



การออกแบบตัวควบคุมไฟไอดีอันดับเศษส่วนสำหรับระบบ
ไฟฟ้ากำลังเซลล์แสงอาทิตย์



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต
ปีการศึกษา 2566



**FRACTIONAL – ORDER PID CONTROL DESIGN FOR
PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS**

**BY
NUMCHAI HOUYSAI**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
COLLEGE ENGINEERING**

**GRADUATE SCHOOL, RANGSIT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2023**

วิทยานิพนธ์เรื่อง

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วนสำหรับระบบ
ไฟฟ้ากำลังเซลล์แสงอาทิตย์

โดย

นำชัย ห้วยทราย

ได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยรังสิต

ปีการศึกษา 2566

ผศ.ดร.เอกชัย มุจลินวิมูติ
ประธานกรรมการสอบ

ผศ.ดร.สุพัฒนา นิธิภมณารณ์
กรรมการ

รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหฤทัย
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผศ.ร.ต.หญิง ดร.วรรณิ์ สุขสาตร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

15 กันยายน 2566

Thesis entitled

**FRACTIONAL – ORDER PID CONTROL DESIGN FOR
PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS**

by

NUMCHAI HOUYSAI

was submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering in Electrical and Computer Engineering

Rangsit University
Academic Year 2023

Asst. Prof. Ekachai Mujjalinvimut, Ph.D.
Examination Committee Chairperson

Asst.Prof. Supattana Nirukkanaporn, D .Eng.
Member

Assoc.Prof. Adirak Kanchanaharuthai, Ph.D..
Member and Advisor

Approved by Graduate School

(Asst. Prof. Plt.Off. Vanee Sooksatra, D.Eng.)

Dean of Graduate School

September 15, 2023

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดีเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์ รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหฤทัย อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.เอกชัย มุจลินวิมูติ และ ผศ.ดร.สุพัฒนา นิรัคฆนาภรณ์ คณะกรรมการที่ให้ความสนใจใส่ช่วยเหลือ และคอยให้คำปรึกษาแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

นำชัย ห้วยทราย

ผู้วิจัย



5906398 : นำชัย ห้วยทราย
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง
 เซลล์แสงอาทิตย์
 หลักสูตร : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
 อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร. อติรักษ์ กาญจนหฤทัย

บทคัดย่อ

การศึกษานี้แนะนำตัวควบคุมอนุพันธ์เชิงปริพันธ์ตามสัดส่วน (FOPID) แบบเศษส่วนซึ่งออกแบบมาสำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโซลาร์เซลล์พร้อมตัวแปลงบูสต์ วัตถุประสงค์คือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยใช้วิธีปรับแต่งและวิธีการอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) การวิเคราะห์เปรียบเทียบดำเนินการระหว่างตัวควบคุมเหล่านี้กับวิธีการลองผิดลองถูก โดยประเมินประสิทธิภาพโดยใช้เมตริกหลัก 2 ตัว ได้แก่ ข้อผิดพลาดของเวลาสัมบูรณ์แบบอินทิกรัล (ITAE) และข้อผิดพลาดแบบอินทิกรัลไทม์สแควร์ (ITSE) พารามิเตอร์การออกแบบของตัวควบคุม FOPID รวมถึง K_p , K_i , λ , K_d และ μ ได้รับการปรับเพื่อให้ได้การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่แม่นยำของเอาต์พุตของระบบ

ตัวควบคุมที่นำเสนอประสบความสำเร็จในการลดการโอเวอร์ชูตที่ต่ำลง 0.5% และปรับปรุงเวลาการสั่นไหวอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้มีเวลาตอบสนองเพียง 0.49 วินาที ผลการจำลองตรวจสอบประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของตัวควบคุม FOPID เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการลองผิดลองถูก (วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 58 หน้า)

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์, การปรับจูนที่เหมาะสมของตัวควบคุม PID, การอินทิกรัลของค่าผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา, การอินทิกรัลของค่าผิดพลาดกำลังสองคูณด้วยเวลา

5906398 : Numchai Houysai
 Thesis Title : Fractional-Order PID Control Design for Photovoltaic Power Systems
 Program : Master of Engineering in Electrical and Computer Engineering
 Thesis Advisor : Assoc.Prof. Adirak Kanchanaharuthai, Ph.D.

Abstract

This study introduces a fractional-order proportional integral derivative (FOPID) controller designed for voltage regulation in a photovoltaic power distribution system with a boost converter. The objective of the study was to enhance system performance through the implementation of a tuning method and the genetic algorithm (GA) method. A comparative analysis is conducted between these controllers and a trial-and-error method, evaluating their performance using two key metrics: integral time absolute error (ITAE) and integral time square error (ITSE). The FOPID controller's design parameters, including K_p , K_i , λ , K_d , and μ , are adjusted to achieve precise voltage regulation of the system's output.

The proposed controller successfully reduces low overshoot by 0.5% and significantly improves stabilization time, achieving a response time of only 0.49 seconds. Simulation results validate the superior performance of the fractional-order PID controllers compared to the trial-and-error method.

(Total 58 pages)

Keywords: Photovoltaic, PID Tuning Optimization, Integral Time Absolute Error: ITAE, Integral Time Squared Error: ITSE

Student's Signature Thesis Advisor's Signature

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1	บทนำ
	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
	1
1.2	วัตถุประสงค์การวิจัย
	2
1.3	สมมติฐานการวิจัย
	2
1.4	นิยามศัพท์
	2
1.5	ขอบเขตของการดำเนินการ
	3
1.5	ประโยชน์ที่ได้รับ
	3
1.6	ขั้นตอนดำเนินงาน
	3
บทที่ 2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องงานวิจัย
	5
2.1	บทนำ
	5
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
	5
2.3	หลักการออกแบบตัวควบคุม
	9
2.4	ทฤษฎีแคลคูลัสอันดับเศษส่วน
	11
2.5	ตัวควบคุมพีไอดี
	12
2.6	ตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วน
	14
2.7	แผงเซลล์แสงอาทิตย์
	17
2.8	ปัจจัยลดทอนกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
	20
2.9	หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง
	20

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	2.10 มาตรฐานและข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบจำหน่าย	26
	2.11 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์	27
	2.12 การป้องกัน	27
	2.13 คุณภาพแรงดันไฟฟ้า	28
บทที่ 3	การออกแบบ	30
	3.1 พิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์	30
	3.2 การออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้ากำลังของเซลล์แสงอาทิตย์	31
	3.3 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยติดตามสัญญาณอ้างอิง	35
	3.4 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไออันดับเศษส่วน ด้วยจีเนติกอัลกอริทึม	39
บทที่ 4	ผลการทดลองวิจัย	43
	4.1 การทำงานของตัวควบคุมแบบลองผิดลองถูกปรับจูน โดยใช้แหล่งจ่าย พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์	43
	4.2 การทำงานของตัวควบคุมพารามิเตอร์แบบจีเนติก (GA) โดยใช้แหล่ง จ่ายพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์	45
	4.3 การทำงานของตัวควบคุมพารามิเตอร์แบบติดตามสัญญาณอ้างอิง โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์	47
	4.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์	49
	4.5 ผลการทดลองตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีการรบกวนระบบ ให้มีการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาต์พุตเพิ่ม โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงาน เซลล์แสงอาทิตย์	51
	4.6 การทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโหลดความต้านทาน	52
	4.7 บทสรุป	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการวิจัย	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม	55
ประวัติผู้วิจัย	58



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 คุณลักษณะของผลการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม	13
3.1 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์	31
3.2 ข้อมูลจำเพาะพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง	32
3.3 พารามิเตอร์จิ้นติกอัลกอริทึมในโปรแกรม MATLAB	41
4.1 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับการควบคุมผ่านลองผิดลองถูก	44
4.2 ผลการหาค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ผ่านลองผิดลองถูก	44
4.3 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับตัวควบคุมผ่านจิ้นติก	46
4.4 ผลการหาค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ผ่านจิ้นติก	46
4.5 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับตัวควบคุมผ่านการติดตามสัญญาณอ้างอิง	48
4.6 ผลการหาค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ผ่านการติดตามสัญญาณอ้างอิง	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	Open-loop Control System 10
2.2	On/off Control System 10
2.3	Linear Control System 11
2.4	บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PID 13
2.5	บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ FOPID 14
2.6	โดเมนการทำงานของตัวควบคุมแบบ FOPID 15
2.7	ความสัมพันธ์เสถียรของระบบอันดับเศษส่วน $0 < \alpha \leq 1$ 16
2.8	ความสัมพันธ์เสถียรของระบบอันดับจำนวนเต็ม $\alpha = 1$ 16
2.9	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ 17
2.10	กราฟการทำงานของ I-V Curve เมื่อเปลี่ยนความเข้มแสงและอุณหภูมิ คงที่ 18
2.11	กราฟการทำงานของ P-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 19
2.12	ปัจจัยการลดทอนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 20
2.13	การทำงานสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง 20
2.14	คลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 21
2.15	โครงสร้างวงจร Boost Converter 22
2.16	วงจรสมมูลของ Boost Converter ขณะสวิตช์นำกระแส 23
2.17	วงจรสมมูลของ Boost Converter ขณะสวิตช์หยุดนำกระแส 23
2.18	กราฟความสัมพันธ์ (V_o/V_{in}) กับ Duty Cycle ของ Boost Converter เชิงทฤษฎีและปฏิบัติ 24
2.19	รูปคลื่น V_L และ i_L ในวงจร Boost Converter 25
2.20	รูปคลื่นกระแส i_c และแรงดัน v_o วงจร Boost Converter 25
3.1	บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองการทำงานตัวควบคุม 30
3.2	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการฉายรังสีและอุณหภูมิสูง/ต่ำ 33
3.3	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ FOPID 33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	แสดงแผนผังการเพิ่มสมรรถนะตัวควบคุมด้วยการติดตามสัญญาณอ้างอิง
3.5	Tuning PID Control Toolbox ในโปรแกรม MATLAB
3.6	แสดงแผนผังการเพิ่มสมรรถนะตัวควบคุมด้วยจินตึก
3.7	แสดง GA Toolbox ในโปรแกรม MATLAB
4.1	บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองการทำงานตัวควบคุมลองผิดลองถูกปรับจูน
4.2	กราฟผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบการลองผิดลองถูก
4.3	บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองการทำงานตัวควบคุมจินตึก (GA)
4.4	กราฟผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบเพิ่มสมรรถนะ (GA)
4.5	บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองการทำงานตัวควบคุมการปรับจูน
4.6	กราฟผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
4.7	กราฟผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบการลองผิดลองถูกและแบบติดตามสัญญาณอ้างอิง
4.8	กราฟผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบการลองผิดลองถูกและแบบเพิ่มสมรรถนะ (GA)
4.9	ทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนโหลดความต้านทานจาก 30 โอห์มไปเป็น 40 โอห์ม
4.10	ทดสอบกระแสเอาต์พุตเปลี่ยนโหลดความต้านทานจาก 30 โอห์มไปเป็น 40 โอห์ม
4.11	กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะผลของการควบคุมผ่าน (ITAE)
4.12	กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะผลของการควบคุมผ่าน (ITSE)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเรากำลังเผชิญกับวิกฤตพลังงานและอนาคตอันใกล้นี้จะเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อความต้องการ อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากรและอุตสาหกรรมของทุกปี เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาพลังงานได้ จึงให้ความสำคัญกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนและไม่ก่อให้เกิดมลพิษ พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในเรื่องนี้ เพราะเป็นพลังงานสะอาดและใช้ได้อย่างกว้างขวาง

โดยปกติแล้วสัญญาณเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระดับต่ำ ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแวดล้อม เช่น ความเข้มแสงและอุณหภูมิ ดังนั้นเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้ได้ถึงระดับที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่มีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าอินพุต ซึ่งจะต้องมีการใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ เพื่อช่วยแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะตัวควบคุมอย่างง่าย เช่น ตัวควบคุมแบบ PID หรือ แบบ FOPID ซึ่งมีความสำคัญที่ช่วยให้ระบบสามารถแก้ไขปัญหาการแปลงแรงดันไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม และลดผลกระทบที่เกิดจากการขาดการควบคุมระบบพลวัต ดังนั้นระบบที่น่าสนใจ จึงพิจารณาถึงความเสถียรภาพของระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เป็นหลัก

บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการใช้ตัวควบคุมแบบ FOPID เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการปรับจูนพารามิเตอร์ควบคุมร่วมกับโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID เพื่อให้ได้ผลตอบสนองการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยลดปัญหาการควบคุมระบบแรงดันไฟฟ้าให้ไม่สูงเกินไป และลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าให้น้อยลง มีการตอบสนองทางเวลาเร็วขึ้นและยังสามารถปรับค่าควบคุมได้อย่างแม่นยำ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงจากภายนอก เพื่อให้การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทางเลือกที่เหมาะสมคือการใช้วิธีการปรับจูนลองผิดลองถูกใน

ระยะแรกของตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ซึ่งการปรับจูนให้เหมาะสมจะช่วยให้ได้ตัวควบคุมที่ดีขึ้น โดยมีกรณีสมรรถนะเป็นเกณฑ์กำหนดและเมื่อเปรียบเทียบกันแสดงให้เห็นว่าระบบตัวควบคุมแบบ FOPID ที่นำเสนอสามารถควบคุมพลวัตได้ดีขึ้นและเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบเป็นที่น่าพอใจกับแบบจำลองทดสอบ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาเทคนิคการควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่
- 1.2.2 ศึกษาความเสถียรภาพของระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่
- 1.2.3 ศึกษาความไม่แน่นอนของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.2.4 ศึกษาผลจำลองภายใต้สภาวะการทำงานระบบร่วมกับโปรแกรม MATLAB

1.3 สมมติฐานการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วน โดยการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการศึกษาผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้การออกแบบสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็วขึ้นกับการใช้งาน

1.4 นิยามศัพท์

PV Module หมายถึง แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะการเชื่อมต่อเป็นวงจรเพื่อให้ได้พลังงานสูงสุด

Boost Converter หมายถึง การแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้สูงขึ้นโดยมีแรงดันเอาต์พุตจะสูงกว่าค่าแรงดันอินพุต

1.5 ขอบเขตของการดำเนินงาน

1.5.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะโหมดการควบคุมแรงดันไฟฟ้าระบบเซลล์แสงอาทิตย์เท่านั้น สำหรับวิเคราะห์การทำงานของวงจรและพิจารณาประสิทธิภาพการควบคุม

1.5.2 ประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นมุ่งเน้นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ของวงจรเป็นสำคัญ

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.6.1 มุ่งองค์ความรู้ด้านการออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่และวิธีการควบคุม

1.6.2 มีองค์ความรู้ด้านการสร้างแบบจำลองทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่แบบ (Off-Grid PV)

1.6.3 มุ่งองค์ความรู้ด้านการพัฒนาระบบการควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยนี้ ได้แบ่งการดำเนินงานเป็นลำดับขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ คือ รวบรวมและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวิจัยรวมไปถึงการจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการทดลองในแบบจำลองแล้วบันทึกผลค่าทางไฟฟ้า เพื่อสรุปผลและจัดทำรายงานเป็นขั้นตอนสุดท้าย ดังตารางดำเนินงานดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

[illegible]

[illegible]

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องงานวิจัย

2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับขั้นตอนการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบพีไอได้อันดับเศษส่วน ซึ่งในอดีตมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบต่างๆ ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สำรวจและศึกษางานวิจัยในขั้นตอนการควบคุมดังกล่าว เพื่อนำมาใช้ในการประยุกต์กับงานวิจัยในบทนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนองานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์มาแล้ว รวมถึงอธิบายสาระสำคัญในแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทางผู้ดำเนินการวิจัยได้ค้นคว้าบทความเกี่ยวกับองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2013	Ishaq, Ibrahim and Abubakar	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ามีประเมนความต้องการพลังงานไฟฟ้าหรือโหลดของวิทยาลัย ถูกประเมินการไว้ คือ 48.787kwh/วัน ข้อมูลจำเพาะของระบบจัดทำขึ้นตามโหลด ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าความจุของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คุ้มค่าสำหรับการลงทุนเมื่อเทียบกับพลังงานแบบเชื้อเพลิงฟอสซิล

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Fracastoro	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความเจริญก้าวหน้าของมนุษย์มีความเกี่ยวข้องอย่างมากกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทุกวันนี้การเติบโตอย่างรวดเร็วการควบคุมของการใช้งานกำลังก่อให้เกิดภัยคุกคามต่างๆ เช่น มลพิษ ภาวะโลกร้อน และความไม่สมดุลระหว่างความต้องการที่เพิ่มขึ้น โดยโลกตะวันตกมองว่าการใช้พลังงานหมุนเวียนคือทางรอดของวิกฤตพลังงานในอนาคต ซึ่งทางสหภาพยุโรปมีความพยายามลดการปล่อย CO ₂ ในช่วงปี 2548-2555 ลดลงจาก 7.5 เป็น 7 พันล้านตัน ส่วนที่เหลือของโลกเพิ่มจาก 21.5 เป็น 27.5 พันล้านตัน (+28%) ทำให้สมดุลทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 29 เป็น 34.5 พันล้านตัน (+19%)
2015	Raju, Babu and Azam	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ามีนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมอันดับเศษส่วนสำหรับระบบเพื่อควบคุมการจ่ายพลังงานระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และกริด ผ่านการจำลองบน Matlab/Simulink ผลลัพธ์เห็นว่าระบบที่นำเสนอนี้สามารถควบคุมกระแสไฟ AC และกระแสการชาร์จและการคายประจุแบตเตอรี่ในระบบต่างๆ ส่งผลให้ต้นทุนลดลงจาก 12.4% เป็น 4.18% ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้นและเพิ่มความยืดหยุ่นในการควบคุมการไหลของพลังงาน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	Dhanowa	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปัจจุบันระบบ Solar PV ได้รับความนิยมกันทั่วโลก ระบบเหล่านี้ผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความต้องการ โดยบทความนี้ได้พิจารณาการออกแบบโครงข่ายไฟฟ้าระบบ PV แบบ Off-Grid ผ่านแบบจำลอง Matlab/Simulink ผลลัพธ์แสดงถึงการทำงานสถานะโหลดและไม่มีโหลด
2015	Yudong	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพกลุ่มอนุภาค (PSO) เป็นวิธีการปรับให้เหมาะสมแบบฮิวริสติก โดยปัจจุบันได้รับความนิยมในแง่ของเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ ในการสำรวจนี้ นำเสนอการตรวจสอบที่ครอบคลุมของ (PSO) ในฐานะเครื่องมือเพิ่มประสิทธิภาพให้กับทางเลือกนักวิจัย
2016	Adnan, Oninda, Nishat and Islam	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มแสงมีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้า จึงได้มีการออกแบบวงจรผ่านโปรแกรม Matlab/Simulink โดยการปรับปรุงผลลัพธ์ของกำลังไฟฟ้าสูงสุด บทความนี้ใช้ตัวควบคุม PID เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอาต์พุต เมื่อไม่ใช้ตัวควบคุม PID กำลังไฟฟ้าที่ได้รับ 190W แต่พอใช้ตัวควบคุม PID กำลังไฟฟ้าที่ได้รับ 350W แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมมีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ PV

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016	Swain	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของ MPP ที่ควบคุมด้วย PID ดีกว่าระบบ P&O MPP สำหรับ สัญญาณอินพุตทั้งหมด ผ่านการสร้างแบบจำลอง ระบบ PV แบบ Off-Grid ใน โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อศึกษาการตอบสนองของ ระบบต่อสัญญาณขั้นบันได ทางลาดและแรง กระตุ่น
2016	Hiremath	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปัจจุบันมี คอนโทรลเลอร์หลายที่พัฒนาขึ้นโดยมีข้อกำหนดที่ แตกต่างกัน แต่มีข้อเสียเพียงข้อเดียว คือ ไม่มี วิธีการที่แน่นอนสำหรับการปรับแต่งคอนโทรล เลอร์เหล่านี้บทความนี้ได้ทำเปรียบเทียบวิธีการ ปรับแต่งต่างๆ ของตัวควบคุม PID สำหรับระบบที่ ไม่เป็นเชิงเส้น โดยวิธีการปรับจูน PID และแสดง ผลลัพธ์เปรียบเทียบแต่ละวิธี ข้อเสนอแนะจึงเป็นหนึ่งใน วิธีทางออกที่ดีที่สุดสำหรับการปรับแต่ง
2017	Hojabri and Toudeshki	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปัจจุบันมีการใช้ พลังงานหมุนเวียนเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วของ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) แบบ (Off-Grid) ดังนั้นคุณภาพไฟฟ้าที่ดีจึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับ การทำงานที่เชื่อถือได้ของโหลดไฟฟ้าในระบบ ไฟฟ้าอย่างไรก็ตาม กระแสที่ดึงมาจากอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่และโหลดที่ไม่ใช่เชิงเส้น นั้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดคุณภาพไฟฟ้าที่ไม่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้านอกโครงข่าย ไฟฟ้า ในบทความนี้ใช้ MATLAB/Simulink เพื่อ จำลองและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในระบบ พลังงาน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่พิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Singh, Kumar and Singh	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ามีการเปรียบเทียบพฤติกรรมของคอนโทรลเลอร์ ทั้ง 2 ประเภท 1. คอนโทรลเลอร์แบบดั้งเดิม 2. คอนโทรลเลอร์แบบอันดับเศษส่วน โดยทั้งสองคอนโทรลเลอร์จะถูกเปรียบเทียบการตอบสนองผ่านตัวแปลงควบคุมไฟฟ้าผ่านแบบจำลองโปรแกรม Matlab /Simulink พบว่าคอนโทรลเลอร์อันดับเศษส่วนให้ผลลัพธ์ดีกว่าคอนโทรลเลอร์แบบดั้งเดิม
2017	Adnan	การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบและจำลองของตัวแปลง DC-DC Boost ที่ใช้ตัวควบคุม PID ผ่านแบบจำลองโปรแกรม Matlab/Simulink มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการรักษาระดับเอาต์พุตให้คงที่ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอินพุต ผลลัพธ์ตัวแปลงที่มีตัวควบคุม PID ให้การควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ และลดการโอเวอร์ชูต และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวแปลงตัวควบคุมมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวแปลงทั่วไป

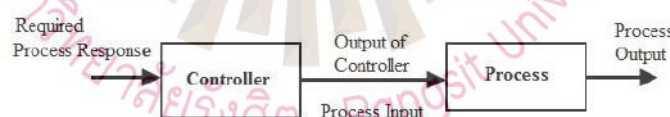
ที่มา: รวบรวมข้อมูลโดยผู้วิจัย, 2022

2.3 หลักการออกแบบตัวควบคุม

การศึกษาพฤติกรรมของระบบเพื่อควบคุมให้ได้ผลตอบสนองตามต้องการ โดยการสร้างตัวควบคุมอาจจะเริ่มจากอย่างง่าย เช่น การควบคุมแบบวงจเปิด (Open-Loop Controller) หรือตัวควบคุมแบบป้อนกลับไปข้างหน้า (Feed Forward Controller) ซึ่งอาจใช้งานได้กับระบบที่ไม่ต้องการความแม่นยำมากนักหรือระบบที่ไม่มีสัญญาณรบกวนแต่ถ้าระบบที่ต้องการควบคุมไม่เป็นอย่างที่กล่าวมา เช่น มีสัญญาณรบกวนสูงหรือต้องการความแม่นยำสูงก็จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบมีการป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งตัวควบคุมจะสามารถตัดสินใจได้ดีขึ้น เมื่อรู้สถานะปัจจุบันของเอาต์พุต ตัวควบคุมแบบป้อนกลับอย่างง่ายที่สุดคือการควบคุมแบบเปิดปิด เช่น

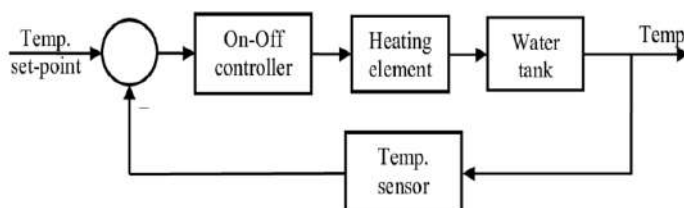
การควบคุมอุณหภูมิ สามารถทำได้โดยการนำค่าเอาต์พุตที่ต้องการเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุตที่ได้จริง ถ้าค่าเอาต์พุตหรืออุณหภูมิจริงมีค่าน้อยกว่าที่ต้องการควบคุมก็จะสั่งเปิดสวิตช์และเมื่ออุณหภูมิมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับตัวควบคุมก็จะสั่งปิดสวิตช์และเมื่ออุณหภูมิลดลงกว่าค่าที่ตั้งไว้ตัวควบคุมจะสั่งเปิดสวิตช์อีกครั้งและทำกระบวนการนี้ไปต่อเนื่อง การควบคุมแบบนี้เหมาะสำหรับระบบเปิดปิด แต่ผลตอบสนองที่ได้จะมีการแกว่งรอบๆ ค่าที่ต้องการ

ดังนั้นถ้าการควบคุมอย่างง่ายดังกล่าวข้างต้นไม่เพียงพอที่จะทำให้ผลตอบสนองหรือพฤติกรรมของระบบเป็นไปตามที่ต้องการได้ ตัวควบคุมต่อมาที่จะนำมาใช้ควบคุมระบบได้คือ ตัวควบคุมป้อนกลับแบบเชิงเส้น ซึ่งจะต้องมีการวัดค่าเอาต์พุตจริงของระบบในปัจจุบัน แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่ต้องการ ซึ่งจะคล้ายกับตัวควบคุมแบบเปิดปิด แต่การควบคุมแบบเชิงเส้นจะไม่ใช้การเปิดปิด หากจะต้องมีการปรับค่าที่ไปกระตุ้นระบบตามค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการกับเอาต์พุตจริงขณะนั้น คือ สัญญาณกระตุ้นระบบจะเป็นสัดส่วนที่แปรผันตรงกับความผิดพลาด เช่น ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิแบบเชิงเส้น เมื่อค่าเอาต์พุตในขณะนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่ต้องการมากๆ ตัวควบคุมจะสั่งให้อุปกรณ์ฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำงานเต็มที่ พอเมื่อความผิดพลาดเริ่มลดลงตัวควบคุมจะสั่งให้อุปกรณ์ฮีตเตอร์ไฟฟ้าลดพลังงานลง เปรียบเสมือนการหรี่ไฟลง ตัวควบคุมแบบนี้จะให้ผลที่ดีกว่าการควบคุมแบบเปิดปิด โดยเฉพาะมักจะไม่มีแกว่งหรือแกว่งน้อยกว่าการควบคุมแบบระบบเปิดปิด



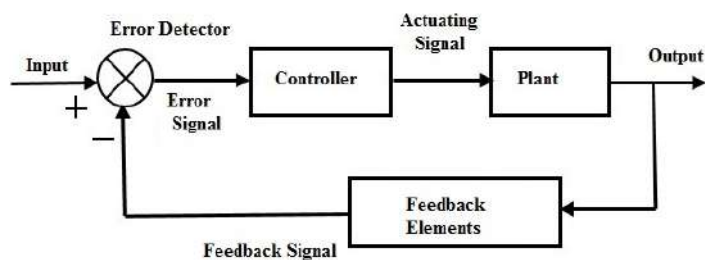
รูปที่ 2.1 Open-Loop Control System

ที่มา: Electronicshub, 2021



รูปที่ 2.2 On/Off Control System

ที่มา: Dulau, 2019



รูปที่ 2.3 Linear Control System

ที่มา: Electronicsforu, 1956

2.4 ทฤษฎีแคลคูลัสอันดับเศษส่วน

แคลคูลัสเป็นสาขาหลักของวิชาคณิตศาสตร์ ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นอย่างมากในสาขาวิชาเกี่ยวกับระบบควบคุม แบ่งออกเป็นสองแนวคิดหลัก คือ แคลคูลัสเชิงอนุพันธ์ ซึ่งว่าด้วยเรื่องอัตราการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เช่น การอัตราความเร็ว อัตราความเร่ง และความชันของฟังก์ชัน แนวความคิดที่สองคือ แคลคูลัสเชิงปริพันธ์ ว่าด้วยเรื่อง การคำนวณหาพื้นที่หรือปริมาตรของรูปทรงทางเรขาคณิตที่ได้จากกราฟฟังก์ชัน โดยปกติลำดับการทำอนุพันธ์และปริพันธ์ของฟังก์ชันจะเป็นจำนวนเต็ม ซึ่งแตกต่างจากแคลคูลัสอันดับเศษส่วน ซึ่งมีอันดับการทำอนุพันธ์และปริพันธ์ที่เป็นจำนวนไม่เต็ม กำหนดสัญลักษณ์ของตัวดำเนินการของแคลคูลัสอันดับเศษส่วน aD_t^α แสดงในสมการที่ 2-1

$$aD_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & \Re(\alpha) > 0, \\ 1 & \Re(\alpha) = 0, \\ \int_a^t (dt)^{-\alpha} & \Re(\alpha) < 0, \end{cases} \quad (2-1)$$

เมื่อ a และ t คือขอบเขตของการดำเนินการ α คืออันดับเศษส่วนของการดำเนินการทางแคลคูลัส ซึ่งมีความหมายนิยามการดำเนินการทางอนุพันธ์และปริพันธ์ที่มีอันดับเป็นเศษส่วน มีดังต่อไปนี้

นิยามของ Riemann-Liouville

สำหรับ $n-1 < \alpha < n, n \in \mathbb{N}$ เมื่อ $\Gamma(\cdot)$ คือฟังก์ชันแกมมาของออยเลอร์ (Euler's Gamma Function)

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \left(\frac{d}{dt}\right)^n \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (2-2)$$

นิยามของ Grunwald-Letnikov

$$D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\lceil \frac{t-\alpha}{h} \rceil} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh) \quad (2-3)$$

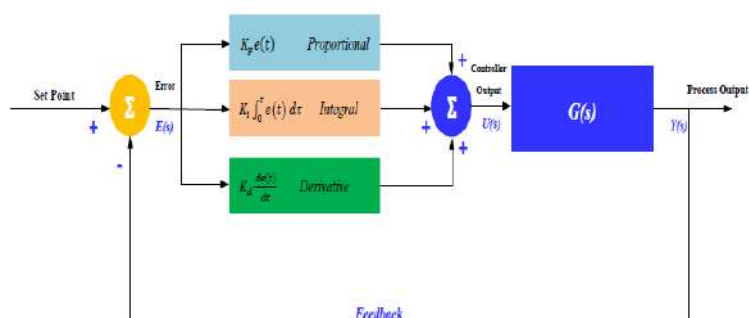
ส่วนที่อยู่ในวงเล็บก้ามปู [] คือจำนวนเต็ม การแปลงลาปลาซของอนุพันธ์อันดับที่ α ของสัญญาณ $x(t)$ เมื่อ $\alpha \in \mathbb{R}_+$ (ลำดับการทำอนุพันธ์เป็นจำนวนจริงบวก) โดยสมมุติให้เงื่อนไขเริ่มต้นเป็นศูนย์แสดงในสมการที่ 2-4

$$\mathcal{L}\{D^\alpha x(t)\} = s^\alpha X(s) \quad (2-4)$$

เมื่อ $X(s)$ คือ ลาปลาซของสัญญาณ $x(t)$, s คือ อาร์กิวเมนต์เชิงซ้อน

2.5 ตัวควบคุมพีไอดี

เบื้องต้นตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ 1. ส่วนควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Action) 2. ส่วนควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Action) 3. ส่วนควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Action) ดังสมการที่ 2-5 โดยจะมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่สอดคล้องกับองค์ประกอบหลักทั้ง 3 ตัว คือ K_p , K_i และ K_d ตามลำดับ ซึ่งความสำคัญของค่าพารามิเตอร์นี้ คือ เมื่อมีการปรับจูนหรือใช้ค่าที่เหมาะสมจะทำให้ Overshoot ลดน้อยลง และทำให้ข้อผิดพลาดสถานะคงตัวเป็นศูนย์ รวมทั้งทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพมากขึ้น โครงสร้างของตัวควบคุมแบบ PID มีรูปแบบของแผนภาพบล็อกแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ PID

ที่มา: Borase, 2021

ซึ่งมีฟังก์ชันการถ่ายโอน ดังนี้

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (2-5)$$

โดยที่

K_p : อัตราขยายตามสัดส่วนซึ่งใช้เพื่อเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบและข้อผิดพลาดของสถานะคงตัว

K_i : ปริพันธ์ลดค่าข้อผิดพลาดของในช่วงสภาวะคงที่

K_d : อนุพันธ์ที่ใช้เพื่อลดการตอบสนองของระบบเกินขนาด

ผลของสัดส่วนปริพันธ์ และอนุพันธ์การควบคุมของระบบป้อนกลับ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของผลการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

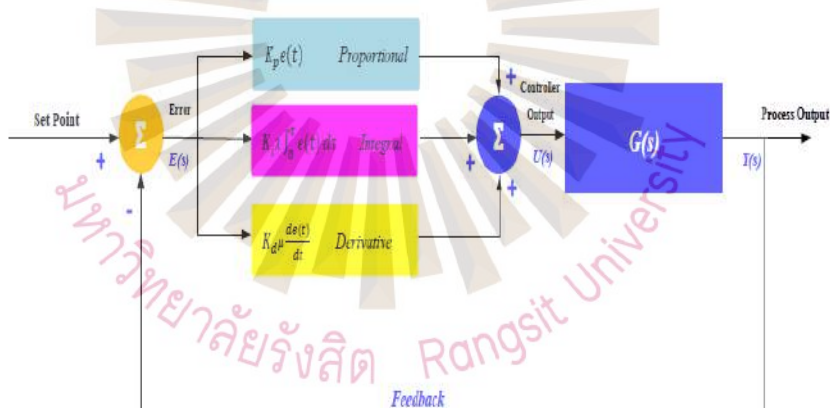
ตัวแปร	ช่วงเวลานับ	โอเวอร์ชูต	เวลาเข้าที่	ความผิดพลาดสถานะคงตัว	เสถียรภาพ
K_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลด	ลด
K_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ	ลด
K_d	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ไม่มีผล	ดีขึ้นถ้า K_d มีค่าต่ำลง

ที่มา: Li, 2005

การปรับจูนค่าคงที่ในตัวควบคุมแบบ PID สามารถปรับจูนแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับกระบวนการได้ โดยมีการตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุม จนถึงค่าความผิดพลาด เช่น ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) ซึ่งมีข้อสังเกต การปรับจูนตัวควบคุมมีเพียง 3 ตัวทำให้ยังขาดประสิทธิภาพการควบคุมในแง่ของการตอบสนองที่ล่าช้า อีกทั้งยังไม่มีคามยืดหยุ่นของตัวควบคุมที่ดีพอ

2.6 ตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วน

ตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วน Fractional-Order PID Controller (FOPID Controller) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากแคลคูลัสอันดับเศษส่วน โดยมี λ และ μ เป็นตัวแปรอันดับการทำปริพันธ์และอนุพันธ์ที่ไม่ใช่จำนวนเต็มตามลำดับ ดังนั้นตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วนจึงมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 5 ตัว คือ $K_p, K_i, \lambda, K_d, \mu$ ทำให้ตัวควบคุมชนิดนี้มีความสามารถในการควบคุมระบบพลวัตได้อย่างแม่นยำ ดังสมการที่ 2-6 ซึ่งมีแผนภาพบล็อกตัวควบคุมแบบ FOPID แสดงดังรูปที่ 2.5



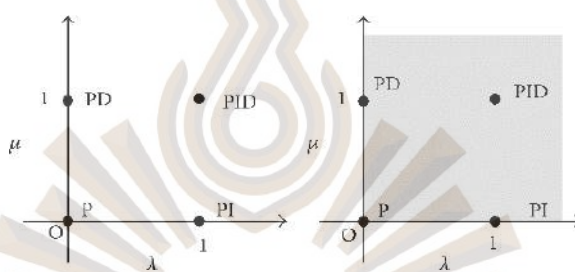
รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบ FOPID

ที่มา: Saadatmand, 2021

โดยตัวควบคุมแบบ FOPID มีฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการ

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (2-6)$$

จากสมการ $C(s)$ คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ FOPID ซึ่ง $E(s)$ เป็น สัญญาณอินพุต และ $U(s)$ คือ ตัวควบคุมเอาต์พุต นอกจากนี้พารามิเตอร์ K_p, K_i และ K_d ยัง แสดงถึงการได้รับตามสัดส่วนปริพันธ์และอนุพันธ์ตามลำดับ โดยมี λ และ μ เป็นตัวแปรอันดับ การทำเชิงปริพันธ์และอนุพันธ์ที่ไม่ใช่จำนวนเต็ม ของโครงสร้างของตัวควบคุมแบบ FOPID ใน รูปย้อนกลับ ซึ่งตัวควบคุมแบบ FOPID เป็นส่วนขยายของตัวควบคุมแบบ PID จากจุดในระบบ λ - μ ไปยังสี่เหลี่ยมจัตุรัสในระนาบเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.6 แผนภาพส่วนขยายนี้ให้ความ ยืดหยุ่นและความทนทานมากขึ้นกับระบบ



รูปที่ 2.6 โดเมนการทำงานของตัวควบคุม FOPID

ที่มา: Puangdownreong, 2019

ถ้าอันดับการทำปริพันธ์และอนุพันธ์ มีค่าเท่ากับ 1 ตัวควบคุมดังกล่าวจะเป็นตัวควบคุมพีไอดีแบบ ดั้งเดิม ซึ่งมีข้อสังเกตตัวควบคุม FOPID จะขยายตัวควบคุม PID แบบเดิมจากจุดหนึ่งไปยังอีก ะนาบ ส่วนขยายนี้ให้ความยืดหยุ่นมากกว่าตัวควบคุม PID และสามารถเข้ากับปัญหาที่เกิดขึ้น จริงได้อย่างสมบูรณ์แบบมากขึ้น เนื่องจากตัวควบคุม FOPID มีข้อได้เปรียบหลักในการแสดง ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในระบบ

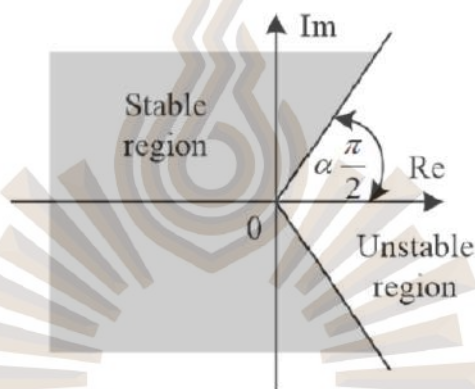
2.6.1 เสถียรของระบบอันดับเศษส่วน (Stabilization of Fractional-Order)

สามารถอธิบายด้วยทฤษฎี Matignon ความเสถียรซึ่งเป็นรากฐานความสัมพันธ์ของระบบ สามารถนำไปใช้การวิเคราะห์ความเสถียรของอันดับจำนวนเต็มและเศษส่วน สำหรับกรณีอันดับ เศษส่วนความเสถียรจะแตกต่างจากอันดับจำนวนเต็ม ในกรณีของระบบอันดับเศษส่วนมีสมการ คุณสมบัติเป็นพหุนามของตัวแปรเชิงซ้อน $\lambda = s^\alpha$ คือ สภาวะความเสถียรของระบบ ดังสมการ ที่ 2-7 โดยที่ λ_i คือรากของพหุนามลักษณะเฉพาะที่มีความสัมพันธ์กับระนาบเชิงซ้อนในรูปที่ 2.7

สำหรับอันดับจำนวนเต็ม $\alpha = 1$ คือ สภาพความเสถียรของระบบ ดังสมการที่ 2-8 ซึ่งมีความสัมพันธ์บนระนาบเชิงซ้อนในรูปที่ 2.8

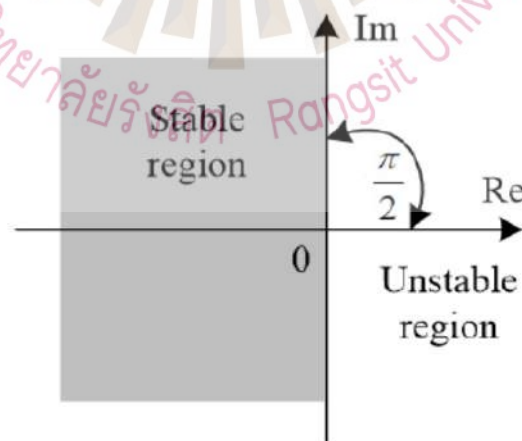
$$|\arg(\lambda_i)| > \alpha \frac{\pi}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-7)$$

$$|\arg(\lambda_i)| > \frac{\pi}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-8)$$



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์เสถียรของระบบอันดับเศษส่วน $0 < \alpha \leq 1$

ที่มา: Matusu, 2011

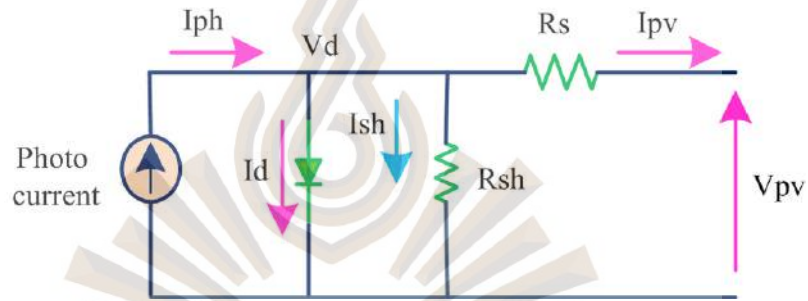


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์เสถียรของระบบอันดับจำนวนเต็ม $\alpha = 1$

ที่มา: Matusu, 2011

2.7 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV MODULE)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า กระแสตรง มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ เซลล์มาต่อกันเป็นแถวหรือเป็นชุด เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าใช้งานตามที่ต้องการ เนื่องด้วยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่คงที่ตลอดเวลา ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ ซึ่งอธิบายได้ด้วยวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: Garoudja, 2019

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า (P_{PV}) และกระแสไฟฟ้า (i_{PV}) ที่สามารถผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$i_{PV} = I_{cc} - I_s \left(e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_s i_{PV})}{mkT} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_s i_{PV}}{R_p} \quad (2-9)$$

เมื่อ

$$I_{cc}(T) = I_{sc}(I_{ref}) \frac{G}{G_{ref}} + \alpha(T - T_{ref}) \quad (2-10)$$

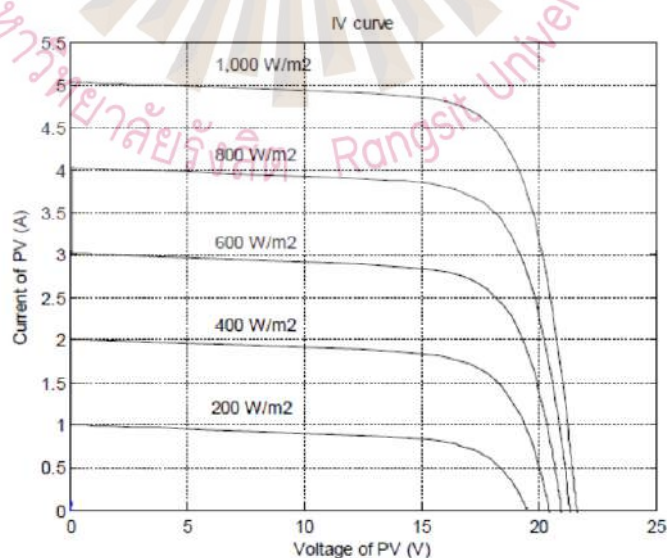
$$I_s(T_{ref}) = \frac{I_{sc}(T_{ref})}{\left(e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_s i_{PV})}{mkT} \right)} - 1 \right)} \quad (2-11)$$

$$V_{oc}(T) = V_{oc}(T_{ref}) + \beta (T - T_{ref}) \quad (2-12)$$

เมื่อ

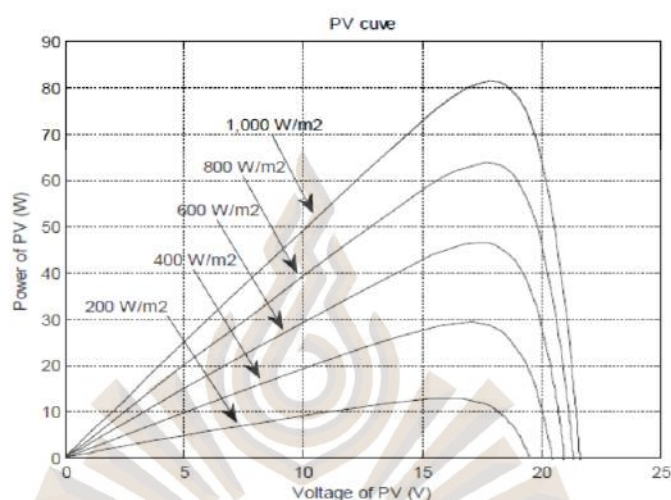
I_S	คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด (A)
I_{CC}	คือ กระแสที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ (A)
k	คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (J/K)
q	คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน (C)
T	คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K)
R_S	คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด (Ω)
R_p	คือ ความต้านทานขนาน (Ω)
m	คือ <i>Ideality factor</i> ของไดโอด ($1 < m < 2$)
I_{SC}	คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (A)
V_{OC}	คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V)
G	คือ ค่าความเข้มแสง (W/m^2)
T_{ref}	คือ ความต้านทานขนาน ($25^\circ C$)
G_{ref}	คือ ค่าความเข้มแสงอ้างอิงที่ ($1000W/m^2$)
α	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแส ($A/^\circ C$)
β	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดัน ($V/^\circ C$)

จากสมการที่ 2-9 ทำให้ได้ผลการจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ตามกราฟ การทำงานของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟการทำงานของ I-V Curve เมื่อเปลี่ยนความเข้มแสงและอุณหภูมิคงที่
ที่มา: Victron Energy, 2020

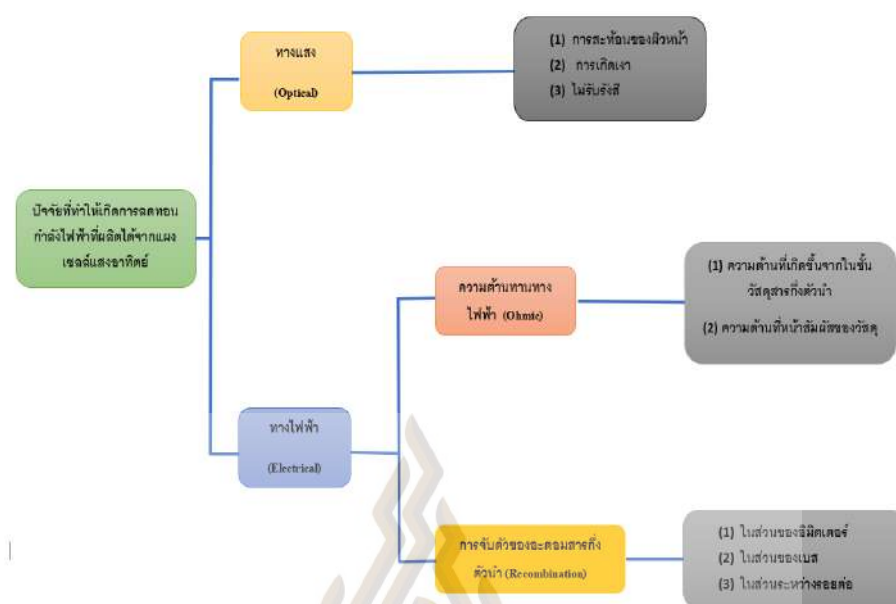
เมื่อพิจารณาค่าของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ คือการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าตามความเข้มแสง ดังรูปที่ 2.11 กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ค่าสูงสุด (P_{max}) ที่จุดแรงดันไฟฟ้า (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้า (I_{mp})



รูปที่ 2.11 กราฟการทำงานของ P-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง
ที่มา: Victron Energy, 2020

2.8 ปัจจัยลดทอนกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

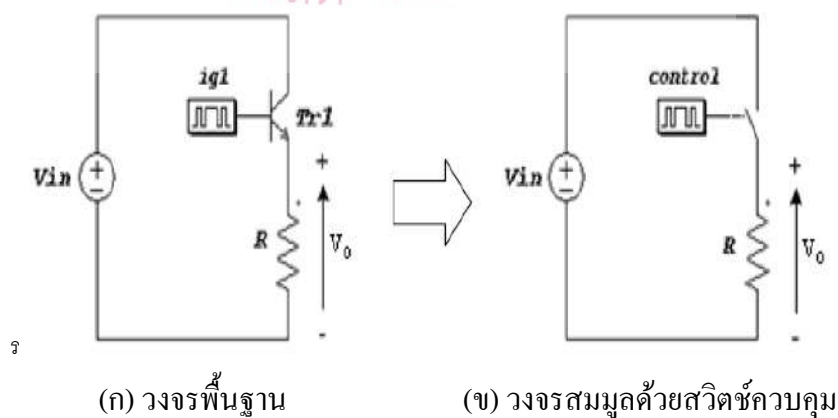
การลดทอนกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาจากสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ ทางแสง (Optical) และทางไฟฟ้า (Electrical) สำหรับทางแสงปัจจัยที่มีผลต่อการรับแสง ได้แก่ การสะท้อน (Reflection) การบังเงา 36 (Shadowing) และไม่รับรังสี (Not Absorbed Radiation) ซึ่งการลดทอนการสะท้อนแสง โดยการเคลือบสารป้องกันการเงาบบังแผงเซลล์ทางไฟฟ้าแบ่งการสูญเสียเป็น 2 ส่วน คือ โอห์มมิก (Ohmic Losses) และการจับตัวของอะตอมสารกึ่งตัวนำ (Recombination) ซึ่งการสูญเสียอันเนื่องมาจากการออกแบบและกระบวนการผลิตเซลล์ โดยที่โอห์มมิกเป็นผลที่เกิดขึ้นจากตัววัสดุสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่หน้าสัมผัสของวัสดุ ได้แก่ รอยต่อระหว่างโลหะตัวนำกับสารกึ่งตัวนำ ส่วนการสูญเสียจากการจับตัวของอะตอมสารกึ่งตัวนำเกิดได้ทั้งในชั้นอิมิตเตอร์ (Emitter Layer) ส่วนเบส และระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ปัจจัยการลดทอนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแอมป์เซลล์แสงอาทิตย์
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562

2.9 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง

หลักการทำงานพื้นฐานของการสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง ดังรูปที่ 2.13 อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรอาจใช้เป็น (Power Transistor, Power Mosfer) หรือ (IGBT) ก็ได้ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ของสวิตช์ ดังในรูป (ก)

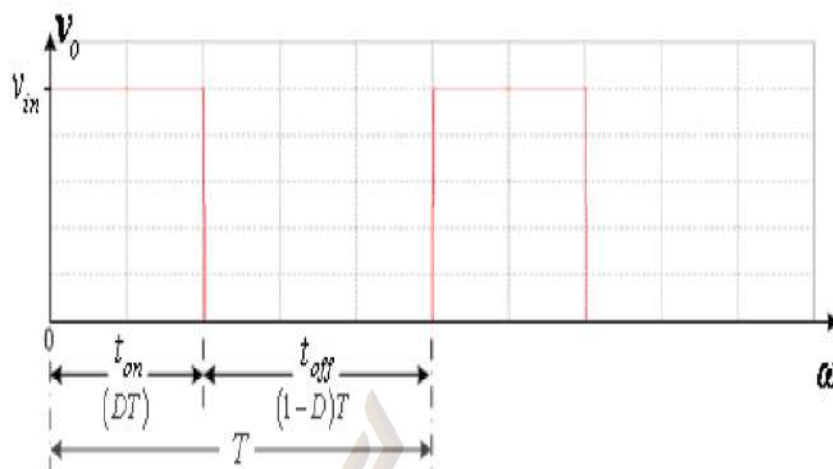


(ก) วงจรพื้นฐาน

(ข) วงจรสมมูลด้วยสวิตช์ควบคุม

รูปที่ 2.13 การทำงานสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟตรง

ที่มา: วินัย แสนจันทร์, 2555



รูปที่ 2.14 คลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ที่มา: วินัย แสนจันทร์, 2555

แรงดันเอาต์พุตจะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.14 โดยช่วงนำกระแสของแรงดันขึ้นอยู่กั
ช่วงเวลาทำงาน (Duty Cycle) ของสัญญาณควบคุมสวิตช์ ทั้งนี้ค่าแรงดันเฉลี่ยเอาต์พุตจะเท่ากับ

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s \cdot dt = D \cdot V_s \quad (2-13)$$

เมื่อ

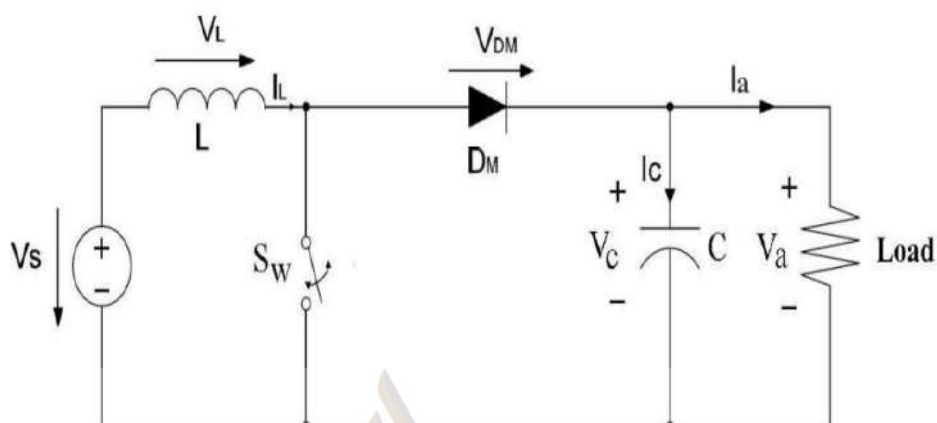
V_s = เป็นค่าแรงดันไฟตรงอินพุต

D = เป็นช่วงเวลาทำงาน ($D = t_{on}/T$)

T = เป็นช่วงเวลาใน 1 คาบ

2.9.1 วงจรทบระดับแรงดันไฟตรง (Boost Converter)

วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) เป็นวงจรที่ใช้สำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้า
ทางด้านเอาต์พุต (Output) ให้มีค่ามากกว่าแรงดันทางด้านอินพุต (Input) ที่ป้อนเข้ามาในวงจรหรือ
เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วงจรทบระดับ (Step-Up Converter) วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์จะใช้
มอสเฟสกำลัง (MOSFET) หรือไอจีบีที (IGBT) ดังรูปที่ 2.15 ทำหน้าที่แทนสวิตช์ โดยจังหวะหรือ
ความถี่ในการสวิตช์จะถูกควบคุมจากวงจรขับอีกทีหนึ่ง



รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจร Boost Converter

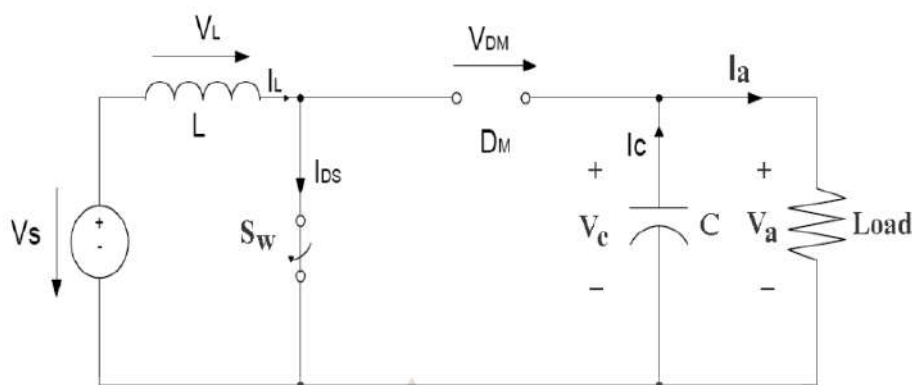
ที่มา: วินัย แสนจันทร์, 2555

2.9.2 สถานะขณะสวิตช์นำกระแส

การทำงานในโหมด (Mode) นี้ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) จะเห็นได้ว่า เมื่อสวิตช์ปิดพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (V_s) จะจ่ายให้ไปสะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ในระยะเวลาหนึ่งในช่วงเวลาที่สวิตช์ปิดอยู่โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (V_s) ตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์สถานะขณะสวิตช์นำกระแส กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายผ่านสวิตช์ ผ่านตัวเหนี่ยวนำไปยังโหลด โดยที่กระแสส่วนหนึ่งจะไหลผ่านตัวเก็บประจุ ซึ่งจะได้อสมการที่สำคัญดังนี้

$$V_L = V_{in} \quad (2-14)$$

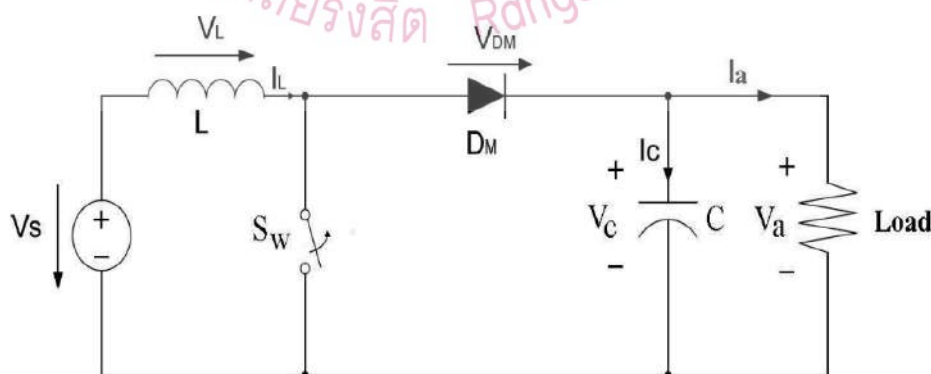
$$\Delta i_{L,on} = \left(\frac{v_{in}}{L} \right) DT \quad (2-15)$$



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลของ Boost Converter ขณะสวิตช์นำกระแส
ที่มา: วินัย แสงจันทร์, 2555

2.9.3 สถานะสวิตช์หยุดนำกระแส

การทำงานในโหมด (Mode) นี้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (V_s) และพลังงานไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำจะถูกส่งมาให้ยังโหลด โดยพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากตัวเหนี่ยวนำเกิดจากการคายพลังงานไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ หลังจากที่ได้สะสมพลังงานไว้ในช่วงเวลาที่ทำงานในโหมดสวิตช์เปิด (Mode Switch On) และจากการที่โหลดได้รับพลังงานไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและการคายพลังงานของตัวเหนี่ยวนำนี้เอง ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (Output) มีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต (Input)



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของ Boost Converter ขณะสวิตช์หยุดนำกระแส
ที่มา: วินัย แสงจันทร์, 2555

จากการทำงานของวงจรทั้ง 2 โหมดนี้ ทำให้เห็นได้ชัดว่าวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) จะมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดอยู่ตลอดเวลาถึงแม้ว่าจะมีบางส่วนของที่สวิตช์ไม่ได้ทำงานก็ตามและจากความสัมพันธ์ของการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) ทั้ง 2 โหมดนี้ เราสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้จากสมการ

$$V_a = \frac{V_s}{1-D} \quad (2-16)$$

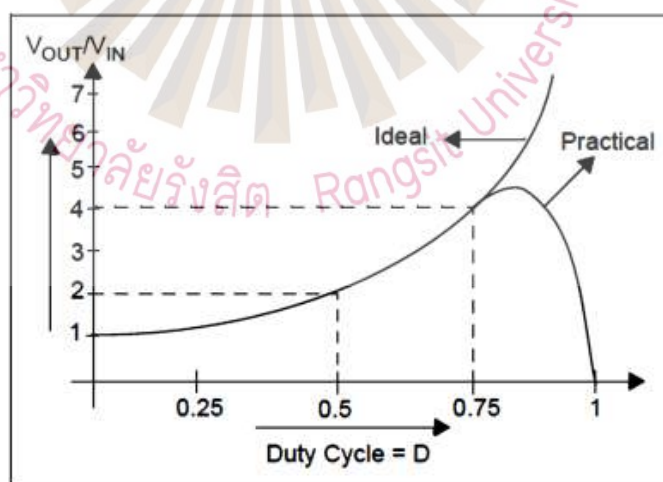
โดยที่

V_s = แรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

D = ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle)

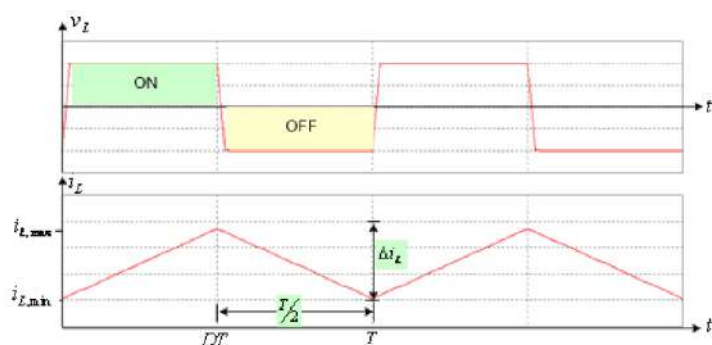
V_a = แรงดันเอาต์พุต (Output)

ซึ่งกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยทันที ซึ่งทำให้ไดโอดได้รับ Forward Bias ทำให้กระแสสามารถไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำได้อย่างต่อเนื่องและในขณะสภาวะคงตัว การเปลี่ยนแปลงของกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแสและขณะสวิตช์หยุดนำกระแสจะสมดุลกัน ซึ่งทำให้มีอัตราขยายแรงดันของวงจรดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้



รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ (V_o/V_{in}) กับ Duty Cycle ของ Boost Converter เชิงทฤษฎี

ที่มา: Mohamed, 2019



รูปที่ 2.19 รูปคลื่น V_L และ i_L ในวงจร Boost Converter

ที่มา: วินัย แสนจันทร์, 2555

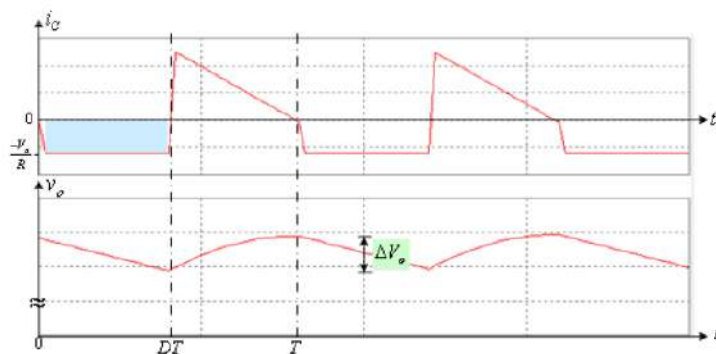
จากรูปที่ 2.19 รูปคลื่นของกระแสเอาต์พุต (i_o) ซึ่งแปรผันตาม i_L สามารถคำนวณได้จากการกระพือมของกระแส i_L ดังสมการที่ 2-17 และ 2-18

$$I_{L,max} = \left(\frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{V_{in}DT}{L} \right) \quad (2-17)$$

$$I_{L,min} = \left(\frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{V_{in}DT}{L} \right) \quad (2-18)$$

โดยค่าตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุด L_{min} ของวงจร Boost Converter สามารถคำนวณได้กรณี $i_L = 0$ ซึ่งทำให้คำนวณหาค่า L_{min} ได้จากสมการที่ 2-19

$$L_{min} = \left(\frac{D(1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \right) \quad (2-19)$$



รูปที่ 2.20 รูปคลื่นกระแส i_C และแรงดัน v_o ในวงจร Boost Converter

ที่มา: วินัย แสนจันทร์, 2555

จากรูปที่ 2.20 จะเห็นว่าระลอกคลื่น V_o จะสัมพันธ์กับระลอกคลื่น i_c ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาค่าขนาดของตัวเก็บประจุได้ ดังนี้

เนื่องจาก
$$\Delta Q = C \cdot \Delta V_o = I_o \cdot t_{on} \quad (2-20)$$

ทำให้
$$\Delta V_o = \frac{I_o \cdot t_{on}}{C} = \frac{V_o \cdot DT}{RC} \quad (2-21)$$

ดังนั้น
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RC \cdot f} \quad (2-22)$$

เมื่อ
$$i_o = \frac{V_o}{R} \text{ และ } t_{on} = DT \quad (2-23)$$

อย่างไรก็ตาม ค่า L และ C ที่จะใช้จริงในวงจร ควรมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้โดยเฉพาะ L ที่จะใช้ควรมีค่าสูงกว่า L_{min} มากกว่า 10 เท่าโดยประมาณ

2.10 มาตรฐานและข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบจำหน่าย

เมื่อเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย โดยใช้พลังงานระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีพิศกำลังการผลิตที่ค่อนข้างต่ำ คือ มีย่านกำลังตั้ง 100 วัตต์สูงสุด (วัตต์พีค) หมายถึง กำลังเอาต์พุตที่สามารถให้ได้ เมื่อแสงแดดมีความเข้มเต็มที่ สภาวะอุดมคติ จนถึง 1 เมกะวัตต์สูงสุดหรือมากกว่านั้น นอกจากนี้ระบบผลิตไฟฟ้าแบบนี้ถือว่าค่อนข้างใหม่ ประเทศอุตสาหกรรมบางประเทศยุโรปยังมีระบบผลิตไฟฟ้าชนิดนี้ติดตั้งใช้งานน้อย เช่น อังกฤษ ในช่วงแรกๆ ที่เริ่มมีการติดตั้งนั้นมาตรฐานทางด้านข้อกำหนดของอินเวอร์เตอร์ยังไม่ได้มีการกำหนดขึ้น การแก้ปัญหาทำโดยการขอเฝ้าข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบจำหน่ายที่มีอยู่แล้วมาใช้ก่อน คือ Engineering Recommendation G59 เป็นข้อบังคับเกี่ยวกับการเชื่อมต่ออุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปแบบใดๆ ที่ทำงานแบบขนาน หรือซิงโครไนซ์กับระบบกริดไฟฟ้าหลัก ซึ่งมีข้อบังคับและได้รับการปฏิบัติตามคำแนะนำทางวิศวกรรมของสมาคมเครือข่ายพลังงาน G59 กับคำแนะนำสำหรับการเชื่อมต่อของโรงงานผลิตไปยังระบบจำหน่ายของผู้ดำเนินการเครือข่ายการจัดจำหน่ายที่ได้รับ

ใบอนุญาต แต่เนื่องจาก G59 นี้ เขียนขึ้นมาเพื่อใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อบรรณานาย ซึ่งมีพิภดถึง 150KVA ทำให้ข้อกำหนดบางข้อกำหนดมาตรฐานนี้ เป็นอุปสรรคที่สำคัญที่ทำให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรณานายไม่สามารถติดตั้งใช้งานได้ ด้วยเหตุผลนี้ หน่วยงานที่มีหน้าที่ด้านนี้ในอังกฤษจึงร่างข้อกำหนดใหม่เรียกว่า G77 ร่างมาตรฐานนี้ ครอบคลุมระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้เอาต์พุตแบบเฟสเดียว ซึ่งมีพิภดไม่เกิน 5KVA ซึ่งถือว่าครอบคลุมระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งตามบ้านพักอาศัยส่วนใหญ่ ส่วนทางด้านสหรัฐอเมริกา (NEC) มีหัวข้อที่ 690 ซึ่งกำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับระบบเชื่อมต่อบรรณานายเช่นกัน

2.11 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการเชื่อมต่อบรรณานายเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อกำหนดที่เกี่ยวกับการเชื่อมต่อบรรณานายเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่าย ประกอบด้วย การป้องกันคุณภาพแรงดันไฟฟ้า การใช้งานและความปลอดภัย และการป้องกันแรงดันเกินรายละเอียดต่างๆ ที่จะกล่าวถึงนี้ส่วนใหญ่มีอยู่ในมาตรฐาน G77 ว่าด้วยการให้คำปรึกษาและคำแนะนำด้านวิศวกรรม Engineering Recommendation G77 ที่เผยแพร่ในปี 2543 โดยสมาคมการไฟฟ้าเพื่ออำนวยความสะดวกในการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์กับเครือข่ายสาธารณะ ซึ่งอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับการแปลงจาก DC เป็น AC ที่มีความถี่ใช้งานและเป็นอินเวอร์เตอร์ที่ผ่านการรับรองสำหรับเครื่องกำเนิดเซลล์แสงอาทิตย์ตามที่กำหนดไว้ในภาคผนวกการอนุมัติและการทดสอบตามข้อกำหนด โดยได้รับการยอมรับจาก Distribution Network Operators (DNOs) ในการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

2.12 การป้องกัน (Protection)

การป้องกันในที่นี้หมายถึง การป้องกันมิให้เกิด (Islanding) นั่นคือระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานโดยที่ไม่มีการจ่ายแรงดันจากการไฟฟ้า เมื่อการจ่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้าขาดหายไประบบเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องหยุดทำงานทันที เทคนิคการป้องกันการเกิด (Islanding) มีหลายวิธี เช่น วิธี Frequency Shift และวิธี Vector Shift เป็นต้น เทคนิคการตรวจจับแบบแอกติฟบางวิธีมีการส่งพัลส์กระแสเข้าไปยังวงจรของการไฟฟ้าทำให้รูปคลื่นของแรงดันผิดเพี้ยนไป ซึ่งวิธีเหล่านี้ข้อกำหนด G77 ไม่อนุญาตให้ใช้

ข้อพิจารณาอื่นๆ ภายใต้หัวข้อนี้ คือการรบกวนซึ่งกันและกันของอินเวอร์เตอร์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไปที่อยู่ใกล้กัน G77 ระบุว่าผู้ผลิตอินเวอร์เตอร์ต้องระบุไว้ในคู่มืออินเวอร์เตอร์ว่าอินเวอร์เตอร์นั้นๆ เมื่อนำไปต่อขนานกับอินเวอร์เตอร์ตัวอื่น ระบบตรวจจับการเกิด (Islanding) ต้องไม่รบกวนการทำงานของระบบตรวจจับ (Islanding) ของอินเวอร์เตอร์ตัวอื่น ข้อนี้ต้องมีการพิจารณาให้มากในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ที่จะนำมาต่อขนานกันใช้หลักการตรวจจับ (Islanding) คนละหลักการ ตัวอย่างเช่น การตรวจจับด้วยวิธี Frequency Shift โดยที่อินเวอร์เตอร์ทั้งสองตัว ตัวหนึ่งพยายามเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้น ส่วนอีกตัวหนึ่งพยายามลดความถี่ให้ต่ำลง และเมื่อแรงดันหรือความถี่ไฟฟ้าออกนอกย่านที่กำหนด อินเวอร์เตอร์ต้องหยุดทำงานโดยอัตโนมัติ สำหรับมาตรฐาน G77 กำหนดความกว้างของย่านการทำงานดังนี้

- 1) แรงดัน $230V \pm 10$ เปอร์เซ็นต์
- 2) ความถี่ $50Hz \pm 1$ เปอร์เซ็นต์ หรือ -6 เปอร์เซ็นต์ ของ LV, HV คือ ค่าเฉลี่ยปัจจัยพื้นฐานที่วัดนานกว่า 10 วินาที ตามมาตรฐาน EN 50160

ในด้านเวลาที่ใช้นั้นอินเวอร์เตอร์ต้องหยุดการทำงานภายใน 5 วินาที หลังเกิดสภาวะ (Islanding) และการต่อกลับเข้าสู่วงจรอีกจะต้องรอเวลาไม่ต่ำกว่า 3 นาที หลังจากแรงดันและความถี่ของไฟฟ้าจากการไฟฟ้ามีค่ากลับมาอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดและในกรณีที่ระบบจำหน่ายมีการใช้รีโคลสเซอร์ อินเวอร์เตอร์ต้องไม่ชำรุดเสียหายจากการทำงานรีโคลสเซอร์

การป้องกันการเกิด (Islanding) นั้นอาจกระทำโดยวงจรป้องกันที่สร้างรวมไว้กับวงจรของอินเวอร์เตอร์หรือด้วยรีเลย์ภายนอกก็ได้ มาตรฐาน G77 ระบุว่า การตัดวงจรออกจากวงจรของการไฟฟ้าควรกระทำโดยใช้หน้าสัมผัสทางกลแทนที่จะเป็นทางอิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น

2.13 คุณภาพแรงดันไฟฟ้า (Power Quality)

ข้อกำหนดทางด้านคุณภาพแรงดันไฟฟ้านั้น ใช้จาก (Engineering Recommendation G.5/3) โดยที่จะมีการกำหนดเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนอาร์มอนิกส์รวมไว้ในการพิจารณาความเพี้ยนอาร์มอนิกส์นี้ให้พิจารณาเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ Partial Load ซึ่งเป็นสภาวะที่อินเวอร์เตอร์ทำงานเป็นส่วนใหญ่มิใช่ที่ภาระทางไฟฟ้าเต็มพิกัด

ในด้านตัวประกอบกำลัง G77 ระบุว่าตัวประกอบกำลังต้องมีค่าระหว่าง 0.95 Lead จนถึง 1.0 Lead ส่วนในด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) จะใช้มาตรฐานยุโรปเป็นบรรทัดฐานโดยอินเวอร์เตอร์ต้องมีเครื่องหมาย CE ติดแสดงไว้ที่ตัวถังของอินเวอร์เตอร์ด้วย

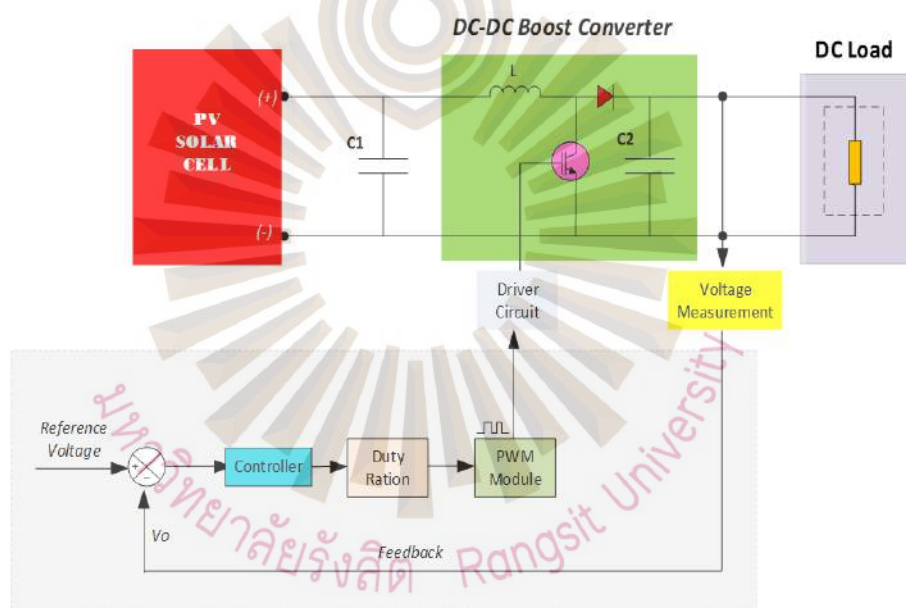
อินเวอร์เตอร์ต้องไม่มีการส่งไฟฟ้ากระแสตรง (DC Current) เข้าสู่วงจรของการไฟฟ้า G77 แนะนำให้มีการต่อหม้อแปลงคั่นไว้ระหว่างอินเวอร์เตอร์กับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า อย่างไรก็ตามหม้อแปลงนี้อาจจะทิ้งได้หากอินเวอร์เตอร์มีระบบตัดการทำงานเมื่อวงจรป้องกันตรวจพบไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกจากอินเวอร์เตอร์มีค่าเกินกว่า 5 มิลลิแอมแปร์



บทที่ 3

การออกแบบ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากำลังของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบ (Photovoltaic-Off Grid System) ดังรูปที่ 3.1 โดยทำการออกแบบตัวควบคุมให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ ภายใต้เงื่อนไขไม่คงที่ของโหลดและความเข้มแสงและอุณหภูมิ ซึ่งมีวิธีการออกแบบดังนี้



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองการทำงานตัวควบคุม

3.1 พิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้ขนาด 305 วัตต์ และมีค่าพารามิเตอร์ซึ่งสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) ขนาด 54.7 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ขนาด 5.58 แอมป์ ที่ค่าความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์

คุณสมบัติ	พารามิเตอร์
แรงดันไฟฟ้า (V_{mp})	54.7 Vdc.
กระแสไฟฟ้า (I_{mp})	5.58 A.
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max})	305 W.
ประเภทเซลล์	Mono Crystalline Silicon
จำนวนเซลล์	96

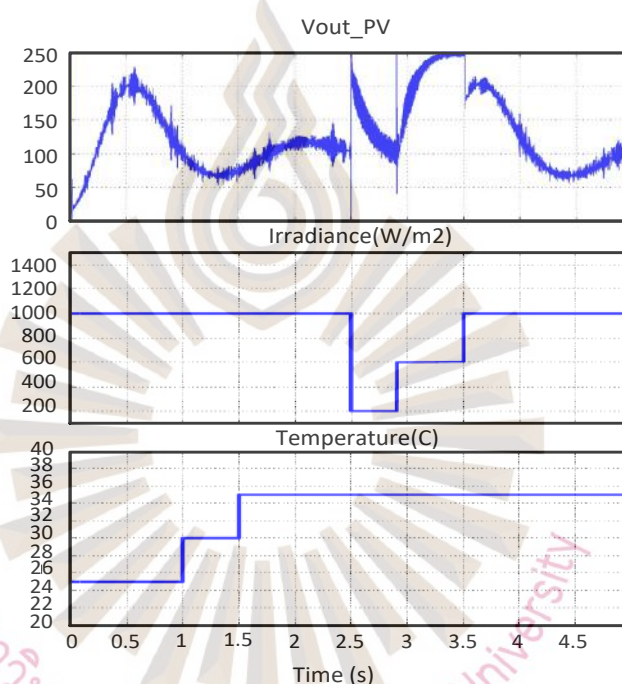
3.2 การออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้ากำลังของเซลล์แสงอาทิตย์

การออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ได้ทำการออกแบบระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ภายใต้เงื่อนไขของความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ไม่คงที่ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองและพฤติกรรมตามที่ต้องการของระบบควบคุมระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุต (Error) โดยการกำหนดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตใช้งานที่ 500 โวลต์ดีซี เมื่อนำมาต่อร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีลักษณะการต่อใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์รวมกันแบบอนุกรมจำนวน 5 แผง และแบบขนานจำนวน 30 แผงเป็นแหล่งจ่าย โดยใช้วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เพิ่มแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีพารามิเตอร์ใช้สำหรับกำหนดค่าความเหนี่ยวนำ L_{min} และค่าตัวเก็บประจุ $C_{min}(C1, C2)$ ที่เลือกใช้ในการออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เป็นค่าต่ำสุด เพื่อช่วยลดกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสเพื่อสำหรับการสูญเสียที่น้อยลงและการควบคุมที่ดีขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์ D_{max} ให้รอบการทำงานสูงสุดที่ 80% ส่วนค่า f_s ให้ความถี่สวิตชิ่ง สำหรับการศึกษานี้ โดยมี $\Delta V_0/V_0 = 0.01$ หมายถึง 1% ของแรงดันไฟฟ้ากระแสเพิ่มในระบบที่ช่วยให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีระลอกคลื่นต่ำ ซึ่งมีพารามิเตอร์กำหนดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง

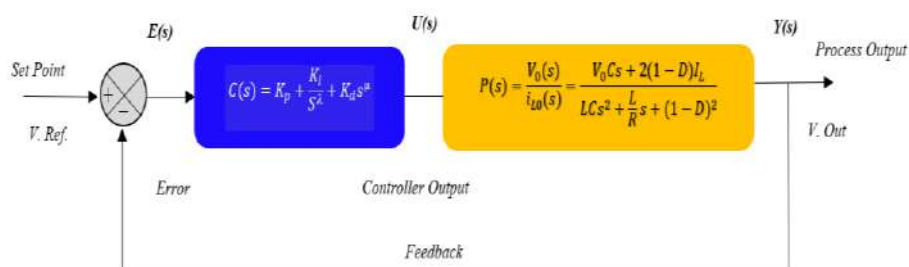
คุณสมบัติ	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์
แรงดันไฟฟ้าอินพุต	V_{in}	50 – 110Vdc
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	V_{out}	500Vdc
เซลล์แสงอาทิตย์ต่อแบบอนุกรม	(N_{ser})	5
เซลล์แสงอาทิตย์ต่อแบบขนาน	(N_{par})	30
ช่วงระดับการฉายรังสี	W/m^2	200 – 1000
ช่วงระดับอุณหภูมิ	$^{\circ}C$	25 – 35
ตัวตัดไซเคลิล	D_{max}	0.8
ตัวเหนี่ยวนำ	L_{min}	5×10^{-3}
ตัวเก็บประจุ	$C1_{min}$	10×10^{-6}
ตัวเก็บประจุ	$C2_{min}$	1200×10^{-7}
โหลดต้านทาน	$Load$	30 Ohm

การทดสอบการทำงานของตัวควบคุมต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงจากความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับโหลด ซึ่งมีสภาวะการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้พลังงานสูงสุด ภายใต้การทดสอบตามมาตรฐาน (STC) ตามที่กำหนดไว้ใน IEC 60904-3 ดังรูปที่ 3.2 แสดงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนเข้าวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ โดยระบบจะมีตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID เป็นตัวดำเนินการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 3.2 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของการฉายรังสีและอุณหภูมิสูง/ต่ำ

โดยกำหนดให้ $U(s)$ คือ สัญญาณควบคุม $E(s)$ เป็นสัญญาณของความผิดพลาดหรือความแตกต่างระหว่างค่า Set Point และ $Y(s)$ ค่าที่วัดได้จริงในระบบควบคุม ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ FOPID

ซึ่งมีสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนของ $P(s)$ ดังนี้

$$P(s) = \frac{V_o(s)}{i_L(s)} = \frac{V_o C s + 2(1-D)I_L}{L C s^2 + \frac{L}{R} s + (1-D)^2} \quad (3-1)$$

สำหรับฟังก์ชันการถ่ายโอนของ $C(s)$ คือ

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s^\mu \right) \quad (3-2)$$

โดยมีฟังก์ชันการถ่ายโอนลูปปิด $H(s)$ ของระบบ คือ

$$H(s) = \frac{C(s)P(s)}{(1+C(s)P(s))} \quad (3-3)$$

จากสมการที่ 3-3 มีฟังก์ชันการถ่ายโอนสำหรับพารามิเตอร์ของระบบควบคุมทดสอบที่ได้มีการปรับปรุงขึ้นโดยการปรับพารามิเตอร์การควบคุมแบบ FOPID ให้เหมาะสมกับการตอบสนองของระบบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

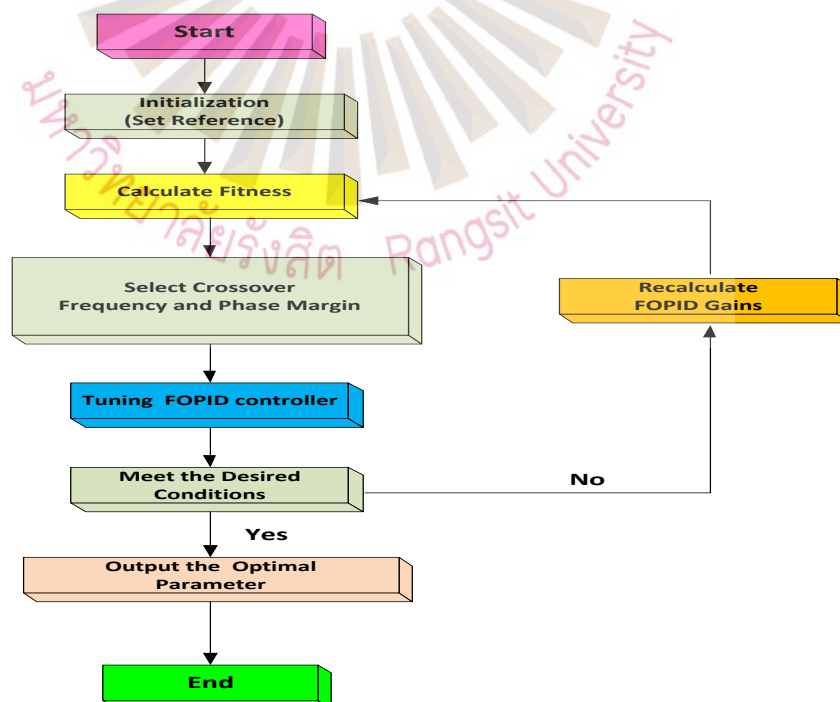
- 1) การสร้างแบบจำลอง
- 2) การปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุม
- 3) การทดสอบแบบจำลองและผลลัพธ์

สังเกตว่าอุปกรณ์เพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่รูปแบบเอาต์พุตที่ต้องการ โดยตัวควบคุมจะส่งสัญญาณการทำงานในโหมดสลับกันอยู่เสมอด้วยสวิตซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะใช้เทคนิค PWM ทั้งสอง ส่วนจะถูกเชื่อมโยงกันด้วยลูปป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจริงกับเอาต์พุตที่ต้องการ ซึ่งมีการตรวจสอบขนาดของข้อผิดพลาดและการตอบสนองตามอัตราขยายผ่านตัวควบคุมในระบบ

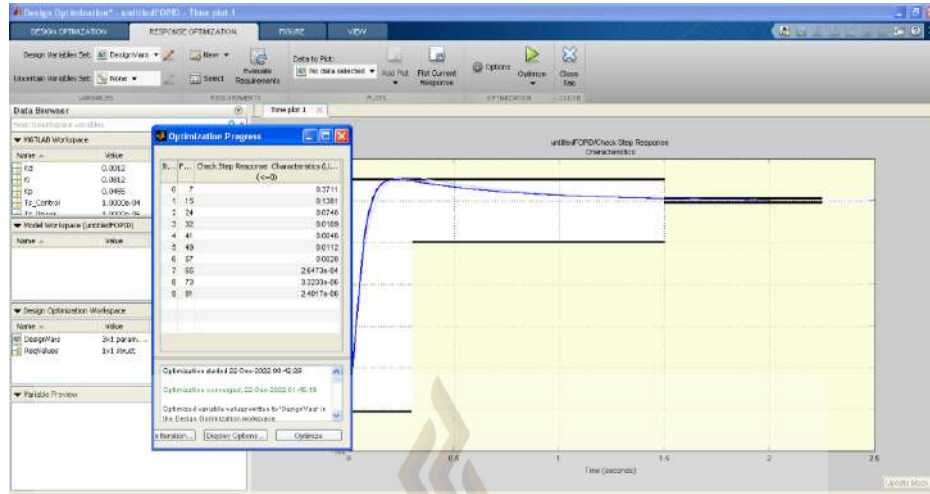
3.3 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยวิธีการติดตามสัญญาณอ้างอิง

กำหนดจำนวนสมาชิกของแต่ละพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการหาคำตอบ โดยสร้างจากช่วงของคำตอบที่เป็นไปได้ในรูปแบบการสุ่มค่าพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าพารามิเตอร์อัตราขยายแบบลองผิดลองถูก ดังผลตารางที่ 4.2
- 2) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดให้มีค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนที่ $K_p, K_i, \lambda, K_d, \mu \in [0,100]$ ลงใน Tuning PID Control Toolbox โปรแกรม MATLAB
- 3) การประเมินค่าของแต่ละพารามิเตอร์ สามารถลดขอบเขตด้วยสมการที่ 3-9
- 4) ค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ด้วยวิธีการหาค่าความผิดพลาดถ่วงน้ำหนัก ดังสมการที่ 3-10
- 5) ปรับปรุงสมรรถนะพารามิเตอร์ให้เหมาะสมที่สุดของตัวแปรในการควบคุมกระบวนการ ดังสมการที่ 3-11
- 6) กำหนดผลการตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมด้วยฟังก์ชันเป้าหมายด้วยสมการที่ 3-12 และ 3-13



รูปที่ 3.4 แผนผังการเพิ่มสมรรถนะตัวควบคุมด้วยการติดตามสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 3.5 Tuning PID Control Toolbox ในโปรแกรม MATLAB

3.3.1 ขั้นตอนการเพิ่มสมรรถนะปรับจูน

กำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ โดยอัลกอริทึมที่อยู่ภายใต้ข้อจำกัด $y_1(t)$, $y_2(t)$ และไม่เกิน $y_n(t)$ ภายใต้ขอบเขต $y_{bound}(t)$ ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$bound(t) = \begin{cases} y_1(t)t_1 \leq t \leq t_2 \\ y_2(t)t_2 \leq t \leq t_3 \\ \vdots \\ y_n(t)t_n \leq t \leq t_{n+1} \end{cases} \quad (3-4)$$

ซึ่งผลต่างของพารามิเตอร์เอาต์พุต $y_{bound} - y_{sim}$

คำนวณภายใต้ขอบเขตล่าง ดังสมการ

$$c = \begin{bmatrix} \max_{t_1 \leq t \leq t_2} & y_{bound} - & y_{sim} \\ \max_{t_1 \leq t \leq t_3} & y_{bound} - & y_{sim} \\ \max_{t_n \leq t \leq t_{n+1}} & y_{bound} - & y_{sim} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

และผลต่างของพารามิเตอร์เอาต์พุตจะคำนวณภายใต้ขอบเขตบน ดังสมการ

$$c = \begin{bmatrix} \max_{t_1 \leq t \leq t_2} & y_{sim} - & y_{bound} \\ \max_{t_1 \leq t \leq t_3} & y_{sim} - & y_{bound} \\ \max_{t_n \leq t \leq t_{n+1}} & y_{sim} - & y_{bound} \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

3.3.2 ขั้นตอนการระบุสัญญาณ

กำหนดสัญญาณอ้างอิงเป็นแอมพลิจูดของเวลา ดังสมการ

$$y_{ref}(t_{ref}), t_{ref} \in t_{ref0}, t_{ref0}, \dots, t_{refn} \quad (3-7)$$

จากนั้นทำการคำนวณการตอบสนองทางเวลา ดังสมการ

$$y_{sim}(t_{sim}), t_{sim} \in t_{sim0}, t_{sim1}, \dots, t_{simn} \quad (3-8)$$

หลังจากนั้นค่าจะถูกนำมาใช้ โดยการรวมเวลากันทั้งสองและตั้งค่าเริ่มใหม่ เรียกว่า t_{new} ในขณะที่ค่าอื่นๆ ทั้งหมดที่เป็นค่าอยู่นอกขอบเขตนี้จะลดลง ในขั้นตอนถัดไปสำหรับ t_{new} จะมีการคำนวณ y_{ref} และ y_{sim} ได้ดังต่อไปนี้

$$e(t_{new}) = \frac{(y_{sim}(t_{new}) - y_{ref}(t_{new}))}{\frac{\max_{y_{ref}}}{t_{new}}}, t_{refn} \quad (3-9)$$

ซึ่งค่า $\frac{\max_{y_{ref}}}{t_{new}}$ คือ สัดส่วนเวลาสูงสุดในแต่ละรอบการคำนวณ

และขั้นตอนสุดท้าย ข้อผิดพลาดอินทิกรัลถ่วงน้ำหนัก W ซึ่งค่า f จะคำนวณได้ดังนี้

$$f = \int W(t) e(t)^2 dt \quad (3-10)$$

โดยการประเมินความต้องการ W จะพิจารณาเลือกวิธีการตามข้อกำหนดต่อไปนี้

- 1) วิธีการผลรวมฟังก์ชันประสิทธิภาพข้อผิดพลาดรวมกำลังสอง
- 2) วิธีการผลรวมฟังก์ชันประสิทธิภาพข้อผิดพลาดสัมบูรณ์
- 3) วิธีการเศษเหลือถ่วงน้ำหนักเฉลี่ย

สำหรับการพิจารณาจะเลือกเป็นวิธีการผลรวมฟังก์ชันประสิทธิภาพข้อผิดพลาดรวมกำลังสองในการทดสอบ ซึ่งซอฟต์แวร์จะคำนวณข้อผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงและจุดทดสอบ

3.3.3 ขั้นตอนการเพิ่มสมรรถนะของพารามิเตอร์

$$\min F(x)$$

$$C(x) \leq 0 \quad (3-11)$$

$$X_1 \leq X \leq X_2$$

โดยที่ $F(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $C(x)$ เป็นฟังก์ชันจำกัด X_1 เป็นขอบล่าง และ X_2 เป็นขอบบน

3.3.4 ฟังก์ชันเป้าหมาย

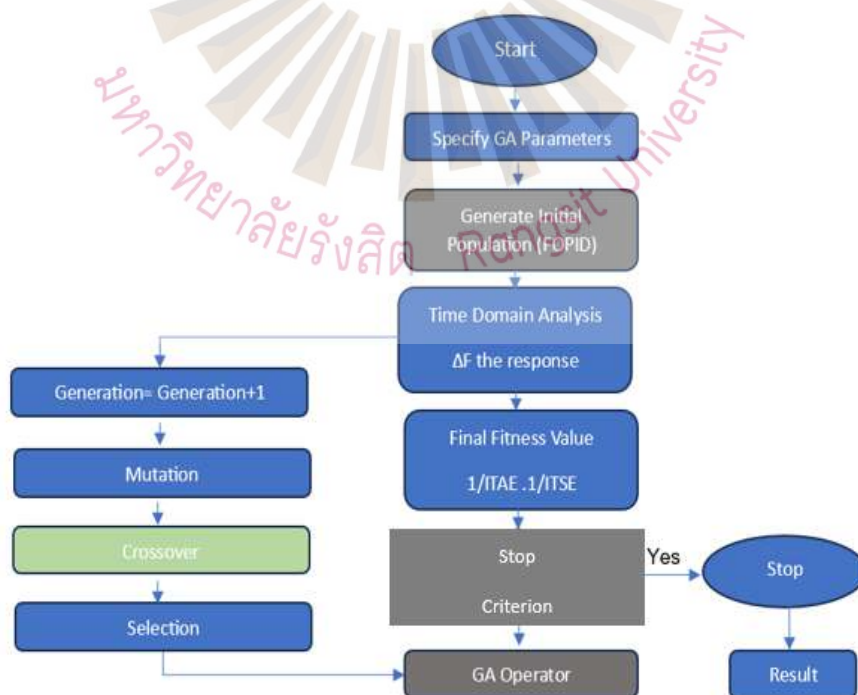
กำหนดดัชนีสมรรถนะในการควบคุมอัตโนมัติผ่านผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปแบบผลรวมค่าความผิดพลาด ITAE และ ITSE ได้ ดังสมการที่ 3-12 และ 3-13 โดยประสิทธิภาพของระบบควบคุมจะถูกวัดอย่างเท่าเทียมกันเพื่อให้ได้สมรรถนะดีที่สุด

$$ITAE = \int_0^t t|e(t)| dt \quad (3-12)$$

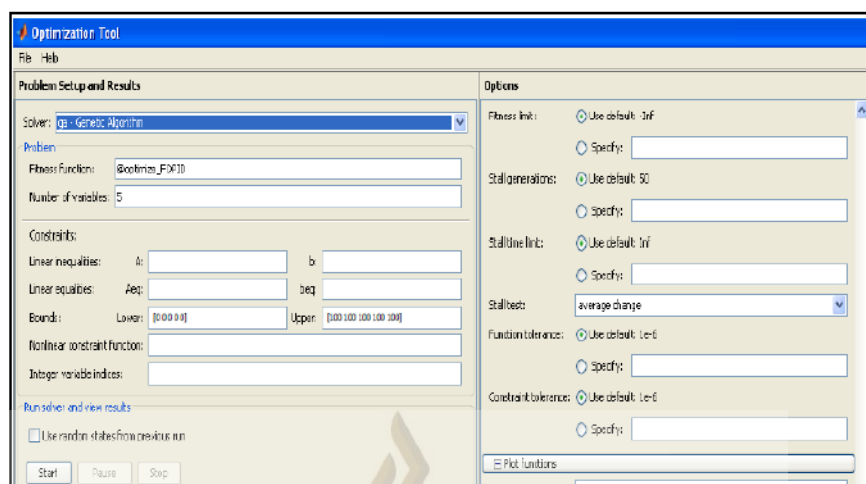
$$ITSE = \int_0^t te^2(t) dt \quad (3-13)$$

3.4 การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีอันดับเศษส่วนด้วยจีเนติกอัลกอริทึม

อัลกอริทึมทางพันธุกรรมเป็นหมวดหมู่หลักของอัลกอริทึมวิวัฒนาการที่สร้างความละเอียดในการเพิ่มประสิทธิภาพการรักษา ซึ่งทำงานเลียนแบบกระบวนการทางธรรมชาติ โดย John H. Holland ได้เสนอการใช้จีเนติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุด เช่น การคัดเลือก การสืบทอด การกลายพันธุ์ และการข้ามอัลกอริทึมทางพันธุกรรม ซึ่งดำเนินการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพอัตราผลลัพธ์ของวิธีการควบคุม สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกมีการเสนอตัวควบคุมเพื่อลดข้อผิดพลาดของเอาต์พุตตอบสนองต่อสัญญาณ ซึ่งข้อผิดพลาดจะถูกคำนวณอย่างเท่าเทียมกัน โดยการลดข้อผิดพลาดระหว่างขั้นตอนหน่วยของการตอบสนองอินพุต โดยทั่วไปจะระบุไว้ในความสัมพันธ์ของจำนวนฟิตเนส และการกำหนดค่าของอัลกอริทึมทางพันธุกรรม การปรับเปลี่ยนปัจจัยตัวควบคุม ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังการเพิ่มสมรรถนะตัวควบคุมด้วยจีเนติก



รูปที่ 3.7 (GA) Toolbox ในโปรแกรม MATLAB

โดยมีตัวดำเนินการ (Operators) หลัก 3 ส่วน คือ 1. Selection 2. Mutation 3. Crossover ซึ่งในแต่ละรอบของการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้

Start หมายถึง การสร้างกลุ่มประชากรเริ่มต้นจำนวน N ค่าในรูปแบบ Chromosomes โดยการสุ่มภายในกรอบหรือช่วงของคำตอบที่เป็นไปได้

Fitness หมายถึง การคำนวณหาค่า Fitness ของประชากรแต่ละตัวหรือค่าของ Chromosomes ทุกตัว

New Population หมายถึง การสร้างประชากรรุ่นใหม่ ซึ่งมีลำดับดังต่อไปนี้

1) Selection คือ การเลือกประชากรต้นแบบที่ละคู่ โดยสุ่มจากความน่าจะเป็นที่คำนวณจากค่า Fitness ของประชากรแต่ละตัว

2) Mutation คือ การใช้ความน่าจะเป็นของการเกิดผ่าเหล่า เพื่อเปลี่ยนค่าของตัวเลขบนตำแหน่งที่ถูกสุ่มมาจาก Chromosome

3) Crossover คือ การสุ่มเลือกตำแหน่งของการ Cross Over ระหว่างคู่ประชากรที่ถูกสุ่มเลือกมาแล้ว เพื่อสร้างประชากรรุ่นใหม่

4) Final Fitness Value คือ การค้นหาคำตอบในแต่ละรอบ โดยมีเกณฑ์หรือเงื่อนไขให้หยุดค้นหาคำตอบ เมื่อค้นพบคำตอบที่เหมาะสมหรือครบรอบจำนวนรอบสูงสุดในการคำนวณ

3.4.1 ขั้นตอนการปรับจูนโดยใช้จีเนติกอัลกอริทึม (GA)

เบื้องต้นระบุพารามิเตอร์อัลกอริทึมลักษณะสำคัญที่จะพิจารณาจากการใช้ GA Toolbox ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.3 ค้นหาคำตอบ โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายเป็นเกณฑ์ กำหนดที่ค้นหาคำตอบที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์จีเนติกอัลกอริทึมในโปรแกรม MATLAB

ฟังก์ชันฟิตเนส (ดัชนีประสิทธิภาพ)	1/ITAE & 1/ITSE
วิธีการคัดเลือก	Tournament
ขนาดรุ่น	5
ขนาดประชากร	30
วิธีครอสโอเวอร์	Arithmetic Crossover
วิธีการกลายพันธุ์	Adaptive Feasible
รุ่นสุดท้าย	50

1) สร้างพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID โดยสุ่ม $K_p, K_i, \lambda, K_d, \mu$ แสดงด้วยเมทริกซ์ของโซลูชันที่เหมาะสมสำหรับแต่ละรายการชุดที่มีอยู่เมทริกซ์ประชากร (Population) ดังสมการที่ 3-14

$$\text{ประชากร } (P) = \begin{matrix} & K_{p1} & K_{i1} & \lambda_1 & K_{d1} & \mu_1 \\ & K_{p2} & K_{i2} & \lambda_2 & K_{d2} & \mu_2 \\ & K_{p3} & K_{i3} & \lambda_3 & K_{d3} & \mu_3 \\ & K_{pn} & K_{in} & \lambda_n & K_{nn} & \mu_n \end{matrix} \quad (3-14)$$

โดยที่ n คือ จำนวนประชากร

1) กำหนดให้มีค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนที่ $K_p, K_i, \lambda, K_d, \mu \in [0,100]$

2) คำนวณค่าความเหมาะสมสำหรับโซลูชันทุกชุดฟังก์ชันฟิตเนสในอัลกอริทึม ดังสมการที่ 3-14

- 3) คัดเลือกจำนวนประชากรที่จำกัดและมีประสิทธิภาพมากกว่า
- 4) การรวมชุดของตัวเลือกใหม่ $K_p, K_i, \lambda, K_d, \mu$ จากตัวเลือกที่ดีที่สุดในลูปก่อนหน้า
- 5) การใช้ฟังก์ชันโอเปอเรเตอร์ทางพันธุกรรมแบบครอสโอเวอร์และการกลายพันธุ์
- 6) ทำซ้ำขั้นตอนก่อนหน้าตั้งแต่ข้อ 3-6 จนกว่าจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมที่เหมาะสม

ที่สุด

- 7) กำหนดฟังก์ชันเป้าหมายผ่านผลตอบแทนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในรูปแบบผลรวมค่า

ความผิดพลาด ITAE และ ITSE



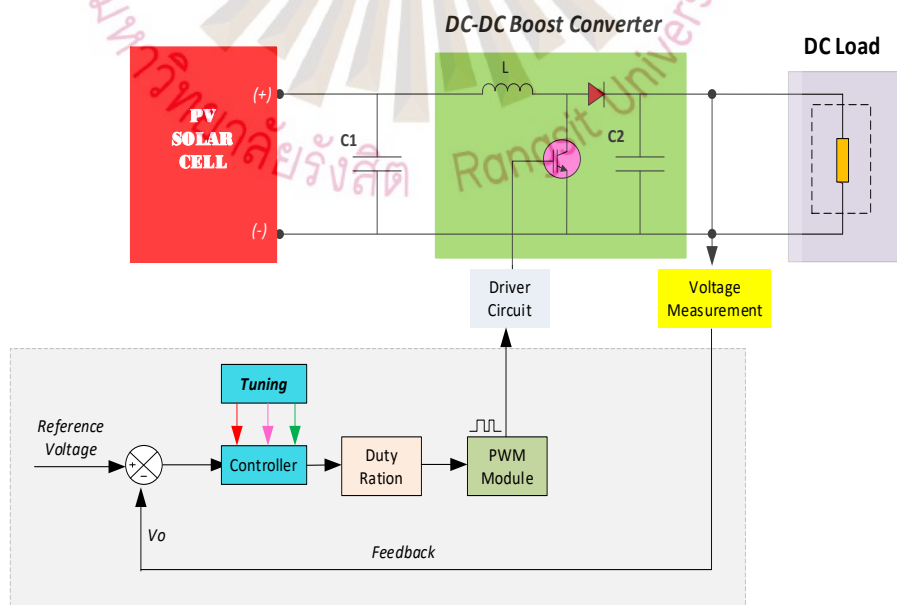
บทที่ 4

ผลการทดลองวิจัย

บทนี้นำเสนอผลการทดลองตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ โดยการทดสอบการทำงานแบ่งออกเป็น การทดสอบแบบลองผิดลองถูกและวิธีเพิ่มสมรรถนะปรับจูนที่ใช้แหล่งจ่ายจากพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงการทดสอบผ่านกรณีสมรรถนะการควบคุม ดังนี้

4.1 การทำงานของตัวควบคุมแบบลองผิดลองถูกปรับจูน โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบการทำงานของตัวควบคุมแบบปรับจูนตามประสบการณ์ผู้ออกแบบ แบ่งออกเป็น การทดสอบแบบลองผิดลองถูก โดยมีตัวควบคุม (PID Controller) และ (FOPID Controller) เป็นตัวดำเนินการ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองการทำงานตัวควบคุมแบบลองผิดลองถูกปรับจูน

4.1.1 ผลการทำงานของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านการลองผิดลองถูกปรับจูน

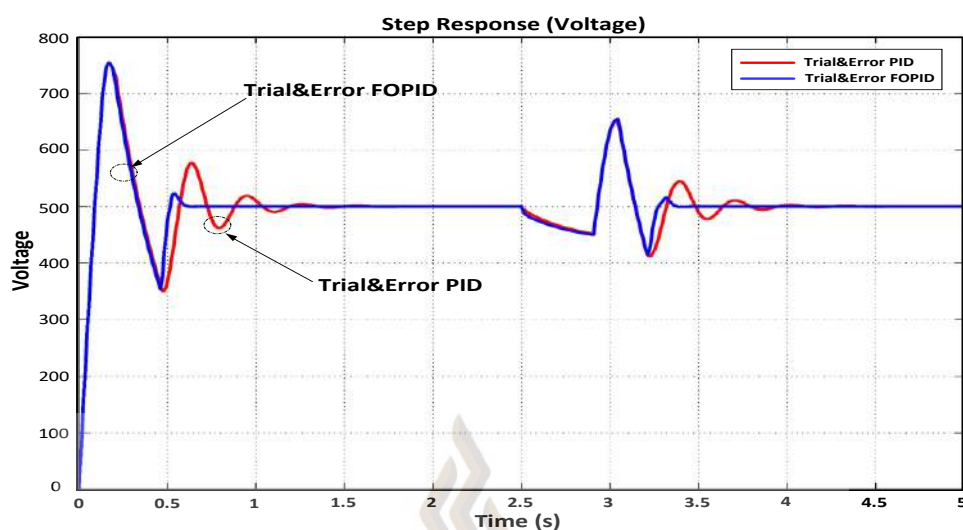
ผลการทดสอบแสดงการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ที่นำเสนอวิธีการควบคุมแบบ PID มีค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 755 โวลต์ดีซี และมีเวลาเข้าที่ 1.95 วินาที และมีค่าพุงเกิน 33.7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวิธีการควบคุมแบบ FOPID มีค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 753 โวลต์ดีซี และมีเวลาเข้าที่ 0.65 วินาที และมีค่าพุงเกิน 33.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการที่ 500 โวลต์ดีซี และใช้เวลาในการทดสอบ 5 วินาที โดยมีผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับการควบคุมผ่านการลองผิดลองถูก

แบบวิธี	แรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตสูงสุด	ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ต้องการ	เวลาเข้าที่ (วินาที)	(%) ค่าพุงเกิน
Trial & Error_ PID 	755Vdc	500Vdc	1.95	33.7
Trial & Error_ FOPID 	753Vdc	500Vdc	0.65	33.5

ตารางที่ 4.2 ผลการหาค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ผ่านการลองผิดลองถูก

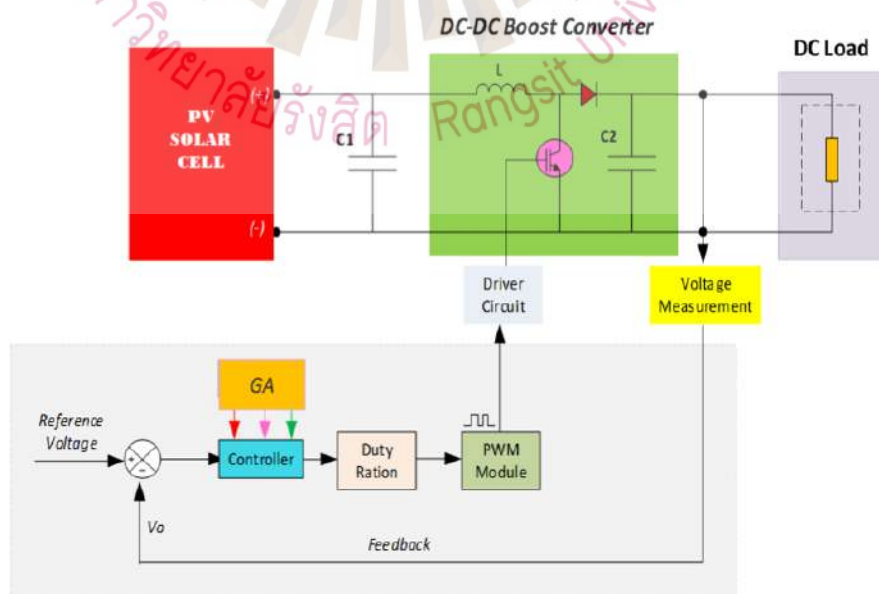
แบบวิธี	K_p	K_i	K_d	λ	μ
Trial & Error_PID 	0.01	0.9	0.02	-	-
Trial & Error_FOPID 	0.01	0.9	0.02	1	0.5



รูปที่ 4.2 กราฟผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบการลองผิดลองถูก

4.2 การทำงานของตัวควบคุมพารามิเตอร์แบบจีเนติก (GA) โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบการทำงานของตัวควบคุมแบบจีเนติก (GA) ตามผู้ออกแบบ แบ่งออกเป็นการทดสอบเพิ่มสมรรถนะ โดยมีตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID เป็นตัวดำเนินการ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองการทำงานตัวควบคุมจีเนติก (GA)

4.2.1 ผลการทำงานของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านจินตคณิต (GA)

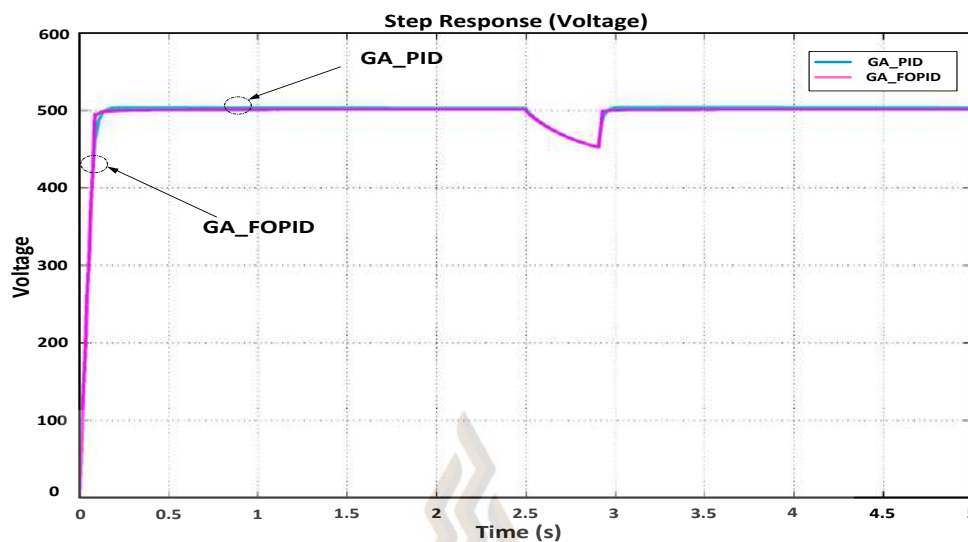
ผลการทดสอบแสดงการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ที่นำเสนอวิธีการควบคุมแบบ PID มีค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 503 โวลต์ดีซี และมีเวลาเข้าที่ 0.5 วินาที และมีค่าฟุงเกิน 1.75 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวิธีการควบคุมแบบ FOPID มีค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 501 โวลต์ดีซี และมีเวลาเข้าที่ 0.19 วินาที และมีค่าฟุงเกิน 0.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการที่ 500 โวลต์ดีซี และใช้เวลาในการทดสอบ 5 วินาที โดยมีผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับตัวควบคุมผ่านจินตคณิต

แบบวิธี	แรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตสูงสุด	ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ต้องการ	เวลาเข้าที่ (วินาที)	(%) ค่าฟุงเกิน
GA_PID 	503Vdc	500Vdc	0.5	1.75
GA_FOPID 	501Vdc	500Vdc	0.19	0.39

ตารางที่ 4.4 ผลการหาค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ผ่านจินตคณิต

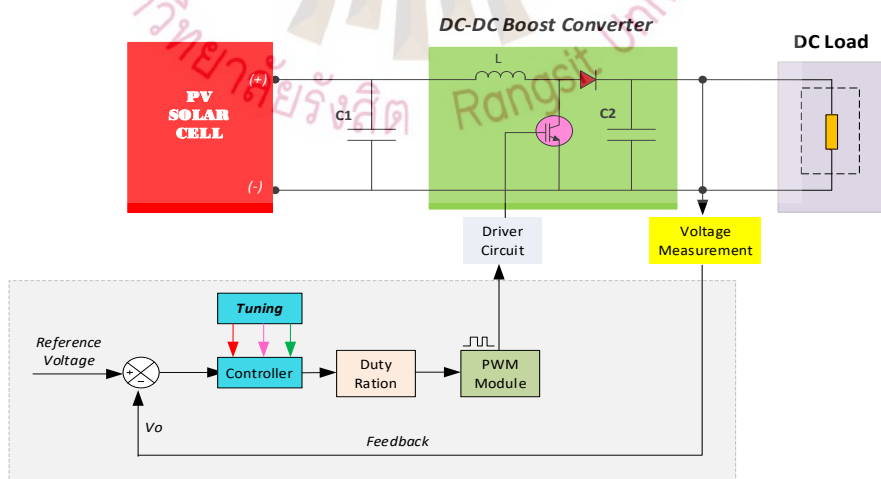
แบบวิธี	K_p	K_i	K_d	λ	μ
GA_PID 	0.006	0.193	0.001	-	-
GA_FOPID 	0.180	0.151	0.02	0.17	0.31



รูปที่ 4.4 กราฟผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าแอต์พุตแบบเพิ่มสมรรถนะ (GA)

4.3 การทำงานของตัวควบคุมพารามิเตอร์แบบติดตามสัญญาณอ้างอิง โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบการทำงานของตัวควบคุมแบบติดตามสัญญาณอ้างอิงผู้ออกแบบ แบ่งออกเป็นการทดสอบเพิ่มสมรรถนะ โดยมีตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID เป็นตัวดำเนินการ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองการทำงานตัวควบคุมการปรับจูน

4.3.1 ผลการทำงานของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านการติดตามสัญญาณอ้างอิง

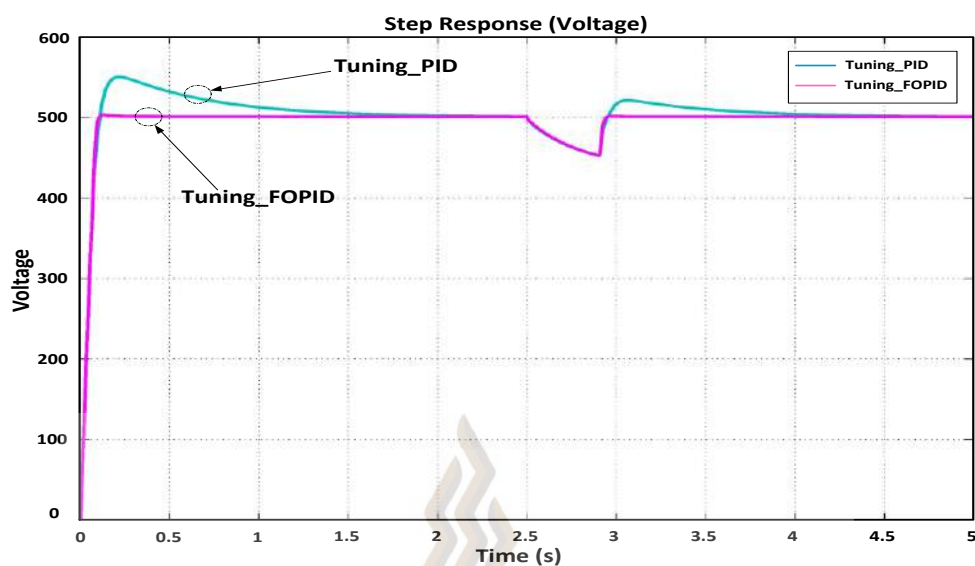
ผลการทดสอบแสดงการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ที่นำเสนอวิธีการควบคุมแบบ PID มีค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 505 โวลต์ดีซี และมีเวลาเข้าที่ 2 วินาที และมีค่าฟุงเกิน 9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวิธีการควบคุมแบบ FOPID มีค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดเท่ากับ 503 โวลต์ดีซี และมีเวลาเข้าที่ 0.49 วินาที และมีค่าฟุงเกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการที่ 500 โวลต์ดีซี และใช้เวลาในการทดสอบ 5 วินาที โดยมีผลการทดสอบดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับตัวควบคุมผ่านการติดตามสัญญาณอ้างอิง

แบบวิธี	K_p	K_i	K_d	λ	μ
Tuning_PID 	0.0455	0.8812	0.0012	-	-
Tuning_FOPID 	1.8907	0.0350	0.0140	0.03927	1.0614

ตารางที่ 4.6 ผลการหาค่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบ PID และแบบ FOPID ผ่านการติดตามสัญญาณอ้างอิง

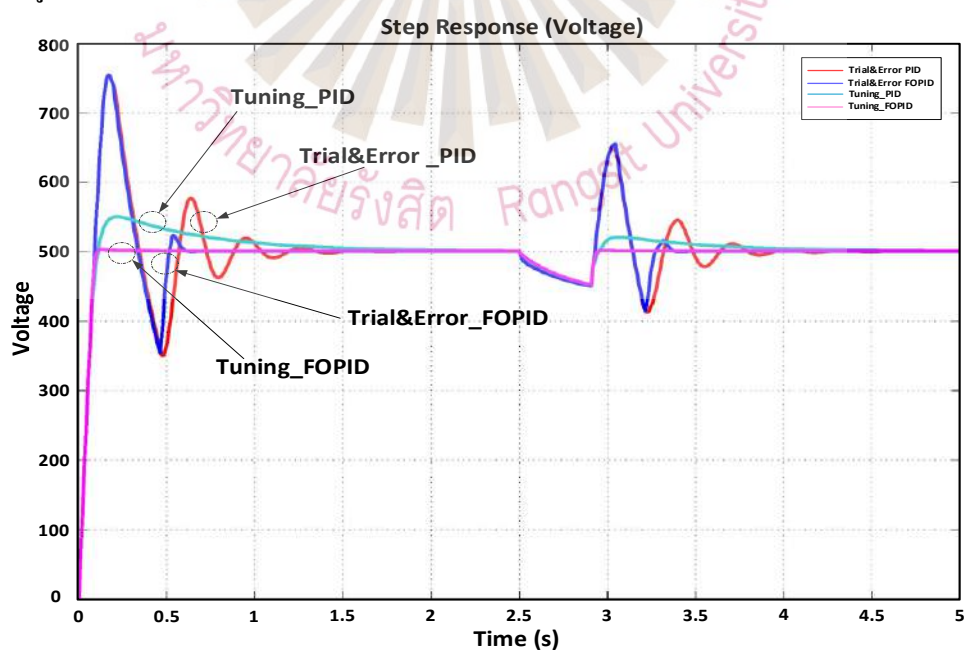
แบบวิธี	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ	เวลาเข้าที่ (วินาที)	(%) ค่าฟุงเกิน
Tuning_PID 	550Vdc	500Vdc	2.0	9
Tuning_FOPID 	503Vdc	500Vdc	0.49	0.5



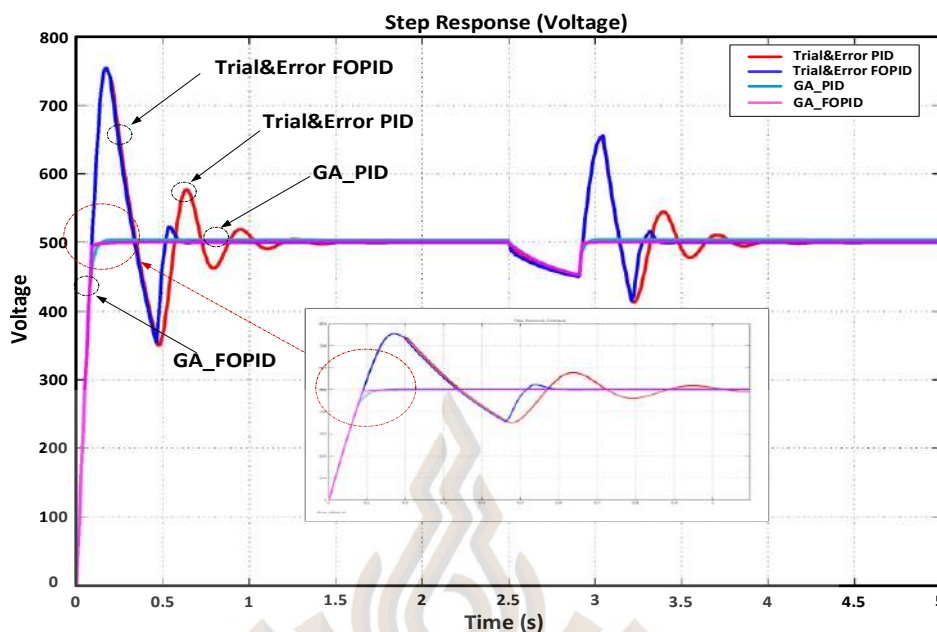
รูปที่ 4.6 กราฟผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

4.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบการทำงานของตัวควบคุมและเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบที่ได้ ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



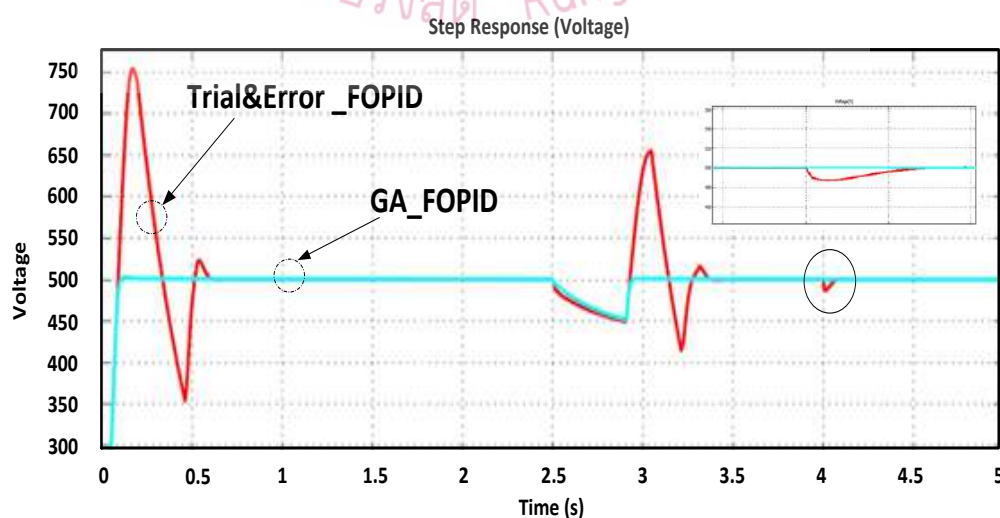
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบการลองผิดลองถูก
และแบบติดตามสัญญาณอ้างอิง



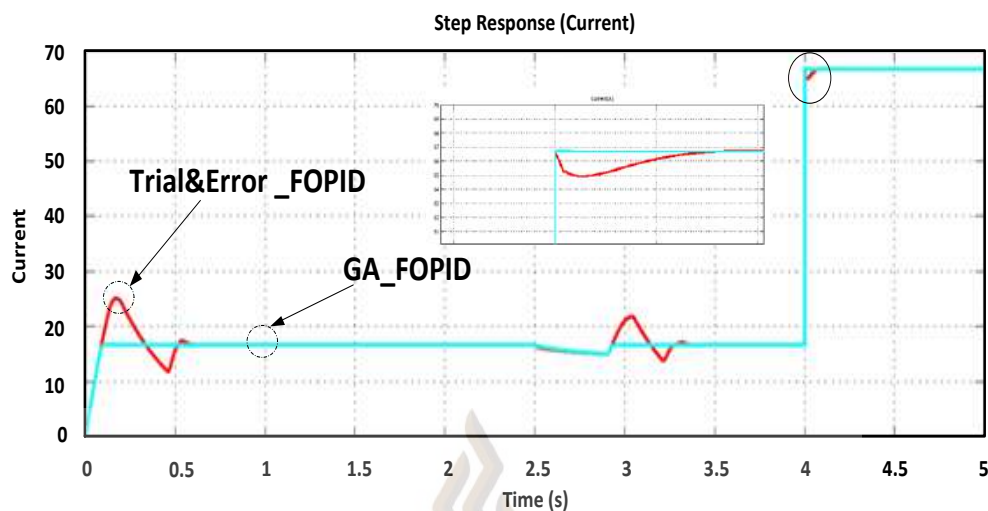
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบการลองผิดลองถูกและแบบเพิ่มสมรรถนะ (GA)

4.5 ผลการทดลองตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีการรบกวนระบบให้มีการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาต์พุตเพิ่ม โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบการทำงานของตัวควบคุมและเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสเอาต์พุตของระบบ โดยการเพิ่มโหลดความต้านทานที่เวลา 4 วินาที โดยมีผลการทดสอบดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ทดสอบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเปลี่ยนโหลดความต้านทานจาก 30 โอห์มไปเป็น 40 โอห์ม

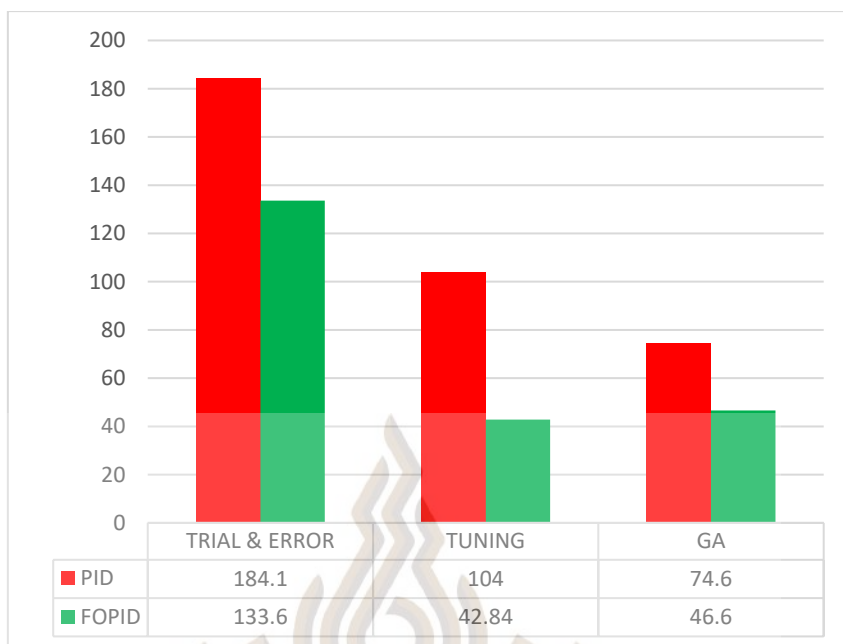


รูปที่ 4.10 ทดสอบกระแสเอาต์พุตเปลี่ยนโหลดความต้านทานจาก 30 โอห์มไปเป็น 40 โอห์ม

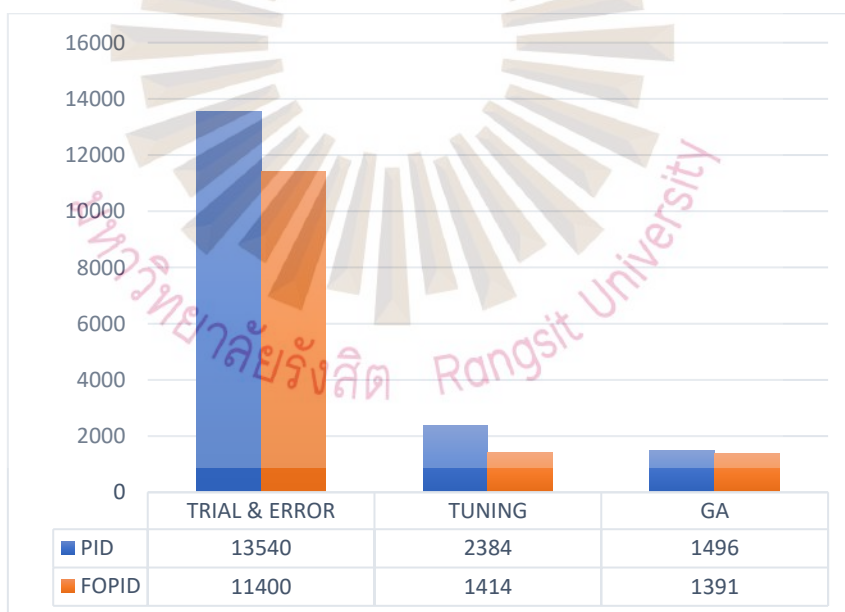
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะมีการเพิ่มกระแสเอาต์พุต ค่าพ่วงเกินสูงสุด เวลาในการสู่สภาวะคงตัว และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของวงจรที่ได้มีการออกแบบตัวควบคุมแบบ FOPID ผ่าน (GA) จะให้ผลลัพธ์ดีกับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการออกแบบไว้ เมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบ Trial & Error FOPID ที่ยังคงมีข้อผิดพลาดการตอบสนองอยู่

4.6 การทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโหลดความต้านทาน

ผลการทดลองเพิ่มสมรรถนะตัวควบคุมนี้จะถูกเปรียบเทียบด้วยวิธีการทดลองและเกณฑ์ครรชนีผ่านสมรรถนะ 2 ราย คือ Integral Time Absolute Error (ITAE) และ Integral Time Square Error (ITSE) ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะผลของการควบคุมผ่าน (ITAE)



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะผลของการควบคุมผ่าน (ITSE)

4.7 บทสรุป

ผลการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมพีไอได้อันดับเศษส่วนที่มีการเพิ่มสมรรถนะการปรับจูนเพื่อหาพารามิเตอร์ของพีไอได้อันดับเศษส่วนที่เหมาะสมสำหรับการแก้ไขปัญหการออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ในระบบไฟฟ้ากำลังเซลล์แสงอาทิตย์อัตโนมัติ ซึ่งผ่านการทดสอบและประเมินสมรรถนะตัวควบคุมแบบต่างๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมรรถนะตัวควบคุมที่ดีที่สุด ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอได้อันดับเศษส่วนที่ผ่านจินเนติก (GA) มีค่าเกณฑ์ดัชนีมีสมรรถนะดีกว่าตัวควบคุมแบบวิธีลองผิดลองถูก



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วน (FOPID Controller) ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีตัวแปลงวงจรถูกควบคุมโดยการใช้วิธีการปรับพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มสมรรถนะตัวควบคุมนี้จะถูกเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองและเกณฑ์ครั้นนี้สมรรถนะ 2 รายการ คือ Integral Time Absolute Error (ITAE) และ Integral Time Square Error (ITSE) รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ $K_p, K_i, \lambda, K_d, \mu$ ที่ได้รับการปรับจนภายใต้เงื่อนไขการตรวจสอบของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ ซึ่งการทำงานของตัวควบคุมที่มีการออกแบบจะทำงานแบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกำหนดที่ 500 โวลต์ดีซี ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) และการควบคุมแบบพีไอดีอันดับเศษส่วน (FOPID Controller) โดยทั้งสองวิธีใช้คอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงานกับระบบ เพื่อนำมาใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่อัตโนมัติที่มีแหล่งจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มต้นกำหนดการทดสอบแบบลองผิดลองถูกและแบบการเพิ่มสมรรถนะปรับจน พบว่าการทดสอบแบบการเพิ่มสมรรถนะพีไอดีอันดับเศษส่วน (FOPID Controller) ที่ผ่านจินตนาการ (GA) ปรับจนสามารถลดค่าฟังก์ชันได้ 0.5 เปอร์เซ็นต์ และเวลาเข้าสู่สภาวะเสถียรที่เร็วขึ้น 0.49 วินาที และมีครั้นนี้สมรรถนะ (ITAE) 46.6 เป็นค่าผิดพลาดคูณด้วยเวลาที่เกิดขึ้น และมีครั้นนี้สมรรถนะ (ITSE) 1391 เป็นค่าผิดพลาดกำลังสองคูณด้วยเวลาที่เกิดขึ้น จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วนมีสมรรถนะทำงานได้ดีกว่าวิธีการลองผิดลองถูกในสภาวะมีการเปลี่ยนแปลงจากภายนอก และสามารถควบคุมพลวัตได้ดีขึ้นเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบเป็นที่น่าพอใจกับแบบจำลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีอันดับเศษส่วนสามารถทำได้สะดวก แต่ยังคงต้องศึกษาตัวแปรการตอบสนองตัวควบคุมหรือวิธีการปรับจนที่ให้ความแม่นยำมากขึ้น เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองกับระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นต่อไป

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2562). ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์. สืบค้นจาก https://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=54235
- ธนิต มาลากร. (2561). ระบบพลศาสตร์และการควบคุม (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วินัย แสนจันทร์. (2555). วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์. มหาวิทยาลัยศรีปทุม: กรุงเทพฯ.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์ (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Adnan, M.F., & Oninda, M.A.M., & Nishat, M.M. and Islam, N. (2017). Design and Simulation of DC-DC Boost Converter with PID Controller for Enhanced Performance. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 6(09), 2278-0181. doi: 10.17577/IJERTV6IS090029
- Borase, R. (2021). A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9(5), 818–827. doi: 10.1007/s40435-020-00665-4
- Basilio, J. C. (2002). Design of PI and PID controllers with transient performance specification. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 45(4), doi: 10.1109/TE.2002.804399
- Dulaua, M. and Madaras, I. (2019). Development of a Monitoring and Control System for Timber's Drying Process. *International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, (32), 545–552. doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.251
- Dhanowa, A. (2015). Modeling and Simulation of an off Grid PV system for with Battery Backup for Remote and Rural Area Network. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(06), 2278-0181. doi: 10.17577/IJERTV4IS060964
- Electronicsforu, (2023). *Control System Definition, Types, Applications, and FAQs*. Retrieved from <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/control-system-definition-types-applications-and-faqs>
- Electronicshub, (2021). *Open Loop System*. Retrieved from <https://www.electronicshub Org/open-loop-system/>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Fracastoro, G. (2014). *The role of renewables in the energy crisis* (2th). Italy: Published by EDP Sciences.
- Garoudja, E. and Filali, W. (2019). Photovoltaic module parameters extraction using best-so-far ABC algorithm. *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*. Algiers, Algeria, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICAEE47123.2019.9015191.
- Hiremath, S. (2016). Comparison of Tuning Methods of PID Controllers for Non-Linear System. *International Journal of Recent Research in Electrical and Electronics Engineering*, 3(1), 2349-7815.
- Hojabri, M., & Toudeshki, A. (2013). Power Quality Consideration for Off-Grid Renewable Energy Systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, 5, doi: 10.4236/epe.2013.55039
- Ishaq, M., & Ibrahim, U.H., & Abubakar, H. (2013). Design of an off grid photovoltaic system: A Case Study of Government Technical College. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2(12), 2277-8616.
- Li, Y. (2005). PID Control System Analysis, Design, and Technology. *Control Systems Technology, Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 13(4), 559. doi: 10.1109/TCST.2005.847331
- Mohamed, M.A. (2019). *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*. Springer International Publishing: Published by Green Energy and Technology.
- Matusu, R. (2011). Application of fractional order calculus to control theory. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 5(7), 1162-1169.
- Podlubny, I. (1999a). Fractional-Order Systems and – P $I^\lambda D^\mu$ Controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(1), 208 – 214. doi: 10.1109/9.739144
- Podlubny, I. (1999b). *On Fractional Derivatives, Fractional-Order Dynamic Systems and fopid controller*. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/On-Fractional-Derivatives%2C-Fractional-Order-Dynamic>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Puangdownreong, D. (2019). Fractional Order PID Controller Design for DC Motor Speed Control System via Flower Pollination Algorithm. *Ecti transactions on electrical eng., Electronics, and Communications*, 17(1), doi: 10.379- 36/ecti-eec.2019171.215368
- Raju, B.S., & Babu K.V., & Azam S. (2015). Fractional Order PID Control for Solar PV and Battery Storage Systems Using Three -Level NPC Inverter. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 04(40), 8672-8681.
- Saadatmand, M. (2021). Optimal fractional-order PID controller of inverter-based power plants for power systems LFO damping. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28(1), 485-499. doi: 10.3906/elk-1907-31
- Shah, P., & Agashe, S. (2017). Pritesh Shah, Sudhir Agashe, Experimental Analysis of Fractional PID Controller Parameters on Time Domain Specifications. *An Internationnal Journal of Applied Mathematics & Information Sciences*, 3(2), 141-154. doi: 10.18576/pfda/030205
- Singh, A., & Kumar, M., & Singh, A.P. (2017). Modelling & Control of DC –DC Converters Incorporating Fractional PID Controller. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 4(6), 2393-8021. doi: 10.17148/ IARJSET - .2017.4621
- Swain, N. (2016). Application of PI and MPPT Controller to DC-DC Converter for Constant Voltage & Power Application. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 11(5), 2320-3331. doi: 10.9790/1676-1105030815
- Victron Energy. (2020). *PV Panel output voltage - shadow effect*. Retrieved from <https://www.victronenergy.com/support-and-downloads/software>
- Zhang, Y., & Wang, S., & Ji, G. (2015, February). A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, 38, doi:10.1155/-2015/931256

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นำชัย ห้วยทราย
วัน เดือน ปีเกิด	30 มกราคม 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดมุกดาหาร ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า, 2553
ที่อยู่ปัจจุบัน	14 ซอยตาดแคน 14 ถนนตาดแคน อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร
สถานที่ทำงาน	Premium Equipment & Engineering Company Limited
ตำแหน่งปัจจุบัน	Energy Saving & Application Project

