



การออกแบบระบบการจัดการพลังงานสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์
โดยรวมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและการประจุพลังงาน
ลงแบตเตอรี่แบบ 3 ขั้นตอน

**Design of Power Management System for Solar Energy Harvesting System by
Combining MPPT and Three-stage Battery Charging**

ชญัญฐ์ เหลืองอมรศิริ

Thanyanut Lueangamornsiri

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การออกแบบระบบการจัดการพลังงานสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์
โดยรวมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและการประจุพลังงาน
ลงแบตเตอรี่แบบ 3 ขั้นตอน

**Design of Power Management System for Solar Energy Harvesting System by
Combining MPPT and Three-stage Battery Charging**

ชญัญฐ์ เหลืองอมรศิริ

Thanyanut Lueangamornsiri

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

| | |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | การออกแบบระบบการจัดการพลังงานสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์โดยรวมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่แบบ 3 ขั้นตอน |
| ผู้เขียน | นางสาวธัญญัฐ เหลืองอมรสิริ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |

| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | คณะกรรมการสอบ |
|---|--|
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เฉลิมยานนท์) |ประธานกรรมการ (ดร.วฤทธิ วิชากุล) |
| |กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เฉลิมยานนท์) |
| |กรรมการ (ดร.มงคล แซ่เจีย) |
| |กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัสวดี กุลบุญ ก่อเกื้อ) |

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมาลย์ เจริญยานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวรัชฎัญญ์ เหลืองอมรศิริ)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการขอขึ้นอนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวรัชฎาภรณ์ เหลืองอมรสิริ)

นักศึกษา

| | |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | การออกแบบระบบการจัดการพลังงานสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์โดยรวมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่แบบ 3 ขั้นตอน |
| ผู้เขียน | นางสาวรัชฎัญญ์ เหลืองอมรสิริ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| ปีการศึกษา | 2559 |

บทคัดย่อ

ระบบเฟ้าะวังและเดือนกัษน้ำท่วมจำเป็นต้องมึแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานของระบบ แต่เนื่องจากความจุของแบตเตอรี่จะจำกัดอายุการใช้งานของระบบ ทำให้ระบบต้องมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่บ่อยๆ ซึ่งอาจเป็นปัญหาถ้ามีการติดตั้งระบบเฟ้าะวังเป็นจำนวนมาก ในพื้นที่กว้างและ/หรือติดตั้งอยู่ในสถานที่ห่างไกล โดยแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การนำพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ มาเป็นแหล่งจ่ายให้แก่ระบบ อย่างไรก็ตามจากข้อจำกัดของพลังงานเหล่านี้คือขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ฤดูกาล เวลา และอุณหภูมิ จึงทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ แต่ถ้ามีการนำพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มารวมกับแบตเตอรี่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ โดยภายในระบบจะมีการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อให้ได้รับพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด โดยจะทำการควบคุมผ่านวงจร buck converter ซึ่งเลือกใช้วิธีการรบกวนและสังเกตในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด และนำพลังงานที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์มาทำการประจุลงแบตเตอรี่ โดยจะทำการควบคุมการประจุผ่านวงจร buck converter ซึ่งมีการควบคุมด้วยวิธีการ TSC (Three – stage charging) เพื่อให้สามารถประจุพลังงานได้อย่างรวดเร็ว พร้อมสำหรับการนำพลังงานไปใช้งาน นอกจากนี้ระบบยังมีการควบคุมการจัดสรรพลังงานจากแหล่งจ่ายและแบตเตอรี่สำรองผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์ buck/boost แบบ 2 ทาง เพื่อให้ระบบสามารถจ่ายโหลดได้อย่างต่อเนื่อง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองและทดลองการทำงานเบื้องต้นของระบบซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าระบบที่นำเสนอสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์อย่างมีเสถียรภาพ โดยมีค่าประสิทธิภาพรวมประมาณ 85% และสามารถนำไปใช้งานในระบบเฟ้าะวังและเดือนกัษน้ำท่วมได้

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์, การติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์, การประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว

| | |
|----------------------|---|
| Thesis Title | Design of Power Management System for Solar Energy Harvesting System by Combining MPPT and Three-stage Battery Charging |
| Author | Miss. Thanyanut Lueangamornsiri |
| Major Program | Electrical Engineering |
| Academic Year | 2016 |

ABSTRACT

In the flood monitoring and warning system, it requires batteries to be power sources of the system. Since the limitation of the capacity of batteries determines the lifetime of the system, the replacement of batteries are frequently occurred. It is the main problem of the system, especially when the systems are installed in a wide area and/or a remote area. Therefore, the renewable energy sources such as solar energy are used to solve the problems. However, these energy sources are not stable because of the climatic conditions, season, time and temperature. Therefore, to improve the stability of the system and reduce the battery replacement, the solar energy has to be combined with batteries. In this research, a solar energy harvesting system is proposed for charging the batteries. The main parts of the proposed system are the control of the maximum energy from the photovoltaic (PV) panel, the charging method to manage the faster battery charging and the energy management control. In this research, 3 basis converters are used. The boost converter is used for MPPT control with Perturb and Observe method (P&O) method. The buck converter is used for charging control of a main battery with voltage regulation and Three-Stage Charging method (TSC) for quick and safety battery charging. The bidirectional buck/boost converter and the auxiliary battery are added for power management proposes. The simulation and experimental results shows that system can work as proposed with the overall efficiency around 85%. Finally, it can be applied for the real flood monitoring and warning system.

Keywords: Photovoltaic (PV), Maximum Power Point Tracking (MPPT), Perturb and Observe method (P&O Method), Three-Stage Charging (TSC)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษาแนะนำความรู้ที่เป็นประโยชน์ สนับสนุนอุปกรณ์ในการทำวิจัย ชัดเจนการบวนการคิดวิเคราะห์ รวมทั้งให้กำลังใจในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปในแนวทางที่ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.วฤทธิ์ วิชกุล ประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.มงคล แซ่เจ็ย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัสวดี กุลบุญ ก่อเกื้อ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร. กิตติคุณ ทองพูล กรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการทำงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ในด้านต่างๆมาโดยตลอด จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ส่งเสริมสนับสนุน ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจที่ดีเยี่ยม และทุนทรัพย์แก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

ชัชณัฐ เหลืองอมรสิริ

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| สารบัญ | 8 |
| รายการตาราง..... | 13 |
| รายการภาพประกอบ | 15 |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย..... | 1 |
| 1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 1.2.1 Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques [3] | 3 |
| 1.2.2 Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method [5] | 4 |
| 1.2.3 Modeling and Control of PV Charger System with SEPIC Converter [8] | 5 |
| 1.2.4 Analysis of an Irradiance Adaptative PV Based Battery Floating Charger [9] | 6 |
| 1.2.5 Comparison of Battery Charging Algorithms for Stand Alone Photovoltaic Systems [10] | 6 |
| 1.2.6 Maximum Power Point Tracking and Optimal Li-ion Battery Charging Control for Photovoltaic Charging System [12] | 7 |
| 1.2.7 Power Control Design of a Battery Charger in a Hybrid Active PV Generator for Load-Following Applications [16]..... | 8 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 10 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 10 |
| 1.5 ขอบเขตงานวิจัย | 10 |
| 1.6 วิธีการวิจัย | 10 |
| 1.7 แผนการดำเนินงาน | 13 |
| 1.8 อุปกรณ์และสถานที่ทำงานวิจัย | 13 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | 14 |
| 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ และการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด | 17 |
| 2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์..... | 17 |
| 2.1.2 การติดตามหาพลังงานไฟฟ้าสูงสุด | 19 |
| 2.2 แบตเตอรี่ และการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ | 25 |
| 2.2.1 แบตเตอรี่ | 25 |
| 2.2.2 การควบคุมขั้นตอนหรือวิธีการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ | 27 |
| 2.3 หลักการควบคุมการจัดสรรพลังงานภายในระบบ (Energy Management System) | 28 |
| 2.3.1 Mode I : $P_{PV} - P_{loss} > P_{Primary Battery}$ | 29 |
| 2.3.2 Mode II : $P_{PV} - P_{loss} = P_{Primary Battery}$ | 30 |
| 2.3.3 Mode III : $P_{PV} - P_{loss} < P_{Primary Battery}$ | 31 |
| 2.4 หลักการทำงานของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter) | 32 |
| 2.5 หลักการทำงานของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter) | 36 |
| 2.6 หลักการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter)..... | 39 |
| 2.7 หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ค่า ระดับแรงดันและกระแสมีค่าคงที่ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว | 40 |
| 2.7.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ (Voltage regulation) | 43 |
| 2.7.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ (Current regulation) | 47 |
| 2.8 หลักการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการ รบกวนและสังเกต (P&O Method)..... | 50 |
| 2.8.1 เวลาการซีกตัวอย่าง (Sampling time : T_a) ในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจาก เซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method) | 51 |
| 2.8.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน (Delta duty : ΔD) ในการติดตามหาค่า กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method) | 53 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 การออกแบบและผลการจำลอง | 54 |
| 3.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์ | 55 |
| 3.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ | 58 |
| 3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง | 60 |
| 3.5 การออกแบบและผลการจำลองการทำงานของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการ ป้อนกลับเพื่อรักษาค่าแรงดันและกระแสเอาต์พุตให้คงที่สำหรับการประจุพลังงานลง แบตเตอรี่ตัวหลักอย่างรวดเร็ว | 61 |
| 3.5.1 การออกแบบและผลการจำลองการทำงานของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์ ที่มีการ ควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ | 61 |
| 3.5.2 การออกแบบและผลการจำลองการทำงานของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์ ที่มีการ ควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อให้กระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ | 82 |
| 3.5.3 การออกแบบและผลการจำลองการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่าง รวดเร็ว | 85 |
| 3.6 การออกแบบและผลการจำลองการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ (MPPT) ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method) | 88 |
| 3.6.1 การวิเคราะห์หาค่าเวลาการชักตัวอย่าง (Sampling time : T_s) ในการติดตามหาค่า กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method) | 88 |
| 3.6.2 การวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน ในการติดตามหาค่า กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต | 92 |
| 3.6.3 การออกแบบและผลการจำลองการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวน และสังเกต (P&O method) | 94 |
| 3.7 ผลการจำลองการทำงานเบื้องต้นของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink | 99 |
| 3.8 การออกแบบการพันตัวเหนี่ยวนำ | 108 |
| 3.8.1 คำนวณหาขนาดของแกน | 109 |
| 3.8.2 คำนวณหาความยาวของช่องว่างอากาศ (air gap) | 110 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 3.8.3 จำนวนจำนวนรอบในการพันตัวเหนี่ยวนำ..... | 111 |
| 3.8.4 จำนวนขนาดของขดลวด | 111 |
| 3.9 การออกแบบวงจรตรวจวัดแรงดัน และวงจรตรวจวัดกระแส..... | 111 |
| 3.9.1 การออกแบบตัวตรวจวัดแรงดัน | 112 |
| 3.9.2 การออกแบบตัวตรวจวัดกระแส..... | 116 |
| 3.10 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง (Dead Time) และวงจรขับมอสเฟต..... | 116 |
| 3.10.1 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง (Dead Time) | 117 |
| 3.10.2 วงจรขับมอสเฟต | 119 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ | 120 |
| 4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์, วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง..... | 121 |
| 4.1.1 ผลการทดสอบวงจรบีกอนเวอร์เตอร์..... | 121 |
| 4.1.2 ผลการทดสอบวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์..... | 124 |
| 4.1.3 ผลการทดลองของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง | 128 |
| 4.1.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์, วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง..... | 131 |
| 4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการควบคุมการป้อนกลับของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่และกระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ เพื่อทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักอย่างรวดเร็ว..... | 132 |
| 4.2.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์..... | 132 |
| 4.2.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้กระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์..... | 137 |
| 4.2.3 ผลการทดลองการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว..... | 140 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----|
| 4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ (MPPT)..... | 145 |
| 4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทำงานเบื้องต้นของระบบฯ ที่มีการจัดสรรพลังงาน | 152 |
| 4.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบฯ เมื่อมีต่อโหลดภายนอกเพิ่มเติม เพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งานจริง..... | 159 |
| บทที่ 5 บทสรุป..... | 164 |
| 5.1 บทสรุป | 164 |
| 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข | 165 |
| 5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป | 166 |
| บรรณานุกรม | 167 |
| ภาคผนวก | 169 |
| ภาคผนวก ก วิธีในการประมาณค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องหรือในรูปแบบของดิจิทัล ด้วยวิธีการประมาณจากสมการออยเลอร์ | 170 |
| ภาคผนวก ข การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน | 175 |
| ประวัติผู้เขียน | 181 |

รายการตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตาราง 1-1 ลักษณะที่สำคัญของเทคนิค MPPT [3]..... | 4 |
| ตาราง 1-2 สรุปการทบทวนวรรณกรรม | 9 |
| ตาราง 2-1 ขนาดและน้ำหนักของแบตเตอรี่และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ | 26 |
| ตาราง 3-1 ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 56 |
| ตาราง 3-2 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 56 |
| ตาราง 3-3 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์..... | 57 |
| ตาราง 3-4 ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบูกอนเวอร์เตอร์ | 58 |
| ตาราง 3-5 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบูกอนเวอร์เตอร์ | 58 |
| ตาราง 3-6 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบูกอนเวอร์เตอร์ | 60 |
| ตาราง 3-7 ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง | 61 |
| ตาราง 3-8 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง..... | 61 |
| ตาราง 3-9 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์..... | 62 |
| ตาราง 3-10 สรุปผลการจำลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ และไม่มี การป้อนกลับของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต | 78 |
| ตาราง 3-11 สรุปผลการจำลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ และไม่มี การป้อนกลับของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาต์พุต..... | 81 |
| ตาราง 3-12 พิกัดแบตเตอรี่ที่ใช้ในการจำลอง | 87 |
| ตาราง 3-13 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกับวงจรบูกอนเวอร์เตอร์ ใน การควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์..... | 89 |
| ตาราง 3-14 ตารางการตรวจสอบการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการ P&O | 97 |
| ตาราง 3-15 ค่าพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลอง | 99 |
| ตาราง 3-16 ค่าพิกัดของแบตเตอรี่ตัวหลักที่ใช้ในการจำลอง | 99 |
| ตาราง 3-17 ค่าพิกัดของแบตเตอรี่ตัวสำรองที่ใช้ในการจำลอง | 99 |
| ตาราง 3-18 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด | 100 |
| ตาราง 3-19 ETD CORE DATA..... | 110 |

รายการตาราง (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| ตาราง 4-1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 121 |
| ตาราง 4-2 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 121 |
| ตาราง 4-3 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์..... | 121 |
| ตาราง 4-4 ผลการทดลองและผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 123 |
| ตาราง 4-5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ | 124 |
| ตาราง 4-6 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ | 125 |
| ตาราง 4-7 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ | 125 |
| ตาราง 4-8 ผลการทดลองและผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์..... | 127 |
| ตาราง 4-9 ผลการทดลองและผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง | 130 |
| ตาราง 4-10 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมี ค่าคงที่ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 133 |
| ตาราง 4-11 สรุปผลการทดลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ เมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงกระแสเอาต์พุต | 137 |
| ตาราง 4-12 ค่าพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 145 |
| ตาราง 4-13 ค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง | 147 |
| ตาราง 4-14 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด | 148 |

รายการภาพประกอบ

| | หน้า |
|---|------|
| ภาพประกอบ 1-1 บล็อกไดอะแกรมของทั้งระบบในงานวิจัยนี้ | 2 |
| ภาพประกอบ 1-2 วงจรและรูปแบบการควบคุมที่ใช้ในบทความที่ [8] | 5 |
| ภาพประกอบ 1-3 ระบบควบคุมป้อนกลับของแรงดันและกระแส [9] | 6 |
| ภาพประกอบ 1-4 โครงสร้างของวงจรทั้งระบบ [12] | 7 |
| ภาพประกอบ 1-5 การเชื่อมต่อระบบสายส่งเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ที่รวมแบตเตอรี่ [16] | 9 |
| ภาพประกอบ 1-6 ลำดับขั้นตอนการวิจัย | 12 |
| ภาพประกอบ 2-1 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์เข้ากับแบตเตอรี่ | 14 |
| ภาพประกอบ 2-2 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์และวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ เข้ากับแบตเตอรี่ | 15 |
| ภาพประกอบ 2-3 วงจรของทั้งระบบฯ ในงานวิจัยนี้ | 16 |
| ภาพประกอบ 2-4 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟกระแสและแรงดัน I-V Curve | 19 |
| ภาพประกอบ 2-5 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟพลังงานและแรงดัน P-V Curve | 19 |
| ภาพประกอบ 2-6 กราฟกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิค่าต่างๆ | 19 |
| ภาพประกอบ 2-7 กราฟกระแสและแรงดันที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ | 19 |
| ภาพประกอบ 2-8 กราฟโพลด [4] | 20 |
| ภาพประกอบ 2-9 แผนผังความคิดของวิธี P&O | 21 |
| ภาพประกอบ 2-10 กราฟกำลังไฟฟ้า และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ | 22 |
| ภาพประกอบ 2-11 แผนผังความคิดของวิธี InC | 23 |
| ภาพประกอบ 2-12 กราฟการหา MPPT ด้วยวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร | 24 |
| ภาพประกอบ 2-13 กราฟแรงดันและกระแสของวิธีการประจุพลังงานแบบ TSC | 28 |
| ภาพประกอบ 2-14 ภาพรวมของระบบในงานวิจัย | 28 |
| ภาพประกอบ 2-15 ทิศทางของการส่งผ่านพลังงานในโหมดที่ 1 | 30 |
| ภาพประกอบ 2-16 ทิศทางของการส่งผ่านพลังงานในโหมดที่ 2 | 30 |
| ภาพประกอบ 2-17 ทิศทางของการส่งผ่านพลังงานในโหมดที่ 3 | 31 |
| ภาพประกอบ 2-18 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 32 |
| ภาพประกอบ 2-19 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดที่ 1 | 32 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| ภาพประกอบ 2-20 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดที่ 2 | 32 |
| ภาพประกอบ 2-21 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 33 |
| ภาพประกอบ 2-22 การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 33 |
| ภาพประกอบ 2-23 กระแสที่ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 33 |
| ภาพประกอบ 2-24 วงจรซิงโครนัสบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 35 |
| ภาพประกอบ 2-25 วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ | 36 |
| ภาพประกอบ 2-26 วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดที่ 1 | 36 |
| ภาพประกอบ 2-27 วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดที่ 2 | 36 |
| ภาพประกอบ 2-28 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจร บูทคอนเวอร์เตอร์ | 37 |
| ภาพประกอบ 2-29 การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ | 37 |
| ภาพประกอบ 2-30 กระแสที่ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุของวงจร บูทคอนเวอร์เตอร์ | 38 |
| ภาพประกอบ 2-31 วงจรซิงโครนัสบูทคอนเวอร์เตอร์ | 39 |
| ภาพประกอบ 2-32 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter) | 39 |
| ภาพประกอบ 2-33 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter) ในขณะที่ทำงานเป็นวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 40 |
| ภาพประกอบ 2-34 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter) ในขณะที่ทำงานเป็นวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ | 40 |
| ภาพประกอบ 2-35 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ | 44 |
| ภาพประกอบ 2-36 บล็อกไดอะแกรมของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ | 45 |
| ภาพประกอบ 2-37 บล็อกไดอะแกรมของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ในรูปแบบของสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) | 45 |
| ภาพประกอบ 2-38 กราฟโพลเดของ $T(s)$ และ $1/(1+T(s))$ | 46 |
| ภาพประกอบ 2-39 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีควบคุมแบบ CPM | 47 |
| ภาพประกอบ 2-40 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมด้วยวิธีการ CPM | 48 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| ภาพประกอบ 2-41 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการ CPM..... | 48 |
| ภาพประกอบ 2-42 บล็อกไดอะแกรมของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการ CPM..... | 49 |
| ภาพประกอบ 2-43 วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าหนึ่ง | 51 |
| ภาพประกอบ 3-1 วงจรของทั้งระบบฯ ในงานวิจัยนี้..... | 54 |
| ภาพประกอบ 3-2 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter)..... | 55 |
| ภาพประกอบ 3-3 วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter)..... | 58 |
| ภาพประกอบ 3-4 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter)..... | 60 |
| ภาพประกอบ 3-5 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบและมีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ | 62 |
| ภาพประกอบ 3-6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบและมีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ | 63 |
| ภาพประกอบ 3-7 กราฟโพลเดของสมการอัตราขยายวงรอบ $T_u(s)$ ที่ยังไม่ได้ได้รับการชดเชยของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 66 |
| ภาพประกอบ 3-8 เส้นแนวกำกับค่าขยาดและมุมเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนตัวชดเชย $G_c(s)$ ในสมการที่ (3-31)..... | 68 |
| ภาพประกอบ 3-9 กราฟโพลเดของอัตราขยายวงรอบ ($T(s)$) ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้าตามสมการที่ (3-38) ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 70 |
| ภาพประกอบ 3-10 กราฟโพลเดของ $T(s)$ และ $1/(1+T(s))$ ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้าของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่..... | 71 |
| ภาพประกอบ 3-11 กราฟโพลเดของ $T(s)$ และ $1/(1+T(s))$ ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลังของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่..... | 73 |
| ภาพประกอบ 3-12 กราฟโพลเดของฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาต์พุต ตอนที่ยังไม่มีมีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)$) เปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาต์พุต ตอนที่มีการควบคุมการป้อนกลับ $G_{vg}(s)/(1+T(s))$ ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | 74 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| ภาพประกอบ 3-13 กราฟผลตอบสนองตามเวลาของฟังก์ชันฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาต์พุต ตอนที่ ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)$) เปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอน อินพุต-เอาต์พุต ตอนที่มีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)/(1+T(s))$) ของ วงจรมอเตอร์ 75 | 75 |
| ภาพประกอบ 3-14 รูปวงจรมอเตอร์ที่ทำการจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยทำการรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนแรงดันอินพุต 76 | 76 |
| ภาพประกอบ 3-15 ผลการจำลองการทำงานของวงจรมอเตอร์ที่มีการควบคุมการ ป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เทียบกับตอนที่ไม่มี การป้อนกลับ เมื่อ แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงจาก 30 V ไปเป็น 35 V (เพิ่มระดับแรงดันอินพุต).. 77 | 77 |
| ภาพประกอบ 3-16 ผลการจำลองการทำงานของวงจรมอเตอร์ที่มีการควบคุมการ ป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เทียบกับตอนที่ไม่มี การป้อนกลับ เมื่อ แรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงจาก 35 V ไปเป็น 30 V (ลดระดับแรงดันอินพุต) ... 77 | 77 |
| ภาพประกอบ 3-17 รูปวงจรมอเตอร์ที่ทำการจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยทำการรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนกระแสเอาต์พุต 79 | 79 |
| ภาพประกอบ 3-18 ผลการจำลองการทำงานของวงจรมอเตอร์ที่มีการควบคุมการ ป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เทียบกับตอนที่ไม่มี การป้อนกลับ เมื่อ กระแสเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงจาก 4.6 A ไปเป็น 9.2 A (เพิ่มกระแสเอาต์พุต).... 80 | 80 |
| ภาพประกอบ 3-19 ผลการจำลองการทำงานของวงจรมอเตอร์ที่มีการควบคุมการ ป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เทียบกับตอนที่ไม่มี การป้อนกลับ เมื่อ กระแสเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงจาก 4.6 A ไปเป็น 2.3 A (ลดกระแสเอาต์พุต) 80 | 80 |
| ภาพประกอบ 3-20 วงจรมอเตอร์ที่ทำการออกแบบและมีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ กระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่โดยวิธี CPM..... 82 | 82 |
| ภาพประกอบ 3-21 กราฟโบเด $T_i(s)$, $T_i(s)/(1+T_i(s))$ และ $1/(1+T_i(s))$ ของวงจรมอเตอร์ ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ โดยวิธีการ แบบ CPM..... 83 | 83 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| ภาพประกอบ 3-22 กราฟโบเดพล็อตของค่าการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) ตอนที่ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ ($G_{ig}(s)$) เปรียบเทียบกับตอนที่มีการควบคุมการ ป้อนกลับด้วยวิธีการควบคุมแบบ CPM ($G_{g0}(s)/(1+T_i(s))$) ของวงจรมอเตอร์84 | 84 |
| ภาพประกอบ 3-23 กราฟผลตอบสนองตามเวลาของค่าการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) ตอนที่ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ ($G_{ig}(s)$) เปรียบเทียบกับตอนที่มีการควบคุมการ ป้อนกลับด้วยวิธีการควบคุมแบบ CPM ($G_{g0}(s)/(1+T_i(s))$) ของวงจรมอเตอร์ 84 | 84 |
| ภาพประกอบ 3-24 กราฟแรงดันและกระแสของวิธีการประจุพลังงานแบบ TSC.....85 | 85 |
| ภาพประกอบ 3-25 ขั้นตอนการทำงานและแผนภาพการทำงาน (Flowchart) ของขั้นตอนการประจุ พลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว.....86 | 86 |
| ภาพประกอบ 3-26 ผลการจำลองการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่โดยวิธี TSC87 | 87 |
| ภาพประกอบ 3-27 กราฟผลตอบสนองตามเวลาของการทำงานของการเปลี่ยนแปลงของรอบการ ทำงาน ($\hat{d}(s)$) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ($\hat{v}_{pv}(s)$) 90 | 90 |
| ภาพประกอบ 3-28 บล็อกไดอะแกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกับวงจรมอเตอร์ใน โปรแกรม MATLAB/Simulink.....91 | 91 |
| ภาพประกอบ 3-29 ผลการจำลองค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์และรอบการทำงานของวงจรมอเตอร์ ในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อค่า $T_d = 0.01$ s และ $\Delta d = 0.01$92 | 92 |
| ภาพประกอบ 3-30 ผลการจำลองค่ากำลังไฟฟ้าจากการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการ ควบคุมและสังเกต (P&O method) ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานที่ ต่างกัน เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....93 | 93 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----|
| ภาพประกอบ 3-31 ผลการจำลองที่มีการขยาย (Zoom in) ค่ากำลังไฟฟ้าจากการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานที่ต่างกัน เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง | 93 |
| ภาพประกอบ 3-32 แผนผังความคิดของการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) | 94 |
| ภาพประกอบ 3-33 กราฟการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) | 95 |
| ภาพประกอบ 3-34 กราฟระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V curve) ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ | 97 |
| ภาพประกอบ 3-35 กราฟระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (P-V curve) ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ | 97 |
| ภาพประกอบ 3-36 ผลการจำลองค่ากำลังไฟฟ้าจากการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี P&O | 98 |
| ภาพประกอบ 3-37 บล็อกไดอะแกรมทั้งระบบในโปรแกรม MATLAB/Simulink | 100 |
| ภาพประกอบ 3-38 การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง | 100 |
| ภาพประกอบ 3-39 ค่าแรงดัน และค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ | 101 |
| ภาพประกอบ 3-40 กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ | 101 |
| ภาพประกอบ 3-41 ค่าแรงดัน และค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก | 102 |
| ภาพประกอบ 3-42 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก | 102 |
| ภาพประกอบ 3-43 ค่าแรงดันและค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง | 103 |
| ภาพประกอบ 3-44 ค่ากำลังไฟฟ้าที่เหลือในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง | 103 |
| ภาพประกอบ 3-45 ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์, ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก และ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุพลังงานลงลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง | 104 |
| ภาพประกอบ 3-46 ค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) ของวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์ | 105 |
| ภาพประกอบ 3-47 แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการขยายที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด | 105 |
| ภาพประกอบ 3-48 ค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) ของวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์ | 106 |
| ภาพประกอบ 3-49 ค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก | 107 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| ภาพประกอบ 3-50 ค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) ของวงจรถอนแวลต์เตอร์แบบ 2 ทาง | 107 |
| ภาพประกอบ 3-51 ค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง | 107 |
| ภาพประกอบ 3-52 ค่าแรงดันที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง..... | 108 |
| ภาพประกอบ 3-53 แกน ETD44 | 110 |
| ภาพประกอบ 3-54 วงจรตรวจวัดแรงดัน..... | 112 |
| ภาพประกอบ 3-55 Forward Voltage vs. Forward Current | 113 |
| ภาพประกอบ 3-56 Collector Emitter Current vs. Temperature and LED Current | 113 |
| ภาพประกอบ 3-57 Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current | 113 |
| ภาพประกอบ 3-58 เซนเซอร์ตรวจวัดกระแส | 116 |
| ภาพประกอบ 3-59 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอสเฟต..... | 117 |
| ภาพประกอบ 3-60 การต่อไอซีเบอร์ CD4070 ในการสร้างสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาไว้ ผลตอบสนอง (Dead Time) | 117 |
| ภาพประกอบ 3-61 หลักการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาไว้ผลตอบสนอง (Dead Time) | 118 |
| ภาพประกอบ 3-62 Function at IR2110 block diagram..... | 119 |
| ภาพประกอบ 3-63 วงจรขับมอสเฟตที่ใช้ IC เบอร์ IR 2110..... | 119 |
| ภาพประกอบ 4-1 วงจรบั๊กคอนแวลต์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ | 122 |
| ภาพประกอบ 4-2 ผลการทดลองของวงจรมัลติคอนแวลต์เตอร์..... | 122 |
| ภาพประกอบ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตของวงจรมัลติคอน แวลต์เตอร์ | 124 |
| ภาพประกอบ 4-4 วงจรบูทคอนแวลต์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ | 125 |
| ภาพประกอบ 4-5 ผลการทดลองของวงจรมัลติคอนแวลต์เตอร์ | 126 |
| ภาพประกอบ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสอินพุตของวงจรมัลติคอน แวลต์เตอร์ | 127 |
| ภาพประกอบ 4-7 วงจรคอนแวลต์เตอร์แบบ 2 ทางที่ใช้ในการทดลอง | 128 |
| ภาพประกอบ 4-8 ผลการทดลองของวงจรถอนแวลต์เตอร์แบบ 2 ทางที่ทำหน้าที่เป็นวงจรมัลติคอน แวลต์เตอร์ | 129 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----|
| ภาพประกอบ 4-9 ผลการทดลองของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางที่ทำหน้าที่เป็นวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ | 129 |
| ภาพประกอบ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง..... | 131 |
| ภาพประกอบ 4-11 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ TL494 เมื่อมีการเพิ่มโหลด | 134 |
| ภาพประกอบ 4-12 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ TL494 เมื่อมีการลดโหลด | 134 |
| ภาพประกอบ 4-13 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อมีการเพิ่มโหลด | 135 |
| ภาพประกอบ 4-14 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อมีการลดโหลด | 136 |
| ภาพประกอบ 4-15 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ ที่มีการควบคุมให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ เมื่อมีการเพิ่มค่าของตัวความต้านทาน | 138 |
| ภาพประกอบ 4-16 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ เมื่อมีการลดค่าของตัวความต้านทาน..... | 139 |
| ภาพประกอบ 4-17 แสดงผลการควบคุมการเปลี่ยนขั้นในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ โดยวิธี TSC | 140 |
| ภาพประกอบ 4-18 แสดงผลการควบคุมการเปลี่ยนขั้น (State) ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ โดยวิธี TSC ที่มีการปรับปรุงแก้ไข..... | 142 |
| ภาพประกอบ 4-19 แสดงผลการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ โดยวิธีการคงค่าแรงดันเพียงอย่างเดียว (Constant voltage) | 143 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----|
| ภาพประกอบ 4-20 ค่ากระแสของการประจุพลังงานด้วยวิธีการแบบ TSC และวิธีการแบบ CV .. | 144 |
| ภาพประกอบ 4-21 วงจรการต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับโหลดโดยตรง..... | 145 |
| ภาพประกอบ 4-22 กราฟระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Curve) จากการทดลอง ที่ความเข้มแสง ค่าต่างๆ | 146 |
| ภาพประกอบ 4-23 กราฟระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (P-V Curve) จากการทดลอง ที่ความเข้ม แสงค่าต่างๆ | 146 |
| ภาพประกอบ 4-24 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดจากเซลล์ แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเพิ่มความต้านทานเอาต์พุตของวงจรถูกคอนเวอร์เตอร์ | 148 |
| ภาพประกอบ 4-25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดจากเซลล์ แสงอาทิตย์ เมื่อมีการลดค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรถูกคอนเวอร์เตอร์ | 149 |
| ภาพประกอบ 4-26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดจากเซลล์ แสงอาทิตย์เมื่อทำการขยาย (Zoom in) ช่วงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด | 149 |
| ภาพประกอบ 4-27 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้า ของการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดจาก เซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเพิ่มความเข้มแสง | 150 |
| ภาพประกอบ 4-28 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้า ของการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดจาก เซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการลดค่าความเข้มแสง..... | 151 |
| ภาพประกอบ 4-29 วงจรของทั้งระบบฯ ในงานวิจัยนี้..... | 152 |
| ภาพประกอบ 4-30 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ และของ จุด เชื่อมต่อตรงกลาง (DC link) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มค่า ความเข้มแสง | 153 |
| ภาพประกอบ 4-31 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ และของ แบตเตอรี่ตัวหลัก (Primary battery) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อ เพิ่มค่าความเข้มแสง..... | 153 |

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----|
| ภาพประกอบ 4-32 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ และของ แบตเตอรี่ตัวสำรอง (Auxiliary battery) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อ เพิ่มค่าความเข้มแสง..... | 154 |
| ภาพประกอบ 4-33 ผลการทดลองการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักให้ได้ตามขั้นตอนการ ประจุแบบ 3 ขั้นตอน | 156 |
| ภาพประกอบ 4-34 ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์,ค่ากำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตัวหลัก และค่า กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตัวสำรอง..... | 157 |
| ภาพประกอบ 4-35 วงจรของทั้งระบบฯ ในงานวิจัยนี้ที่มีการต่อโหลดภายนอกเพิ่มเติม | 159 |
| ภาพประกอบ 4-36 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของโหลด และ จุดเชื่อมต่อตรงกลาง (DC link) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มโหลดจากภายนอก.... | 160 |
| ภาพประกอบ 4-37 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของโหลด และ เซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มโหลดจากภายนอก | 160 |
| ภาพประกอบ 4-38 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของโหลด และของ แบตเตอรี่ตัวหลัก (Primary battery) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มโหลดจาก ภายนอก..... | 161 |
| ภาพประกอบ 4-39 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของโหลด และของ แบตเตอรี่ตัว สำรอง (Auxiliary battery) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มโหลด จากภายนอก..... | 161 |
| ภาพประกอบ ก-1 ผลการจำลองเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่องด้วยตัว ควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องที่อัตราการสุ่มข้อมูลต่างกันโดยใช้คำจำกัดความ ของสมการออยเลอร์..... | 174 |

บทที่ 1

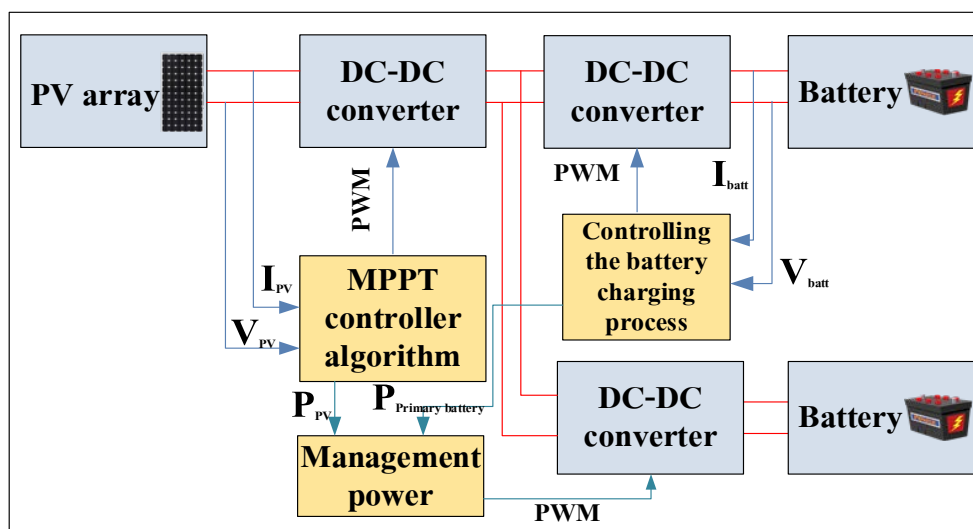
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ระบบเฝ้าระวังและเตือนภัยน้ำท่วมที่มีการติดตั้งตัวตรวจวัดระดับ อุปกรณ์สำหรับเก็บและส่งข้อมูล จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปสถานที่ในการติดตั้งระบบดังกล่าวตัวอย่างเช่น บริเวณริมคลองหรือสะพานอาจไม่มีระบบไฟฟ้าให้ใช้หรือถึงแม้มีระบบไฟฟ้า แต่หากในกรณีที่เกิดภัยพิบัติ ระบบไฟฟ้าปกติอาจใช้การไม่ได้ ดังนั้นระบบเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองซึ่งโดยส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะใช้แบตเตอรี่เป็นหลัก อย่างไรก็ตามเนื่องจากความจุของแบตเตอรี่จะเป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานของระบบ ดังนั้นหากต้องมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่บ่อยๆ อาจเป็นปัญหาถ้ามีการติดตั้งระบบเฝ้าระวังเป็นจำนวนมาก ในพื้นที่กว้างและ/หรือติดตั้งอยู่ในสถานที่ที่ยากแก่การเข้าถึง

แนวทางในการแก้ปัญหาเหล่านี้ที่น่าสนใจก็คือ การแปลงพลังงานรูปแบบอื่นๆ ซึ่งแฝงตัวอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่ทั่วไป เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ มาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้แก่ระบบ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของพลังงานเหล่านี้คือปริมาณจะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ฤดูกาล เวลา และอุณหภูมิ จึงอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ นอกจากนี้พลังงานเหล่านี้ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากระดับและรูปแบบของแรงดันไฟฟ้ายังไม่ตรงตามที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรแปลงหรือวงจรคอนเวอร์เตอร์เพื่อปรับเปลี่ยนระดับและรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสม และเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายพลังงานเหล่านี้ไม่มีความแน่นอนเพราะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังที่กล่าวมา ดังนั้นการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานเดียวจึงอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและอาจมีกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอในบางช่วงเวลาที่มีความต้องการการใช้มาก ดังนั้นในการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าจึงควรรวมแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลายชนิดเข้าด้วยกันและมีการเพิ่มแบตเตอรี่เพื่อสำรองไฟ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้ในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานอาจจำเป็นต้องมีการควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ของแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของระบบ [3] โดยส่วนของแบตเตอรี่และวงจรในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่จะต้องมีการเลือกและพัฒนาให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานด้านระบบเตือนภัยน้ำท่วม ซึ่งต้องการการประจุแบตเตอรี่ที่เร็วในสภาวะพลังงานจากแหล่งจ่ายที่มีจำกัด [12] และการใช้งานของแบตเตอรี่มากขึ้นที่แบตเตอรี่จะ

สามารถจ่ายได้หรือการประจุไฟที่น้อยเกินไป (Undercharge) ส่งผลให้อายุการทำงานของแบตเตอรี่สั้นลงหรืออาจส่งผลให้แบตเตอรี่เสียหายอย่างถาวรได้ ดังนั้นการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้ อย่างไรก็ตามถ้าแบตเตอรี่มีการประจุพลังงานเต็มแล้ว พลังงานที่ได้เซลล์แสงอาทิตย์จะไม่มีติดตามหาค่าพลังงานสูงสุดอีก เพราะเนื่องมาจากแบตเตอรี่ไม่สามารถรับพลังงานได้แล้ว ทำให้เป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์



ภาพประกอบ 1-1 บล็อกไดอะแกรมของทั้งระบบในงานวิจัยนี้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบโคเดเดี่ยว (Stand-Alone System) ดังแสดงในภาพประกอบ 1-1 เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบเฝ้าระวังและเตือนภัยน้ำท่วม โดยมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานสำรองและเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพที่สุด จึงจะทำการออกแบบและสร้างระบบที่มีการควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MPPT) และการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ระบบจะมีแบตเตอรี่สำรองเพิ่มขึ้นอีกตัวหนึ่งเพื่อที่จะเป็นการแก้ปัญหาการสูญเสียพลังงานอย่างเปล่าประโยชน์ เนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจมีค่ามากกว่าพลังงานที่แบตเตอรี่ต้องการในการประจุพลังงานอย่างรวมเร็ว ดังนั้นจะสามารถเก็บพลังงานที่เหลือมาสำรองในแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นมาอีกตัวได้ซึ่งเป็นการเก็บเกี่ยวพลังงานได้มากที่สุด ซึ่งแบตเตอรี่สำรองที่เพิ่มขึ้นมานี้จะไม่มีควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงาน แต่จะมีเฉพาะการควบคุมค่าแรงดันของแบตเตอรี่ให้มีค่าไม่เกิดค่าแรงดันสูงสุด เพื่อเป็นการป้องกันการประจุ

พลังงานที่มีแรงดันเกิน ซึ่งส่งผลให้แบตเตอรี่เกิดความเสียหายได้ โดยจะสมมุติว่าแบตเตอรี่ตัวสำรองมีขนาดใหญ่มากพอที่สามารถรับกระแสเท่าไรก็ได้ ทำให้สามารถรับพลังงานเท่าไรก็ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งวงจรต้นแบบยังต้องสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีโครงสร้างของวงจรที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไปเพื่อให้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้จริงได้ โดยจะทำการวิเคราะห์ ออกแบบ กำหนดโหมดการทำงาน สร้างและทดสอบวงจรเพื่อเป็นต้นแบบสำหรับใช้งานด้านเฝ้าระวังและเตือนภัยน้ำท่วมต่อไป

1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากหัวข้อของงานวิจัยในหัวข้อ 1.1 จะประกอบด้วยหัวข้อหลักของงานวิจัยคือการติดตามหาค่าพลังงานสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์, การควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ และการจัดสรรพลังงานที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่าที่สุด โดยการตรวจสอบเอกสารได้มีหลายงานวิจัยที่ได้นำเสนอแนวทางในการพัฒนาการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ, นำเสนอวิธีการในการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้อย่างรวดเร็ว และมีการป้องกันแบตเตอรี่จากการประจุไฟเกินหรือใช้ไฟจากแบตเตอรี่เกิน และได้มีการนำเสนอวิธีการในการนำมาประยุกต์เพื่อจัดสรรพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างคุ้มค่า โดยในแต่ละงานวิจัยจะมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

1.2.1 Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques [3]

ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการหลากหลายวิธีการในการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นการทบทวนวรรณกรรมหลัก ๆ ตั้งแต่ปี ค.ศ.1968-ค.ศ. 2005 มีทั้งหมด 19 วรรณกรรม โดยจะเป็นการเปรียบเทียบในหัวข้อหลัก ๆ คือ วิธีการนั้นสามารถติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้จริง, ความซับซ้อนในการนำมาใช้งานจริง, จำนวนตัวตรวจวัด, และกล่าวข้อดีและข้อเสียในแต่ละวิธีการดังตาราง 1-1 โดยในงานวิจัยนี้จะนำวิธีการเปรียบเทียบมาเป็นตัวตัดสินในการเลือกใช้วิธีการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

| MPPT Technique | PV Array Dependent? | True MPPT? | Analog or Digital? | Periodic Tuning? | Convergence Speed | Implementation Complexity | Sensed Parameters |
|-------------------------------------|---------------------|------------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------|
| Hill-climbing/P&O | No | Yes | Both | No | Varies | Low | Voltage, Current |
| IncCond | No | Yes | Digital | No | Varies | Medium | Voltage, Current |
| Fractional V_{OC} | Yes | No | Both | Yes | Medium | Low | Voltage |
| Fractional I_{SC} | Yes | No | Both | Yes | Medium | Medium | Current |
| Fuzzy Logic Control | Yes | Yes | Digital | Yes | Fast | High | Varies |
| Neural Network | Yes | Yes | Digital | Yes | Fast | High | Varies |
| RCC | No | Yes | Analog | No | Fast | Low | Voltage, Current |
| Current Sweep | Yes | Yes | Digital | Yes | Slow | High | Voltage, Current |
| DC Link Capacitor Droop Control | No | No | Both | No | Medium | Low | Voltage |
| Load I or V Maximization | No | No | Analog | No | Fast | Low | Voltage, Current |
| dP/dV or dP/dI Feedback Control | No | Yes | Digital | No | Fast | Medium | Voltage, Current |
| Array Reconfiguration | Yes | No | Digital | Yes | Slow | High | Voltage, Current |
| Linear Current Control | Yes | No | Digital | Yes | Fast | Medium | Irradiance |
| I_{MPP} & V_{MPP} Computation | Yes | Yes | Digital | Yes | N/A | Medium | Irradiance, Temperature |
| State-based MPPT | Yes | Yes | Both | Yes | Fast | High | Voltage, Current |
| OCC MPPT | Yes | No | Both | Yes | Fast | Medium | Current |
| BFV | Yes | No | Both | Yes | N/A | Low | None |
| LRCM | Yes | No | Digital | No | N/A | High | Voltage, Current |
| Slide Control | No | Yes | Digital | No | Fast | Medium | Voltage, Current |

ตาราง 1-1 ลักษณะที่สำคัญของเทคนิค MPPT [3]

อย่างไรก็ตามในบทความนี้ได้นำเสนอเฉพาะการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว แต่ไม่มีการกล่าวถึงขั้นตอนในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่และการจัดการพลังงานอย่างเหมาะสมหรือการนำพลังงานมาจัดสรรและใช้งานให้ได้อย่างคุ้มค่า

1.2.2 Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method [5]

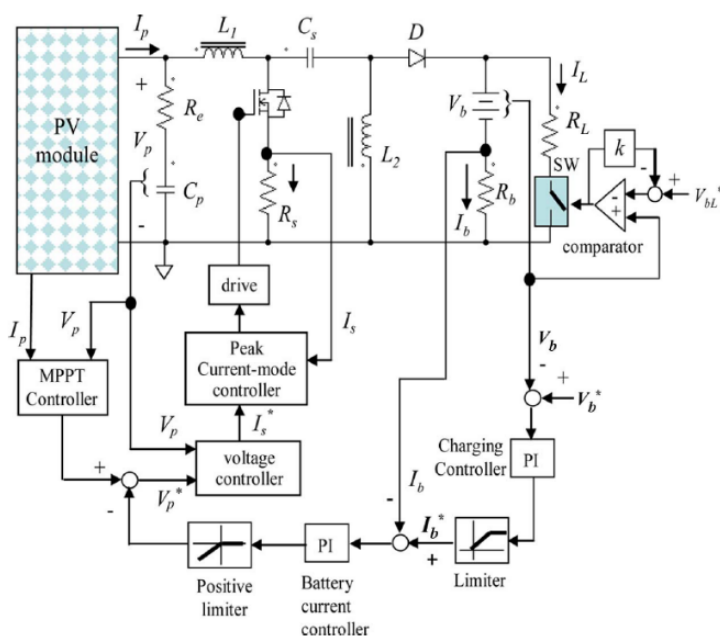
ในบทความนี้ได้นำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าขึ้นหรือขึ้นในการรบกวนระบบ (Duty Cycle Perturbation, ΔD) และค่าเวลาในการชั่งตัวอย่าง (Sampling Rate, T_s) ที่เหมาะสมที่สุดในการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดโดยวิธีการรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe Method: P&O Method) ซึ่งสามารถทำให้หาจุดที่มีค่าพลังงานสูงสุดได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสงหรืออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

อย่างไรก็ตามในบทความนี้ได้มุ่งเน้นไปเฉพาะในด้านการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียงอย่างเดียว ซึ่งไม่มีการกล่าวถึงการจัดการพลังงานอย่างเหมาะสมหรือการนำพลังงานมาจัดสรรและใช้งานให้ได้อย่างคุ้มค่าและขั้นตอนในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่

1.2.3 Modeling and Control of PV Charger System with SEPIC Converter [8]

ในบทความนี้ ได้นำเสนอการออกแบบวงจรและออกแบบตัวควบคุมของการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่จากพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในบทความนี้เลือกใช้วงจรแปลงผันไฟตรงแบบ SEPIC (SEPIC Converter) ดังภาพประกอบ 1-2 ซึ่งได้มุ่งเน้นไปในด้านการจัดสรรพลังงานที่ได้จากการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งไปให้โหลดตามต้องการ และพลังงานที่เหลือจะทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ โดยวิธีการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะใช้วิธีการเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: InC Method) เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงแต่อาจมีความซับซ้อนในการคำนวณเพิ่มขึ้น และการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ในบทความนี้ได้เลือกใช้วิธีการสามขั้นตอนในการประจุพลังงาน คือ คงค่ากระแส (Constant-Current) , คงค่าแรงดัน (Constant-Voltage) และปล่อยลอยการประจุพลังงาน (floating-charge)

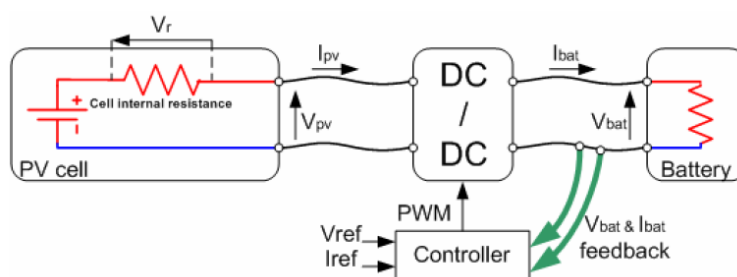
แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ และการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ที่บทความนี้ได้นำเสนอยังไม่สามารถทำงานพร้อมกันได้ ซึ่งถือเป็นข้อด้อยของบทความนี้ เพราะเนื่องมาจากมีตัวแปรในการควบคุมเพียงตัวเดียวจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ในการชดเชยค่าแรงดันหรือค่ากระแสเพียงวงจรเดียวจึงสามารถควบคุมการทำงานได้เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ไม่สามารถนำพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ได้อย่างเต็มที่ และจะเป็นการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ที่ไม่ได้มีความรวดเร็ว



ภาพประกอบ 1-2 วงจรและรูปแบบการควบคุมที่ใช้ในบทความนี้ [8]

1.2.4 Analysis of an Irradiance Adaptive PV Based Battery Floating Charger [9]

ในบทความนี้ ได้นำเสนอการควบคุมแบบป้อนกลับของการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่โดยใช้ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller) ซึ่งใช้วงจรถูกควบคุมในการชดเชยแรงดันในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่คือวงจรถักระดับแรงดัน (Buck Converter) ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบได้ดังแสดงในภาพประกอบ 1-3 ซึ่งระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller) จะช่วยทำให้ระบบป้อนกลับมีความเร็วและเกิดแรงดันเกินน้อย ทำให้เป็นการรักษาระดับแรงดันของแบตเตอรี่และเป็นการเปลี่ยนขั้นตอนในการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้อย่างดีและรวดเร็ว ซึ่งนี่ก็คือเป็นของเด่นของบทความนี้



ภาพประกอบ 1-3 ระบบควบคุมป้อนกลับของแรงดันและกระแส [9]

แต่อย่างไรก็ตามในบทความนี้ได้นำเสนอเฉพาะการออกแบบการควบคุมการประจุพลังงานเพียงอย่างเดียวไม่มีการกล่าวถึงการควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งนี่ก็คือเป็นข้อดีของบทความนี้

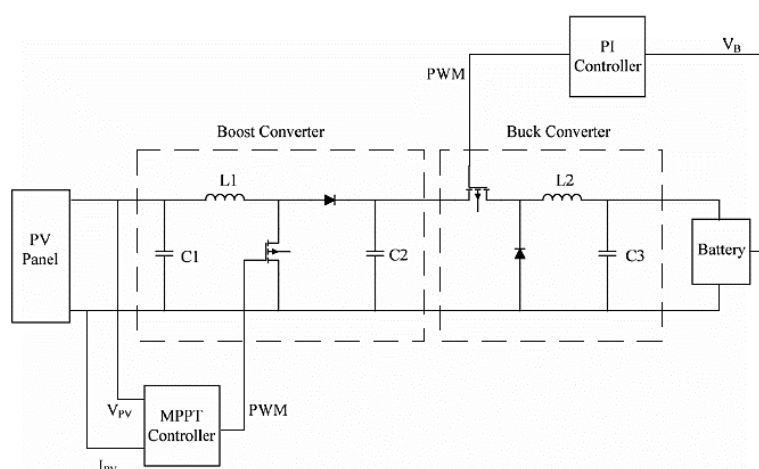
1.2.5 Comparison of Battery Charging Algorithms for Stand Alone Photovoltaic Systems [10]

ในบทความนี้มุ่งเน้นในเรื่องของการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ โดยจะเป็นการนำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการในการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่, ประเมินความสามารถในการรักษาระดับของ State of Charge (SOC) ให้มีค่าสูง, และดูประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ที่ทำการประจุพลังงานในวิธีการที่ต่างกัน โดยนำเสนอวิธีการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ทั้งหมดสามวิธี คือ Intermittent Charging (IC), Three Stage Charging (TSC) และ Interrupted Charge Control (ICC) ซึ่งจากการจำลองและการทดลอง ในบทความนี้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการ Three Stage Charging (TSC) จะมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้การควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่จากพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์

อย่างไรก็ตามในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และประเมินขั้นตอนวิธีการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว แต่ไม่มีการกล่าวถึงการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และการจัดการพลังงานอย่างเหมาะสมหรือการนำพลังงานมาจัดสรรและใช้งานให้ได้อย่างคุ้มค่า

1.2.6 Maximum Power Point Tracking and Optimal Li-ion Battery Charging Control for Photovoltaic Charging System [12]

ในบทความนี้ ได้นำเสนอระบบที่สามารถติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีการปรับเปลี่ยนขึ้นในการเพิ่มค่าความนำ (Variable Step Size Incremental Conductance Method) เป็นวิธีการที่สามารถปรับระดับขึ้นในการเพิ่มหรือลดของรอบการทำงาน (Duty cycle) โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์เพิ่มระดับแรงดัน (Boost Converter) เป็นวงจรที่ช่วยในการชดเชยค่าแรงดัน ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้จุดที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีการแกว่งน้อย และในบทความนี้ยังได้นำเสนอวิธีการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ ซึ่งมีแบตเตอรี่เพียงตัวเดียว โดยนำเสนอวิธีการ คงค่าแรงดัน (Constant Voltage Charging Method : CV) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีการตรวจสอบเฉพาะค่าแรงดันของแบตเตอรี่ โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ลดระดับแรงดัน (Buck Converter) เป็นวงจรที่ช่วยในการชดเชยค่าแรงดัน ซึ่งวงจรทั้งระบบของบทความนี้จะประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์สองวงจรดังภาพประกอบ 1-4 ซึ่งทำให้ระบบมีเสถียรภาพและมีช่วงการทำงานที่กว้างกว่าการปรับคอนเวอร์เตอร์เป็นแบบคอนเวอร์เตอร์หลายพอร์ต โดยในบทความนี้มีข้อดีคือสามารถติดตามหาค่าพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ และมีการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ ซึ่งการควบคุมทั้งสอง สามารถทำงานพร้อมกันได้



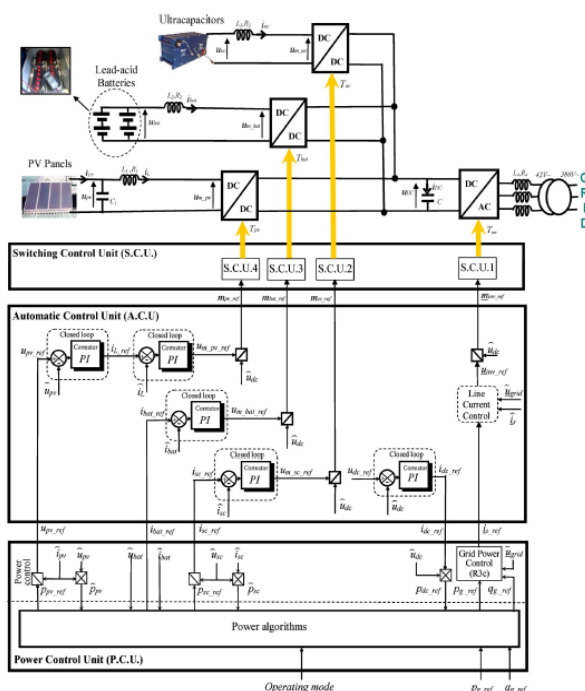
ภาพประกอบ 1-4 โครงสร้างของวงจรทั้งระบบ [12]

แต่อย่างไรก็ตามบทความนี้ก็ยังมีข้อด้อยคือ เมื่อแบตเตอรี่ประจุพลังงานเต็มแล้ว จะไม่มีการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ระบบขาดความน่าเชื่อถือ เพราะเนื่องจากแบตเตอรี่ไม่สามารถรับพลังงานได้แล้ว ซึ่งจะเป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

1.2.7 Power Control Design of a Battery Charger in a Hybrid Active PV Generator for Load-Following Applications [16]

ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ และวิธีการในการจัดสรรพลังงาน โดยในบทความนี้ ระบบจะประกอบไปด้วย เซลล์แสงอาทิตย์, แบตเตอรี่, Ultracapacitor, วงจร DC - DC Converter ทั้งหมด 3 วงจร และมีวงจรถูกอินเวอร์เตอร์เพื่อสำหรับการเชื่อมต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้า (Grid-Connected) การควบคุมจะแบ่งออกเป็น 4 การควบคุมย่อย คือการควบคุมสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายพลังงานให้กับระบบสายส่งไฟฟ้าหรือโหลดกระแสสลับ, การควบคุมสวิตช์ของ DC - DC Converter ตัวที่หนึ่งในการควบคุมพลังงานของ Ultracapacitor ซึ่งเป็นการควบคุมช่วงไดนามิกของพลังงาน, การควบคุมสวิตช์ของ DC - DC Converter ตัวที่สองในการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ และการควบคุมสวิตช์ของ DC - DC Converter ตัวที่สามในการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพประกอบ 1-5 โดยการควบคุมทั้ง 4 การควบคุมย่อยจะสามารถทำงานพร้อมกันได้ สามารถทำให้เก็บเกี่ยวพลังงานได้อย่างเต็มที่ เพราะมีการแยกการควบคุมของแต่ละวงจร ซึ่งนี่ก็คือข้อดีของบทความนี้

แต่อย่างไรก็ตามในบทความนี้จะเป็นการเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีการเชื่อมต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้า แต่ไม่มีการอธิบายถึงการทำงานถ้าระบบทำงานแบบโคดเดี่ยว (Stand-Alone System) ซึ่งเป็นระบบที่เราสนใจในการทำวิจัย



ภาพประกอบ 1-5 การเชื่อมต่อระบบสายส่งเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ที่รวมแบตเตอรี่ [16]

จากการทบทวนวรรณกรรม สามารถสรุปภาพรวมของวิจัยที่ได้ทำการทบทวนได้ดังแสดงในตาราง 1-2

| บทความ | MPPT Control | Battery Charging Control (BC Control) | Energy Storing Devices | Energy Harvest (MPPT+BC) |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| [3] | ✓ (Many MPPT Method) | ✗ | ✗ | ✗ |
| [5] | ✓ (P&O Method) | ✗ | ✗ | ✗ |
| [8] | ✓ (Inc Method) | ✓ (CC/CV) | 1 Battery | ✗ |
| [9] | ✗ | ✓ (No Detail) | 1 Battery | ✗ |
| [10] | ✗ | ✓ (IC,TSC,ICC) | 1 Battery | ✗ |
| [12] | ✓ (Variable Step Size Inc Method) | ✓ (CV) | 1 Battery | ✓ |
| [16] | ✓ (No Detail) | ✓ (Current-tracking) | 1 Battery + Ultracapacitor + Grid | ✓ |

ตาราง 1-2 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Energy Harvester) โดยมีการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์และมีการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้
- (2) เพื่อพัฒนาระบบให้ตอบสนองต่อความต้องการในการนำไปใช้ในด้านเตือนภัยน้ำท่วมที่จะสามารถมีพลังงานสำรองในการเตือนภัยได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) สามารถออกแบบและสร้างต้นแบบของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด และควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่
- (2) ต้นแบบที่สร้างสามารถนำไปใช้งานในการเตือนภัยน้ำท่วมได้จริง

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

- (1) ระบบฯ ที่ทำการออกแบบมีขนาดพิกัดกำลังสูงสุดเท่ากับ 100 วัตต์
- (2) ระบบฯ ที่ออกแบบสามารถประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead Acid) ที่มีพิกัดแรงดัน 12 โวลต์
- (3) การวิเคราะห์ระบบฯ จะวิเคราะห์การเก็บเกี่ยวพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ คือการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ การควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ และการถ่ายโอนพลังงานภายในระบบฯ
- (4) แบตเตอรี่ตัวสำรองซึ่งเชื่อมต่อกับวงจรคอนเวอร์เตอร์สองทาง ถูกกำหนดให้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่สามารถรับพลังงานได้อย่างไม่จำกัด
- (5) ในการทดสอบระบบฯ การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการใช้งานเป็นระยะเวลา ยาวนาน จะไม่ถูกพิจารณาให้เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6 วิธีการวิจัย

จากหัวข้อของงานวิจัยในหัวข้อ 1.1 และการทบทวนวรรณกรรม สามารถแยกการทำงานออกมาเป็นสี่ขั้นตอน ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการวิเคราะห์ของงานวิจัยได้ดังนี้

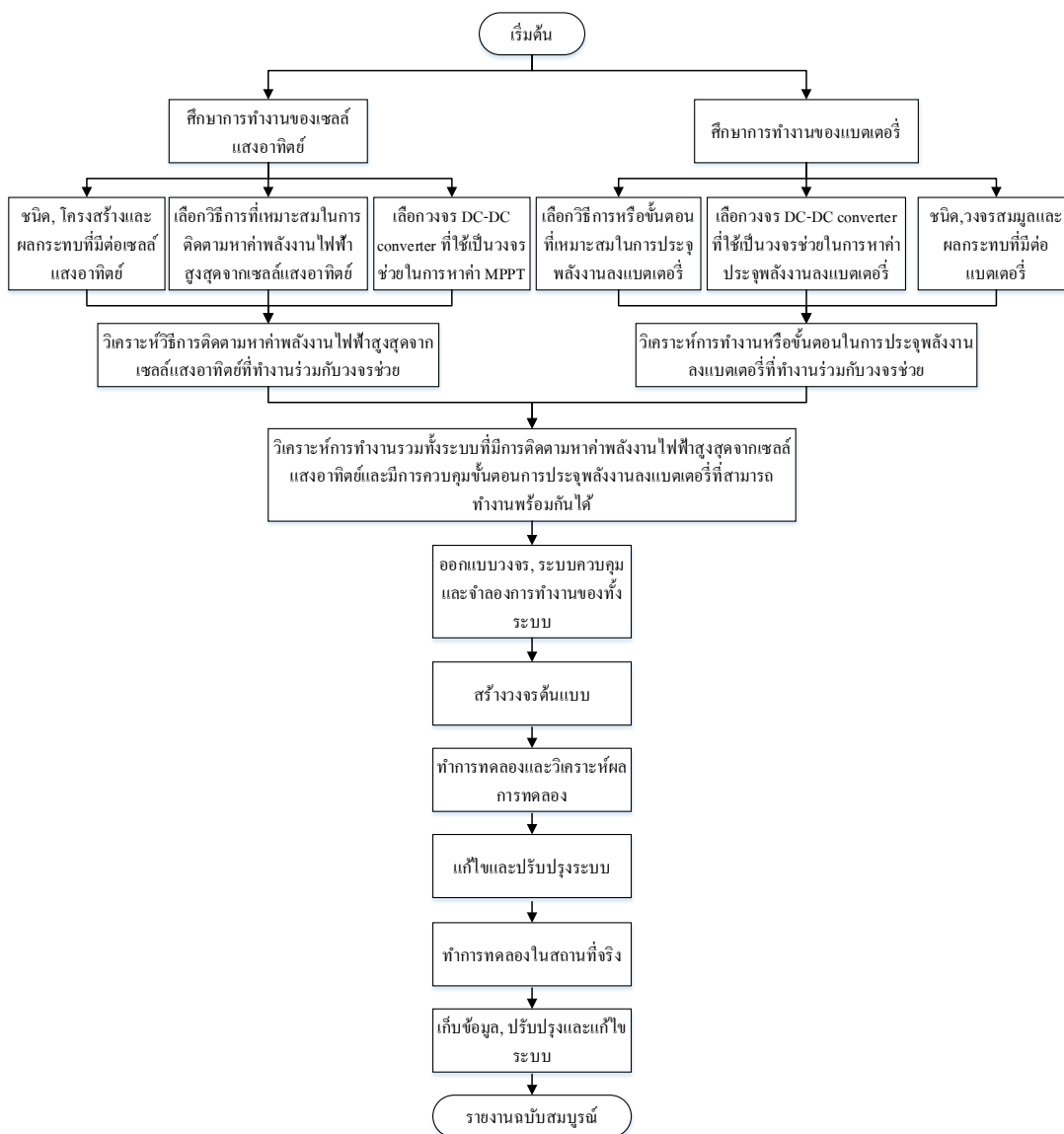
(1) การวิเคราะห์หาวิธีการและวงจรคอนเวอร์เตอร์ ที่เหมาะสมในการติดตามหาค่ากำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทบทวนวรรณกรรม จะเห็นได้ว่ามีอยู่หลายวิธีการที่สามารถติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยแต่ละวิธีการจะมีความซับซ้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกวิธีการพื้นฐานที่มีความซับซ้อนน้อย โดยความซับซ้อนของแต่ละวิธีจะพิจารณาจากความสามารถในการติดตามหาค่ากำลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้จริง จำนวนตัวตรวจวัด ความซับซ้อนในการนำมาใช้งานจริง ความเร็วในการติดตามหาค่ากำลังงานสูงสุด และความแม่นยำในการหาจุดที่มีค่ากำลังงานไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจากบทความที่ [3] จะมี 3 วิธีการที่เป็นวิธีการพื้นฐาน มีความซับซ้อนน้อย ซึ่งวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ในการติดตามหาค่ากำลังงานไฟฟ้าสูงสุด คือ วงจรเพิ่มระดับแรงดัน (Boost Converter) และในส่วนถัดมาจะเป็นวิเคราะห์และทำการจำลองวิธีการทั้ง 3 วิธีการเพื่อหาวิธีการที่มีความเหมาะสมกับระบบ

(2) การวิเคราะห์หาวิธีการและวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ จากการทบทวนวรรณกรรม จะเห็นได้ว่ามีอยู่หลายวิธีการที่มีการนำเสนอวิธีการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ ซึ่งแต่ละวิธีการในการควบคุมจะส่งผลกระทบต่อความเร็วในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ การป้องกันแบตเตอรี่ที่แตกต่างกัน และมีความเหมาะสมในการนำใช้งานของแบตเตอรี่ที่แตกต่างกัน และวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ในการประจุพลังงาน คือ วงจรลดระดับแรงดัน (Buck Converter)

(3) การวิเคราะห์หาแนวทางในการรวมกันของการติดตามหาค่ากำลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์และการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ จากการวิเคราะห์หาวิธีการที่เหมาะสมในสองส่วนนี้แล้ว เราจะนำทั้งสองวิธีการมารวมกันเป็นวิธีการควบคุมการทำงานของทั้งระบบเพื่อที่จะสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้

เบื้องต้นเป็นการจำลองการทำงานของระบบ โดยเริ่มจากการจำลองการทำงานแบบแยกที่แต่ละส่วนซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ การจำลองการติดตามหาค่ากำลังงานไฟฟ้าสูงสุด การจำลองในการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ การจำลองวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่มีการใช้งานทั้งหมดในงานวิจัยนี้ คือ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเพิ่มระดับแรงดัน (Boost Converter) วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบลดระดับแรงดัน (Buck Converter) และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional Buck/Boost Converter) สุดท้ายจะเป็นการจำลองวงจรรวมทั้งระบบซึ่งจะทำการจำลองแยกในแต่ละโหมดการทำงาน หลังจากการจำลองเป็นไปตามที่ต้องการแล้ว จะเริ่มทำการทดลองจริง โดยจะทำการทดลองในลักษณะคล้ายกับการจำลองที่มีการจำลองแยกที่แต่ละส่วน เพื่อทำการดูลักษณะการทำงานและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยจะสนใจในเรื่องของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ และการจัดสรรพลังงานที่ได้จากเซลล์

แสงอาทิตย์เพื่อทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้อย่างที่ต้องการ โดยมีแผนภาพวิธีการวิจัยดัง
แสดงในภาพประกอบ 1-6



ภาพประกอบ 1-6 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

1.7 แผนการดำเนินงาน

| ขั้นตอน | ปีการศึกษา 2558 | | | | | ปีการศึกษา 2559 | | | | | | | | | | ปีการศึกษา 2560 | | | | | | | |
|---|-----------------|------|------|------|------|-----------------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|-----------------|------|------|------|-------|-------|------|--|
| | ศ.ล. | ก.ย. | ค.ล. | พ.ย. | ธ.ล. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | มิ.ย. | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ค.ล. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | |
| 10.1 ศึกษางานวิจัย, เอกสารตีพิมพ์ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.2 ออกแบบระบบและวิเคราะห์การทำงานของระบบ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.3 ทำการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.4 วิเคราะห์การจำลองและเลือกวิธีการที่จะนำมาใช้ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.5 สร้างฮาร์ดแวร์ของระบบที่ออกแบบ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.6 ทดสอบการทำงานของระบบและปรับปรุงแก้ไข | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.7 สรุปผลและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1.8 อุปกรณ์และสถานที่ทำงานวิจัย

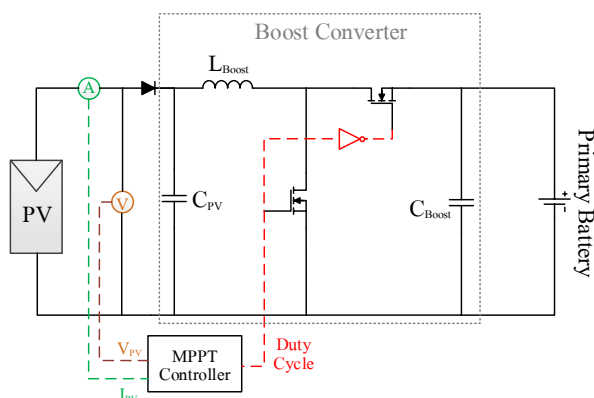
ห้อง EE101 Power Electronics Research Lab ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต

หาดใหญ่

บทที่ 2

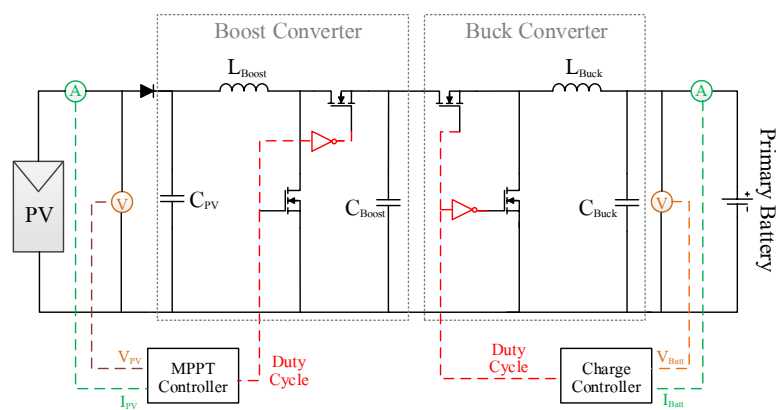
ทฤษฎีและหลักการ

จากหัวข้อของงานวิจัยในบทที่ 1 จะเห็นได้ว่าการติดตามหาค่าพลังงานสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถช่วยให้เรานำค่าพลังงานที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานได้ ส่วนการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก (Primary Battery) จะช่วยให้เป็นการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้อย่างรวดเร็วและป้องกันแบตเตอรี่ ซึ่งการควบคุมทั้งสองอย่างนี้จะช่วยให้ระบบการทำงานมีประสิทธิภาพดีขึ้น ตัวอย่างสถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นคือ หากต้องการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ 12 โวลต์ แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้ค่าพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 17 โวลต์ ซึ่งหากเราทำการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงกับแบตเตอรี่ จะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงไปที่ 12 โวลต์และทำให้ระบบทำงานที่ประสิทธิภาพต่ำลงโดยระบบไม่ได้ทำงานที่จุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นวิธีการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งสามารถติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้นั้น จะต้องมียวจรที่ช่วยในการชดเชยความแตกต่างของแรงดันให้สามารถทำงานที่จุดที่แหล่งจ่ายจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ซึ่งวงจรที่ช่วยในการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด คือ วงจรคอนเวอร์เตอร์ โดยจะเลือกใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์เพิ่มระดับแรงดัน หรือ วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) เพราะเป็นวงจรที่เรียบง่ายและให้ประสิทธิภาพสูง [18] ที่สามารถเพิ่มแรงดันให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในวงจรจะมีค่าต่ำลงเป็นผลให้เกิดกำลังสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำน้อยลง ดังแสดงในภาพประกอบ 2-1 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ผ่านวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์เข้ากับแบตเตอรี่



ภาพประกอบ 2-1 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ผ่านวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์เข้ากับแบตเตอรี่

การควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ คือ ควบคุมแรงดันหรือกระแสในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ โดยการควบคุมค่าแรงดันและกระแสในการประจุพลังงานจะเลือกใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ซึ่งการควบคุมเราจำเป็นต้องมีวงจรที่ช่วยในชดเชยความแตกต่างของแรงดันหรือกระแสเพื่อให้ประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้ตามขั้นตอน ภาพประกอบ 2-2 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ซึ่งคือวงจรลดระดับแรงดัน หรือ วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) เนื่องจากแรงดันที่มาจากเซลล์แสงอาทิตย์หรือแรงดันที่มาจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าที่มากกว่าระดับแรงดันของแบตเตอรี่จึงจำเป็นต้องใช้ในการประจุพลังงาน นอกจากนี้วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ยังเป็นวงจรที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพสูงด้วย [18]

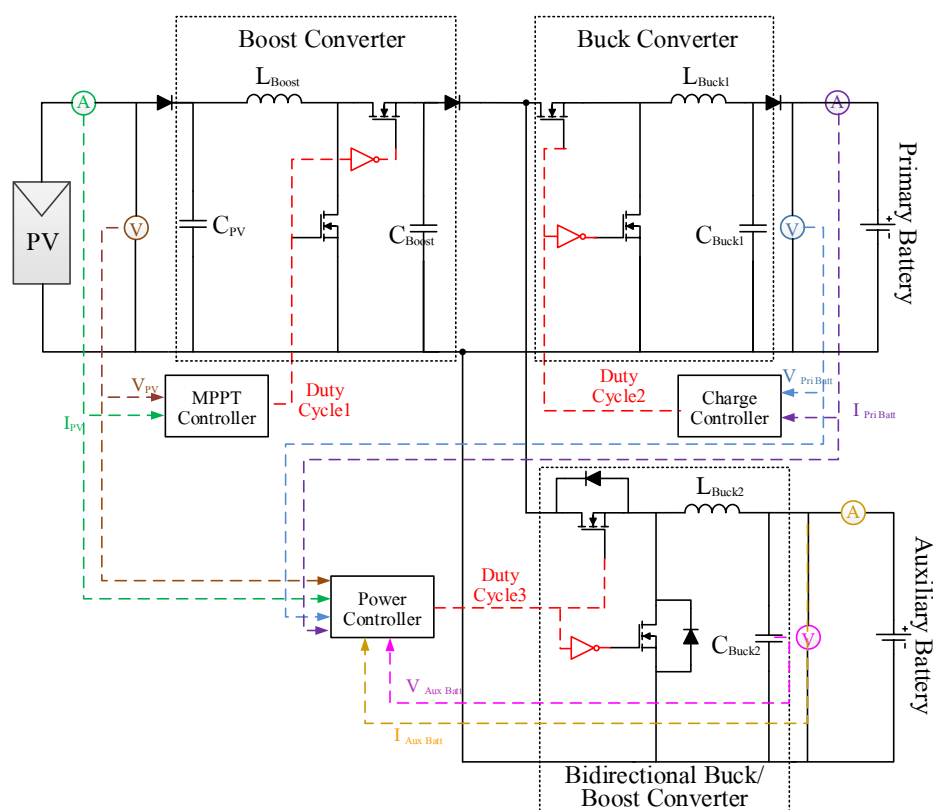


ภาพประกอบ 2-2 การต่อเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านวงจรบัพคอนเวอร์เตอร์และวงจรบักคอนเวอร์เตอร์เข้ากับแบตเตอรี่

อย่างไรก็ตามถ้าพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าพลังงานที่ต้องการในการประจุแบตเตอรี่ตัวหลักที่มีการควบคุมขั้นตอนในการประจุพลังงาน จะส่งผลให้ความแตกต่างของพลังงานเป็นเหตุให้วงจรติดตามหาค่าพลังงานสูงสุดต้องหยุดการทำงานเพื่อให้ตรงตามกฎอนุรักษ์พลังงาน คือ พลังงานด้านเข้ามีค่าเท่ากับพลังงานด้านออก ทำให้ไม่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทั้งหมด และยังสามารถส่งผลให้ระบบมีความน่าเชื่อถือน้อยลงและมีประสิทธิภาพต่ำลงด้วย วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการเพิ่มวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional Buck/Boost Converter) และแบตเตอรี่สำรอง (Auxiliary Battery) อีกตัวเพื่อรับพลังงานในกรณีที่มีพลังงานเหลือจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแบตเตอรี่ตัวสำรองนี้จะไม่มีการควบคุมการประจุพลังงาน จะมีเฉพาะการควบคุมค่าแรงดันในการประจุพลังงานไม่ให้เกิดค่าแรงดันพิกัดสูงสุดที่แบตเตอรี่รับได้ เพื่อเป็นการป้องกันการประจุพลังงานเกิน (Overcharging) ซึ่งจากหลักการทำงานทั่วไปของแบตเตอรี่ถ้าสมมุติว่าแบตเตอรี่มีขนาดใหญ่มากพอที่สามารถรับกระแสเท่าไรก็ได้

ในการประจุพลังงาน ก็ทำให้สามารถรับพลังงานที่เหลือในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักที่มีการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานทั้งสามขั้นตอนได้ และถ้าพลังงานที่มาจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลักต้องการ พลังงานที่ได้เก็บสะสมในแบตเตอรี่ตัวสำรองก็จะช่วยในการจ่ายพลังงานให้กับแบตเตอรี่ตัวหลักที่เราทำการควบคุมขั้นตอนในการประจุเพื่อให้สามารถประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักได้รวดเร็วสำหรับนำไปใช้งานกับโหลดต่อไป

ดังนั้นระบบแหล่งจ่ายพลังงานโดยรวมในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยแบตเตอรี่จำนวนสองตัว คือ แบตเตอรี่ตัวหลักและแบตเตอรี่สำรอง, เซลล์แสงอาทิตย์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์สามวงจร คือ วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter), วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter) และวงจรคอนเวอร์เตอร์บัก/บูทแบบ 2 ทาง (Bidirectional Buck/Boost Converter) ซึ่งระบบจะต้องมีวงจรควบคุมในการควบคุม 3 ส่วนด้วยกัน คือ การควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด การควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่แบบรวดเร็ว และการจัดสรรพลังงานภายในระบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-3



ภาพประกอบ 2-3 วงจรของทั้งระบบฯ ในงานวิจัยนี้

ในบทที่ 2 นี้ จะมีการนำเสนอรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังนี้

- (1) เซลล์แสงอาทิตย์ และวิธีการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์
- (2) แบตเตอรี่ และวิธีการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่
- (3) หลักการควบคุมการจัดสรรพลังงานภายในระบบ
- (4) หลักการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter)
- (5) หลักการทำงานของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter)
- (6) หลักการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional Buck/boost converter)
- (7) การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ให้ค่าระดับแรงดันและกระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว
- (8) หลักการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method)

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ และการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

แสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีอย่างไม่มีวันหมด แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลกเฉลี่ยประมาณ 4-5 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อตารางเมตรต่อวัน [14] ซึ่งในอดีตได้มีการนำพลังงานของแสงอาทิตย์มาใช้กันมากมาย เช่น การตาก หรือ อบสีน้าเกษตร เป็นต้น และต่อมาได้มีการพยายามนำพลังงานแสงอาทิตย์มาทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นก็ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลก(คือทราย) นำมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ผลิดให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และในทันทีที่มีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบ ที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับ อิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำ จนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (Atom) และสามารถ

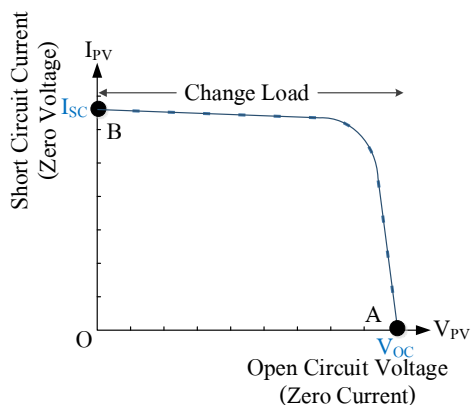
เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอน (Electron) มีการเคลื่อนที่ครบวงจรก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น

การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand Alone System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า, การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid Connected System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง ใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมือง หรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง และ การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ

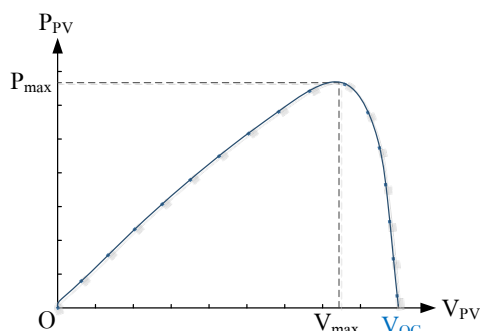
คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นสามารถแสดงได้โดยใช้กราฟระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V Curve) หรือกราฟระหว่างพลังงานกับแรงดัน (P-V Curve) การสร้างกราฟระหว่างกระแสกับแรงดัน ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ไม่การต่อโหลด (V_{oc}) จะให้ค่าแรงดันที่จุด A และเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าจนถึงค่ากระแสสูงสุดในสภาวะลัดวงจร ที่จุดนั้นจะให้ค่ากระแสสูงสุด (I_{sc}) ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ B จากนั้นลากเส้นผ่านจุดทุกจุดที่ทดสอบจะเกิดเป็นกราฟระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V Curve) ขึ้น ดังภาพประกอบ 2-4 และถ้านำค่ากระแสมาคูณกับแรงดันในแต่ละจุด จะได้ค่าของพลังงานแต่ละจุดซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟระหว่างพลังงานกับแรงดัน (P-V Curve) ได้ดังภาพประกอบ 2-5

- *อุณหภูมิ* กระแสไฟฟ้าจะไม่แปรตามหรือแปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% ซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟระหว่างกระแสกับแรงดัน ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิได้ดังภาพประกอบ 2-6

- *ความเข้มของแสงอาทิตย์* กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสงอาทิตย์ คือ ถ้าค่าความเข้มของแสงอาทิตย์มีค่าสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์เพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟระหว่างกระแสกับแรงดัน ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ได้ดังภาพประกอบ 2-7

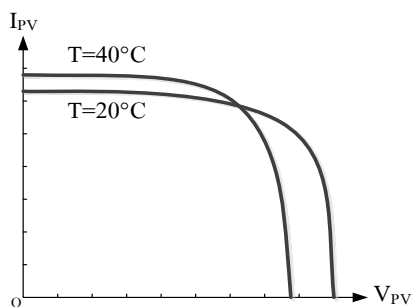


ภาพประกอบ 2-4 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟ กระแสและแรงดัน I-V Curve

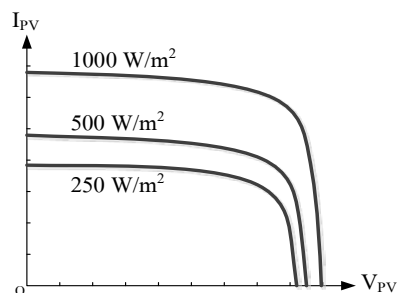


ภาพประกอบ 2-5 การทดสอบเพื่อสร้างกราฟ พลังงานและแรงดัน P-V Curve

ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน จะขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกได้แก่



ภาพประกอบ 2-6 กราฟกระแสและแรงดันที่ อุณหภูมิค่าต่างๆ

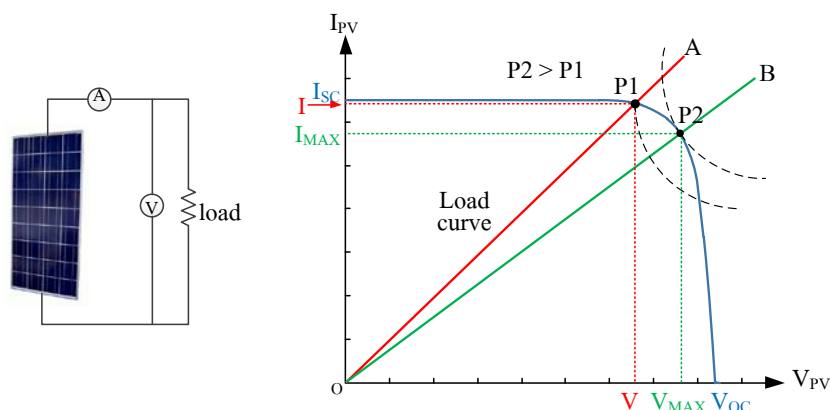


ภาพประกอบ 2-7 กราฟกระแสและแรงดันที่ ความเข้มแสงค่าต่างๆ

2.1.2 การติดตามหาพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

การติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด หรือ Maximum Power Point Tracking (MPPT) เป็นวิธีการทางอ้อมในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งถ้าเราทำการพิจารณาจากภาพประกอบ 2-8 เมื่อทำการต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับโหลดโดยตรง จะเห็นได้ว่าค่าของโหลดที่ถูกแทนด้วยเส้นกราฟโหลด OB ที่นำมาต่อจะมีเพียงค่าเดียวที่ตรงกับค่าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_2) โดยถ้าค่าของโหลดที่ถูกแทนด้วยเส้นกราฟโหลด OA จะได้รับค่าพลังงานมีค่าเท่ากับ P_1 ซึ่งน้อยกว่าค่าพลังงานสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ P_2 ที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงได้มีวิธีการติดตามหาค่าพลังงานสูงสุด โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ ปรับการรอบการทำงาน (Duty Cycle)

เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์มองเห็นโหลดที่ขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ (Resistive Input) มีค่าโหลดเป็นเส้นกราฟ OB ซึ่งทำให้โหลด (OA) สามารถดึงค่าพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_2) มาใช้งานได้เต็มที่



ภาพประกอบ 2-8 กราฟโหลด [4]

โดยวิธีการในการติดตามหาค่าพลังงานสูงสุดเหล่านี้จะเป็นการทำงานที่ทำซ้ำแล้วซ้ำอีกเพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าอยู่ที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยวิธีการที่พบมากที่สุดและเป็นวิธีการพื้นฐานที่สามารถนำไปประยุกต์ของการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีทั้งหมด 3 วิธีการคือ วิธีการรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe Method: P&O Method) วิธีการเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: InC Method) และวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (Fraction Open - Circuit Voltage Method: FO-CV Method) แต่ละวิธีในการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจะมีความซับซ้อนในการคำนวณ ความแม่นยำ จำนวนตัวตรวจวัด และประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน

(1) วิธีการรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe Method: P&O Method) [3-5]

วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) หลักการทำงานของวิธีการนี้จะทำงานเป็นคาบเวลาโดยจะทำปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หรือการปรับเปลี่ยนรอบการทำงาน (Duty cycle) ของระบบ ซึ่งก็คือการรบกวนระบบ และทำการสังเกตหรือดูค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด เพื่อเป็นการตรวจสอบตลอดเวลาว่า ตอนนี้ระบบทำงานอยู่ในจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วหรือไม่ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า ดังสมการที่ (2-1)

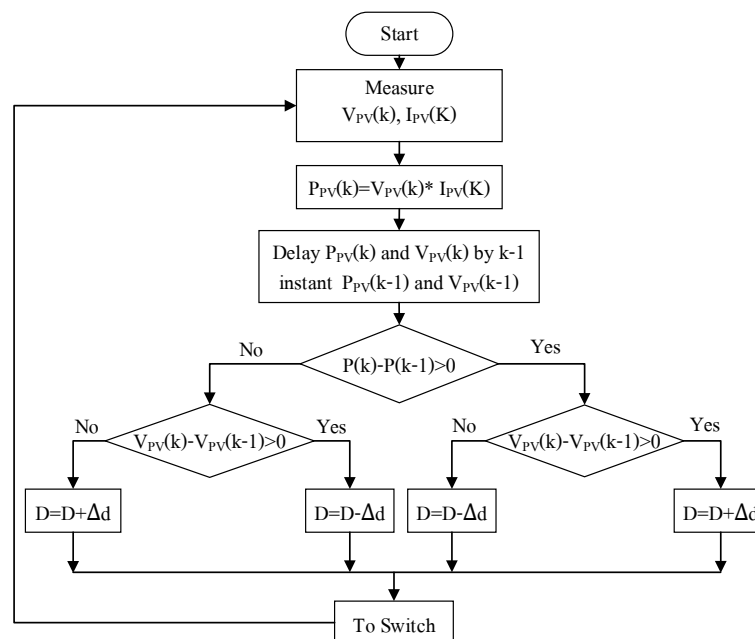
$$dP = P(k) - P(k-1) \quad (2-1)$$

โดย

ถ้า $- P(k) > P(k-1)$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางบวก หรือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมีค่าเป็นบวก ระบบจะทำการปรับทิศทางของแรงดัน (เพิ่มหรือลดแรงดัน) โดยการปรับรอบการทำงาน (Duty cycle) ในทิศทางเดิม

ถ้า $- P(k) < P(k-1)$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางลบ หรือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมีค่าเป็นลบ ระบบจะทำการปรับทิศทางของแรงดัน (เพิ่มหรือลดแรงดัน) โดยการปรับรอบการทำงาน (Duty cycle) ในทิศทางตรงกันข้าม

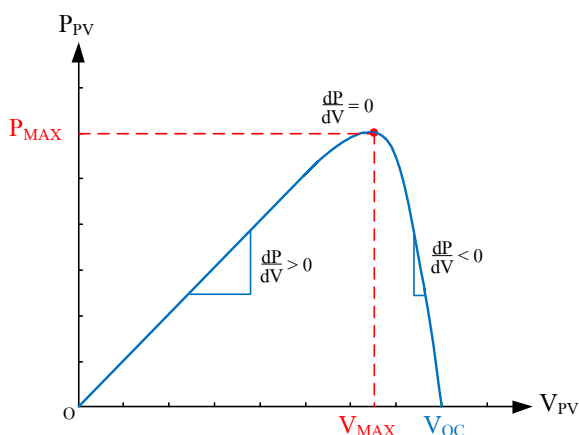
ซึ่งข้อดีของวิธีการรบกวนและสังเกตคือเป็นวิธีการในการคำนวณที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถทำงานได้ดีที่สภาวะคงตัว (สภาวะที่ปริมาณแสง และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ) โดยแผนผังความคิดของวิธีการนี้แสดงดัง ภาพประกอบ 2-9 แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแสงอาทิตย์หรืออุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะทำให้การติดตามหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเกิดข้อผิดพลาดได้



ภาพประกอบ 2-9 แผนผังความคิดของวิธี P&O

(2) วิธีการเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: InC Method) [3], [13]

วิธีการเพิ่มค่าความนำเป็นวิธีการที่พัฒนามาจากวิธีการรบกวนและสังเกต แต่วิธีการนี้จะการเปรียบเทียบค่าของผลต่างของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า หรือเป็นการหาค่าความชันของกราฟ กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพประกอบ 2-10



ภาพประกอบ 2-10 กราฟกำลังไฟฟ้า และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยถ้า $\frac{dP}{dV} > 0$ หรือค่าความชันของกราฟเป็นบวก แสดงว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านซ้ายของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งระบบจะทำการเพิ่มค่าแรงดัน เพื่อปรับให้ระบบวิ่งไปทำงานที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

$\frac{dP}{dV} = 0$ หรือค่าความชันของกราฟมีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าตอนนี้ระบบทำงานอยู่ที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

$\frac{dP}{dV} < 0$ หรือค่าความชันของกราฟมีค่าเป็นลบ แสดงว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านขวาของจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งระบบจะทำการปรับลดแรงดัน เพื่อปรับให้ระบบวิ่งกลับมาทำงานที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ถ้าเราทำการจัดรูปสมการที่ใช้ในการเปรียบเทียบใหม่ ให้อยู่ในรูปของกระแสและแรงดัน จะได้ดังสมการที่ (2-2)

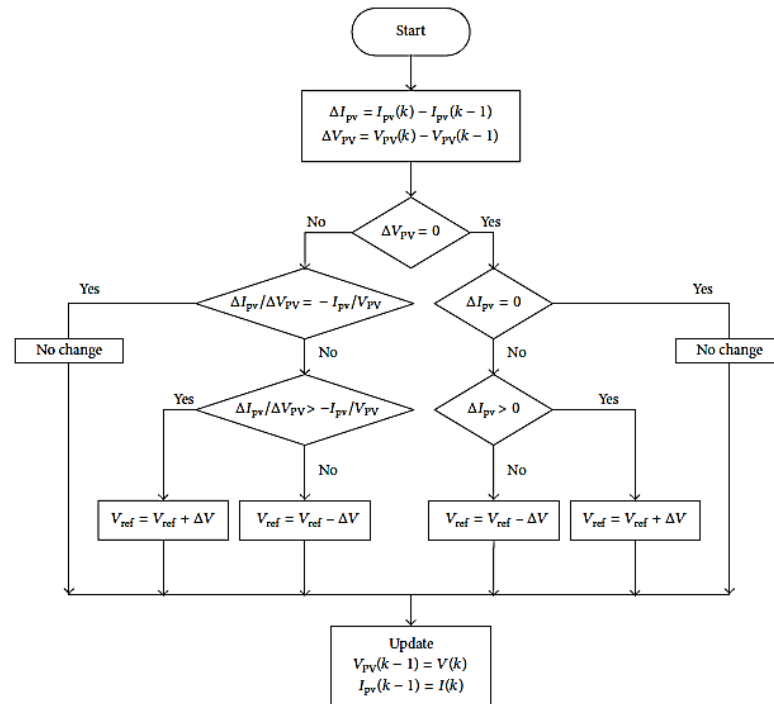
$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (2-2)$$

ดังนั้นจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

$$\frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} = 0 \quad (2-3)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2-4)$$

จากสมการที่ (2-4) เราสามารถเขียนเป็นแผนผังความคิดที่ใช้การคำนวณได้ดังภาพประกอบ 2-11 โดยที่ $\frac{I}{V}$ คือความนำของเซลล์แสงอาทิตย์ และ $\frac{dI}{dV}$ คือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพประกอบ 2-11 แผนผังความคิดของวิธี InC

จากภาพประกอบ 2-11 จะเห็นได้ว่าระบบจะทำการคำนวณโดยการเปรียบเทียบค่าของ $\frac{dI}{dV}$ กับ $-\frac{I}{V}$

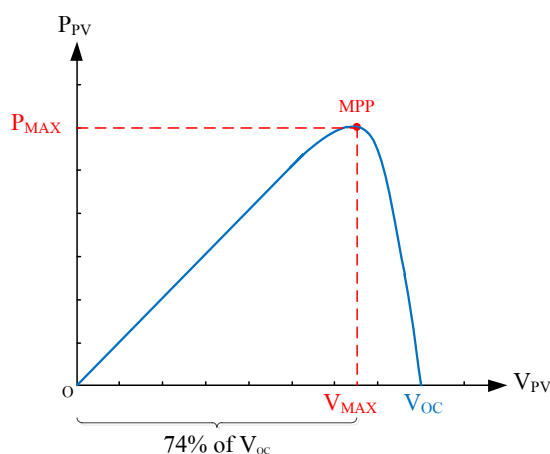
- โดยถ้าค่าของ $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ แสดงว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านซ้ายของระบบ
- $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ แสดงว่าจุดทำงานอยู่ที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$ แสดงว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านขวาของระบบ

และทำการตรวจค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ซึ่งจากการตรวจสอบค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะทำให้ระบบสามารถติดตามค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มของแสงอาทิตย์อย่างรวดเร็ว เพราะการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มของแสงอาทิตย์จะส่งผลต่อค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งนี่ก็เป็นข้อดีของวิธีการคำนวณนี้ แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ จุดทำงานจะยังคงแกว่งอยู่รอบจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เหมือนกับวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O) เพราะเกิดจากการปรับค่าแรงดันหรือค่ารอบการทำงาน (Duty

cycle) เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าระบบทำงานอยู่ในจุดพลังงานสูงสุด และอีกหนึ่งข้อเสียของวิธีการนี้ก็จะเป็นค่านวมที่เพิ่มขึ้นและมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น

(3) วิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร(Fraction Open - Circuit Voltage Method: FO-CV Method) [3], [15]

วิธีการคงค่าแรงดันเป็นวิธีการที่ง่ายและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยหลักการทํางานของวิธีการนี้คือ จะทำการคงค่าแรงดันให้มีค่าคงที่ของแรงดันขณะเปิดวงจร เป็นค่าแรงดันที่ได้จากการประมาณที่จะสามารถได้รับค่าพลังงานสูงสุดจะมีค่าประมาณ 71-78% ของแรงดันขนาดเปิดวงจร โดยในภาพประกอบ 2-12 จะมีค่าแรงดันคงที่อยู่ที่ประมาณ 74 % ของแรงดันขนาดเปิดวงจร



ภาพประกอบ 2-12 กราฟการหา MPPT ด้วยวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร

เนื่องจากแรงดันขนาดเปิดวงจรจะมีค่าไม่คงที่ในแต่ช่วงเวลา ดังนั้นการตรวจสอบหาค่าแรงดันขนาดเปิดวงจรจะทำการตรวจสอบเป็นคาบเวลาโดยการตัดโหลดออก เพื่อทำการวัดค่าแรงดันขณะเปิดวงจรเมื่อได้รับค่าแรงดันขนาดเปิดวงจร ก็สามารถที่นำไปคำนวณค่าแรงดันตามอัตราส่วนที่ระบุเพื่อให้ระบบย้ายจุดทํางานไปยังตำแหน่งที่ต้องการ คือตำแหน่งค่าพลังงานสูงสุดที่ได้จากการประมาณค่า ซึ่งข้อเสียของวิธีการนี้ คือการทำงานของโหลดจะมีความไม่ต่อเนื่อง และมีกำลังสูญเสียเนื่องจากการตัดโหลดออกเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าขนาดเปิดวงจร และมันมีความเป็นไปได้ไม่มากที่ค่าพลังงานสูงสุดจะอยู่ที่ค่าแรงดันเท่ากับ 74% ของแรงดันขณะเปิดวงจร ทำให้เราอาจไม่ได้รับค่าพลังงานสูงสุด ซึ่งส่งผลให้วิธีการนี้จะมีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method) และวิธีการเพิ่มค่าความนำ (InC Method) โดยข้อดีของวิธีการนี้คือ ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และเป็นวิธีการคำนวณที่ง่ายไม่ซับซ้อน

2.2 แบตเตอรี่ และการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีการใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่คือแบตเตอรี่ โดยในระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่มีหน้าที่เก็บพลังงานที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์และจัดเก็บไว้ใช้ในเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ผลิตไฟฟ้าหรือเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์หรือเวลากลางคืน

2.2.1 แบตเตอรี่

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานหรือแบตเตอรี่จะถูกใช้เป็นตัวกลางที่ใช้ในการเก็บพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนที่จะถูกจ่ายไปให้ไปให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างเหมาะสมตามที่ต้องการ การเลือกแบตเตอรี่ จะต้องพิจารณาตามความต้องการของระบบดังนี้

- **อายุการใช้งาน** อายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะหาได้จากรอบการประจุและการปล่อยประจุสูงสุด โดยอายุการใช้งานควรมีค่าเพียงพอเพื่อไม่ต้องทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่บ่อย
- **ความจุ** แบตเตอรี่ต้องมีค่าความจุเพียงพอสำหรับให้ระบบทำงานได้ในกรณีที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถให้พลังงานได้เช่น ตอนกลางคืน โดยถ้าเราทำการเลือกแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กเกินไปก็จะทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ได้อย่างเพียงพอในขณะที่ไม่มีแสงแดด และถ้าเราทำการเลือกแบตเตอรี่ขนาดใหญ่เกินไปก็จะทำให้ไม่สามารถประจุพลังงานได้เต็มค่าความจุของแบตเตอรี่หรือแบตเตอรี่ประจุพลังงานไม่เต็มจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Sulfating หรือ แผ่นธาตุที่มีผลึกซัลเฟตเกาะติดอยู่ที่บริเวณแผ่นธาตุ อาจเรียกว่า การประจุพลังงานน้อยเกิน (Undercharge) ซึ่งส่งผลให้อายุการทำงานของแบตเตอรี่สั้นลง หรืออาจส่งผลให้แบตเตอรี่เสียหายอย่างถาวรได้เช่นกัน นอกจากนี้จะต้องคำนึงถึงอัตราการคลายประจุภายในตัวเองและ ผลของ Memory effect ซึ่งส่งผลต่อความจุของอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละชนิดด้วย
- **การดีดกระแส** แบตเตอรี่ต้องมีความสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าค่าสูงๆ ในช่วงเวลาสั้นๆ ได้
- **ขนาดและน้ำหนัก** แสดงดังตาราง 2-1

| | NiCd | NiMH | Lead Acid | Li-ion | Li-ion polymer | Reusable Alkaline |
|--|-----------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Gravimetric Energy Density (Wh/kg) | 45-80 | 60-120 | 30-50 | 110-160 | 100-130 | 80 (initial) |
| Internal Resistance (includes peripheral circuits) in mΩ | 100 to 200 6V pack | 200 to 300 6V pack | <100 12V pack | 150 to 250 7.2V pack | 200 to 300 7.2V pack | 200 to 2000 6V pack |
| Cycle Life (to 80% of initial capacity) | 15002 | 300 to 500 | 200 to 300 | 500 to 1000 | 300 to 500 | 50(to 50%) |
| Fast Charge Time | 1h typical | 2-4h | 8-16h | 2-4h | 2-4h | 2-3h |
| Overcharge Tolerance | moderate | low | high | very low | Low | moderate |
| Self-discharge/Month (room temperature) | 20% | 30% | 5% | 10% | ~10% | 0.30% |
| Cell Voltage (nominal) | 1.25V | 1.25V | 2V | 3.6V | 3.6V | 1.5V |
| Load Current - peak - best result | 20C 1C | 5C 0.5C or lower | 5C 0.2C | >2C 1C or lower | >2C 1C or lower | 0.5C 0.2C or lower |
| Operating temperature (discharge only) | -40 to 60°C | -20 to 60°C | -20 to 60°C | -20 to 60°C | 0 to 60°C | 0 to 65°C |
| Maintenance Requirement | 30 to 60 days | 60 to 90 days | 3 to 6 months | not req. | not req. | not req. |
| Typical Battery Cost (US\$, reference only) | \$50 (7.2V) | \$60 (7.2V) | \$25 (6V) | \$100 (7.2V) | \$100 (7.2V) | \$5 (9V) |
| Cost per Cycle (US\$) | \$0.04 | \$0.12 | \$0.10 | \$0.14 | \$0.29 | \$0.10-0.50 |
| Commercial use since | 1950 | 1990 | 1970 | 1991 | 1999 | 1992 |

ตาราง 2-1 ขนาดและน้ำหนักของแบตเตอรี่และซูเปอร์คาปาซิเตอร์

สำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ที่เหมาะสม ได้แก่ แบตเตอรี่ชนิด NiMH , Lead Acid และ Li+/Li+ Polymer ส่วนแบตเตอรี่ชนิด NiCd ไม่เหมาะสม เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานน้อย มีผลของ Memory effect และมีพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในการพิจารณาเลือกแบตเตอรี่ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการหลักในการใช้งาน เช่น ถ้าคำนึงถึงราคาและความจุเป็นหลักควรเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิด NiMH และ Lead Acid หากต้องการความหนาแน่นของพลังงานสูงและขนาดเล็กควรเลือกแบตเตอรี่ชนิด Li+, Li+ Polymer ตาราง 2-1 แสดงการเปรียบเทียบความจุและอายุการใช้งานของอุปกรณ์เก็บพลังงานชนิดต่างๆ

นอกจากนี้วิธีการประจุพลังงานเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบ แบตเตอรี่แต่ละชนิดจะมีวิธีการประจุพลังงานที่แตกต่างกันออกไป เช่น แบตเตอรี่ชนิด NiMH จะมีวิธีการประจุพลังงานที่ง่าย โดยสามารถประจุพลังงานได้โดยใช้เพียงกระแสต่อเนื่องค่าต่ำๆ เท่านั้น ในขณะที่แบตเตอรี่ชนิด Li+ จะมีวิธีการประจุพลังงานที่ค่อนข้างยุ่งยาก ส่วนแบตเตอรี่ชนิด Lead Acid จะมีวิธีการประจุพลังงานอาจต้องการการประจุพลังงานแบบกระแสคงที่และตามด้วยการประจุพลังงานแบบแรงดันคงที่ซึ่งสามารถประยุกต์ให้เป็นการประจุพลังงานอย่างรวดเร็วได้

งานวิจัยนี้จะเน้นการประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่ชนิด Lead Acid เพราะต้องการความหนาแน่นของพลังงานสูง ขนาดเล็ก วิธีการที่สามารถประจุพลังงานได้อย่างรวดเร็วและมีความปลอดภัยกับแบตเตอรี่

2.2.2 การควบคุมขั้นตอนหรือวิธีการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่

เซลล์แสงอาทิตย์จะให้ค่าแรงดันและกระแสที่มีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงทำให้เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่เหมาะสมสำหรับการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ที่ต้องการค่าแรงดันและกระแสตามขั้นตอนการประจุโดยตรง ดังนั้นการที่เราจะเอาแบตเตอรี่มาใช้งานในระบบของเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ลดลง ทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลงและจากสภาพอากาศจะทำให้ State of Charge (SOC) ของแบตเตอรี่มีค่าต่ำด้วย โดยปกติแล้วการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่จะต้องมีการใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์มาช่วยในการปรับค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) เพื่อทำการปรับค่าแรงดันและกระแสให้มีค่าตามขั้นตอนการประจุ ซึ่งการควบคุมการประจุพลังงานก็ยังสามารถทำให้มีการประจุพลังงานได้อย่างรวดเร็ว และยังสามารถป้องกันการประจุพลังงานเกิน (Overcharge) ซึ่งส่งผลให้อายุการทำงานของแบตเตอรี่สั้นลง หรืออาจส่งผลให้แบตเตอรี่เสียหายอย่างถาวรได้ โดยวิธีการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ที่มีความเหมาะสม [10] ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำมาประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ คือวิธีการแบบ Three-Stages Charging (TSC) ดังภาพประกอบ 2-13 ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

(1) State 1: Bulk Charging

การประจุพลังงานในขั้นตอนนี้จะเป็นการประจุพลังงานที่ค่ากระแสคงที่ที่ค่ากระแสสูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถทำงานได้ตามข้อมูลจากผู้ผลิตและค่าแรงดันของแบตเตอรี่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่า Absorption Voltage ซึ่งการประจุพลังงานในขั้นตอนนี้จะเป็นการประจุที่ 70-80% ของความจุของแบตเตอรี่ และเป็นขั้นที่ประจุพลังงานในอัตราที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้

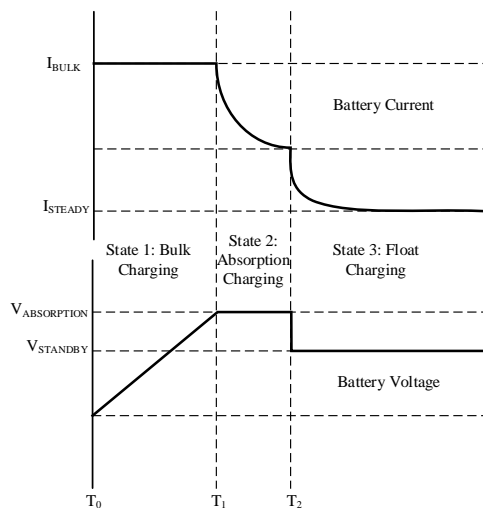
(2) State 2: Absorption Charging

การประจุพลังงานในขั้นตอนนี้จะกำหนดให้ค่าแรงดันในการประจุมีค่าคงที่ที่ Absorption Voltage โดยจะมีค่าประมาณ 1.2 เท่าของระดับแรงดันปกติของแบตเตอรี่และค่ากระแสการประจุจะค่อยๆลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการประจุพลังงานอีกประมาณ 20-30 % ของความจุของแบตเตอรี่

(3) State 3: Float Charging

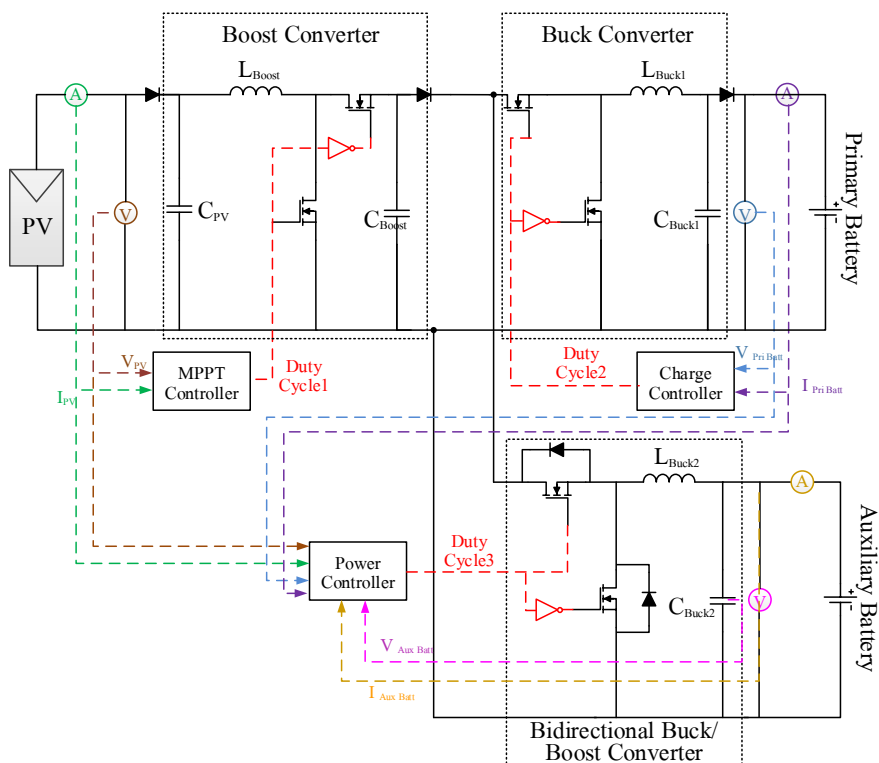
ในขั้นตอนนี้ระดับแรงดันจะถูกปรับลดลงให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่งๆที่เรียกว่า Standby - Voltage โดยมีค่าประมาณ 1.13 - 1.15 เท่าของระดับแรงดันปกติของแบตเตอรี่ โดยในขั้นตอนนี้จะมีการใช้กระแสลดลงน้อยกว่า 10% ของความสามารถของแบตเตอรี่ เพื่อรักษาระดับแรงดันของ

แบตเตอรี่ให้มีการประจุพลังงานลงอย่างปลอดภัย เป็นการชดเชยการคายประจุและเป็นการยืดอายุให้แก่อแบตเตอรี่ด้วย



ภาพประกอบ 2-13 กราฟแรงดันและกระแสของวิธีการประจุพลังงานแบบ TSC

2.3 หลักการควบคุมการจัดสรรพลังงานภายในระบบ (Energy Management System)



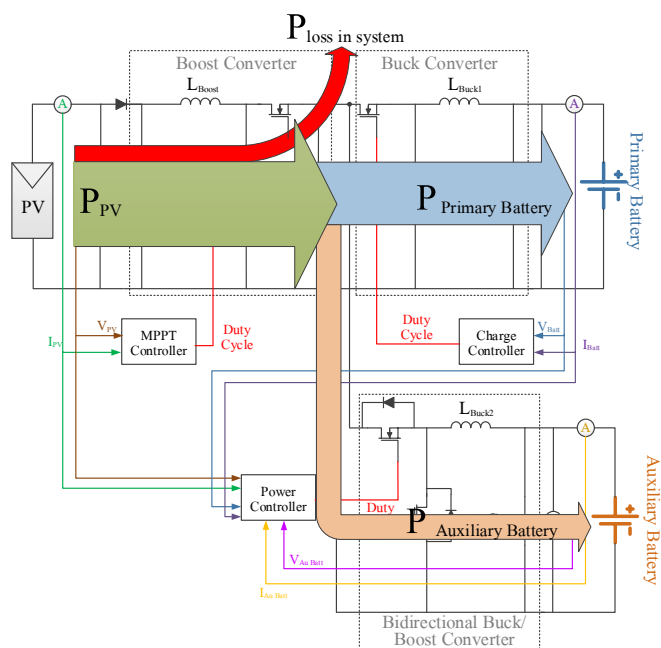
ภาพประกอบ 2-14 ภาพรวมของระบบในงานวิจัย

จากภาพประกอบ 2-3 นำมาเขียนได้เป็นภาพประกอบ 2-14 จะแสดงภาพรวมของระบบที่ได้ทำการออกแบบและนำเสนอ ซึ่งภายในระบบมีการควบคุมทั้งหมด 3 ส่วน การควบคุมทั้งหมดจะมีความเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อเรามีการจัดสรรพลังงานทั้งหมดของระบบอย่างดี โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทางและแบตเตอรี่ช่วย จะเป็นตัวที่ช่วยในการควบคุมและช่วยในการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้เกิดการควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้อย่างรวดเร็วและสามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ ซึ่งการจัดสรรพลังงานนี้คือการควบคุมและการบาลานซ์พลังงานภายในระบบ โดยมีการแบ่งโหมดการทำงานของระบบ โดยเราสามารถที่จะสรุปเป็นโหมดการรับส่งพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) เพื่อจ่ายพลังงานไปยังแบตเตอรี่ตัวหลัก ($P_{\text{Primary Battery}}$) ที่มีการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานและจ่ายพลังงานไปยังแบตเตอรี่ตัวสำรองอีกตัว ($P_{\text{Auxiliary Battery}}$) ซึ่งจะมีการทำงานได้ทั้งหมด 3 โหมด Mode I : $P_{PV} - P_{\text{loss}} > P_{\text{Primary Battery}}$, Mode II : $P_{PV} - P_{\text{loss}} = P_{\text{Primary Battery}}$ และ Mode III : $P_{PV} - P_{\text{loss}} < P_{\text{Primary Battery}}$ โดยแต่ละโหมดของการควบคุมพลังงานก็จะมีเงื่อนไขในการควบคุมที่แตกต่างกันออกไป ดังนี้

2.3.1 Mode I : $P_{PV} - P_{\text{loss}} > P_{\text{Primary Battery}}$

ในโหมดการทำงานที่ 1 จะทำการแบ่งออกเป็นอีกสองโหมดย่อย โหมดย่อยที่หนึ่งคือแบตเตอรี่ตัวสำรองสามารถรับพลังงานได้มากกว่าพลังงานที่เหลือหลังจากหักค่าของพลังงานสูญเสียในระบบจากการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักที่มีการควบคุมขั้นตอนการประจุ และโหมดย่อยที่สองคือแบตเตอรี่ตัวสำรองรับค่าพลังงานได้น้อยกว่าค่าพลังงานที่เหลือหลังจากหักค่าของพลังงานสูญเสียในระบบจากการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักที่มีการควบคุมการประจุ ซึ่งใน ถ้าเรามีการสมมุติว่าแบตเตอรี่ตัวสำรองมีขนาดใหญ่มาก โหมดย่อยที่สองก็จะไม่เกิดขึ้น

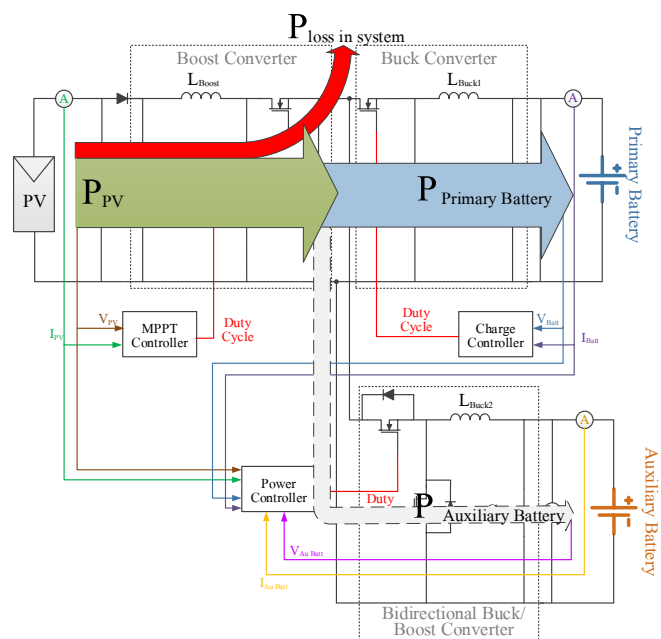
ถ้าทำการสมมุติสถานการณ์ที่แบตเตอรี่ตัวสำรองสามารถรับพลังงานที่เหลือจากการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักที่มีการควบคุมขั้นตอนการประจุ เพื่อให้เห็นเป้าหมายที่เรา กำหนด คือสมมุติให้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) มีค่าเท่ากับ 180 วัตต์ และพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลัก ($P_{\text{Primary Battery}}$) ต้องการที่ทำการควบคุมขั้นตอนการประจุ ต้องการเท่ากับ 67 วัตต์ และระบบเกิดกำลังสูญเสียเท่ากับ 10 วัตต์ ดังนั้นพลังงานที่เหลือเท่ากับ $180 - 67 - 10 = 103$ วัตต์ จะทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง ($P_{\text{Auxiliary Battery}}$) ที่ไม่มีการควบคุมขั้นตอนการประจุ ดังภาพประกอบ 2-15



ภาพประกอบ 2-15 ทิศทางของการส่งผ่านพลังงานในโหมดที่ 1

$$2.3.2 \text{ Mode II : } P_{PV} - P_{loss} = P_{Primary Battery}$$

ในโหมดการทำงานโหมดที่ 2 ค่าของพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการหักค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ มีค่าเท่ากับค่าพลังงานของแบตเตอรี่ตัวหลักที่ทำการควบคุมขั้นตอนในการประจุ ซึ่งในโหมดนี้จะไม่มีการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง ดังภาพประกอบ 2-16

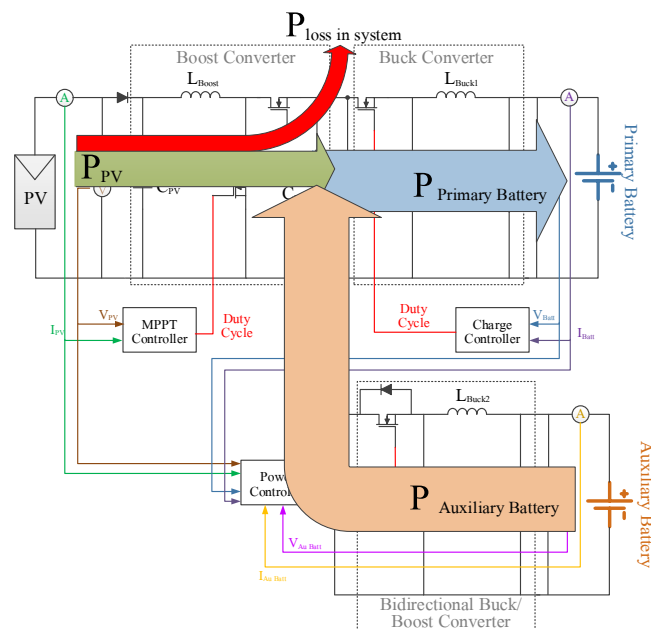


ภาพประกอบ 2-16 ทิศทางของการส่งผ่านพลังงานในโหมดที่ 2

2.3.3 Mode III : $P_{PV} - P_{loss} < P_{Primary Battery}$

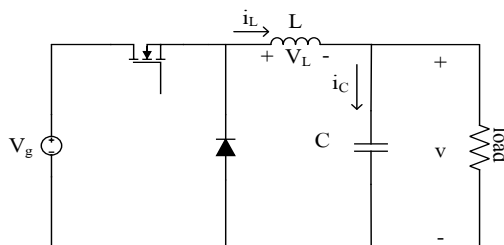
ในโหมดการทำงานที่ 3 จะทำการแบ่งออกเป็นอีกสองโหมดย่อย โหมดย่อยที่หนึ่งคือแบตเตอรี่ตัวสำรองสามารถจ่ายพลังงานให้กับแบตเตอรี่ตัวหลักที่ทำการควบคุมขั้นตอนในการประจุพลังงานลงเพียงพอดตามขั้นตอน หลังจากที่หักค่าของพลังงานสูญเสียในระบบ และโหมดย่อยที่สองคือแบตเตอรี่ตัวสำรองไม่สามารถจ่ายพลังงานให้กับแบตเตอรี่ตัวหลักที่ทำการควบคุมขั้นตอนในการประจุได้ตามขั้นตอน ซึ่งโหมดย่อยที่สองมีโอกาสเกิดน้อยมาก ถ้าเรามีการคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

ถ้าทำการสมมุติสถานการณ์ที่แบตเตอรี่ตัวสำรองสามารถจ่ายพลังงานให้กับแบตเตอรี่ตัวหลักที่ทำการควบคุมขั้นตอนในการประจุพลังงานเพียงพอ เพื่อให้เห็นเป้าหมายที่เรา กำหนด คือสมมติให้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) มีค่าเท่ากับ 30 วัตต์ และพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลัก ($P_{Primary Battery}$) ต้องการที่ทำการควบคุมขั้นตอนการประจุ ต้องการเท่ากับ 67 วัตต์ และระบบเกิดกำลังสูญเสียเท่ากับ 10 วัตต์ ดังนั้นพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวสำรองต้องจ่ายเท่ากับ $67 - 30 - 10 = 27$ วัตต์ เพื่อทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก ($P_{Primary Battery}$) ให้ได้ตามขั้นตอนในการควบคุม ดังภาพประกอบ 2-17



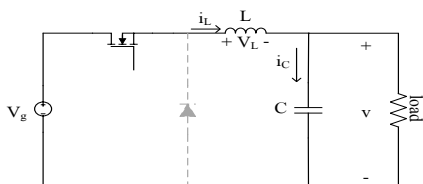
ภาพประกอบ 2-17 ทิศทางของการส่งผ่านพลังงานในโหมดที่ 3

2.4 หลักการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter)

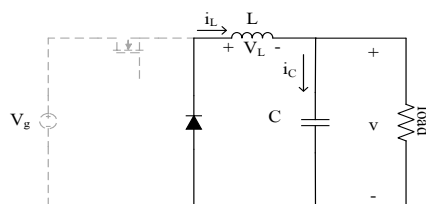


ภาพประกอบ 2-18 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) เป็นวงจรที่มีค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย (v) มีค่าน้อยกว่าแรงดันอินพุต (v_g) ซึ่งเป็นวงจรที่มีค่าคงที่ นิยมใช้กันมาก ในภาพประกอบ 2-18 เป็นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้มอสเฟตกำลังเป็นสวิทช์ การทำงานของวงจรเป็นแบบชดเชยพลังงานระดับแรงดัน โดยเราจะทำการวิเคราะห์ห้วงจรที่ทำงานอยู่ในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) สมมุติวงจรทำงานอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัว (Steady state) และอุปกรณ์ภายในวงจรเป็นแบบอุดมคติ ซึ่งการทำงานของวงจรแบ่งออกเป็น 2 โหมด



ภาพประกอบ 2-19 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดที่ 1



ภาพประกอบ 2-20 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดที่ 2

โหมดที่ 1 เริ่มต้นเมื่อ มอสเฟต (Q_1) นำกระแสที่เวลา $t=0$ ไดโอดจะเกิดการไบอัสกลับ ตัวเหนี่ยวนำจะทำการชาร์จประจุ ดังแสดงภาพประกอบ 2-19 ซึ่งเราสามารถเขียนสมการแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ, การเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ และกระแสของตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$v_L = V_g - V \quad (2-5)$$

จาก $v_L = L \frac{di_L}{dt}$ จะได้

$$\Delta i_L = \frac{V_g - V}{L} DT_s \quad (2-6)$$

$$i_c = I - \frac{V}{R} \quad (2-7)$$

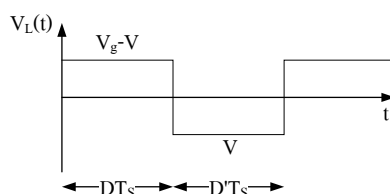
โหมดที่ 2 เริ่มต้นเมื่อ มอสเฟต (Q_1) หยุดนำกระแสที่เวลา $t = t_1$ ไดโอดหมุนเปล้า ดังแสดงภาพประกอบ 2-20 ซึ่งภายในวงจรไดโอดหมุนเปล้าจะนำกระแสเพื่อคายพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ กระแสจะไหลต่อเนื่องผ่านตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ โหลด ไดโอด (D_1) กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะลดลงจนกระทั่งถึงเวลาที่มอสเฟตนำกระแสอีกครั้ง ซึ่งเราสามารถเขียนสมการแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ, การเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ และกระแสของตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$v_L = -V \quad (2-8)$$

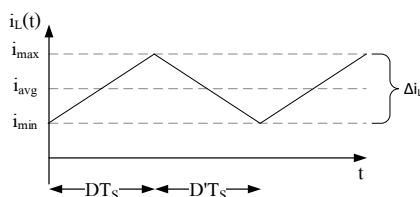
จาก $v_L = L \frac{di_L}{dt}$ จะได้
$$\Delta i_L = \frac{-V}{L} (1-D) T_s \quad (2-9)$$

$$i_c = I - \frac{V}{R} \quad (2-10)$$

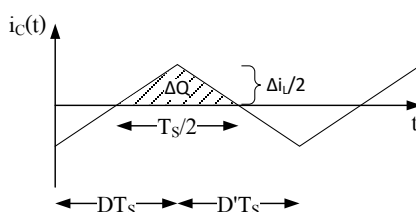
จากสมการที่ (2-5) - (2-10) เราสามารถเขียนเป็นกราฟแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ, การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และกระแสที่ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุได้ดังภาพประกอบ 2-21 ถึงภาพประกอบ 2-23



ภาพประกอบ 2-21 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 2-22 การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 2-23 กระแสที่ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

จากหลักการของ Inductor Volt-Second Balance ของตัวเหนี่ยวนำ หรือถ้าทำการวิเคราะห์จากกราฟแรงดันของตัวเหนี่ยวนำดังภาพประกอบ 2-21 แรงดันของตัวเหนี่ยวนำในหนึ่งคาบจะมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการที่ (2-11)

$$(V_g - V)DT_s + (-V)D'T_s = 0 = \langle v_L \rangle \quad (2-11)$$

จะได้อัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุต ดังสมการที่ (2-12)

$$M(D) = \frac{V}{V_g} = D \quad (2-12)$$

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ ส่วนใหญ่เราจะทำการดูค่าขอดถึงขอดหรือค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งสมการที่(2-6) จะมีค่าเท่ากับค่าของสมการที่ (2-9) ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_g - V}{L} \right) (DT_s) = \left(\frac{V}{L} \right) (1 - D) T_s \quad (2-13)$$

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_g - V}{L f_s} \right) D = \frac{V(1 - D)}{L f_s}$$

ดังนั้น

$$L = \left(\frac{V_g - V}{\Delta i_L f_s} \right) D = \frac{V(1 - D)}{\Delta i_L f_s} \quad (2-14)$$

ถ้าเราต้องการทำการออกแบบตัวเก็บจุ จะทำการพิจารณาในขณะที่ตัวประจุตัวเก็บประจุทำการเก็บประจุซึ่งก็คือครึ่งบวกของภาพประกอบ 2-23 จากสมการจำกัดความของความจุ

$$Q = CV \quad (2-15)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta Q}{C}$$

การเปลี่ยนแปลงของ ΔQ คือรูปสามเหลี่ยมเหนือแกนเวลา

$$\Delta V = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{T_s}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right)}{C} \quad (2-16)$$

$$\Delta V = \frac{T_s \Delta i_L}{8C}$$

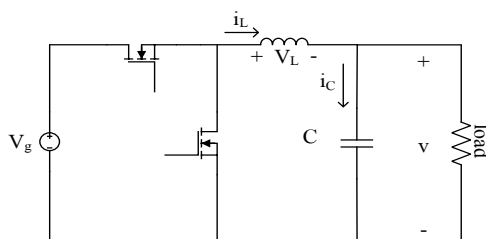
เมื่อแทนค่า Δi_L จากสมการที่ (2-6) และ (2-9) จะได้

$$\Delta V = \frac{(V_g - V)D}{8LCf_s^2} = \frac{V(1-D)}{8LCf_s^2} \quad (2-17)$$

ดังนั้น

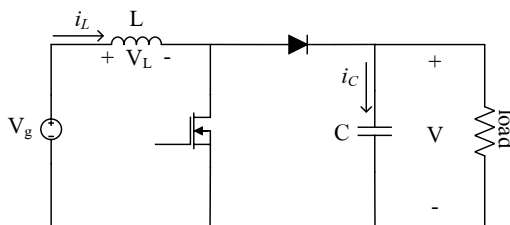
$$C = \frac{(V_g - V)D}{8(\Delta V)Lf_s^2} = \frac{V(1-D)}{8(\Delta V)Lf_s^2} \quad (2-18)$$

วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ ดังภาพประกอบ 2-18 เป็นวงจรที่นิยมนำไปใช้สร้างเพื่อเป็นวงจรแบบลดทอนแรงดันธรรมดา แต่ไม่นิยมที่นำมาใช้ในวงจรลดทอนแรงดันแต่ค่ากระแสสูง เนื่องจากจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียภายในไดโอดสูง เมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียที่เกิดภายในตัวมอสเฟต ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรต่ำ จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีการแทนที่ไดโอดด้วยมอสเฟต ซึ่งเรียกวงจรแปลงผันนี้ว่า วงจรซิงโครนัสบัสคอนเวอร์เตอร์ (Synchronous Buck Converter) ดังภาพประกอบ 2-24 โดยข้อดีของวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้คือ สามารถลดกำลังสูญเสียภายในวงจรได้ โดยในการออกแบบสามารถเลือกมอสเฟตกำลังที่มีความต้านทานภายในต่ำๆ มาแทนไดโอดได้ นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดค่าเวลาไร้ผลตอบสนอง (Dead Time) ระหว่างการทำงานของสวิตช์กำลังทั้ง 2 ตัวได้ ส่งผลให้สวิตช์กำลังทำงานไม่พร้อมกัน ทำให้สวิตช์กำลังมีความปลอดภัยมากขึ้น ส่วนหลักการทำงานและการออกแบบของวงจรซิงโครนัสบัสคอนเวอร์เตอร์จะมีลักษณะที่เหมือนกับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการออกแบบ แต่ข้อเสียของวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้คือจะต้องทำการควบคุมการทำงานทั้งสองสวิตช์ซึ่งอาจสร้างความยุ่งยากในการควบคุมได้



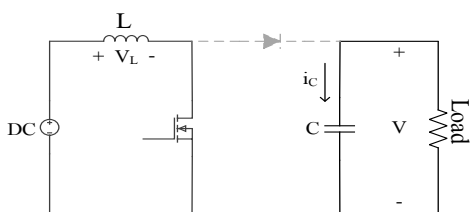
ภาพประกอบ 2-24 วงจรซิงโครนัสบัสคอนเวอร์เตอร์

2.5 หลักการทำงานวงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter)

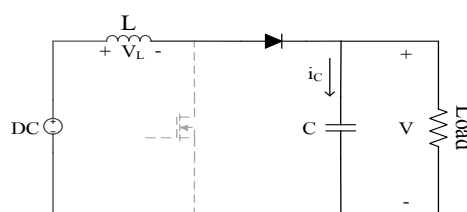


ภาพประกอบ 2-25 วงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์

วงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) คือวงจรที่ใช้ในการเพิ่มระดับแรงดัน โดยที่ค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย (v) มีค่ามากกว่าแรงดันอินพุต (v_g) ในภาพประกอบ 2-25 เป็นวงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้มอสเฟตกำลังเป็นสวิตช์ โดยเราจะทำการวิเคราะห์ห้วงจรที่ทำงานอยู่ในโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) สมมุติวงจรทำงานอยู่ในช่วงสภาวะอยู่ตัว (Steady state) และอุปกรณ์ภายในวงจรเป็นอุดมคติ การทำงานของวงจรแบ่งออกเป็น 2 โหมด



ภาพประกอบ 2-26 วงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์
ทำงานในโหมดที่ 1



ภาพประกอบ 2-27 วงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์
ทำงานในโหมดที่ 2

โหมดที่ 1 เริ่มต้นเมื่อ มอสเฟต (Q_1) นำกระแสที่เวลา $t=0$ ไคโอดจะเกิดการไบอัสกลับ ตัวเหนี่ยวนำจะทำการชาร์จประจุ ดังแสดงภาพประกอบ 2-26 ซึ่งเราสามารถเขียนสมการแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ, การเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ และกระแสของตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$v_L = V_g \quad (2-19)$$

$$\text{จาก } v_L = L \frac{di_L}{dt} \text{ จะได้} \quad \Delta i_L = \frac{V_g}{L} DT_s \quad (2-20)$$

$$i_c = \frac{-V}{R} \quad (2-21)$$

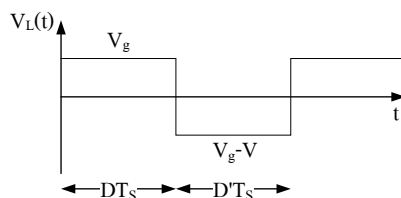
โหมดที่ 2 เริ่มต้นเมื่อ มอสเฟต (Q_1) หยุดนำกระแสที่เวลา $t = t_1$ ไดโอดหมุนเปล้า ดังแสดงภาพประกอบ 2-27 ซึ่งภายในวงจรไดโอดหมุนเปล้าจะนำกระแสเพื่อคายพลังงานในตัวเหนี่ยวนำและรวมกับพลังงานจากแหล่งจ่าย กระแสจะไหลต่อเนื่องผ่านตัวเหนี่ยวนำ ไดโอด (D_1) ตัวเก็บประจุและโหลด กระแสในตัวเหนี่ยวนำจะลดลงจนกระทั่งถึงเวลาที่มอสเฟตนำกระแสอีกครั้ง ซึ่งเราสามารถเขียนสมการแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ, การเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ และกระแสของตัวเก็บประจุได้ดังนี้ซึ่งเราสามารถเขียนสมการแรงดันของตัวเหนี่ยวนำ และกระแสของตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$v_L = V_g - V \quad (2-22)$$

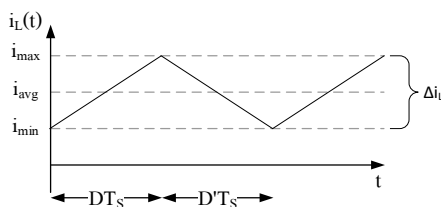
จาก $v_L = L \frac{di_L}{dt}$ จะได้
$$\Delta i_L = \frac{V_g - V}{L} (1 - D) T_s \quad (2-23)$$

$$i_c = i_L - \frac{V}{R} \quad (2-24)$$

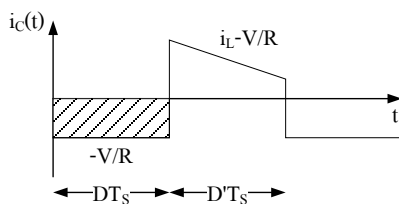
จากสมการที่ (2-19) - (2-24) เราสามารถเขียนเป็นกราฟแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ, การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุได้ดังนี้



ภาพประกอบ 2-28 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจร บุกคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 2-29 การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรบุกคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 2-30 กระแสที่ไหลผ่านที่ตัวเก็บประจุของวงจร บุทคอนเวอร์เตอร์

จากหลักการของ Inductor Volt-Second Balance ของตัวเหนี่ยวนำ หรือถ้าทำการวิเคราะห์จากกราฟแรงดันของตัวเหนี่ยวนำภาพประกอบ 2-29 แรงดันของตัวเหนี่ยวนำในหนึ่งคาบจะมีค่าเท่ากับศูนย์ดังสมการที่ (2-25)

$$(V_g)DT_s + (V_g - V)D'T_s = 0 \quad (2-25)$$

จะได้อัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตต่อแรงดันอินพุต ดังสมการที่ (2-26)

$$M(D) = \frac{V}{V_g} = \frac{1}{1-D} \quad (2-26)$$

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรบุทคอนเวอร์เตอร์ ส่วนใหญ่เราจะทำการดูค่าขอดถึงขอดหรือค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งสมการที่(2-20) จะมีค่าเท่ากับค่าของสมการที่ (2-23) ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_g}{L} \right) (DT_s) = \left(\frac{V_g - V}{L} \right) (1-D)T_s \quad (2-27)$$

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_g}{Lf_s} \right) D = \frac{(V_g - V)(1-D)}{Lf_s}$$

ดังนั้น

$$L = \left(\frac{V_g}{\Delta i_L f_s} \right) D = \frac{(V_g - V)(1-D)}{\Delta i_L f_s} \quad (2-28)$$

ถ้าเราต้องการทำการออกแบบตัวเก็บจุ จะทำการพิจารณาในขณะที่ตัวประจุตัวเก็บประจุทำการเก็บประจุซึ่งก็คือครึ่งบวกของภาพประกอบ 2-30 จากสมการจำกัดความของความจุ

$$Q = CV \quad (2-29)$$

$$\Delta Q = C\Delta V$$

$$\Delta V = \frac{\Delta Q}{C}$$

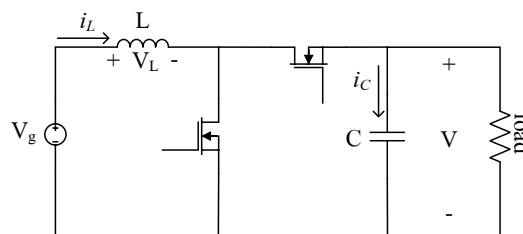
การเปลี่ยนแปลงของ ΔQ คือสี่เหลี่ยมใต้แกนเวลา

$$\Delta V = \frac{\left(\frac{V}{R}\right)DT_s}{C}$$

ดังนั้น

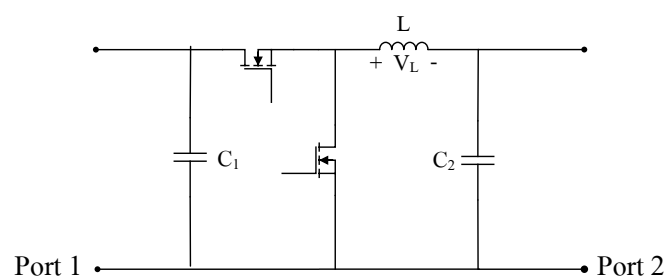
$$C = \frac{D}{R(\Delta V/V)f_s} \quad (2-30)$$

วงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์ ดังภาพประกอบ 2-25 ก็เป็นวงจรที่นิยมนำไปใช้สร้างเพื่อเป็นวงจรแบบเพิ่มระดับแรงดัน แต่ไม่นิยมที่นำมาใช้ในวงจรเพิ่มระดับแรงดันแต่ค่ากระแสสูง เนื่องจากจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียภายในไดโอดสูง เมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียที่เกิดภายในตัวมอสเฟส ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรต่ำเช่นเดียวกับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจากสาเหตุดังกล่าวนี้ จึงทำการเปลี่ยนเป็นวงจรซิงโครนัสบูทคอนเวอร์เตอร์ (Synchronous Boost Converter) ด้วยการนำมอสเฟสมาแทนที่ไดโอด ดังภาพประกอบ 2-31 ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่เหมือนกับวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้ว



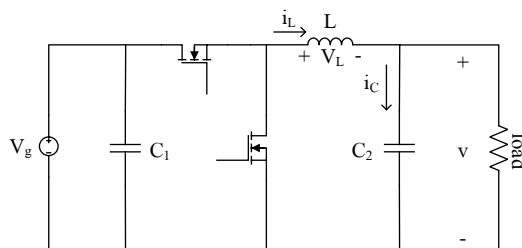
ภาพประกอบ 2-31 วงจรซิงโครนัสบูทคอนเวอร์เตอร์

2.6 หลักการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter)

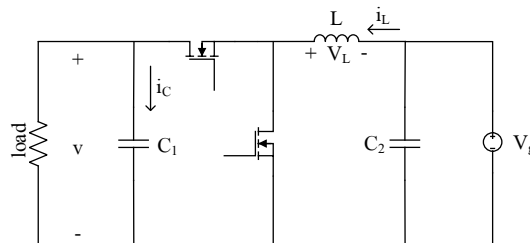


ภาพประกอบ 2-32 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter)

จากภาพประกอบ 2-32 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง คือวงจรที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ทั้ง 2 ทิศทาง โดยวงจรจะทำงานเป็นวงจรบักคอนเวอร์เตอร์เพื่อลดระดับแรงดันลงเมื่อทำการต่อแหล่งจ่ายอินพุตทางด้านซ้ายมือ (Port 1) ดังภาพประกอบ 2-33 และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางจะทำงานเป็นวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มระดับแรงดันเมื่อต่อแหล่งจ่ายอินพุตทางด้านขวามือ (Port 2) ดังภาพประกอบ 2-34 ดังนั้นหลักการและทฤษฎีการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง จะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับวงจรบักคอนเวอร์เตอร์และวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้า



ภาพประกอบ 2-33 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter) ในขณะทำงานเป็นวงจรบักคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 2-34 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter) ในขณะทำงานเป็นวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์

2.7 หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ค่าระดับแรงดันและกระแสค่าคงที่ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว

จากทฤษฎีและหลักการในหัวข้อที่ 2.2.2 แสดงถึงวิธีการในการควบคุมการประจุพลังงานแบบรวดเร็ว ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ชั้น โดยในชั้นแรกจะเป็นการควบคุมให้ค่ากระแสมีค่าคงที่ให้การประจุพลังงาน และชั้นที่สองคือการควบคุมค่าแรงดันให้มีค่าคงที่ และชั้นที่สามจะเป็นการควบคุมค่าแรงดันให้มีค่าคงที่เช่นเดียวกับชั้นที่สอง แต่ต่างที่ระดับแรงดันที่ต้องการ โดยการควบคุมทั้ง 3 ชั้นตอนของการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่จะเป็นการควบคุมผ่านวงจรบักคอน

เวอร์เตอร์ (Buck converter) ซึ่งจะเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อให้ค่าระดับแรงดันและกระแสมีค่าคงที่

การทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ส่วนใหญ่จะต้องมีการควบคุมการทำงานแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เพื่อที่จะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตหรือกระแสเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการและไม่เปลี่ยนแปลงตามการรบกวนที่เกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต นอกจากนี้ระบบป้อนกลับจะต้องมีเสถียรภาพและเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติบางประการของระบบให้เป็นไปตามข้อกำหนด เช่น การพุ่งเกินชั่วขณะ (Transient overshoot), เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (Settling time) และการคงค่าในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state regulation) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ จำเป็นจะต้องมีการควบคุม เพื่อให้แรงดันเอาต์พุต หรือกระแสเอาต์พุต มีค่าคงที่เพื่อที่จะทำการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ให้ได้อย่างรวดเร็วตามขั้นตอนการประจุพลังงาน

ในการออกแบบระบบป้อนกลับของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ เราจะต้องทราบแบบจำลอง (Model) พลวัตของวงจรสวิตชิ่งคอนเวอร์เตอร์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตหรือการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุตของวงจรคอนเวอร์เตอร์หากมีการรบกวนเกิดขึ้นที่แรงดันอินพุต เพื่อคว่ารอบทำงานมีผลต่อแรงดันเอาต์พุตหรือกระแสเอาต์พุตอย่างไร หรือฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรคอนเวอร์เตอร์เป็นอย่างไร เพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับต่อไป

สมการฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter)

วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรที่ประกอบไปด้วยเหนี่ยวนำ (Inductor: L) ตัวเก็บประจุ (Capacitor: C) และสวิตช์ (Switch) ซึ่งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นตัวที่ส่งผลให้การทำงานของวงจรไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในการหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอน เราจะทำการหาโดยวิธีการประมาณส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ ให้เป็นส่วนประกอบที่เป็นเชิงเส้น โดยใช้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบเชิงเส้น ณ จุดทำงานสงบ (Quiescent operating point) หรือก็คือการประมาณการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าน้อยๆ เพื่อให้เราสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ดังนี้

ฟังก์ชันถ่ายโอนควบคุม-แรงดันเอาต์พุต (Control to output voltage transfer function : $G_{vd}(s)$) เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนนี้จะอธิบายถึงผลของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุม ($d(s)$) ที่มีต่อสัญญาณแรงดันเอาต์พุต ($v(s)$) โดยในระบบการคงค่าแรงดันเอาต์พุตฟังก์ชันถ่ายโอนตัวนี้จะเป็นส่วนประกอบสำคัญในลูปเกน (Loop gain) ที่มีผลต่อระบบควบคุม

$$\hat{v}(s) = \frac{1}{(sL)(sC + \frac{1}{R}) + 1} (V_g) \hat{d}(s)$$

$$G_{vd}(s) = \left. \frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_g(s)=0} = \frac{V_g}{s^2 LC + s \frac{L}{R} + 1} \quad (2-31)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนแรงดันอินพุต-แรงดันเอาต์พุต (Input voltage to output voltage transfer function : $G_{vg}(s)$) จะเป็นตัวอธิบายว่าถ้าแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือถูกรบกวนจะส่งผลกระทบต่อแรงดันด้านเอาต์พุต ($\hat{v}(s)$) โดยในการออกแบบระบบการควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ฟังก์ชันถ่ายโอนนี้จะมีผลกระทบต่อระบบในการออกแบบค่อนข้างมาก ตัวอย่างเช่น ถ้าแรงดันอินพุตที่มาจากแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกเลขคู่ที่ไม่ต้องการผสมอยู่ ฟังก์ชันถ่ายโอน ($G_{vg}(s)$) จะเป็นตัวช่วยที่บอกผลกระทบของแรงดันฮาร์มอนิกเหล่านี้ที่อาจเกิดที่แรงดันเอาต์พุตของวงจร

$$\hat{v}(s) = \frac{1}{(sL)(sC + \frac{1}{R}) + 1} (D) \hat{v}_g(s)$$

$$G_{vg}(s) = \left. \frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{D}{s^2 LC + s \frac{L}{R} + 1} \quad (2-32)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนควบคุม-กระแสเอาต์พุต (Control to output voltage transfer function : $G_{id}(s)$) เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ที่จะอธิบายถึงผลของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุม ($\hat{d}(s)$) ที่มีต่อสัญญาณกระแสเอาต์พุต ($\hat{i}(s)$) โดยในระบบการลงค่ากระแสเอาต์พุต ฟังก์ชันถ่ายโอนตัวนี้จะเป็นส่วนประกอบสำคัญในลูปลูปเกน (Loop gain) ที่มีผลกระทบต่อระบบควบคุม

$$\hat{i}(s) = \frac{1}{(sL)(sC + \frac{1}{R}) + 1} (sC + \frac{1}{R}) (V_g) \hat{d}(s)$$

$$G_{id}(s) = \left. \frac{\hat{i}(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_g(s)=0} = \frac{sV_g C + \frac{V_g}{R}}{s^2 LC + s \frac{L}{R} + 1} \quad (2-33)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนแรงดันอินพุต-กระแสเอาต์พุต (Input voltage to output voltage transfer function : $G_{ig}(s)$) จะเป็นตัวอธิบายว่าถ้าแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือถูกรบกวนจะส่งผลกระทบต่อกระแสด้านเอาต์พุต ($\hat{i}(s)$) โดยในการออกแบบระบบการควบคุมกระแสเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ ฟังก์ชันถ่ายโอนนี้จะมีผลต่อระบบในการออกแบบค่อนข้างมาก ตัวอย่างเช่น ถ้าแรงดันอินพุตที่มาจากแหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกเลขคู่ที่ไม่ต้องการผสมอยู่ ฟังก์ชันถ่ายโอน ($G_{ig}(s)$) จะเป็นตัวช่วยที่บอกผลกระทบของแรงดันฮาร์มอนิกเหล่านี้ที่อาจเกิดที่กระแสเอาต์พุตของวงจร

$$\hat{i}(s) = \frac{1}{(sL)(sC + \frac{1}{R}) + 1} (sC + \frac{1}{R})(D)\hat{v}_g(s)$$

$$G_{ig}(s) = \left. \frac{\hat{i}(s)}{\hat{v}_g(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{sDC + \frac{D}{R}}{s^2LC + s\frac{L}{R} + 1} \quad (2-34)$$

และเราสามารถหาเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Output impedance) ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ได้จาก

$$Z_{out}(s) = R // \frac{1}{sC} // sL$$

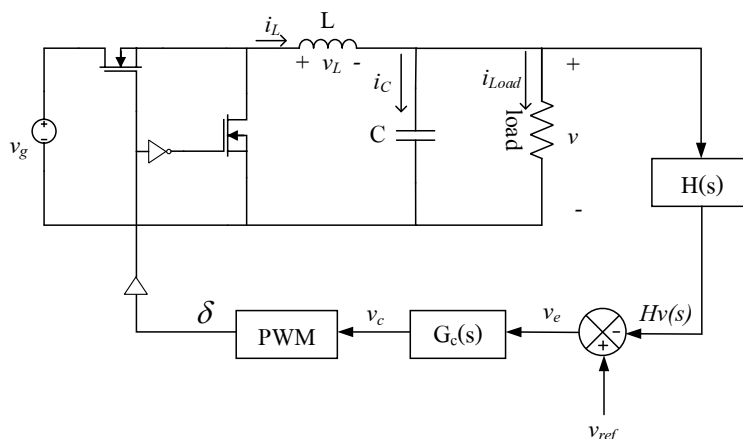
$$Z_{out}(s) = \frac{sL}{s^2LC + s\frac{L}{R} + 1} = \frac{\hat{v}(s)}{\hat{i}(s)} \quad (2-35)$$

ซึ่งเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ($Z_{out}(s)$) ของวงจรจะอธิบายถึงผลการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลด ($\hat{i}(s)$) ต่อแรงดันด้านออก ($\hat{v}(s)$) หรือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่โหลด ($\hat{v}(s)$) ต่อกระแสด้านออก ($\hat{i}(s)$) ซึ่งค่านี้มีผลต่อการออกแบบควบคุมการคงค่าแรงดันเอาต์พุตหรือการออกแบบการควบคุมการคงที่แรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ ส่วนอินพุตอิมพีแดนซ์ ($Z_{in}(s)$) ของวงจรคอนเวอร์เตอร์เป็นส่วนที่มีความสำคัญเมื่อต้องมีการออกแบบตัวกรองการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) ทางด้านเข้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่กล่าวถึง

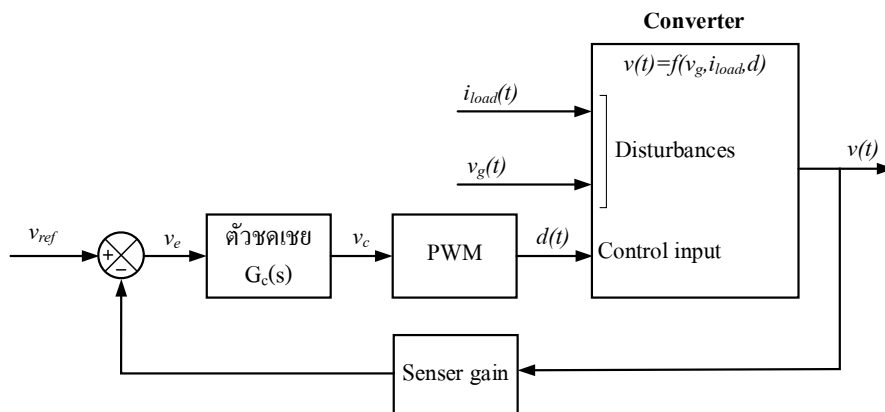
2.7.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ (Voltage regulation)

ในการประยุกต์ใช้งานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ส่วนใหญ่สิ่งที่ต้องการคือการคงค่าแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต หรือกระแสเอาต์พุตหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจร ซึ่งเราไม่สามารถสร้างวงจรคอนเวอร์

เตอร์ให้มีรอบการทำงานเดียวและสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ได้ในทุกสภาวะ ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีการควบคุมการป้อนกลับหรือการควบคุมระบบให้สามารถปรับค่ารอบการทำงานได้อย่างอัตโนมัติเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ค่าคงที่ตามต้องการอย่างแม่นยำมากที่สุด และให้ระบบมีเสถียรภาพดีซึ่งก็คือค่าพุ่งเกิน (Over shoot), การแกว่ง (Ringing), การออสซิลเลต (Oscillation) จะต้องมีค่าน้อยและพฤติกรรมอื่นๆ ที่จะต้องไม่เกิดขึ้นในวงจร ซึ่งหลักการทำงานง่ายๆ ของการป้อนกลับ คือ การนำเอาค่าแรงดันเอาต์พุต ($v(s)$) ที่ผ่านตัวตรวจจับ ($H(s)$) ได้เป็นสัญญาณเอาต์พุตของตัวตรวจจับ ($H(s)v(s)$) มาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง ($v_{ref}(s)$) ซึ่งถ้าระบบป้อนกลับทำงานได้อย่างสมบูรณ์ค่าของสัญญาณ $H(s)v(s)$ มีค่าเท่ากับ $v_{ref}(s)$ เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุต ($v(s)$) เป็นไปตามค่า $v_{ref}(s)$ ที่ต้องการหรือทำให้ค่าผลต่างของสัญญาณ $v_{ref}(s)$ กับสัญญาณ $H(s)v(s)$ มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งค่าผลต่างนี้เราเรียกว่าสัญญาณค่าความผิดพลาด ($v_e(s)$) แต่ในทางปฏิบัติค่าสัญญาณความผิดพลาดจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะต้องมีการเพิ่มในส่วนของตัวชดเชย (Compensator network : $G_c(s)$) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-35 เพื่อทำให้สัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อย โดยถ้าตัวชดเชย ($G_c(s)$) มีค่าอัตราขยายมากพอจะทำให้สัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อยมากๆ และทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันอ้างอิงได้ตามต้องการ

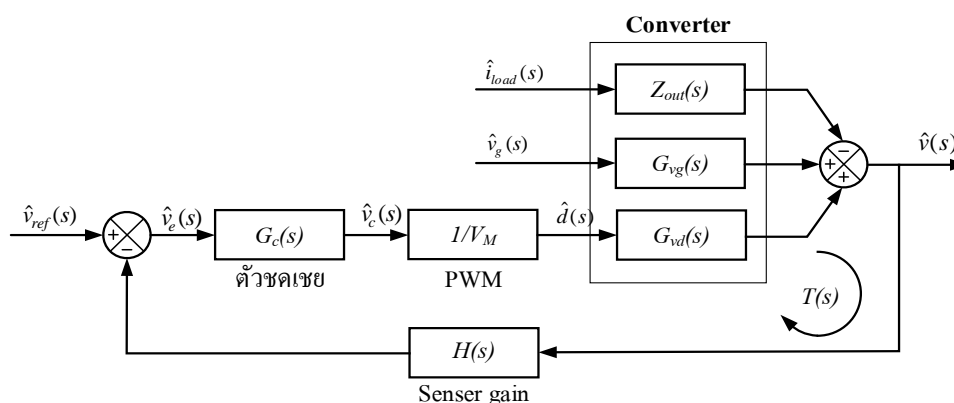


ภาพประกอบ 2-35 วงจรบิ่กคอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่



ภาพประกอบ 2-36 บล็อกไดอะแกรมของวงจรบู้คอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่

โดยเราจะสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมของวงจรบู้คอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบป้อนกลับใหม่ในรูปของสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ในความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจร ได้ดังภาพประกอบ 2-37



ภาพประกอบ 2-37 บล็อกไดอะแกรมของวงจรบู้คอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ในรูปของสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model)

จากภาพประกอบ 2-37 เราสามารถเขียนสมการของแรงดันเอาต์พุตที่มีการควบคุมการป้อนกลับใหม่ได้ดังนี้

$$\hat{v} = \hat{v}_{ref} \frac{G_c G_{vd} / V_M}{1 + H G_c G_{vd} / V_M} + \hat{v}_g \frac{G_{vg}}{1 + H G_c G_{vd} / V_M} - \hat{i}_{load} \frac{Z_{out}}{1 + H G_c G_{vd} / V_M} \tag{2-36}$$

สามารถเขียนอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\hat{v} = \hat{v}_{ref} \frac{1}{H} \frac{T}{1+T} + \hat{v}_g \frac{G_{vg}}{1+T} - \hat{i}_{load} \frac{Z_{out}}{1+T} \quad (2-37)$$

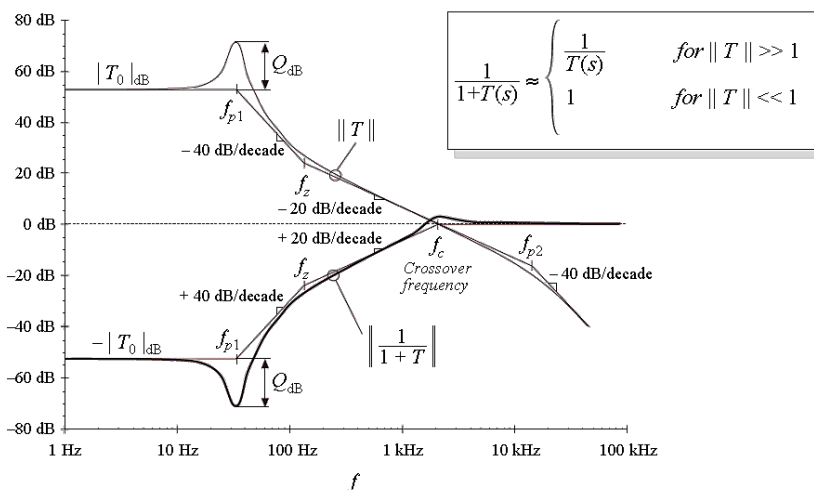
เมื่อ $T(s) = H(s)G_c(s)G_{vd}(s) / V_M$ คือ อัตราขยายวงรอบ (Loop gain)

จากสมการที่ (2-37) เป็นรูปแบบสมการทั่วไปของการควบคุมการป้อนกลับ เพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการควบคุมการป้อนกลับจะทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนและผลตอบสนองของระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยเราได้ให้นิยามของอัตราขยายวงรอบ $T(s)$ เป็นผลคูณของอัตราขยายในเส้นทางไปข้างหน้า (Forward path gain) และเส้นทางป้อนกลับ (Feedback path gain) ของการควบคุมการป้อนกลับ

เมื่อเราทำการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนแรงดันอินพุต-แรงดันเอาต์พุต และฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ที่มีการเพิ่มการป้อนกลับจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเปลี่ยนไปดังสมการที่ (2-38) และสมการที่ (2-39) ตามลำดับ

$$\left. \frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} \right|_{\substack{\hat{v}_{ref}(s)=0 \\ \hat{i}_{load}(s)=0}} = \frac{G_{vg}(s)}{1+T(s)} \quad (2-38)$$

$$\left. \frac{\hat{v}(s)}{-\hat{i}_{load}(s)} \right|_{\substack{\hat{v}_{ref}(s)=0 \\ \hat{v}_g(s)=0}} = \frac{Z_{out}(s)}{1+T(s)} \quad (2-39)$$

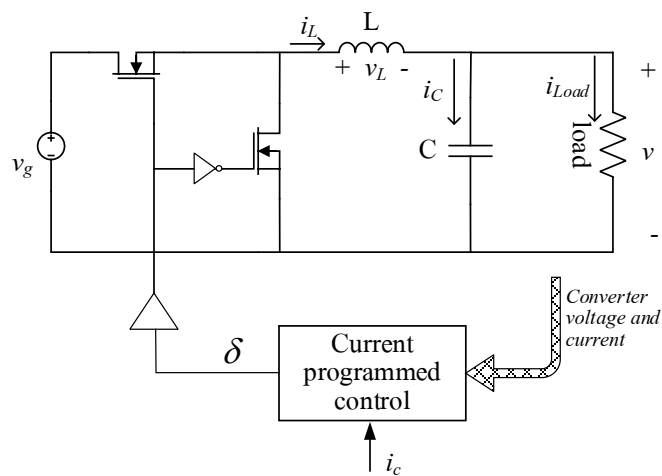


ภาพประกอบ 2-38 กราฟโบเดของ $T(s)$ และ $1/(1+T(s))$

จากสมการที่ (2-38) และสมการที่ (2-39) จะแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสองจะถูกคูณด้วยแฟกเตอร์ $1/(1+T(s))$ ถ้าอัตราขยายวงรอบ $T(s)$ มีขนาดใหญ่มากก็คือค่าของ $1/(1+T(s))$ ที่เป็นแฟกเตอร์ของสมการทั้งสองมีค่าน้อยมาก ๆ ดังภาพประกอบ 2-38 จะทำให้ผลการเปลี่ยนแปลงของ \hat{v}_g และ \hat{i}_{load} ส่งผลต่อสัญญาณแรงดันเอาต์พุต \hat{v} น้อยมาก ๆ ดังนั้นหลักการในการออกแบบวงจรให้สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการหรือการควบคุมการป้อนกลับก็คือการออกแบบตัวชดเชย $G_c(s)$ เพื่อเป็นปรับปรุงค่าของ $T(s)$ ให้ได้ตามที่ต้องการ

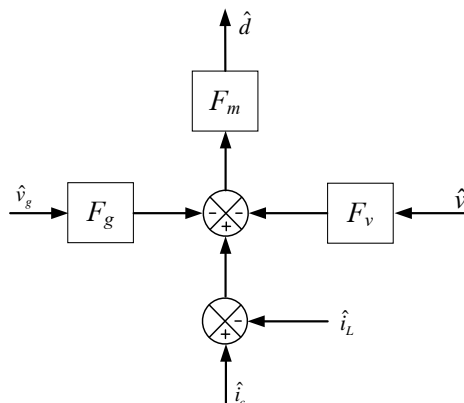
2.7.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ของวงจร buck คอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ (Current regulation)

การควบคุมกระแสเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการ Current Programmed Mode (CPM) ในการควบคุมซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการออกแบบ โดยวิธีการนี้จะเป็นการนำสัญญาณกระแสในการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์หรือสัญญาณกระแสตัวเหนี่ยวนำของวงจร buck คอนเวอร์เตอร์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสควบคุม ($i_c(t)$) แล้วจึงทำการปรับค่ารอบการทำงาน (Duty cycle : D) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-39

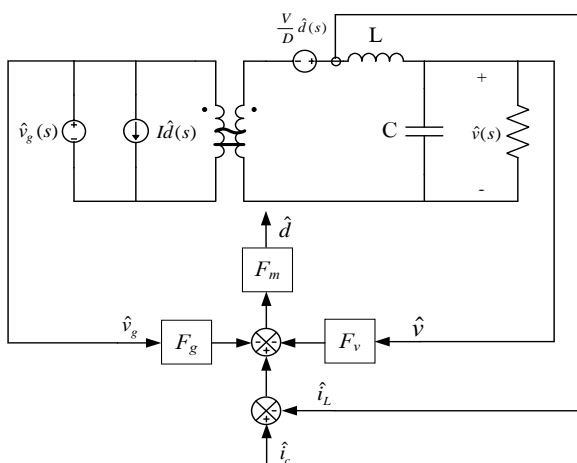


ภาพประกอบ 2-39 วงจร buck คอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีควบคุมแบบ CPM

จากทฤษฎีการควบคุมแบบ CPM เราสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ CPM ได้ดังภาพประกอบ 2-40 และภาพประกอบ 2-41 จะเป็นวงจร buck คอนเวอร์เตอร์ที่การเพิ่มการควบคุมการป้อนกลับโดยการควบคุมแบบ CPM ที่แสดงดังภาพประกอบ 2-40



ภาพประกอบ 2-40 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมด้วยวิธีการ CPM



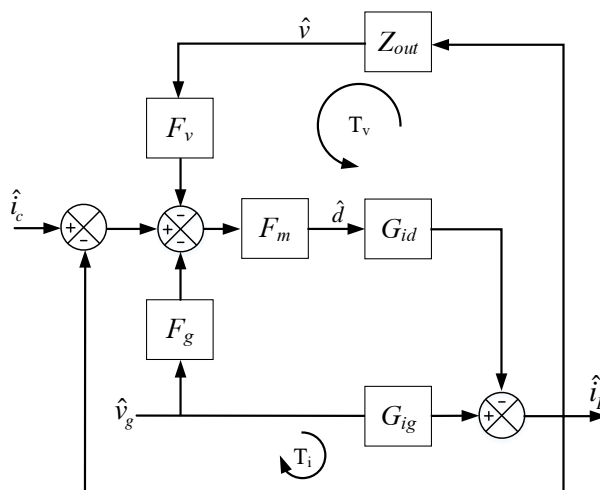
ภาพประกอบ 2-41 วงจรบัพักคอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการ CPM

จากภาพประกอบ 2-41 ถ้าเราพิจารณาเฉพาะในส่วนของวงจรบัพักคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่มีการป้อนกลับ จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) จะขึ้นอยู่กับค่าของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต (\hat{v}_g) และการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน (\hat{d}) ที่มีการกำหนดมาจาก G_{ig} และ G_{id} โดยเราจะสามารถเขียนสมการการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ได้ดังนี้

$$\hat{i}_L(s) = G_{id}\hat{d}(s) + G_{ig}\hat{v}_g(s) \tag{2-40}$$

เมื่อค่า $G_{ig} = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{v}_g(s)} = \frac{D}{Z_i(s)} = \frac{DCs + \frac{D}{R}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}$, $G_{id} = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V}{DZ_i(s)} = \frac{V_gCs + \frac{V_g}{R}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}$

เมื่อเราจะทำการพิจารณาวงจรบückคอนเวอร์เตอร์ที่มีการป้อนกลับโดยวิธีการควบคุมแบบ CPM ซึ่งในการพิจารณานี้เราจะทำการเขียนรูปวงจรบückคอนเวอร์เตอร์ที่มีการป้อนกลับจากภาพประกอบ 2-41 ให้อยู่ในรูปบล็อกไดอะแกรม ดังภาพประกอบ 2-42 เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์



ภาพประกอบ 2-42 บล็อกไดอะแกรมของวงจบบückคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการ CPM

จากภาพประกอบ 2-42 เราสามารถเขียนสมการของกระแสตัวเหนี่ยวนำที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการ CPM ได้ดังนี้

$$\hat{i}_L(s) = \frac{G_{ig}(s) - G_{id}(s)F_m F_g}{1 + G_{id}(s)F_m + G_{id}(s)F_m F_v Z_o} \hat{v}_g(s) + \frac{G_{id}(s)F_m}{1 + G_{id}(s)F_m + G_{id}(s)F_m F_v Z_o} \hat{i}_c(s) \quad (2-41)$$

สามารถเขียนอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\hat{i}_L(s) = \frac{G_{g0}(s)}{1 + T_i(s)} \hat{v}_g(s) + \frac{T_i(s)}{1 + T_i(s)} \hat{i}_c(s) \quad (2-42)$$

โดยที่ $G_{g0}(s) = \frac{G_{ig}(s) - G_{id}(s)F_m F_g}{1 + G_{id}(s)F_m F_v Z_o(s)}$, $F_m = \frac{1}{M_a T_s}$, $F_g = \frac{D^2 T_s}{2L}$, $F_v = \frac{(1-D)T_s}{2L}$

เมื่อ $Z_o = R \parallel \frac{1}{sC}$ คือ เอ้าท์พุตอิมพีแดนซ์

$T_v(s) = F_m G_{id} Z_o(s) F_v$ คือ อัตราขยายวงรอบของแรงดัน (Voltage loop gain)

$T_i(s) = \frac{1}{Z_o(s) F_v} \frac{T_v(s)}{1 + T_v(s)} = \frac{F_m G_{id}}{1 + F_m G_{id} Z_o(s) F_v}$ คือ อัตราขยายวงรอบของกระแส (Current

loop gain)

จากสมการที่ (2-42) เป็นรูปแบบสมการทั่วไปของการควบคุมการป้อนกลับซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าการควบคุมการป้อนกลับจะทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนและผลตอบสนองของระบบเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) จะขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) และค่าของกระแสควบคุม ($\hat{i}_c(s)$) แทนการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน (\hat{d}) ในขณะที่ยังไม่มีการป้อนกลับ

เมื่อเราทำการเขียนสมการที่ (2-42) ใหม่ โดยจะทำการพิจารณาแยกระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) และค่าการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าของกระแสควบคุม ($\hat{i}_c(s)$) ได้ดังสมการที่ (2-43) และสมการที่ (2-44) ตามลำดับ

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{v}_g(s)} = \frac{G_{g0}(s)}{1 + T_i(s)} \Big|_{\hat{i}_c=0} \quad (2-43)$$

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{i}_c(s)} = \frac{T_i(s)}{1 + T_i(s)} \Big|_{\hat{v}_g=0} \quad (2-44)$$

จากสมการที่ (2-43) จะเห็นได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) จะถูกคูณด้วยเฟกเตอร์ $1/(1 + T_i(s))$ และสมการที่ (2-44) ค่าการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าของกระแสควบคุม ($\hat{i}_c(s)$) จะถูกคูณด้วยเฟกเตอร์ $T_i(s)/(1 + T_i(s))$ ซึ่งถ้าอัตราขยายวงรอบของกระแส (Current loop gain : $T_i(s)$) มีค่าขนาดใหญ่มากจะทำให้ค่าของการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) มีค่าเท่ากับค่าของกระแสควบคุม ($\hat{i}_c(s)$) และค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) น้อยมาก ดังนั้นเราจึงบอกได้ว่าค่าอัตราขยายวงรอบของกระแส (Current loop gain : $T_i(s)$) มีความสำคัญต่อการควบคุมการป้อนกลับแบบ CPM ก่อนข้างมาก

2.8 หลักการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method)

จากการวิเคราะห์วิธีการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทั้งสามวิธี ได้เลือกใช้วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งในส่วนวิธีการเทียบสัดส่วนแรงดันขณะเปิดวงจร (FO – CV Method) อาจให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่คลาดเคลื่อน ทำให้มีประสิทธิภาพในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดต่ำ ส่วนวิธีการเพิ่มค่าความนำ

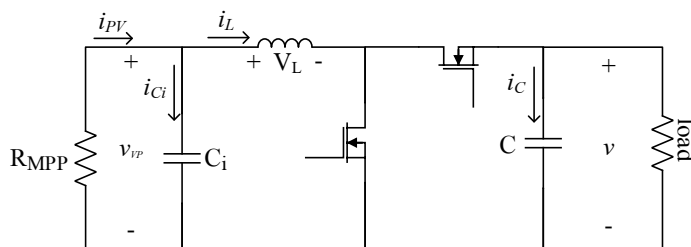
(InC Method) เป็นวิธีการที่มีความถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง แต่มีความซับซ้อนในการคำนวณเพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่ต้องการเสถียรภาพและความซับซ้อนน้อย

การติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method) เป็นวิธีการที่จะทำการปรับหรือรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนค่ารอบการทำงานที่เล็กน้อย (delta duty : ΔD) และทำการตรวจเช็คค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อเทียบกับค่าแรงดัน และกำลังไฟฟ้าก่อนหน้าหรือในคาบเวลาก่อนหน้า แล้วจึงทำการปรับค่ารอบการทำงานอีกครั้ง เพื่อให้ระบบสามารถทำงานที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่ส่งผลในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์อาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวเป็นหลัก คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน (Delta duty : ΔD) ในการรบกวนระบบ และค่าของเวลาการชักตัวอย่าง (Sampling time : T_a) เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทำการปรับค่ารอบการทำงานให้ระบบสามารถทำงานที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

2.8.1 เวลาการชักตัวอย่าง (Sampling time : T_a) ในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method)

การควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำการควบคุมผ่านวงจรวจรทคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งถ้าเราทำการสมมติให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point : MPP) ที่ความความเข้มแสง (S) และอุณหภูมิ (T) ค่าหนึ่ง เราจะได้รับค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{MPP}) และกระแส (I_{MPP}) ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลานั้น ซึ่งเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปตัวต้าน (R_{MPP}) เพื่อได้ง่ายต่อการเคราะห์ได้ดังนี้

$$\frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} = R_{MPP} \quad (2-45)$$



ภาพประกอบ 2-43 วงจรวจรทคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าหนึ่ง

จากภาพประกอบ 2-43 ภาพที่วงจรมุกอนเวอร์เตอร์ที่ต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าหนึ่งซึ่งค่า แรงดัน (V_{PV}) และกระแส (I_{PV}) จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงวงจรมุกอนเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ส่งผลให้การทำงานของวงจรไม่เป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน ซึ่งเราจะทำการวิเคราะห์โดยการประมาณส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้นของทั้งเซลล์แสงอาทิตย์และวงจรมุกอนเวอร์เตอร์ ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ ให้เป็นส่วนประกอบที่เป็นเชิงเส้นโดยใช้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบเชิงเส้น ณ จุดทำงานสงบ (Quiescent operating point) หรือก็คือการประมาณการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าน้อยๆ เช่นเดียวกับวงจรมุกอนเวอร์เตอร์ เพื่อให้เราสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน ($\hat{d}(s)$) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ($\hat{v}_{PV}(s)$) ดังนี้

$$G_{v_{PVd}}(s) = \frac{\hat{v}_{PV}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{-V/LC_i}{s^2 + s\left(\frac{1}{R_{MPP}C_i}\right) + \frac{1}{LC_i}} \quad (2-46)$$

ทำการเปรียบเทียบกับสมการในรูปทั่วไป

$$G_{v_{PVd}}(s) = \frac{\hat{v}_{PV}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\mu\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-47)$$

โดย $\mu = -V$, $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC_i}}$, $\xi = \frac{1}{2R_{MPP}} \sqrt{\frac{L}{C_i}}$

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ว่าตัวแปรสำคัญที่ส่งผลในการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกด ก็คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน (delta duty : ΔD) ในการรบกวนระบบ และค่าของเวลาการชั้กตัวอย่าง (Sampling time : T_s) เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าของแรงดันและกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเปรียบเทียบนี้เราจะต้องนำค่าที่อยู่ในสถานะคงตัวแล้วมาทำการเปรียบเทียบ เพราะถ้าค่าของแรงดันและกำลังไฟฟ้ายังอยู่ในช่วงพลวัต (Dynamic) อาจส่งผลให้ค่าที่ทำการเปรียบเทียบมีความผิดพลาดได้ เนื่องจากค่าแรงดันหรือกำลังไฟฟ้าตอนที่ระบบยังทำงานอยู่ในช่วงพลวัต อาจมีค่าพุ่งสูงหรือยังอยู่ในช่วงโอเวอร์ชูต (Overshoot) ซึ่งทำให้ค่าที่รับมาผิดพลาดได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าก่อนหน้า และส่งผลให้การปรับรอบการทำงาน ปรับผิดพลาด ดังนั้นเวลาในการชั้กตัวอย่าง (Sampling time : T_s) จะต้องมีค่ามากกว่าเวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัว (Setting time : T_s) ของระบบ

(2-48)

$$T_a \geq T_s$$

จากสมการที่อยู่ในรูปทั่วไป สมการ (2-47) เราสามารถหาเวลาในการสู่สภาวะคงตัว (Setting time : T_s) ซึ่งประมาณค่าได้ว่า

$$T_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (2-49)$$

ดังนั้นเวลาในการซ้กตัวอย่าง (T_a) เพื่อตรวจสอบค่าแรงดัน ($V_{PV}(k)$) และกำลังไฟฟ้า ($P_{PV}(k)$) จากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่จะนำมาทำการเปรียบเทียบกับค่าของแรงดัน ($V_{PV}(k-1)$) และกำลังไฟฟ้า ($P_{PV}(k-1)$) จากเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาก่อน เพื่อทำการปรับค่ารอบการทำงานให้ระบบทำงานที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ได้จากสมการ

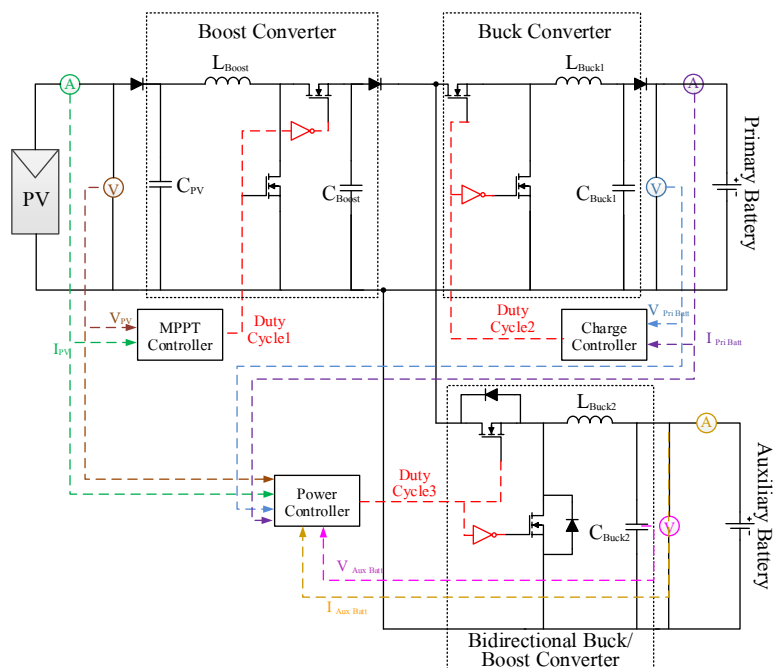
$$T_a \geq \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (2-50)$$

2.8.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน (Delta duty : ΔD) ในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method)

ในการพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงาน (Δd) จะต้องมีการออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสม เพราะถ้ค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานมีค่ามากเกินไป จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ถ้ค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานมีค่าน้อยเกินไปทำให้เวลาในการติดตามหาค่าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต้องใช้เวลาานาน ซึ่งจะเป็นการสูญเสียพลังงานโดยไร้ประโยชน์ โดยวิธีการวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานที่เหมาะสมได้เลือกใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) เพราะเป็นวิธีที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ และสามารถดูผลตอบสนองได้เลย

บทที่ 3

การออกแบบและผลการจำลอง



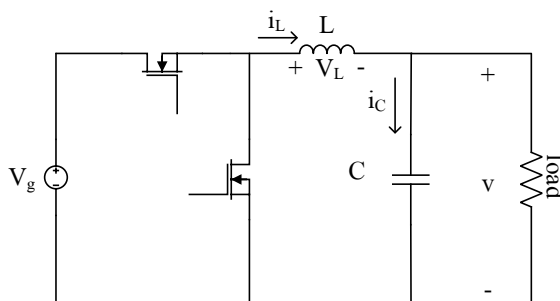
ภาพประกอบ 3-1 วงจรของทั้งระบบฯ ในงานวิจัยนี้

ภาพประกอบ 3-1 แสดงวงจรของทั้งระบบ ประกอบไปด้วย วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter), วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter) และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง (Bidirectional Buck/Boost Converter) ภายในระบบมีการควบคุมทั้งหมด 3 ส่วน คือ การควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking) การควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่แบบรวดเร็ว (Quick battery charging) และการจัดสรรพลังงานภายในระบบ (Energy management) ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แยกแ่วงจรการออกแบบการควบคุมการทำงานในแต่ละส่วนรวมถึงการออกแบบการพันตัวเหนี่ยวนำวงจรตรวจวัดแรงดัน วงจรตรวจวัดกระแส และการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ PWM ซึ่งจะมีการนำเสนอรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังนี้

- (1) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์
- (2) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์
- (3) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง

- (4) การออกแบบและผลการจำลองการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับ (Feedback Control) ให้ค่าระดับแรงดัน (Voltage regulate) และกระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ (Current regulate) เพื่อทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักอย่างรวดเร็ว (Quick battery charging)
- (5) การออกแบบและผลการจำลองการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ (MPPT)
- (6) ผลการจำลองการทำงานเบื้องต้นของระบบที่มีการจัดสรรพลังงาน
- (7) การออกแบบการพันตัวเหนี่ยวนำ
- (8) การออกแบบวงจรตรวจวัดแรงดัน และวงจรตรวจวัดกระแส
- (9) วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง (Dead Time) และวงจรขับมอเตอร์

3.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 3-2 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter)

วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในภาพประกอบ 3-2 คือ วงจรที่ใช้ลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ โดยการออกแบบนี้จะทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านจากวงจร buck คอนเวอร์เตอร์ โดยแรงดันด้านเข้าสูงสุดประมาณ 60 V และแรงดันด้านออกประมาณ 13.8 V สำหรับการประจุแบตเตอรี่ โดยในการออกแบบนั้นจะต้องทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจร ซึ่งได้แก่ ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) และค่าตัวเก็บประจุ (C) ของวงจร โดยมีข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบแสดงดังตาราง 3-1

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|--------------------------|----------------|
| แรงดันด้านเข้า (V_g) | 15-60 V |
| แรงดันด้านออก (V) | 13.8 V |
| กระแสออก (I) | 6 A |
| กำลังออก (P_{out}) | 80 W |

ตาราง 3-1 ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

โดยกำหนดให้

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|-----------------------------|---|
| ความถี่การสวิตช์ (f_s) | 50 kHz |
| กระแสระลอก (ΔI_L) | $10\% = \frac{10}{100} \times 6 = 0.6 \text{ A}$ |
| แรงดันระลอก (ΔV) | $1\% = \frac{1}{100} \times 13.8 = 0.138 \text{ V}$ |

ตาราง 3-2 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

(1) คำนวณหาค่า Duty cycle

จากสมการ $V = DV_g$ (3-1)

แทนค่าแรงดัน $V_g = 15 \text{ V}$ และ $V = 13.8 \text{ V}$

จะได้ $D = \frac{13.8}{15} = 0.92$ (3-2)

แทนค่าแรงดัน $V_g = 60 \text{ V}$ และ $V = 13.8 \text{ V}$

จะได้ $D = \frac{13.8}{60} = 0.23$ (3-3)

(2) คำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

จากสมการ $L = \frac{V(1-D)}{\Delta I_L f_s}$ (3-4)

แทนค่า $D = 0.92$

จะได้
$$L_{\min} = \frac{13.8 \times (1 - 0.92)}{0.6 \times 50 \times 10^3} = 36.8 \mu H \approx 50 \mu H \quad (3-5)$$

แทนค่า $D = 0.23$

จะได้
$$L_{\max} = \frac{13.8 \times (1 - 0.23)}{0.6 \times 50 \times 10^3} = 354.2 \mu H \approx 500 \mu H \quad (3-6)$$

(3) กำหนดหาค่าตัวเก็บประจุ

จากสมการ
$$C = \frac{V(1-D)}{8(\Delta V)Lf_s^2} \quad (3-7)$$

แทนค่า $D = 0.92$ และ $L = 500 \mu H$

จะได้
$$C = \frac{13.8 \times (1 - 0.92)}{8 \times 0.138 \times (500 \times 10^{-6}) \times (50 \times 10^3)^2} = 0.097 \mu F \quad (3-8)$$

แทนค่า $D = 0.23$ และ $L = 500 \mu H$

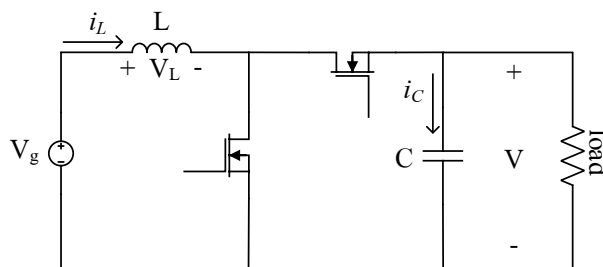
จะได้
$$C = \frac{13.8 \times (1 - 0.23)}{8 \times 0.138 \times (500 \times 10^{-6}) \times (50 \times 10^3)^2} = 7.7 \mu F \quad (3-9)$$

ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในการออกแบบวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แสดงดังตาราง 3-3 โดยค่าพารามิเตอร์ที่เลือกมาจากกรณีการทำงานที่เลวร้ายที่สุด ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์ที่มีค่ามากที่สุดเพื่อให้วงจรเราทำงานดีที่สุดในกรณีการเลือกตัวเก็บประจุจะเลือกให้มีค่าที่มากกว่าการคำนวณเพราะจะทำให้แรงดันระลอกมีค่าน้อยลงซึ่งเป็นผลดีกับวงจร

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|----------------------|----------------|
| ตัวเหนี่ยวนำ (L) | $500 \mu H$ |
| ตัวเก็บประจุ (C) | $100 \mu F$ |

ตาราง 3-3 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์

3.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 3-3 วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter)

วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ในภาพประกอบ 3-3 คือ วงจรที่ใช้เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ โดยการออกแบบนี้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 21.6 V แรงดันเอาต์พุตที่ต้องการประมาณ 30 V โดยในการออกแบบจะต้องทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งได้แก่ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) และค่าตัวเก็บประจุ (C) ของวงจร ซึ่งข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบมีค่าดังตาราง 3-4

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|----------------------------|----------------|
| แรงดันด้านเข้า (V_g) | 17.2 V |
| กระแสด้านเข้า (I_{in}) | 5 A |
| กำลังด้านเข้า (P_{in}) | 80 W |
| แรงดันด้านออก (V) | 20-60 V |

ตาราง 3-4 ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์

โดยกำหนดให้

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|-----------------------------|--|
| ความถี่การสวิตช์ (f_s) | 50 kHz |
| กระแสระลอก (ΔI_L) | $10\% = \frac{10}{100} \times 5 = 0.5 \text{ A}$ |
| แรงดันระลอก (ΔV) | $1\% = \frac{1}{100} \times 30 = 0.3 \text{ V}$ |

ตาราง 3-5 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์

(1) คำนวณหาค่า Duty cycle

จากสมการ
$$V = \frac{1}{1-D} V_g \quad (3-10)$$

แทนค่าแรงดัน $V_g = 17.2 \text{ V}$ และ $V = 20 \text{ V}$

จะได้
$$D = 1 - \frac{17.2}{20} = 0.14 \quad (3-11)$$

แทนค่าแรงดัน $V_g = 17.2 \text{ V}$ และ $V = 60 \text{ V}$

จะได้
$$D = 1 - \frac{17.2}{60} = 0.71 \quad (3-12)$$

(2) คำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำ

จากสมการ
$$L = \frac{V_g D}{\Delta I_L f_s} \quad (3-13)$$

แทนค่า $D = 0.14$

จะได้
$$L_{\min} = \frac{17.2 \times 0.14}{0.5 \times 50 \times 10^3} = 96.32 \mu\text{H} \approx 100 \mu\text{H} \quad (3-14)$$

แทนค่า $D = 0.71$

จะได้
$$L_{\max} = \frac{17.2 \times 0.71}{0.5 \times 50 \times 10^3} = 488.48 \mu\text{H} \approx 500 \mu\text{H} \quad (3-15)$$

(3) คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ

จากสมการ
$$C = \frac{ID}{\Delta V f_s} \quad (3-16)$$

แทนค่า $D = 0.14$ และ $L = 400 \mu\text{H}$

จะได้
$$C = \frac{(120/30) \times 0.14}{0.3 \times 50 \times 10^3} = 37.3 \mu\text{F} \quad (3-17)$$

แทนค่า $D = 0.71$ และ $L = 400 \mu\text{H}$

จะได้

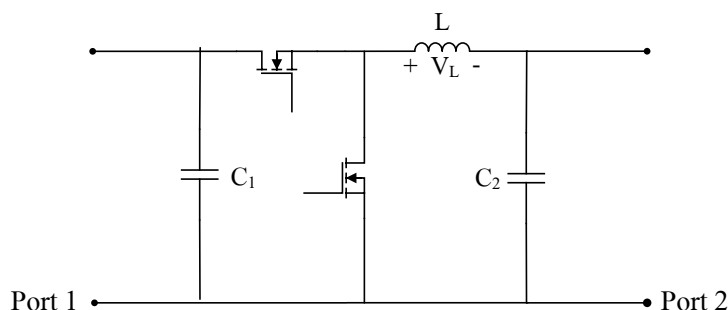
$$C = \frac{(120/30) \times 0.71}{0.3 \times 50 \times 10^3} = 189 \mu F \quad (3-18)$$

การเลือกค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบวงจร buck-boost converter แสดงดังตาราง 3-6 ซึ่งจะเลือกค่าจากกรณีการทำงานที่เลวร้ายที่สุด ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์ที่มีค่ามากที่สุดเพื่อให้วงจรเราทำงานดีที่สุด ส่วนในการเลือกตัวเก็บประจุจะเลือกให้มีค่าที่มากกว่าการคำนวณเพราะจะทำให้แรงดันระลอกมีค่าน้อยลงซึ่งเป็นผลดีกับวงจร

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|----------------------|----------------|
| ตัวเหนี่ยวนำ (L) | $500 \mu H$ |
| ตัวเก็บประจุ (C) | $200 \mu F$ |

ตาราง 3-6 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจร buck-boost converter

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร buck-boost converter แบบ 2 ทาง



ภาพประกอบ 3-4 วงจร buck-boost converter แบบ 2 ทาง (Bidirectional buck/boost converter)

ภาพประกอบ 3-4 เป็นวงจร buck-boost converter แบบ 2 ทาง จะเห็นได้ว่าลักษณะการทำงานของวงจร buck-boost converter แบบ 2 ทางจะมีลักษณะการทำงานที่คล้ายกับ buck converter เมื่อแหล่งจ่ายถูกต่อเข้าทาง Port 1 และโหลดต่อเข้าทาง Port 2 และทำงานคล้ายกับ boost converter เมื่อแหล่งจ่ายถูกต่อเข้าทาง Port 2 และโหลดต่อเข้าทาง Port 1 โดยการออกแบบนี้จะใช้ข้อกำหนดเดียวกับการออกแบบ buck converter ข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจากมีคุณลักษณะการทำงานที่เหมือนกัน ส่วนในขณะที่ยังคงเป็น buck-boost converter นั้นสามารถใช้ค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ได้ ดังนั้นข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบจะมีค่าที่

เท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังตาราง 3-7

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|--------------------------|----------------|
| แรงดันด้านเข้า (V_g) | 15-60 V |
| แรงดันด้านออก (V) | 13.8 V |
| กระแสออก (I) | 6 A |
| กำลังออก (P_{out}) | 80 W |

ตาราง 3-7 ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณการออกแบบ แสดงได้ดังตาราง 3-8

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|----------------------|----------------|
| ตัวเหนี่ยวนำ (L) | 500 μH |
| ตัวเก็บประจุ (C) | 100 μF |

ตาราง 3-8 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง

3.5 การออกแบบและผลการจำลองการทำงานของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อรักษาค่าแรงดันและกระแสเอาต์พุตให้คงที่สำหรับการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักอย่างรวดเร็ว

3.5.1 การออกแบบและผลการจำลองการทำงานของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ ที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่

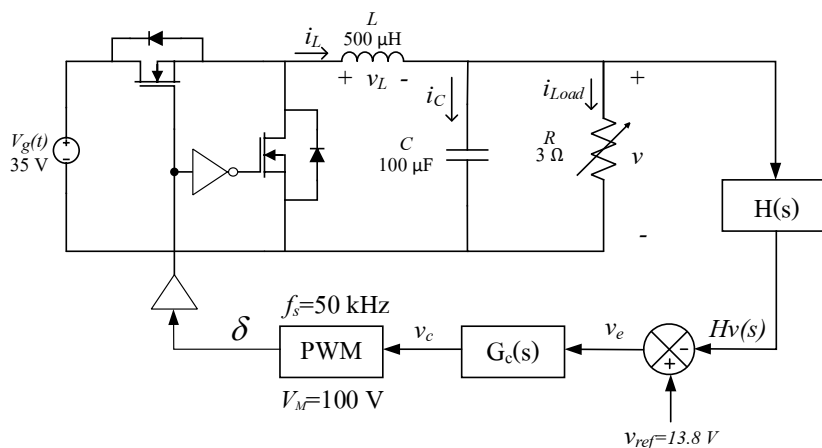
การออกแบบตัวควบคุมการป้อนกลับเพื่อรักษาแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ เป็นการออกแบบอัตราขยายของตัวชดเชย $G_c(s)$ ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง (Lead-Lag Compensator) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายไม่ซับซ้อนและเหมาะกับการควบคุมวงจรคอนเวอร์เตอร์ และจะพิจารณาเฉพาะเกณฑ์ของมุมเฟสมาร์จิน (Phase margin) เท่านั้น โดยการออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง (Lead-Lag Compensator) จะเป็นการรวมข้อดีของการชดเชยแบบเฟสนำหน้า (Lead Compensator) คือ ทำให้ค่าเวลาคงตัว (Settling time) มีค่าน้อยลงและค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) มีค่าน้อยลง

ส่วนการชดเชยแบบเฟสล่าช้า (Lag Compensator) คือเป็นตัวที่จะช่วยลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady state error) ของระบบควบคุม

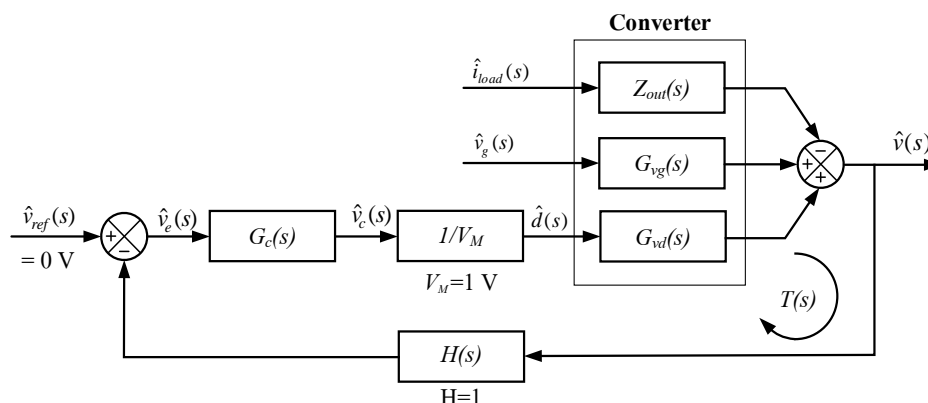
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรที่ต้องการการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่จะมีค่าดังตาราง 3-9 โดยจะทำการเลือกค่าพารามิเตอร์จากกรณีการทำงานที่เลวร้ายที่สุดของการทำงาน

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|---------------------------|----------------|
| แรงดันด้านเข้า : V_g | 35 V |
| แรงดันด้านออก : V | 13.8 V |
| แรงดันอ้างอิง : V_{ref} | 13.8 V |
| โหลด : R | 3 Ω |
| ตัวเหนี่ยวนำ : L | 500 μH |
| ตัวเก็บประจุ : C | 100 μF |

ตาราง 3-9 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ของวงจรบückคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 3-5 วงจรบückคอนเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบและมีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่



ภาพประกอบ 3-6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบและมีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตาราง 3-9 เราสามารถเขียนวงจรและบล็อกไดอะแกรมที่มีการป้อนกลับใหม่ได้ดังภาพประกอบ 3-5 และภาพประกอบ 3-6 ตามลำดับ โดยในการออกแบบเราต้องการให้ระบบที่ป้อนกลับมีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินสูงสุด (%OS) ไม่เกิน 5% และมีค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (e_{ss}) มีค่าน้อยกว่า ± 0.002 ซึ่งมีแนวทางในการออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง (Lead-Lag Compensator) ด้วยวิธีผลตอบสนองเชิงความถี่ โดยใช้แผนภาพโบเด (Bode) เป็นเครื่องมือในการออกแบบดังนี้

(1) เลือกอัตราขยายของตัวตรวจจับ (Sensor) ในเส้นทางป้อนกลับ $H(s)$ โดย $H(s)$ จะถูกเลือกเพื่อให้วงจรสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ หากเราสมมติให้การออกแบบระบบป้อนกลับดีมาก ซึ่งทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าตามแรงดันอ้างอิงที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ ซึ่งกรณีนี้จะเกิดขึ้นต่อเมื่ออัตราขยายวงรอบมีค่ามาก ๆ จนทำให้แรงดันผิดพลาดมีค่าน้อย $v_e(s) \approx 0$ และ $H(s)v(s) \approx v_{ref}(s)$ ดังนั้นเราจะได้

$$H(s) = \frac{v_{ref}(s)}{v(s)} = \frac{13.8}{13.8} = 1 \quad (3-19)$$

(2) หาค่ารอบการทำงานที่จุดทำงานสงบของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

$$D = \frac{V}{V_g} = \frac{13.8}{35} = 0.3942 \quad (3-20)$$

(3) หาค่าแรงดันควบคุม $v_c(s)$ จากรูปบล็อกไดอะแกรมภาพประกอบ 3-6 จะได้สมการของ $v_c(s)$ ดังนี้

$$V_c = DV_M = (0.3942)(1) = 0.3942 \quad (3-21)$$

ดังนั้นเราสามารถหาค่าต่างๆ ที่จุดทำงานสงบของวงจรได้ ยังคงเหลือเฉพาะการออกแบบอัตราขยายตัวชดเชย $G_c(s)$ เท่านั้น

(4) กำหนดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง (Lead-Lag compensator) ซึ่ง

- ตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า (Lead (PD) compensator) จะประกอบด้วย ซีโรที่ความถี่ f_z โดยมีค่าต่ำกว่าความถี่ตัดศูนย์ (Crossover frequency : f_c) เพื่อเป็นการเพิ่มมาร์จินของมุมเฟส $T(s)$ และ โพลที่ความถี่สูง f_p เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากฮาร์มอนิกที่ความถี่สูงๆ ของความถี่สวิตซิ่ง แต่ถ้าวทำการออกแบบให้ความถี่ f_p มีค่าสูงเกินไปจะทำให้กลายเป็นตัวขยายฮาร์มอนิกของความถี่สวิตซิ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจร PWM ดังนั้นค่าความถี่ f_p ควรมีค่าน้อยกว่าความถี่สวิตซิ่ง ซึ่งข้อพิจารณาี้จะเป็นตัวกำหนดความถี่ตัดศูนย์ f_c ควรมีค่าน้อยกว่า 10% ของความถี่สวิตซิ่งของวงจรคอนเวอร์เตอร์

- ตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลัง (Lag (PI) compensator) จะประกอบด้วยซีโรแบบกลับความถี่ f_L โดยจะมีค่าต่ำกว่าความถี่ตัดศูนย์ f_c มากๆ เพื่อทำให้มุมเฟสมาร์จินไม่มีการเปลี่ยนแปลงและเป็นการเพิ่มอัตราขยายที่ความถี่ต่ำซึ่งจะทำให้แรงดันเอาท์พุทมีค่าคงที่

ซึ่งเราสามารถเขียนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง (Lead-Lag compensator) ได้ดังนี้

$$G_c(s) = G_{c0} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right) \left(1 + \frac{\omega_L}{s}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)} \quad (3-22)$$

โดยการออกแบบค่าของ $G_c(s)$ จะทำได้โดยการออกแบบอัตราขยายวงรอบ $T(s)$ ซึ่งเราสามารถเขียนสมการของอัตราขยายวงรอบได้ดังนี้

$$T(s) = G_c(s) \left(\frac{1}{V_M} \right) G_{vd}(s) H(s) \quad (3-23)$$

$$T(s) = \frac{G_c(s) H(s) V}{V_M D} \frac{1}{s^2(LC) + s\left(\frac{L}{R}\right) + 1}$$

โดยเริ่มต้นก่อนจะมีการชดเชยเราจะทำการกำหนดให้ $G_c(s) = 1$ (Uncompensated) จะได้

$$T_u(s) = \frac{(1) \times H(s) V}{V_M D} \frac{1}{s^2(LC) + s\left(\frac{L}{R}\right) + 1} \quad (3-24)$$

เราสามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$T_u(s) = T_{u0}(s) \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + \frac{s}{Q_0\omega_0} + 1} \quad (3-25)$$

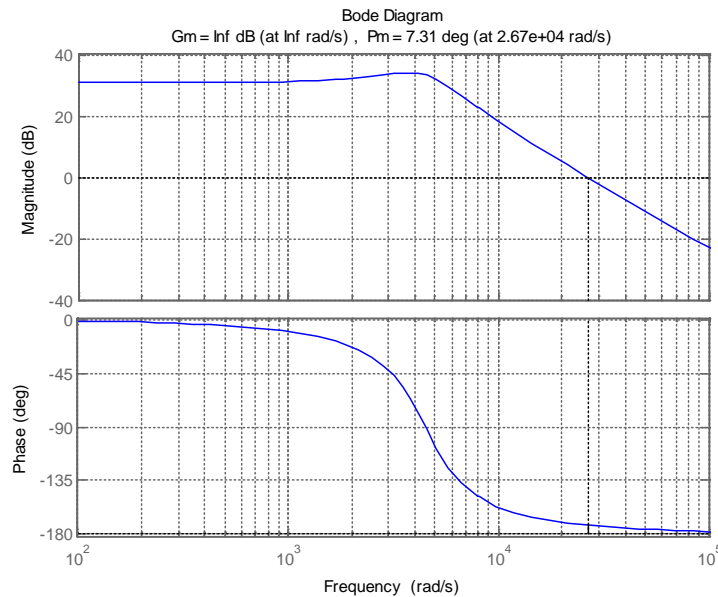
โดย

$$T_{u0}(s) = \frac{H(s) V}{V_M D}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Q_0 = R\sqrt{\frac{C}{L}}$$

ทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆเพื่อนำไปพล็อตกราฟ

$$T_u(s) = \frac{(1) \times (1)}{(1)} \frac{13.8}{0.3942} \frac{1}{\left(\frac{s}{\frac{1}{\sqrt{500\mu \times 100\mu}}}\right)^2 + \frac{s}{3\sqrt{\frac{100\mu}{500\mu}} \frac{1}{\sqrt{500\mu \times 100\mu}}} + 1} \quad (3-26)$$

ทำการพล็อตกราฟโบเดของสมการอัตราขยายวงรอบ $T_u(s)$ ดังภาพประกอบ 3-7 เพื่อดูผลตอบสนองของวงจร



ภาพประกอบ 3-7 กราฟโบเดของสมการอัตราขยายวงรอบ $T_u(s)$ ที่ยังไม่ได้ได้รับการชดเชยของ วงจรบีกอนเวอร์เตอร์

จากกราฟผลตอบแทนเชิงความถี่ของระบบควบคุมจะเห็นได้ว่าผลตอบแทนจะมีค่าพุ่งเกินและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวค่อนข้างมาก และมีค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (e_{ss}) เกินข้อกำหนด และเมื่อเราทำการดูกราฟโบเดเราจะได้อ่า

- มุมเฟสมาร์จิน (Phase margin : PM_u) มีค่าเท่ากับ 7.31°
- $f_{uc} = 2.67 \times 10^4 \text{ rad/s} = 4.249 \text{ kHz}$
- $\|T_{u0}(s)\| = \frac{H(s) V}{V_M D} = \frac{1}{1} \frac{13.8}{0.3942} = 35 = 30.881 \text{ dB}$
- $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{500\mu \times 100\mu}} = 4.477 \times 10^3 \text{ rad/s}$
- $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{4.477 \times 10^3}{2\pi} = 711.7625 \text{ Hz}$
- $Q_{u0} = R \sqrt{\frac{C}{L}} = 3 \sqrt{\frac{100\mu}{500\mu}} = 1.341 = 2.5527 \text{ dB}$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ามุมเฟสมาร์จินจะมีค่าค่อนข้างน้อย ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องทำการชดเชยมุมเฟสมาร์จินให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อให้ค่าพุ่งเกินและเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่าลดลง ซึ่งก็คือการควบคุมแบบเฟสนำหน้า แล้วจึงค่อยทำการชดเชยแบบเฟสล้าหลังเพื่อทำให้ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (e_{ss}) มีค่าเป็นไปตามที่กำหนด เพราะเนื่องมาจากการควบคุมแบบเฟสล้าหลังส่วนใหญ่จะทำการชดเชยกับระบบที่มีผลตอบแทนคืออยู่แล้ว

การออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า

(5) ในการออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า เราจะทำการออกแบบตัวชดเชยเพื่อให้ค่าความถี่ตัดศูนย์ f_c ทำงานอยู่ที่ 10% ของความถี่สวิตชิงหรือก็คือ

$$f_c = \frac{10}{100} \times 50k = 5 \text{ kHz} = 3.14 \times 10^4 \text{ rad / s} \quad (3-27)$$

(6) หากค่ามูเฟสมาร์จิน(Phase margin : PM) ที่ต้องการจากการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์พุ่งเกินสูงสุด (%OS) ให้มีค่าน้อยกว่า 5%

จากสมการความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์พุ่งเกินสูงสุด (%OS) กับค่าอัตราส่วนความหน่วง(ξ)

$$\%OS = e^{-\left(\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)\pi} \times 100\% \quad (3-28)$$

จัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่าอัตราส่วนความหน่วง(ξ)

$$\xi = \frac{\sqrt{(\ln(\%OS/100))^2}}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(\%OS/100))^2}} \quad (3-29)$$

แทนค่า

$$\xi = \frac{\sqrt{(\ln(5/100))^2}}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(5/100))^2}}$$

จะได้

$$\xi = 0.69$$

จากสมการความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนความหน่วง(ξ) กับค่ามูเฟสมาร์จิน

$$PM = \tan^{-1} \left(\frac{2\xi}{\sqrt{\sqrt{1+4\xi^4} - 2\xi^2}} \right) \quad (3-30)$$

แทนค่า

$$PM = \tan^{-1} \left(\frac{2(0.69)}{\sqrt{\sqrt{1+4(0.69)^4} - 2(0.69)^2}} \right)$$

จะได้

$$PM = 64.625^\circ \approx 65^\circ$$

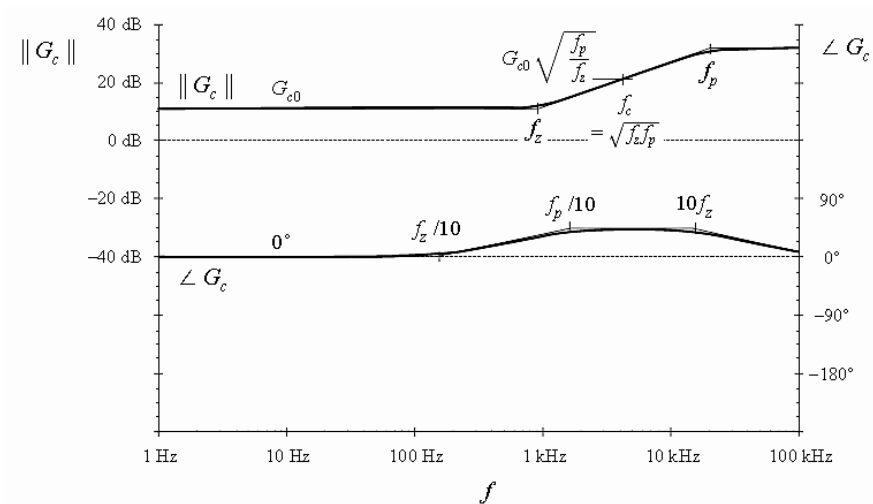
จะได้ค่ามูเฟสมาร์จินที่ต้องการมีค่า 65°

(7) หาค่าความถี่ f_z และ f_p ของตัวชดเชย

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชย เมื่อเราทำการพิจารณาเฉพาะตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้าซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (3-31)

$$G_c(s) = G_{c0} \frac{1 + \frac{s}{\omega_z}}{1 + \frac{s}{\omega_p}} \quad (3-31)$$

จากสมการที่ (3-31) สามารถเขียนเส้นแนวกำกับค่าขนาดและมุมเฟสได้ดังภาพประกอบ 3-8



ภาพประกอบ 3-8 เส้นแนวกำกับค่าขนาดและมุมเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนตัวชดเชย $G_c(s)$ ในสมการที่ (3-31)

จากภาพประกอบ 3-8 ค่ามุมเฟสสูงสุดปรากฏที่ความถี่ $f_{\phi\max}$ ซึ่งมีค่าเป็นค่าเฉลี่ยของความถี่โพลและซีโรดังสมการที่ (3-32)

$$f_{\phi\max} = \sqrt{f_z f_p} \quad (3-32)$$

ในการปรับปรุงมาร์จินของมุมเฟสให้มีค่ามากที่สุด เราจะต้องออกแบบตัวชดเชยที่ทำให้ความถี่ $f_{\phi\max}$ เป็นค่าเดียวกับความถี่ตัดศูนย์ของอัตราขยายวงรอบ f_c ค่ามุมเฟสที่ความถี่นี้จะเท่ากับ

$$\angle G_c(f_{\phi\max}) = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{\frac{f_p}{f_z}} - \sqrt{\frac{f_z}{f_p}}}{2} \right) \quad (3-33)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{f_p}{f_z} = \frac{1 + \sin(\theta)}{1 - \sin(\theta)} \quad (3-34)$$

เมื่อ $\theta = -G_c(f_{\phi\max})$ สมการ (3-31) และ (3-33) แสดงให้เห็นว่าการออกแบบให้ตัวชดเชยมีมุมเฟสหน้า (θ) ที่ความถี่ f_c นั้น ความถี่ที่โพลและซีโรควรรจะถูกเลือกดังนี้

$$f_z = f_c \sqrt{\frac{1 - \sin(\theta)}{1 + \sin(\theta)}} \quad (3-35)$$

$$f_p = f_c \sqrt{\frac{1 + \sin(\theta)}{1 - \sin(\theta)}}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-35) หาค่าความถี่ f_z และ f_p ของตัวชดเชยได้ดังนี้

$$f_z = f_c \sqrt{\frac{1 - \sin(65^\circ)}{1 + \sin(65^\circ)}} = 1.10847 \text{ kHz} = 6.961 \times 10^3 \text{ rad/s} \quad (3-36)$$

$$f_p = f_c \sqrt{\frac{1 + \sin(65^\circ)}{1 - \sin(65^\circ)}} = 22.553 \text{ kHz} = 1.417 \times 10^5 \text{ rad/s}$$

(8) หาค่าขนาด G_{c0} ของตัวชดเชย

เมื่อเราไม่ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าที่ความถี่ตัดศูนย์ ค่าขนาดของตัวชดเชยจะถูกเลือกให้เป็น 1 ที่ความถี่ตัดศูนย์ของอัตราขยายวงรอบ f_c โดยจะต้องให้ G_{c0} มีค่าเท่ากับ

$$G_{c0} = \left(\frac{f_c}{f_0} \right)^2 \frac{1}{T_{u0}} \sqrt{\frac{f_z}{f_p}} = \left(\frac{5k}{711.76} \right)^2 \frac{1}{35} \sqrt{\frac{1.1084k}{22.553k}} = 0.3125 \quad (3-37)$$

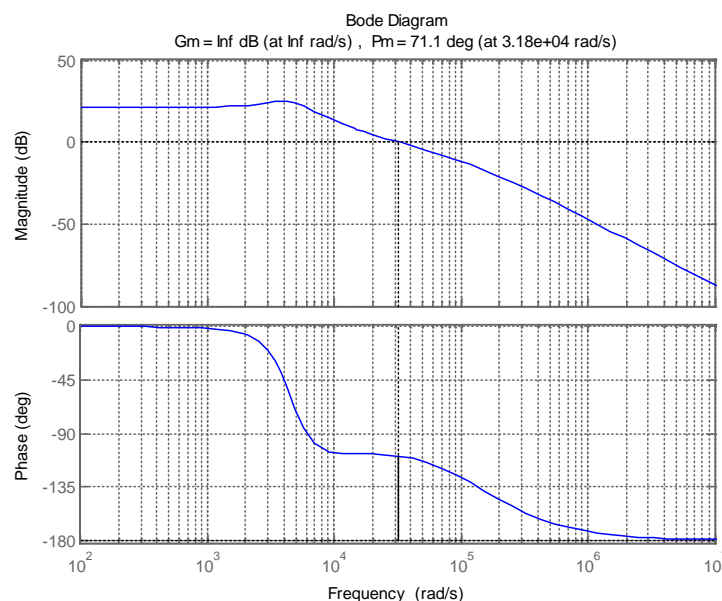
(9) ดังนั้นอัตราขยายวงรอบ (Loop gain) ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้า ดังนี้

$$T(s) = T_{u0}(s)G_{c0}(s) \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right) \left(\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + \frac{s}{Q_0\omega_0} + 1\right)} \quad (3-38)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$T(s) = (35)(0.3125) \frac{\left(1 + \frac{s}{6.961 \times 10^3}\right)}{\left(1 + \frac{s}{1.417 \times 10^5}\right) \left(\left(\frac{s}{4.477 \times 10^3}\right)^2 + \frac{s}{(1.341)(4.477 \times 10^3)} + 1\right)} \quad (3-39)$$

ทำการพล็อตกราฟโบเดของสมการที่ (3-39) ได้ดังภาพประกอบ 3-9 ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้า เพื่อตรวจสอบสนองของวงจรมีลักษณะเป็นไปตามที่ออกแบบไว้หรือไม่



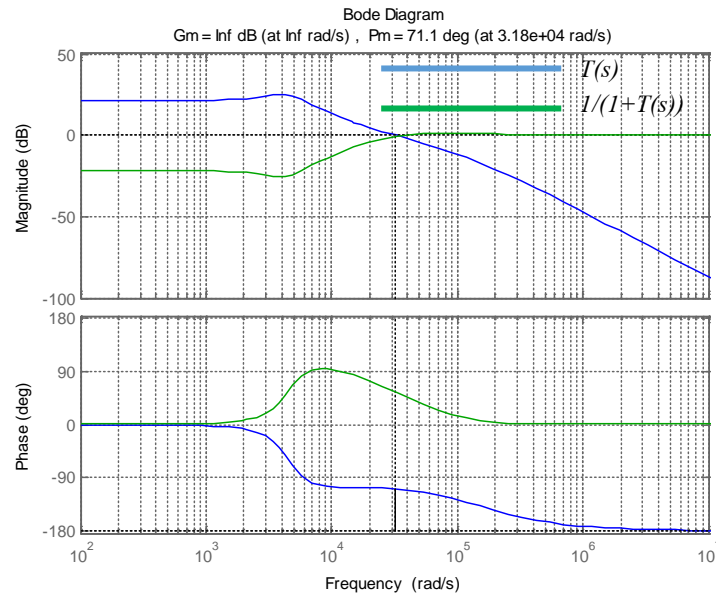
ภาพประกอบ 3-9 กราฟโบเดของอัตราขยายวงรอบ ($T(s)$) ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้าตามสมการที่ (3-38) ของวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์

จากภาพประกอบ 3-9 จะเห็นได้ว่าเส้นแนวกำกับของอัตราขยายวงรอบป้อนกลับที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้าแล้วจะได้ค่า

- มุมเฟสมาร์จิน (Phase margin : PM) มีค่าเท่ากับ 71.1°

$$- f_c = 3.18 \times 10^4 \text{ rad/s} \approx 5 \text{ kHz}$$

$$- \|T_0(s)\| = T_{u0}(s)G_{c0}(s) = (35)(0.3125) = 10.9375 = 20.77 \text{ dB}$$



ภาพประกอบ 3-10 กราฟโบเดของ $T(s)$ และ $1/(1+T(s))$ ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้าของวงจร บั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่

เมื่อเราทำการพล็อตกราฟโบเดของ $1/(1+T(s))$ ที่เป็นแฟกเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาต์พุต และฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ดังภาพประกอบ 3-10 จะเห็นว่าที่ความต่ำกว่า 711.7625 Hz สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตหรือกระแสโหลดจะส่งผลกระทบต่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงไป -20.77 dB หรือ 0.084 คือถ้าเราสมมติให้แรงดันอินพุตมีค่าเปลี่ยนไป 5 V จะส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป 0.165 V ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} = \|G_{vg}(s)\| \times \left\| \frac{1}{1+T(s)} \right\|$$

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} = D \times \left\| \frac{1}{1+T(s)} \right\| \quad (3-40)$$

$$\frac{\hat{v}(s)}{(5)} = (0.3942) \times (0.084)$$

$$\hat{v}(s) = 0.165 \text{ V}$$

โดยเราสามารถลดค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากแรงดันอินพุตได้ โดยการเพิ่มค่าขนาดของอัตรายาววงรอบที่ความถี่ต่ำ ซึ่งก็คือการเพิ่มตัวชดเชยแบบเฟสล่าช้า

การออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสล่าช้า

(10) การออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสล่าช้าก็คือการเพิ่มซีโรที่มีการกลับความถี่ ดังนี้

$$G_c(s) = \left(1 + \frac{\omega_L}{s}\right) \quad (3-41)$$

ทำให้เราได้สมการตัวชดเชยดังสมการที่ (3-42) ซึ่งสามารถนำเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$G_c(s) = G_{c0} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right) \left(1 + \frac{\omega_L}{s}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)} \quad (3-42)$$

(11) หาค่าความถี่ของซีโร

เราจะทำการเลือกค่าความถี่ f_L ให้มีค่าต่ำกว่าความถี่โพลและซีโรของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า เพื่อให้ขนาดอัตรายาววงรอบที่ความถี่สูงกว่าความถี่ f_L ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือก็คือความถี่ตัดศูนย์ (f_c) ยังคงมีค่าเท่าเดิม ดังนั้นซีโรกลับความถี่นี้จะได้ไปลดค่ามูมเฟสมาร์จินของระบบ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะทำการเลือกให้

$$f_L = \frac{1}{10} f_c \quad (3-43)$$

จะได้

$$f_L = \frac{1}{10} (5k) = 500 \text{ Hz} \quad (3-44)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-22) สมการของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล่าช้า เราจะสมการแทนค่าตัวแปรต่างๆที่ได้ทำการออกแบบมาได้สมการของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล่าช้า ดังนี้

$$G_c(s) = 0.3125 \frac{\left(1 + \frac{s}{2\pi 1.10847 \times 10^3}\right) \left(1 + \frac{2\pi 22.553 \times 10^3}{s}\right)}{\left(1 + \frac{s}{2\pi 500}\right)} \quad (3-45)$$

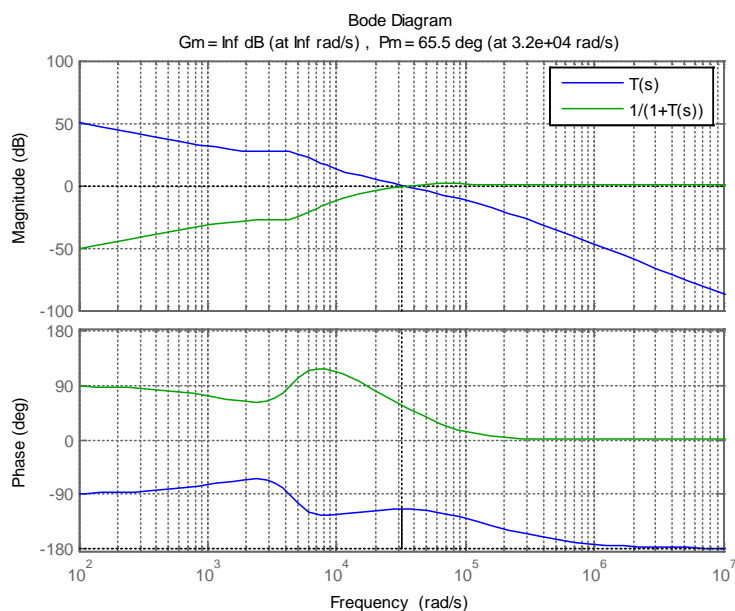
(12) คำนวณอัตราขยายวงรอบ (Loop gain) ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ถ้าหลังจะได้ดังนี้

$$T(s) = T_{u0}(s)G_{c0}(s) \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)\left(1 + \frac{\omega_L}{s}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)\left(\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + \frac{s}{Q_0\omega_0} + 1\right)} \quad (3-46)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้

$$T(s) = (35)(0.3125) \frac{\left(1 + \frac{s}{6.961 \times 10^3}\right)\left(1 + \frac{3.141 \times 10^3}{s}\right)}{\left(1 + \frac{s}{1.417 \times 10^5}\right)\left(\left(\frac{s}{4.477 \times 10^3}\right)^2 + \frac{s}{(1.341)(4.477 \times 10^3)} + 1\right)} \quad (3-47)$$

ทำการพล็อตกราฟโบเดของ $T(s)$ และ $1/(1+T(s))$ ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ถ้าหลัง ได้ดังภาพประกอบ 3-11



ภาพประกอบ 3-11 กราฟโบเดของ $T(s)$ และ $1/(1+T(s))$ ที่มีการชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ถ้าหลัง ของวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่

จากภาพประกอบ 3-11 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ของซีโร ($f_L = 500 \text{ Hz}$) ค่าขนาดของ $T(s)$ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและค่าขนาดของ $1/(1+T(s))$ ที่เป็นแฟกเตอร์ของฟังก์ชัน

ถ่ายโอนอินพุต - เอาท์พุท และฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ซึ่งก็คือระบบสามารถลดค่าแรงดันเอาท์พุทในสภาวะอยู่ตัวหรือที่ความถี่ต่ำได้ดียิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น ถ้าแรงดันอินพุทมีค่าเปลี่ยนแปลงไป 5 V ที่ความถี่ 100 Hz จะส่งผลให้แรงดันเอาท์พุทที่ความถี่ 100 Hz มีค่าลดลงไป -50 dB หรือ 0.00316 ซึ่งทำให้แรงดันเอาท์พุทเปลี่ยนแปลงไป 6.22 mV ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

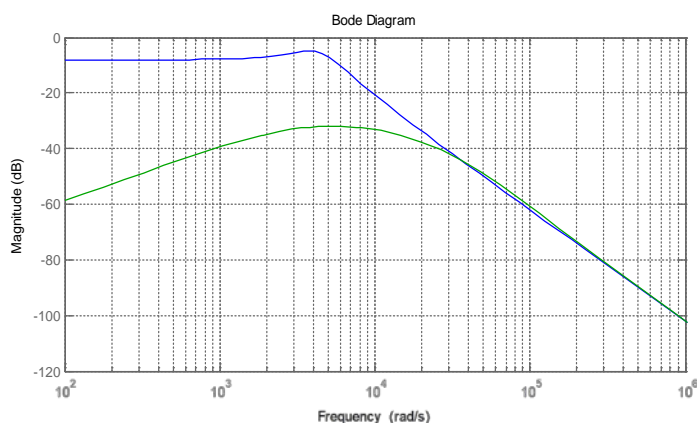
$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} = \|G_{vg}(s)\| \times \left\| \frac{1}{1+T(s)} \right\|$$

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} = D \times \left\| \frac{1}{1+T(s)} \right\| \quad (3-48)$$

$$\frac{\hat{v}(s)}{(5)} = (0.3942) \times (0.00316)$$

$$\hat{v}(s) = 0.00622 \text{ V} = 6.22 \text{ mV}$$

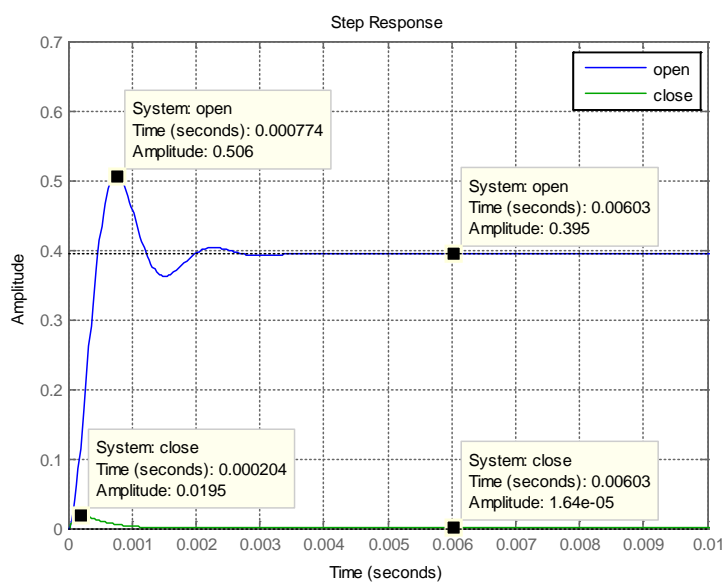
ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณแรงดันอินพุทที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแรงดันเอาท์พุทน้อยมาก



ภาพประกอบ 3-12 กราฟโบเดของฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาท์พุท ตอนที่ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)$) เปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาท์พุท ตอนที่มีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)/(1+T(s))$) ของวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์

ถ้าเราทำการเขียนกราฟโบเดพล็อตของฟังก์ชันถ่ายโอนแรงดันอินพุต-แรงดันเอาท์พุท ตอนที่ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)$) เปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาท์พุท ตอนที่มีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)/(1+T(s))$) แล้ว ดังภาพประกอบ 3-12 จะเห็น

ได้ว่า ที่ความถี่สูงกว่าความถี่ตัดศูนย์ (f_c) พังก์ชันถ่ายโอนทั้งสองจะมีลักษณะของกราฟเหมือนกัน แต่ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัดศูนย์ พังก์ชันถ่ายโอนที่มีการป้อนกลับจะถูกลดด้วยค่าของ อัตราขยายวงรอบ ($T(s)$) ซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณแรงดันอินพุตจะส่งผลทำให้ ขนาดของสัญญาณแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



ภาพประกอบ 3-13 กราฟผลตอบสนองตามเวลาของฟังก์ชันพังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาต์พุต ตอนที่ ยังไม่มีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)$) เปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาต์พุต ตอนที่ มีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)/(1+T(s))$) ของวงจรถักคอนเวอร์เตอร์

ถ้าเขียนกราฟผลตอบสนองตามเวลาของฟังก์ชันพังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาต์พุต ตอนที่ ยังไม่มีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)$) เปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาต์พุต ตอนที่ มีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)/(1+T(s))$) แล้วดังในภาพประกอบ 3-12 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราทำการเปลี่ยนแรงดันอินพุตที่ความถี่ 0 Hz จะส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 0 Hz มีค่า ลดลงประมาณ -80 dB หรือ 0.0001 กราฟผลตอบสนองตามเวลาที่มีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)/(1+T(s))$) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} = \|G_{vg}(s)\| \times \left\| \frac{1}{1+T(s)} \right\| = D \times \left\| \frac{1}{1+T(s)} \right\|$$

$$\frac{\hat{v}(s)}{(1)} = (0.3942) \times (0.0001)$$

$$\hat{v}(s) = 3.9 \times 10^{-5} \text{ V}$$

แต่กราฟผลตอบสนองตามเวลาที่ไม่มีการควบคุมการป้อนกลับ ($G_{vg}(s)$) จะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามสมการของฟังก์ชันถ่ายโอนอินพุต-เอาต์พุตซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

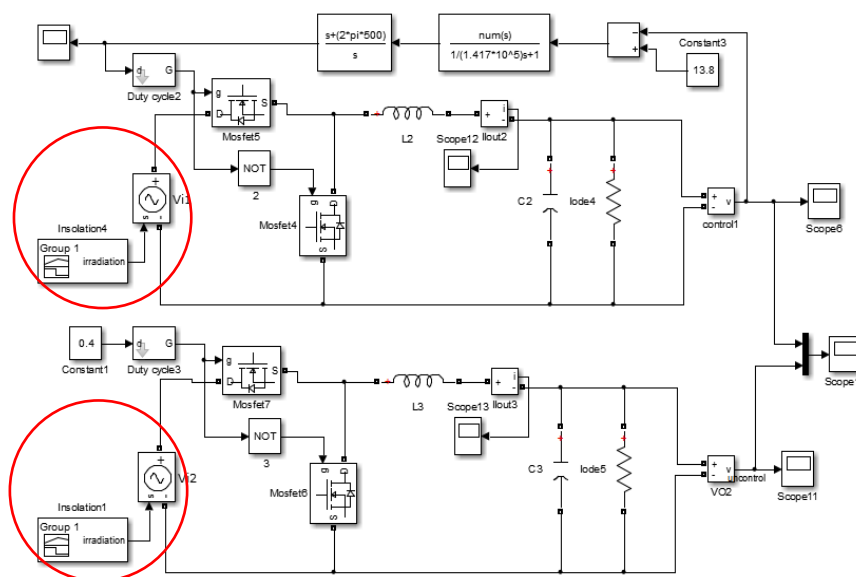
$$\frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} = \|G_{vg}(s)\| = D$$

$$\frac{\hat{v}(s)}{(1)} = (0.3942)$$

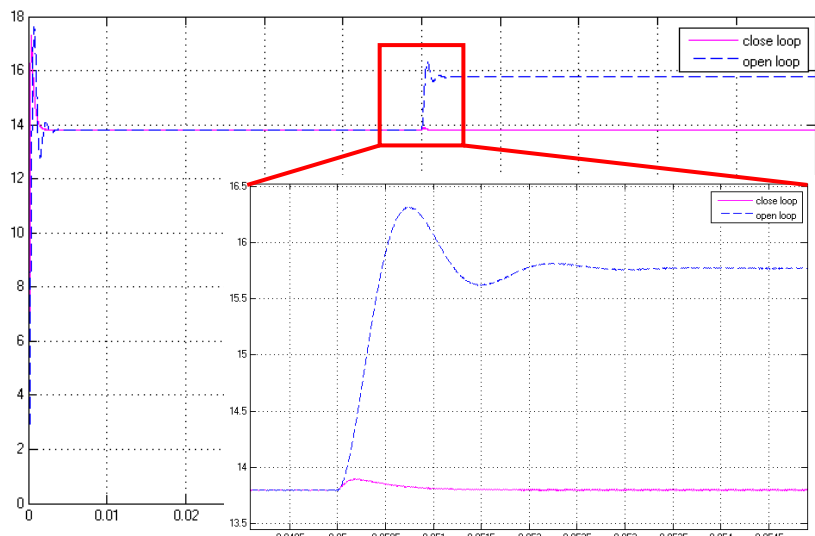
$$\hat{v}(s) = 0.3942 V$$

ดังนั้นเมื่อระบบมีการควบคุมการป้อนกลับจะสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ได้ ถึงแม้ว่าจะมีการรบกวนเกิดขึ้น เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต หรือการเปลี่ยนแปลงของโหลด

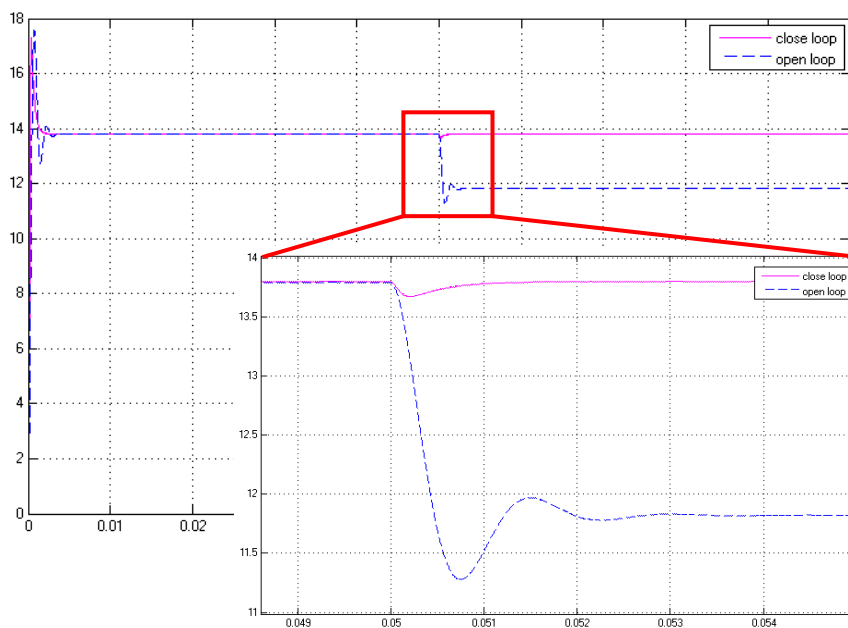
สุดท้ายนี้เราจะทำการจำลองวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเปรียบเทียบกับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าค่าของตัวชดเชย (G_c) ที่ได้ทำการออกแบบมาว่าสามารถรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการหรือไม่และมีค่าของ %OS ตามที่ออกแบบหรือไม่ ซึ่งเราจะทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพประกอบ 3-14 รูปวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ทำการจำลองใน โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยทำการรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนแรงดันอินพุต



ภาพประกอบ 3-15 ผลการจำลองการทำงานของวงจรมอเตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เทียบกับตอนที่ไมมีการป้อนกลับ เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงจาก 30 V ไปเป็น 35 V (เพิ่มระดับแรงดันอินพุต)



ภาพประกอบ 3-16 ผลการจำลองการทำงานของวงจรมอเตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เทียบกับตอนที่ไมมีการป้อนกลับ เมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงจาก 35 V ไปเป็น 30 V (ลดระดับแรงดันอินพุต)

จากภาพประกอบ 3-14 วงจรที่ทำการจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำการควบคุมระบบโดยการเปลี่ยนแรงดันอินพุต และคงค่ากระแสเอาต์พุต ซึ่งในการจำลอง ตอนที่ไม่มีการควบคุมการป้อนกลับจะมีการคงค่าของรอบการทำงาน (Duty cycle) อยู่ที่ 0.4 ส่วนวงจรที่มีการควบคุมการป้อนกลับจะทำการชดเชยค่าตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ข้างต้น ได้รูปผลผลการจำลองดังภาพประกอบ 3-15 และ ภาพประกอบ 3-16

จากผลการจำลอง ภาพประกอบ 3-15 และภาพประกอบ 3-16 จะเห็นได้ว่าเมื่อเรามีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต วงจรที่มีการควบคุมการป้อนกลับจะสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ได้ตามต้องการ โดยการปรับค่ารอบการทำงาน (Duty cycle) อย่างอัตโนมัติ แต่วงจรที่ไม่มี การควบคุมการป้อนกลับจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตจะมีการเปลี่ยนตามแรงดันอินพุต ซึ่งถ้าเราทำการดูแรงดันเอาต์พุตในช่วงพลวัต ขณะที่เพิ่มระดับแรงดันอินพุต กับขณะที่ลดระดับแรงดันอินพุต ช่วงพลวัตจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน สรุปได้ดังตาราง 3-10

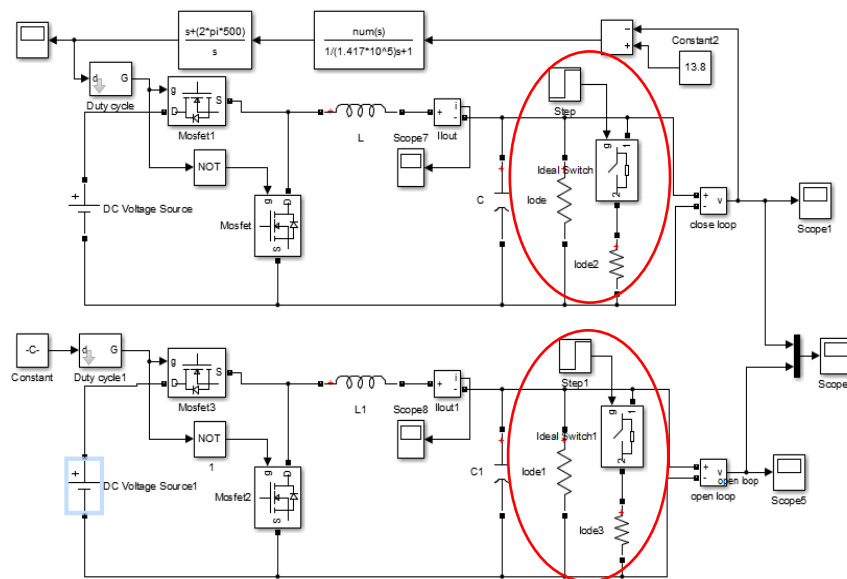
| ผลการจำลองการทำงานของวงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์ | | ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot/ Undershoot) | เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (Settling time) | ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady state error) |
|--|------------------------------|---|--|---|
| วงจรไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ (Open loop) | ขณะที่เพิ่มระดับแรงดันอินพุต | 3.36% (Overshoot) | 4 ms | +1.97 V |
| | ขณะที่ลดระดับแรงดันอินพุต | 4.633% (Undershoot) | 4 ms | -1.972 V |
| วงจรมีการควบคุมการป้อนกลับ (Close loop) | ขณะที่เพิ่มระดับแรงดันอินพุต | 0.89% (Overshoot) | 2 ms | +250 μ V |
| | ขณะที่ลดระดับแรงดันอินพุต | 0.91% (Undershoot) | 2 ms | -250 μ V |

ตาราง 3-10 สรุปผลการจำลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ และไม่มี การป้อนกลับของวงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต

จากตารางจะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะมีการเพิ่มระดับแรงดันหรือลดระดับแรงดัน ค่าพุ่งเกินสูงสุด เวลาในการสู่สภาวะคงตัวและค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของวงจรที่ได้มีการ ออกแบบการควบคุมการป้อนกลับจะมีค่าอยู่ในช่วงที่เราทำการออกแบบไว้ ส่วนวงจรที่ไม่มีการ ควบคุมการป้อนกลับ จะเห็นได้ว่าค่าค่าพุ่งเกินสูงสุดและ เวลาในการสู่สภาวะคงตัว จะมีค่า

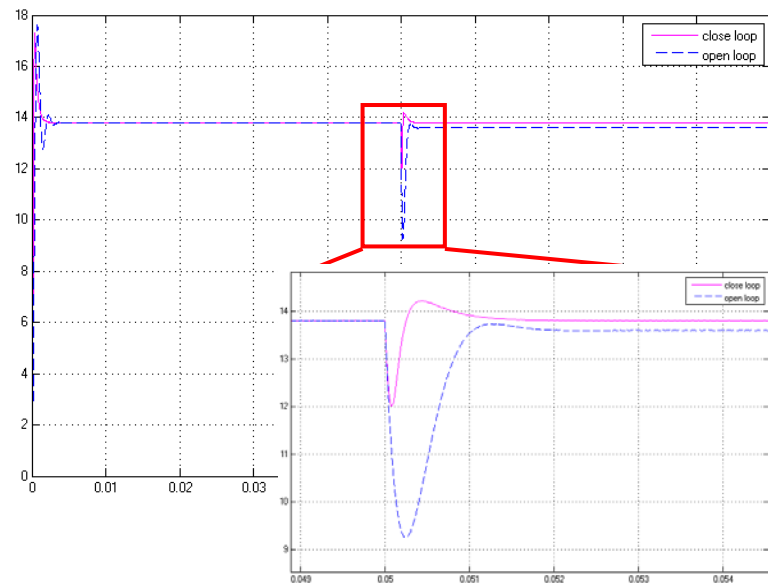
ค่อนข้างสูงซึ่งเป็นเรื่องไม่ต้องการ ดังนั้นการออกแบบการควบคุมการป้อนกลับสามารถทำให้ระบบมีผลตอบสนองตามที่ต้องการ

ในส่วนถัดมาจะทำการจำลองการทำงานโดยการรบกวนระบบให้มีเปลี่ยนแปลง กระแสเอาต์พุตและคงค่าแรงดันอินพุตด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 3-17

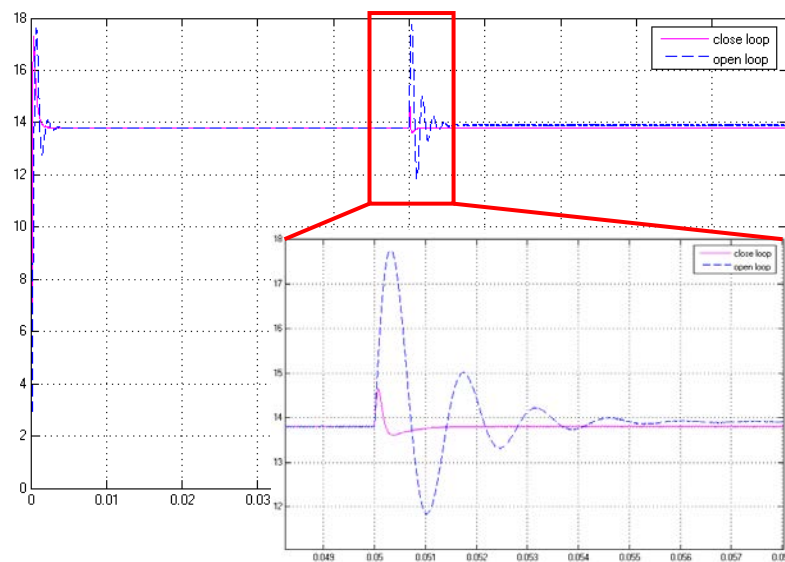


ภาพประกอบ 3-17 รูปวงจรมอเตอร์คอนเวอร์เตอร์ที่ทำการจำลองใน โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยทำการรบกวนระบบโดยการเปลี่ยนกระแสเอาต์พุต

ในการจำลองตอนที่ไม่มีการควบคุมการป้อนกลับ ค่ารอบการทำงาน (Duty cycle) จะมีค่าคงที่ที่ 0.4 ส่วนวงจรที่มีการควบคุมการป้อนกลับจะทำการชดเชยค่าตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ข้างต้น ได้รูปผลการจำลองแสดงดังภาพประกอบ 3-18 และ ภาพประกอบ 3-19



ภาพประกอบ 3-18 ผลการจำลองการทำงานของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เทียบกับตอนที่ไมมีการป้อนกลับ เมื่อกระแสเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงจาก 4.6 A ไปเป็น 9.2 A (เพิ่มกระแสเอาต์พุต)



ภาพประกอบ 3-19 ผลการจำลองการทำงานของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่เทียบกับตอนที่ไมมีการป้อนกลับ เมื่อกระแสเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงจาก 4.6 A ไปเป็น 2.3 A (ลดกระแสเอาต์พุต)

จากผลการจำลอง ภาพประกอบ 3-18 และภาพประกอบ 3-19 จะเห็นได้ว่าเมื่อเรามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุต วงจรที่มีการควบคุมการกลับจะสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ได้ตามต้องการ โดยการปรับค่ารอบการทำงาน (Duty cycle) อย่างอัตโนมัติ แต่วงจรที่ไม่มีการควบคุมการป้อนกลับจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตจะมีการเปลี่ยนแปลงกันข้ามกับกระแสเอาต์พุต ซึ่งถ้าเราทำการดูแรงดันเอาต์พุตในช่วงพลวัต ขณะที่เพิ่มกระแสเอาต์พุต กับขณะที่ลดกระแสเอาต์พุต ช่วงพลวัตจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน สรุปได้ดังตาราง 3-11

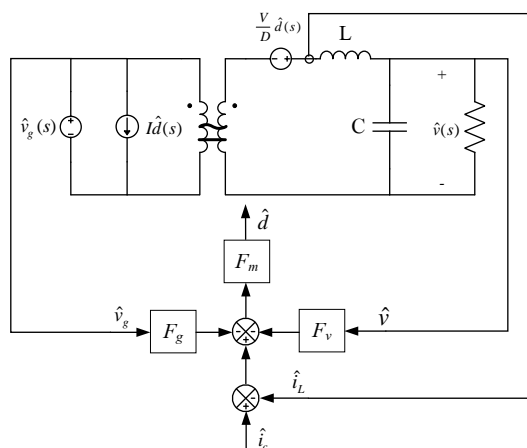
| ผลการจำลองการทำงานของวงจรบ็๊กคอนเวอร์เตอร์ | | ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot/Undershoot) | เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (Settling time) | ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady state error) |
|--|-----------------------------|--|--|---|
| วงจรไม่มีการควบคุมการป้อนกลับ (Open loop) | ขณะที่เพิ่มค่ากระแสเอาต์พุต | 31.96% (Overshoot) | 2 ms | -0.204 V |
| | ขณะที่ลดค่ากระแสเอาต์พุต | 27.81% (Undershoot) | 5 ms | +0.103 V |
| วงจรมีการควบคุมการป้อนกลับ (Close loop) | ขณะที่เพิ่มค่ากระแสเอาต์พุต | 15% (Overshoot) | 1.5 ms | -250 μ V |
| | ขณะที่ลดค่ากระแสเอาต์พุต | 6.15% (Undershoot) | 1.5 ms | +250 μ V |

ตาราง 3-11 สรุปผลการจำลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ และไม่มี การป้อนกลับของวงจรบ็๊กคอนเวอร์เตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาต์พุต

จากตารางจะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะมีการเพิ่มกระแสเอาต์พุตหรือลดกระแสเอาต์พุต ค่าพุ่งเกินสูงสุด เวลาในการสู่สภาวะคงตัว และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของวงจรที่ได้มีการออกแบบการควบคุมการป้อนกลับจะมีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับที่เราทำการออกแบบไว้ ส่วนวงจรที่ไม่มีการควบคุมการป้อนกลับจะเห็นได้ว่าค่าค่าพุ่งเกินสูงสุดและเวลาในการสู่สภาวะคงตัว จะมีค่าค่อนข้างสูงซึ่งเป็นเรื่องไม่ต้องการ ดังนั้นจึงบอกได้ว่าการออกแบบการควบคุมการป้อนกลับสามารถทำให้ระบบมีผลตอบสนองตามที่ต้องการ

3.5.2 การออกแบบและผลการจำลองการทำงานของวงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์ ที่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อให้กระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2.6.2 วิธีการควบคุมการป้อนกลับของวงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ จะเลือกใช้วิธีการ Current Programmed Mode (CPM) โดยในส่วนของบทนี้จะเป็นการจำลองเพื่อดูผลของการออกแบบว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่



ภาพประกอบ 3-20 วงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์ที่ทำการออกแบบและมีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้กระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่โดยวิธี CPM

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตาราง 3-9 เราสามารถเขียนวงจรที่มีการป้อนกลับแบบ CMP ใหม่ได้ดังภาพประกอบ 3-20 และจากการวิเคราะห์ที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 2.6.2 เราสามารถเขียนสมการการควบคุมของวงจรบ็ีกคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้กระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่โดยวิธีการควบคุมแบบ CMP ใหม่ได้ดังสมการที่ (3-49)

$$\hat{i}_L(s) = \frac{G_{g0}(s)}{1 + T_i(s)} \hat{v}_g(s) + \frac{T_i(s)}{1 + T_i(s)} \hat{i}_c(s) \quad (3-49)$$

$$\text{โดยที่ } G_{g0}(s) = \frac{G_{ig}(s) - G_{id}(s)F_m F_g}{1 + G_{id}(s)F_m F_v Z_o(s)}, F_m = \frac{1}{M_a T_s}, F_g = \frac{D^2 T_s}{2L}, F_v = \frac{(1-D)T_s}{2L},$$

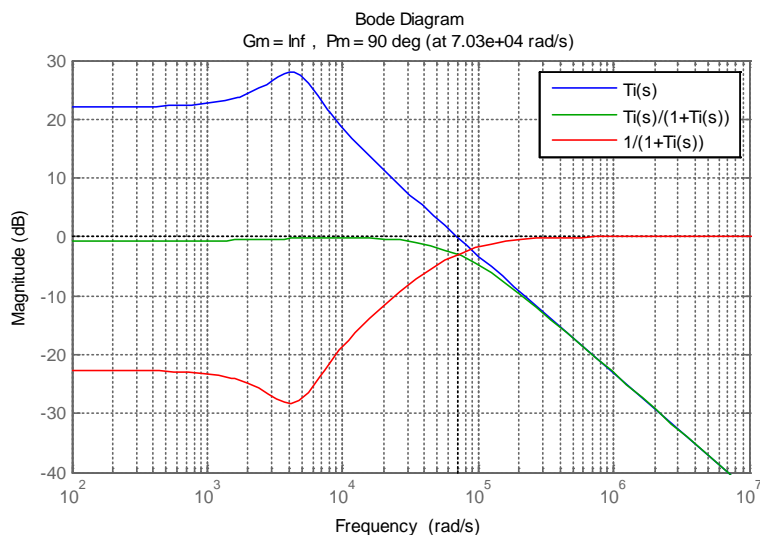
$$G_{ig} = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{v}_g(s)} = \frac{D}{Z_i(s)} = \frac{DCs + \frac{D}{R}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}, G_{id} = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V}{DZ_i(s)} = \frac{V_g Cs + \frac{V_g}{R}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1}$$

เมื่อ $Z_o = R \parallel \frac{1}{sC}$ คือ เอาต์พุตอิมพีแดนซ์

$T_v(s) = F_m G_{id} Z_o(s) F_v$ คือ อัตราขยายวงรอบของแรงดัน (Voltage loop gain)

$$T_i(s) = \frac{1}{Z_o(s)F_v} \frac{T_v(s)}{1+T_v(s)} \quad \text{คือ อัตราขยายวงรอบของกระแส (Current loop gain)}$$

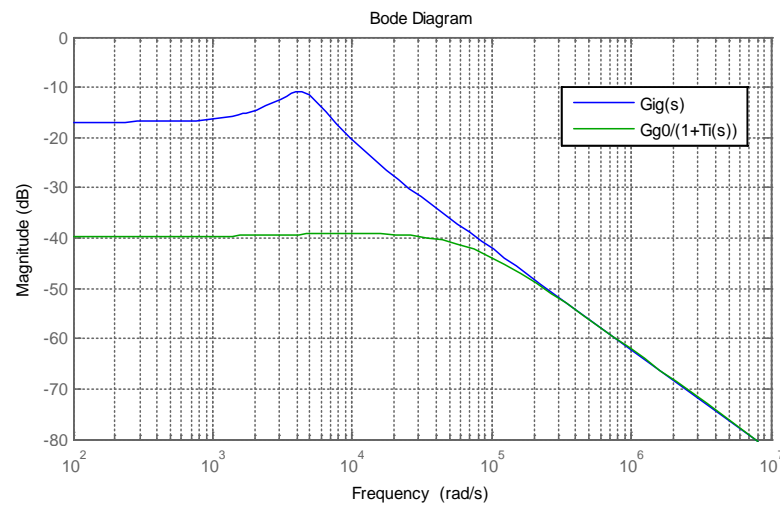
โดยเริ่มต้นเราจะทำการพล็อตกราฟโบเดของ $T_i(s)$, $T_i(s)/(1+T_i(s))$ และ $1/(1+T_i(s))$ ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่ส่งผลต่อการควบคุม เพื่อดูผลของการออกแบบในการควบคุมแบบ CPM



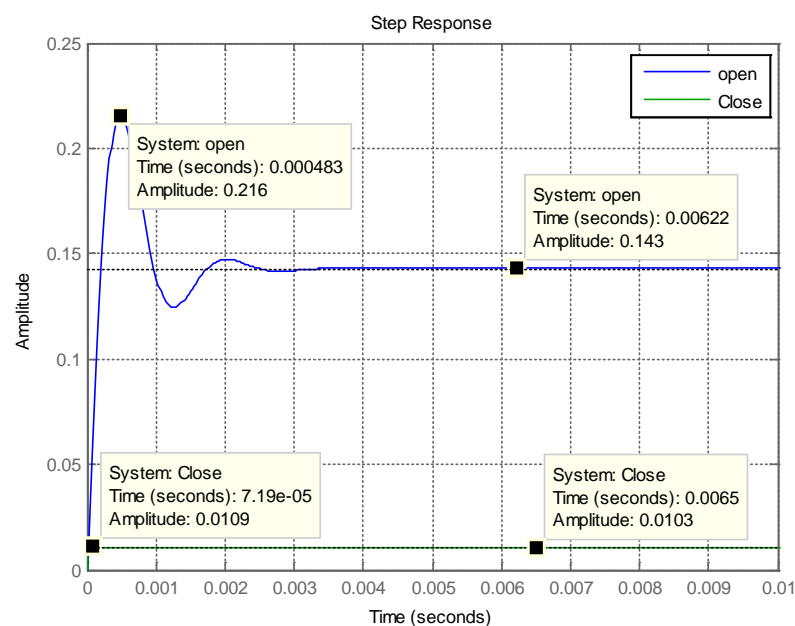
ภาพประกอบ 3-21 กราฟโบเด $T_i(s)$, $T_i(s)/(1+T_i(s))$ และ $1/(1+T_i(s))$ ของวงจรบีกคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ โดยวิธีการแบบ CPM

จากภาพประกอบ 3-21 คือผลการจำลองที่ทำการพล็อตกราฟโบเดของ $T_i(s)$, $T_i(s)/(1+T_i(s))$ และ $1/(1+T_i(s))$ จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายวงรอบของกระแส (Current loop gain : $T_i(s)$) ให้ผลตอบสนองที่ดี คือมีค่าขนาด $\|T_i(s)\| = 22.1 \text{ db} = 12.735$ ซึ่งเป็นค่าที่สูง ทำให้ค่าขนาดของ $T_i(s)/(1+T_i(s))$ มีค่าเข้าใกล้ $0 \text{ db} \approx 1$ ทำให้ค่าของการเปลี่ยนแปลงของกระแสตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) มีค่าเท่ากับค่าของกระแสควบคุม ($\hat{i}_c(s)$)

ถ้าเราทำการเขียนกราฟโบเดพล็อตของค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) ตอนที่ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ ($G_{ig}(s)$) เปรียบเทียบกับตอนที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการควบคุมแบบ CPM ($G_{g0}(s)/(1+T_i(s))$) ได้ดังภาพประกอบ 3-22 จะเห็นได้ว่า ที่ความถี่สูงกว่าความถี่ตัดศูนย์ (f_c) กราฟทั้งสองจะมีลักษณะของกราฟเหมือนกัน แต่ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัดศูนย์ กราฟที่มีการควบคุมการป้อนกลับจะถูกลดลงด้วยค่าของอัตราขยายวงรอบของกระแส ($T_i(s)$) ซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณแรงดันอินพุตจะส่งผลทำให้ขนาดของสัญญาณกระแสเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



ภาพประกอบ 3-22 กราฟโบเดพล็อตของค่าการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($i_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) ตอนที่ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ ($G_{ig}(s)$) เปรียบเทียบกับตอนที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการควบคุมแบบ CPM ($G_{g0}(s)/(1+T_i(s))$) ของวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์

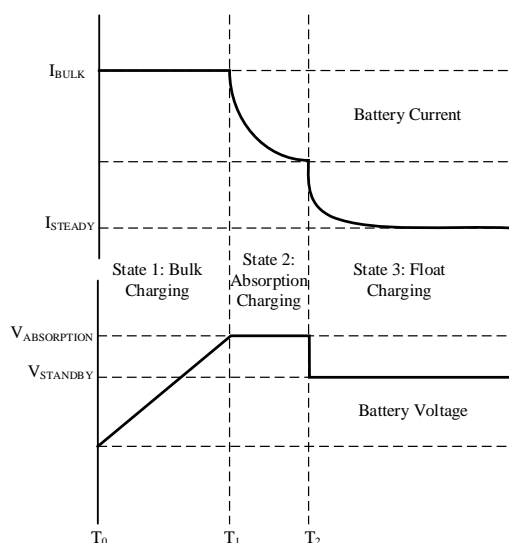


ภาพประกอบ 3-23 กราฟผลตอบสนองตามเวลาของค่าการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($i_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) ตอนที่ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ ($G_{ig}(s)$) เปรียบเทียบกับตอนที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการควบคุมแบบ CPM ($G_{g0}(s)/(1+T_i(s))$) ของวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์

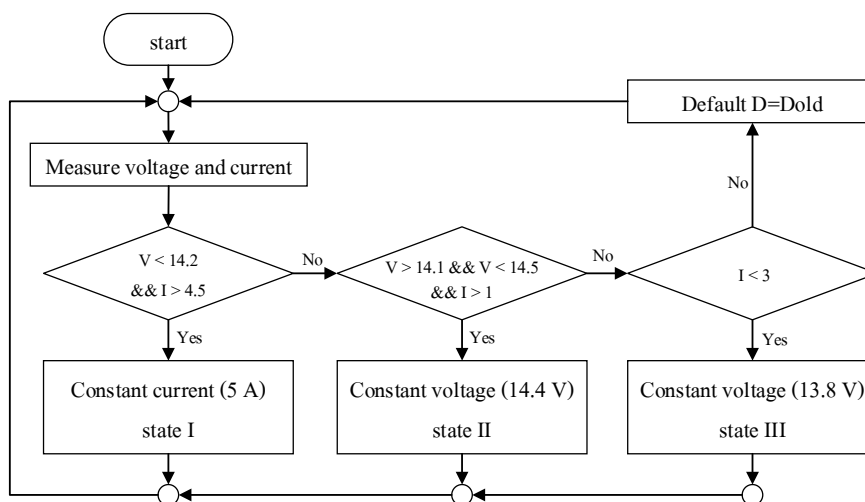
จากภาพประกอบ 3-23 เราทำการเขียนกราฟผลตอบสนองตามเวลาของค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสของตัวเหนี่ยวนำ ($\hat{i}_L(s)$) ที่ขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต ($\hat{v}_g(s)$) ตอนที่ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ ($G_{ig}(s)$) เปรียบเทียบกับตอนที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยวิธีการควบคุมแบบ CPM ($G_{g0}(s)/(1+T_i(s))$) จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่มีการควบคุมการป้อนกลับจะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตอนที่ยังไม่มี การควบคุมการป้อนกลับ คือ ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) จะมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าประมาณ 6.0021% และเวลาในการสู่สภาวะคงตัว (Settling time) มีค่าน้อยลงมีค่าประมาณเท่ากับ 0.376 ms ซึ่งจากที่อธิบายมาทำให้เราบอกได้ว่าการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่โดยวิธีการควบคุมแบบ CPM ไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มตัวชดเชยให้กับระบบการควบคุมการป้อนกลับ ซึ่งนี่ก็คือข้อดีของการควบคุมแบบ CPM

3.5.3 การออกแบบและผลการจำลองการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว

การออกแบบการควบคุมการป้อนกลับของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่และกระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ตามที่ได้อ้างมาแล้วข้างต้น ขั้นตอนต่อมาจะทำการออกแบบการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ (Battery Charging) ที่เป็นไปตามขั้นตอนการประจุ เพื่อให้สามารถประจุพลังงานได้อย่างรวดเร็ว โดยในงานวิจัยนี้เราได้เลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-acid) ที่มีพิกัดแรงดัน 12 V ความจุ 7.2 Ahr และเลือกใช้วิธีการประจุพลังงานแบบ Three Stage Charging (TSC) ดังภาพประกอบ 3-24 ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานและแผนภาพการทำงานดังภาพประกอบ 3-25



ภาพประกอบ 3-24 กราฟแรงดันและกระแสของวิธีการประจุพลังงานแบบ TSC



ภาพประกอบ 3-25 ขั้นตอนการทำงานและแผนภาพการทำงาน (Flowchart) ของขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว

ภาพประกอบ 3-25 แสดงขั้นตอนการทำงานและแผนภาพการทำงานของขั้นตอนการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็วด้วยวิธี TSC โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน

(1) เริ่มต้นจะทำการตรวจวัดค่าของแรงดันและกระแสจากแบตเตอรี่และทำการเช็คค่าของแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ว่ามีค่าตรงกับขั้นไหน

(2) ถ้าแรงดันมีค่าน้อยกว่า Absorption Voltage โดยจะมีค่าประมาณ 1.2 เท่าของระดับแรงดันปกติของแบตเตอรี่ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีค่าประมาณ 14.4 V และกระแสมีค่าคงที่ที่ค่ากระแสสูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถทำงานได้ตามข้อมูลจากผู้ผลิต ซึ่งในงานวิจัยนี้แบตเตอรี่สามารถมีค่ากระแสในการประจุสูงสุด อยู่ในช่วง 4.9 A ถึง 5.1 A จะมีการประจุพลังงานในขั้นตอนที่ 1 (State1) คือการประจุพลังงานด้วยการคงค่ากระแสให้มีค่าคงที่ (Constant current : CC) และแรงดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

(3) เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจนถึงค่า Absorption Voltage หรือ 14.4 V เราทำการเปลี่ยนขั้นในการประจุเป็นการประจุพลังงานในขั้นตอนที่ 2 (State2) คือการประจุพลังงานด้วยค่าแรงดันคงที่ (Constant voltage : CV_{14.4}) ที่ 14.4 V ในขั้นนี้กระแสในการประจุจะมีค่าค่อยๆ ลดลง

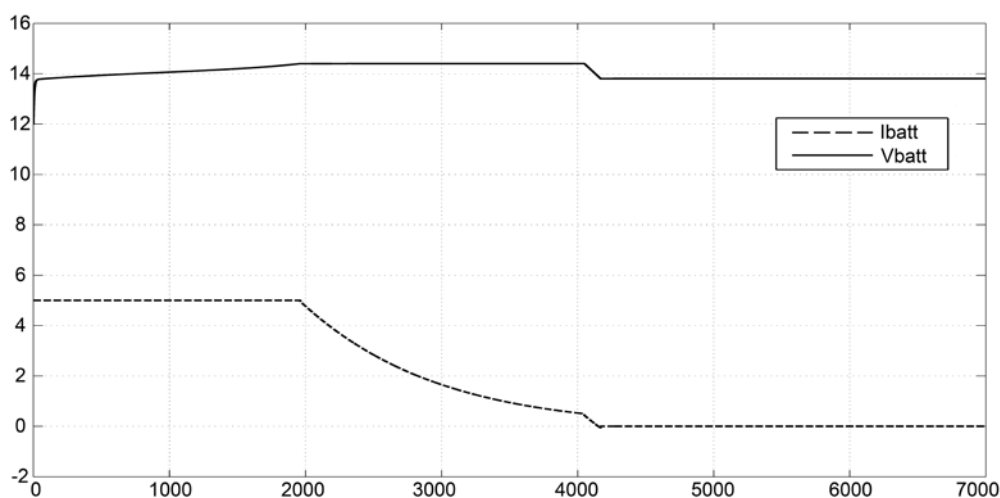
(4) เมื่อกระแสลดลงน้อยกว่า 10% ของความจุของแบตเตอรี่หรือก็คือน้อยกว่า 0.72 A ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกค่าเท่ากับ 0.5 A ระบบควบคุมจะทำการเปลี่ยนขั้นในการประจุเป็นการประจุพลังงานในขั้นตอนที่ 3 (State3) คือการประจุด้วยค่าแรงดันคงที่ (Constant voltage : CV_{13.8}) ที่ Standby - Voltage โดยมีค่าประมาณ 1.13 - 1.15 เท่าของระดับแรงดันปกติของแบตเตอรี่ ซึ่งใน

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบตเตอรี่ที่มีค่าแรงดันปกติอยู่ที่ 12 V ดังนั้นแรงดันในขั้นนี้จะคงไว้ที่แรงดัน 13.8 V และค่ากระแสจะมีค่าน้อยกว่า 0.5 A เพื่อรักษาระดับแรงดันของแบตเตอรี่และเป็นการชดเชยการคายประจุ

เมื่อเราทำการออกแบบขั้นตอนในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นถัดมาจะทำการจำลองการทำงานในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ว่าสามารถทำงานได้ตามขั้นตอนหรือไม่ โดยพิกัดของแบตเตอรี่มีค่าดังตาราง 3-12 ซึ่งได้ผลการจำลองดังภาพประกอบ 3-26

| | |
|-------------------------|-----------|
| ชนิดของแบตเตอรี่ | Lead-acid |
| Nominal voltage | 12 V |
| Rated capacity | 7.2 Ah |
| Initial State-Of-Charge | 30 % |

ตาราง 3-12 พิกัดแบตเตอรี่ที่ใช้ในการจำลอง



ภาพประกอบ 3-26 ผลการจำลองการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่โดยวิธี TSC

จากภาพประกอบ 3-26 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้ตามขั้นตอน โดยในช่วงเวลาตั้งแต่ 0-2000 s ระบบควบคุมจะทำงานอยู่ในขั้นที่ 1 มีการคงค่ากระแสให้มีค่าคงที่ และเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นถึง 14.4 V ระบบควบคุมจะสามารถเปลี่ยนขั้นในการประจุเป็นขั้นที่ 2 ซึ่งจะเป็นการควบคุมให้ค่าแรงดันมีค่าคงที่ และระบบจะสามารถเปลี่ยนขั้นเป็นขั้นที่ 3 ได้เมื่อกระแสที่ใช้ในการประจุมีค่าลดลงจนถึง 0.5 A ดังนั้นเราจะบอกได้ว่าระบบควบคุมการประจุพลังงานด้วยวิธีการ TSC ที่ได้ทำการออกแบบสามารถทำงานได้

3.6 การออกแบบและผลการจำลองการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ (MPPT) ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method)

จากทฤษฎีและหลักการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิธีการแบบ P&O ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.8 มีตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์มี 2 ตัวแปรหลักๆ คือ เวลาในการชักตัวอย่าง (Sampling time : T_s) และค่าการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน (Delta duty : ΔD) ซึ่งในบทนี้เราจะการออกแบบตัวแปรทั้งสองตัวแปรให้มีความเหมาะสม เพื่อให้สามารถติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว และเมื่อทำการออกแบบตัวแปรทั้งสองเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการจำลองการทำงานการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงเพื่อดูผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออยู่กับวงจรบัพทคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดว่าสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วหรือไม่

3.6.1 การวิเคราะห์หาค่าเวลาการชักตัวอย่าง (Sampling time : T_s) ในการติดตามหาค่า

กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method)

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.8.1 เราจะต้องมีการกำหนดให้เวลาในการชักตัวอย่าง (T_s) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Setting time : T_s) เพราะถ้าเราให้ค่าเวลาในการชักตัวอย่าง (T_s) น้อยกว่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (T_s) หรือทำการชักตัวอย่างตอนเกิดโอเวอร์ชูตสูงสุด จะทำให้ค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงซึ่งอาจสูงกว่าค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าในคาบเวลาก่อนหน้า ทำให้รอบการทำงานมีการปรับไปในทิศทางเดิม ทั้งที่ในความเป็นจริงเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจมีค่าน้อยกว่าในคาบเวลาก่อนหน้าซึ่งการรอบการทำงานจะต้องมีการปรับในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์หาค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว เพื่อไปทำการออกแบบค่าเวลาในการชักตัวอย่างต่อไป

สมการการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน ($\hat{d}(s)$) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ($\hat{v}_{PV}(s)$) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$G_{v_{pvd}}(s) = \frac{\hat{v}_{PV}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\mu\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3-50)$$

โดย $\mu = -V$, $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC_i}}$, $\xi = \frac{1}{2R_{MPP}} \sqrt{\frac{L}{C_i}}$

ถ้าเราให้ R_{in} คือค่าความต้านทานอินพุตของวงจรมอเตอร์ และสมมติให้ระบบทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด จะทำให้ $R_{in} = R_{MPP}$ และค่าของ R_{in} เราสามารถหาได้จากหลักการการทำงานของวงจรมอเตอร์ในอุดมคติ

ถ้า

$$P_{in} = P_{out}$$

$$V_{in} I_{in} = V_{out} I_{out}$$

$$\frac{V_{in}^2}{R_{in}} = \frac{V_{out}^2}{R_{load}} \quad (3-51)$$

$$\frac{V_{in}^2}{R_{in}} = \frac{\left(\frac{1}{(1-D)} V_{in} \right)^2}{R_{load}}$$

$$R_{in} = (1-D)^2 R_{load}$$

ดังนั้น

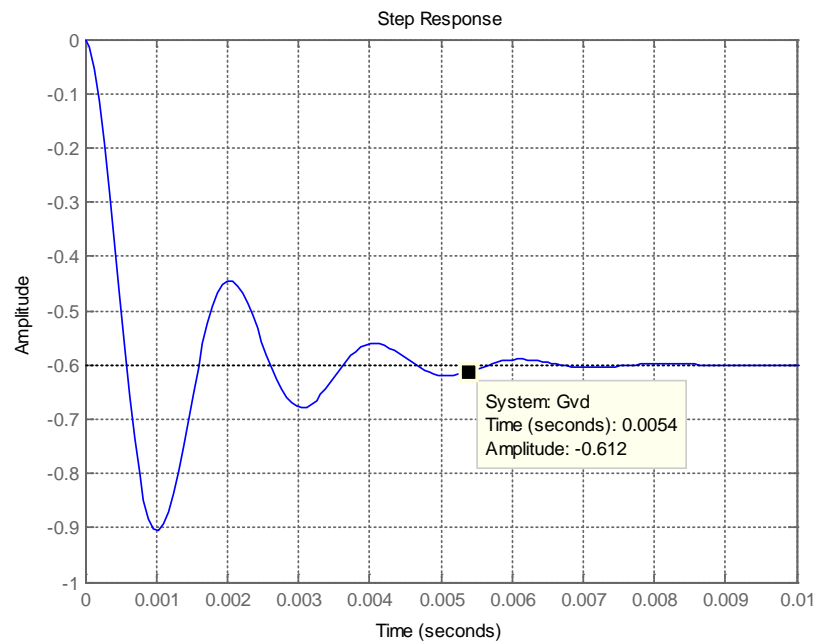
$$R_{MPP} = R_{in} = (1-D)^2 R_{load} \quad (3-52)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกับวงจรมอเตอร์ ในการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|---|----------------|
| ตัวเหนี่ยวนำในวงจรมอเตอร์ : L | 500 μH |
| ตัวเก็บประจุอินพุต : C_i | 200 μF |
| ความต้านทานโหลด : R_{load} | 15 Ω |
| รอบการทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด : D | 0.5 |

ตาราง 3-13 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกับวงจรมอเตอร์ ในการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์

เราจะสามารถจำลองการทำงานของกรเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน ($\hat{d}(s)$) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ($\hat{v}_{PV}(s)$) จากสมการ (3-50) ได้ โดยสมมติให้ค่ารอบการทำงานเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.01 ($\Delta d = 0.01$) ซึ่งจะทำให้การจำลองโดยการพล็อตกราฟผลตอบสนองตามเวลาได้ดังภาพประกอบ 3-27



ภาพประกอบ 3-27 กราฟผลตอบสนองตามเวลาของการทำงานของการทำงานของการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน ($\hat{d}(s)$) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ($\hat{v}_{pv}(s)$)

จากภาพประกอบ 3-27 จะเห็นได้ว่า เมื่อเราทำการเปลี่ยนค่ารอบการทำงานไป 0.01 ($\Delta d = 0.01$) จะทำให้แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการแกว่งและมีเวลาเข้าสู่ภาวะคงตัวเท่ากับ 0.0054 s หรือสามารถคำนวณได้จากการประมาณการหาค่าเวลาในการสู่สภาวะคงตัว (Setting time : T_s) ซึ่งประมาณค่าได้ว่า

$$T_s = \frac{4}{\xi \omega_n}$$

$$T_s = \frac{4}{\frac{1}{2R_{load}(1-D)^2} \sqrt{\frac{L}{C_i} \frac{1}{\sqrt{LC_i}}}} \quad (3-53)$$

$$T_s = \frac{4}{\frac{1}{2(15)(1-0.5)^2} \sqrt{\frac{500 \times 10^{-6}}{200 \times 10^{-6}} \frac{1}{\sqrt{(500 \times 10^{-6})(200 \times 10^{-6})}}}}$$

$$T_s = 0.006$$

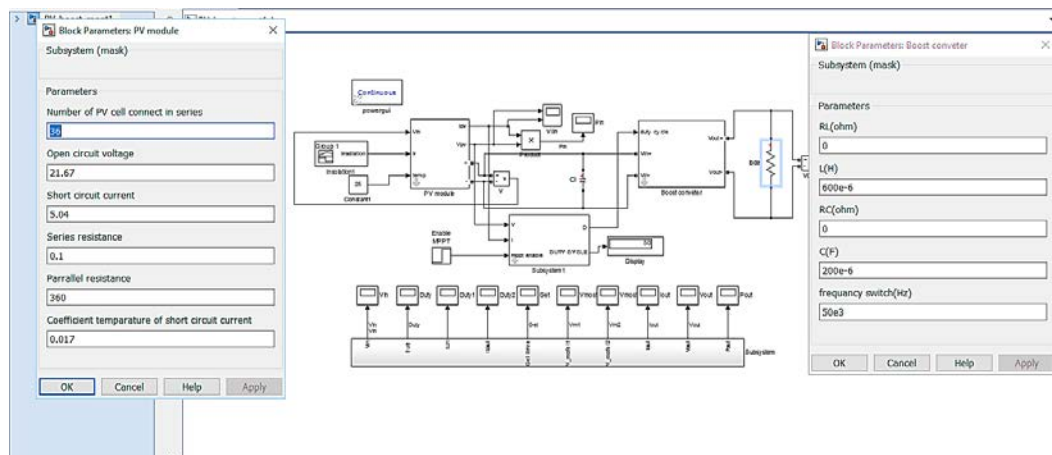
ดังนั้นเมื่อเราสามารถวิเคราะห์หาค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (T_s) ของวงจร buck converter ที่ต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ได้แล้ว ขั้นตอนต่อมาเราก็จะสามารถทำการออกแบบหา

ค่าเวลาในการชั้ตัวอย่าง (T_a) เพื่อทำการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วงจรถูกอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรถูกคุม ซึ่งค่าเวลาในการชั้ตัวอย่าง (T_a) จะต้องทำการเลือกให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (T_s) เพราะถ้าเราเลือกในจุดที่ระบบยังทำงานอยู่ในช่วงของไดนามิก ค่าที่ได้รับอาจได้รับค่าที่ผิดพลาดและส่งผลให้การตรวจเช็คและปรับในทิศทางที่ผิดพลาดได้ ดังนั้นเราจึงจะทำการเลือกค่าเวลาในการชั้ตัวอย่าง ในขณะที่ระบบทำงานอยู่ในสภาวะคงตัว ซึ่งจะใช้เวลาในการชั้ตัวอย่างเท่ากับ

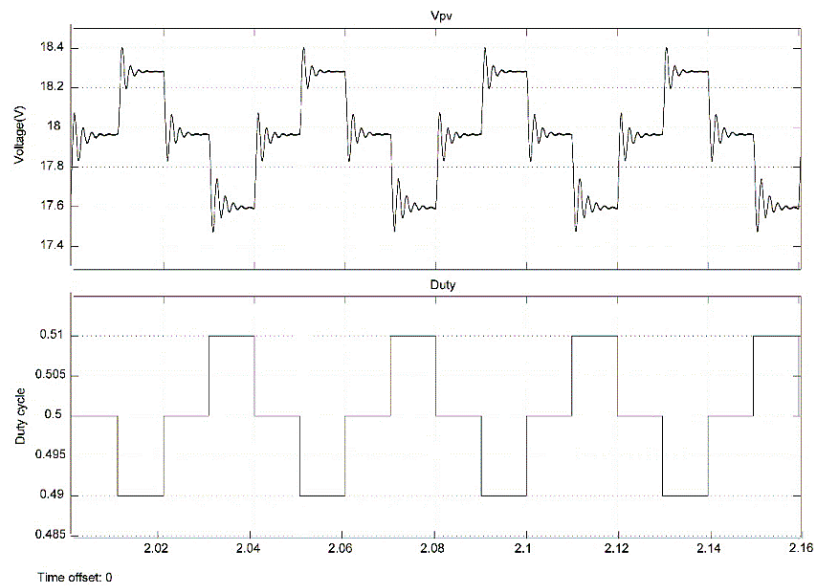
$$T_a \geq T_s \quad (3-54)$$

$$T_a \geq 0.006$$

เมื่อได้ค่าเวลาในการชั้ตัวอย่าง (T_a) ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ค่า $T_a = 0.01$ s ต่อมาจะทำการจำลองการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) เพื่อดูว่าเมื่อทำการรบกวนระบบหรือมีการปรับเปลี่ยนค่ารอบการทำงานที่ 0.01 s จะสามารถตรวจวัดค่าแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกต้องหรือไม่ ในการจำลองใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังภาพประกอบ 3-28



ภาพประกอบ 3-28 บล็อกไดอะแกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกับวงจรถูกอนเวอร์เตอร์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพประกอบ 3-29 ผลการจำลองค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์และรอบการทำงานของวงจรมอเตอร์ในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อค่า $T_a = 0.01$ s และ

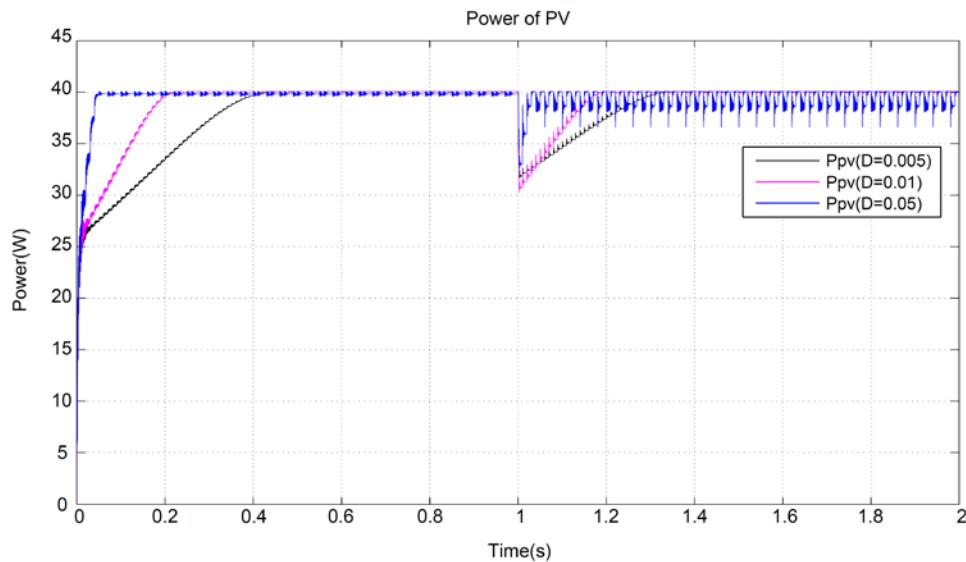
$$\Delta d = 0.01$$

ภาพประกอบ 3-29 คือผลการจำลองค่าแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์และรอบการทำงานของวงจรมอเตอร์ในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อค่า $T_a = 0.01$ s และ $\Delta d = 0.01$ โดยทำการจำลองที่ค่าความเข้มแสง 1000 W/m^2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าเวลาในการชั้ตัวอย่างที่ $T_a = 0.01$ s จะทำให้สามารถตรวจวัดค่าแรงดันจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกต้องและระบบสามารถติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ โดยที่ไม่เกิดการสับสนในการติดตามและจะเห็นได้ว่าถ้าระบบสามารถติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ค่าของรอบการทำงานจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ 3 ค่า $\{d_{MPP} - \Delta d, d_{MPP}, d_{MPP} + \Delta d\}$ ตามที่แสดงดังภาพประกอบ 3-29

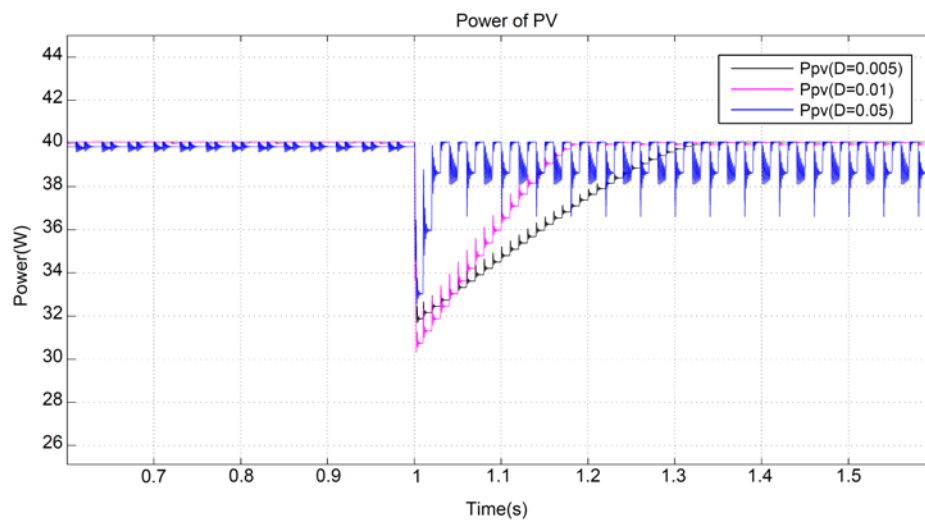
3.6.2 การวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน ในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น การติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) เพื่อให้ระบบสามารถติดตามค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องจะขึ้นอยู่กับสองตัวแปรหลัก ๆ คือ ค่าเวลาในการชั้ตัวอย่าง (T_a) และค่าการเปลี่ยนแปลงของรอบการทำงาน (Δd) ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงาน ได้เลือกใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) ซึ่งใช้โปรแกรม

MATLAB/Simulink ในการจำลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม โดยมีค่าพารามิเตอร์และบล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการจำลองเช่นเดียวกับการจำลองการค่าเวลาในการซึกตัวอย่าง ตามภาพประกอบ 3-28



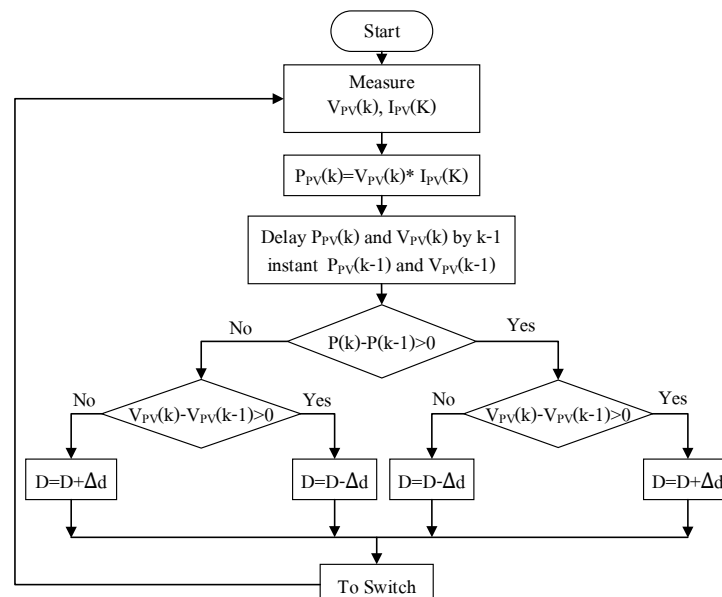
ภาพประกอบ 3-30 ผลการจำลองค่ากำลังไฟฟ้าจากการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานที่ต่างกัน เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



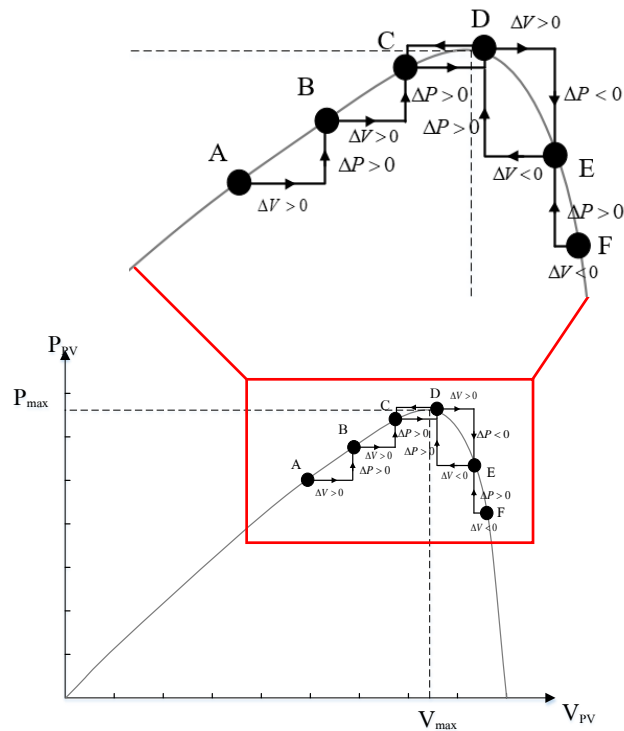
ภาพประกอบ 3-31 ผลการจำลองที่มีการขยาย (Zoom in) ค่ากำลังไฟฟ้าจากการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) ที่ค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานที่ต่างกัน เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-30 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่ารอบการทำงานที่แตกต่างกันในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดและภาพประกอบ 3-31 เป็นภาพขยายในช่วงเวลา 0.7-1.5 s ของภาพประกอบ 3-30 ที่แสดงเฉพาะช่วงเวลาในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานที่ต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด โดยในการจำลองจะทำการคงค่าเวลาในการชั้ตัวอย่างที่ 0.01 s ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานมีค่ามากเกินไป ($\Delta d = 0.05$: เส้นสีฟ้า) จะทำให้เกิดการแกว่งรอบจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะก่อให้เกิดกำลังสูญเสียที่เพิ่มขึ้นแต่จะมีข้อดีคือระบบควบคุมสามารถเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.05 s ในทางกลับกันถ้าค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานมีค่าน้อยเกินไป ($\Delta d = 0.005$: เส้นสีแดง) จะทำให้เวลาในการเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามาก หรือใช้เวลานาน ซึ่งเวลาในการเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.4 s แต่จะมีข้อดี คือ การแกว่งที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีการแกว่งน้อยมาก ดังนั้นค่ารอบการทำงานที่เหมาะสมที่เกิดจากการลองผิดลองถูก จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.01 ($\Delta d = 0.01$: เส้นสีเขียว) ซึ่งจะเห็นได้ว่าจะมีการแกว่งรอบจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดน้อย และใช้เวลาในการเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาในการเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.2 s

3.6.3 การออกแบบและผลการจำลองการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method)



ภาพประกอบ 3-32 แผนผังความคิดของการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method)



ภาพประกอบ 3-33 กราฟการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method)

จากภาพประกอบ 3-32 และภาพประกอบ 3-33 แสดงหลักการทำงานของ การติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) ซึ่งวิธีการนี้

(1) ทำการตรวจวัดตรวจวัดค่าแรงดัน (V_{pv}) และกระแส (I_{pv}) จากเซลล์แสงอาทิตย์และทำการหาค่ากำลังไฟฟ้า (P_{pv})

(2) เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบัน ($P_{pv}(k)$) กับค่าในคาบเวลาก่อนหน้า ($P_{pv}(k-1)$) และเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบัน ($V_{pv}(k)$) กับค่าในคาบเวลาก่อนหน้า ($V_{pv}(k-1)$)

(3) ถ้าในคาบเวลาปัจจุบันอยู่ที่จุด C ระบบควบคุมจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุด C กับจุด B

(4) จะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จุด C มีค่ามากกว่าค่าที่จุด B ระบบควบคุมจะทำการปรับค่ารอบการทำงานในทิศทางเดิม หรือก็คือบวกค่า $+\Delta d$ ทำให้ย้ายจุดทำงานไปยังจุด D

(5) เมื่อจุดทำงานอยู่ที่จุด D ระบบควบคุมจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเช่นเดิม โดยเปรียบระหว่าง จุด D ที่อยู่ในคาบเวลาปัจจุบันกับจุด C ที่อยู่ในคาบเวลา ก่อนหน้า

(6) จะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จุด D ยังมีค่ามากกว่าค่าที่จุด C ระบบควบคุมก็ยังคงปรับค่ารอบการทำงานในทิศทางเดิม หรือก็คือบวกค่า $+\Delta d$ ทำให้ย้ายจุดทำงานไปยังจุด E

(7) เมื่อจุดทำงานอยู่ที่จุด E ระบบควบคุมจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเช่นเดิม โดยเปรียบระหว่าง จุด E ที่อยู่ในคาบเวลาปัจจุบันกับจุด D ที่อยู่ในคาบเวลา ก่อนหน้า

(8) จะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่จุด E มีค่าน้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่จุด D แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด E มีค่ามากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ D ระบบควบคุมจะทำการปรับค่ารอบการทำงานในทิศทางตรงกันข้าม หรือก็คือลบค่า $-\Delta d$ ทำให้ย้ายจุดทำงานกลับไปยังจุด D

(9) เมื่อจุดทำงานอยู่ที่จุด D ระบบควบคุมจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเช่นเดิม โดยเปรียบระหว่าง จุด D ที่อยู่ในคาบเวลาปัจจุบันกับจุด E ที่อยู่ในคาบเวลา ก่อนหน้า

(10) จะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่จุด D มีค่ามากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่จุด E แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด D มีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ E เมื่อค่ากำลังไฟฟ้ายังคงมากกว่าระบบควบคุม จะทำการปรับค่ารอบการทำงานในทิศทางเดิม หรือก็คือยังคงลบค่าด้วยค่า $-\Delta d$ ทำให้ย้ายจุดทำงานไปยังจุด C

(11) เมื่อจุดทำงานอยู่ที่จุด C ระบบควบคุมจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเช่นเดิม โดยเปรียบระหว่าง จุด C ที่อยู่ในคาบเวลาปัจจุบันกับจุด D ที่อยู่ในคาบเวลา ก่อนหน้า

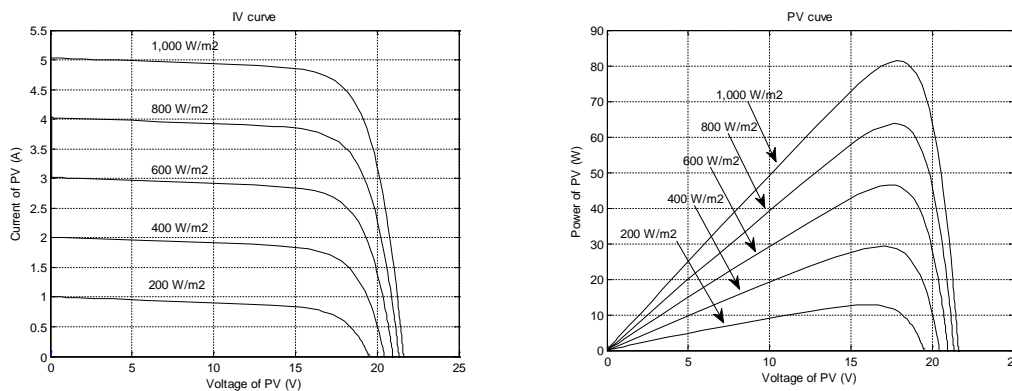
(12) จะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันที่จุด C มีค่าน้อยกว่าที่จุด D ทั้งสองค่า ทำให้ระบบควบคุมจะทำการปรับค่ารอบการทำงานในทิศทางตรงกันข้าม หรือก็คือจะเปลี่ยนค่ารอบการทำงานเป็นบวกด้วยค่า Δd ทำให้ย้ายจุดทำงานกลับไปยังจุด D

(13) จะมีการตรวจสอบเหมือนเดิมซ้ำ วนกลับไปเหมือนกับในหัวข้อที่ (5)

ขั้นตอนที่กล่าวข้างต้นคือ หลักการทำงานในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) ซึ่งระบบควบคุมจะทำการเปลี่ยนค่ารอบการทำงานทุกครั้งหลังจากที่ทำการตรวจวัดค่าและตรวจสอบเงื่อนไข โดยจะเห็นว่าระบบควบคุมมีการทำงานวนอยู่ที่ C, D และ E ตามตาราง 3-14

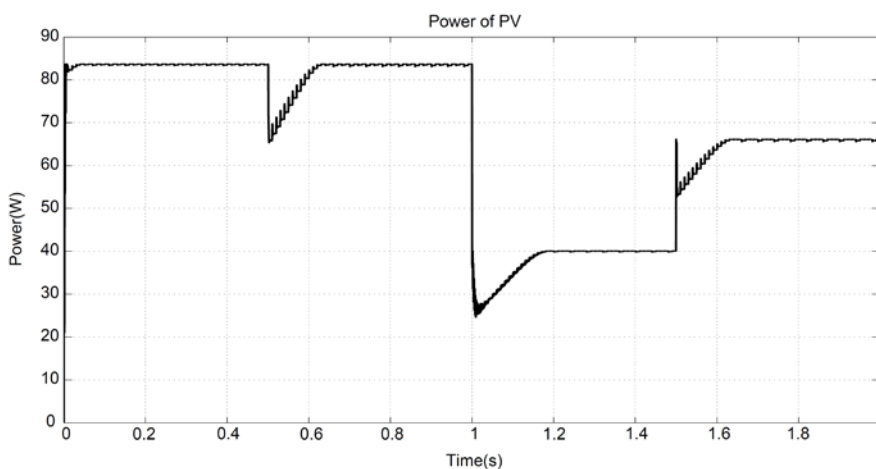
| (k-1) -th | (k) -th | ΔP | ΔV | Δd | (k+1) -th | ข้อที่ |
|-----------|---------|--------------------------|------------|------------|-----------|------------|
| B | C | + | + | + | D | (3), (4) |
| C | D | + | + | + | E | (5), (6) |
| D | E | - | + | - | D | (7), (8) |
| E | D | + | - | - | C | (9), (10) |
| D | C | - | - | + | D | (11), (12) |
| C | D | วนซ้ำกลับไปยังข้อที่ (5) | | | | (13) |

ตาราง 3-14 ตารางการตรวจสอบการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการ P&O



ภาพประกอบ 3-34 กราฟระหว่างกระแสกับ แรงดัน (I-V curve) ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ ภาพประกอบ 3-35 กราฟระหว่างกำลังไฟฟ้า กับแรงดัน (P-V curve) ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ

จากภาพประกอบ 3-34 แสดงกราฟระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V curve) ที่ค่าความเข้มแสงแตกต่างกัน ซึ่งได้มาจากการจำลอง เมื่อทำการต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงกับ โหลด และทำการเปลี่ยนค่าของโหลดจาก 0 Ω ถึง $\infty \Omega$ และนำค่ากระแสและแรงดันในแต่ละจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดมาทำการพล็อตกราฟ แล้วนำมาทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามาพล็อตกราฟใหม่ได้ดังภาพประกอบ 3-35 ซึ่งจากกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดัน (P-V curve) จะเห็นได้ว่าจะมีอยู่จุดหนึ่งที่ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด หรือก็คือ ในจุดที่โหลดมีค่าเท่ากับค่าความต้านที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง



ภาพประกอบ 3-36 ผลการจำลองค่ากำลังไฟฟ้าจากการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี P&O

จากภาพประกอบ 3-36 แสดงผลการจำลองการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยกำหนดให้ค่าเวลาในการชั่งตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 0.01 s ($T_d = 0.01$) และค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานอยู่ที่ 0.01 ($\Delta d = 0.01$) โดยในช่วงที่เวลา 0-1 s จะทำการคงค่าความเข้มให้มีค่าคงที่ที่ 1000 W/m^2 และทำการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่เวลา 0.5 s จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมจะสามารถทำการปรับค่ารอบการทำงานหรือก็คือการปรับค่าความต้านทานอินพุตของวงจรมัลติคอนเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเราทำการต่อตัวต้านทานค่าหนึ่งโดยตรงกับเซลล์แสงอาทิตย์และทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งก็บอกได้ว่าระบบควบคุมสามารถติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง และในช่วงวินาทีที่ 1 และวินาทีที่ 1.5 จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจาก 1000 W/m^2 ไปยัง 500 W/m^2 และจาก 500 W/m^2 ไปยัง 800 W/m^2 ตามลำดับ โดยทำการคงค่าโหลดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะเห็นว่าค่าพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเปลี่ยนไป ซึ่งในช่วงตั้งแต่เวลา 0-1 s จะได้ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าประมาณ 80 W และในช่วงเวลาตั้งแต่เวลา 1-1.5 s เมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจะมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าประมาณ 40 W และช่วงเวลาตั้งแต่เวลา 1.5-2 s เมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าประมาณ 65 W เมื่อเราทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากการควบคุมที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ กับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากกราฟกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) ตาม ภาพประกอบ 3-35 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากการควบคุม ที่ค่าความเข้มแสงต่างๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากกราฟกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) ซึ่งเราสามารถบอกได้ระบบควบคุมที่ได้ทำการออกแบบในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ

3.7 ผลการจำลองการทำงานเบื้องต้นของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

การจำลองเพื่อให้เห็นลักษณะการทำงานอย่างชัดเจน เมื่อเราได้ทำการรวมวงจร ทูทวงจรเข้าด้วยกันและมีการควบคุมการจัดสรรพลังงาน โดยจะทำการเปลี่ยนค่าความเข้มของ แสงอาทิตย์เพื่อที่จะดูว่าระบบสามารถที่จะติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้หรือไม่ โดยวิธีการ ติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ คือ วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method) และจะทำการดูว่า ระบบจะสามารถจัดสรรพลังงานตามโหมดการทำงานแต่ละโหมดหรือควบคุมการส่งผ่านพลังงาน ให้ได้ตามต้องการหรือไม่ โดยค่าพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์, แบตเตอรี่ตัวหลัก, และแบตเตอรี่ตัว สำรองมีค่าดังตาราง 3-15, ตาราง 3-16, และ ตาราง 3-17 ตามลำดับ

| เซลล์แสงอาทิตย์ | |
|---|--------|
| Power maximum (STC 1000W/m ² 25 C) | 80 W |
| Maximum power voltage (V _{MP}) | 17.2 V |
| Maximum power current (I _{MP}) | 4.58 A |
| Open circuit voltage (V _{OC}) | 21.5 V |
| Short circuit current (I _{SC}) | 5.02 A |

ตาราง 3-15 ค่าพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการจำลอง

| | |
|-------------------------|-----------|
| ชนิดของแบตเตอรี่ตัวหลัก | Lead-acid |
| Nominal voltage | 12 V |
| Rated capacity | 7.2 Ah |
| Initial State-Of-Charge | 50 % |

ตาราง 3-16 ค่าพิกัดของแบตเตอรี่ตัวหลักที่ใช้ในการจำลอง

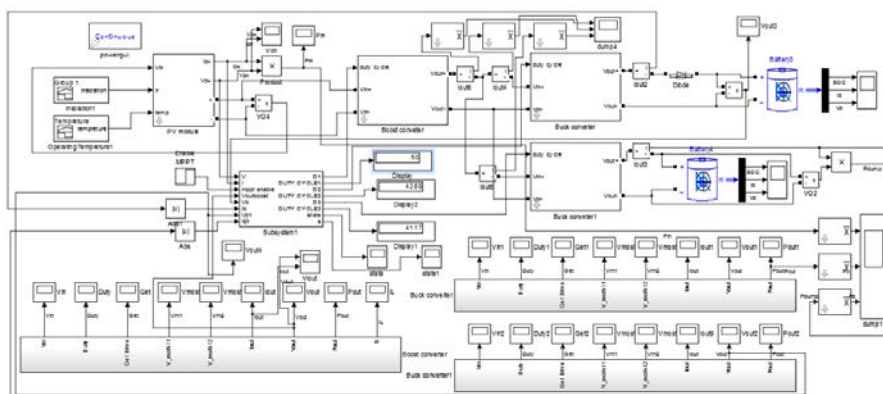
| | |
|--------------------------|-----------|
| ชนิดของแบตเตอรี่ตัวสำรอง | Lead-acid |
| Nominal voltage | 12 V |
| Rated capacity | 7.2 Ah |
| Initial State-Of-Charge | 50 % |

ตาราง 3-17 ค่าพิกัดของแบตเตอรี่ตัวสำรองที่ใช้ในการจำลอง

| การควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด | |
|---|-----------|
| Δd | 0.01 step |
| T_a | 0.01 s |

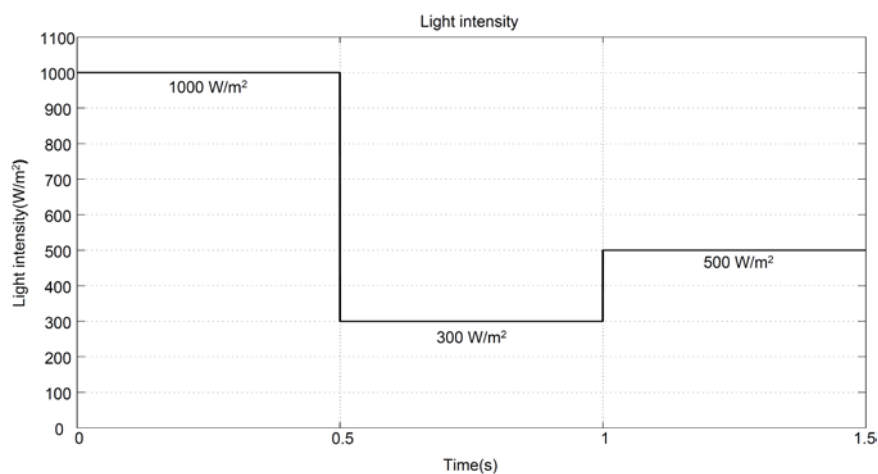
ตาราง 3-18 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพราะเป็นโปรแกรมที่ง่ายต่อการเขียนคำสั่งควบคุมการทำงาน โดยภาพประกอบ 3-37 แสดงรูปร่างจรรยาของทั้งระบบและบล็อกคำสั่งในการควบคุม

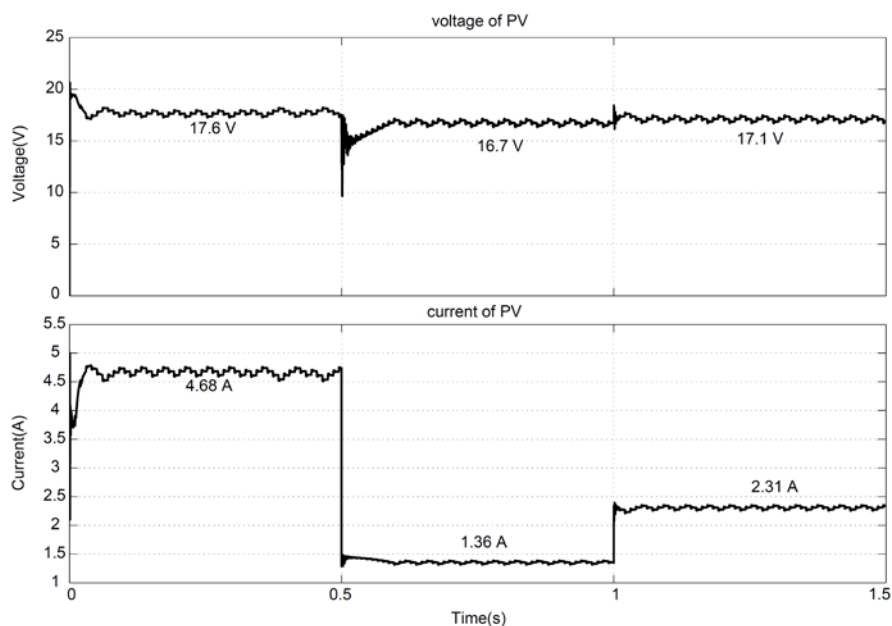


ภาพประกอบ 3-37 บล็อกไดอะแกรมทั้งระบบในโปรแกรม MATLAB/Simulink

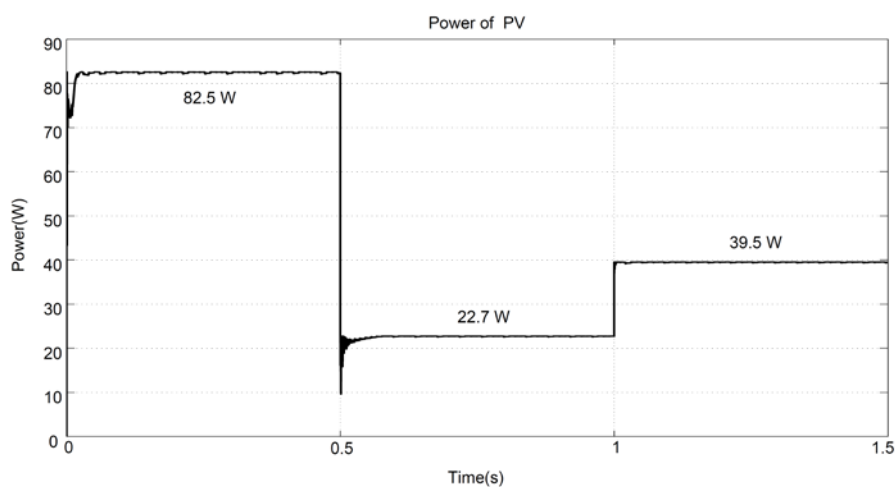
ในการจำลองเราจะทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มแสง ดังภาพประกอบ 3-38 และดูค่าแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพประกอบ 3-39 และค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์ ดังภาพประกอบ 3-40 ที่มีการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT)



ภาพประกอบ 3-38 การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง



ภาพประกอบ 3-39 ค่าแรงดัน และค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์

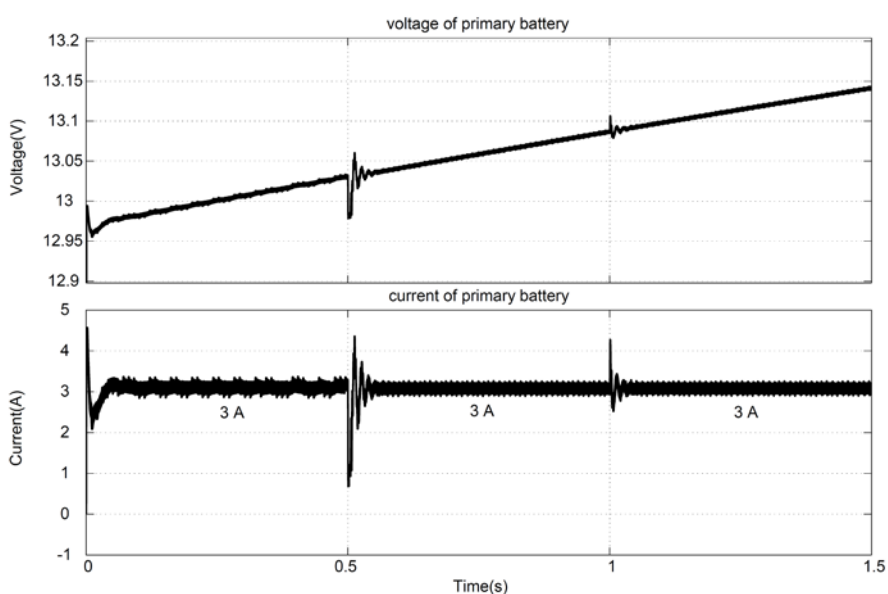


ภาพประกอบ 3-40 กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

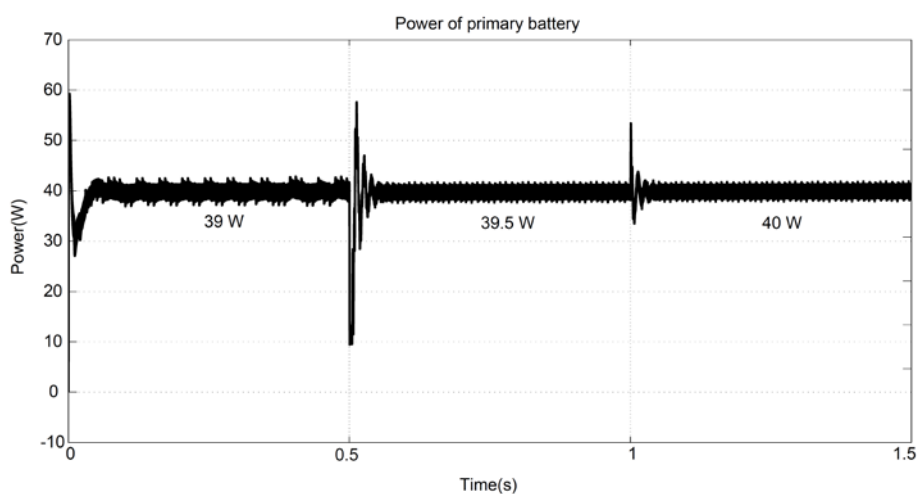
จากผลการจำลอง ภาพประกอบ 3-40 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถที่จะติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และในภาพประกอบ 3-39 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์ แต่ค่าแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยถ้าค่าความเข้มแสงมากค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูง และถ้าค่าความเข้มแสงน้อย ค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าต่ำ

ในส่วนต่อมาจะดูค่าแรงดันและกระแสที่จะทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักที่มีการควบคุมขั้นตอนการประจุดังภาพประกอบ 3-41 โดยในการจำลองในครั้งนี้จะเป็นการ

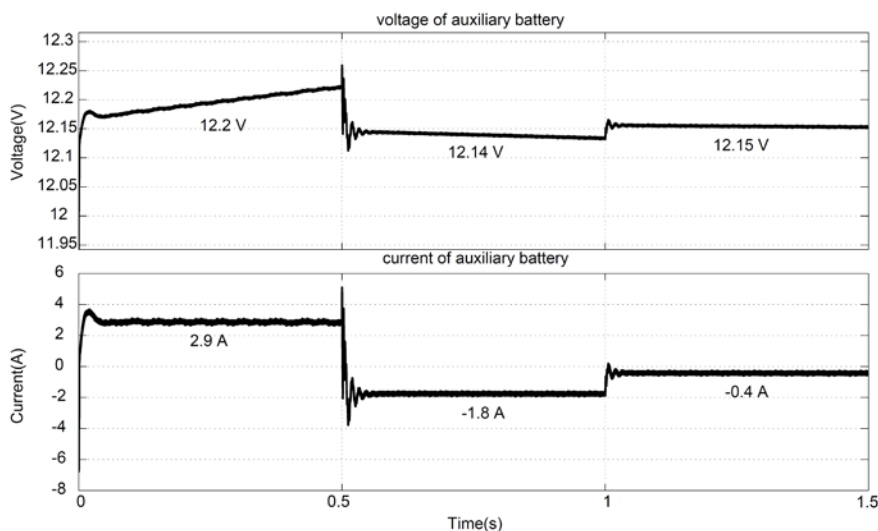
จำลองในช่วงระยะเวลาสั้น ซึ่งเราจะทำการจำลองการประจุพลังงานในขั้นตอนที่ 1 คือการประจุ โดยให้ค่ากระแสมีค่าคงที่ เพราะเนื่องจากการควบคุมค่ากระแสให้คงที่จะเป็นเรื่องที่ยากกว่าการควบคุมค่าแรงดันให้คงที่ ถ้าเราทำการควบคุมได้แสดงว่าในการควบคุมให้ค่าแรงดันคงที่จะสามารถควบคุมได้ไม่ยาก และจะดูค่าพลังงานที่ทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก ดังภาพประกอบ 3-42 เพื่อดูต่อไปว่าพลังงานที่เหลือจากการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักจะสามารถประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรองได้ โดยภาพประกอบ 3-43 แสดงค่าแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ตัวสำรอง และภาพประกอบ 3-44 แสดงค่ากำลังที่แบตเตอรี่ตัวสำรองได้รับ



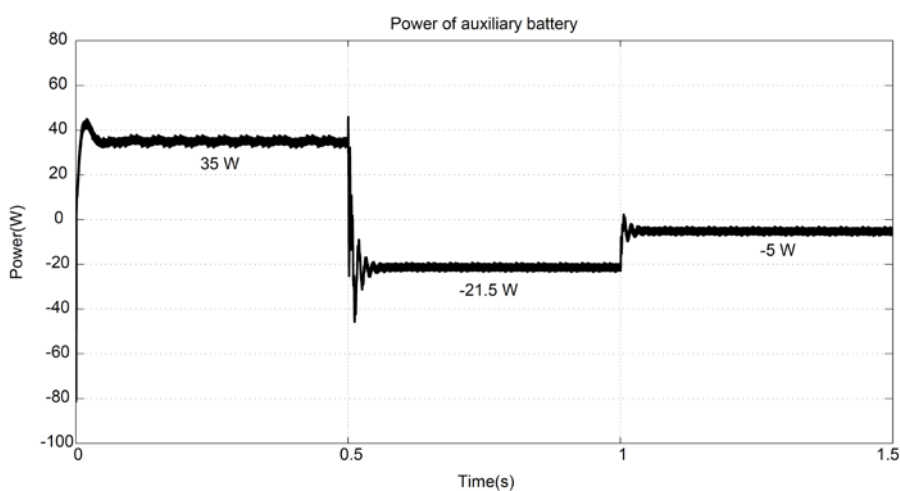
ภาพประกอบ 3-41 ค่าแรงดัน และค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก



ภาพประกอบ 3-42 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก

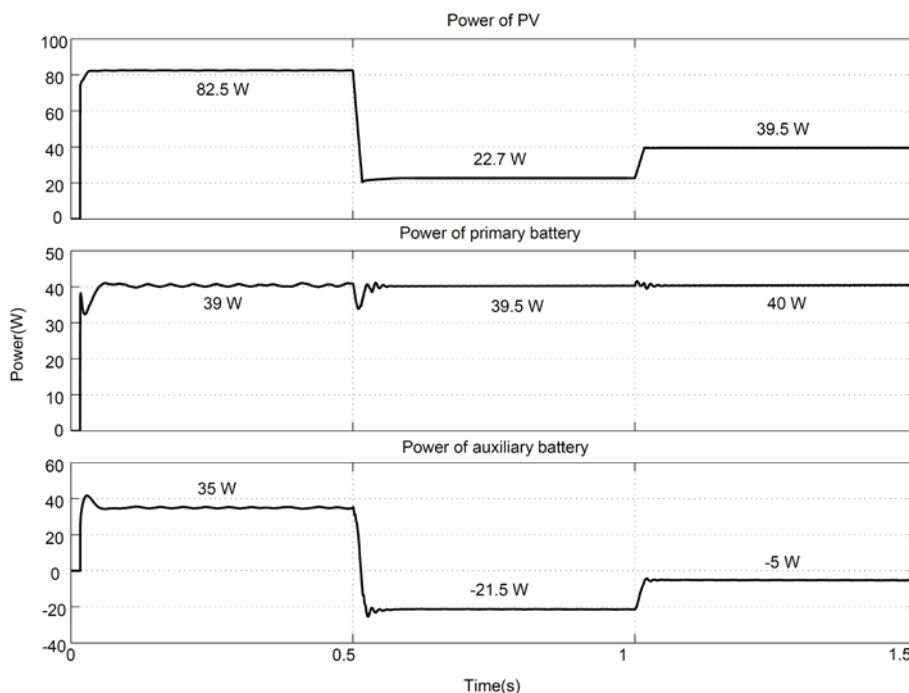


ภาพประกอบ 3-43 ค่าแรงดันและค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง



ภาพประกอบ 3-44 ค่ากำลังไฟฟ้าที่เหลือในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง

จากผลการจำลองภาพประกอบ 3-41 และภาพประกอบ 3-42 จะเห็นได้ว่า ค่ากระแสแบตเตอรี่ที่มีการควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงาน จะมีค่าคงที่และพลังงานที่แบตเตอรี่ได้รับก็มีค่าคงที่ตามที่ต้องการ ส่วนพลังงานที่เหลือจากการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักที่มีการควบคุมการประจุ ลบค่ากำลังสูญเสียในระบบ จะถูกส่งไปยังแบตเตอรี่ตัวสำรองตามโหมดการทำงาน ซึ่งจากภาพประกอบ 3-43 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันของแบตเตอรี่ตัวสำรองจะมีค่าไม่เกินพิกัดค่าแรงดันสูงสุดที่แบตเตอรี่จะสามารถรับได้ซึ่งมีค่าประมาณ 14.4 V และค่ากระแสของแบตเตอรี่ตัวสำรองจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ตามค่าของพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวสำรองได้รับดังภาพประกอบ 3-44 และจะทำการจัดการจัดสรรพลังงานของระบบหรือการควบคุมการส่งผ่านพลังงานภายในระบบแต่ละโหมดการทำงาน



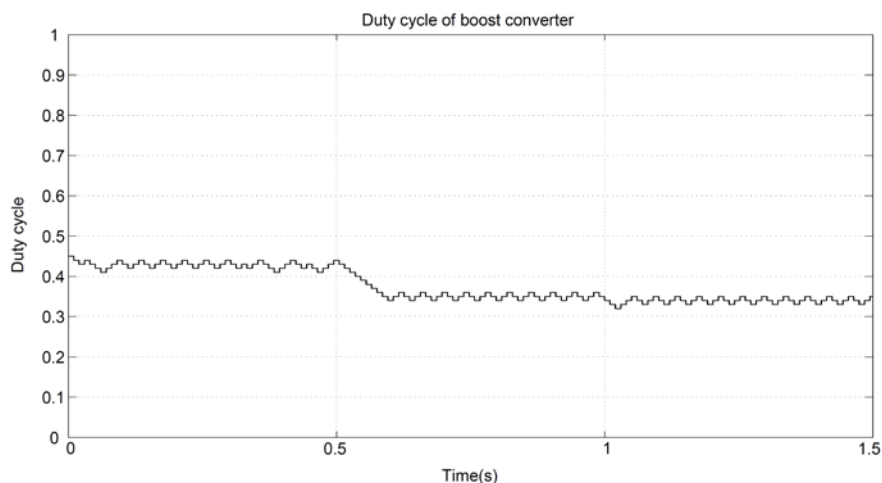
ภาพประกอบ 3-45 ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์, ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก และ ค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง

จากผลการจำลองภาพประกอบ 3-45 จะแสดงให้เห็นได้ว่าระบบสามารถจัดสรรพลังงานได้ตามแต่ละโหมดการทำงาน โดยในช่วงเวลาที่ 0-0.5 วินาที ระบบทำงานอยู่ในโหมด I ค่าพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 82.5 W ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลักต้องการซึ่งมีค่าประมาณ 40 W ดังนั้นพลังงานที่เหลือจากการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก 42.5 W จะทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง ซึ่งภายในระบบมีกำลังสูญเสียประมาณ 7.5 W ในช่วงเวลาที่ 0.5-1 วินาที ระบบทำงานอยู่ในโหมด III พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าเท่ากับ 22.7 W ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลักต้องการในการประจุพลังงานตามขั้นตอน ดังนั้นแบตเตอรี่ตัวสำรองจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายอีกตัวที่จ่ายพลังงานประมาณ 21.5 W ให้กับแบตเตอรี่ตัวหลักในการประจุพลังงานให้ขึ้นไปตามขั้นตอน และสุดท้ายในช่วงเวลาที่ 1-1.5 วินาทีระบบก็ยังทำงานอยู่ในโหมด III

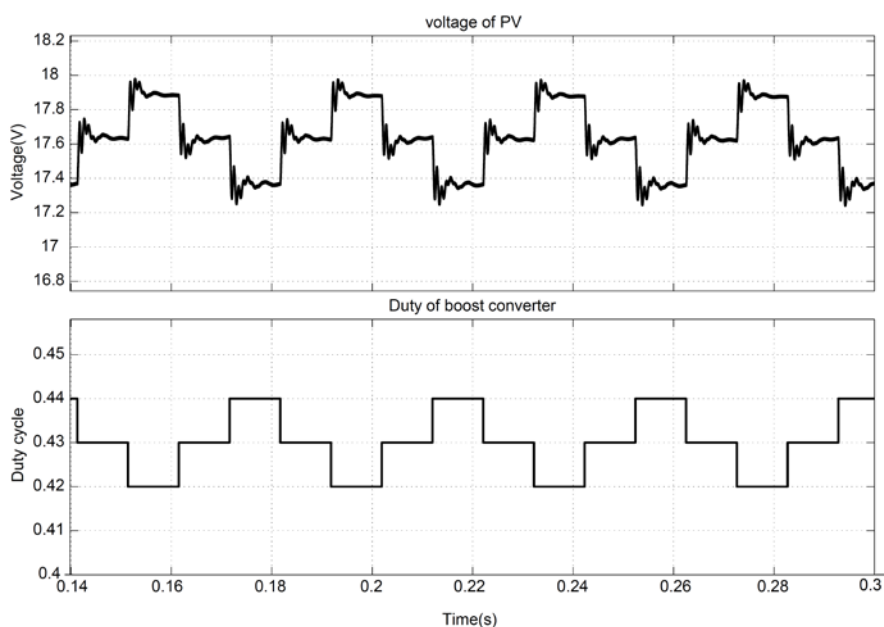
จากผลการทำงานข้างต้น จะเห็นได้ว่าระบบสามารถทำงานได้และมีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยในส่วนถัดมาจะทำการดูผลการจำลองในลักษณะการทำงานย่อย ๆ ของแต่ละการควบคุม

ในส่วนของการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O Method) เราจะทำการดูค่าของรอบการทำงาน (Duty Cycle)

ของวงจรหมทคอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) เพื่อดูว่าเมื่อค่าความเข้มแสงเปลี่ยน ดังภาพประกอบ 3-38 รอบการทำงาน (Duty Cycle) ภาพประกอบ 3-46 จะมีการปรับเปลี่ยนรอบการทำงาน (Δd) และเวลาในการช้กตัวอย่าง (T_d) ตามตาราง 3-18 เพื่อให้ให้สามารถระบบสามารถติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดหรือไม่ และจะทำกรขยายคูล่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดภาพประกอบ 3-47



ภาพประกอบ 3-46 ค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) ของวงจรหมทคอนเวอร์เตอร์

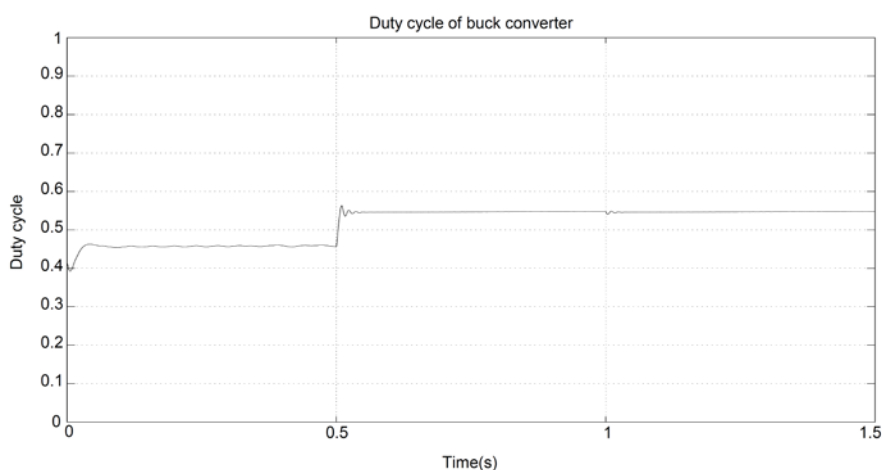


ภาพประกอบ 3-47 แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการขยายที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

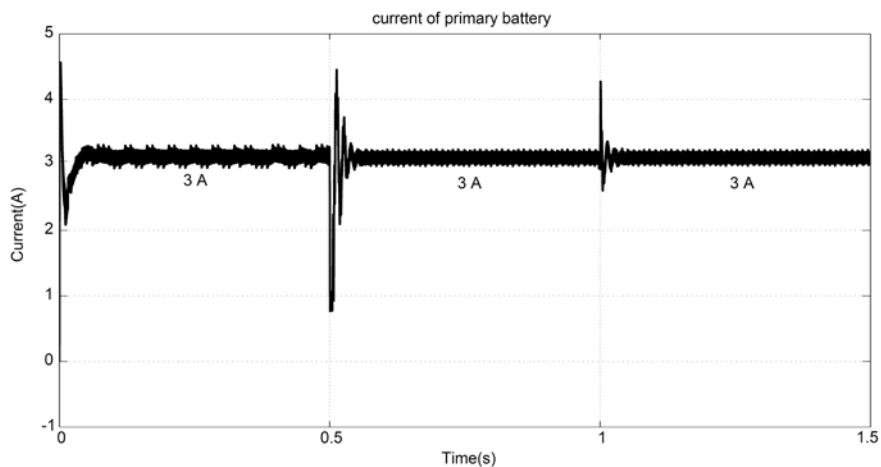
ซึ่งจากผลการจำลองในภาพประกอบ 3-46 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถปรับค่ารอบการทำงานของวงจรหมทคอนเวอร์เตอร์ ได้ตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ในตาราง 3-18 และ

ส่งผลให้ค่าแรงดันและค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลง ที่จะนำไปสู่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด และเมื่อทำการขยายดูค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดดังภาพประกอบ 3-47 จะเห็นได้ว่าระบบมีการปรับแรงดัน หรือก็คือการปรับค่ารอบการทำงานอยู่รอบๆจุดที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยเราสามารถบอกได้ว่าการควบคุมจะไม่สามารถที่จะปรับระบบให้ทำงานอยู่ที่จุดพลังงานไฟฟ้าสูงสุดได้ แต่จะทำงานอยู่รอบ ๆ จุดพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Oscillation at MPP)

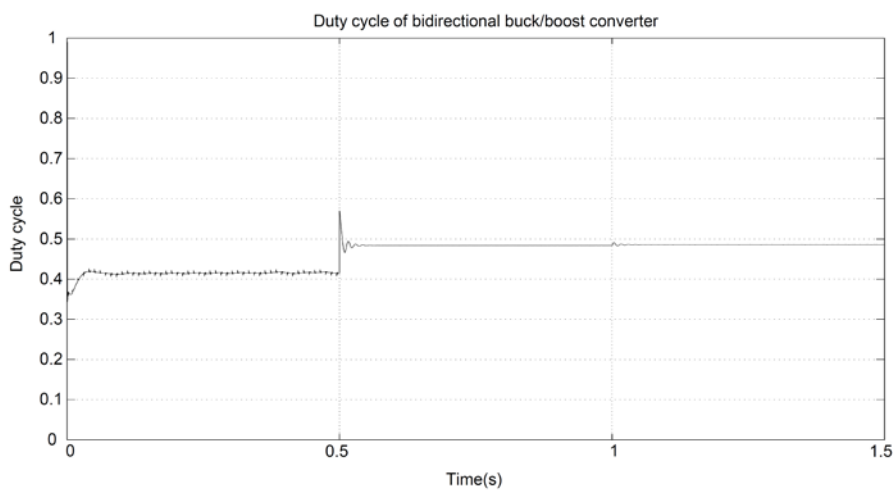
ในส่วนของ การควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ ได้ทำการจำลองในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ โดยจะทำการควบคุมในส่วนการคงค่ากระแสให้คงที่ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก ซึ่งจะทำการดูการปรับเปลี่ยนของค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ดังภาพประกอบ 3-48 เทียบกับค่ากระแสของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งนำภาพประกอบ 3-41 มาเขียนใหม่ได้ดังภาพประกอบ 3-49 ว่าระบบสามารถปรับค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) ให้สามารถควบคุมค่ากระแสในการประจุพลังงานให้มีค่าคงที่ได้ ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง ซึ่งทำให้พลังงาน, แรงดันและกระแส สำหรับใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรองมีค่าเปลี่ยนแปลง และจะทำการดูการปรับรอบการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางดังภาพประกอบ 3-50 เพื่อทำการดูค่ากระแสในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรองซึ่งนำภาพประกอบ 3-43 มาเขียนใหม่ได้ดังภาพประกอบ 3-51 และค่าแรงดันที่แบตเตอรี่ตัวสำรองซึ่งนำภาพประกอบ 3-43 มาเขียนใหม่ได้ดังภาพประกอบ 3-52 ว่าระบบควบคุมการจัดสรรพลังงานจะสามารถทำการจัดสรรพลังงานหรือค่ากระแสภายในระบบได้ และแรงดันของแบตเตอรี่ตัวสำรองอยู่ในระดับที่เหมาะสม



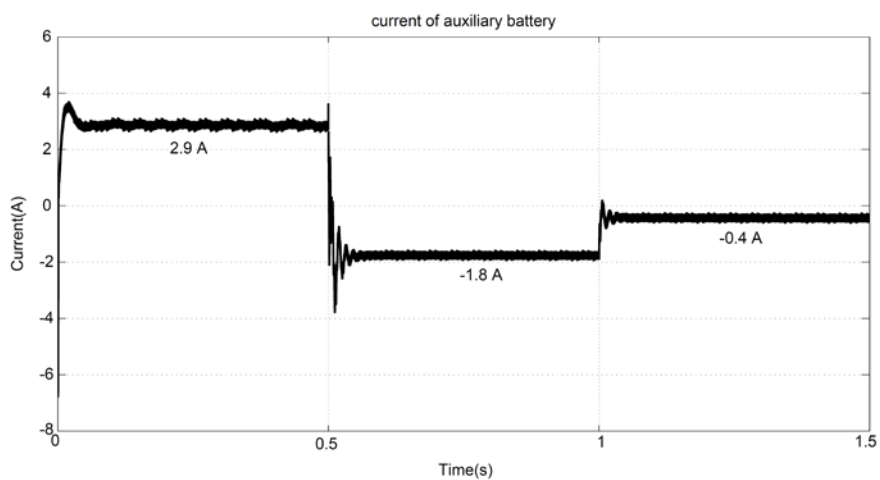
ภาพประกอบ 3-48 ค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์



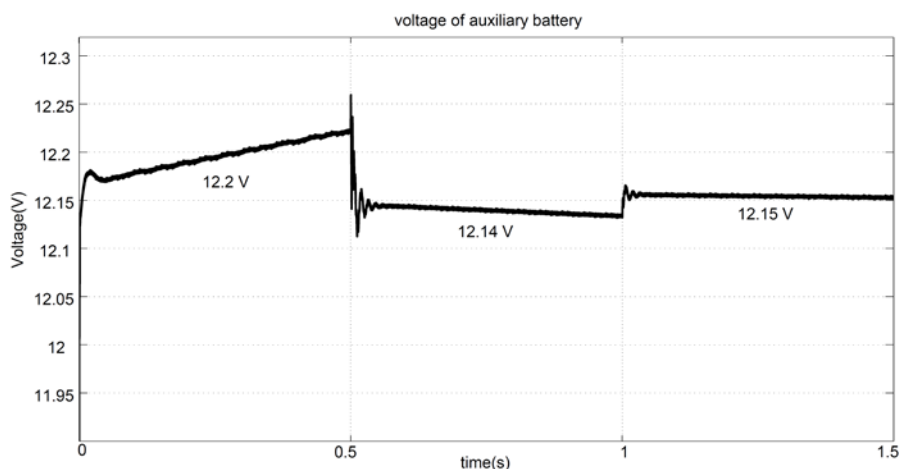
ภาพประกอบ 3-49 ค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก



ภาพประกอบ 3-50 ค่ารอบการทำงาน (Duty Cycle) ของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง



ภาพประกอบ 3-51 ค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง



ภาพประกอบ 3-52 ค่าแรงดันที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง

ซึ่งจากผลการจำลองในภาพประกอบ 3-48 และ ภาพประกอบ 3-49 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงให้ลดลง จะส่งผลให้กระแสที่ส่งให้ในการประจุพลังงานลดลง แต่ระบบควบคุมจะยังคงสามารถปรับรอบการทำงาน เพื่อให้ค่ากระแสในการประจุพลังงานมีค่าคงที่ หรือถ้าค่าความเข้มแสงมีการเปลี่ยนค่าให้มากขึ้น จะทำให้ค่าพลังงานหรือกระแสที่ส่งให้ในการประจุพลังงานมีค่ามากขึ้น ซึ่งระบบควบคุมขั้นตอนการประจุพลังงานก็ยังคงสามารถควบคุมให้ค่ากระแสมีค่าคงที่ได้เช่นกัน และค่าพลังงานหรือกระแสที่เหลือ ระบบควบคุมการจัดสรรพลังงานที่วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง ก็สามารถจัดสรรพลังงานหรือรับค่ากระแสที่เหลือจากการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักได้ โดยการปรับเปลี่ยนรอบการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางดังภาพประกอบ 3-50 ทำให้ค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวสำรองได้ดังภาพประกอบ 3-51 มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสหรือพลังงานที่ระบบควบคุมการจัดสรรได้ทำการควบคุม และระบบควบคุมการจัดสรรพลังงานยังสามารถควบคุมให้ค่าแรงดันในการประจุพลังงานดังภาพประกอบ 3-52 ไม่เกินค่าพิคคแรงดันสูงสุดที่แบตเตอรี่รับได้

3.8 การออกแบบการพันตัวเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบการพันตัวเหนี่ยวนำจะนำเสนอเฉพาะการออกแบบการพันตัวเหนี่ยวนำของวงจรบู้ทคอนเวอร์เตอร์ ส่วนการออกแบบการพันตัวเหนี่ยวนำของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง จะมีวิธีการออกแบบในการพันตัวเหนี่ยวนำจะมีการออกแบบในลักษณะเดียวกัน

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้การออกแบบวงจรมอเตอร์ จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำสำหรับการออกแบบ มีค่าประมาณ 500 μH ซึ่งจะทำให้การออกแบบเพื่อหาค่าต่าง ๆ ในการสร้างตัวเหนี่ยวนำ ดังนี้

3.8.1 คำนวณหาขนาดของแกน

จากสมการ
$$k_g \geq \frac{\rho L^2 I_{\max}^2}{B_{\max}^2 R K_u} \times 10^8 \quad (3-55)$$

โดยค่า K_g = ค่าคงที่ทางเรขาคณิตของแกน

$$\rho = 1.724 \times 10^{-6} \Omega - \text{cm}$$

R = ค่าความต้านทานของขดลวด

B_{\max} ของแกนเฟอร์ไรต์อยู่ในช่วง 0.3 - 0.5 T

ใช้วิธีพันด้วยมือ K_u จะมีค่าประมาณระหว่าง 0.55 - 0.7

กำหนดให้

$$K_u = 0.6$$

$$B_{\max} = 0.4 \text{ T}$$

จากตาราง 3-1 ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่า 10 A

จากตาราง 3-2 ได้กำหนดให้ค่า $\Delta I = 0.5 \text{ A}$

$$I_{\max} = I + \Delta I = 10 + 0.5 = 10.5 \text{ A}$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I^2 + \left(\frac{\Delta I/2}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{10^2 + \left(\frac{0.5/2}{\sqrt{3}}\right)^2} = 10.001$$

$$R = \frac{P_{\text{cu}}}{I_{\text{rms}}^2} = \frac{5\% P_{\text{in}}}{I_{\text{rms}}^2} = \frac{0.05 \times 120}{10.001} = 0.0599$$

จะได้

$$k_g \geq \frac{(1.724 \times 10^{-6}) \times (500 \times 10^{-6})^2 \times (10.5)^2}{(0.4)^2 \times (0.599) \times (0.6)} \times 10^8$$

$$k_g \geq 0.825 \text{ cm}^5$$

ทำการเลือกขนาดของแกนให้มากกว่าหรือเท่ากับค่าที่ทำการคำนวณได้จากสมการ ซึ่งชนิดของแกนที่เลือกจะเลือกแกนชนิด ETD เพราะเป็นแกนที่หาซื้อได้ง่าย โดยขนาดของแกนชนิด ETD ที่มีอยู่ในท้องตลาดจะมีขนาดดังตาราง 3-19

| Core type | Geometrical constant | Geometrical constant | Cross-sectional area | Bobbin winding area | Mean length per turn | Magnetic path length | Thermal resistance | Core weight |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|-------------|
| (A) (mm) | K_g (cm^5) | K_{gfe} (cm^x) | A_c (cm^2) | W_A (cm^2) | MLT (cm) | l_m (cm) | R_{th} ($^{\circ}C/W$) | (g) |
| ETD29 | 0.0978 | $8.5 \cdot 10^{-3}$ | 0.76 | 0.903 | 5.33 | 7.20 | | 30 |
| ETD34 | 0.193 | $13.1 \cdot 10^{-3}$ | 0.97 | 1.23 | 6.00 | 7.86 | 19 | 40 |
| ETD39 | 0.397 | $19.8 \cdot 10^{-3}$ | 1.25 | 1.74 | 6.86 | 9.21 | 15 | 60 |
| ETD44 | 0.846 | $30.4 \cdot 10^{-3}$ | 1.74 | 2.13 | 7.62 | 10.3 | 12 | 94 |
| ETC49 | 1.42 | $41.0 \cdot 10^{-3}$ | 2.11 | 2.71 | 8.51 | 11.4 | 11 | 124 |

ตาราง 3-19 ETD CORE DATA

จากตาราง 3-19 ขนาดของแกน เราทำการเลือกแกน ETD44 เพราะมีค่ามากกว่าค่าขนาดของแกนที่ได้จากการคำนวณ เพียงเล็กน้อย



ภาพประกอบ 3-53 แกน ETD44

3.8.2 คำนวณหาความยาวของช่องว่างอากาศ (air gap)

เลือกใช้ ETD44 $k_g = 0.846 \text{ cm}^5$, $A_c = 1.74 \text{ cm}^2$, $W_A = 2.13 \text{ cm}^2$

จากสมการ

$$l_g = \frac{\mu_0 L I_{\max}^2 \times 10^4}{B_{\max}^2 \times A_c} \quad (3-56)$$

จะได้

$$\begin{aligned} l_g &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \times (500 \times 10^{-6}) \times (10.5)^2 \times 10^4}{(0.4)^2 \times 1.74} \\ &= 0.00248 \text{ m} \end{aligned}$$

3.8.3 คำนวณจำนวนรอบในการพันตัวเหนี่ยวนำ

จากสมการ

$$n = \frac{LI_{\max} \times 10^4}{B_{\max} A_c} \quad (3-57)$$

จะได้

$$\begin{aligned} n &= \frac{(500 \times 10^{-6}) \times (10.5)^2 \times 10^4}{(0.4)^2 \times 1.74} \\ &= 75 \end{aligned}$$

3.8.4 คำนวณขนาดของขดลวด

จากสมการ

$$A_w \leq \frac{k_u W_A}{n} \quad (3-58)$$

จะได้

$$\begin{aligned} A_w &\leq \frac{(0.6) \times 2.13}{75} \\ A_w &\leq 0.0169 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

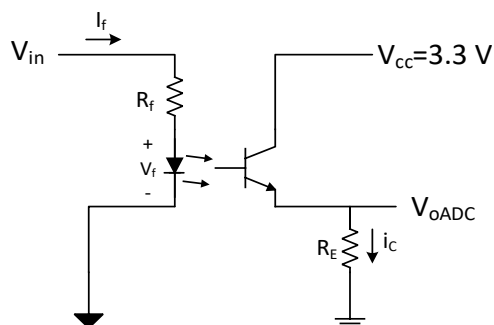
เลือกขดลวดตามมาตรฐาน S.W.G.

โดยเราจะนำเอาขดลวด S.W.G. #22 ($A_w = 0.41 \text{ mm}^2$) มาตีเกลียวรวมกันทั้งหมด 4 เส้น ซึ่งจะได้ค่า $A_w = 1.64 \text{ mm}^2$ ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการ การที่เราได้นำขดลวดมาตีเกลียวแทนที่จะเลือกขดลวดเบอร์ใหญ่มาใช้งาน เพราะเนื่องจากการใช้ขดลวดเบอร์เล็กมาตีเกลียวสามารถลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในขดลวดได้ เช่น การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy current loss) และเป็นขดลวดเบอร์เล็กยังเป็นขดลวดที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด

3.9 การออกแบบวงจรตรวจวัดแรงดัน และวงจรตรวจวัดกระแส

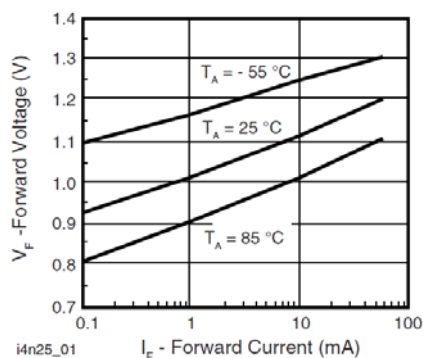
ในการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด, การประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ หรือการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เราจำเป็นจะต้องมีข้อมูลของแรงดันและกระแสเพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด หรือนำค่าข้อมูลแรงดันและกระแสไปทำการควบคุมการป้อนกลับ (Close loop feedback) ให้แรงดันมีค่าคงที่ (Voltage regulator) หรือกระแสมีค่าคงที่ (Current regulator) เพื่อนำไปคำนวณหาค่ารอบการทำงานให้กับโปรแกรมในการควบคุม หรือนำค่าข้อมูลแรงดันและกระแสมากำหนดค่าพิคคสูงสุดในการทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีวงจรในการตรวจวัดค่าแรงดันและกระแสเพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการคำนวณ

3.9.1 การออกแบบตัวตรวจวัดแรงดัน

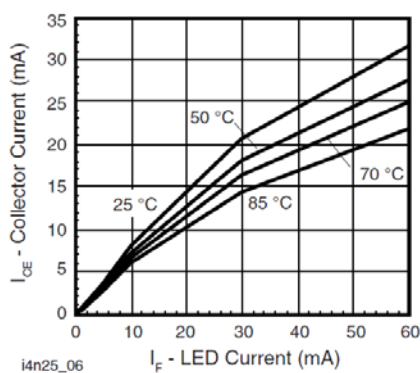


ภาพประกอบ 3-54 วงจรตรวจวัดแรงดัน

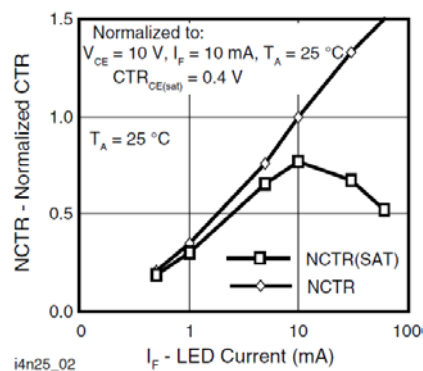
จากภาพประกอบ 3-54 แสดงวงจรตรวจวัดแรงดัน โดยค่าแรงดัน จะถูกตรวจวัดและส่งไปยังขาอินพุตของไอซีเบอร์ 4N26 ซึ่งเป็นวงจร Opto isolator หรือก็คือวงจรแยกกราวเพื่อเป็นการป้องกันกระแสที่อาจไหลในกราวเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยไอซี 4N26 เป็นวงจร Opto isolator ที่ใช้ความสว่างของ LED เป็นตัวไบแอสขาเบสให้กับโฟโตทรานซิสเตอร์ภายในไอซี ซึ่งเราสามารถกำหนดกระแสของขาเบส (I_B) ที่มาจากความสว่างของ LED ที่ถูกกำหนดโดยแรงดันที่ตกคร่อม LED (V_f) และค่ากระแสไบแอสของ LED (I_f) ตามภาพประกอบ 3-55 ที่ได้ได้จาก Datasheet โดยการออกแบบค่าตัวต้านทาน (R_f) ด้าน LED เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ที่เป็นตัวรับแสงที่ขาเบสทำงานในช่วงทำงาน (Active Region) ซึ่งทำให้ค่าของกระแสคอนเลคเตอร์ (I_C) เปลี่ยนตามค่ากระแสเบส (I_B) หรือเปลี่ยนตามค่ากระแสไบแอสของ LED (I_f) ตามภาพประกอบ 3-56 ที่ได้ได้จาก Datasheet และทำให้กระแสคอนเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (I_{CE}) ที่ไหลผ่านตัวตัวต้านทาน (R_E) หรือค่าแรงดัน (V_{oADC}) ที่เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าแรงดันที่เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีค่าสูงสุดคือ 3.3 V ตามค่าแหล่งจ่ายที่จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์ ซึ่งถือเป็นการป้องกันไม่ให้ขา ADC (Analog to Digital Converter) เกิดความเสียหายด้วย โดยที่ขา (V_{oADC}) ที่เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีการนำค่าปาสิตเตอร์มาต่อคร่อมเพื่อเป็นการกรองความถี่สูงออกและทำให้แรงดันที่ ADC อ่านมีค่าเรียบและไม่ผิดเพี้ยน



ภาพประกอบ 3-55 Forward Voltage vs. Forward Current



ภาพประกอบ 3-56 Collector Emitter Current vs. Temperature and LED Current



ภาพประกอบ 3-57 Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current

(1) การคำนวณหาค่า R_f

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อม LED (V_f) และค่ากระแสไบแอสของ LED (I_f) ตามภาพประกอบ 3-55 ที่ได้ได้จาก Datasheet เราสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

- ทำการหาค่าความชันของกราฟ

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{1.1 - 1}{(8 \times 10^{-3}) - (0.8 \times 10^{-3})} = 11.363 \quad (3-59)$$

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อม LED (V_f) และค่ากระแสไบแอสของ LED (I_f) ดังนี้

$$V_f = 11.363I_f + 0.99 \quad (3-60)$$

ถ้าทำการพิจารณาในส่วนด้วยอินพุต หรือฝั่งที่เป็นด้าน LED จะได้

$$V_{in} = I_f R_f + V_f \quad (3-61)$$

นำสมการ (3-60) มาแทนในสมการ (3-61) จะได้

$$V_{in} = I_f R_f + 11.363I_f + 0.99 \quad (3-62)$$

ถ้าต้องการให้ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงทำงาน (Active Region) ถ้าดูจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Saturated CTR และค่ากระแสไบแอสของ LED ตามภาพประกอบ 3-57 ที่ได้จาก datasheet ค่า $I_f < 10mA$ ที่ $V_{CE} = 10V$ และ $T = 25^\circ C$ แต่ถ้าค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายมาสูงสุดที่ 3.3 V ค่า $I_f < 3.3mA$ เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ยังคงทำงานอยู่ในช่วงทำงาน (Active Region) ซึ่งเพื่อความมั่นใจได้เลือกให้ค่ากระแสไบแอส LED มีค่าสูงสุดเท่ากับ 3 mA ($I_f = 3mA$) จากสมการ (3-61) ถ้าสมมติให้แรงดันอินพุต (V_{in}) ที่ตรวจวัดนี้สามารถวัดได้มีค่าแรงดันสูงสุดที่ 30 V เราจะสามารถหาค่าความต้านทาน R_f ได้ดังนี้

$$30 = (3 \times 10^{-3})R_f + 11.363 \times (3 \times 10^{-3}) + 0.99 \quad (3-63)$$

จะได้

$$R_f = 9.6 \times 10^3 \Omega \quad (3-64)$$

ซึ่งได้เลือกใช้ $R_f = 10k\Omega$ ที่สามารถหาซื้อได้ง่าย โดยเราสามารถเลือกค่า R_f ให้มีค่ามากกว่าที่คำนวณได้ เพราะถ้าเราทำการเลือกค่า R_f น้อยกว่าที่ทำการคำนวณจะทำให้ค่า I_f มีค่าสูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้ทรานซิสเตอร์เปลี่ยนช่วงการทำงานเป็นช่วงอิ่มตัว (Saturation Region) และทำให้ค่า V_f

มีค่าคงที่และส่งผลให้ V_{oADC} จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของ V_{in} ซึ่งถ้าเราทำการเลือกใช้ $R_f = 10k\Omega$ จะสามารถคำนวณค่า I_f ใหม่ได้ดังนี้

$$V_{in} = I_f R_f + 11.363 I_f + 0.99$$

$$30 = I_f (10 \times 10^3) + 11.363 I_f + 0.99 \quad (3-65)$$

$$I_f = 2.897 \times 10^{-3} \text{ A}$$

(2) การคำนวณหาค่า R_E

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอนเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (I_{CE}) และค่ากระแสไบแอสของ LED (I_f) ตามภาพประกอบ 3-56 ที่ได้ได้จาก Datasheet เราสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

- ทำการหาค่าความชันของกราฟ

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{(8.5 \times 10^{-3}) - 0}{(10 \times 10^{-3}) - 0} = 0.85 \quad (3-66)$$

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอนเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (I_{CE}) และค่ากระแสไบแอสของ LED (I_f) ดังนี้

$$I_{CE} = 0.85 I_f \quad (3-67)$$

ถ้าทำการพิจารณาในส่วนด้วยเอาท์พุต หรือฝั่งที่เป็นด้านทรานซิสเตอร์ จะได้

$$V_{oADC} = I_{CE} R_E \quad (3-68)$$

นำสมการ (3-67) มาแทนในสมการ (3-68) จะได้

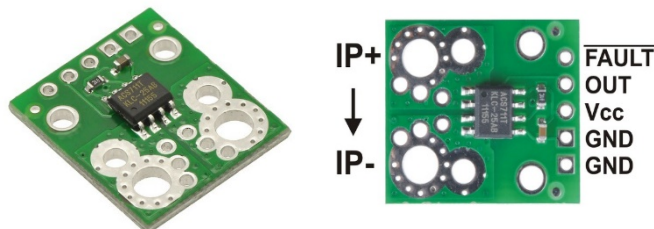
$$V_{oADC} = 0.85 I_f R_E \quad (3-69)$$

เมื่อกำหนดให้ V_{oADC} สูงสุดที่สามารถวัดได้คือ 3 V ที่ V_{in} 30 V จะสามารถหาค่า R_E ได้ดังนี้

$$3 = 0.85 (2.897 \times 10^{-3}) R_E \quad (3-70)$$

$$R_E = 1.2 \times 10^3 \Omega$$

3.9.2 การออกแบบตัวตรวจวัดกระแส



ภาพประกอบ 3-58 เซนเซอร์ตรวจวัดกระแส

จากภาพประกอบ 3-58 คือเซนเซอร์ตรวจวัดกระแสที่ใช้ IC เบอร์ ACS711 เป็น IC ที่ใช้ในการตรวจวัดกระแส เราได้ทำการเลือกใช้ IC นี้ เพราะ IC สามารถวัดได้ทั้งไฟกระแสตรงและไฟกระแสสลับ สามารถวัดกระแสที่ไหลได้ 2 ทิศทาง ทั้งค่าบวกและค่าลบ ที่มีขนาด 12.5 A ($\pm 12.5A$) และเป็น IC ที่หาซื้อง่ายและมีราคาพอประมาณ โดยภายในวงจรของเซนเซอร์ตรวจวัดกระแสที่ใช้ IC เบอร์ ACS711 มีการทำงานคือจะให้กระแสผ่านขาคินพุตแล้วทำการวัดค่ากระแสโดยใช้หลักการของ Hall Effect ซึ่งจะทำให้การแปลงค่ากระแสเป็นค่าแรงดันเอาท์พุตของเซนเซอร์ โดยสามารถเลือกกระแสแรงดันได้ 2 ระดับคือ 3.3 V และ 5 V ขึ้นอยู่กับไฟเลี้ยงที่ใช้ โดยมีอัตราการถ่ายโอนอยู่ที่ 110 mV/A ที่ไฟเลี้ยง 3.3 V และ 167mV/A ที่ไฟเลี้ยง 5V

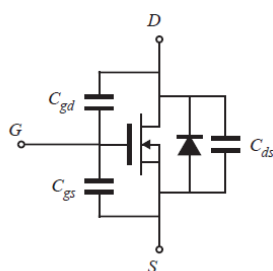
3.10 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง (Dead Time) และวงจรขับมอเตอร์

การทำงานของมอเตอร์จะได้รับสัญญาณ PWM มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยค่าความถี่ของสัญญาณ PWM เท่ากับ 50 kHz และมีค่าแรงดัน 3.3 V ซึ่งเราจำเป็นต้องทำการยกระดับสัญญาณให้มีค่าแรงดันที่สูงขึ้นเป็น 12 V โดยผ่านไอซีเบอร์ 6N137

จากการศึกษาการทำงานหลักการทำงานของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ และวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ เราได้มีงานนำเอาวงจรซิงโครนัสบั๊กคอนเวอร์เตอร์ และวงจรซิงโครนัสบูทคอนเวอร์เตอร์ มาใช้งานแทนวงจรเดิม เนื่องจากสามารถช่วยลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวไดโอด และส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรสูงขึ้น แต่ข้อเสียของวงจรซิงโครนัสบั๊กคอนเวอร์เตอร์ และวงจรซิงโครนัสบูทคอนเวอร์เตอร์ก็คือ เราจะเป็นจำเป็นต้องใช้สัญญาณ PWM 2 สัญญาณในการควบคุมมอเตอร์ทั้งสองตัวในวงจร และสัญญาณทั้งสองจะต้องทำงานกลับเฟสกัน และต้องมีช่วงเวลาที่ไม่ทำงานทั้งคู่ หรือช่วงเวลาไร้ผลตอบสนอง (Dead Time) อีกด้วย ซึ่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวอาจสัญญาณ PWM ได้ไม่เพียงพอกับทุกวงจรที่จะต้องทำการควบคุม

ดังนั้น เราจะทำการนำสัญญาณ PWM 1 สัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์มาผ่านวงจรสร้างสัญญาณ PWM เพื่อทำให้เกิดเป็น 2 สัญญาณที่กลับเฟสกันและมีช่วงเวลาไรผลตอบสนอง

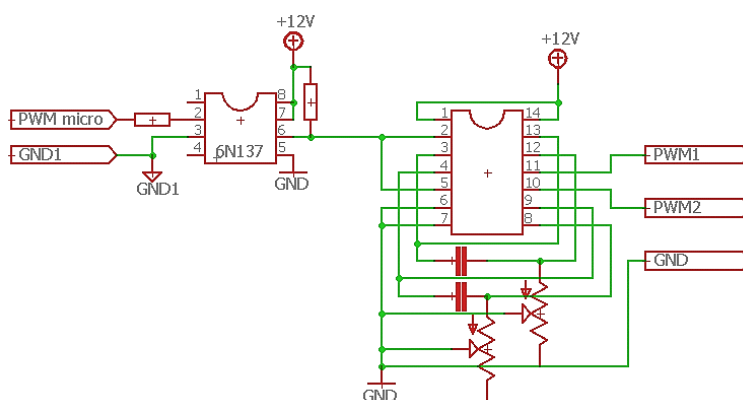
เมื่อได้สัญญาณ PWM ทั้ง 2 สัญญาณจากวงจรสร้างสัญญาณ PWM แล้ว เราจะเห็นได้ว่าวงจรที่ได้ทำการออกแบบทั้งวงจรซิงโครนัสบีกคอนเวอร์เตอร์, วงจรซิงโครนัสบูทคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง การต่อมอสเฟสทั้ง 2 ตัวของทั้ง 3 วงจร จะมีมอสเฟสตัวหนึ่งที่ขาซอร์ส (S) ต่ออยู่กับกราว (Common ground) และอีกตัวหนึ่งขาซอร์ส (S) ของมอสเฟสไม่ได้ต่อถึงกราว (Floating ground) ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำสัญญาณที่สร้างมาขั้มมอสเฟสได้โดยตรง อีกทั้งสัญญาณ PWM ทั้ง 2 สัญญาณที่ได้จากวงจรสร้างสัญญาณ PWM จะยังไม่สามารถนำไปใช้ควบคุมมอสเฟสได้เนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของมอสเฟส ซึ่งที่ระหว่างขาของมอสเฟสจะมีคุณลักษณะเป็นตัวเก็บประจุ (Parasitic capacitances) ดังแสดงในภาพประกอบ 3-59



ภาพประกอบ 3-59 วงจรสมมูลอย่างง่ายของมอสเฟต

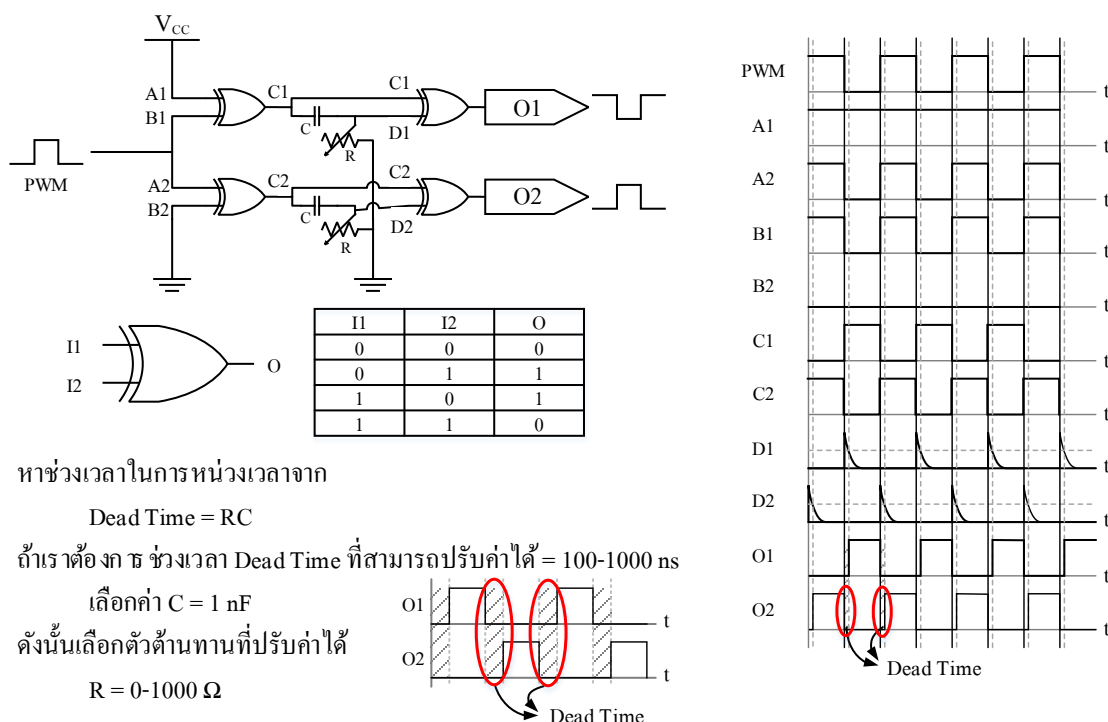
ดังนั้นจึงจะเป็นจะต้องมีการเพิ่มกระแสให้กับสัญญาณ เพื่อให้ผลตอบสนองของสัญญาณสามารถเปลี่ยนระดับได้อย่างทันทีทัน โดยใช่วงจรขั้มมอสเฟต

3.10.1 วงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาไรผลตอบสนอง (Dead Time)



ภาพประกอบ 3-60 การต่อไอซีเบอร์ CD4070 ในการสร้างสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาไรผลตอบสนอง (Dead Time)

ภาพประกอบ 3-60 คือวงจรที่นำสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผ่านไอซีเบอร์ 6N137 ที่ทำการแยกกราวระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับส่วนของวงจรกำลังเพื่อเป็นการป้องกันกระแสที่อาจไหลในกราว เมื่อได้สัญญาณ PWM 1 สัญญาณ มาผ่านไอซีเบอร์ CD4070 เพื่อทำการเอ็กซ์คลูซีฟออร์ (Exclusive OR) และมีการเพิ่มตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เพื่อเป็นการหน่วงเวลาให้มีช่วงเวลาที่ไร้ผลตอบสนอง โดยมีลักษณะการทำงาน, สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านไอซีเบอร์ CD4070 ดังภาพประกอบ 3-61



หาช่วงเวลาในการหน่วงเวลาจาก

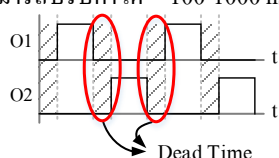
$$\text{Dead Time} = RC$$

ถ้าเราต้องการ ช่วงเวลา Dead Time ที่สามารถปรับค่าได้ = 100-1000 ns

$$\text{เลือกค่า } C = 1 \text{ nF}$$

ดังนั้นเลือกตัวต้านทานที่ปรับค่าได้

$$R = 0-1000 \text{ } \Omega$$

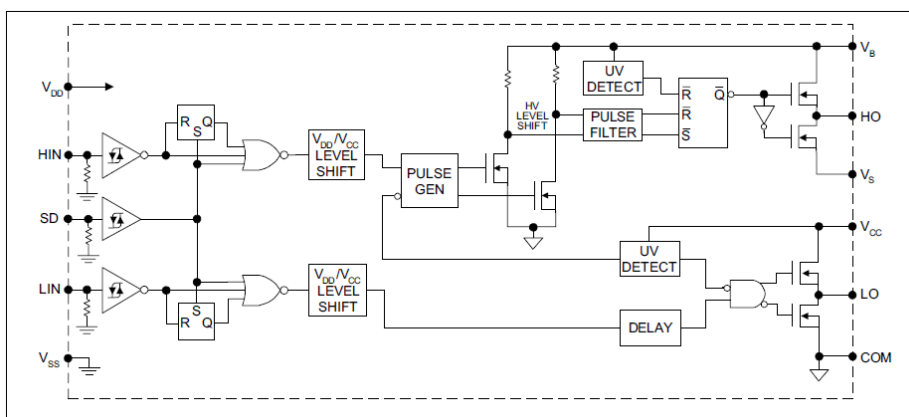


ภาพประกอบ 3-61 หลักการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาที่ไร้ผลตอบสนอง (Dead Time)

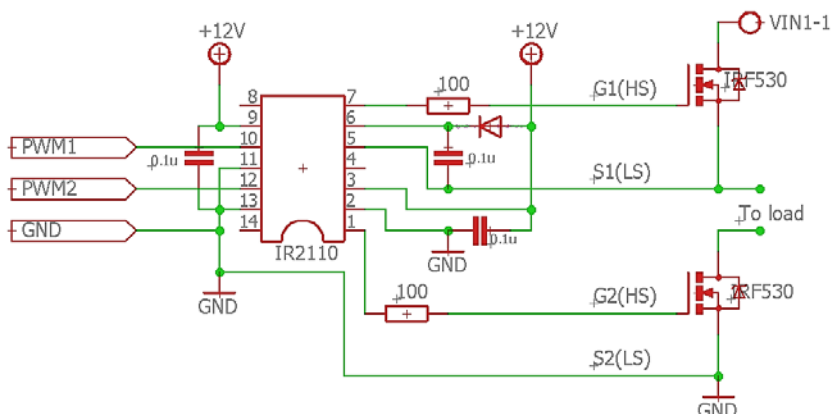
โดยจากภาพประกอบ 3-61 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีสัญญาณ PWM ที่มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงสัญญาณเดียว วงจรนี้สามารถสร้างสัญญาณ PWM ออกมาได้ 2 สัญญาณ โดยจะมีหนึ่งสัญญาณที่จะมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณของ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ และอีกหนึ่งสัญญาณจะมีลักษณะที่กลับเฟสกัน ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะเกิดช่วงเวลาที่ไม่มีทำงานทั้งคู่คือ ช่วงเวลาที่ไร้ผลตอบสนอง (Dead Time) ที่เป็นส่วนสำคัญในการควบคุมการทำงานของวงจรชิปไมโครคอนโทรลเลอร์

3.10.2 วงจรขับมอสเฟต

การขับมอสเฟตที่มอสเฟตตัวหนึ่งที่ขาซอร์ส (S) ต่ออยู่กับกราว (Common ground) และอีกตัวหนึ่งขาซอร์ส (S) ของมอสเฟตไม่ได้ต่อถึงกราว (Floating ground) ให้สามารถทำงานได้ และมีค่ากระแสเพียงพอกที่ให้อำนาจทำให้ผลตอบสนองของสัญญาณเปลี่ยนได้อย่างทันทีทันใด ได้ เลือกลงใช้ไอซีเบอร์ IR2110 ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้สำหรับในการขับมอสเฟตโดยเฉพาะ และยังสามรถขับมอสเฟต 2 ตัว ทั้งมอสเฟตขาซอร์ส (S) ต่ออยู่กับกราวโดยใช้ตัวขับที่เป็น Low side และมอสเฟตที่ขาซอร์ส (S) ไม่ได้ต่อถึงกราว โดยใช้ตัวขับที่เป็นฝั่ง High side การทำงานของทั้งฝั่ง Low side และ High side ของไอซีเบอร์นี้จะเป็นการทำงานแยกกัน ทำให้เราสามารถกำหนดช่วงเวลาไว้ผลตอบสนองได้ (Dead Time) ซึ่งวงจรภายใน IC เบอร์ IR2110 จะมีดังภาพประกอบ 3-62 และสามารถต่อวงจรกับไอซีเบอร์ IR2110 กับมอสเฟตได้ดังภาพประกอบ 3-63



ภาพประกอบ 3-62 Function at IR2110 block diagram



ภาพประกอบ 3-63 วงจรขับมอสเฟตที่ใช้ IC เบอร์ IR 2110

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้นำเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ โดยเริ่มจากการทดสอบการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ทั้งหมดในระบบ โดยเป็นการทดสอบทีละส่วน การทดลองและการวิเคราะห์ผลของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์, วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง เมื่อทำการทดสอบแยกการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์ทีละส่วนแล้ว ส่วนต่อมาจะทำการทดสอบการควบคุมการทำงานของแต่ละวงจร ซึ่งได้แก่ การควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักอย่างรวดเร็วซึ่งจะเป็นการควบคุมผ่านวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์, การควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และสุดท้ายจะเป็นการทดสอบรวมทั้งระบบ โดยการควบคุมการจัดสรรพลังงานให้ได้ตามโหมดการทำงาน โดยทำการควบคุมผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง ซึ่งในการทดสอบสุดท้ายนี้จะเป็นการรวมของทั้งระบบ เพื่อดูการทำงานในแต่ละโหมดของระบบ โดยในบทนี้จะมีการนำเสนอรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังนี้

- (1) ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์, วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง
- (2) ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการควบคุมการป้อนกลับ (Feedback Control) ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ (Voltage regulate) และกระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ (Current regulate) เพื่อทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักอย่างรวดเร็ว (Quick battery changing)
- (3) ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ (MPPT)
- (4) ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทำงานเบื้องต้นของระบบฯ ที่มีการจัดสรรพลังงาน
- (5) ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบฯ เมื่อมีต่อโหลดภายนอกเพิ่มเติม เพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งานจริง

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์, วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และ วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง

4.1.1 ผลการทดสอบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

จากการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ นำเสนอในบทที่ 3 โดยมีข้อกำหนดและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตาราง 4-1 ถึงตาราง 4-3

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|--------------------------|----------------|
| แรงดันด้านเข้า (V_g) | 30 V |
| แรงดันด้านออก (V) | 13.8 V |
| กระแสออก (I) | 6 A |
| กำลังออก (P_{out}) | 80 W |

ตาราง 4-1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

โดยกำหนดให้

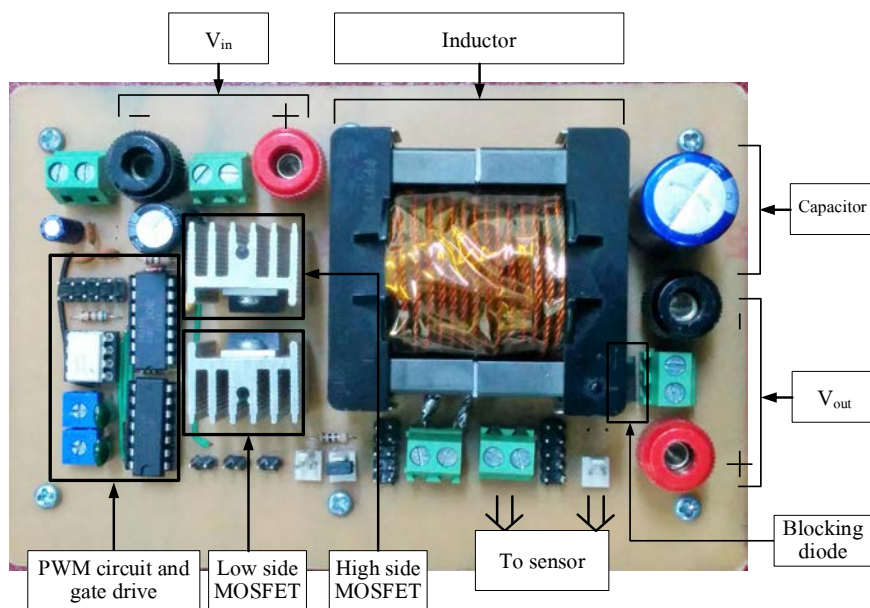
| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|-----------------------------|---|
| ความถี่การสวิตช์ (f_s) | 50 kHz |
| กระแสระลอก (ΔI_L) | $10\% = \frac{10}{100} \times 6 = 0.6 \text{ A}$ |
| แรงดันระลอก (ΔV) | $1\% = \frac{1}{100} \times 13.8 = 0.138 \text{ V}$ |

ตาราง 4-2 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

สามารถออกแบบได้

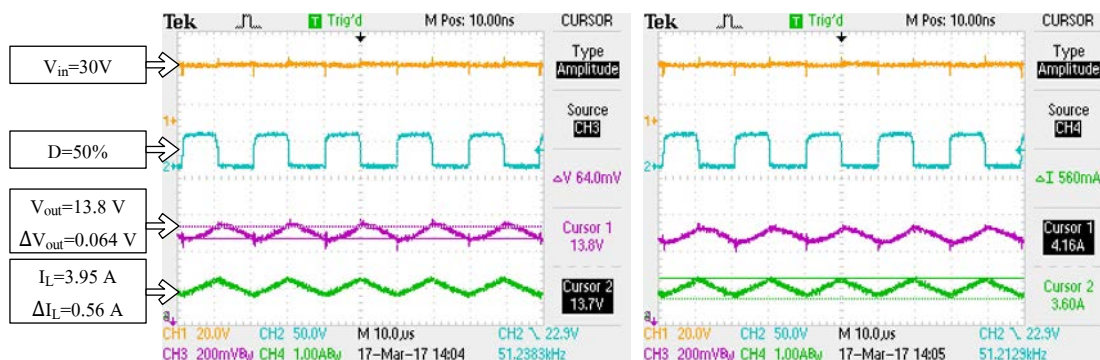
| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|------------------|-------------------|
| ตัวเหนี่ยวนำ (L) | 500 μH |
| ตัวเก็บประจุ (C) | 100 μF |

ตาราง 4-3 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 4-1 วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพประกอบ 4-1 แสดงวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบการทำงาน เพื่อดูลักษณะของสัญญาณที่ออกมาว่าเป็นไปตามที่ทำการออกแบบหรือไม่และเพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของวงจร ว่ามีประสิทธิภาพการทำงานดีหรือไม่ โดยผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 4-2



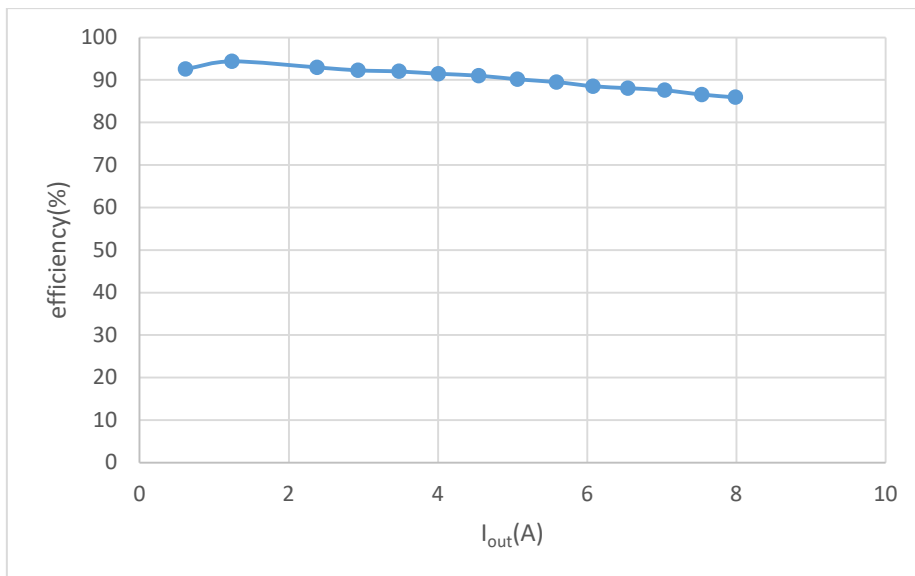
ภาพประกอบ 4-2 ผลการทดลองของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดลองในภาพประกอบ 4-2 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นของกระแสและแรงดันจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับทฤษฎี และค่ากระแสระลอก (ΔI_L) จะมีค่าเท่ากับ 0.56 A ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้ทำการออกแบบไว้ และแรงดันระลอก (ΔV_o) จะมีค่าเท่ากับ 0.064 V ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ เพราะเนื่องจากเราได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่ามากกว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ซึ่งเป็นผลดีต่อวงจร

ในส่วนต่อมาเป็นการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ โดยจะทำการคงค่าแรงดันอินพุตที่ 30 V, รอบการทำงาน (Duty cycle) ที่ 50% และจะทำการปรับค่ากระแสโหลดจาก 0-8 A ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงในตาราง 4-4

| V_{in} (V) | I_{in} (A) | P_{in} (W) | V_{out} (V) | I_{out} (A) | P_{out} (W) | P_{loss} (W) | efficiency(%) |
|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 30.00 | 0.02 | 0.50 | 14.82 | 0.00 | 0.00 | 0.50 | 0.00 |
| 29.96 | 0.33 | 9.74 | 14.54 | 0.62 | 9.01 | 0.72 | 92.58 |
| 29.93 | 0.63 | 18.86 | 14.35 | 1.24 | 17.79 | 1.06 | 94.37 |
| 29.90 | 1.21 | 36.18 | 14.13 | 2.38 | 33.63 | 2.55 | 92.95 |
| 29.87 | 1.48 | 44.21 | 13.92 | 2.93 | 40.79 | 3.42 | 92.26 |
| 29.85 | 1.75 | 52.24 | 13.81 | 3.48 | 48.06 | 4.18 | 92.00 |
| 29.82 | 2.01 | 59.94 | 13.67 | 4.01 | 54.82 | 5.12 | 91.46 |
| 29.80 | 2.28 | 67.94 | 13.59 | 4.55 | 61.83 | 6.11 | 91.01 |
| 29.76 | 2.54 | 75.59 | 13.44 | 5.07 | 68.14 | 7.45 | 90.14 |
| 29.74 | 2.81 | 83.57 | 13.38 | 5.59 | 74.79 | 8.78 | 89.50 |
| 29.71 | 3.07 | 91.21 | 13.28 | 6.08 | 80.74 | 10.47 | 88.52 |
| 29.66 | 3.30 | 97.88 | 13.16 | 6.55 | 86.20 | 11.68 | 88.07 |
| 29.66 | 3.54 | 105.00 | 13.06 | 7.04 | 91.94 | 13.05 | 87.57 |
| 29.63 | 3.81 | 112.89 | 12.96 | 7.54 | 97.72 | 15.17 | 86.56 |
| 29.58 | 4.05 | 119.80 | 12.88 | 7.99 | 102.91 | 16.89 | 85.90 |

ตาราง 4-4 ผลการทดลองและผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

จากกราฟประสิทธิภาพกับกระแสอินพุตในภาพประกอบ 4-3 ค่าประสิทธิภาพต่ำสุดเท่ากับ 85.9 % ที่กระแสโหลด 8 A และค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 94.37% เมื่อค่ากระแสเอาต์พุตอยู่ที่ 1.24 A และสามารถหาค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 90.21%

4.1.2 ผลการทดสอบวงจร buck converter

จากการออกแบบค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 โดยมีข้อกำหนดและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตาราง 4-5 ถึง ตาราง 4-7

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|----------------------------|----------------|
| แรงดันด้านเข้า (V_g) | 17.2 V |
| กระแสด้านเข้า (I_{in}) | 5 A |
| กำลังด้านเข้า (P_{in}) | 80 W |
| แรงดันด้านออก (V) | 20-60 V |

ตาราง 4-5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจร buck converter

โดยกำหนดให้

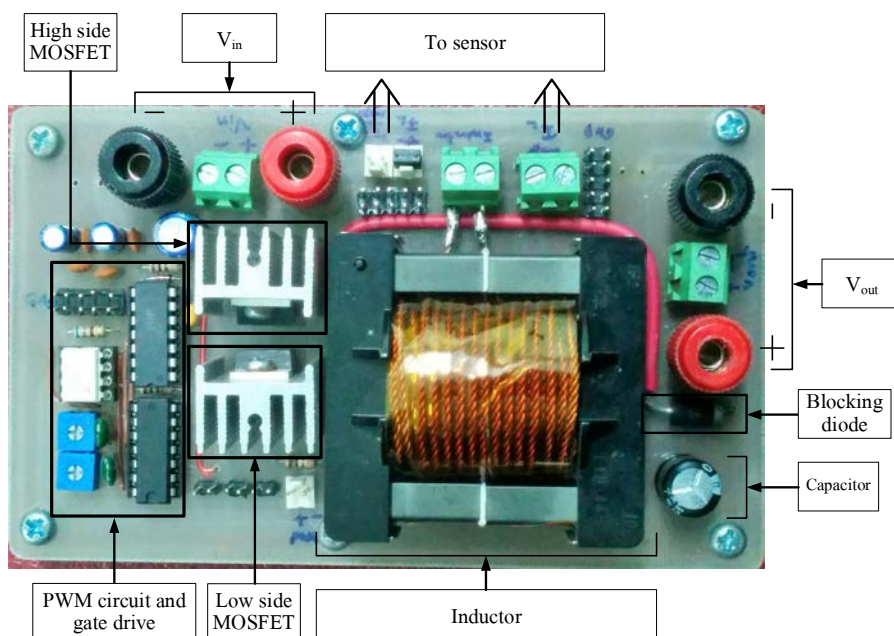
| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|-----------------------------|--|
| ความถี่การสวิตช์ (f_s) | 50 kHz |
| กระแสระลอก (ΔI_L) | $10\% = \frac{10}{100} \times 5 = 0.5 \text{ A}$ |
| แรงดันระลอก (ΔV) | $1\% = \frac{1}{100} \times 30 = 0.3 \text{ V}$ |

ตาราง 4-6 ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจร buck converter

สามารถออกแบบได้

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|----------------------|-------------------|
| ตัวเหนี่ยวนำ (L) | 500 μH |
| ตัวเก็บประจุ (C) | 200 μF |

ตาราง 4-7 ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจร buck converter

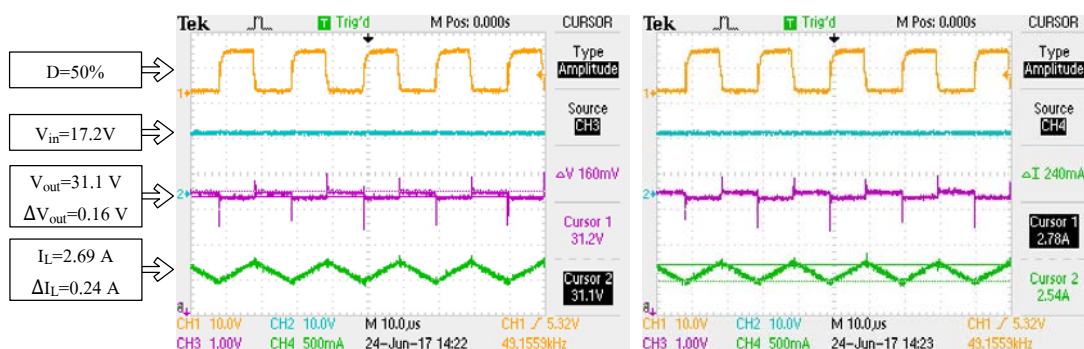


ภาพประกอบ 4-4 วงจร buck converter ที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพประกอบ 4-4 แสดงวงจร buck converter ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งการทดลองจะมีลักษณะเดียวกับวงจร buck converter คือ ทดลองการทำงานเพื่อคุณลักษณะของสัญญาณให้เป็นไปตามที่

การออกแบบจากทฤษฎี และการทดลองวงจรเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการทำงานของวงจรบวทคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งได้รูปคลื่นผลการทดลองแสดงดัง

ภาพประกอบ 4-5



ภาพประกอบ 4-5 ผลการทดลองของวงจรบวทคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดลอง

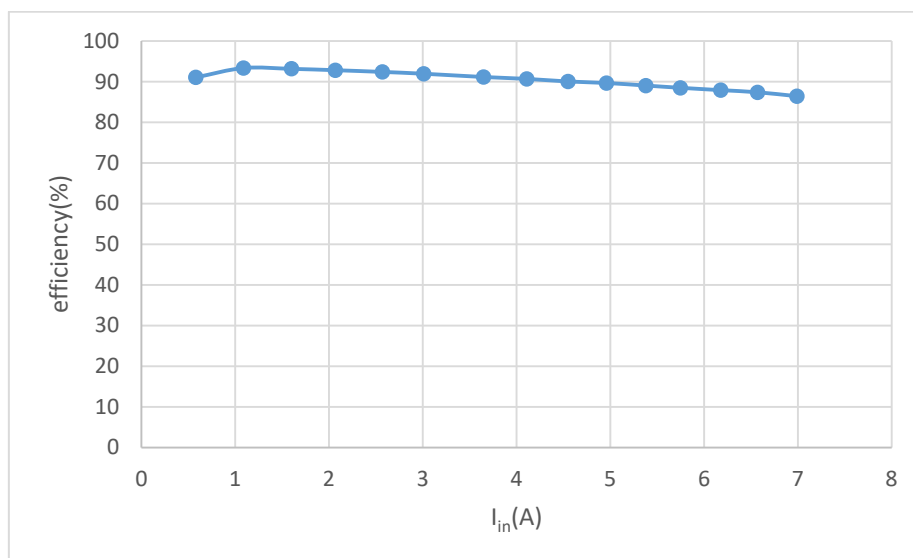
ภาพประกอบ 4-5 จะเห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณจะมีลักษณะเป็นไปตามทฤษฎี แต่จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ จากผลการทดลองจะได้ค่ากระแสระลอก (ΔI_L) จะมีค่าเท่ากับ 0.24 A ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ และแรงดันระลอก (ΔV_o) จะมีค่าเท่ากับ 0.16 V ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ เนื่องจากเราได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่ามากกว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้

ต่อมาเป็นการทดลองวงจรบวทคอนเวอร์เตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรโดยจะทำการคงค่าแรงดันอินพุตที่ 17.2 V, รอบการทำงาน (Duty cycle) ที่ 50% และจะทำการปรับค่ากระแสโหลดตั้งแต่ 0-3.5 A ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงในตาราง 4-8

กราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพของวงจรกับกระแสอินพุตแสดงดังภาพประกอบ 4-6 ซึ่งเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของวงจรบวทคอนเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 90.34%

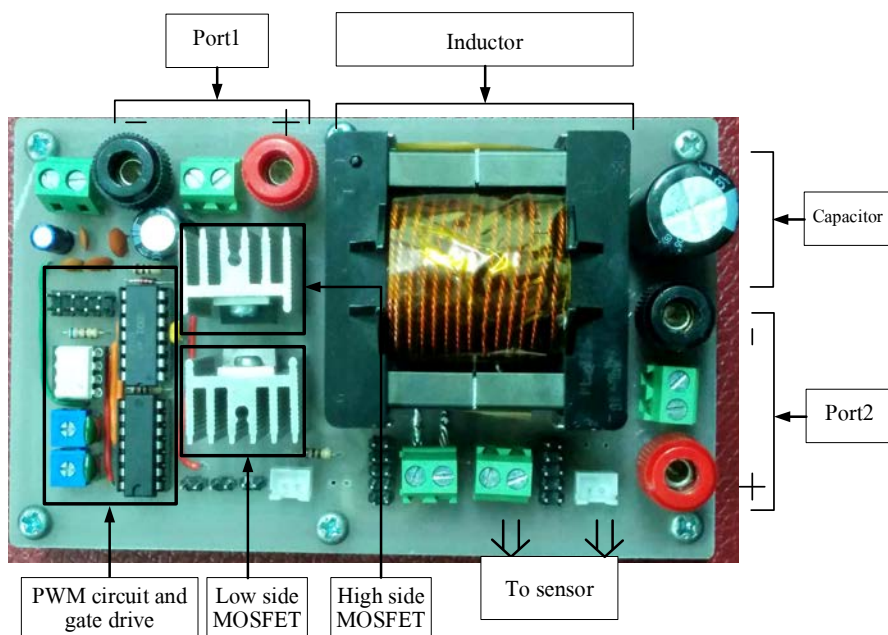
| $V_{in}(V)$ | $I_{in}(A)$ | $P_{in}(W)$ | $V_{out}(V)$ | $I_{out}(A)$ | $P_{out}(W)$ | $P_{loss}(W)$ | efficiency(%) |
|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| 17.20 | 0.58 | 9.96 | 33.45 | 0.27 | 9.06 | 0.89 | 91.02 |
| 17.20 | 1.09 | 18.75 | 33.08 | 0.53 | 17.50 | 1.25 | 93.34 |
| 17.20 | 1.60 | 27.52 | 32.73 | 0.78 | 25.63 | 1.89 | 93.12 |
| 17.20 | 2.07 | 35.60 | 32.39 | 1.02 | 33.04 | 2.57 | 92.79 |
| 17.20 | 2.57 | 44.20 | 32.15 | 1.27 | 40.83 | 3.37 | 92.37 |
| 17.20 | 3.01 | 51.77 | 31.94 | 1.49 | 47.59 | 4.18 | 91.92 |
| 17.20 | 3.65 | 62.78 | 31.78 | 1.80 | 57.20 | 5.58 | 91.12 |
| 17.20 | 4.11 | 70.69 | 31.57 | 2.03 | 64.09 | 6.60 | 90.66 |
| 17.20 | 4.55 | 78.26 | 31.31 | 2.25 | 70.45 | 7.81 | 90.02 |
| 17.20 | 4.96 | 85.31 | 31.09 | 2.46 | 76.48 | 8.83 | 89.65 |
| 17.20 | 5.38 | 92.54 | 30.85 | 2.67 | 82.37 | 10.17 | 89.01 |
| 17.20 | 5.75 | 98.90 | 30.59 | 2.86 | 87.49 | 11.41 | 88.46 |
| 17.20 | 6.18 | 106.30 | 30.33 | 3.08 | 93.42 | 12.88 | 87.88 |
| 17.20 | 6.57 | 113.00 | 30.10 | 3.28 | 98.73 | 14.28 | 87.37 |
| 17.20 | 6.99 | 120.23 | 29.85 | 3.48 | 103.88 | 16.35 | 86.40 |

ตาราง 4-8 ผลการทดลองและผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรบวมคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 4-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสอินพุตของวงจรบวมคอนเวอร์เตอร์

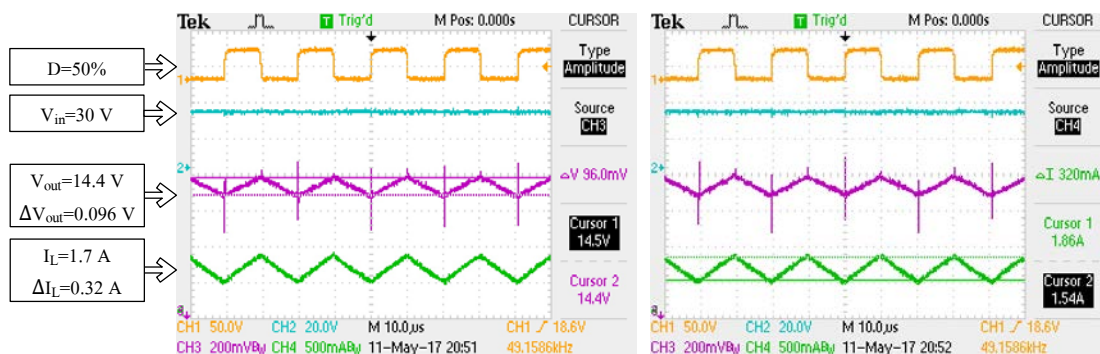
4.1.3 ผลการทดลองของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง



ภาพประกอบ 4-7 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางที่ใช้ในการทดลอง

ภาพประกอบ 4-7 แสดงวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางที่ใช้ในการทดลองการทำงาน ซึ่งการทดลองวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง จะแยกเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองขณะที่วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางทำหน้าที่เป็นวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ และในขณะที่วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางทำหน้าที่เป็นวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางสามารถทำงานได้ทั้งสองกรณี ซึ่งข้อกำหนดและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าเหมือนกับการทดลองของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ ตามตาราง 4-1 ถึงตาราง 4-3 เมื่อวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางทำหน้าที่เป็นวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ และเหมือนวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ ตามตาราง 4-5 ถึง ตาราง 4-7 เมื่อวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางทำหน้าที่เป็นวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์

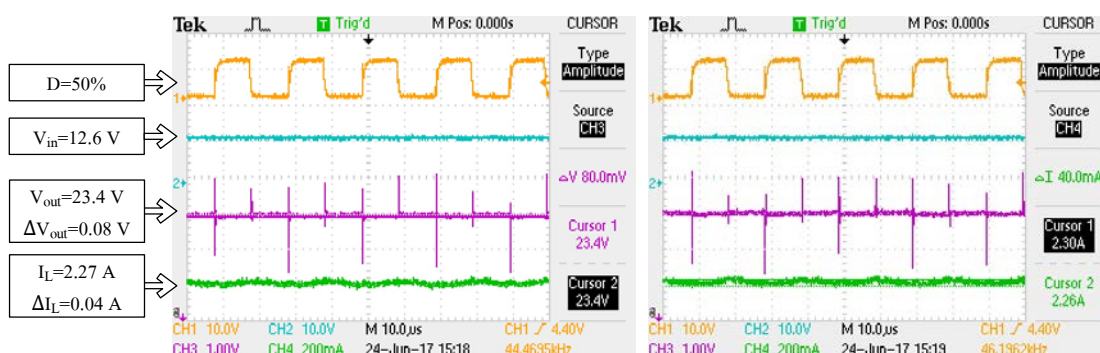
- (1) ผลการทดลองวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง ในขณะที่ทำงานเป็นวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 4-8 ผลการทดลองของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางที่ทำหน้าที่เป็นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดลองในภาพประกอบ 4-8 จะเห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณออกมามีลักษณะตามคล้ายกับของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ และสามารถทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันอินพุตได้ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางสามารถทำงานเป็นวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ได้ จากผลการทดลองจะได้ค่ากระแสระลอก (ΔI_L) จะมีค่าเท่ากับ 0.32 A และแรงดันระลอก (ΔV_o) จะมีค่าเท่ากับ 0.096 V ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทำงานของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

(2) ผลการทดลองวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง ในขณะที่ทำงานเป็นวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 4-9 ผลการทดลองของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางที่ทำหน้าที่เป็นวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์

จากผลการทดลองในภาพประกอบ 4-9 จะเห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณออกมามีลักษณะตามคล้ายกับของวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และสามารถทำการเพิ่มค่าระดับแรงดันเอาต์พุตได้ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทางสามารถทำงานเป็นวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์

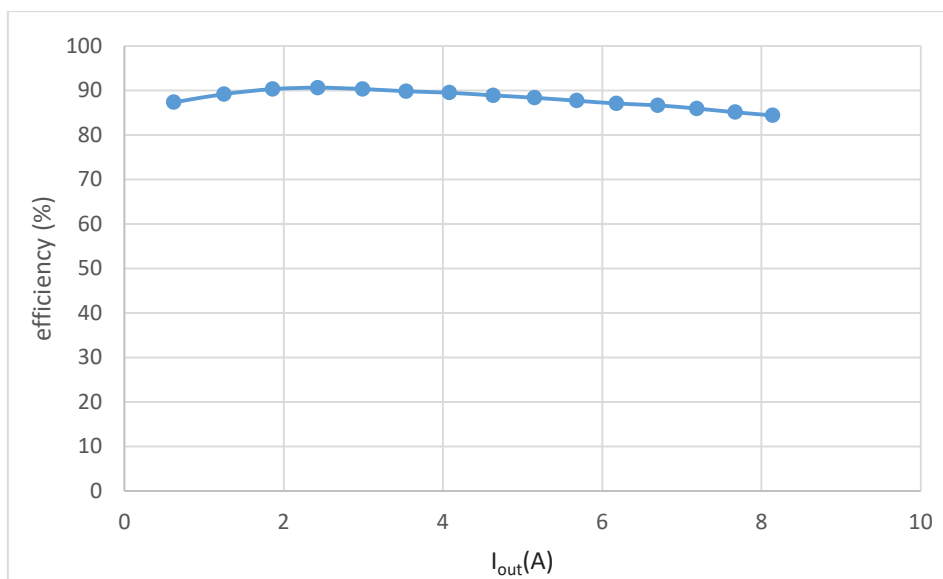
ได้จากผลการทดลองจะได้ค่ากระแสระลอก (ΔI_L) จะมีค่าเท่ากับ 0.04 A และแรงดันระลอก (ΔV_o) จะมีค่าเท่ากับ 0.08 V ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทำงานของวงจร buck converter

(3) ผลการทดลองหาค่าประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง

จากผลการทำงานของวงจรทั้งสองการทดลอง สามารถบอกได้ว่าวงจรแบบสองทางสามารถทำงานได้ทั้งเป็นวงจร buck converter เมื่อทำการป้อนแหล่งจ่ายไฟเข้าทาง Port1 และ Port2 ทำการต่อกับโหลด และเป็นวงจร buck converter เมื่อ Port2 ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟ และ Port1 ต่อกับโหลด ในส่วนต่อมาระยะทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของวงจร ซึ่งเราจะทำการทดลองในขณะที่วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทางทำงานเป็นวงจร buck converter โดยจะทำการคงค่าแรงดันอินพุตที่ 30 V, รอบการทำงาน (Duty cycle) ที่ 50% และจะทำการปรับค่าโหลด ตั้งแต่ 0.62-8.14 A ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงในตาราง 4-9

| V_{in} (V) | I_{in} (A) | P_{in} (W) | V_{out} (V) | I_{out} (A) | P_{out} (W) | P_{loss} (W) | efficiency(%) |
|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 30 | 0.35 | 10.47 | 14.75 | 0.62 | 9.15 | 1.33 | 87.34 |
| 30 | 0.68 | 20.28 | 14.47 | 1.25 | 18.09 | 2.19 | 89.19 |
| 30 | 0.98 | 29.49 | 14.32 | 1.86 | 26.64 | 2.85 | 90.32 |
| 30 | 1.27 | 38.10 | 14.21 | 2.43 | 34.53 | 3.57 | 90.63 |
| 30 | 1.55 | 46.50 | 14.05 | 2.99 | 42.01 | 4.49 | 90.34 |
| 30 | 1.83 | 54.90 | 13.93 | 3.54 | 49.31 | 5.59 | 89.82 |
| 30 | 2.10 | 63.00 | 13.82 | 4.08 | 56.39 | 6.61 | 89.50 |
| 30 | 2.38 | 71.40 | 13.71 | 4.63 | 63.48 | 7.92 | 88.90 |
| 30 | 2.64 | 79.20 | 13.59 | 5.15 | 69.99 | 9.21 | 88.37 |
| 30 | 2.91 | 87.30 | 13.48 | 5.68 | 76.57 | 10.73 | 87.70 |
| 30 | 3.17 | 95.10 | 13.40 | 6.18 | 82.81 | 12.29 | 87.08 |
| 30 | 3.42 | 102.60 | 13.27 | 6.70 | 88.91 | 13.69 | 86.66 |
| 30 | 3.67 | 110.10 | 13.16 | 7.19 | 94.62 | 15.48 | 85.94 |
| 30 | 3.92 | 117.60 | 13.05 | 7.67 | 100.09 | 17.51 | 85.11 |
| 30 | 4.16 | 124.80 | 12.94 | 8.14 | 105.33 | 19.47 | 84.40 |

ตาราง 4-9 ผลการทดลองและผลการคำนวณหาประสิทธิภาพของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง



ภาพประกอบ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับกระแสเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง

กราฟค่าประสิทธิภาพของวงจรกับกระแสอินพุตแสดงดังภาพประกอบ 4-10 ซึ่งเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทางมีค่าเท่ากับ 88.08%

4.1.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์, วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง

จากผลการทดลองของวงจรคอนเวอร์เตอร์ทั้งสามวงจรจะเห็นได้ว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นทุกวงจรจะมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง โดยวงจรบักคอนเวอร์เตอร์และวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ที่ได้สร้างขึ้นนั้นจะใช้มอสเฟตแทนไดโอดในวงจร ซึ่งเรียกว่าวงจรซิงโครนัสบักคอนเวอร์เตอร์ (Synchronous buck converter) และวงจรซิงโครนัสบูทคอนเวอร์เตอร์ (Synchronous boost converter) เนื่องจากมอสเฟตจะมีกำลังสูญเสียน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวไดโอดซึ่งทำให้วงจรมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ส่วนวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองทางจะเป็นวงจรที่มีการใช้มอสเฟตแทนไดโอดอยู่แล้ว เนื่องจากต้องมีการทำงานเป็นทั้งวงจรบักคอนเวอร์เตอร์และวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์

จากกราฟค่าประสิทธิภาพของวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง เราจะเห็นได้ว่าจะมีอยู่จุดๆหนึ่งที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ค่ากระแสค่าหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากที่กระแสเอาต์พุตมีค่าน้อยๆ ค่ากำลังสูญเสียที่มีค่าคงที่ (Static loss) หรือกำลังสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับกระแสเอาต์พุตหรือกระแสอินพุต เช่นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนตัวเหนี่ยวนำ (Core loss) จะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ากำลังเอาต์พุตที่มีค่าน้อย ในขณะที่กระแสเอาต์พุตมีค่าน้อยๆ ค่าประสิทธิภาพจึงมีค่าต่ำ แต่ในขณะที่กระแสเอาต์พุตมีค่าสูง ประสิทธิภาพก็มีค่าต่ำลง

เช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากเกิดกำลังสูญเสียที่มีการเปลี่ยนแปลง (Dynamic loss) หรือกำลังสูญเสียที่แปรผันกับกระแสเอาต์พุตหรือกระแสอินพุต เช่น กำลังสูญเสียที่เกิดจากเส้นลวดตัวเหนี่ยวนำ (Copper loss) ทำให้เมื่อกระแสเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดกำลังสูญเสียที่เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพต่ำลง ส่วนในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือจุดที่มีกำลังสูญน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกำลังเอาต์พุต

4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการควบคุมการป้อนกลับของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่และกระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ เพื่อทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักอย่างรวดเร็ว

4.2.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์

ในการทดลองการควบคุมการแบบป้อนกลับ (Feedback control) ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์เพื่อรักษาค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ (Voltage regulation) ซึ่งได้มีการออกแบบไว้ในบทที่ 3 หัวข้อ 3.4.1 เราจะทำการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกคอนเวอร์เตอร์ (A/D converter) โดยมีคาบเวลา (T_a) ทำหน้าที่ในการควบคุมการซักรับตัวอย่าง (Sampling time) เพื่อการคำนวณและส่งผลพัลส์ของการคำนวณไปควบคุมวงจร ดังนั้นเราจะต้องมีการประมาณค่าอัตราขยายของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ ที่อยู่ในรูปของตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous time controller) ให้อยู่ในรูปแบบของตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time controller) เพื่อที่จะสามารถนำมาคำนวณในไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ซึ่งเป็นระบบดิจิทัลได้ โดยวิธีในการประมาณค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องหรือในรูปแบบของดิจิทัลในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการประมาณจากสมการออยเลอร์ (Euler equation) โดยรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งจะได้อสมการที่สามารถนำไปเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{\omega_p} \right] v_c(k) &= \left[\frac{1}{\omega_p} - T_s \right] v_c(k-1) + \left[T_s - \frac{1}{\omega_p} \right] v_c(k-2) + \left[\frac{G_{c0}}{\omega_z} \right] v_e(k) \\ &+ \left[T_s G_{c0} - \frac{2G_{c0}}{\omega_z} + T_s G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} \right] v_e(k-1) \\ &+ \left[-T_s G_{c0} + T_s^2 G_{c0} \omega_L + \frac{G_{c0}}{\omega_z} - T_s G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} \right] v_e(k-2) \end{aligned} \quad (4-1)$$

จากการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.1 สมการที่ (3-45) จะได้ค่าของตัวแปร $G_{c0} = 0.3125$, $\omega_p = 1.417 \times 10^5 \text{ rad/s}$, $\omega_z = 6.964 \times 10^3 \text{ rad/s}$, $\omega_L = 3.141 \times 10^3 \text{ rad/s}$ และค่าคาบเวลาในการสุ่มข้อมูล (T_a) ที่ใช้ในการควบคุมแบบดิจิทัลหรือที่ใช้ในการประมาณค่าอัตราขยายของตัวควบคุมที่อยู่ในรูปของตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous time controller) ให้อยู่ในรูปแบบของตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time controller) ส่วนใหญ่จะเลือกค่าความถี่ในการสุ่มให้มีค่าประมาณ 4-10 เท่าของช่วงความถี่ในการทำงานของระบบเปิด (Bandwidth frequency) หรือความถี่ตัดศูนย์ (Cross-over frequency : f_c) ซึ่งในการทดลองในครั้งนี้ได้เลือกให้ค่าความถี่ในการสุ่ม ให้มีค่าเป็น 4 เท่าของความถี่ตัดศูนย์ โดยจากการออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง ความถี่ตัดศูนย์มีค่าเท่ากับ $3.14 \times 10^4 \text{ rad/s}$ หรือประมาณ 5 kHz ดังนั้นค่าความถี่ในการสุ่มจะมีค่าเท่ากับ 20 kHz หรือคาบเวลาในการสุ่ม (T_a) มีค่าประมาณ 50×10^{-6} วินาที

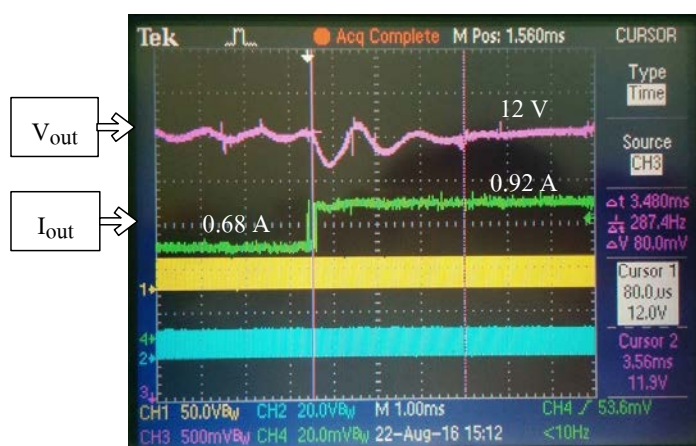
เมื่อเราได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลังให้อยู่ในรูปแบบตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้แล้ว ในขั้นถัดมา เราจะทำการทดลองวงจรบ๊อคคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมการป้อนกลับ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมและทำการเปรียบเทียบกับผลการควบคุมการป้อนกลับโดยใช้ไอซีสำเร็จรูป TL494 เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของวงจรที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตาราง 4-10 และสมการในการควบคุมการป้อนกลับแสดงดังสมการ (4-1) อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้เราได้ใช้คาบเวลาในการสุ่ม (T_a) มีค่าประมาณ 100×10^{-6} วินาที ซึ่งมากกว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ ทั้งนี้เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้ ไม่สามารถทำงานได้ และระบบที่ทำการทดลองจริงได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าใหญ่กว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ระบบตอบสนองช้าลงและคาดว่าสามารถใช้เวลาในการสุ่มที่ 100×10^{-6} วินาที ได้

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|---------------------------|----------------|
| แรงดันด้านเข้า : V_g | 35 V |
| แรงดันด้านออก : V | 13.8 V |
| แรงดันอ้างอิง : V_{ref} | 13.8 V |
| โหลด : R | 3 Ω |
| ตัวเหนี่ยวนำ : L | 500 μH |
| ตัวเก็บประจุ : C | 100 μF |

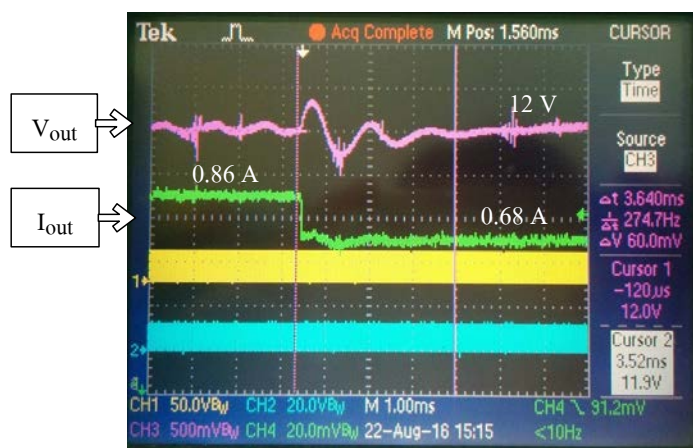
ตาราง 4-10 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ของวงจรบ๊อคคอนเวอร์เตอร์

การทดลองเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดซึ่งคือการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสเอาต์พุต และดูผลของแรงดันเอาต์พุตในช่วงพลวัต (Dynamic) เช่น ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) และ เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (Settling time) ได้รูปผลการทดลองที่มีการควบคุมการป้อนกลับโดยใช้ไอซีสำเร็จรูปแสดงดังภาพประกอบ 4-11 และภาพประกอบ 4-12 ส่วนรูปผลการทดลองที่มีการควบคุมการป้อนกลับด้วยไมโครคอนโทรเลอร์ดังภาพประกอบ 4-13 และ ภาพประกอบ 4-14

- (1) ผลการทดลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ โดยใช้ ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ TL494 ในการควบคุม



ภาพประกอบ 4-11 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรถับก้อนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุม ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ TL494 เมื่อมีการเพิ่มโหลด



ภาพประกอบ 4-12 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรถับก้อนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุม ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ TL494 เมื่อมีการลดโหลด

จากผลการทดลองภาพประกอบ 4-11 และภาพประกอบ 4-12 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตในช่วงพลวัตร ในขณะที่เพิ่มโหลด กับในขณะที่ลดโหลด ช่วงพลวัตรจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน โดย

- ขณะที่เพิ่มโหลด

ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) มีค่าเท่ากับ 4.16%

เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (settling time) มีค่าเท่ากับ 3.48 ms

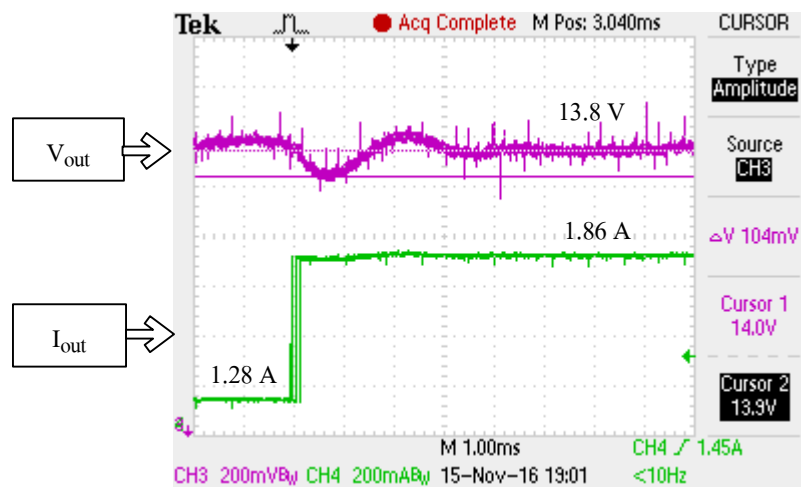
- ขณะที่ลดโหลด

ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) มีค่าเท่ากับ 4.03%

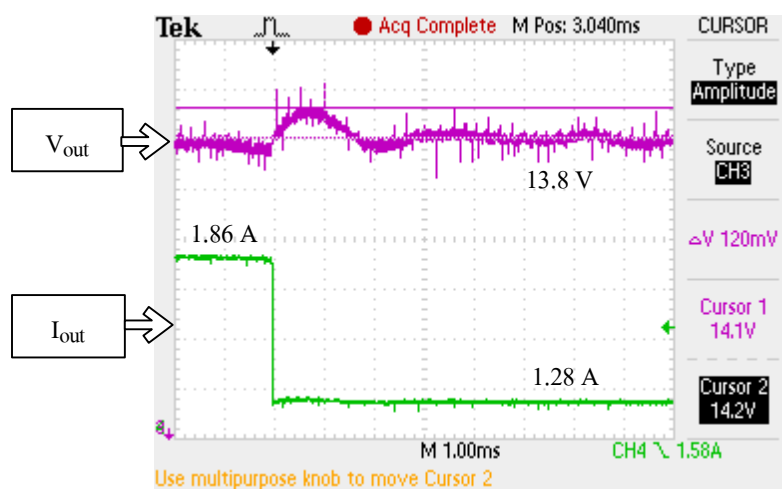
เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (settling time) มีค่าเท่ากับ 3.64 ms

ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตในช่วงพลวัตรของการควบคุมการป้อนกลับโดยใช้ไอซีสำเร็จรูป เราจะไม่สามารถที่จะปรับปรุงให้ค่าการเปลี่ยนแปลงช่วงพลวัตรดีขึ้นได้

(2) ผลการทดลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม



ภาพประกอบ 4-13 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อมีการเพิ่มโหลด



ภาพประกอบ 4-14 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อมีการลดโหลด

จากผลการทดลองภาพประกอบ 4-13 และภาพประกอบ 4-14 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตในช่วงพลวัต ในขณะที่เพิ่มโหลด กับในขณะที่ลดโหลด ช่วงพลวัตจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน โดย

- ขณะที่เพิ่มโหลด

ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) มีค่าเท่ากับ 0.75%

เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (settling time) มีค่าเท่ากับ 3.96 ms

- ขณะที่ลดโหลด

ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) มีค่าเท่ากับ 0.86%

เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (settling time) มีค่าเท่ากับ 2.92 ms

โดยผลการทดลองการควบคุมการป้อนกลับทั้งสองวิธีสามารถเขียนสรุปในภาพประกอบ 4-11 ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตในช่วงพลวัตของการควบคุมการป้อนกลับโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะดีกว่าการควบคุมการป้อนกลับด้วยไอซีสำเร็จรูป เมื่อเราทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่มีการควบคุมการป้อนกลับโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์กับผลการจำลองการออกแบบการควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB จากบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.1 จะเห็นว่าลักษณะการทำงานของผลการทดลองจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการจำลองด้วยโปรแกรม ซึ่งถือว่าการออกแบบมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานได้

| การทดลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อ ลดค่าแรงดันของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ | | ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) | เวลาในการสู่สภาวะ คงตัว (settling time) |
|--|-----------------|----------------------------------|--|
| TL464 | ขณะที่เพิ่มโหลด | 4.16% | 3.48 ms |
| | ขณะที่ลดโหลด | 4.03% | 3.64 ms |
| Microcontroller | ขณะที่เพิ่มโหลด | 0.75% | 3.96 ms |
| | ขณะที่ลดโหลด | 0.86% | 2.92 ms |

ตาราง 4-11 สรุปผลการทดลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสเอาต์พุต

4.2.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้กระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์

ในการทดลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่ากระแสมีค่าคงที่ (Current regulation) ของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่มีการออกแบบไว้ในบทที่ 3 หัวข้อ 3.4.2 เราจะทำการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกคอนเวอร์เตอร์ (A/D converter) เช่นเดียวกับการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันมีค่าคงที่

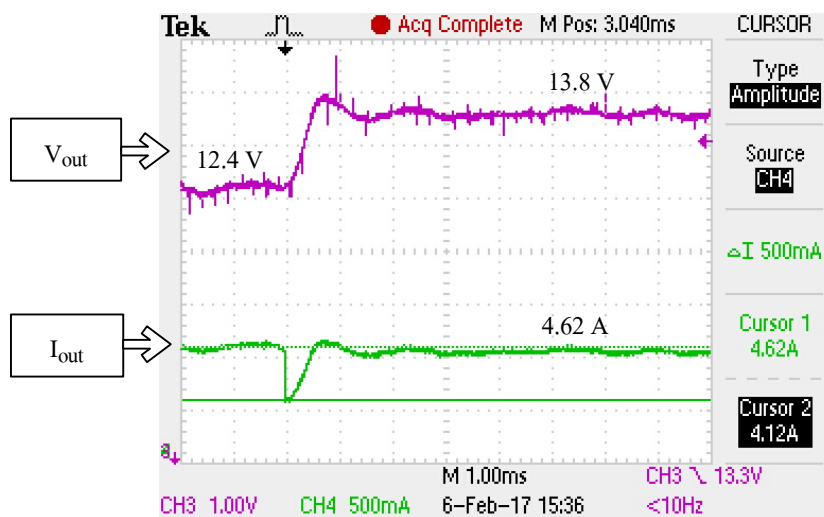
จากสมการที่ (2-41) ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.7.2 จะเป็นสมการที่ได้จากการประมาณส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ให้เป็นส่วนประกอบที่เป็นเชิงเส้นโดยใช้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบเชิงเส้น ณ จุดทำงานสงบ (Quiescent operating point) หรือการประมาณการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าน้อยๆ เพื่อให้เราสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นเชิงเส้นที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.7.2 เราจึงบอกได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรอบการทำงาน ($\hat{d}(t)$) จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น ($d(t)$) และสามารถนำไปเขียนเป็นสมการการเปลี่ยนแปลงในการควบคุมวงจรที่ทำการคำนวณในไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ได้ ดังนี้

$$d(t) = \frac{1}{M_a T_s} \left[i_c(t) - i_L(t) - \frac{D^2 T_s}{2L} v_g(t) - \frac{(1-D) T_s}{2L} v(t) \right] \quad (4-2)$$

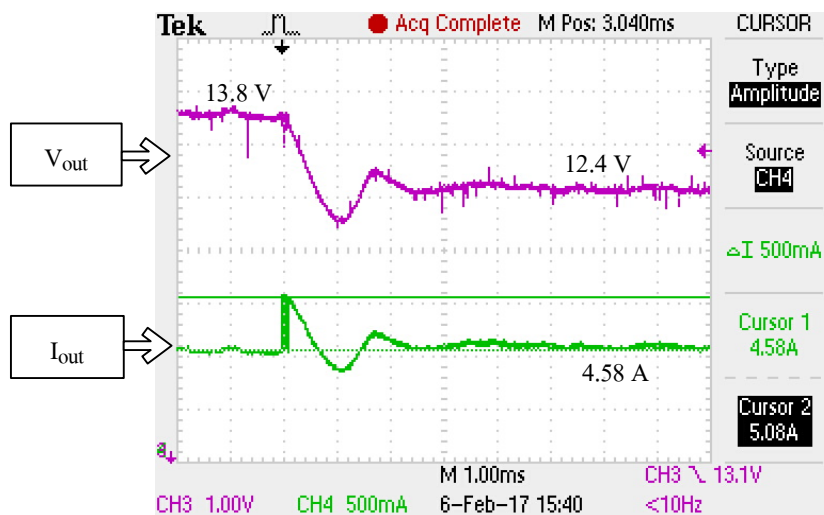
จากสมการที่ (4-2) จะเห็นได้ว่ารูปแบบสมการไม่มีพจน์ของอนุพันธ์ ทำให้สามารถนำสมการนี้ไปเขียนโปรแกรมการคำนวณในไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูปแบบตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ โดยค่าคาบเวลาในการซิกตัวอย่าง (T_a) เราจะมีค่าเท่ากับความถี่ในการสวิตช์ หรือเป็นเท่าของความถี่ในการสวิตช์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $20 \mu s$ หรือ $n \times 20 \mu s$ ในการทดลองเราได้

เลือกใช้ค่าเวลาในการชักตัวอย่าง (T_a) มีค่าประมาณ $100\ \mu\text{s}$ เพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองที่ดีขึ้น เนื่องจากวงจรที่ได้ทำการทดลองไว้ได้เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าใหญ่กว่าที่ได้ทำการออกแบบ และอีกหนึ่งเหตุผลที่เลือกให้ค่าเวลาในการชักตัวอย่างที่มีค่าเท่ากับ $100\ \mu\text{s}$ เพราะต้องเลือกให้มีค่าเท่ากับค่าเวลาในการชักตัวอย่างของการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงที่ ซึ่งทำให้ง่ายต่อควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว

ต่อมาเป็นการทดลองการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ของวงจร บั๊กคอนเวอร์เตอร์ โดยเขียนโปรแกรมควบคุมการป้อนกลับจากไมโครคอนโทรลเลอร์และทำการดูค่าเฉลี่ยของกระแสตัวเหนี่ยวนำหรือผลของกระแสเอาต์พุตในช่วงพลวัต (Dynamic) เช่น ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot), เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (settling time) และค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (steady state error) รูปผลการทดลองที่มีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อคงค่ากระแสด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังภาพประกอบ 4-15 และภาพประกอบ 4-16



ภาพประกอบ 4-15 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ ที่มีการควบคุมให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ เมื่อมีการเพิ่มค่าของตัวความต้านทาน



ภาพประกอบ 4-16 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรบีกอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมให้ค่ากระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ เมื่อมีการลดค่าของตัวความต้านทาน

จากผลการทดลองภาพประกอบ 4-15 และภาพประกอบ 4-16 จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตในช่วงพลวัต ในขณะที่เพิ่มค่าของตัวความต้านทาน กับในขณะที่ลดค่าของตัวความต้านทาน ช่วงพลวัตจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน โดย

- ขณะที่เพิ่มค่าของตัวความต้านทาน

| | |
|---|------------------------------|
| ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) | มีค่าเท่ากับ 500 mA = 10.82% |
| เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (settling time) | มีค่าเท่ากับ 1.12 ms |
| ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady state error) | มีค่าเท่ากับ 40 mA |

- ขณะที่ลดค่าของตัวความต้านทาน

| | |
|---|------------------------------|
| ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot) | มีค่าเท่ากับ 500 mA = 10.91% |
| เวลาในการสู่สภาวะคงตัว (settling time) | มีค่าเท่ากับ 2.2 ms |
| ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady state error) | มีค่าเท่ากับ 40 mA |

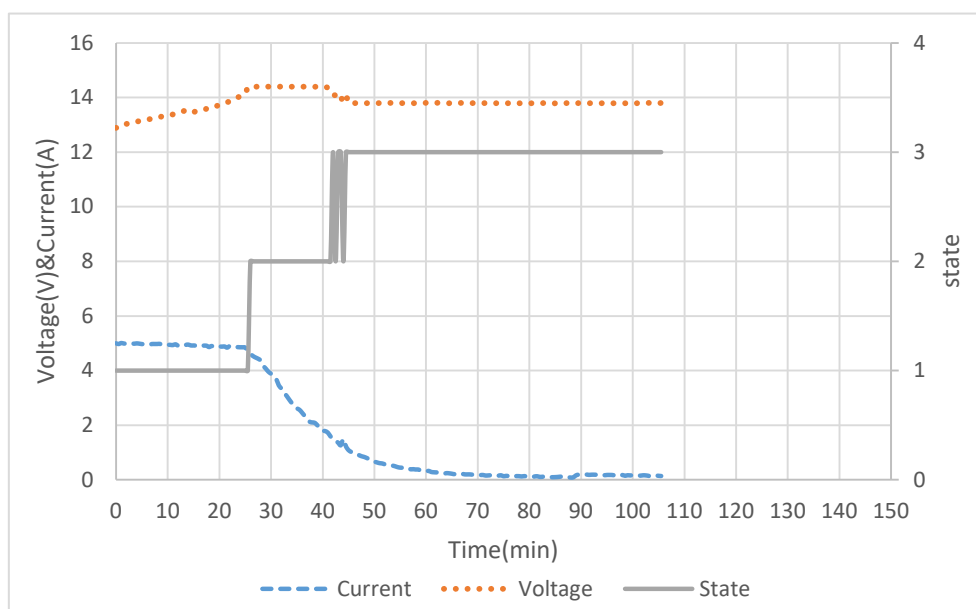
จากผลการทดลองภาพประกอบ 4-15 และภาพประกอบ 4-16 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถทำให้วงจรบีกอนเวอร์เตอร์มีการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการ CPM (Current program mode) เพื่อคงค่ากระแสเอาต์พุตให้คงที่ สามารถทำให้ค่าเฉลี่ยของกระแสตัวเหนี่ยวนำหรือกระแสเอาต์พุตมีค่าคงที่ตามที่ต้องการได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุตในช่วงพลวัต (Dynamic) อาจมีค่ามากกว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ตัวตรวจกระแสอาจมีความคลาดเคลื่อน หรืออาจเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของอุปกรณ์ แต่ถึงแม้

ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอทพุตในช่วงพลวัตรจะมีค่ามากกว่าที่ทำการออกแบบไว้ แต่ระบบก็ยังสามารถควบคุมให้ค่ากระแสเอทพุตมีค่าคงที่ได้ตามที่ต้องการ

4.2.3 ผลการทดลองการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว

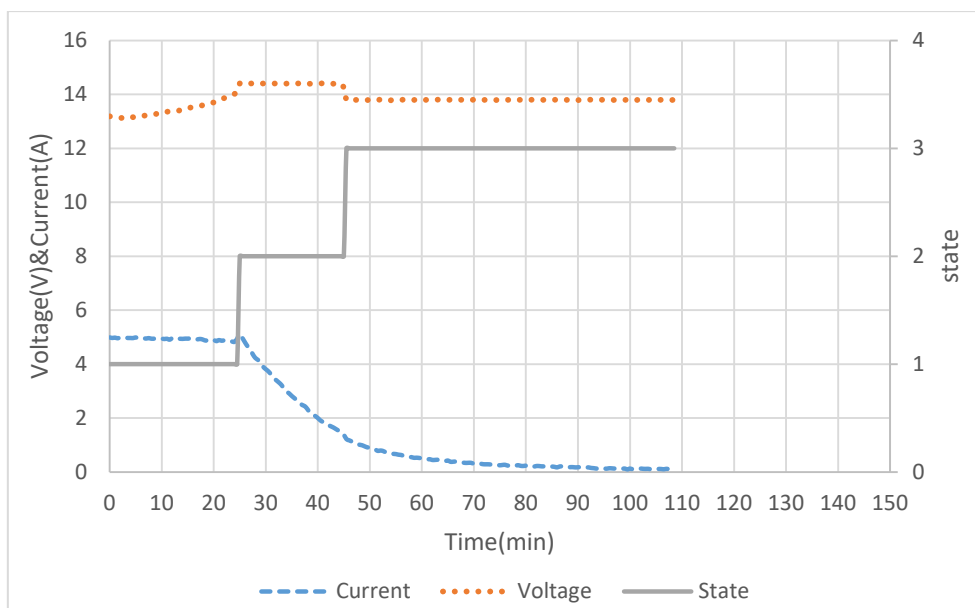
การทดสอบนี้เพื่อทดลองการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ให้ได้ตามขั้นตอนการประจุพลังงานเพื่อให้สามารถประจุพลังงานได้อย่างรวดเร็ว (Three-stage charging; TSC) ซึ่งจากขั้นตอนที่ทำการออกแบบในการควบคุมการประจุพลังงาน ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.3 จะเห็นได้ว่าจะต้องมีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้ค่าแรงดันเอทพุตมีค่าคงที่และจะต้องมีการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้กระแสเอทพุตมีค่าคงที่ด้วย เพื่อให้ง่ายต่อการทดลองในการยืนยันการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ว่าสามารถประจุพลังงานได้ตามขั้นตอนที่ได้ทำการออกแบบไว้ เราจะทำการป้อนแรงดันจากแหล่งจ่าย (Power supply) ที่สามารถจ่ายค่าแรงดันได้อย่างคงที่ และสามารถจ่ายกระแสได้สูง ให้กับวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ และดูผลของการประจุพลังงานว่าสามารถทำงานได้ตามขั้นตอนหรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับการทดลองการประจุพลังงานด้วยวิธีการควบคุมให้มีค่าแรงดันคงที่เพียงอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบความเร็วและความปลอดภัยในการประจุพลังงาน

(1) ผลการทดลองการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ด้วยวิธี TSC



ภาพประกอบ 4-17 แสดงผลการควบคุมการเปลี่ยนขั้นในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่โดยวิธี TSC

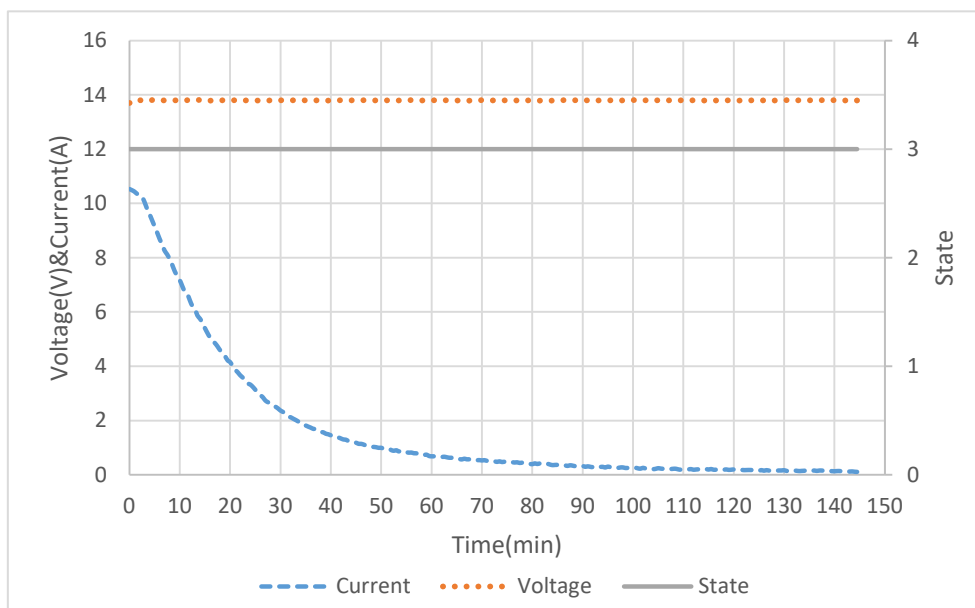
ภาพประกอบ 4-17 แสดงผลการทดลองการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่โดยใช้วิธีการ TSC โดยเส้นประสีฟ้าแสดงค่ากระแสของแบตเตอรี่ เส้นไขว้ปลาสีส้มแสดงค่าแรงดันของแบตเตอรี่ (Voltage) และเส้นทึบสีเทาแสดงขั้นของการประจุ (State) ในขั้นตอนที่หนึ่ง (State I) หรือในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 นาทีถึงประมาณ 25 นาที จะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมค่ากระแสในการประจุที่ค่าคงที่ 5 A ส่วนค่าแรงดันของแบตเตอรี่จะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อค่าแรงดันของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าประมาณ 14.2 V ระบบจะทำการเปลี่ยนขั้นตอนในการประจุมาเป็นขั้นตอนที่ 2 (State II) ในช่วงเวลาตั้งแต่ 25 นาทีถึงเวลาประมาณ 45 นาที โดยค่าแรงดันที่ทำการประจุจะมีค่าคงที่ที่ 14.4 V และค่าของกระแสประจุจะมีค่าค่อยๆ ลดลง เมื่อค่ากระแสในการประจุลดลงจนถึงค่าประมาณ 0.5 A ระบบจะทำการเปลี่ยนสถานะเป็นการประจุในการขั้นตอนที่ 3 (State III) คือ การประจุพลังงานด้วยค่าแรงดันคงที่ที่ 13.8 V และค่าของกระแสในการประจุจะมีค่าน้อยๆ เพื่อให้แบตเตอรี่อยู่ในสถานะเต็มตลอดเวลา ซึ่งเวลาทั้งหมดในการประจุพลังงานจากตอนที่แบตเตอรี่หมดหรือแรงดันของแบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 12.0 V จนกระทั่งแบตเตอรี่ประจุเต็มจะใช้เวลาประมาณ 108 นาที และจากผลการทดลองทั้งหมดในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ด้วยวิธีการ TSC จะเห็นได้ว่าในช่วงของการเปลี่ยนขั้นจากขั้นที่ 1 (CC) ไปยังขั้นที่ 2 ($CV_{14.4}$) ระบบควบคุมสามารถทำการเปลี่ยนขั้นการประจุได้อย่างมีประสิทธิภาพคือสามารถเปลี่ยนได้ทันที แต่ช่วงของการเปลี่ยนขั้นในการประจุพลังงานจากขั้นที่ 2 ($CV_{14.4}$) ไปยังขั้นที่ 3 ($CV_{13.8}$) ระบบควบคุมจะมีความสับสนเล็กน้อยซึ่งเกิดจากค่าแรงดันอ้างอิงที่ใช้การควบคุมการป้อนกลับมีค่าลดลงอย่างทันทีทันใดจาก 14.4 V เป็น 13.8 V ทำให้ระบบควบคุมจะต้องทำการปรับค่ารอบการทำงานให้มีค่าน้อยที่สุด (D_{min}) เพื่อให้ค่าแรงดันมีค่าลดลงตามค่าแรงดันอ้างอิงจากการควบคุมการป้อนกลับ ส่งผลให้ค่ากระแสในการประจุมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่ากระแสที่ใช้ในการประจุด้วยค่ากระแสคงที่ในขั้นที่ 1 เพียงครู่เดียว ทำให้ระบบควบคุมเกิดความสับสนและเปลี่ยนขั้นการประจุไปยังขั้นที่ 1 แทน (ระบบเก็บข้อมูลไม่สามารถเก็บค่าได้ทันทีเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมาก โดยระบบเก็บข้อมูลจะทำเก็บของมูลทุกๆ 1 s) และเปลี่ยนกลับมายังขั้นที่ 2 และไปขั้นที่ 3 ซึ่งระบบจะหยุดแกว่งก็ต่อเมื่อค่ากระแสในขณะที่ยกขึ้นในการประจุจากขั้นที่ 2 ไปยังขั้นที่ 3 มีค่าพุ่งสูงไม่เกินค่าการประจุด้วยค่ากระแสคงที่ในขั้นที่ 1 หรือไม่เกิน 3 A โดยจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อแบตเตอรี่มีสถานะเกือบเต็ม หรือต้องการกระแสในการประจุน้อยมาก ซึ่งเราจะทำการแก้ไขโดยการค่อยๆ เปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากระดับแรงดัน 14.4 V ในขั้นที่ 2 ให้มีค่าค่อยๆ ลดลงไปยังค่าระดับแรงดัน 13.8 V ในขั้นที่ 3 โดยจะไม่ทำการเปลี่ยนแบบทันทีทันใด จะได้ผลการทดลองในการประจุพลังงานด้วยวิธีการ TSC ใหม่ดังภาพประกอบ 4-18



ภาพประกอบ 4-18 แสดงผลการควบคุมการเปลี่ยนขั้น (State) ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่
โดยวิธี TSC ที่มีการปรับปรุงแก้ไข

จากภาพประกอบ 4-18 จะเห็นได้ว่าช่วงในการเปลี่ยนขั้นตอนการประจุจากขั้นที่ 2 ไปยังขั้นที่ 3 ระบบควบคุมสามารถทำการเปลี่ยนได้ โดยไม่เกิดความสับสน และถึงแม้ว่าเราจะทำการแก้ไข โดยการค่อยๆ เปลี่ยนระดับแรงดัน ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะก็ยังคงถือว่าสามารถเปลี่ยนได้อย่างทันทีทันใด ดังนั้นเราจึงบอกได้ว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมการเปลี่ยนสถานะในประจุพลังงานทั้งสามขั้นตอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถเปลี่ยนได้ตามขั้นตอนที่ได้ทำการออกแบบไว้อย่างถูกต้อง

(2) ผลการทดลองการประจุพลังงานด้วยวิธีการคงค่าแรงดัน (Constant voltage)

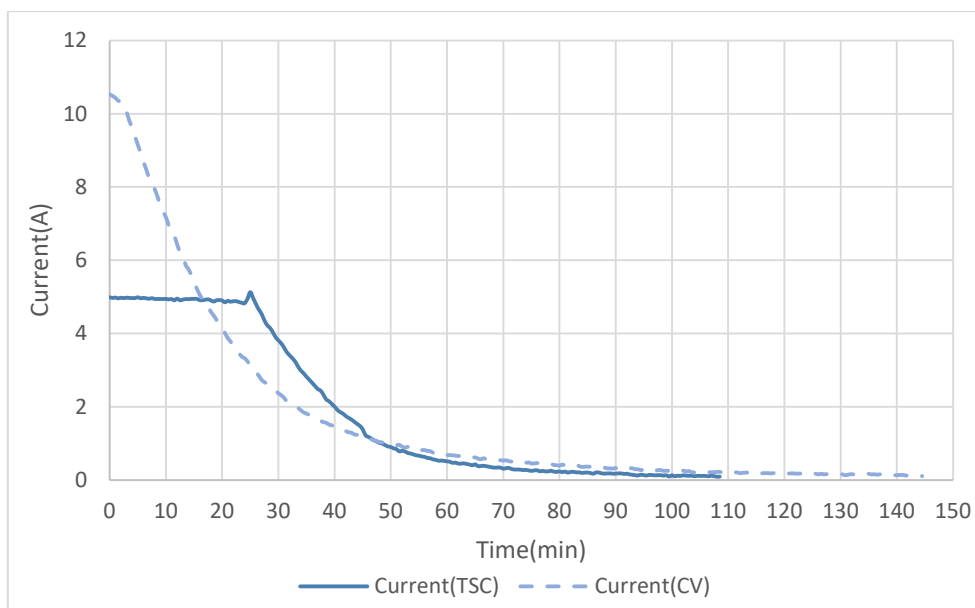


ภาพประกอบ 4-19 แสดงผลการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ โดยวิธีการคงค่าแรงดันเพียงอย่างเดียว (Constant voltage)

ภาพประกอบ 4-19 แสดงผลการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ด้วยวิธีการควบคุมให้ค่าแรงดันคงที่ (Constant voltage : CV) ที่ประมาณ 13.8 V เพียงอย่างเดียว หรือเป็นการควบคุมให้วงจรทำงานในขั้นที่ 3 (State III) เพียงอย่างเดียว ซึ่งเวลาในการประจุพลังงานจากตอนที่แบตเตอรี่หมดหรือแรงดันของแบตเตอรี่อยู่ที่ประมาณ 12.0 V จะใช้เวลาประมาณ 144 นาที

(3) การวิเคราะห์ผลการทดลองในการควบคุมการประจุพลังงาน

จากผลการทดลองภาพประกอบ 4-17 ภาพประกอบ 4-18 และ ภาพประกอบ 4-19 ซึ่งเป็นการแสดงการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ทั้งสองวิธีการ จะเห็นได้ว่าเมื่อเราทำการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ที่ค่าระดับแรงดันเริ่มต้นในการประจุใกล้เคียงกันที่ 12.0 V เวลาที่ใช้ในการประจุพลังงานจะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยเวลาที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ด้วยวิธีการแบบ TSC จะใช้นเวลาน้อยกว่าวิธีการแบบ CV ประมาณ 40 นาที ซึ่งเราสามารถบอกได้ว่าการควบคุมการประจุพลังงานด้วยวิธีการ TSC จะสามารถประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้อย่างรวดเร็ว (Quick battery charging)

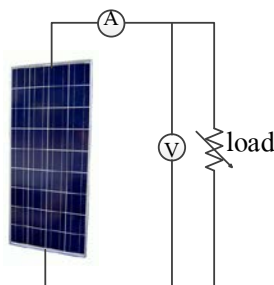


ภาพประกอบ 4-20 ค่ากระแสของการประจุพลังงานด้วยวิธีการแบบ TSC และวิธีการแบบ CV

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากระแสที่ใช้ในการประจุพลังงานทั้งสองวิธีการดังภาพประกอบ 4-20 จะเห็นได้ว่าการประจุพลังงานด้วยวิธีแบบ CV จะมีค่ากระแสในการประจุที่สูงมากในช่วงเริ่มต้น ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อวงจรหรือตัวแบตเตอรี่ แต่การประจุพลังงานด้วยวิธีการแบบ TSC ในช่วงแรกของการประจุจะมีการกำหนดค่ากระแสให้มีค่าคงที่ที่ไม่สูงกว่าค่ากระแสที่แบตเตอรี่จะสามารถรับได้ ดังนั้น เราจึงบอกได้ว่าการประจุพลังงานด้วยวิธีการแบบ TSC จะมีความปลอดภัยในการประจุ

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ (MPPT)

ในการทดลองการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มต้นจากการตรวจสอบก่อนว่าที่ค่าความเข้มแสงค่าหนึ่งที่ได้จากการทดลองจริง ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเท่าไร เพื่อยืนยันว่าค่าที่ได้จากการควบคุมจะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจริง โดยการทดลองเพื่อทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น เราจะทำการทดสอบโดยการต่อตัวต้านทานที่สามารถเปลี่ยนค่าได้โดยตรงกับเซลล์แสงอาทิตย์ ดังภาพประกอบ 4-21 และมีค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังตาราง 4-12

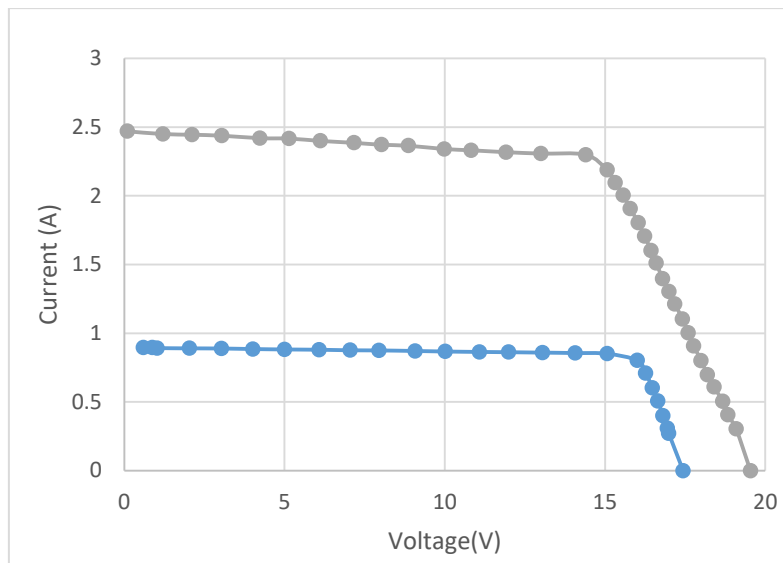


ภาพประกอบ 4-21 วงจรการต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับ โหลดโดยตรง

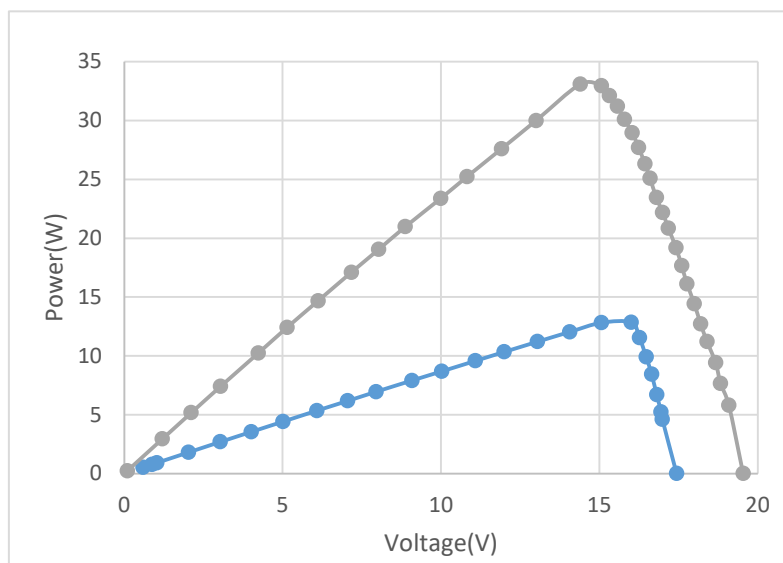
| เซลล์แสงอาทิตย์ | |
|---|--------|
| Power maximum (STC 1000W/m ² 25 C) | 80 W |
| Maximum power voltage (V _{MP}) | 17.2 V |
| Maximum power current (I _{MP}) | 4.58 A |
| Open circuit voltage (V _{OC}) | 21.5 V |
| Short circuit current (I _{SC}) | 5.02 A |
| Number of Cells per Module | 36 Pcs |

ตาราง 4-12 ค่าพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองจะทำการปรับค่าความต้านทานจาก 0-60 ohm และทำการวัดค่ากระแสและแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานและนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า จากผลการทดสอบสามารถพล็อตกราฟระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V Curve) และกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (P-V Curve) ได้ดังภาพประกอบ 4-22 และภาพประกอบ 4-23 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4-22 กราฟระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Curve) จากการทดลอง ที่ความเข้มแสง
ค่าต่างๆ



ภาพประกอบ 4-23 กราฟระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (P-V Curve) จากการทดลอง ที่ความเข้ม
แสงค่าต่างๆ

จากกราฟในภาพประกอบ 4-22 และภาพประกอบ 4-23 จะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองจะมีลักษณะและค่าที่ใกล้เคียงกับการจำลองที่ได้มีการนำเสนอในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5.3 ซึ่งจากกราฟกำลังไฟฟ้ากับแรงดัน (P-V Curve) จะมีจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจุดนั้นก็คือจุดที่ค่าความต้านทานที่ต่ออยู่กับเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ได้รับกำลังไฟฟ้าสูง

ในขั้นตอนถัดมาจะเป็นการทดลองการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบ โดยจะนำเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกับวงจรบวมคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็นวงจรในการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด และใช้ตัวต้านทานเป็นโหลดที่ต่อกับเอาต์พุตของวงจรบวมคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งการทดลองเราจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ

การทดลองที่ 1 จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวต้านทานที่ต่อกับวงจรบวมคอนเวอร์เตอร์ และคงค่าความเข้มแสงให้มีค่าคงที่

การทดลองที่ 2 จะทำการคงค่าโหลดที่ต่อกับวงจรบวมคอนเวอร์เตอร์ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง

ซึ่งจากการทดลองทั้งสองการทดลอง เราจะทำการทดลองเพื่อดูว่า เมื่อเรามีการรบกวนระบบทั้งสองอย่าง ระบบควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะสามารถทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ โดยจะมีค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์และค่าพารามิเตอร์ของวงจรบวมคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองตามตาราง 4-12 และตาราง 4-13 ตามลำดับ

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|------------------|----------------|
| ตัวเหนี่ยวนำ (L) | 500 μH |
| ตัวเก็บประจุ (C) | 200 μF |

ตาราง 4-13 ค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรบวมคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

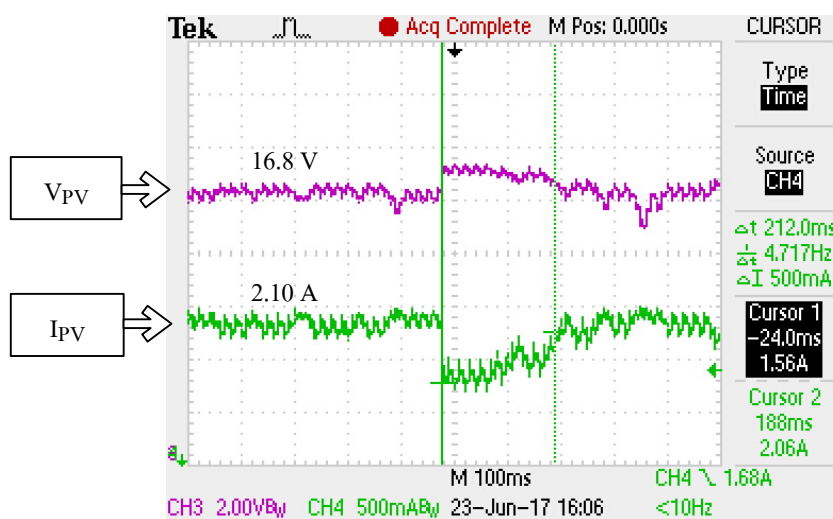
จากทฤษฎีในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะถูกควบคุมจากตัวแปรหลักๆ สองตัว คือ ค่าเวลาในการซึกตัวอย่าง (T_d) ที่จะทำให้การตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันเพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาทิศทางในการปรับค่ารอบการทำงาน และอีกหนึ่งตัวแปรคือค่าการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงาน (Δd) ซึ่งเป็นตัวที่ทำหน้าที่ในการปรับรอบการทำงานเพื่อให้ระบบสามารถติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยจากการออกแบบในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5 เราจะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดดังตาราง 4-14

| พารามิเตอร์ | ค่าพารามิเตอร์ |
|-------------|----------------|
| Δd | 0.01 step |
| T_s | 0.01 s |

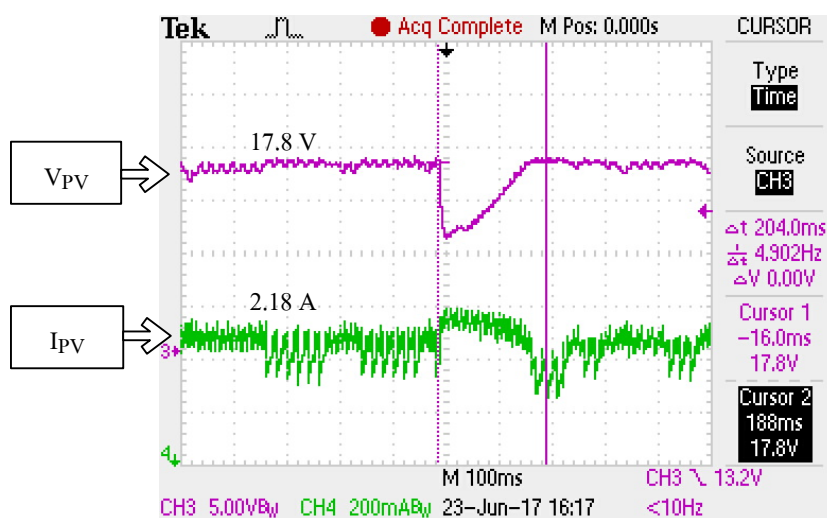
ตาราง 4-14 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด

(1) ผลการทดลองที่ 1

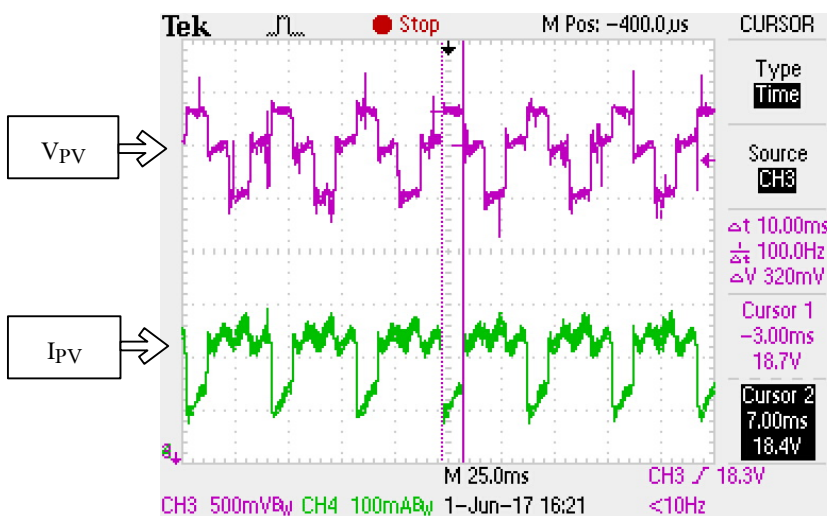
ในการทดลองเราจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวต้านทานเอาท์พุทของวงจรหม้อแปลงเวอ์เตอร์ โดยคงค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ไว้ ซึ่งในการทดลอง ได้ใช้แสงจากสปอร์ตไลท์เป็นตัวฉายแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์และสัญญาณของแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อที่ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ระบบควบคุมจะสามารถทำให้เซลล์แสงอาทิตย์กลับมาทำงานยังจุดเดิมหรือจุดที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้หรือไม่



ภาพประกอบ 4-24 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเพิ่มค่าความต้านทานเอาท์พุทของวงจรหม้อแปลงเวอ์เตอร์



ภาพประกอบ 4-25 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการลดค่าความต้านทานเอาต์พุตของวงจรบวทคอนเวอร์เตอร์



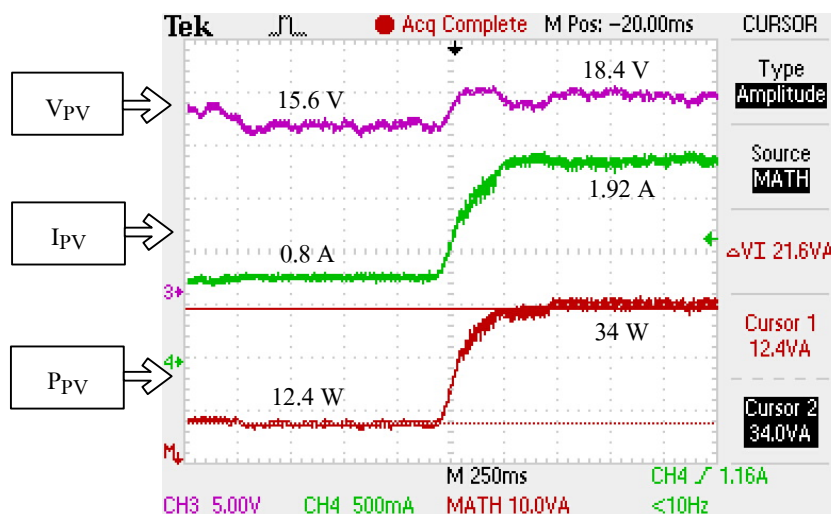
ภาพประกอบ 4-26 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการขยาย (Zoom in) ช่วงค่ากำลังไฟสูงสุด

จากภาพประกอบ 4-24 และภาพประกอบ 4-25 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่ต่อกับเอาต์พุตของวงจรบวทคอนเวอร์เตอร์ ค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หรือค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างทันทีทันใด แต่เมื่อเวลาผ่านไป จะเห็นได้ว่าค่ากระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถกลับมาทำงานยังจุดเดิมได้ โดยใช้เวลาในการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดอีกครั้งประมาณ 0.2 วินาที ซึ่งมีค่า

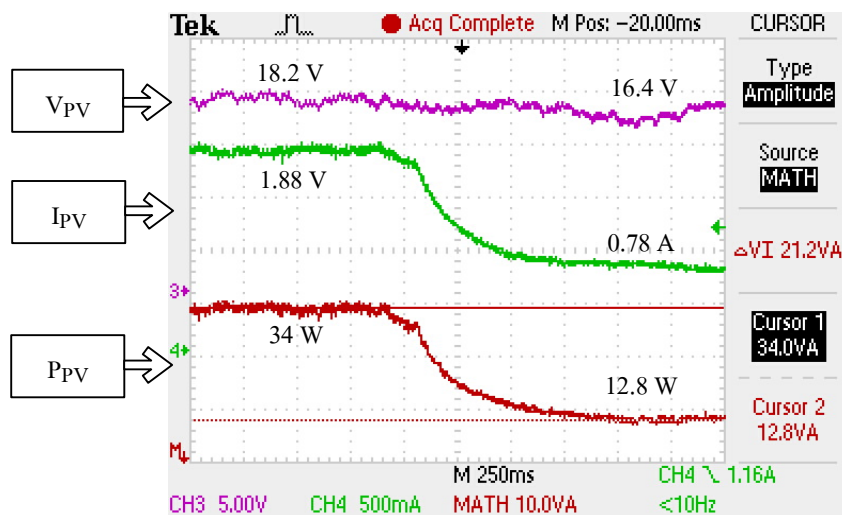
ใกล้เคียงกับผลการจำลองในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5 และเมื่อเราทำการขยายภาพของแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่อยู่ในช่วงที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังภาพประกอบ 4-26 จะเห็นได้ว่าค่าของแรงดันและกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ 3 ค่า ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรอบการทำงานที่เป็นการรบกวนและสังเกตผลของกำลังไฟฟ้าตลอดเวลา เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎีของการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) ดังนั้นจากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมที่ได้ทำการออกแบบสามารถติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามที่ทำการออกแบบ

(2) ผลการทดลองที่ 2

ในการทดลองที่ 2 เราทำการคงค่าโหลดที่ต่ออยู่กับวงจรหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ให้มีค่าคงที่ แต่จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง ซึ่งจะทำการเพิ่มหรือลดแสงจากสปอร์ตไลท์ที่เป็นฉายแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ และทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการควบคุมกับค่าที่จากการทดสอบข้างต้นที่เป็นการทดลองหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย ซึ่งถ้าค่ากำลังไฟฟ้าทั้งสองมีค่าเท่ากัน เราก็จะสามารถบอกได้ว่าระบบควบคุมสามารถที่จะติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ถึงแม้ว่าค่าความเข้มแสงจะมีค่าการเปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบ 4-27 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้า ของการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเพิ่มค่าความเข้มแสง

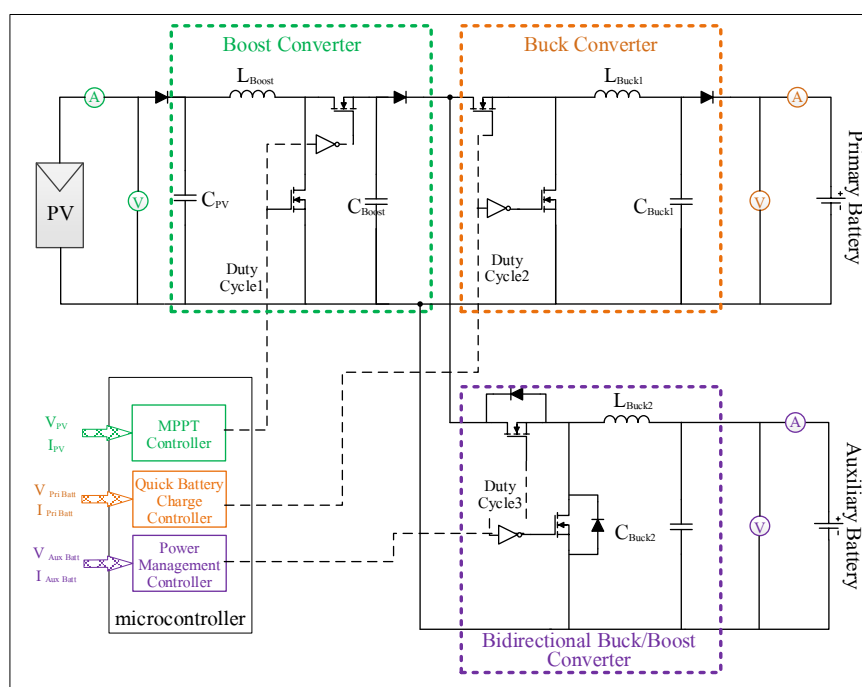


ภาพประกอบ 4-28 รูปคลื่นแรงดัน, กระแสและกำลังไฟฟ้า ของการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการลดค่าความเข้มแสง

จากภาพประกอบ 4-27 และภาพประกอบ 4-28 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเปลี่ยนไป โดยจากการทดลอง เมื่อเรามีการเพิ่มค่าความเข้มแสง ค่ากำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 12.4 W เป็น 34 W และเมื่อเราทำการลดค่าความเข้มแสง ค่ากำลังไฟฟ้าจะลดลงจาก 34 W เป็น 12.8 W เมื่อเรานำค่าที่ได้จากการทดลองที่มีการควบคุมการติดตาม มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่ากำลังไฟสูงสุดข้างต้นตามภาพประกอบ 4-23 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการควบคุมการติดตามจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งการที่ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการควบคุมมีค่าไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบ เพราะเนื่องมาจากการควบคุมการติดตามด้วยวิธีการ P&O จะมีการแกว่งที่จุดกำลังไฟสูงสุด หรืออาจเกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิมีค่าไม่เท่ากันหรือค่าความเข้มแสงมีค่าไม่คงที่ซึ่งทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจะมีค่าไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการทดสอบแต่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก หรือเราอาจจะทำการพิจารณาจากค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ โดยจะเห็นได้ว่าค่ากระแสจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์ แต่ค่าแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นเราจึงบอกได้ว่าระบบควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟสูงสุดที่ได้ทำการออกแบบ สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ

4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานเบื้องต้นของระบบฯ ที่มีการจัดสรรพลังงาน

ในการทดสอบการทำงานของระบบ ฯ จะทำการทดสอบเพื่อดูว่าระบบฯ สามารถควบคุมการจัดสรรพลังงานให้ตามโหมดการทำงานที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องทำงานไปพร้อมกับการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ โดยหน่วยประมวลผลการควบคุมทั้งหมดอยู่บนไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว ซึ่งในการทดสอบนี้ จะเป็นการรวมการทำงานของทั้งระบบที่จะประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ตัวหลัก แบตเตอรี่ตัวสำรอง และวงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 วงจร คือ วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์, วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง ตามภาพประกอบ 4-29

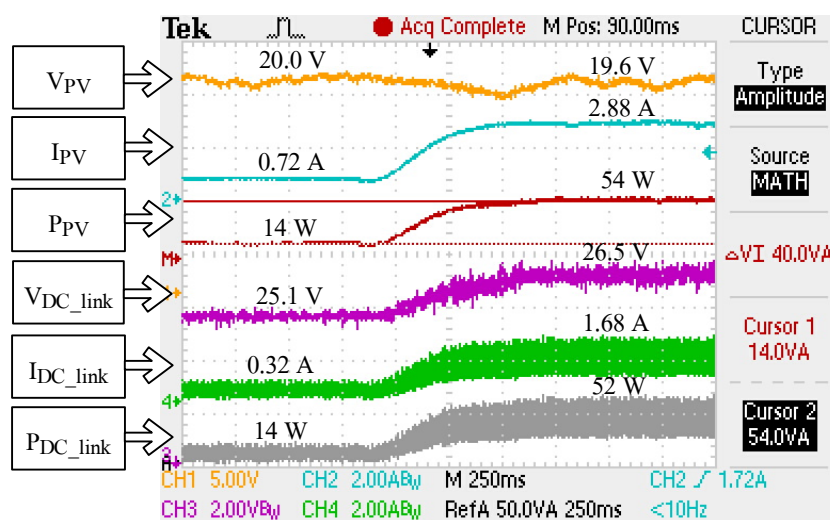


ภาพประกอบ 4-29 วงจรของทั้งระบบฯ ในงานวิจัยนี้

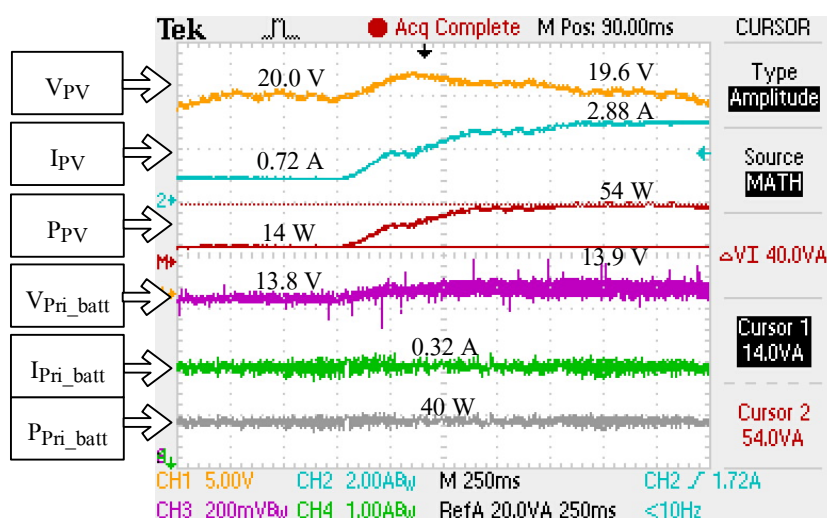
โดยวิธีการทดลอง จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจากสปอร์ตไลท์ทั้งจากความเข้มแสงน้อย ไปยังความเข้มแสงมาก โดยจะกำหนดให้แบตเตอรี่ตัวหลักมีการประจุพลังงานอยู่ในขั้นที่ 1 (State I : CC) แต่ด้วยข้อจำกัดในการทดลองที่แสงจากสปอร์ตไลท์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 55 W เราจึงให้แบตเตอรี่ตัวหลักมีการประจุพลังงานด้วยค่ากระแสคงที่ที่ 3 A เพื่อให้เห็นผลการทดลองที่ระบบควบคุมการจัดสรรพลังงานสามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้อย่างชัดเจน

โดยการทดลองจะทำให้ระบบการจัดสรรพลังงานเปลี่ยน โหมดการทำงานจากโหมดที่ 3 ซึ่งเป็นโหมดที่ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่หลัก

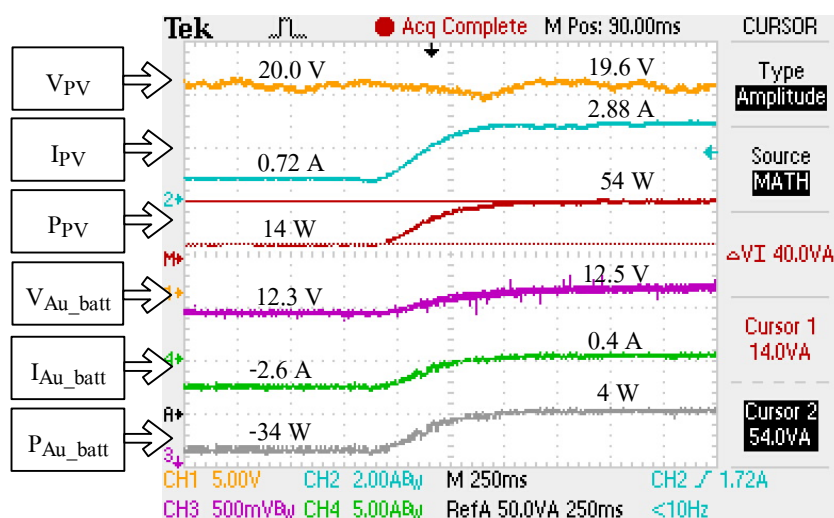
($P_{PV} - P_{loss} < P_{Primary Battery}$) เป็นโหมดการทำงานที่ 1 ซึ่งเป็นโหมดที่ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่หลัก ($P_{PV} - P_{loss} > P_{Primary Battery}$) โดยจะทำการวัดสัญญาณแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า จากเซลล์แสงอาทิตย์, จากจุดเชื่อมต่อตรงกลางหรือเอาต์พุตของวงจรบัพทคอนเวอร์เตอร์ (DC link), จากแบตเตอรี่ตัวหลัก และจากแบตเตอรี่ตัวสำรอง ว่าค่ากระแส, แรงดันหรือค่ากำลังไฟฟ้า จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามโหมดการทำงานหรือไม่ ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพประกอบ 4-30 ถึงภาพประกอบ 4-32



ภาพประกอบ 4-30 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ และของจุดเชื่อมต่อตรงกลาง (DC link) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มค่าความเข้มแสง



ภาพประกอบ 4-31 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ และของแบตเตอรี่ตัวหลัก (Primary battery) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มค่าความเข้มแสง



ภาพประกอบ 4-32 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ และของแบตเตอรี่ตัวสำรอง (Auxiliary battery) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มค่าความเข้มแสง

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 4-30 ถึงภาพประกอบ 4-32 เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ (เส้นสีส้ม : V_{PV} , เส้นสีฟ้า : I_{PV} และเส้นสีแดง : P_{PV}) จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงให้มียค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14 W เป็น 54 W และเมื่อเราทำการสังเกตค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{PV}) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์ แต่ค่าแรงดัน (V_{PV}) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งสามารถบอกได้ว่าเมื่อนำระบบการควบคุมทั้งหมดที่มีการจัดสรรพลังงานมารวมและให้ทำงานพร้อมกันในไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว ระบบควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 4-30 เมื่อเราทำการพิจารณาในส่วนจุดเชื่อมต่อตรงกลางหรือเอาต์พุตของวงจร buck converter (DC link) จะเห็นได้ว่าแรงดัน (เส้นสีม่วง : $V_{DC-link}$) ที่จุดตรงกลางที่เป็นจุดเชื่อมต่อของทั้งสามวงจรจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่ถึง 1 V เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง และค่าของแรงดันจะยังอยู่ในช่วงที่เราทำการออกแบบ ส่วนค่าของกระแส (เส้นสีเขียว : $I_{DC-link}$) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่จะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจากผลการทดลองเราก็สามารถบอกได้ว่าค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของทั้งสามวงจรที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จะส่งผลดีและเป็นไปตามที่ทำการออกแบบคือค่าของแรงดันในจุดเชื่อมต่อ

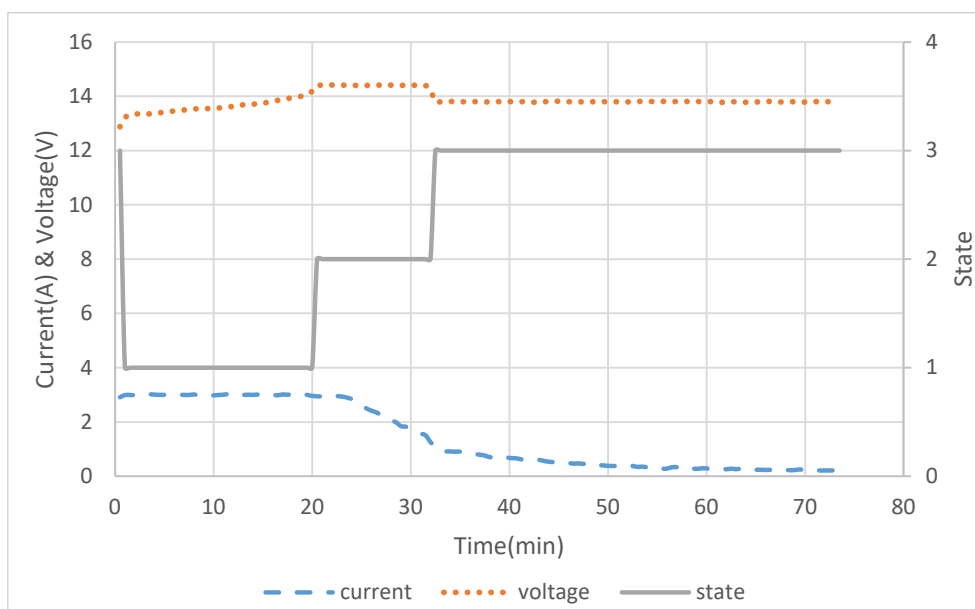
ควรมีค่าคงที่เพื่อที่จะทำให้การควบคุมการทำงานของทั้งสามการควบคุมทำงานได้อย่างง่าย และไม่เกิดการแกว่งที่อาจส่งผลให้การควบคุมเกิดของผิดพลาดได้

จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 4-31 เมื่อเราทำการพิจารณาในส่วนของ แบตเตอรี่ตัวหลัก (Primary battery) ที่มีการควบคุมการประจุพลังงานในขั้นที่ 1 ควบคุมให้มีค่ากระแสคงที่ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ากระแสของแบตเตอรี่ตัวหลัก (เส้นสีเขียว : I_{Pri_batt}) จะมีค่าค่อนข้างคงที่ ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงที่ส่งผลให้ค่าแรงดันจุดเชื่อมต่อตรงกลางหรือเป็นแรงดันอินพุตของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปในภาพประกอบ 4-30 หรือก็คือมีการรบกวนระบบควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันอินพุต แต่ผลการควบคุมในการประจุพลังงานให้มีค่ากระแสคงที่ก็ยังได้ผลการทดลองเป็นไปตามผลการทดลองเบื้องต้นที่ทำการออกแบบไว้ในการควบคุมให้มีค่ากระแสคงที่ในหัวข้อที่ 4.3.2 ส่วนค่าแรงดันของแบตเตอรี่ตัวหลัก (เส้นสีม่วง : V_{Pri_batt}) มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เพราะเนื่องจากโหลดของเราคือแบตเตอรี่ ที่ส่งผลให้แรงดันระหว่างขั้วมีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้นเราก็สามารถบอกได้ว่าระบบการประมวลผลบนไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว ที่รวมการควบคุมทั้งหมด ก็ยังสามารถควบคุมการประจุพลังงานในขั้นที่ 1 ควบคุมให้มีค่ากระแสคงที่ในการประจุได้ตามที่ต้องการ

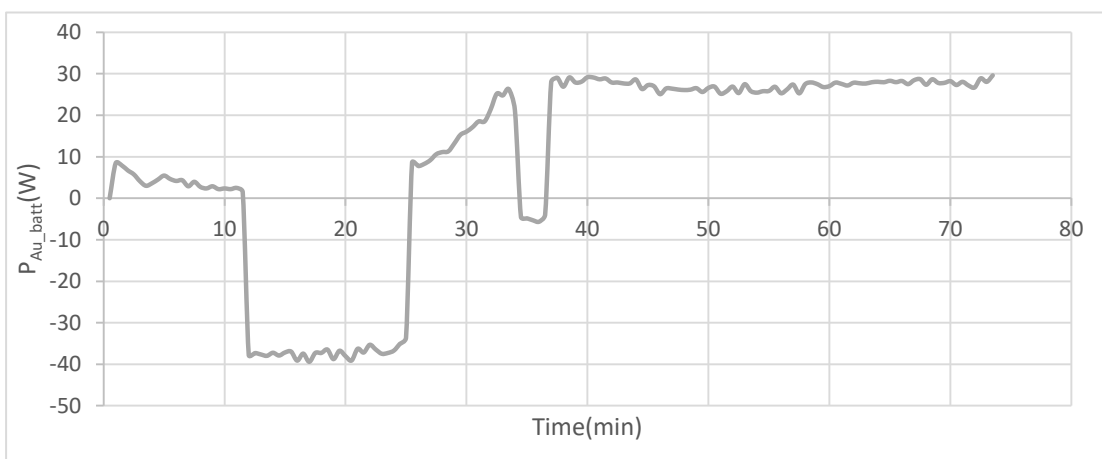
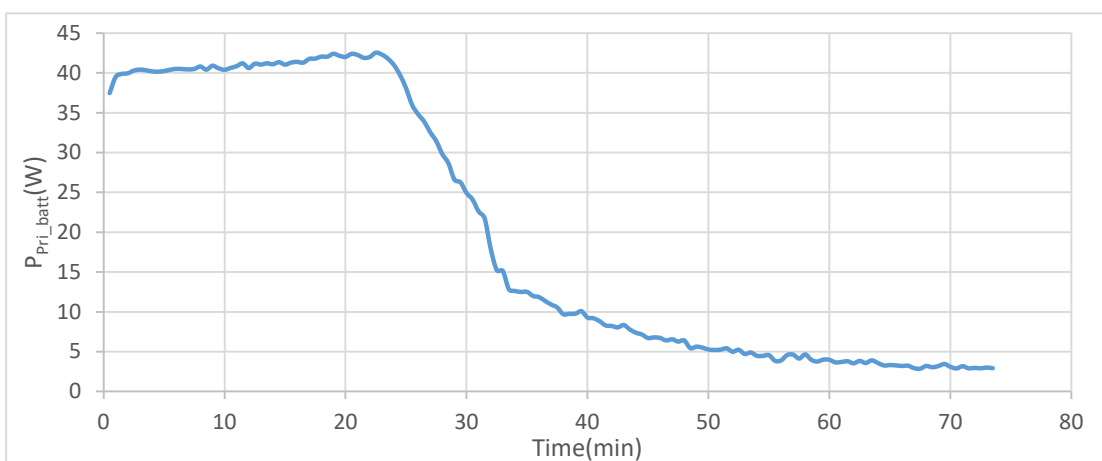
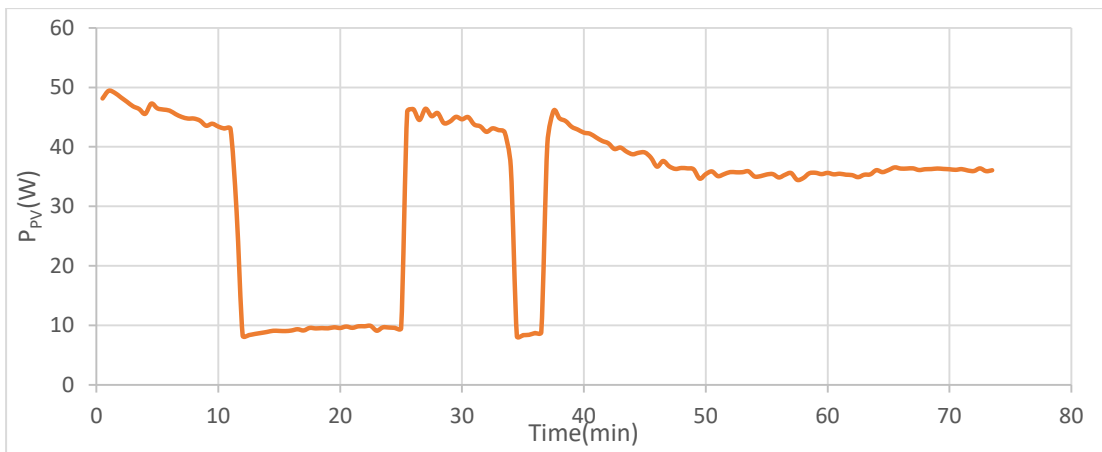
จากผลการทดลองตามภาพประกอบ 4-32 เมื่อเราทำการพิจารณาในส่วนของ แบตเตอรี่ตัวสำรอง (Auxiliary battery) จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมการจัดสรรพลังงานสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ โดยในขณะที่เริ่มต้น ระบบการจัดสรรพลังงานจะทำงานอยู่ในโหมดที่ 3 ($P_{PV} - P_{loss} < P_{Primary\ Battery}$) ซึ่งสังเกตได้จากค่ากระแสจากแบตเตอรี่ตัวสำรอง (เส้นสีเขียว : I_{Au_batt}) จะมีค่าติดลบ นั่นคือแบตเตอรี่ตัวสำรองจะกลายเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบฯ (เส้นสีเทา : P_{Au_batt} จะติดลบ) ซึ่งจ่ายพลังงานเท่ากับ -34 W เพื่อให้มีพลังงานเพียงพอในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักให้ได้ตามขั้นตอนการประจุ ที่ต้องการพลังงานเท่ากับ 40 W (ในภาพประกอบ 4-31 เส้นสีเทา : $P_{Primary\ Battery}$) รวมกับกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นประมาณ 8 W เพราะเนื่องจากพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (เส้นสีแดง : P_{PV}) มีค่าเท่ากับ 14 W ซึ่งมีค่าไม่เพียงพอ และเมื่อเราทำการเปลี่ยนค่าความเข้มแสงให้มีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมการจัดสรรพลังงานจะมีการเปลี่ยนโหมดการทำงานจากโหมดการทำงานที่ 3 เป็นโหมดการทำงานที่ 1 ($P_{PV} - P_{loss} > P_{Primary\ Battery}$) โดยดูได้จากค่ากระแสของแบตเตอรี่ตัวสำรอง (I_{Au_batt}) จะมีค่าเปลี่ยนไปเป็นบวก เนื่องจากพลังงานที่มาจากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) ที่มีค่าเท่ากับ 54 W จะมีค่ามากกว่าค่าพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลักต้องการในการประจุพลังงานให้ได้ตามขั้นตอน ที่ต้องการพลังงานเท่ากับ 40 W รวมกับกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นประมาณ 10 W ทำให้พลังงานที่เหลือ 4 W จะถูกประจุลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง (P_{Au_batt}) หรือก็คือแบตเตอรี่ตัวสำรองจะเป็นตัวรับพลังงาน ทำให้กระแสของแบตเตอรี่ตัวสำรองกลายเป็นบวก

เมื่อทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงานของทั้งระบบ จะมีค่าประมาณ 85% ซึ่งถือว่าระบบนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ดังนั้นเราก็สามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมการจัดสรรพลังงานสามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้ตามต้องการ

เมื่อมีการนำระบบควบคุมทั้งหมดมารวมกันให้มีการประมวลผลอยู่บนไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว จากผลการทดลองข้างต้นสามารถบอกได้ว่า ระบบประมวลผลบนไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์, สามารถควบคุมการประจุพลังงานในขั้นที่ 1 ควบคุมให้กระแสในการประจุมีค่าคงที่ และสามารถควบคุมการจัดสรรพลังงานให้สามารถเปลี่ยนโหมดการทำงานได้ตามที่ต้องการ ซึ่งต่อมาเราจะทำการทดลองเพื่อดูว่า ระบบประมวลผลจะสามารถควบคุมการประจุพลังงานให้เปลี่ยนขั้นตอนการประจุตามที่ได้ทำการออกแบบไว้หรือไม่



ภาพประกอบ 4-33 ผลการทดลองการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักให้ได้ตามขั้นตอนการประจุแบบ 3 ขั้นตอน

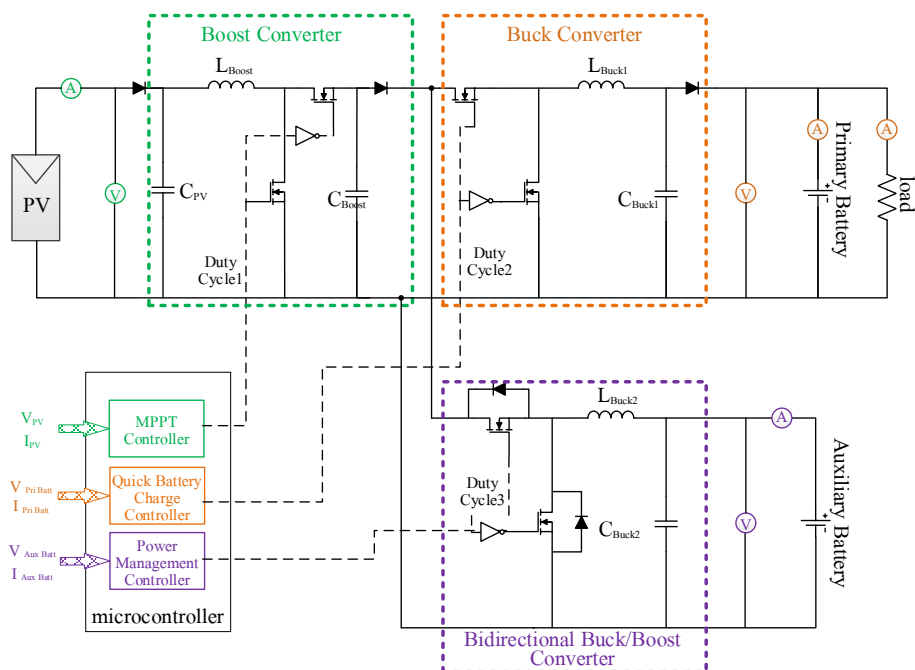


ภาพประกอบ 4-34 ค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์,ค่ากำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตัวหลัก และค่ากำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตัวสำรอง

จากผลการทดลอง ตามภาพประกอบ 4-33 จะเห็นได้ว่าตัวประมวลผลสามารถควบคุมการประจุพลังงานให้เปลี่ยนขั้นตอนการประจุได้ตามขั้นตอน ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสง และเปลี่ยนโหมคการทำงาน โดยในช่วงเวลาตั้งแต่ประมาณ 0-20 นาที จะเป็นการประจุพลังงานในขั้นที่ 1 (State1 : CC) และในช่วงเวลาประมาณ 20 -32 นาที จะเป็นการประจุพลังงานในขั้นที่ 2 (State2 : CV_{14.4}) และการประจุพลังงานในขั้นที่ 3 (State3 : CV_{13.8}) จะอยู่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 32 นาทีขึ้นไป ซึ่งในช่วงของการเปลี่ยนขั้นในการประจุจากขั้นที่ 1 ไปยังขั้นที่ 2 ได้มีการรบกวนระบบโดยการลดค่าความเข้มแสงในช่วงเวลา 12- 25 นาที และจะทำการปรับค่าความเข้มแสงให้มีค่าเพิ่มขึ้นดังเดิม และเราจะมีกรรบกวนระบบอีกครั้ง โดยการลดค่าความเข้มแสงในขณะที่ทำการประจุพลังงานอยู่ในขั้นที่ 3 ในช่วงเวลา 34-37 นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถึงแม้เราจะมีกรรบกวนระบบในขณะที่มีการควบคุมการประจุพลังงานให้ได้ตามขั้นตอนการประจุ แต่ระบบควบคุมก็ยังคงสามารถรักษาขั้นในการประจุพลังงานไว้ได้ และสามารถควบคุมการเปลี่ยนขั้นในการประจุได้ตามขั้นตอนที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยระบบควบคุมการจัดสรรพลังงานสามารถเปลี่ยนโหมคการทำงานได้ตามเงื่อนไข ดังภาพประกอบ 4-34

จากภาพประกอบ 4-34 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักจะมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงของการประจุพลังงานด้วยค่ากระแสคงที่และมีค่าลดลงเรื่อยในการประจุพลังงานด้วยค่ากระแสคงที่ เนื่องจากแบตเตอรี่มีการประจุใกล้เต็ม ซึ่งทำให้พลังงานที่แบตเตอรี่ตัวสำรองได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น โดยระบบการจัดสรรพลังงานสามารถทำการควบคุมได้ตามที่ทำการออกแบบไว้ ดังนั้นเราจึงบอกได้ว่าบนหน่วยประมวลไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียวสามารถรวมการควบคุมทั้งสามการควบคุมได้ คือ เราสามารถควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์, สามารถควบคุมการประจุพลังงานให้ได้ตามขั้นตอนการประจุ และสามารถควบคุมการจัดสรรพลังงานภายในระบบให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

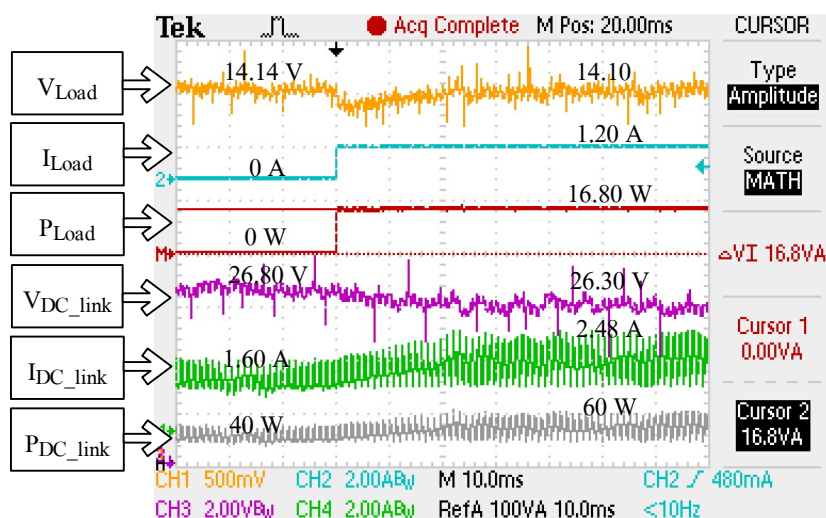
4.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบฯ เมื่อมีต่อโหลดภายนอกเพิ่มเติม เพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งานจริง



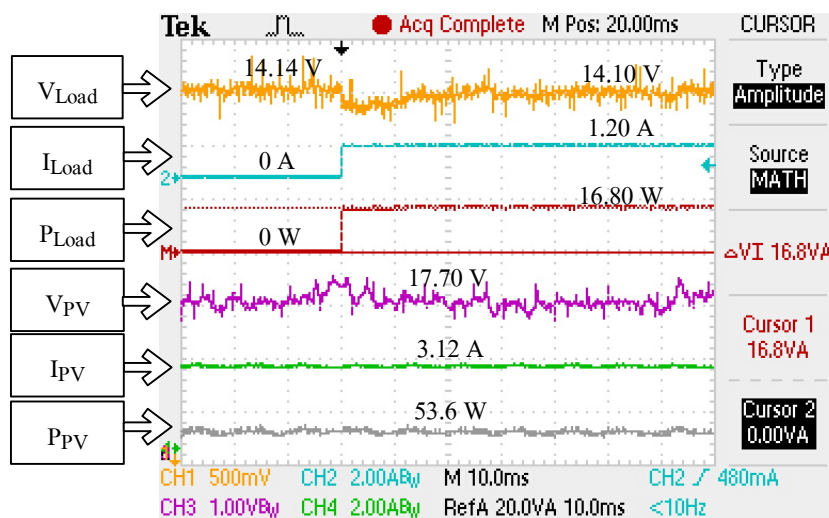
ภาพประกอบ 4-35 วงจรของทั้งระบบฯ ในงานวิจัยนี้ที่มีการต่อ โหลดภายนอกเพิ่มเติม

จากภาพประกอบ 4-35 แสดงรูปวงจรของทั้งระบบฯ ที่มีการควบคุมการทำงานแต่ ละวงจร และมีการต่อ โหลดเพิ่มเติมจากภายนอก โดยในการทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อดูว่าเมื่อมี การนำระบบฯ ไปใช้งานจริงคือมีการต่อ โหลดกับระบบฯ ระบบที่ทำการออกแบบจะสามารถ ทำงานได้ตามที่ต้องการหรือสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่

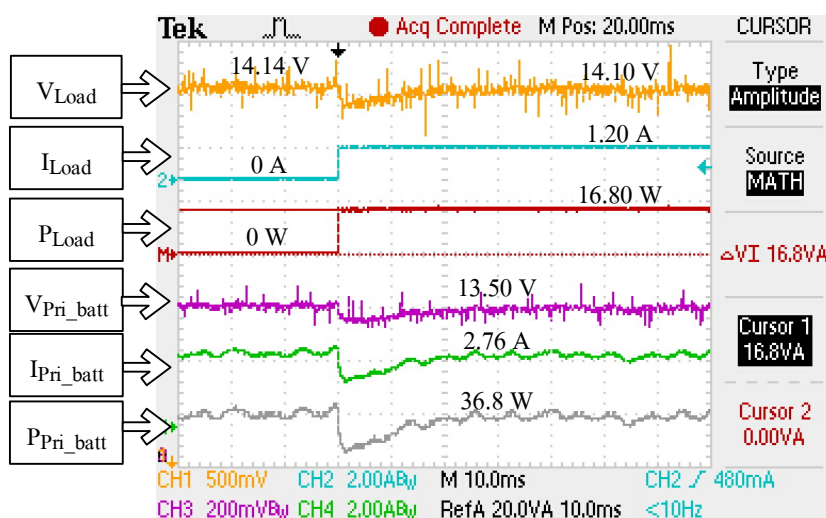
ในการทดลองจะทำการรบกวนระบบฯ โดยการเพิ่ม โหลดจากภายนอกอย่าง ทันทีทันใด, คงค่าของความเข้มแสงให้มีค่าคงที่ และกำหนดให้แบตเตอรี่ตัวหลักทำการประจุ พลังงานอยู่ในขั้นที่ 1 (State I : CC) และแบตเตอรี่ตัวสำรองทำงานอยู่ในโหมดที่ 3 ซึ่งได้ผลการ ทดลองดังภาพประกอบ 4-36 ถึงภาพประกอบ 4-39



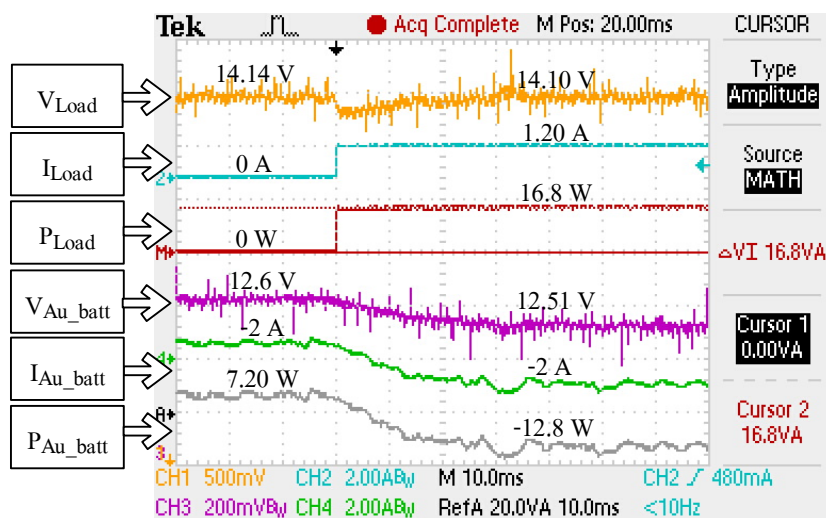
ภาพประกอบ 4-36 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของโหลด และจุดเชื่อมต่อตรงกลาง (DC link) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มโหลดจากภายนอก



ภาพประกอบ 4-37 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของโหลด และเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่มโหลดจากภายนอก



ภาพประกอบ 4-38 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของโหลด และของ แบตเตอรี่ตัวหลัก (Primary battery) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่ม โหลดจากภายนอก



ภาพประกอบ 4-39 รูปคลื่นแรงดัน, กระแส และกำลังไฟฟ้า ของโหลด และของ แบตเตอรี่ตัวสำรอง (Auxiliary battery) ในการจัดสรรพลังงานภายในระบบ เมื่อเพิ่ม โหลดจากภายนอก

จากภาพประกอบ 4-36 ถึงภาพประกอบ 4-39 ถ้าเราทำการพิจารณาในส่วนเฉพาะของโหลด จะเห็นได้ว่าการเพิ่มโหลดอย่างทันทีทันใด ค่ากระแสของโหลด (เส้นสีฟ้า : I_{Load}) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันทีทันใด ส่วนค่าของแรงดันโหลด (เส้นสีส้ม : V_{Load}) จะมีค่าค่อนข้างคงที่ เพราะเนื่องจากโหลดมีการเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ตัวหลัก ซึ่งค่าแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่จะเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดเล็กน้อยมีค่า $\%OS = 1.39 \%$ ในช่วงที่มีการเพิ่มโหลด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด ทำให้แรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่มีการแกว่งเกิดขึ้นเล็กน้อย

จากภาพประกอบ 4-36 เมื่อเราทำการพิจารณาในส่วนของโหลดกับจุดเชื่อมต่อตรงกลาง จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่าโหลดภายนอกอย่างทันทีทันใด ค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อตรงกลาง (เส้นสีม่วง : V_{DC_link}) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 V จากค่าแรงดันประมาณ 26 V ซึ่งถือเป็นผลดีกับระบบและเป็นตามที่ออกแบบที่ต้องการให้ค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อตรงกลางมีค่าแรงดันคงที่ เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมการทำงานของแต่ละวงจร ส่วนค่าของกระแสที่จุดเชื่อมต่อตรงกลางหรืออินพุตของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ เราจะเห็นได้ว่าการเพิ่มโหลดภายนอก ค่ากระแสอินพุตของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อจ่ายพลังงานให้กับโหลด เพราะโหลดจะต่อผ่านวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

จากภาพประกอบ 4-37 เมื่อเราทำการพิจารณาในส่วนของโหลดและเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเรากำหนดให้ค่าความเข้มแสงมีค่าคงที่ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มโหลดจากภายนอกเข้าระบบ ค่ากระแส (เส้นสีม่วง : I_{PV}) และแรงดัน (เส้นสีเขียว : V_{PV}) จากเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพราะเนื่องจากแบตเตอรี่จะเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่มาก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้อยมาก และสามารถสังเกตได้จากแรงดันที่จุดเชื่อมต่อตรงกลางที่แสดงดังภาพประกอบ มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากเช่นกัน ดังนั้นเราจึงบอกได้ เมื่อมีการเพิ่ม โหลดจากภายนอกเข้าสู่ระบบ จะไม่ส่งผลกระทบต่อควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพประกอบ 4-38 เมื่อเราทำการพิจารณาในส่วนของโหลดกับแบตเตอรี่ตัวหลัก จะเห็นได้ว่าการเพิ่มโหลดจากภายนอกอย่างทันทีทันใดซึ่งสังเกตได้จากค่ากระแสโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น (เส้นสีฟ้า : I_{Load}) ระบบควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลักที่ทำการควบคุมการประจุในขั้นที่ 1 จะยังคงสามารถควบคุมให้มีค่ากระแสคงที่ในการประจุพลังงานได้ (เส้นสีเขียว : I_{Pri_batt}) โดยมีค่า $\%OS = 25\%$ และ $T_s = 20 \text{ ms}$ ซึ่งค่าผลตอบแทนที่ได้รับจะเห็นได้ว่ามีค่าที่มากกว่าที่ได้ทำการออกแบบไว้หรือที่ได้จากทดสอบการควบคุมการป้อนกลับเพื่อให้กระแสเอาท์พุทมีค่าคงที่ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ในหัวข้อที่ 4.2.2 เพราะเนื่องจากแบตเตอรี่จะทำตัวเป็น

เหมือนกับตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ตัวหนึ่ง ซึ่งค่าขนาดของตัวเก็บประจุถ้ามีขนาดใหญ่ก็จะทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่ช้าลงดังนั้นผลที่ได้รับจึงจะเห็นได้ว่าค่าของเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในส่วนนี้เราก็สามารถที่จะทำการพัฒนาต่อได้ในงานในอนาคตโดยการเพิ่มเวลาในการชาร์จตัวอย่างให้มีค่าเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งจะเป็นลดจำนวนครั้งในการชาร์จตัวอย่างและอาจจะสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ลงได้ ส่วนแรงดันของโหลดและแรงดันของแบตเตอรี่ตัวหลักจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เพราะเนื่องจากการต่อขนาดกัน

จากภาพประกอบ 4-39 เมื่อเราทำการพิจารณาในส่วนของโหลดกับแบตเตอรี่ตัวสำรอง จะเห็นได้ว่า ก่อนที่เราจะทำการเพิ่มโหลดจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ระบบจัดสรรพลังงานจะทำงานอยู่ในโหมดที่ 1 คือพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีพลังงานเท่ากับ 53.6 W ดังแสดงในภาพประกอบ 4-37 เส้นสีเทา (P_{PV}) มีค่ามากกว่าพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลักต้องการในการประจุพลังงานให้ได้ตามขั้นตอนที่ต้องการพลังงานเท่ากับ 36.8 W ดังแสดงในภาพประกอบ 4-38 เส้นสีเทา (P_{Pri_batt}) ดังนั้นพลังงานที่เหลือประมาณ 7.2 W (เส้นสีเทา : P_{Au_batt}) จะทำการประจุลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง แต่เมื่อมีการเพิ่มโหลดจากภายนอกเข้าสู่ระบบที่ต้องการพลังงาน 16.8 W (เส้นสีแดง : P_{Load}) ระบบจัดสรรพลังงานจะนำพลังงานที่เหลือจากการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ตัวหลัก ซึ่งมีพลังงานเหลือเท่ากับ 7.2 W (ในตอนแรกพลังงานส่วนนี้จะถูกประจุลงแบตเตอรี่ตัวสำรอง) จ่ายให้กับโหลดที่มีการเพิ่มเติมเข้ามา แต่พลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงมีค่าไม่เพียงพอต่อพลังงานที่โหลดต้องการ ดังนั้นระบบการจัดสรรพลังงานจะเปลี่ยนโหมดการทำงานไปยังโหมดที่ 3 โดยแบตเตอรี่ตัวสำรองจะเป็นตัวช่วยจ่ายพลังงานให้กับโหลดเพิ่มเติมประมาณ 12.8 W ในขณะที่แบตเตอรี่ตัวหลักยังคงประจุพลังงานอยู่ในขั้นที่ 1 เพื่อให้สามารถประจุได้อย่างรวดเร็วและพร้อมสำหรับนำไปใช้กับอุปกรณ์หรือโหลดภายนอก เมื่อภายในระบบไม่มีพลังงานสำรองเหลือ

ดังนั้นเราก็สามารถสรุปได้ว่า การนำระบบฯ ไปใช้งานจริงคือมีการต่อโหลดกับระบบฯ ระบบที่ทำการออกแบบสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการหรือสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งระบบโดยรวมจะประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ 2 ตัวคือแบตเตอรี่ตัวหลักและแบตเตอรี่ตัวสำรอง วงจรคอนเวอร์เตอร์ 3 วงจร คือ วงจรบักคอนเวอร์เตอร์ (Buck converter) วงจรบูทคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter) และวงจรคอนเวอร์เตอร์วงจรคอนเวอร์เตอร์บัก/บูทแบบ 2 ทาง (Bidirectional Buck/Boost Converter) โดยภายในระบบประกอบไปด้วยระบบควบคุม 3 ส่วนด้วยกัน คือ การควบคุมการติดตามหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่จะทำการควบคุมผ่านวงจรบูทคอนเวอร์เตอร์, การควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่แบบรวดเร็วที่จะทำการควบคุมผ่านวงจรบักคอนเวอร์เตอร์ และการจัดสรรพลังงานภายในระบบที่จะทำการควบคุมผ่านวงจรคอนเวอร์เตอร์บัก/บูทแบบ 2 ทาง ซึ่งการควบคุมทั้งสามส่วนนี้จะถูกประมวลผลอยู่บนไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว

ในการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการรบกวนและสังเกต (P&O method) จากผลการจำลองและผลการทดลอง สามารถที่จะติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มจากแสงอาทิตย์ หรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลด และค่าพลังงานที่ได้รับจากการควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จะมีค่ากำลังไฟฟ้าที่เป็นไปตามกราฟ IV curve และกราฟ PV curve ที่ได้การจำลองและการทดลองของ ซึ่งเป็นตัวยืนยันได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าอยู่ที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

ในการควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการ TSC (Three State Changing) ในการประจุพลังงาน ซึ่งจากผลการจำลองและผลการทดลอง สามารถที่จะควบคุมการประจุพลังงานให้เป็นไปตามขั้นตอนในการประจุได้ และมีผลการทดลองเปรียบเทียบระยะเวลาในการประจุและความปลอดภัยในการประจุพลังงานด้วยวิธีการ TSC กับวิธีการประจุพลังงานแบบทั่วไป คือการประจุแบบค่าแรงดันคงที่ สามารถบอกได้ว่า วิธีการประจุพลังงานด้วยวิธี TSC จะมีระยะเวลาในการประจุที่สั้นกว่าและมีความปลอดภัยในการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่มากกว่าวิธีการประจุพลังงานแบบทั่วไป

ในการควบคุมการจัดสรรพลังงาน ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการจัดสรรพลังงานในระบบออกแบบ 3 โหมดการทำงาน คือ โหมดที่ 1 พลังงานที่ได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลักต้องการในการประจุพลังงานให้ได้ตามขั้นตอนการประจุ (แบตเตอรี่

ตัวสำรองจะทำการรับพลังงานที่เหลือ), โหมดที่ 2 พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลักต้องการในการประจุพลังงานให้ได้ตามขั้นตอนการประจุ (ระบบตัดแบตเตอรี่ตัวสำรองออก), โหมดที่ 3 พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าพลังงานที่แบตเตอรี่ตัวหลักต้องการในการประจุพลังงานให้ได้ตามขั้นตอนการประจุ (แบตเตอรี่จะจ่ายพลังงาน) , จากผลการจำลองและผลการทดลอง สามารถควบคุมให้ระบบการจัดสรรพลังงานสามารถทำงานได้ตามโหมดการทำงาน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ เราสามารถทำการควบคุมการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ตามต้องการ โดยสามารถควบคุมการติดตามหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์, ควบคุมการประจุพลังงานลงแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว และควบคุมการจัดสรรพลังงานภายในระบบ ซึ่งการควบคุมทั้งหมดสามารถทำงานอยู่บนหน่วยประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียวได้

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

- (1) ค่าที่รับจากตัวตัวกระแสมีค่าไม่คงที่ และมีค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งเราอาจจะทำการออกแบบตัวตรวจวัดให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่านี้ หรืออาจหาซื้อตัวตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพมากกว่านี้
- (2) การทำงานของหน่วยประมวลผลในการควบคุมการประจุพลังงานไม่สามารถทำงานได้เร็วเทียบเท่ากับการออกแบบ ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองไม่เป็นไปตามทฤษฎี ที่เกิดจากการทำงานแบบที่ละบรรทัด ซึ่งเราอาจจะมี การนำตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวอื่นที่สามารถทำงานแบบขนานมาใช้แทน เช่น FPGA
- (3) ค่าความเข้มแสงที่ได้จากสปอร์ตไลท์ในการทดลองมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากความรื้อ ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่คงที่ ซึ่งเราจะแก้ไข โดยการเปลี่ยนแสงสว่างอื่นที่สามารถให้ค่าความเข้มแสงคงที่และไม่ก่อให้เกิดความร้อน เช่น หลอดไฟแอลอีดี

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

- (1) จัดทำวงจรเป็นแบบแผ่นปริ้นท์ 2 หน้า เพื่อลดขนาดของวงจรให้มีความกะทัดรัดมากขึ้น เพื่อให้เหมาะแก่การใช้งาน
- (2) ทำการเปลี่ยนชนิดของแบตเตอรี่ตัวสำรอง ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานให้มากขึ้น
- (3) เพิ่มส่วนของจอแสดงผลและทำการเพิ่มในส่วนการติดตามผลการดำเนินงานได้จากอินเตอร์เน็ต
- (4) พัฒนาความเร็วในการประจุพลังงาน ให้สามารถประจุพลังงานได้อย่างรวดเร็วเพิ่มมากขึ้น โดยยังคงเป็นการประจุอย่างมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยในการประจุ
- (5) พัฒนาการทำงานของระบบฯ ให้มีการใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ที่น้อยลง เพื่อเป็นการลดกำลังสูญเสียภายในวงจรคอนเวอร์เตอร์

บรรณานุกรม

- [1] H. Bellia, R. Youcef, M. Fatima, “A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB,” *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2014, Vol. 3, pp. 53-61.
- [2] Samer Alsadi, Basim Alsayid, “Maximum Power Point Tracking Simulation for Photovoltaic Systems Using Perturb and Observe Algorithm”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, Vol. 2, Issue 6, pp. 80-85, December 2012.
- [3] T. Esum and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.
- [4] C. Hua and C. Shen, “Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1998. APEC '98. Conference Proceedings 1998. , Thirteenth Annual, 1998, vol. 2, pp. 679–685.
- [5] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, Jul. 2005.
- [6] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimizing duty cycle perturbation of P&O MPPT technique,” in *Proc. IEEE 35th Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, 2004, vol. 3, pp. 1939–1944.
- [7] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimizing Sampling Rate of P&O MPPT Technique,”. *IEEE Power Electronics Specialist Conference*, 2004, vol. 3, pp. 1945-1949
- [8] S. J. Chiang, H.-J. Shieh, and M.-C. Chen, “Modeling and control of PV charger system with SEPIC converter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4344–4353, Nov. 2009
- [9] N. Karami, N. Moubayed, and R. Outbib, “Analysis of an irradiance adaptative PV based battery floating charger,” in *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2011, pp. 1852–1858.
- [10] S. Armstrong, M. E. Glavin, and W. G. Hurley, “Comparison of battery charging algorithms for stand alone photovoltaic systems,” in *Proc. IEEE PESC*, Jun. 15–19, 2008, pp. 1469–1475.

- [11] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications," *Proc. Inst. Elect. Eng.—Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 2, pp. 191–197, Mar. 2004.
- [12] H. T. Yau, Q. C. Liang, and C. T. Hsieh, "Maximum power point tracking and optimal Li-ion battery charging control for photovoltaic charging system," *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 64, pp. 822–832, 2012.
- [13] H.-T. Yau, C.-J. Lin, and Q.-C. Liang, "PSO Based PI Controller Design for a Solar Charger System," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, 2013.
- [14] Robert W. Erickson, and Dragan Maksimovic, *Fundamental of Power Electronics*. Norwell, MA: Kluwer, 2001.
- [15] D. Dondi, A. Bertacchini, D. Brunelli, L. Larcher, and L. Benini, "Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, pp. 2759–2766, Jul. 2008.
- [16] H. Fakhm, D. Lu, and B. Francois, "Power Control Design of a Battery Charger in a Hybrid Active PV Generator for Load-Following Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 85–94, Jan. 2011.
- [17] L. W. Yao, J. A. Aziz, P. Y. Kong, and N. R. N. Idris, "Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/simulink," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 1729–1734.
- [18] M. H. Taghvaei, M. A. M. Radzi, S. M. Moosavain, Hashim Hizam and M. Hamiruce Marhaban, "A Current and Future Study on Non-isolated DC–DC Converters for Photovoltaic Applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 17, pp. 216–227, Jan. 2013

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

**วิธีการประมาณค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบ
เวลาไม่ต่อเนื่องหรือในรูปแบบของดิจิทัล ด้วยวิธีการประมาณจากสมการออยเลอร์**

วิธีในการประมาณค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องหรือในรูปแบบของดิจิทัล โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการประมาณจากสมการออยเลอร์ (Euler equation) ซึ่งมีคำจำกัดความของอนุพันธ์ของตัวแปรได้ว่า

$$\dot{x}(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\delta t} \quad (\text{ก-1})$$

ถ้ากำหนดให้ $\delta t = T_a =$ คาบเวลาในการซิกตัวอย่าง ถ้าสมมติให้ค่าเวลา T_a มีค่าน้อยมาก (มีหน่วยเป็นวินาที) เราจะสามารถประมาณสมการ (ก-1) ได้ดังนี้

$$\dot{x}(t) \cong \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (\text{ก-2})$$

โดยที่ T_a = คาบเวลาที่ใช้ในการสุ่มข้อมูลมีหน่วยเป็นวินาที $T_a = t_{k+1} - t_k$
 k = เลขจำนวนเต็ม
 $x(k)$ = ค่าของ $x(t)$ ที่เวลา t_k
 $x(k+1)$ = ค่าของ $x(t)$ ที่เวลา t_{k+1}

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวซดเซชแบบเฟสนำหน้า – ล้ำหลังที่อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่องสมการที่ (ก-3) เราสามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$G_c(s) = G_{c0} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right) \left(1 + \frac{\omega_L}{s}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)} \quad (\text{ก-3})$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่

$$G_c(s) = \frac{v_c(s)}{v_e(s)} = G_{c0} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right) \left(1 + \frac{\omega_L}{s}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)} \quad (\text{ก-4})$$

$$\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right) v_c(s) = G_{c0} \left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right) \left(1 + \frac{\omega_L}{s}\right) v_e(s)$$

$$v_c(s) + \frac{s}{\omega_p} v_c(s) = G_{c0} \left(1 + \frac{\omega_L}{s} + \frac{s}{\omega_z} + \frac{\omega_L}{\omega_z}\right) v_e(s)$$

$$\begin{aligned}
v_c(s) + \frac{s}{\omega_p} v_c(s) &= G_{c0} v_e(s) + G_{c0} \frac{\omega_L}{s} v_e(s) + G_{c0} \frac{s}{\omega_z} v_e(s) + G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} v_e(s) \\
s v_c(s) + \left(\frac{1}{\omega_p} \right) s^2 v_c(s) &= (G_{c0}) s v_e(s) + (G_{c0} \omega_L) v_e(s) \\
&\quad + \left(\frac{G_{c0}}{\omega_z} \right) s^2 v_e(s) + \left(G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} \right) s v_e(s)
\end{aligned} \tag{ก-5}$$

สมมติว่าค่าเริ่มต้นของตัวแปร $v_c(0)$ และ $v_e(0)$ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (ก-5) เราจะได้ว่า

$$\dot{v}_c(t) + \left(\frac{1}{\omega_p} \right) \ddot{v}_c(t) = (G_{c0}) \dot{v}_e(t) + (G_{c0} \omega_L) v_e(t) + \left(\frac{G_{c0}}{\omega_z} \right) \ddot{v}_e(t) + \left(G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} \right) \dot{v}_e(t) \tag{ก-6}$$

จากคำจำกัดความของออยเลอร์เราจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
v_c(t) &= v_c(k) \\
\dot{v}_c(t) &= \frac{v_c(k+1) - v_c(k)}{T_s} \\
\ddot{v}_c(t) &= \frac{\dot{v}_c(k+1) - \dot{v}_c(k)}{T_s} = \frac{v_c(k+2) - 2v_c(k+1) + v_c(k)}{T_s^2}
\end{aligned} \tag{ก-7}$$

และ

$$\begin{aligned}
v_e(t) &= v_e(k) \\
\dot{v}_e(t) &= \frac{v_e(k+1) - v_e(k)}{T_s} \\
\ddot{v}_e(t) &= \frac{\dot{v}_e(k+1) - \dot{v}_e(k)}{T_s} = \frac{v_e(k+2) - 2v_e(k+1) + v_e(k)}{T_s^2}
\end{aligned} \tag{ก-8}$$

แทนสมการที่ (ก-7) และสมการที่ (ก-8) ลงในสมการที่ (ก-6)

$$\begin{aligned}
&\left(\frac{v_c(k+1) - v_c(k)}{T_s} \right) + \left(\frac{1}{\omega_p} \right) \left(\frac{v_c(k+2) - 2v_c(k+1) + v_c(k)}{T_s^2} \right) \\
&= (G_{c0}) \left(\frac{v_e(k+1) - v_e(k)}{T_s} \right) + (G_{c0} \omega_L) (v_e(k)) \\
&\quad + \left(\frac{G_{c0}}{\omega_z} \right) \left(\frac{v_e(k+2) - 2v_e(k+1) + v_e(k)}{T_s^2} \right) + \left(G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} \right) \left(\frac{v_e(k+1) - v_e(k)}{T_s} \right)
\end{aligned} \tag{ก-9}$$

ดังนั้นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง สมการที่ (ก-4) สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{\omega_p} \right] v_c(k+2) &= \left[\frac{1}{\omega_p} - T_s \right] v_c(k+1) + \left[T_s - \frac{1}{\omega_p} \right] v_c(k) + \left[\frac{G_{c0}}{\omega_z} \right] v_e(k+2) \\ &+ \left[T_s G_{c0} - \frac{2G_{c0}}{\omega_z} + T_s G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} \right] v_e(k+1) \\ &+ \left[-T_s G_{c0} + T_s^2 G_{c0} \omega_L + \frac{G_{c0}}{\omega_z} - T_s G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} \right] v_e(k) \end{aligned} \quad (ก-10)$$

เมื่อเรากำหนดให้

$$\begin{aligned} v_c(k+1) &= v_c(k) \\ v_c(k) &= v_c(k-1) \end{aligned} \quad (ก-11)$$

และ

$$\begin{aligned} v_e(k+1) &= v_e(k) \\ v_e(k) &= v_e(k-1) \end{aligned} \quad (ก-12)$$

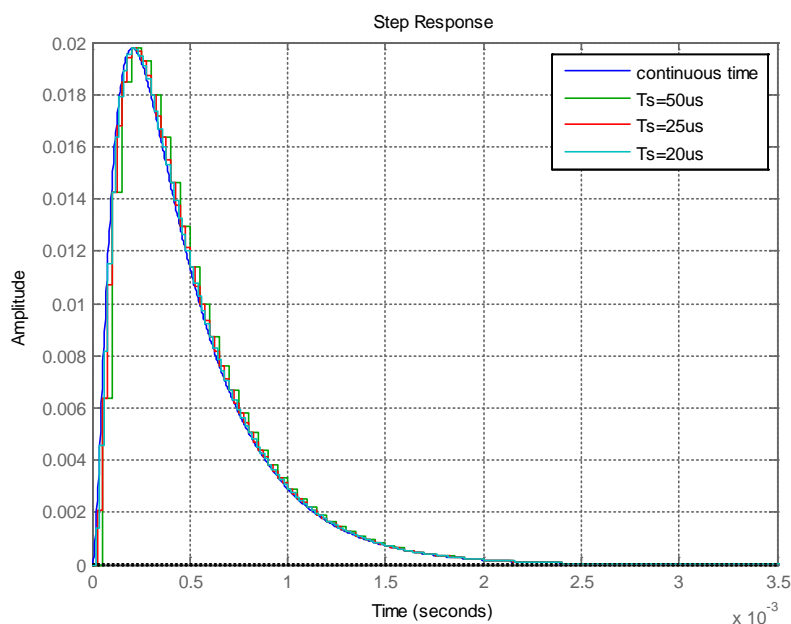
ทำการแทนค่าสมการที่ (ก-11) และสมการที่ (ก-12) ในสมการที่ (ก-10) จะได้สมการที่สามารถนำไปเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{\omega_p} \right] v_c(k) &= \left[\frac{1}{\omega_p} - T_s \right] v_c(k-1) + \left[T_s - \frac{1}{\omega_p} \right] v_c(k-2) + \left[\frac{G_{c0}}{\omega_z} \right] v_e(k) \\ &+ \left[T_s G_{c0} - \frac{2G_{c0}}{\omega_z} + T_s G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} \right] v_e(k-1) \\ &+ \left[-T_s G_{c0} + T_s^2 G_{c0} \omega_L + \frac{G_{c0}}{\omega_z} - T_s G_{c0} \frac{\omega_L}{\omega_z} \right] v_e(k-2) \end{aligned} \quad (ก-13)$$

จากการออกแบบฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.1 สมการที่ (3-45) จะได้ค่าของตัวแปร $G_{c0} = 0.3125$, $\omega_p = 1.417 \times 10^5 \text{ rad/s}$, $\omega_z = 6.964 \times 10^3 \text{ rad/s}$, $\omega_L = 3.141 \times 10^3 \text{ rad/s}$ และค่าคาบเวลาในการสุ่มข้อมูล (T_a) ที่ใช้ในการควบคุมแบบดิจิทัลหรือที่ใช้ในการประมาณค่าอัตราขยายของตัวควบคุมที่อยู่ในรูปของตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous time controller) ให้อยู่ในรูปแบบของตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time controller) ส่วนใหญ่จะเลือกค่าความถี่ในการสุ่มให้มีค่าประมาณ 4-10 เท่าของช่วงความถี่ในการทำงานของระบบเปิด (Bandwidth frequency) หรือความถี่ตัดศูนย์ (cut-off

frequency : f_c) ซึ่งในการทดลองในครั้งนี้ได้เลือกให้ค่าความถี่ในการสุ่ม ให้มีค่าเป็น 4 เท่าของความถี่ตัดศูนย์ โดยจากการออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง ความถี่ตัดศูนย์มีค่าเท่ากับ 3.14×10^4 rad/s หรือประมาณ 5 kHz ดังนั้นค่าความถี่ในการสุ่มจะมีค่าเท่ากับ 20 kHz หรือคาบเวลาในการสุ่ม (T_a) มีค่าประมาณ 50×10^{-6} วินาที

เมื่อทำการแปลงสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง ให้อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้แล้ว ในขั้นต่อมาเราจะทำทดสอบผลการประมาณค่า โดยการทดสอบจะทำการทดสอบที่ค่าความถี่ในการสุ่มมีค่าเป็น 4 เท่า (50×10^{-6} วินาที), 8 เท่า (25×10^{-6} วินาที) และ 10 เท่า (20×10^{-6} วินาที), เพื่อเป็นการตรวจสอบเช็คผลตอบสนองของระบบว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า - ล้าหลัง ที่อยู่ในรูปตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่องมากน้อยเพียงใด โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการทดสอบ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังภาพประกอบ ก-1



ภาพประกอบ ก-1 ผลการจำลองเปรียบเทียบการประมาณค่าตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่องด้วยตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องที่อัตราการสุ่มข้อมูลต่างกัน โดยใช้ค่าจำกัดความของสมการออยเลอร์

จากภาพประกอบ ก-1 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการสุ่มข้อมูล (T_a) มีค่าน้อยๆ การประมาณค่าอัตราขยายของตัวควบคุมที่อยู่ในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง จะมีค่าเข้าใกล้ระบบต้นฉบับที่อยู่ในรูปแบบของตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง

ภาคผนวก ข
การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Design and Development of A Stand-Alone Solar Energy Harvesting System by MPPT and Quick Battery Charging

Thanyanut Lueangamornsiri*, Kittikun Thongpull, Kusumal Chalermyanont, Warit Wichakool

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Prince of Songkla University, Hat Yai

Songkhla 90112, Thailand

L.thanyanut@gmail.com*, kittikhun.t@psu.ac.th, kusumal.c@psu.ac.th, warit.wi@psu.ac.th

Abstract— This paper presents a solar energy harvesting system applied especially for the flood warning system. The proposed topology is a stand-alone system that is required to harvest the maximum energy from the photovoltaic (PV) panel to charge batteries. Perturb and Observe method (P&O) is used to control converters using for Maximum Power Point Tracking (MPPT). Additionally, a Three-Stage Charging (TSC) method is used to quickly and safely charge the battery. The power management technique between the maximum power point tracking and the power charging processes is also proposed. The simulation results show that the P&O method can efficiently track the maximum power and the TSC method can properly control the charging process. Moreover, the MPPT method and optimal charging of the battery can work together with the proposed power management algorithm.

Keywords— Photovoltaic (PV); Three-Stage Charging (TSC); Maximum Power Point Tracking (MPPT); Perturb and Observe method (P & O Method)

I. INTRODUCTION

At present, a renewable energy is one of the features that has been used in many applications, especially the use of a photovoltaic (PV) panel because it provides endless, clean and easy to use energy of the PV panel [1]. The use of a PV panel at maximum efficiency is to extract the Maximum Power Point (MPP) of the PV panel [2]. To extract the maximum value, it is necessary to calculate how to keep the system running at the MPP. This method is called the method of Maximum Power Point Tracking (MPPT) [3]-[7]. There are many factors that affect the MPPT control such as temperature, light intensity and load. The temperature and light intensity are caused by the change of environment. If the light intensity is changed, it will directly affect the current produced by the PV panel resulting in the deviated MPP. Also if the temperature is changed, it will directly affect the voltage of the PV panel and the MPP is changed. If the load connected to the PV panel is changed, the MPP will be changed as well.

Since the energy from a PV panels is available for limited time, depending on the duration of sunlight and weather, or environmental conditions in each period. The system may lack of reliability if it does not receive the maximum power from the

PV panel. As the result, the power will not be constant and will not be active at all times. To improve the system reliability, a battery is added to store energy when there is sunlight and supply power back to the system when there is no sunlight as shown in [8] and [9]. However, having only one huge battery may cause the systems lack of reliability and low efficiency because the power to charge the battery must take longer time and many steps which may not consistent with the period of sunlight and weather. Therefore the battery charging control process is needed to quickly charge the battery and also to prevent the overcharging or the undercharging which results in the decrease of the battery lifetime or permanent damage of the battery as shown in [10] and [11]. Thus, if the MPPT control and the battery charging control processes are combined in same the system, they will make the system more reliable and efficient as stated in [12] and [13]. However, if the battery is fully charged, the remaining energy of the PV panel on the duration of sunlight become to the loss power. So the harvesting energy aim will be lost since it cannot store the solar energy effectively.

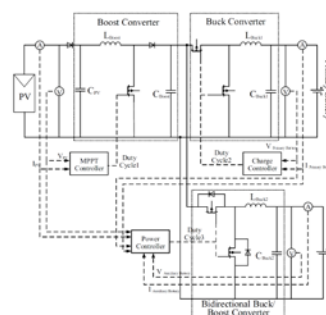


Fig. 1 Circuit architecture of the proposed solar energy harvesting system.

A solar energy harvesting system shown in Fig. 1 is designed for a flood warning system under the condition of having MPPT and quickly charging the batteries. The flood warning system is used in remote locations or without grid utility. Therefore, the power supply system needs to be reliable and sufficient to supply power to the flood warning machine at all-time, especially in an

emergency situation. This paper focuses on solar energy harvesting for utilizing all available energy and to make the system more reliable. MPPT will be controlled at every moment along with the process of charging the battery. Finally, this paper has included an auxiliary battery to solve the problem of losing energy. The auxiliary battery will not be controlled in the charging process, so the remaining power, from PV panel, will be kept by the auxiliary battery. The system will be designed and simulated by using the "Simulink / MATLAB" software.

II. PROPOSED SOLAR ENERGY HARVESTING SYSTEM

A. Circuit Architecture

The circuit architecture of the solar energy harvesting system for tracking the maximum power of the PV panel and controlling the battery charging process is shown in Fig. 1. The system consists of the PV panel, the primary battery, the auxiliary battery and three main circuits. These circuits are explained as follows:

1) *Boost converter*: This circuit supports the difference of the voltage to track the maximum power point determined by the P&O method. To illustrate this goal, the voltage of the battery charging is 12 V, and the voltage of the MPP is 17 V. If the battery is directly connected with the PV panel, the voltage of the PV panel will be decreased to 12 V. This will change the MPP working points. The boost converter is selected and used to track the MPP because it is simple and high efficiency.

2) *Buck Converter*: The circuit controls battery charging by the TSC method. It controls the charging voltage and the charging current of the battery. The value of the voltage from the PV panel or the tracking system of the maximum power is higher than the voltage of the battery. The process of the buck converter will optimize charging voltage.

3) *Bidirectional Buck/Boost Converter*: This circuit allocates and harvests all power from the PV panel and controls the charging process of the primary battery. If the power of the PV panel is higher than the charging power of the primary battery, the bidirectional back/boost converter will be the buck converter to transfer the excess power to the auxiliary battery. However, if the power of the PV panel is lower than the charging of the primary battery, the bidirectional back/boost converter will be the boost converter to transfer the power from the auxiliary battery to the primary battery.

B. MPPT Technique

Maximum Power Point Tracking (MPPT) is the indirect technique to increase the efficiency of the PV panel. In Fig. 2, the PV panel is connected directly to the load which is represented by OB curve and the power is equal to P2, which matches to the value of the MPP. If the load is represented by OA curve, the power is equal to P1 which is less than the MPP (P2). Therefore, the converter used to find and track the maximum power (P2) of the PV panel.

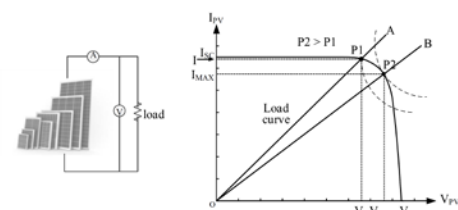


Fig. 2. The operation of the MPPT.

For the MPPT process, it will work continuously to make the system to operate at or around the MPP. There are many methods to track the MPP. The most common and basic method that can be applied to track the maximum power is the Perturb and Observe method (P&O method).

A principle of the P&O method works by adjusting the duty cycle of the converter, which indirectly perturb the power output of the PV. Then, the system compares the new power to the previous power to determine the next adjustment. Let's define the difference of the PV power output as

$$dP = P(k) - P(k-1) \quad (1)$$

- If the value $P(k) > P(k-1)$ is positive, the system will adjust the voltage (increase or decrease the voltage) by adjusting the duty cycle of the converter in the same direction.
- If the value $P(k) < P(k-1)$ is negative, the system will adjust the voltage (increase or decrease the voltage) by adjusting the duty cycle of the converter in the opposite direction.

The diagram of this method is shown in Fig. 3. The advantage of the P&O method is a simple method for MPP determination. The P&O method can also work well at steady state, when light intensity and temperature change slowly.

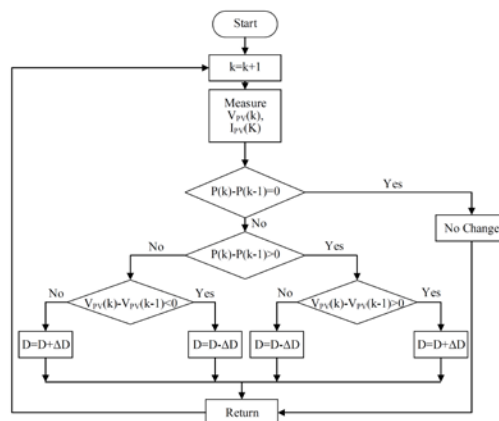


Fig. 3 Diagram of the P & O method.

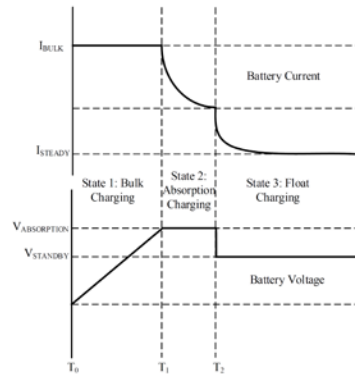


Fig. 4 Three stage charging the voltage and the current curve.

C. Charging Technique

The PV panel might not provide the constant voltage and current because the PV output depends on light intensity and temperature. Then the PV panel is not a suitable energy source for charging the battery. Therefore, if the battery will be used in the PV system, the performance of the battery will be decreased, the lifetime of the battery becomes shorter. In conditions of varying light intensity the battery may experience a low State of Charge (SOC). Typically, the battery charging process will be controlled by a converter to adjust the duty cycle for the value of the voltage and the current in charging process, for quick charging and protecting the battery [13].

To achieve a quick, complete, and safe charging process of the lead-acid battery, the method was implemented in the most practical way of the Three Stage Charging (TSC), which is divided into three stages. Fig. 4 shows a graph of the TSC.

1) *Bulk charging*: This state of charging, the current is kept constant, which will reduce time to charge the battery. It will charge in this state until the battery voltage reaches the absorption voltage. In this state, the battery will be recharged 70-80% of the battery capacity. It is the fastest state of charging.

2) *Absorption charging*: The charging voltage is kept constant. At the absorption voltage, it will be about 1.2 times of the nominal voltage of the battery. The current charge is reduced close to zero. In this state, the battery will be charged additionally 20-30% of the capacity.

3) *Float charging*: The voltage level will be reduced to a constant value, which is called standby-voltage. It is approximately 1.13 to 1.15 times of the nominal voltage of the battery. In this state, the battery is charged by a small current to maintain the voltage of battery. It is important to maintain the voltage of the battery in a full state of charge.

III. OPERATING PRINCIPLES

Three controlled charging modes for a primary battery ($P_{\text{Primary Battery}}$) and an auxiliary battery ($P_{\text{Auxiliary Battery}}$) are shown in TABLE I.

TABLE I. EACH MODE OF MANAGEMENT POWER SYSTEM

| Mode | Management power system |
|----------|--|
| Mode I | $P_{\text{PV}} - P_{\text{loss}} > P_{\text{Primary Battery}}$ |
| Mode II | $P_{\text{PV}} - P_{\text{loss}} = P_{\text{Primary Battery}}$ |
| Mode III | $P_{\text{PV}} - P_{\text{loss}} < P_{\text{Primary Battery}}$ |

Each mode of the power control is provided to control different ways as follows.

A. Mode I

In the first mode, it is divided into two cases. In the first case, the auxiliary battery can harvest power remaining after deducting the power losses in the system of charging power to the primary battery controlled. In the second case, if the auxiliary battery is fully charged, the auxiliary battery will not harvest power remaining after deducting the power losses in the system of charging power to the primary battery controlled.

For example, we assume the PV output power equal to 180 W and the controlled primary battery ($P_{\text{Primary Battery}}$) charging process is equal to 67 W. The system loss of power is 10 W, so $180 - 67 - 10 = 103$ W of power are left to charge the auxiliary battery ($P_{\text{Auxiliary Battery}}$) by uncontrolled charging process as shown Fig. 5.

B. Mode II

In this mode, the net output power is available to sufficiently charge only the primary battery. The converter for the auxiliary battery is turned off, as shown in Fig. 6.

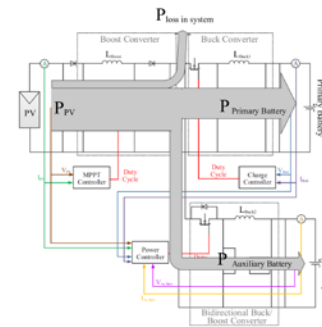


Fig. 5 Direction of the power transmission mode I.

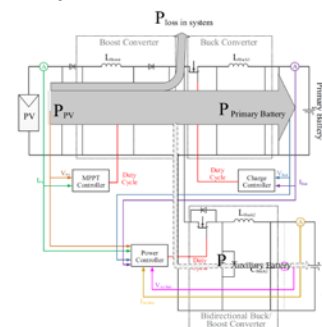


Fig. 6 Direction of the power transmission mode II.

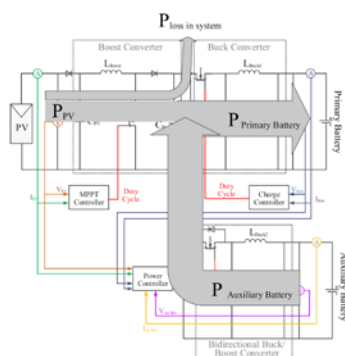


Fig. 7 Direction of the power transmission mode III.

C. Mode III

In the third mode, it will be divided into two cases. In the first case, the auxiliary battery supplies power to the primary battery charging adequate for control procedures after deducting the energy losses in the system. In the second case, the auxiliary battery is unable to supply power to the primary battery charging procedure.

For example, if the PV output power equals to 30 W and the primary battery ($P_{\text{Primary Battery}}$) wants 67 W to control step of charging and the system loss of power is 10 W, the auxiliary battery ($P_{\text{Auxiliary Battery}}$) must supply $67-30-10 = 27$ W to charge the primary battery as shown in Fig. 7.

IV. SIMULATION RESULTS

To confirm the concept of the solar energy harvesting system and test the validity of the system, we change light intensity in order to see whether the system is able to track the maximum power and to see that the system is able to control energy in the process of battery charging. We simulated using the "Simulink / MATLAB" software. KV235-60M solar module is chosen for a MATLAB simulation model. TABLE II shows its electrical specification from data sheet. The simulation results are shown in Fig. 8-Fig. 12.

Fig. 8 shows that the controlled TSC can realize the voltage and the current stabilized charging of the charging system.

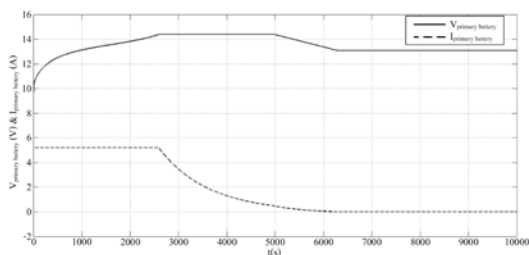


Fig. 8 The voltage and the current of the battery charging process by the TSC method

TABLE II. THE ELECTRICAL DATA OF THE KV235-60M SOLAR MODULE RELATES TO STANDARD TEST CONDITIONS [STC]: 1,000 W/m², AM 1.5, 25 °C. TAKEN FROM THE DATASHEET

| Parameters | Values |
|------------------------------------|--------|
| Maximum Power (P_{mp}) | 235 W |
| Maximum Power Voltage (V_{mp}) | 29.6 V |
| Maximum Power Current (I_{mp}) | 7.94 A |
| Open circuit voltage (V_{oc}) | 36.8 V |
| Short Circuit Current (I_{sc}) | 8.45 A |
| Number of Cells (PCS) | 60 PCS |

Fig. 9 shows the changing of light intensity from 500 W/m² to 250 W/m² at 0.5 second, and from 250 W/m² to 500 W/m² at 1 second and from 500 W/m² to 700 W/m² at 1.5 second. Fig. 10 and Fig. 11 show graph of the power, the voltage and the current of the PV panels to track the maximum power. Fig. 12 shows the solar power, the primary battery power and the auxiliary battery power for management of power to the system.

According to the simulation results shown in Fig. 10, the system is able to track the maximum power of the PV panel when the light intensity changes from 500 W/m² to 250 W/m² at 0.5 second, and from 250 W/m² to 500 W/m² at 1 second and from 500 W/m² to 700 W/m² at 1.5 second. In a rapidly changing of the light intensity, the result in a tracking system for maximum power of the PV panel is slow and erroneous at first, but the system can track the maximum power of the PV panel. Fig. 11 shows the voltage of the PV panel, which has changed slightly when the light intensity change. It also shows that the current of the PV panel is changed according to the light intensity. If the light intensity is very high, the current value is also high.

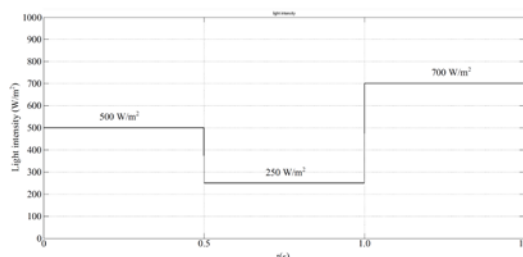


Fig. 9 Light intensity condition.

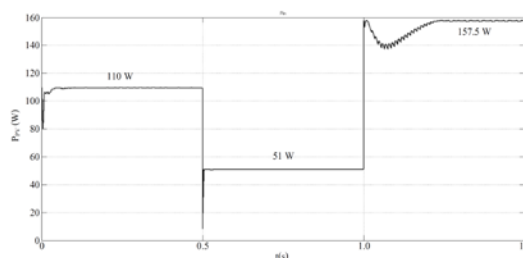


Fig. 10 The power of the PV panel in changed light intensity condition (500 W/m² - 250 W/m² - 700 W/m²).

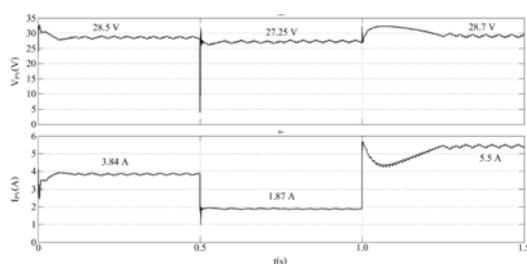


Fig. 11 The voltage and the current of the PV panel in changed light intensity condition ($500 \text{ W/m}^2 - 250 \text{ W/m}^2 - 700 \text{ W/m}^2$).

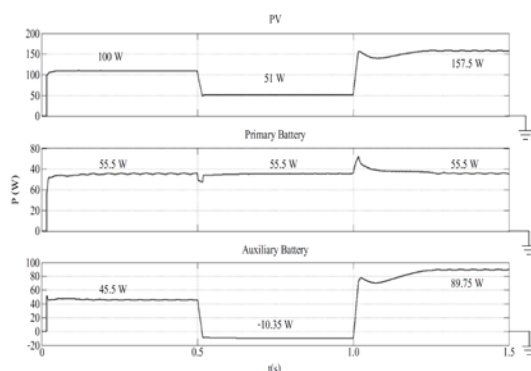


Fig. 12 Output power of the PV panel, the primary battery and the auxiliary battery in changed light intensity condition ($500 \text{ W/m}^2 - 250 \text{ W/m}^2 - 700 \text{ W/m}^2$).

In addition, Fig. 12 shows the system allocation of the power in each mode. During the time between 0 to 0.5 second, the system works in mode I, where the PV power output is 110 W and the required battery power is 55 W. The remaining power equals 50 W, which is charged to the auxiliary battery. During the time between 0.5 to 1 second, the system works in mode III, which the power of the PV panel equals 50 W less than the power of the primary battery required 55 W. The auxiliary battery supplies power equal 10 W to the primary battery charging and during the time between 1 to 1.5 second, the system works in mode I again.

V. CONCLUSION

This paper presents the modified TSC system for solar energy harvesting applications. The purpose of the proposed system is to combine the PV panel MPPT to develop the most efficient process for the lead-acid battery and the power management technique. We have proven that the designed system can utilize solar energy and control the charging of

battery at maximum efficiency, so that the lead-acid battery can be quickly and safely charged.

Finally, the simulation results show that the proposed system is feasible and it will be implemented in the battery charging system for the flood warning system in future works.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been financial and facility supported by the Faculty of Engineering at Prince of Songkla University (PSU).

REFERENCES

- [1] H. Bellia, R. Youcef, M. Fatima, "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB," *NRLAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2014, vol. 3, pp. 53-61.
- [2] Samer Alsadi, Basim Alsayid, "Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm", *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 2, Issue 6, pp. 80-85, December 2012.
- [3] T. Esmar and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, Jun. 2007.
- [4] C. Hua and C. Shen, "Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1998. APEC '98. Conference Proceedings 1998. , Thirteenth Annual, 1998, vol. 2, pp. 679-685.
- [5] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963-973, Jul. 2005.
- [6] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimizing duty cycle perturbation of P&O MPPT technique," in *Proc. IEEE 35th Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, 2004, vol. 3, pp. 1939-1944.
- [7] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimizing Sampling Rate of P&O MPPT Technique," *IEEE Power Electronics Specialist Conference*, 2004, vol. 3, pp. 1945-1949.
- [8] S. J. Chiang, H.-J. Shieh, and M.-C. Chen, "Modeling and control of PV charger system with SEPIC converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4344-4353, Nov. 2009.
- [9] N. Karami, N. Moubayed, and R. Outbib, "Analysis of an irradiance adaptative PV based battery floating charger," in *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2011, pp. 1852-1858.
- [10] S. Armstrong, M. E. Glavin, and W. G. Hurley, "Comparison of battery charging algorithms for stand alone photovoltaic systems," in *Proc. IEEE PESC*, Jun. 15-19, 2008, pp. 1469-1475.
- [11] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications," *Proc. Inst. Elect. Eng.—Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 2, pp. 191-197, Mar. 2004.
- [12] H. T. Yau, Q. C. Liang, and C. T. Hsieh, "Maximum power point tracking and optimal Li-ion battery charging control for photovoltaic charging system," *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 64, pp. 822-832, 2012.
- [13] H.-T. Yau, C.-J. Lin, and Q.-C. Liang, "PSO based PI controller design for a solar charger system," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, Article ID 815280, 13 pages, 2013.
- [14] M. H. Taghvaei, M. A. M. Radzi, S. M. Moosavain, Hashim Hizam and M. Hamiruce Marhaban, "A current and future study on non-isolated DC-DC converters for photovoltaic applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 17, pp. 216-227, Jan. 2013

ประวัติผู้เขียน

| | | |
|--|----------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล | นางสาวชญัญฐ์ เหลืองอมรศิริ | |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา | 5810120026 | |
| วุฒิการศึกษา | | |
| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2557 |

ทุนการศึกษา

ทุนศึกษย์ก้นกุฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

T. Lueangamornsiri, K. Thongpull, K. Chalermyanont, W. Wichakool, “Design and Development of A Stand-Alone Solar Energy Harvesting System by MPPT and Quick Battery Charging”, in Proceedings of *The 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON2016)*, Thailand, June 28th – July 1st, 2016.