_c$
- 5) คำนวณค่าเกนของตัวควบคุมได้จากตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางการปรับค่าเกนโดยวิธีซิกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler–Nichols tuning method)

ชนิดตัวควบคุม	$K_p$	$K_i$	$K_d$
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.45K_u$	$1.2K_p/T_c$	-
PID	$0.6K_u$	$2K_p/T_c$	$K_p T_c/8$

จากตารางที่ 4.2 สามารถคำนวณหาค่าเกนตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)  
เท่ากับ 8.4 ค่าเกนตัวควบคุมแบบอินติกรัล (Integral Control) เท่ากับ 33.6 และตัวควบคุมแบบ  
อนุพันธ์ (Derivative Control) เท่ากับ 0.525

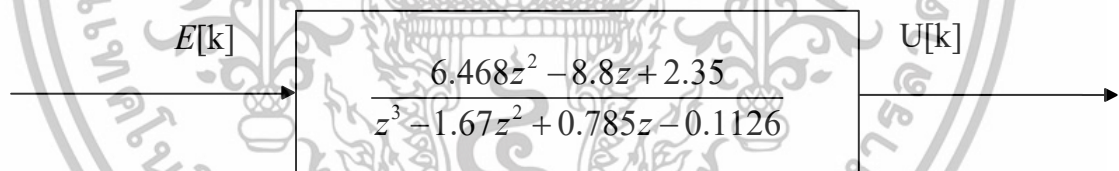
### 4.3 การแปลงตัวควบคุมจากสัญญาณต่อเนื่องทางเวลา (Continuous Time) เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discontinuous Time)

การที่จะนำตัวควบคุมมาใช้ในการทดลองจำเป็นต้องแปลงตัวควบคุมแบบคงทนจากเวลาแบบต่อเนื่อง (Continuous Time) ไปเป็นเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Time) สามารถแปลงสัญญาณได้จากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) ดังแสดงในรูปที่ 4.6

```
sys =
      6.468 z^2 - 8.8 z + 2.35
-----
      z^3 - 1.67 z^2 + 0.785 z - 0.1126
Sample time: 0.0001 seconds
Discrete-time transfer function.
```

รูปที่ 4.4 การแปลงสัญญาณตัวควบคุมจากสัญญาณต่อเนื่องเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.4 เป็นการแสดงการใช้คำสั่งในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแบบต่อเนื่องไปเป็นสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง คำสั่งที่ใช้คือ  $sys = c2d(ktf,0.0001)$  โดย  $sysd$  คือตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง  $ktf$  คือตัวควบคุมคงทนแบบเวลาต่อเนื่อง และ  $0.0001$  คือเวลาในการสุ่ม (Sampling time)



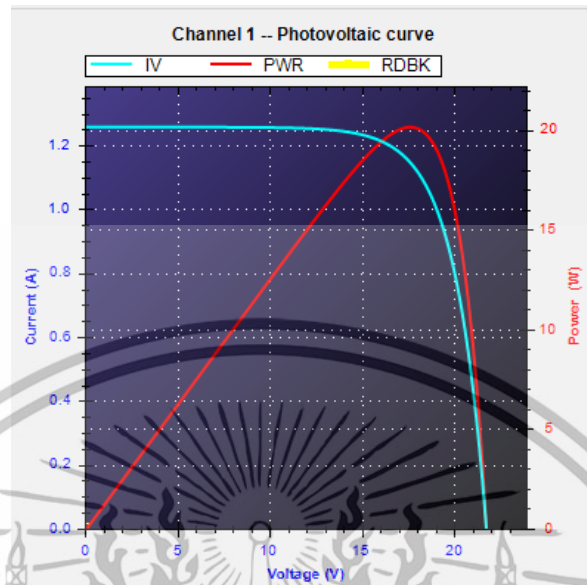
รูปที่ 4.5 แผนภาพไดอะแกรมของตัวควบคุมคงทนแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.5 สามารถเขียนเอาต์พุตของตัวควบคุมคงทนแบบสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลาได้ดังสมการ (4.3)

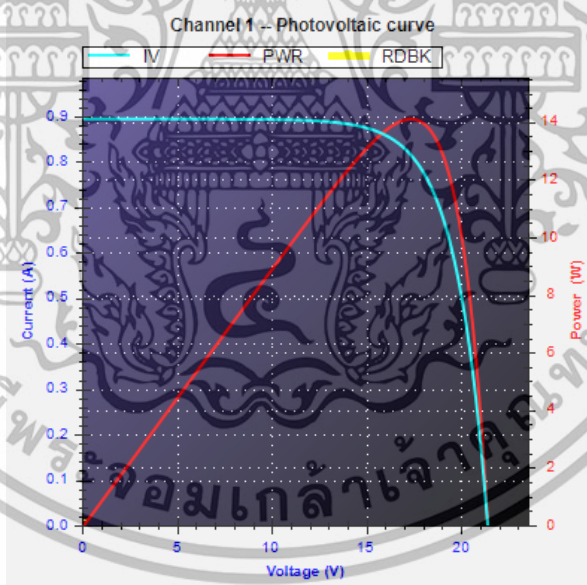
$$U[k]=1.67U[k-1]-0.785U[k-2]+0.1126U[k-3]+6.468E[k-1]-8.8E[k-2]+2.35E[k-3] \quad (4.3)$$

โดยที่  $U[k]$  คือค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมคงทนแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง  
 $E[k]$  คือค่าความผิดพลาดของตัวควบคุมคงทนแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

#### 4.4 คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

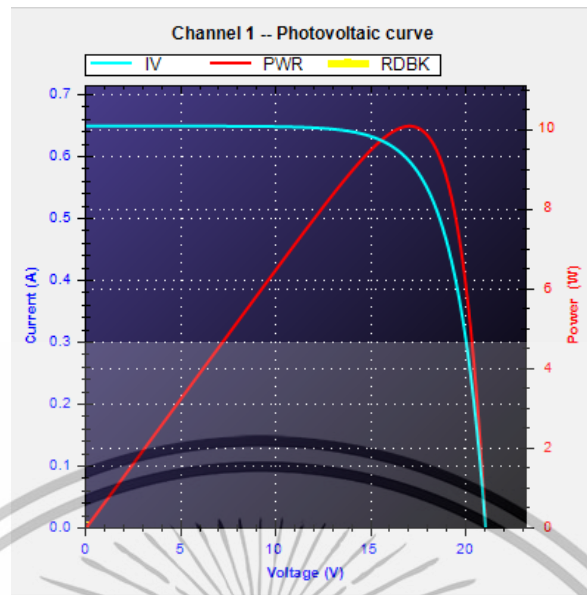


(ก) กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า (I-V curve) ของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

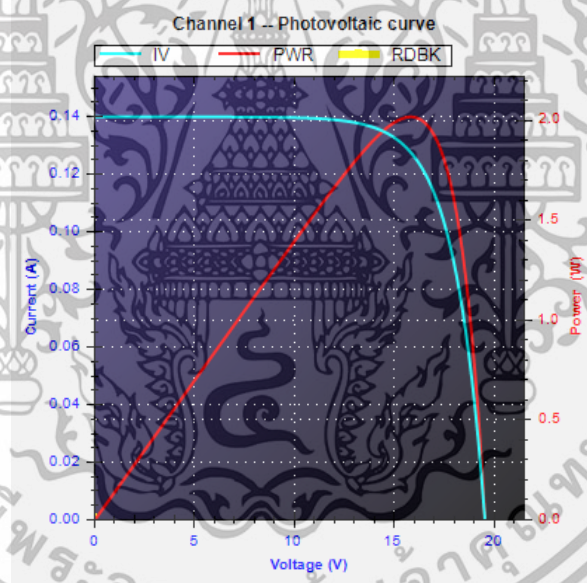


(ข) กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า (I-V curve) ของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสง  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า (I-V curve) ของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$



(ง) กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า (I-V curve) ของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มแสง  $100 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$

รูปที่ 4.6 กราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้า (I-V curve) ของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น Kyocera Solar ks20 ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 (ก) แสดงกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น Kyocera Solar ks20 ที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  โดยเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มีคุณลักษณะดังนี้ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (open circuit Voltage) มีค่าเท่ากับ  $21.7 \text{ V}$  กระแสลัดวงจร (short circuit current) มีค่าเท่ากับ  $1.26 \text{ A}$  แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด (Voltage at maximum power point) เท่ากับ  $17.58 \text{ V}$  กระแสที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด (Current at maximum power point) เท่ากับ  $1.148 \text{ A}$  และกำลังสูงสุด (Maximum power point) เท่ากับ  $20.2 \text{ W}$  รูปที่ 4.6 (ข) แสดงกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ความเข้มแสง  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (open circuit Voltage) มีค่าเท่ากับ  $21.36 \text{ V}$  กระแสลัดวงจร (short circuit current) มีค่าเท่ากับ  $0.896 \text{ A}$  แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด (Voltage at maximum power point) เท่ากับ  $17.31 \text{ V}$  กระแสที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด (Current at maximum power point) เท่ากับ  $0.817 \text{ A}$  และกำลังสูงสุด (Maximum power point) เท่ากับ  $14.14 \text{ W}$  รูปที่ 4.6 (ค) แสดงกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (open circuit Voltage) มีค่าเท่ากับ  $20.84 \text{ V}$  กระแสลัดวงจร (short circuit current) มีค่าเท่ากับ  $0.525 \text{ A}$  แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด (Voltage at maximum power point) เท่ากับ  $16.89 \text{ V}$  กระแสที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด (Current at maximum power point) เท่ากับ  $0.472 \text{ A}$  และกำลังสูงสุด (Maximum power point) เท่ากับ  $8.08 \text{ W}$  รูปที่ 4.6 (ง) แสดงกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่ความเข้มแสง  $100 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (open circuit Voltage) มีค่าเท่ากับ  $19.53 \text{ V}$  กระแสลัดวงจร (short circuit current) มีค่าเท่ากับ  $0.14 \text{ A}$  แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด (Voltage at maximum power point) เท่ากับ  $15.83 \text{ V}$  กระแสที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุด (Current at maximum power point) เท่ากับ  $0.128 \text{ A}$  และกำลังสูงสุด (Maximum power point) เท่ากับ  $2.02 \text{ W}$

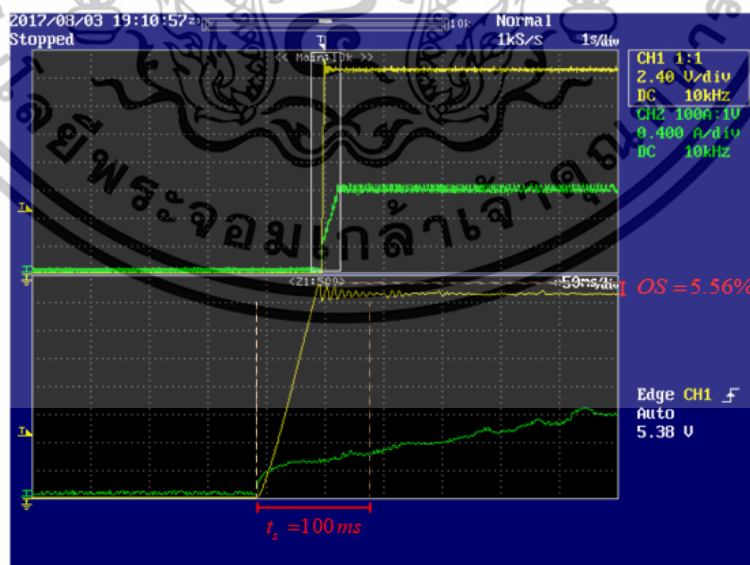
#### 4.5 ผลการทดลองเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงคงที่

ทำการทดลองควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบด้วยการจัดสัณฐานวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และระบบควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูนด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเข้มแสงคงที่ 4 ระดับ ได้แก่ 1000 700 400 และ 100 W/ m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 และ 50 °C

##### 4.5.1 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัณฐานวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัณฐานวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

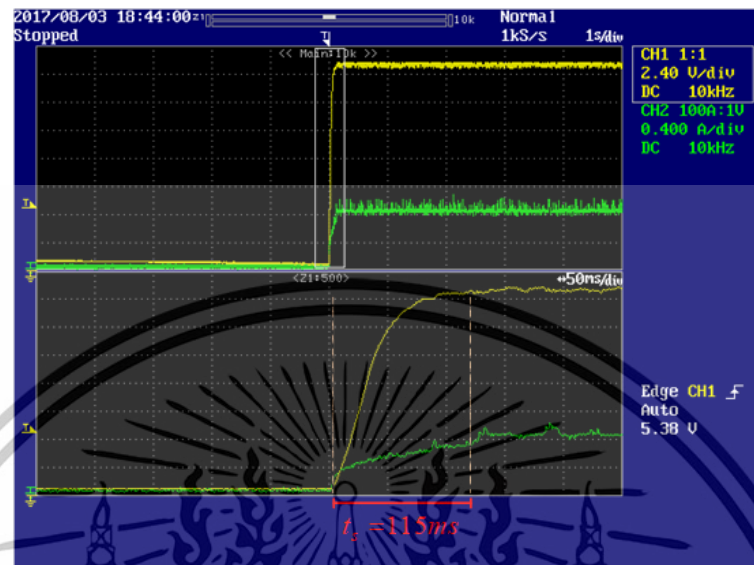
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 4.7** การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 1000 W/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 °C

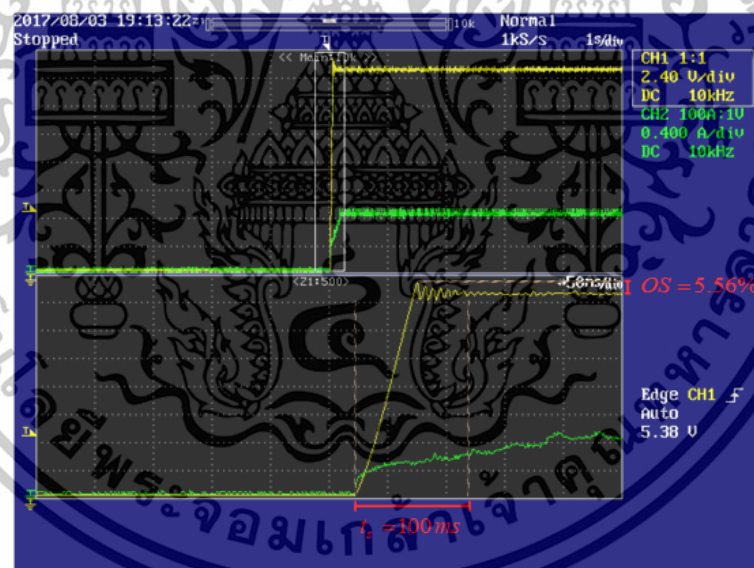
จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงเปิดวงจรไฟฟ้าไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ 25 °C ความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1, 2.4 V/div) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2 , 0.4A/div) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ 17.6 V (สภาวะคงตัว) ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงเปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงแรก) และปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงหลัง)

จากรูปที่ 4.7 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ 25 °C ความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ (ช่วงแรก) และสภาวะคงตัว (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 1.22 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 0 % และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่ 0.115 s จากรูปที่ 4.7 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ 25 °C ความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> ในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 1.22 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 5.56 % และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่ 0.100 s

#### 4.5.2 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอซอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีโอดีที่ความเข้มแสง $700 \text{ W m}^{-2}$ ณ อุณหภูมิ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีโอดี

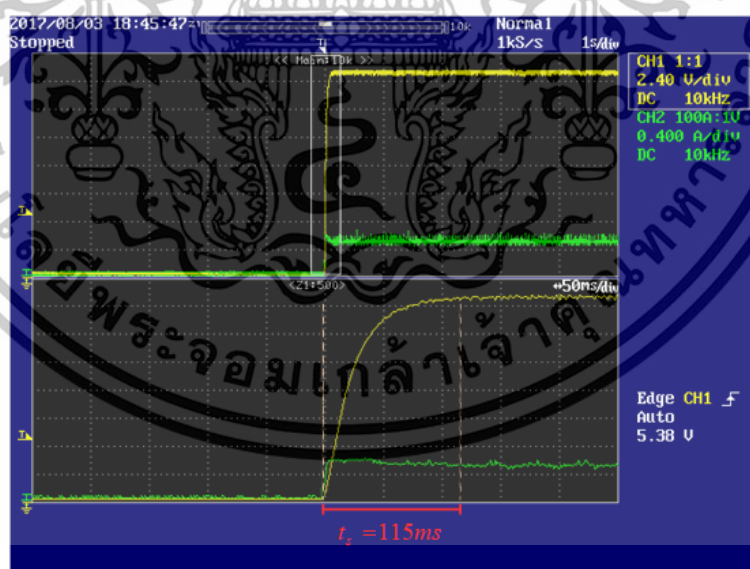
รูปที่ 4.8 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง  $700 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอซอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีโอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงเปิดวงจรไฟฟ้าไปสู่สถานะคงตัวที่อุณหภูมิ  $^{\circ}\text{C}$  ความเข้มแสง  $700 \text{ W/ m}^2$  เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1,  $2.4 \text{ V/div}$ ) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2 ,  $0.4\text{A/div}$ ) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ  $17.6 \text{ V}$  (สถานะคงตัว) ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงเปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงแรก) และปิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

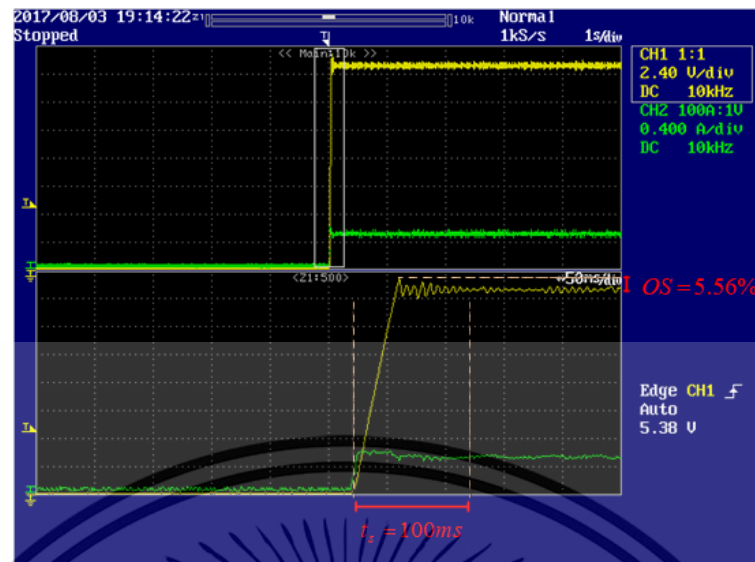
วงจรไฟฟ้า (ช่วงหลัง)

จากรูปที่ 4.8 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัด  
 สัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่  
 อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ความเข้มแสง  $700\text{ W/m}^2$  การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ความเข้ม  
 แสงเป็นศูนย์ (ช่วงแรก) และสภาวะคงตัว (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่า  
 แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ V}$  ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสี  
 เหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า  $17.6\text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  
 $0.804\text{ A}$  หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี  
 ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $0\%$  และเวลาเข้าสู่  
 สภาวะคงตัวอยู่ที่  $0.115\text{ s}$  จากรูปที่ 4.8 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่  
 ควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$   
 ความเข้มแสง  $700\text{ W/m}^2$  ในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ V}$  ส่วน  
 กราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่  
 แรงดันไฟฟ้า  $17.6\text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  $0.804\text{ A}$  หลังจากนั้นทำการ  
 วิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มีความเข้มแสงไปสู่สภาวะคง  
 ตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $5.56\%$  และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่  $0.100\text{ s}$

#### 4.5.3 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัณฐานวงรอบ แบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง $400\text{ W/m}^2$ ณ อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C}$



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัณฐานวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

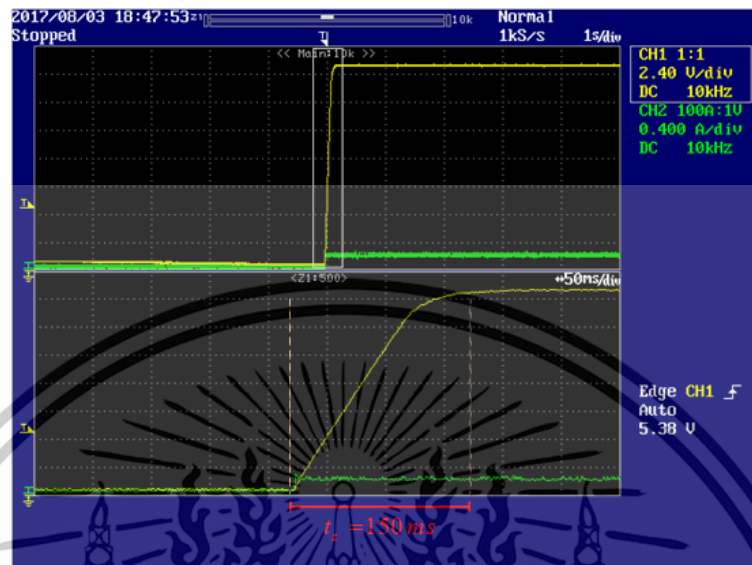
**รูปที่ 4.9** การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

จากรูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงเปิดวงจรไฟฟ้าไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1,  $2.4 \text{ V/div}$ ) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2,  $0.4 \text{ A/div}$ ) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ  $17.6 \text{ V}$  (สภาวะคงตัว) ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงเปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงแรก) และปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงหลัง)

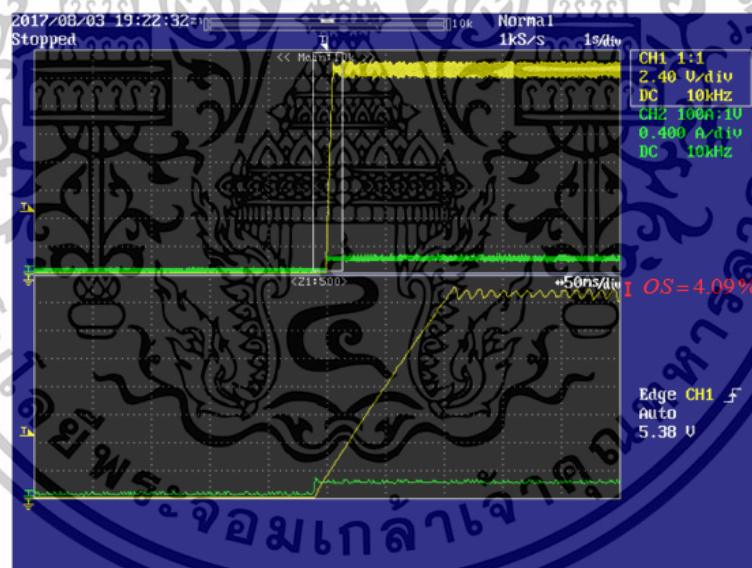
จากรูปที่ 4.9 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ (ช่วงแรก) และสภาวะคงตัว (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0 \text{ V}$  ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0 \text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า  $17.6 \text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  $0.397 \text{ A}$  หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $0 \%$  และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่  $0.115 \text{ s}$  จากรูปที่ 4.9 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  ในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0 \text{ V}$  ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0 \text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า  $17.6 \text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  $0.397 \text{ A}$  หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $5.56 \%$  และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่  $0.100 \text{ s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอซอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง  $100 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี  
รูปที่ 4.10 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่  
ความเข้มแสง  $100 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอซอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงเปิดดวงจรไฟฟ้าไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ความเข้มแสง  $100 \text{ W/m}^2$  เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1, 2.4 V/div) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2, 0.4A/div) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ 17.6 V (สภาวะคงตัว) ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงเปิดดวงจรไฟฟ้า (ช่วงแรก) และปิดดวงจรไฟฟ้า (ช่วงหลัง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

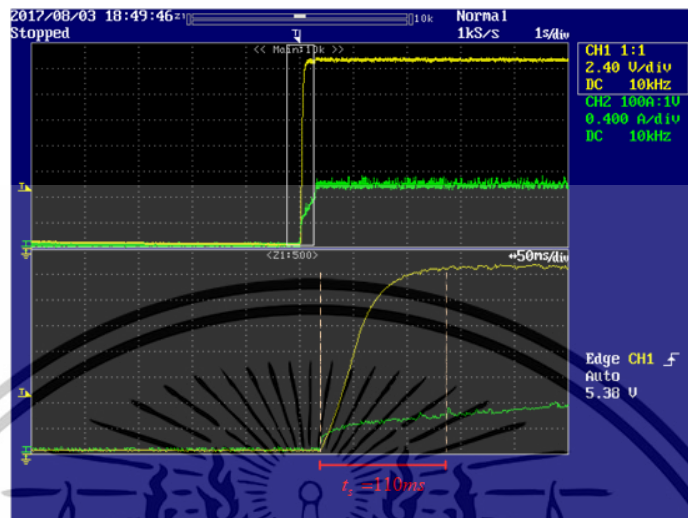
จากรูปที่ 4.10 (ค) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัด  
 สัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่  
 อุณหภูมิ 25 °C ความเข้มแสง 100 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ความเข้ม  
 แสงเป็นศูนย์ (ช่วงแรก) และสภาวะคงตัว (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่า  
 แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสี  
 เหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  
 0.104 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี  
 ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 0 % และเวลาเข้าสู่  
 สภาวะคงตัวอยู่ที่ 0.150 s จากรูปที่ 4.10 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่  
 ควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ 25 °  
 C ความเข้มแสง 100 W/ m<sup>2</sup> ในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0 V ส่วน  
 กราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่  
 แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.104 A หลังจากนั้นทำการ  
 วิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มีความเข้มแสงไปสู่สภาวะคง  
 ตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 4.09 % และไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะชั่วคราวระหว่างตัวควบคุมแบบจัด  
 สัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้กับตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ความเข้มแสง 1000 700  
 400 100 W/ m<sup>2</sup> และ อุณหภูมิ 25 °C

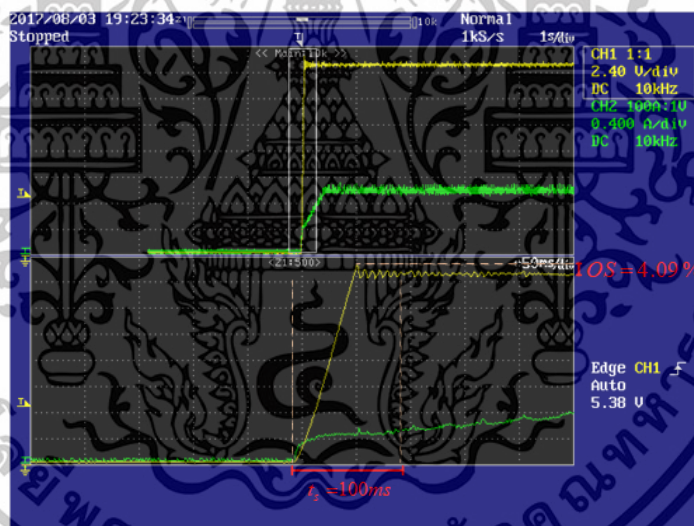
ความเข้ม แสง (W/m <sup>2</sup> )	การควบคุมแบบ พีไอดี (PID)		การควบคุมแบบ จัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ ( $H_{\infty}$ )	
	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot, %)	เวลาเข้าสู่ สภาวะคงตัว (s)	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot, %)	เวลาเข้าสู่ สภาวะคงตัว (s)
1000	5.56	0.100	0	0.115
700	5.56	0.100	0	0.115
400	5.56	0.085	0	0.115
100	4.09	-	0	0.150

จากตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะชั่วคราวของการทดลองแบบที่ 1  
 ระหว่างตัวควบคุมแบบจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ กับตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่าตัวควบคุมแบบ  
 จัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ไม่มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) ทุกความเข้มแสง (1000,  
 700, 400, 100 W/ m<sup>2</sup>) และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 0.115, 0.115, 0.115, 0.150 s  
 ตามลำดับ ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) เท่ากับ 5.56,  
 5.56, 5.56, 4.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ 0.100, 0.100, 0.085, ไม่เข้า  
 สู่สภาวะคงตัว ตามลำดับ

4.5.5 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอซอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $50^\circ \text{C}$



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



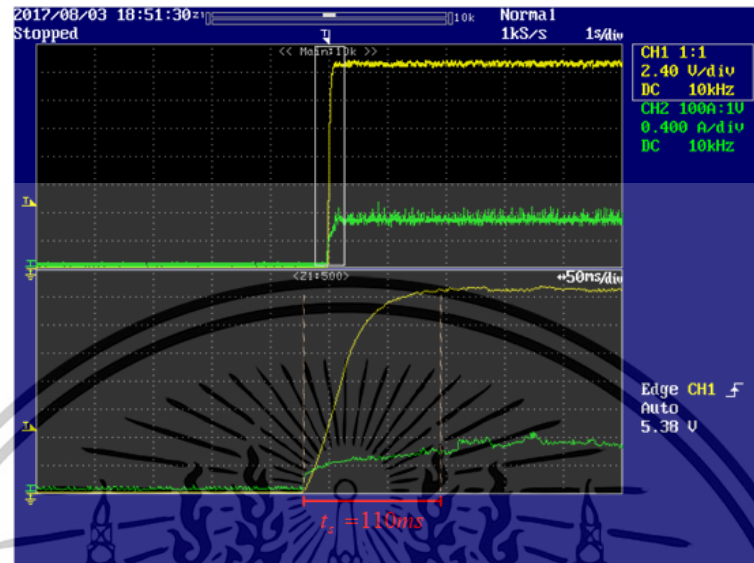
(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี  
รูปที่ 4.11 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $50^\circ \text{C}$

จากรูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอซอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงเปิดวงจรไฟฟ้าไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50^\circ \text{C}$  ความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1,  $2.4 \text{ V/div}$ ) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2,  $0.4 \text{ A/div}$ ) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ  $17.6 \text{ V}$  (สภาวะคงตัว) ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงเปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงแรก) และปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงหลัง)

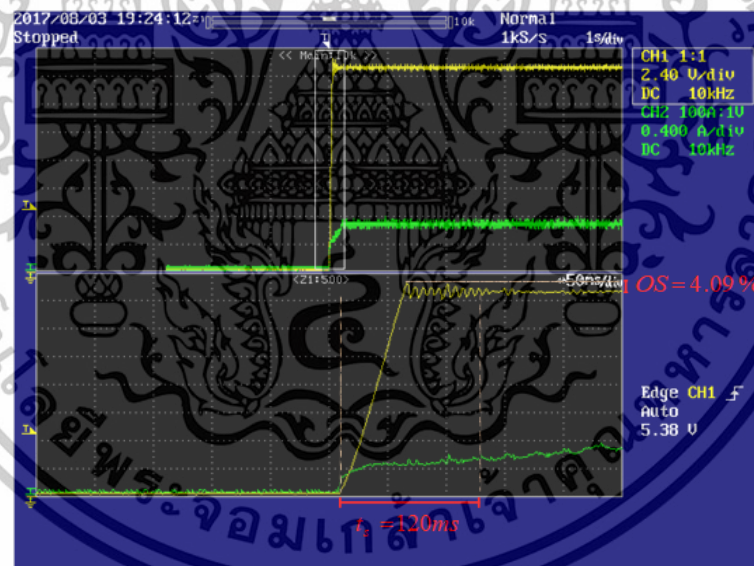
จากรูปที่ 4.11 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัด สัณฐานวงรอบเอชอินฟิวดี้ ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่ อุณหภูมิ 50 °C ความเข้มแสง 1000 W/ตารางเมตร การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ ความเข้มแสงเป็นศูนย์ (ช่วงแรก) และสภาวะคงตัว (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลือง มีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสี เหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.93 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 0 % และเวลาเข้าสู่ สภาวะคงตัวอยู่ที่ 0.115 s จากรูปที่ 4.11 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ ควบคุมแบบพีเอ็ด ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ 50 ° C ความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> ในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0 V ส่วน กราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.93 A หลังจากนั้นทำการ วิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคง ตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 4.09 % และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่ 0.100 s



4.5.6 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีโอดีที่ความเข้มแสง  $700 \text{ W/ m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



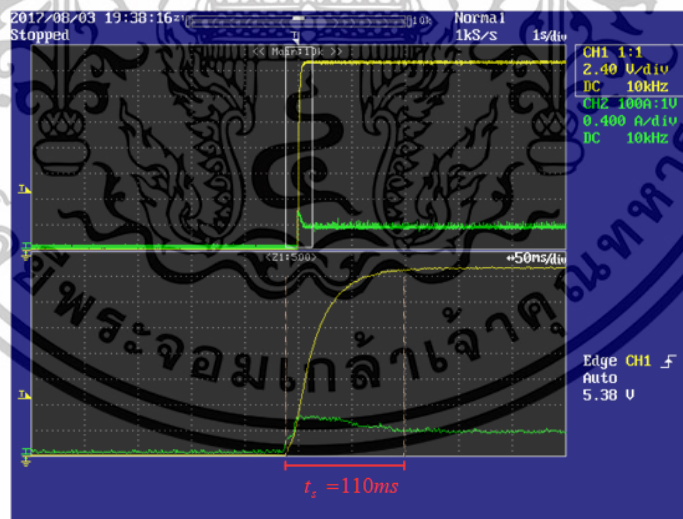
(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีโอดี  
รูปที่ 4.12 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วครู่ของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่  
ความเข้มแสง  $700 \text{ W/ m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีโอดี ณ สภาวะชั่วครู่จากช่วงเปิดวงจรไฟฟ้าไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ความเข้มแสง  $700 \text{ W/ m}^2$  เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1, 2.4 V/div) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2, 0.4A/div) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ 17.6 V (สภาวะคงตัว) ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงเปิดวงจรไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

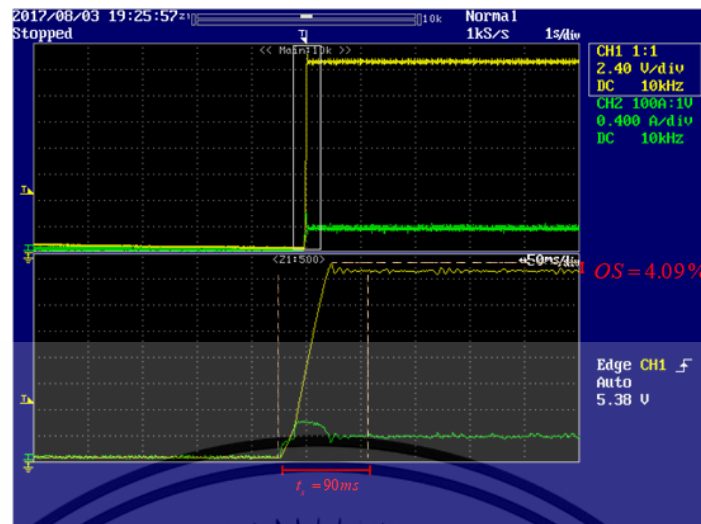
(ช่วงแรก) และปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงหลัง)

จากรูปที่ 4.12 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ความเข้มแสง  $700\text{ W/m}^2$  การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ (ช่วงแรก) และสภาวะคงตัว (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ V}$  ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า  $17.6\text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  $0.64\text{ A}$  หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $0\%$  และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่  $0.115\text{ s}$  จากรูปที่ 4.12 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ความเข้มแสง  $700\text{ W/m}^2$  ในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ V}$  ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า  $17.6\text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  $0.64\text{ A}$  หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มีความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $4.09\%$  และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่  $0.120\text{ s}$

**4.5.7 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง  $400\text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$**



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



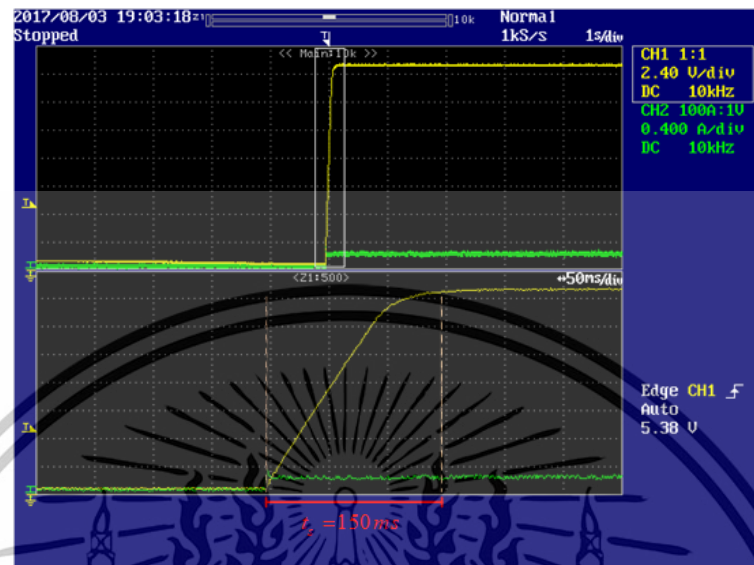
(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

**รูปที่ 4.13** การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $50 \text{ }^\circ\text{C}$

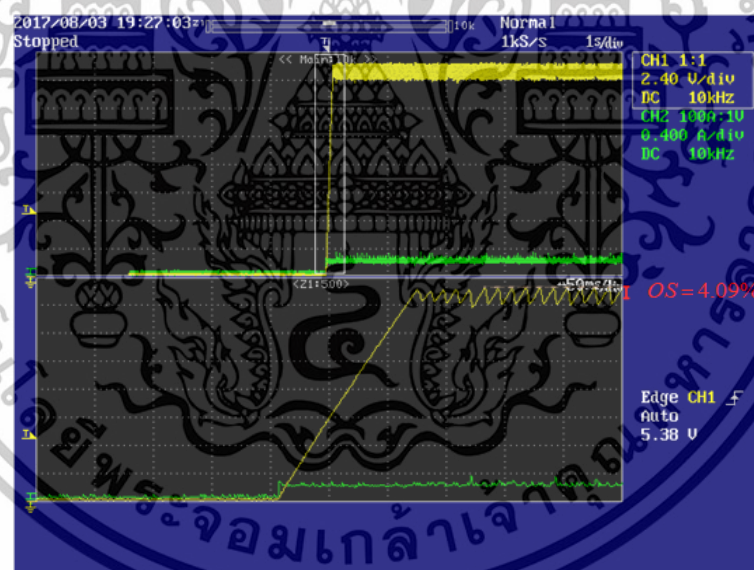
จากรูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงเปิดวงจรไฟฟ้าไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1,  $2.4 \text{ V/div}$ ) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2,  $0.4\text{A/div}$ ) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ  $17.6 \text{ V}$  (สภาวะคงตัว) ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงเปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงแรก) และปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงหลัง)

จากรูปที่ 4.13 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ (ช่วงแรก) และสภาวะคงตัว (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0 \text{ V}$  ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0 \text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า  $17.6 \text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  $0.28 \text{ A}$  หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $0 \%$  และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่  $0.115 \text{ s}$  จากรูปที่ 4.13 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  ความเข้มแสง  $400 \text{ W/m}^2$  ในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0 \text{ V}$  ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0 \text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า  $17.6 \text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  $0.28 \text{ A}$  หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $4.09 \%$  และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่  $0.090 \text{ s}$

4.5.8 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสง  $100 \text{ W/ m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

รูปที่ 4.14 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า ณ สภาวะชั่วคราวของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง  $100 \text{ W/ m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงเปิดวงจรไฟฟ้าไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ความเข้มแสง  $100 \text{ W/ m}^2$  เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1,  $2.4 \text{ V/div}$ ) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2,  $0.4 \text{ A/div}$ ) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ  $17.6 \text{ V}$  (สภาวะคงตัว) ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงเปิดวงจรไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ช่วงแรก) และปิดวงจรไฟฟ้า (ช่วงหลัง)

จากรูปที่ 4.14 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ความเข้มแสง  $100\text{ W/m}^2$  การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ความเข้มแสงเป็นศูนย์ (ช่วงแรก) และสภาวะคงตัว (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ V}$  ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า  $17.6\text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  $0.024\text{ A}$  หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $0\%$  และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่  $0.150\text{ s}$  จากรูปที่ 4.14 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะชั่วคราวจากช่วงที่มีความเข้มแสงเป็นศูนย์ไปสู่สภาวะคงตัวที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  ความเข้มแสง  $100\text{ W/m}^2$  ในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ V}$  ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  $0\text{ A}$  ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า  $17.6\text{ V}$  และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า  $0.024\text{ A}$  หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในสภาวะชั่วคราวจากช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสงไปสู่สภาวะคงตัว มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่  $4.09\%$  และไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว

**ตารางที่ 4.4** ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะชั่วคราว ระหว่าง ตัวควบคุมแบบจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ กับ ตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ความเข้มแสง  $1000\text{ }700\text{ }400\text{ }100\text{ W/m}^2$  และ อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$

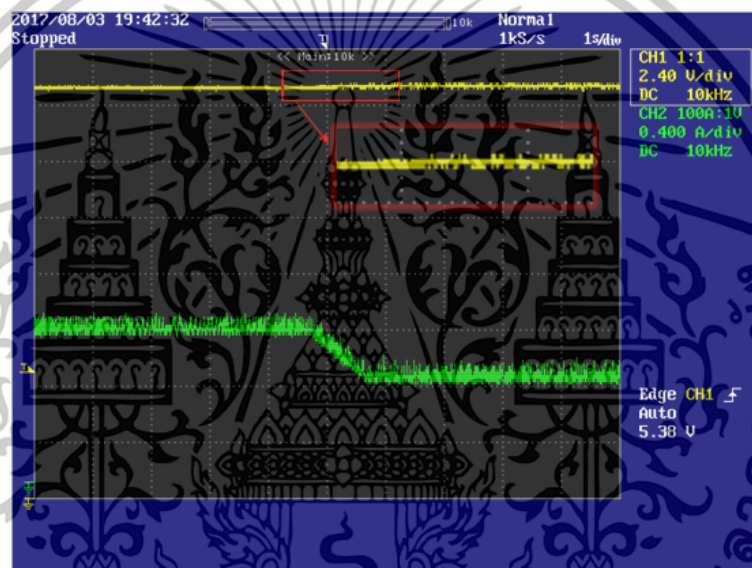
ความเข้มแสง ( $\text{W/m}^2$ )	การควบคุมแบบพีไอดี (PID)		การควบคุมแบบจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ ( $H_{\infty}$ )	
	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot, %)	เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (s)	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot, %)	เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (s)
1000	4.09	0.100	0	0.110
700	4.09	0.120	0	0.110
400	4.09	0.090	0	0.110
100	4.09	-	0	0.150

จากตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะชั่วคราวของการทดลองแบบที่ 2 ระหว่างตัวควบคุมแบบจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ กับตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่าตัวควบคุมแบบจัดตั้งฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ไม่มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) ทุกความเข้มแสง ( $1000, 700, 400, 100\text{ W/ตารางเมตร}$ ) และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ  $0.115, 0.115, 0.115, 0.150\text{ s}$  ตามลำดับ ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) เท่ากับ  $4.09, 4.09, 4.09, 4.09\%$  ตามลำดับ และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวเท่ากับ  $0.100, 0.100, 0.085$ , ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว ตามลำดับ

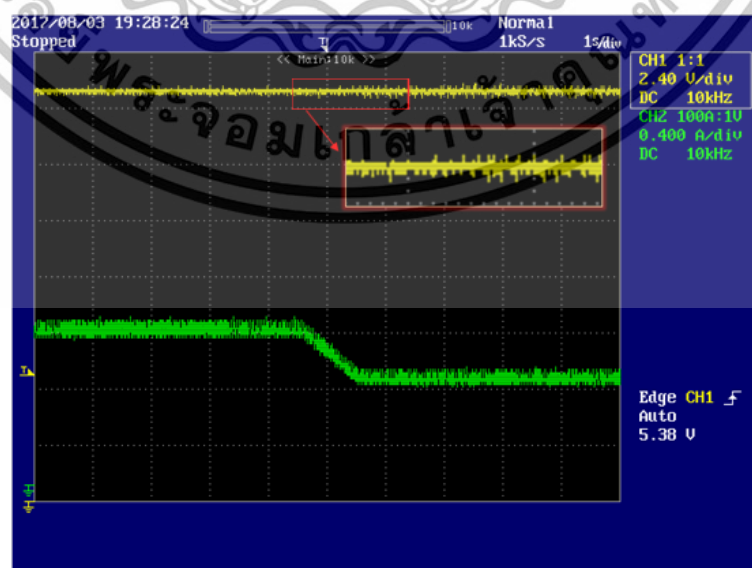
#### 4.6 ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง

ทำการทดลองควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และระบบควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูนด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ ที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ได้แก่ 1000->700 , 1000->400 และ 1000->100 W/ m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 และ 50 °C

4.6.1 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 700 W/ m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

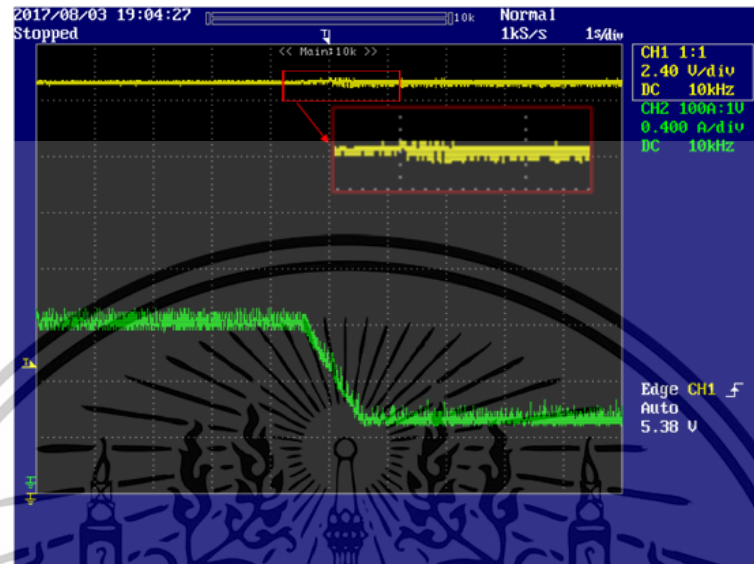
**รูปที่ 4.15** การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 700 W/ m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 700 W/ m<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 25 °C เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1, 2.4 V/div) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2 , 0.4A/div) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ 17.6 V (สภาวะคงตัว)

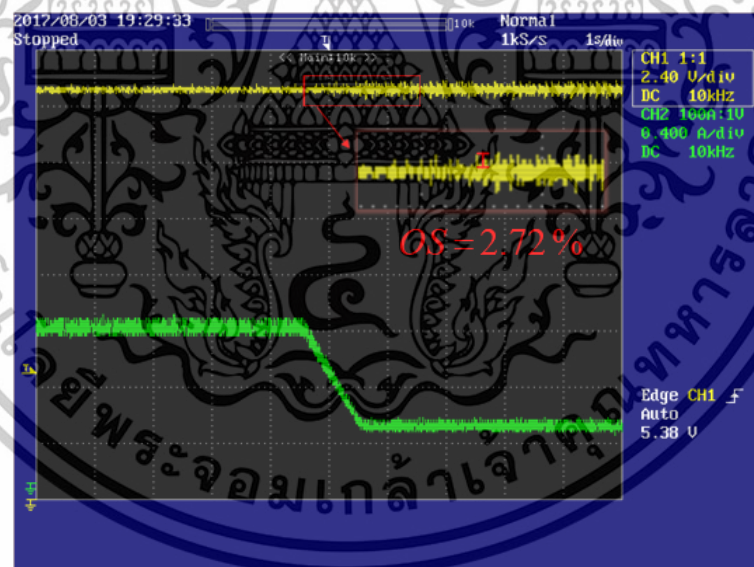
จากรูปที่ 4.15 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 700 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 700 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1.22 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.804 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงนั้นมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 1.86 % และการแกว่งของแรงดันยอติงยอติงเท่ากับ 0.65 V

จากรูปที่ 4.15 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยพีไอดี ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 700 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 700 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1.22 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.804 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 1.86 % และการแกว่งของแรงดันยอติงยอติงเท่ากับ 0.65 V

4.6.2 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอซอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 ไป 400 W/ตารางเมตร ณ อุณหภูมิ 25 °C



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

รูปที่ 4.16 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 400 W/ m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอซอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 400 W/ m<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 25 °C เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1,

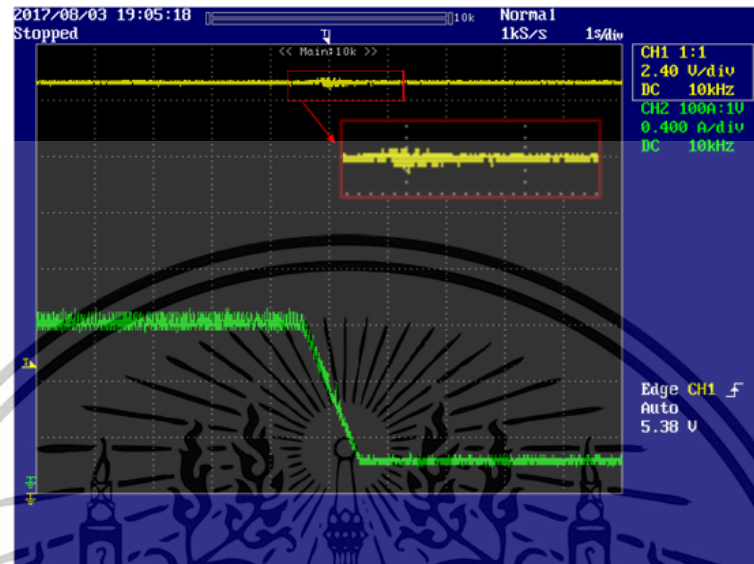
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 V/div) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2 , 0.4A/div) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ 17.6 V (สภาวะคงตัว)

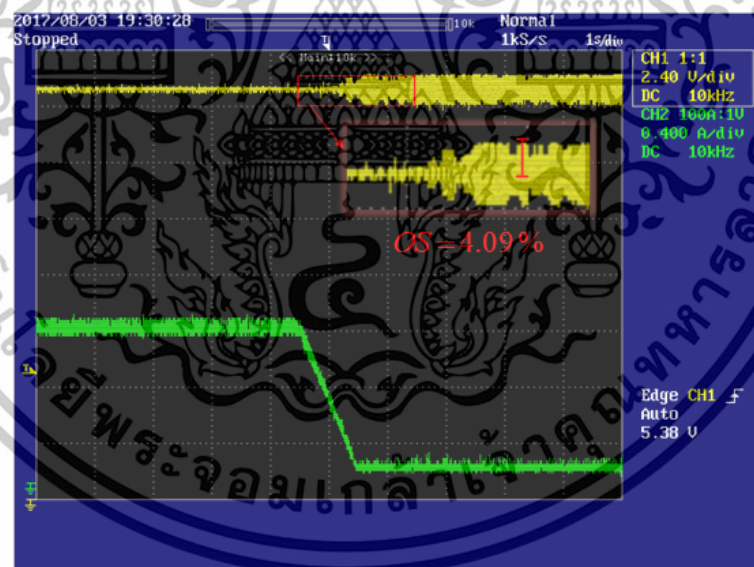
จากรูปที่ 4.16 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอซอินฟินิตี้ ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 400 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 400 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1.22 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.397 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 1.86 % และการแกว่งของแรงดันยอด้ถึงยอด้เท่ากับ 0.65 V

จากรูปที่ 4.16 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมพีโอดี ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 400 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 400 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1.22 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.397 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 2.72 % และการแกว่งของแรงดันยอด้ถึงยอด้เท่ากับ 0.96 V

4.6.3 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอซอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 ไป 100 W/ m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

รูปที่ 4.17 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 100 W/ m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอซอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 500 W/ m<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เส้นสีเหลืองแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้า (CH1, 2.4 V/div) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2 , 0.4A/div) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ 17.6 V (สภาวะคงตัว) เนื่องจากเป็นแรงดันที่ทำให้กำลังไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด

จากรูปที่ 4.17 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดสัดส่วนวงจรรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 100 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 100 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1.22 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.104 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 1.86 % และการแกว่งของแรงดันยออดถึงยออดเท่ากับ 0.65 V

จากรูปที่ 4.17 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยพีไอดี ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 100 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 100 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1.22 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.104 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 4.09 % และมีการแกว่งของแรงดันยออดถึงยออดเท่ากับ 1.44 V

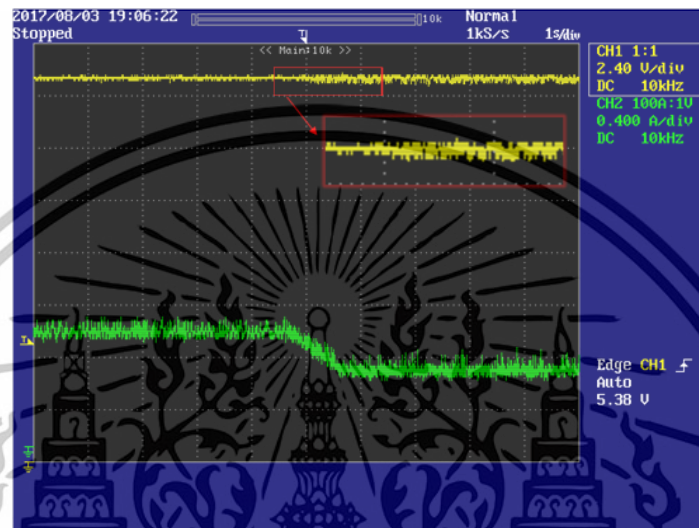
ตารางที่ 4.5 ผลสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมแบบจัดสัดส่วนวงจรรอบเอชอินฟินิตี้กับตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ความเข้มแสง 1000-700 , 1000-400 , 1000-100 W/ m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 25 °C

ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	การควบคุมแบบพีไอดี (PID)		การควบคุมแบบจัดสัดส่วนวงจรรอบเอชอินฟินิตี้ ( $H_{\infty}$ )	
	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot, %)	การแกว่ง (Osilation, V)	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot, %)	การแกว่ง (Osilation, V)
1000->700	1.86	0.65	1.86	0.65
1000->400	2.72	0.96	1.86	0.65
1000->100	4.09	1.44	1.86	0.65

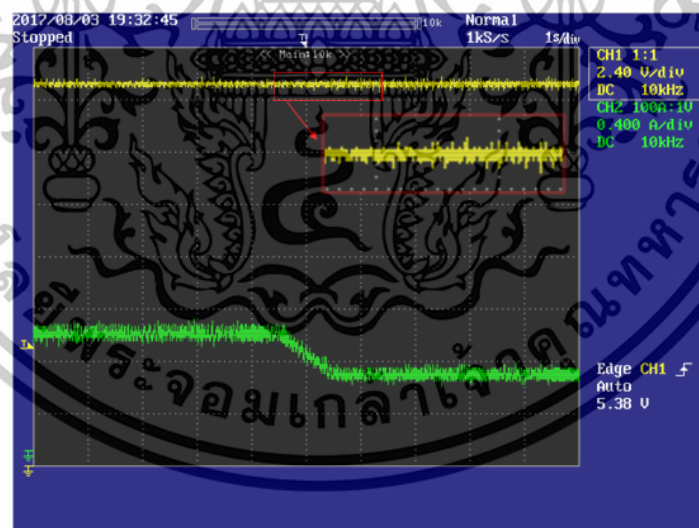
จากตารางที่ 4.6 ผลสมรรถนะเชิงเวลาของสภาวะที่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงระหว่างตัวควบคุมแบบจัดสัดส่วนวงจรรอบเอชอินฟินิตี้ กับตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่าตัวควบคุมแบบจัดสัดส่วนวงจรรอบเอชอินฟินิตี้ที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก 1000->700 , 1000->400 , 1000->100 W/ m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 °C มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) เท่ากับ 1.86 % และการแกว่งของแรงดันยออดถึงยออดเท่ากับ 0.65 V ทุกช่วงการเปลี่ยนความเข้มแสง ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่า

เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) เท่ากับ 1.86, 2.72, 4.09 ตามลำดับ และการแกว่งของแรงดัน ยอดถึงยอดเท่ากับ 0.65, 0.96, 1.44 V ตามลำดับ

4.6.4 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอซอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 ไป 700 W/ m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 50 °C



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

รูปที่ 4.18 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 700 W/ m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 50 °C

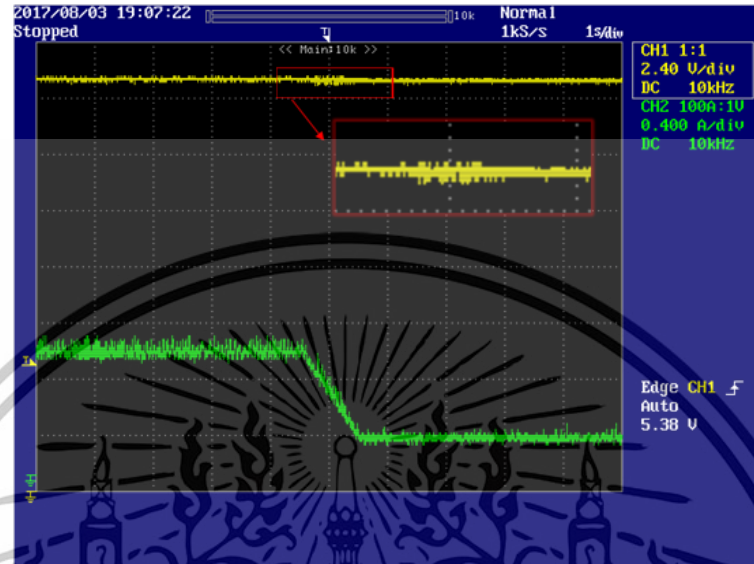
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 700 W/ m<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 50 °C เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1, 2.4 V/div) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2 , 0.4A/div) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ 17.6 V (สภาวะคงตัว)

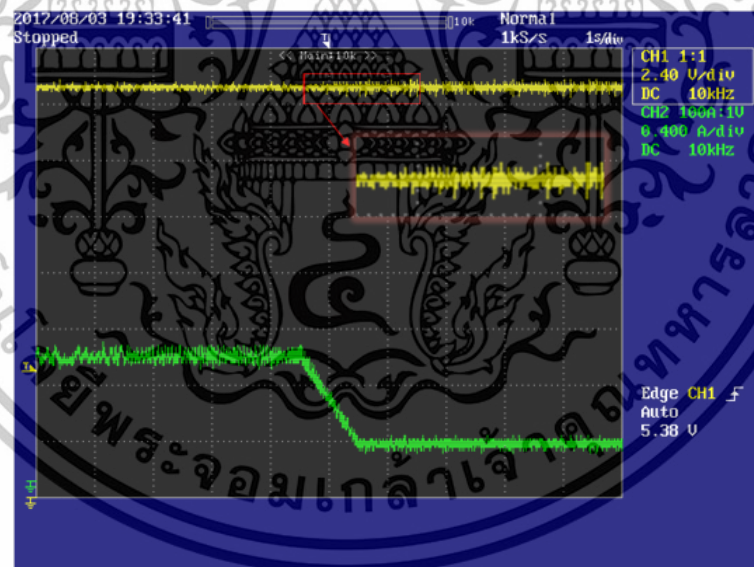
จากรูปที่ 4.18 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 700 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 700 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.93 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.64 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงนั้นมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 1.86 % และมีการแกว่งของแรงดันยอด้ถึงยอด้เท่ากับ 0.65 V

จากรูปที่ 4.18 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยพีไอดี ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 700 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 700 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.93 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.64 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 1.86 % และมีการแกว่งของแรงดันยอด้ถึงยอด้เท่ากับ 0.65 V

4.6.5 ผลการทดลองควบคุมที่ออกแบบด้วยการจัดสัญญาณวงรอบแบบเอซอินฟินิตี้ และระบบการควบคุมแบบพีไอดีที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 ไป 400 W/ m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 50 °C



(ก) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบ



(ข) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

รูปที่ 4.19 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 400 W/ m<sup>2</sup> อุณหภูมิ 50 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ และการควบคุมแบบพีไอดี ณ สภาวะที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 เป็น 400 W/ m<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ 50 °C เส้นสีเหลืองแทนแรงดันไฟฟ้า (CH1, 2.4 V/div) เส้นสีฟ้าแทนกระแสไฟฟ้า (CH2 , 0.4A/div) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมคือ 17.6 V (สภาวะคงตัว)

จากรูปที่ 4.19 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 400 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 400 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.93 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.28 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงนั้นมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 1.86 % และการแกว่งของแรงดันยอด้ถึงยอด้เท่ากับ 0.65 V

จากรูปที่ 4.19 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมพีไอดี ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 400 W/ m<sup>2</sup> การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงแรก) และ 400 W/ m<sup>2</sup> (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.93 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.28 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 2.72 % ไม่เข้าสู่สภาวะคงตัวอยู่ที่ และมีการแกว่งของแรงดันยอด้ถึงยอด้เท่ากับ 0.96 V



จากรูปที่ 4.20 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยการจัด  
 สัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 100  
 $W/m^2$  การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000  $W/m^2$  (ช่วงแรก) และ 100  
 $W/m^2$  (ช่วงหลัง) โดยในช่วงแรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟ  
 เส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.93 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่  
 แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้นสีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.024 A หลังจากนั้นทำการ  
 วิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงนั้นมีค่า  
 เเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 1.86 % และมีการแกว่งของแรงดันยอถึงยอต่อเท่ากับ  
 0.65 V

จากรูปที่ 4.20 (ข) แสดงแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควบคุมด้วยพีไอดี  
 ณ สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจาก 1000 เป็น 100  $W/m^2$  การทดลองจะแบ่งออกเป็น  
 2 ช่วง คือช่วงความเข้มแสง 1000  $W/m^2$  (ช่วงแรก) และ 100  $W/m^2$  (ช่วงหลัง) โดยในช่วง  
 แรกพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 17.6 V ส่วนกราฟเส้นสีฟ้ามีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่  
 0.93 A ในช่วงหลังพบว่ากราฟเส้นสีเหลืองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงดันไฟฟ้า 17.6 V และกราฟเส้น  
 สีฟ้าเข้าสู่สภาวะคงตัวที่กระแสไฟฟ้า 0.024 A หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเวลาที่เกิดขึ้น  
 พบว่าในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) อยู่ที่ 4.09  
 % และมีการแกว่งของแรงดันโดยวัดจากจุดยอถึงจุดยอต่อเท่ากับ 1.44 V

**ตารางที่ 4.6** ผลสมรรถนะเชิงเวลาที่สภาวะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงของตัวควบคุมแบบจัด  
 สัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้กับตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ความเข้มแสง 1000-700 ,  
 1000-400 ,1000-100  $W/m^2$  อุณหภูมิ 50 °C

ความเข้ม แสง ( $W/m^2$ )	การควบคุมแบบ พีไอดี (PID)		การควบคุมแบบ จัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ ( $H_\infty$ )	
	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot , %)	การแกว่ง (Osilation, V)	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot , %)	การแกว่ง (Osilation, V)
1000->700	1.86	0.65	1.86	0.65
1000->400	2.72	0.96	1.86	0.65
1000->100	4.09	1.44	1.86	0.65

จากตารางที่ 4.6 ผลสมรรถนะเชิงเวลาของสภาวะที่เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงระหว่างตัว  
 ควบคุมแบบจัดสัณฐานวงรอบเอชอินฟินิตี้ กับตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่าตัวควบคุมแบบจัดสัณฐาน  
 วงรอบเอชอินฟินิตี้ที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก 1000->700 , 1000->400 , 1000->100  $W/m^2$  ณ  
 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) เท่ากับ 1.86 % และการ  
 แกว่งของแรงดันยอถึงยอต่อเท่ากับ 0.65 V ทุกช่วงการเปลี่ยนความเข้มแสง ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอ  
 ดีมีค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot) เท่ากับ 1.86, 2.72, 4.09 % ตามลำดับ และการแกว่ง  
 ของแรงดันยอถึงยอต่อเท่ากับ 0.65, 0.96, 1.44 V ตามลำดับ

#### 4.7 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงคงที่ระหว่างการควบคุมจัดสรรฐานวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้กับการควบคุมแบบพีไอดีโดยการปรับจูนด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ที่ความเข้มแสงคงที่ ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $700 \text{ W/m}^2$ ,  $400 \text{ W/m}^2$  และ  $100 \text{ W/m}^2$ ) ณ อุณหภูมิ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่าในกรณีจากช่วงเปิดวงจรไฟฟ้าไปสู่สภาวะคงตัว (แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ  $17.6 \text{ V}$ ) การควบคุมจัดสรรฐานวงรอบมีผลตอบสนองทางเวลาที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ในกรณีจากความเข้มแสงมีค่าเท่ากับศูนย์ไปสู่ช่วงสภาวะคงตัว การควบคุมจัดสรรฐานวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้มีเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบพีไอดี ส่วนค่าพุ่งเกินการควบคุมจัดสรรฐานวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ไม่มีค่าพุ่งเกิน แต่การควบคุมแบบพีไอดีมีเพียง

จากการทดลองที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการควบคุมจัดสรรฐานวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้กับการควบคุมแบบพีไอดีโดยการปรับจูนด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 4 ระดับ  $1000 \rightarrow 700$ ,  $1000 \rightarrow 400$  และ  $1000 \rightarrow 100 \text{ W/m}^2$  ณ อุณหภูมิ  $25$  และ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่าการควบคุมจัดสรรฐานวงรอบมีความคงทนมากกว่าการควบคุมแบบพีไอดีในช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง  $1000 \rightarrow 400$  และ  $1000 \rightarrow 100 \text{ W/m}^2$

## สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทน (Robust Control) ด้วยเทคนิคการจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้ (H Infinity Loop Shaping) ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมจำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification)

หลังจากทราบฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ ขั้นตอนถัดมาเป็นการออกแบบฟังก์ชันค่าน้ำหนักโดยลักษณะแผนภาพโบเดวงรอบเปิดของฟังก์ชันค่าน้ำหนักของระบบหลังจัดสัญญาณวงรอบแล้วต้องมีอัตราการขยายสูงที่ความถี่ต่ำ อัตราขยายต่ำที่ความถี่สูง และมีแบนวิดท์สูง เมื่อทำการพล็อตแผนภาพโบเดวงรอบเปิดของระบบเปรียบเทียบกับระบบหลังจัดสัญญาณวงรอบแล้วพบว่า ที่ความถี่ต่ำอัตราการขยายของระบบหลังจัดสัญญาณวงรอบแล้วมีค่าสูงกว่าระบบที่ยังไม่ได้จัดสัญญาณวงรอบ ที่ความถี่สูงอัตราการขยายของระบบหลังจัดสัญญาณวงรอบแล้วมีค่าต่ำกว่าระบบที่ยังไม่ได้จัดสัญญาณวงรอบ และระบบหลังจัดสัญญาณวงรอบแล้วมีแบนวิดท์สูงกว่าระบบที่ยังไม่ได้จัดสัญญาณวงรอบ หลังจากที่ได้ฟังก์ชันค่าน้ำหนักมาแล้ว ต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมของฟังก์ชันค่าน้ำหนัก ซึ่งสามารถตรวจสอบจากค่าแกมมามิน โดยถ้าค่าแกมมามินมีค่ามากกว่า 4 จะถือว่าฟังก์ชันค่าน้ำหนักไม่มีความเหมาะสม ผลปรากฏว่าค่าแกมมามินของฟังก์ชันค่าน้ำหนักที่ทำการออกแบบมีค่าเท่า 1.4811 เพราะฉะนั้นฟังก์ชันค่าน้ำหนักที่ออกแบบมีความเหมาะสม จากนั้นทำการสังเคราะห์ตัวควบคุม

ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงคงที่ระหว่างการควบคุมจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ (H Infinity Loop Shaping) กับการควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูนด้วยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols tuning method) ที่ความเข้มแสงคงที่ ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $700 \text{ W/m}^2$ ,  $400 \text{ W/m}^2$  และ  $100 \text{ W/m}^2$ ) ณ อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$  และ  $50^\circ \text{C}$  พบว่าในกรณีจากช่วงเปิดวงจรไฟฟ้าไปสู่สภาวะคงตัว (แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 17.6 โวลต์) การควบคุมจัดสัญญาณวงรอบมีผลตอบสนองทางเวลาที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี ในกรณีจากความเข้มแสงมีค่าเท่ากับศูนย์ไปสู่ช่วงสภาวะคงตัว การควบคุมจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้มีเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบพีไอดี ส่วนค่าฟุงเกินการควบคุมจัดสัญญาณวงรอบแบบเอชอินฟินิตี้ไม่มีค่าฟุงเกิน แต่การควบคุมแบบพีไอดีมีค่าการฟุงเกินประมาณ 5.56 % และ 4.09 % ที่อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$  และ  $50^\circ \text{C}$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการควบคุมจัดสัญญาณวงรอบแบบเอซอินฟินิตี้กับการควบคุมแบบพีไอดีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 3 ระดับ 1000->700, 1000->400 และ 1000->100 W/m<sup>2</sup> ณ อุณหภูมิ 25 และ 50 °C พบว่าการควบคุมจัดสัญญาณวงรอบมีความคงทนมากกว่าการควบคุมแบบพีไอดีในช่วงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 1000->400 และ 1000->100 W/m<sup>2</sup>

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ขั้นตอนการหาฟังก์ชันการถ่ายโอนสำหรับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) ซึ่งเป็นการประมาณพฤติกรรมของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้นด้วยสมการเชิงเส้น ความเป็นเชิงเส้นอยู่ที่จุดการทำงานของอุปกรณ์ที่ออกแบบ เพราะฉะนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนที่หามาได้มีข้อจำกัดคือฟังก์ชันถ่ายโอนจะมีความแม่นยำที่จุดการทำงาน

เนื่องจากตัวควบคุมแบบคงทนมีโครงสร้างซับซ้อนและมีลำดับสูง เพื่อความสะดวกต่อการใช้งานสามารถใช้เทคนิคการกำหนดโครงสร้าง เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่มีคุณสมบัติคล้ายเดิมแต่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยลง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2559. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม 2559 (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : [https://www.m-society.go.th/article\\_attachment/16426/19323.pdf](https://www.m-society.go.th/article_attachment/16426/19323.pdf), เข้าดูเมื่อวันที่ 08/03/2559.
- [2] J. M. Ogden, "Annual energy outlook," U.S. Dept. of Energy, 2011, pp. 1-4.
- [3] Shi-Cheng Zheng, Liang Yu Wang, "Research on Charging Control for Battery in Photovoltaic System" Key Lab of Power Electronics & Motion Control, Anhui University of Technology.,2008, China
- [4] M. G. Villalva, E. Ruppert F., "Input-controlled Buck Converter for Photovoltaic Applications: Modeling and Design," Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008. 4th IET Conference, pp. 505-509.
- [5] Chi-Jen Huang, Ying-Chun Chuang and Yu-Lung Ke, "Design of Closed-loop Buck-Boost Converter for Led Driver Circuit", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 1-6, 2011.
- [6] Tiago Kommers Jappe and Samir Ahmad Mussa "Discrete-time one cycle control technique applied in single-phase PFC boost converter", Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium, pp. 1555-1560
- [7] P. M. Meshram and Rohit G. Kanojiya, "Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor.", Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference, pp. 117-122
- [8] N. S. Rathore, Dr. V. P. Singh and D. P. S. Chauhan, "ISE bases PID Controller Tuning for Position Control of DC Servo-Motor using LJ," International Conference on Signal Processing, 2015, Computing and Control (2015 ISPPCC), pp. 125-128.
- [9] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2553. เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell). (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm>. 15 ธันวาคม 2557.
- [10] ธีรภัทร เดชะคุณ, ธีรพงศ์ วิสุทธีสุริยเสกกุล, ธีรภัทร สัจจมาศ และธนกร ตั้งจิตตรง. "การศึกษาชุดสะสมพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับไฟถนน." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557
- [11] Marcelo Gradella Villalva and Ernesto Ruppert Filho, "DYNAMIC ANALYSIS OF THE INPUT-CONTROLLED BUCK CONVERTER FED BY A PHOTOVOLTAIC ARRAY," Brazillian Journal of Control and Automation, vol. 19, No. 4, 2008, pp. 463-474.
- [12] วีระเชษฐ์ ชันเงิน, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 9, กรุงเทพฯ: หจก.วี.เจ. พรินติ้ง , 2552.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] สุภารัตน์ พุ่มย้อย. “การออกแบบระบบควบคุมสัณฐานวงรอบแบบคงทนไฮบริด สำหรับวงจรทอน-ทบแรงดันด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม” วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557
- [14] สมยศ เกียรติวนิชวิไล, ระบบควบคุม, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: มินิ เซอร์วิส ซัพพลาย, 2554.
- [15] วโรดม ตูจันดา, การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- [16] ชำนาญ โกยทรัพย์. “การควบคุมแบบจัดสัณฐานวงรอบแบบคงทนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เทคนิคแอลเอ็มไอ และวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างกระชับ.” วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### บทความวิชาการ

#### การประชุมวิชาการ

[1] พีรวิชญ์ ดิถีสวัสดิ์เวทย์. วรชาติ สุวรรณงาม. และสมยศ เกียรติวนิชวิไล. 2560. “วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าควบคุมแบบจัดสัญญาณวงรอบเอชอินฟินิตี้สำหรับการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์” หน้า 773-776 ใน การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10. พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10

10<sup>th</sup> ECTI-CARD 2018, Phitsanulok Thailand

### วงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าควบคุมแบบจัดสัดส่วนวงรอบเอชอินฟินิตี้สำหรับการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ H Infinity Loop Shaping Controlled Buck Converter with photovoltaic applications

พีรวิชญ์ คิติสวัสดิ์เวทย์<sup>1</sup> วรชาติ สุวรรณงาม<sup>1</sup> สมยศ เกียรติวนิชวิไล<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10520 โทรศัพท์ 085-010-0129 E-mail: d.phirawit@gmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทน (Robust Control) ด้วยเทคนิคการจัดสัดส่วนวงรอบเอชอินฟินิตี้ (H Infinity Loop Shaping) สำหรับวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแรงดันด้านอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่ภาระทางไฟฟ้าเป็นตัว ด้านทาน นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของตัวควบคุมแบบการจัดสัดส่วนวงรอบเอชอินฟินิตี้กับตัวควบคุมแบบที่ไอดีที่ปรับจูนโดยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols tuning method) ด้วยเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่ดีของตัวควบคุมที่นำเสนอในวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวิธีการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

คำสำคัญ: วงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า, การควบคุมแบบจัดสัดส่วนวงรอบเอชอินฟินิตี้, การควบคุมแบบคงทน, เซลล์แสงอาทิตย์

#### Abstract

This research work aims to design the H Infinity Loop Shaping technique for the robust control system in a buck converter with photovoltaic applications; where the input voltage is focused as the uncertain variable while the load is a resistor. Furthermore, the performance and stability of system between H infinity loop shaping controller and PID Ziegler-Nichols tuning method controller are compared using photovoltaic simulator. The results show the effectiveness of the robust controller proposed in the buck converter. The design of the controller can be applied to the load which is the battery as well..

Keywords: Buck Converter, H Infinity Loop Shaping, Robust Control, Photovoltaic

#### 1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันเริ่มมีการนำหุ่นยนต์เข้ามามีส่วนร่วมทั้งในชีวิตประจำวันและภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างเช่น หุ่นยนต์เชื่อม กระเจก หรือบางประเทศเริ่มมีการนำหุ่นยนต์เข้ามาช่วยในการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งหุ่นยนต์จำเป็นต้องมีแบตเตอรี่ในการทำงาน และบางพื้นที่ที่ไฟฟ้าไม่สามารถเข้าถึงได้จำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนไปตามความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ ดังนั้นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ถือเป็นเรื่องสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้

การออกแบบตัวควบคุมใช้ในวงจรแปลงผัน กระแสตรง-กระแสตรงมีมากมายหลายวิธี เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) ซึ่งมีเทคนิคในการปรับจูนหลายแบบ อาทิเช่น การปรับจูนด้วยวิธีอินทิกรัลของค่าความผิดพลาดยกกำลังสอง (The Integral of Squared Error, ISE) [1] การปรับจูนด้วยวิธีซิกเลอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols tuning) [2] การควบคุมแบบวิเคราะห์วงรอบปิด [3] วิธีการที่กล่าวข้างต้น [1-3] ไม่รับประกันความเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นปัญหาความเสถียรภาพจะเกิดขึ้นเมื่อใช้ก้อนินพุตที่เปลี่ยนแปลงจากเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้นำเสนอการหาฟังก์ชันถ่ายโอนโดยเทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ หลังจากนั้นนำฟังก์ชันถ่ายโอนไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทน (Robust Control) โดยอาศัยเทคนิคการจัดสัดส่วนวงรอบเอชอินฟินิตี้ (H Infinity Loop Shaping) ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุดและเหมาะสม เมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้นจากทางด้านอินพุต

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10  
10<sup>th</sup> ECTI-CARD 2018, Phitsanulok Thailand

**2. ทฤษฎีและการจำลองระบบ**

**2.1 ระบบระบุเอกลักษณ์ [4]**

รูปแบบของระบบระบุเอกลักษณ์ในงานวิจัยนี้ได้มีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปในระบบแล้วทำการเก็บเอาต์พุตเพื่อนำมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้รูปแบบการประมาณค่าแบบ OE (output error) ดังนี้

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)}u(t-nk) + e(t) \quad (1)$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1} \quad (2)$$

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (3)$$

$y(t)$  คือ ค่าเอาต์พุต ณ เวลา  $t$

$u(t)$  คือ ค่าอินพุต ณ เวลา  $t$

$n_k$  คือ จำนวนซีโรบวกหนึ่งของระบบบวกหนึ่ง

$n_d$  คือ จำนวนโพลของระบบ

$n_k$  คือ จำนวนการสุ่มข้อมูลก่อนที่อินพุตจะมีผลต่อเอาต์พุตระบบ

$e(t)$  คือ ค่าความผิดพลาด

$b_1, \dots, b_{nb}$  และ  $a_1, \dots, a_{na}$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เราต้องการ

**2.2 การควบคุมแบบจัดสถานะวงรอบเอชอินฟินิตี้**

การออกแบบตัวควบคุมในระบบ G จะออกแบบฟังก์ชันชดเชยนำหน้าบางส่วนหน้า (pre-compensation) หรือ W1 และออกแบบฟังก์ชันชดเชยนำหน้าส่วนหลัง (post-compensation) หรือ W2 ก่อนเป็นอันดับแรก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้แค่เพียงฟังก์ชันชดเชยนำหน้าส่วนหน้าเท่านั้น ระบบที่ถูกจัดสถานะ (Gs) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4

$$G_s = W_1GW_2 \quad (4)$$

ลำดับถัดมาหลังจากที่เราออกแบบฟังก์ชันชดเชยนำหน้าเสร็จแล้ว เราจะต้องตรวจสอบ ความเหมาะสมของฟังก์ชันชดเชยนำหน้า จากค่าที่เรียกว่าค่าออร์มอนันต์ที่มีค่าต่ำที่สุด ( $\gamma_{\min}$ ) โดยเราสามารถหาค่าออร์มอนันต์ที่มีค่าต่ำที่สุดได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\gamma_{\min} = \epsilon_{\max}^{-1} = \left(1 - \|[N \ M]\|_H^2\right)^{\frac{1}{2}} = (1 + \rho(XZ))^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

โดยที่

$\rho$  คือ ค่ากำหนดครีมีของค่าเฉพาะสูงสุด (maximum eigenvalue)

X, Z คือ ตัวแปรในการหาค่าตอบของสมการพีชคณิตรีคลาดิ

การตรวจสอบความเหมาะสมของฟังก์ชันชดเชยนำหน้า ถ้า  $\gamma_{\min}$  มีค่ามากกว่า 4 จะถือว่า ฟังก์ชันชดเชยนำหน้าที่ยกแบบมานั้นไม่เหมาะสมต้องออกแบบฟังก์ชันชดเชยนำหน้าใหม่ หลังจากได้ฟังก์ชันชดเชยที่เหมาะสมแล้วให้เลือกค่าออร์มอนันต์ให้มีค่ามากกว่าค่าออร์มอนันต์ที่มีค่าต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ หลังจากนั้นทำการสังเคราะห์ตัวควบคุม ( $K_\infty$ ) จากสมการ 5

$$K_\infty = \begin{bmatrix} A + BF + \gamma^2(LT)^{-1}ZC^T(C + DF) & \gamma^2(LT)^{-1}ZC^T \\ B^TX & -D^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

หลังจากที่สังเคราะห์ตัวควบคุม ( $H_\infty$ ) ได้แล้วจะต้องนำไปคูณกับฟังก์ชันชดเชยนำหน้า  $K_\infty$  ก่อน ดังนั้นตัวควบคุม (K) ที่เรานำไปใช้ควบคุมระบบ (G) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 6

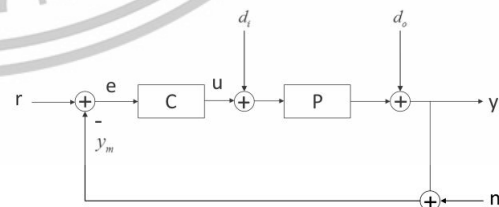
$$K = W_1K_\infty W_2 \quad (6)$$

**3 ผลตอบสนองแบบวงรอบปิด**

รูปที่ 3 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์ (G) และตัวควบคุม (K) สัญญาณต่าง ๆ ประกอบด้วย อินพุต (r) เอาต์พุตของระบบ (y) อินพุตควบคุม (u) ความผิดพลาดที่วัด ได้ (e) สัญญาณรบกวนที่อินพุต ( $d_i$ ) และเอาต์พุต ( $d_o$ ) และสัญญาณการรบกวนจากกราวด์ (n)

จากนิยามข้างต้น สามารถหาผลตอบสนองวงปิดได้เป็น

$$Y(s) = S(s)D_o(s) + T(s)(R(s) - N(s)) + S(s)P(s)D_i(s) \quad (7)$$



รูปที่ 1 ระบบป้อนกลับหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิจัย**

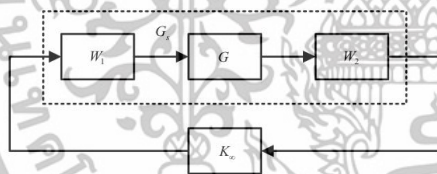
การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10  
10<sup>th</sup> ECTI-CARD 2018, Phitsanulok Thailand

จากสมการที่ (7) ถ้าต้องการทำให้ระบบตามรอยคำสั่งมีประสิทธิภาพต้องพยายามทำให้ S(s) เข้าใกล้ศูนย์ และในขณะเดียวกันไม่ต้องการสัญญาณรบกวนจากการวัด (n) ซึ่งมีผลต่อเอาต์พุต (y) ดังนั้นต้องพยายามทำให้ T(s) เข้าสู่ศูนย์เช่นกัน อย่างไรก็ตามไม่สามารถทำให้ S(s) และ T(s) เข้าสู่ศูนย์ในเวลาเดียวกันได้ เนื่องจากมีเงื่อนไขที่มีชื่อว่า เงื่อนไขบังคับเชิงพีชคณิต (algebraic constraint) วิธีแก้ไขก็คือต้องให้ฟังก์ชันทั้งสองมีค่าน้อยที่ความถี่ต่างกัน โดยทำให้ |S(j $\omega$ )| มีขนาดเล็กในช่วงความถี่ต่ำ เนื่องจากช่วงสัญญาณความถี่ของสัญญาณ (r) และสัญญาณรบกวน (d) อยู่ในช่วงความถี่ต่ำ และทำให้ |T(j $\omega$ )| มีขนาดเล็กในช่วงความถี่สูง เพราะเป็นช่วงที่ได้รับผลกระทบจาก สัญญาณรบกวนจากการวัด (n) มากที่สุด เงื่อนไขที่มีชื่อว่า เงื่อนไขบังคับเชิงพีชคณิต

$$S(s) + T(s) = 1 \tag{8}$$

**3. การออกแบบตัวควบคุม**

การออกแบบชุดควบคุมที่ต้องการจัดสรรฐานวงรอบด้วยฟังก์ชันชดเชยนำหน้า โดยในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันนำหน้าส่วนหน้า (pre-compensator) เท่านั้น ซึ่งมีโครงสร้างการควบคุม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การควบคุมแบบจัดสรรฐานวงรอบปิด

**3.1 การประมวลผลด้วยทฤษฎีการหาพารามิเตอร์ระบบในโปรแกรม MATLAB มีขั้นตอนดังต่อไปนี้**

- ขั้นตอนที่ 1 หาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ
  - 1. นำตัวอย่างอินพุตและเอาต์พุต 600 ตัวอย่าง โดย Volt คือ สัญญาณอินพุตที่เปลี่ยนแปลง และ Volt คือ สัญญาณเอาต์พุตข้อมูล
  - 2. ใช้ฟังก์ชันการระบุเอกลักษณ์ใน โปรแกรม MATLAB โดย
- เลือกรูปแบบการประมาณแบบจำลองเป็นแบบ OE (Output Error) โดยที่
  - mb คือ จำนวนซีโรของระบบบวกหนึ่ง
  - mf คือ จำนวนโพลของระบบ
  - mk คือ จำนวนการสุ่มข้อมูลก่อนที่ค่าอินพุตจะมีผลต่อเอาต์พุตของระบบ

3. เมื่อเลือกรูปแบบการประมาณแบบจำลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นเราจะได้ค่าเอาต์พุตของแบบจำลองเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่วัดจากระบบจริง

4. สร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ในรูปแบบสัญญาณต่อเนื่องทางเวลา (Continuous Time) เปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ระบบ ทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ 9

$$G_v(s) = \frac{-31.37s + 9081}{s^2 + 37.64s + 504.5} \tag{9}$$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการหาฟังก์ชันชดเชยนำหน้า หาค่านำหน้าโดยเลือกให้มีความถี่ข้ามผ่านมีค่าต่ำกว่าความถี่สวิตช์ซึ่งและมีค่าออกฐานมากในย่านความถี่ต่ำ ได้ค่านำหน้าดังนี้

$$W = \frac{1 \times 10^{-6}s + 7.035 \times 10^5}{s + 7.035 \times 10^4} \tag{10}$$

จากนั้นตรวจสอบความเหมาะสมฟังก์ชันชดเชยนำหน้า เมื่อแก้สมการปริศนาแล้วได้ค่า  $\gamma_{min} = 1.4811$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสังเคราะห์ตัวควบคุมแบบเอชอินฟินิตี้ (K)

หาค่า  $K_x$  จากสมการที่ (11) - (14)

$$K_x = \begin{bmatrix} A + BF + \gamma^2(L^{-1}ZC'(C + DF) & \gamma^2(LT)^{-1}ZC' \\ B^T X & -D^T \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$F = -S^{-1}(D^T C + B^T X) \tag{12}$$

$$L = (1 - \gamma^2)I + XZ \tag{13}$$

$$K = K_x \times W \tag{14}$$

ได้ตัวควบคุมดังสมการที่ 15

$$K = \frac{1.098 \times 10^5 s^2 + 1.112 \times 10^9 s + 4.928 \times 100}{s^3 + 2.184 \times 10^5 s^2 + 1.99 \times 10^9 s + 5.426 \times 10^9} \tag{15}$$

**4. ผลการทดลอง**

ในการทดลองเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายสำหรับวงจรทอนระดับแรงดัน ซึ่งจำลองเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น Kyocera Solar ks20

การทดสอบความทนของตัวควบคุมแบบจัดสรรฐานเอชอินฟินิตี้และตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับจูนโดยวิธีของซิกเลอร์-นิโคลส์ ถูกทดสอบโดยการเปลี่ยนความเข้มแสงจาก 1000 W/m<sup>2</sup> เป็น 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 10  
10<sup>th</sup> ECTI-CARD 2018, Phitsanulok Thailand

$W/m^2$  รูปที่ 3 แสดงแรงดันด้านอินพุต (เส้นสีเขียว) ของตัวควบคุมแบบจัดสถานะเอชอินฟินิตี้ ซึ่งแรงดันด้านอินพุตถูกตั้งค่าไว้เท่ากับ 17.6 V และรูปที่ 4 แสดงแรงดันด้านอินพุต (เส้นสีเขียว) ของตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งแรงดันด้านอินพุตถูกตั้งค่าไว้เท่ากับ 17.6 V เช่นกัน



รูปที่ 3 แรงดันด้านอินพุตของตัวควบคุมแบบจัดสถานะเอชอินฟินิตี้



รูปที่ 4 แรงดันด้านอินพุตของตัวควบคุมแบบพีไอดี

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบคงทน (Robust Control) ด้วยเทคนิคการจัดสถานะวงรอบเอชอินฟินิตี้ (H Infinity Loop Shaping) ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมจำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) ผลการเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบคงทน

กับตัวควบคุมแบบพีไอดีพบว่าตัวควบคุมแบบคงทนมีความคงทนมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีเมื่อมีการรบกวนด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

## 4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หมายเลขทุนวิจัย KREF055706

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Abd El-Shafy A. Nafeh, "An effective and safe charging algorithm for lead-acid batteries in PV systems" International journal of energy research, Int. J. Energy Res. 2011; 35:733-740.
- [2] S.Pradeepa, K. Mohamed Hussain, R.Hariharan, S.Sindhu, K.Varunvel, "Comparison of Tuning Methods of PID Controllers for Level Process for Single Tank System," INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING Vol. 4, Issue 2, February 2016
- [3] Apekshit Bhowate, Shraddha Deogade, "COMPARISON OF PID TUNING TECHNIQUES FOR CLOSED LOOP CONTROLLER OF DC-DC BOOST CONVERTER," International Journal of Advances in Engineering & Technology, Feb., 2015
- [4] L. Jung, "System Identification: Theory for the User," 2<sup>nd</sup> edition., New Jersey:, Prentice-Hall, 1999.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายพีรวิษณุ ดิถีสวัสดิ์เวทย์  
วัน เดือน ปีเกิด 29 สิงหาคม 2535  
ที่อยู่ 110/132 ถ.เจริญนคร แขวง คลองตันไทร เขต คลองสาน กทม.  
10600

ประวัติการศึกษา :

- 2558 – ปัจจุบัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปริญญาโท คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า เกรดเฉลี่ย 3.87
- 2554 – 2558 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปริญญาตรี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า เกรดเฉลี่ย 2.98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้