

การประจุแบตเตอรี่จากเทอร์โมอิเล็กทริกโดยเทคนิคควบคุมการ
ติดตามจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด

THERMOELECTRIC BATTERY CHARGER WITH MAXIMUM
POWER POINT TRACKING CONTROL TECHNIQUE

อานันท์ กังวาลไกล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2018-SC-M-030-017

การประจุแบตเตอรี่จากเทอร์โมอิเล็กทริกโดยเทคนิคควบคุมการ
ติดตามจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด

THERMOELECTRIC BATTERY CHARGER WITH MAXIMUM
POWER POINT TRACKING CONTROL TECHNIQUE

อานันท์ กังวาลไกล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2018-SC-M-030-017

THERMOELECTRIC BATTERY CHARGER WITH MAXIMUM
POWER POINT TRACKING CONTROL TECHNIQUE

ANUN KANGWALKAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN
APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2018-SC-M-030-017

COPYRIGHT 2017


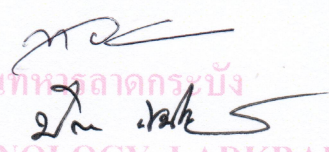
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การประจุแบตเตอรี่จากเทอร์โมอิเล็กทริกโดยเทคนิคควบคุมการติดตามจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด”
“THERMOELECTRIC BATTERY CHARGER WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING CONTROL TECHNIQUE”

ชื่อนักศึกษา นายอานันท์ กังวาลไกล
รหัสประจำตัว 58605067
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | ลายมือชื่อ |
|---|---|
| รศ.วิจิต ศิริโชติ ประธานกรรมการ ดร.กวางปัญญา สุวรรณสุข อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ผศ.ดร.ปัญญา แชน้ำแก้ว ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ |   อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก |

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 10 มิถุนายน พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัยลักษณะ 1 ชั้น 3

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2561



| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | เครื่องประจุแบตเตอรี่จากเทอร์โมอิเล็กทริกโดยเทคนิคควบคุมการติดตามจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด |
| ชื่อนักศึกษา | นายอานันท์ กังวาลไกล |
| รหัสประจำตัว | 58605067 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต |
| ภาควิชา | ฟิสิกส์ |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ |
| มหาวิทยาลัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) |
| พ.ศ. | 2560 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกุกการะเวก |

บทคัดย่อ

เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (TEGs) สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานความร้อนไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิ และบ่อยครั้งที่ได้รับผลกระทบของพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อม ดังนั้นติดตามที่รวดเร็วและแม่นยำจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เกิดการทำงานให้ได้รับกำลังที่สูงที่สุด ในการศึกษานี้ได้มีการตรวจสอบอัลกอริทึมของการติดตามจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด (MPPT) สองเทคนิคซึ่งเป็นที่รู้จักกันทั่วไป คือ เทคนิคครบวงและสังเกต (P & O) และ เทคนิคเพิ่มค่าความนำ (INC) โดยแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกถูกเชื่อมต่อกับตัวแปลงกำลังกระแสตรงพร้อมทั้งตรวจวัดพารามิเตอร์ด้วย Arduino ซึ่งใช้เพื่อคำนวณอัลกอริทึม MPPT และควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่แบบตะกั่ว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิค P & O และ INC มีประสิทธิภาพมากกว่าการประจุแบตเตอรี่โดยตรงจากเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งกำลังจากการผลิตไฟฟ้าของเทคนิค P & O และ INC สูงกว่าอัตราการประจุโดยตรงถึง 6.5 W ที่อุณหภูมิต้านร้อน 250 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ : วงจรทระดับ การหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก พลังงานความร้อน

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | Thermoelectric Battery Charger with Maximum Power Point Tracking Control Technique |
| Student Name | Anun Kangwalkai |
| Student ID | 58605067 |
| Degree | Master of Science |
| Department | Physics |
| Faculty | Science |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL) |
| Year | 2017 |
| Thesis Advisor | Asst. Prof. Dr. Aparporn Sakulalavek |

Abstract

Thermoelectric generators (TEGs) can harvest thermal energy producing electrical power from a temperature gradient. They are often employed in dynamic thermal environments; therefore, it is important to quickly and precisely track the best operating point to maximize the power production. In this study, two Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms known as the perturb and observe (P&O) algorithm and Incremental conductance (INC) are investigated. The TEG power source is connected to a DC to DC power boost converter with Arduino sensor, which is used both to compute the MPPT algorithm and to control the charging of a lead-acid battery. Experimental results are presented, which demonstrate that P&O and INC methods more power than direct charge technique, where the output power of P&O and INC methods are higher than that of direct charge by 6.5 W at the hot temperature of 250 °C.

Keywords: Boost Converter, Maximum Power Point Tracking, Thermoelectric Generator, Thermal Energy

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ถ่ายทอดวิชาความรู้ในด้านทฤษฎีและการใช้งานแหล่งกำเนิดพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริก รวมถึงสนับสนุนการจัดหาอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยจนทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จเสร็จสมบูรณ์ได้อย่างราบรื่น

ขอขอบพระคุณ รศ.วิชิต ศิริโชติ อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากภาควิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการให้คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ การแก้ปัญหาในด้านการเขียนโปรแกรม ด้านวงจรไฟฟ้า ด้านทฤษฎี รวมถึงการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และให้เกียรติเข้าร่วมเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิ หัวหน้าภาควิชาฯ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุง การแก้ปัญหาด้านทฤษฎีและให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปัญญา แชน้ำแก้ว อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากภาควิชาฟิสิกส์ รองคณบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่ให้คำแนะนำและให้เกียรติเข้าร่วมเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.กมลปัญญา สุวรรณสุข อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและให้เกียรติเข้าร่วมเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ในงานวิจัยนี้

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดี ทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็น ประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องและขอมอบความกตัญญูตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มี พระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียง ผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ใน การพัฒนางานวิจัยต่อไป

อานันท์ กังวาลไกล

สารบัญ

| | หน้า |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ช |
| สารบัญรูป | ซ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 ปรากฎการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก | 4 |
| 2.1.1 ปรากฎการณ์ซีแบก | 4 |
| 2.1.2 ปรากฎการณ์เพลเทียร์ | 5 |
| 2.1.3 ปรากฎการณ์ทอมสัน | 6 |
| 2.1.4 ความสัมพันธ์ของทอมสัน | 6 |
| 2.1.5 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล | 7 |
| 2.1.6 เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ | 7 |
| 2.1.7 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก | 8 |
| 2.1.8 วงจรสมมูลของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ | 8 |
| 2.2 จุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum power point) | 10 |
| 2.2.1 ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด | 10 |
| 2.2.2 เทคนิคการถ่ายโอนกำลังสูงสุด | 12 |
| 2.2.3 วิธีการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด | 13 |
| 2.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง | 14 |
| 2.3.1 ไดโอด (Diode) | 15 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.3.2 BJT (Bipolar Junction Transistor) | 16 |
| 2.3.3 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) | 17 |
| 2.3.4 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) | 18 |
| 2.4 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC converter) | 19 |
| 2.4.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง | 19 |
| 2.4.2 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ | 19 |
| 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ | 22 |
| 2.5.1 ขั้นตอนพื้นฐานของการเขียนโปรแกรมบน Arduino | 23 |
| 2.6 แบตเตอรี่ (Battery) | 24 |
| 2.6.1 ประเภทของแบตเตอรี่ | 24 |
| 2.6.2 แบตเตอรี่แบบลีดเอซิด (Lead-Acid Battery) | 24 |
| 2.7 หลักการประจุแบตเตอรี่แบบ 2 สถานะ | 25 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 27 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 29 |
| 3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล | 29 |
| 3.1.1 ฮีตเตอร์ (Heater) | 29 |
| 3.1.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45 | 30 |
| 3.1.3 ฮีตซิงก์หรือแผงระบายความร้อน (Heat Sink) | 31 |
| 3.1.4 เทอร์โมคัปเปิล | 32 |
| 3.1.5 เครื่องทำความเย็น (Chiller) | 33 |
| 3.1.6 เครื่องบันทึกข้อมูล NI9211 NI9201 NI9227 | 34 |
| 3.1.7 ขั้นตอนการประกอบระบบและเก็บค่าตัวพารามิเตอร์ของเทอร์โมอิเล็กทริก | 35 |
| 3.2 การออกแบบวงจรทบระดับ | 36 |
| 3.3 การจำลองวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ | 37 |
| 3.4 การสร้างวงจรทบระดับ | 39 |
| 3.5 โปรแกรมควบคุมการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด | 40 |
| 3.6 ขั้นตอนการประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด | 44 |
| 3.7 การจำลองระบบประจุแบตเตอรี่เมื่อเกิดการถ่ายโอนกำลังสูงสุดโดยใช้ Pspice | 45 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล | 46 |
| 4.1 คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกขณะเปิดวงจร | 46 |
| 4.2 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยไม่เกิดการสวิตช์ของ วงจรทระดับ | 53 |
| 4.3 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยกำหนดค่าวัฏจักรการสวิตช์ | 56 |
| 4.4 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยใช้เทคนิคหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด | 60 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 68 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 68 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 68 |
| เอกสารอ้างอิง | 69 |
| ภาคผนวก | 72 |
| ภาคผนวก | 73 |
| ภาคผนวก | 84 |
| ประวัติผู้เขียน | 123 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า | |
|----------|--|----|
| 1.1 | ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย | 2 |
| 3.1 | คุณสมบัติของฮีตเตอร์ | 30 |
| 3.2 | ลักษณะจำเพาะของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล | 31 |
| 3.3 | คุณสมบัติของอุปกรณ์จากการออกแบบโดยการคำนวณ | 37 |
| 4.1 | คุณสมบัติของวงจรแบบผสมของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล ขณะเปิดวงจร | 47 |
| 4.2 | คุณสมบัติของวงจรแบบผสมของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล ขณะเปิดวงจร | 49 |
| 4.3 | ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยกำหนดให้ไม่มีการสวิตช์ของมอสเฟต | 54 |
| 4.4 | ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยไม่มีการสวิตช์ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 °C | 73 |
| 4.5 | ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยไม่มีการสวิตช์ที่อุณหภูมิด้านร้อน 220 °C | 74 |
| 4.6 | ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยไม่มีการสวิตช์ที่อุณหภูมิด้านร้อน 250 °C | 75 |
| 4.7 | ผลการคำนวณค่าวัฏจักรการสวิตช์และประสิทธิภาพวงจรทระดับจากสมการที่ (4.9) | 59 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|---|----|
| 2.1 | ปรากฏการณ์ซีเบก | 4 |
| 2.2 | ปรากฏการณ์เพลเทียร์ | 5 |
| 2.3 | เทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ที่เชื่อมต่อกันภายในโมดูล | 7 |
| 2.4 | เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ | 7 |
| 2.5 | วงจรสมมูลของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ | 8 |
| 2.6 | เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เชื่อมต่อโหลดปรับค่าได้ | 9 |
| 2.7 | กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของการถ่ายโอนกำลังสูงสุดและอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าโหลดต่อแหล่งกำเนิดกับอัตราส่วนความต้านทานโหลดต่อแหล่งกำเนิด | 12 |
| 2.8 | จุดให้กำลังสูงสุดตามทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด | 12 |
| 2.9 | กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดในอุดมคติและกราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดจริง | 15 |
| 2.10 | สัญลักษณ์ของไดโอดชนิดต่างๆ | 16 |
| 2.11 | BJT (a) symbol, (b) i-v characteristic, (c) idealized characteristics | 16 |
| 2.12 | การเพิ่มค่าอัตราการขยายของ Power BJT | 17 |
| 2.13 | MOSFET (a) symbol, (b) I-V characteristic, (c) idealized characteristics | 17 |
| 2.14 | ขาเดรนซอสของ MOSFET สามารถมองเป็นความต้านทาน | 18 |
| 2.15 | IGBT (a) symbol, (b) I-V characteristic | 18 |
| 2.16 | เทอร์โมอิเล็กทริกที่ต่อกับวงจรทระดับ | 19 |
| 2.17 | วงจรสมมูลของวงจรทระดับขณะสวิตช์ปิด (Switch On) | 20 |
| 2.18 | แสดงวงจรสมมูลย์ของวงจรขณะสวิตช์เปิด (Switch Off) | 21 |
| 2.19 | บอร์ด Arduino R3 | 22 |
| 2.20 | เลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload และ เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด | 23 |
| 2.21 | การตรวจสอบความถูกต้องและอัปโหลดโค้ดโปรแกรม | 23 |
| 2.22 | แบตเตอรี่ปฐมภูมิ B) แบตเตอรี่ทุติยภูมิ | 24 |
| 2.23 | ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด | 25 |
| 2.24 | การประจุแบตเตอรี่ 2 สถานะ | 26 |
| 3.1 | ฮีตเตอร์ชนิดแห้ง | 29 |
| 3.2 | เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45 | 30 |
| 3.3 | ฮีตซิงก์ | 32 |
| 3.4 | เทอร์โมคัปเปิลชนิด K | 33 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|--|----|
| 3.5 | เครื่องทำความเย็น | 33 |
| 3.6 | เครื่องบันทึกข้อมูล NI9211 NI9201 NI9227 | 34 |
| 3.7 | โปรแกรม LAB VIEW | 34 |
| 3.8 | แผนภาพระบบเก็บค่าเทอร์โมอิเล็กทริก | 35 |
| 3.9 | ภาพระบบการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก | 36 |
| 3.10 | การจำลองวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ | 37 |
| 3.11 | สัญญาณของวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ | 38 |
| 3.12 | วงจรขับเคลื่อนของวงจรทบระดับแรงดันไฟฟ้า | 39 |
| 3.13 | แผนภาพระบบประจุแบตเตอรี่ | 40 |
| 3.14 | แผนภาพเทคนิค P&O | 41 |
| 3.15 | แผนภาพเทคนิค INC | 42 |
| 3.16 | ตัวอย่างการสร้างโปรแกรมหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด | 43 |
| 3.17 | แผนภาพระบบประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด | 44 |
| 3.18 | หน้าต่างสำหรับวาดวงจรจากโปรแกรม Pspice | 45 |
| 4.1 | แผนภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล | 46 |
| 4.2 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล | 48 |
| 4.3 | แผนภาพวงจรแบบผสมของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล | 48 |
| 4.4 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจร กับค่าความแตกต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล | 50 |
| 4.5 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล | 51 |
| 4.6 | ระบบประจุแบตเตอรี่โดยไม่มีกระแสสวิตช์ (ค่าวัฏจักรเท่ากับ 0) | 53 |
| 4.7 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อประจุโดยไม่มีกระแสสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส | 55 |
| 4.8 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อประจุโดยไม่มีกระแสสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส | 55 |
| 4.9 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อประจุโดยไม่มีกระแสสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส | 56 |

สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.10 ระบบประจุแบตเตอรี่ที่กำหนดค่าวัฏจักรการสวิตช์ | 56 |
| 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าวัฏจักรการสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส | 57 |
| 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าวัฏจักรการสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 220 องศาเซลเซียส | 58 |
| 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าวัฏจักรการสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 250 องศาเซลเซียส | 58 |
| 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรการสวิตช์และประสิทธิภาพของวงจรทบทระดับ | 60 |
| 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคครบวงจรและสังเกต ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส | 61 |
| 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคครบวงจรและสังเกต ที่อุณหภูมิด้านร้อน 220 องศาเซลเซียส | 62 |
| 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคครบวงจรและสังเกต ที่อุณหภูมิด้านร้อน 250 องศาเซลเซียส | 63 |
| 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคเพิ่มค่าความนำ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส | 63 |
| 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคเพิ่มค่าความนำ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 220 องศาเซลเซียส | 64 |
| 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคเพิ่มค่าความนำ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 250 องศาเซลเซียส | 65 |
| 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลาจากโปรแกรม Pspice ที่อุณหภูมิด้านร้อน : a) 200 องศาเซลเซียส b) 220 องศาเซลเซียส c) 250 องศาเซลเซียส | 66 |
| 4.22 ภาพชุดควบคุมการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดในงานวิจัย | 67 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากระบบ ซึ่งในอดีตสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย จึงมีการค้นคว้าและพัฒนาวัสดุที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้นเพื่อจะได้ใช้ประโยชน์จากพลังงานให้ได้มากที่สุด โดยในขณะนี้ปัจจุบันสามารถนำพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (Thermoelectric generator ; TEG) เมื่ออุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสองด้านเกิดความแตกต่างกันขึ้น จะเกิดการสร้างแรงดันไฟฟ้าทำให้พาหะภายในเทอร์โมอิเล็กทริกเคลื่อนที่ได้ และเมื่อต่อเทอร์โมอิเล็กทริกครบวงจรจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจร

พลังงานที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์จะถูกจัดเก็บไว้ในแบตเตอรี่ แต่เนื่องจากการเก็บพลังงานโดยตรงจากเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์นั้น ไม่สามารถเก็บพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การประจุแบตเตอรี่นั้นเป็นไปอย่างไม่มีความหมาย และยังส่งผลให้กับแบตเตอรี่นั้นมีอายุการใช้งานที่สั้นลง จึงมีการพัฒนาวงจร รวมทั้งกระบวนการประจุแบตเตอรี่ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ กระบวนการประจุแบตเตอรี่ที่กล่าวถึงนั้นคือ การหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum Power point tracking หรือ MPPT) ซึ่งเป็นการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC converter) เพื่อให้สามารถปรับความเข้ากันได้ (Impedance Matching) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดของระบบ เนื่องจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะให้กำลังสูงสุดได้ต่อเมื่อความต้านทานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับโหลด (Load)

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาระบบประจุแบตเตอรี่จากเทอร์โมอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยการควบคุมการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดที่ให้กับแบตเตอรี่ผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสร้างโปรแกรมหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดแบบ Perturb & Observe และ Incremental Conductance
- 2) สร้างระบบประจุแบตเตอรี่จากเทอร์โมอิเล็กทริกด้วยเทคนิคหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริก
- 3) เพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมกับระบบ โดยเปรียบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทคนิคครบวงจรและสังเกตเทคนิคเพิ่มค่าความนำ และผลจากโปรแกรม Pspice

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างวงจรวงจรถะดับ ที่แรงดันไฟฟ้าอินพุต 5 โวลต์ ให้มีแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุต 18 โวลต์
- 2) ออกแบบและสร้างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เตอร์ โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลรุ่น TEHP1-24156-1.2
- 3) ออกแบบและสร้างโปรแกรมหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดแบบ Perturb & Observe และ Incremental Conductance โดยควบคุมผ่านบอร์ด Arduino Uno R3
- 4) สร้างระบบประจุแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 7 แอมป์(ชั่วโมง) ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้เทคนิค Perturb & Observe และ Incremental Conductance
- 5) เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค Perturb & Observe และ Incremental Conductance กับผลจากโปรแกรม Pspice

1.4 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

| การดำเนินงานวิจัย | เดือน (ปี2559) | | | | | |
|---|----------------|------|------|------|------|------|
| | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. |
| 1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | | | | | | |
| 2. ออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง | | | | | | |
| 3. สร้างวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง | | | | | | |
| 4. สร้างระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ | | | | | | |

| การดำเนินงานวิจัย | เดือน (ปี2560) | | | | | |
|--|----------------|------|-------|-------|------|-------|
| | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | มิ.ย. |
| 5. สร้างโปรแกรมหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด | | | | | | |
| 6. สร้างระบบประจุแบตเตอรี่ | | | | | | |
| 7. ทดสอบระบบประจุแบตเตอรี่ | | | | | | |
| 8. วิเคราะห์และสรุปงานวิจัย | | | | | | |
| 9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ | | | | | | |

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจทฤษฎีเบื้องต้นของเทอร์โมอิเล็กทริก
- 2) เข้าใจหลักการทำงานของระบบประจุแบตเตอรี่
- 3) เข้าใจหลักการการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดในระบบประจุแบตเตอรี่
- 4) สามารถสร้างระบบประจุแบตเตอรี่ด้วยวิธีการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด
- 5) สามารถใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกในการประจุแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

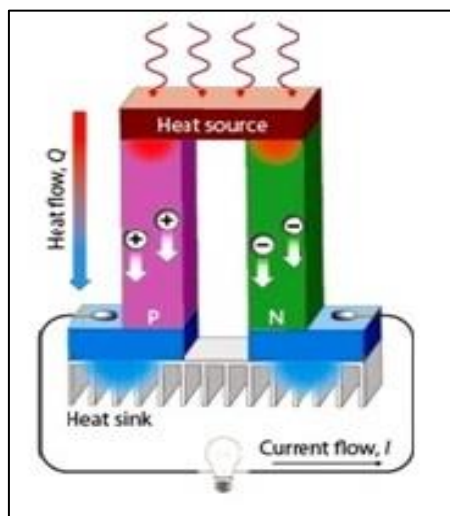
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้แก่ ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แบตเตอรี่ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นพื้นฐานที่นำมาใช้ศึกษาเพื่อดำเนินการในงานวิจัยนี้

2.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก หมายถึง ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงความร้อนให้เกิดกระแสไฟฟ้า และในทางตรงกันข้ามยังสามารถรับกระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดเป็นความเย็นได้เช่นกัน

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นการเกิดขึ้นบนพื้นฐานความสัมพันธ์ของ 3 ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ คือ ปรากฏการณ์ซีเบก ปรากฏการณ์เพลเทียร์ และปรากฏการณ์ทอมสัน โดยความสัมพันธ์ของทอมสันได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปรากฏการณ์นี้ไว้ [1] ดังนี้

2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบก [2][3]



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ซีเบก [4]

ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชื่อ อาเลสซานโดร โวลตา และหลังจากการค้นพบครั้งแรก 25 ปีต่อมา โทมัส โจแฮนน์ ซีเบก ได้ค้นพบปรากฏการณ์นี้อีกครั้ง ปรากฏการณ์ซีเบกเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิสองด้านที่แตกต่างกัน ด้านหนึ่งมีอุณหภูมิที่สูงและอีกด้านมี

อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจนสามารถทำให้เกิดการสร้างแรงดันไฟฟ้า โดยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกจะขึ้นอยู่กับวัสดุ เทอโมอิเล็กทริกดังรูปที่ 2.1 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและความแตกต่างของอุณหภูมิดังสมการ

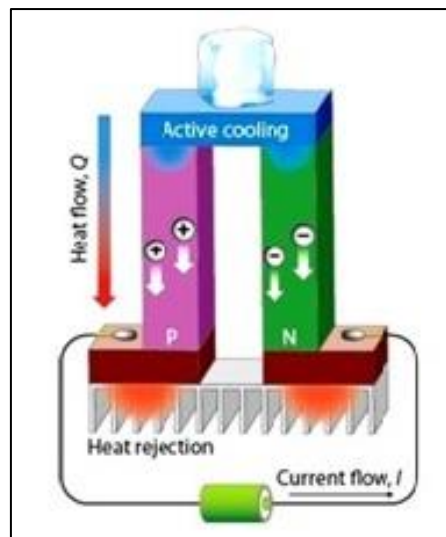
$$V_{oc} = S_{pn}\Delta T \quad (2.1)$$

โดย V_{oc} คือ แรงดันเปิดวงจร (V)

S_{pn} คือ ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ซีเบกระหว่าง n กับ p (VK^{-1})

ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ (K)

2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ [5]



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์ [4]

ปรากฏการณ์ย้อนกลับของปรากฏการณ์ซีเบก คือ ปรากฏการณ์เพลเทียร์ และถูกค้นพบโดย จิน เพลเทียร์ จากรูปที่ 2.2 ซึ่งสังเกตว่าเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าภายนอกเชื่อมต่อกับคู่ตัวนำกระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายแรงดัน ทำให้ด้านหนึ่งเกิดความร้อนและอีกด้านเกิดความเย็น ดังนั้นกระแสที่ส่งผ่านไป ยังตัวนำจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปและกระแสไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ

$$\dot{Q} = \Pi i \quad (2.2)$$

โดย \dot{Q} คือ ความร้อนที่แปลงไป (J/s, W)

Π คือ สัมประสิทธิ์เพลเทียร์ (V)

i คือ กระแสไฟฟ้า (A)

2.1.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน [6]

ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย วิลเลียม ทอมสัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำของวัสดุและมีการดูดกลืนความร้อนซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\dot{Q} = B_t i \Delta T \quad (2.3)$$

เมื่อ B_t คือ สัมประสิทธิ์ทอมสัน (VK^{-1})

2.1.4 ความสัมพันธ์ของทอมสัน

ทอมสันได้ค้นพบว่าปรากฏการณ์ทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดยตรง สัมประสิทธิ์ซีเบกและสัมประสิทธิ์เพลเทียร์มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\Pi = ST \quad (2.4)$$

ดังนั้นความร้อนที่เปลี่ยนแปลงของเพลเทียร์สามารถเขียนในรูปของซีเบกดังสมการ

$$\dot{Q} = \Pi i = STi \quad (2.5)$$

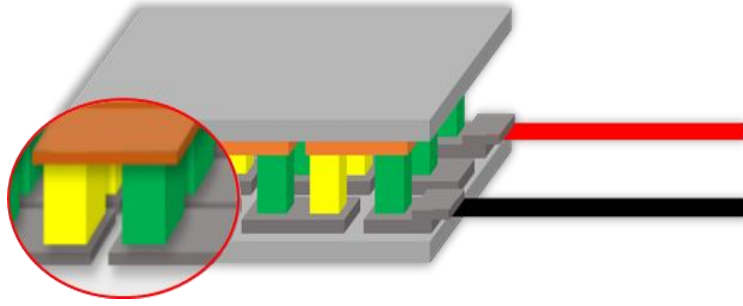
นอกจากนี้ยังเขียนสัมประสิทธิ์ทอมสันด้วยความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ซีเบกได้เป็น

$$B_t = T \frac{dS}{dT} \quad (2.6)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

โดยความสัมพันธ์ของทอมสันสามารถกำหนดด้วยสัมประสิทธิ์ซีเบกและสัมประสิทธิ์ทอมสันในตัวนำที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน [2]

2.1.5 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)

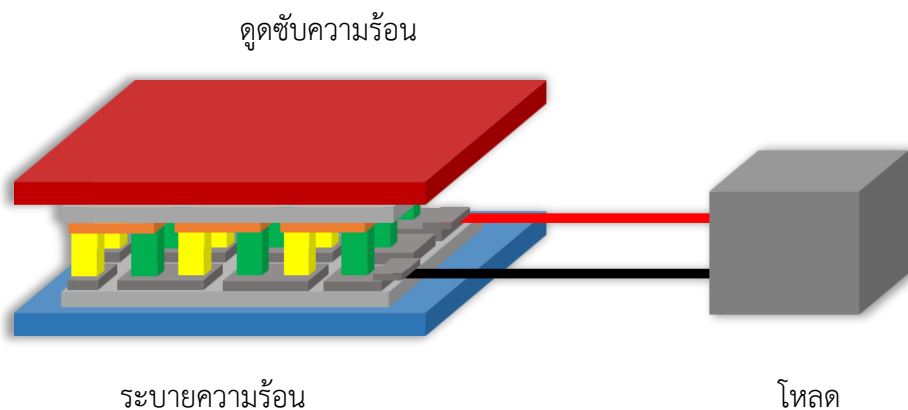


รูปที่ 2.3 เทอร์โมอิเล็กทริกเซลล์ที่เชื่อมต่อกันภายในโมดูล

เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่นำเอาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีมาเชื่อมต่อกันด้วยขั้วโลหะบาง และนำเซลล์มาต่อเรียงกันแบบอนุกรมหรือขนานกัน เพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการ โดยแต่ละด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะมีแผ่นเซรามิกที่มีสมบัติเป็นฉนวนติดอยู่เพื่อป้องกันการลัดวงจรของโมดูล เมื่อมีการให้พลังงานความร้อนที่ด้านหนึ่งของเทอร์โมอิเล็กทริก จะทำให้พาหะซึ่งก็คืออิเล็กตรอนกับโฮลเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วโลหะไปยังโหลดดังรูปที่ 2.3

2.1.6 เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

ในรูปที่ 2.4 เป็นระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์พื้นฐาน ซึ่งระบบจะประกอบด้วยด้านรับความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อน (ด้านบน) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ด้านระบายความร้อน (ด้านล่าง) และส่วนสุดท้ายคือโหลด เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์เป็นเครื่องแปลงผันพลังงานในรูปของแข็ง เกิดจากการนำเอาเทอร์โมอิเล็กทริกมาให้ความร้อน เพื่อใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนที่เหลือหรือเกินจากการใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ เช่น ในรถยนต์ ในครัวเรือน ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น



รูปที่ 2.4 เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

2.1.7 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก [7]

ค่าประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกในการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ZT หรือ Figure of merit ซึ่งเป็นฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในรูปทั่วไปดังสมการ

$$ZT = \frac{S^2 T}{\rho k} = \frac{S^2 T}{\rho(k_L + k_e)} \quad (2.7)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (mS^{-1})

k คือ ค่าจำเพาะการนำความร้อนทั้งหมด ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

k_L คือ ค่าจำเพาะการนำความร้อนของพาหะ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

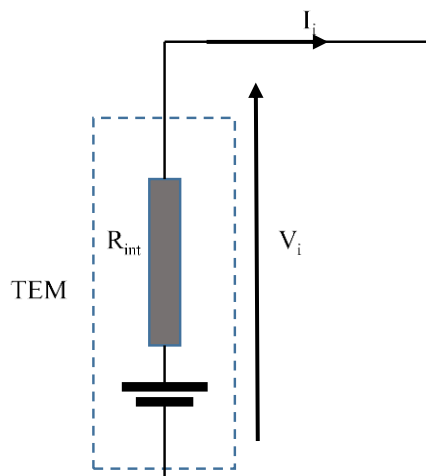
k_e คือ ค่าจำเพาะการนำความร้อนทางไฟฟ้า ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T คือ อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของเทอร์โมอิเล็กทริก (K)

โดยวัสดุที่มีค่า ZT ที่สูงหรือมีประสิทธิภาพสูงนั้น ต้องมีคุณสมบัติ 3 ประการ ได้แก่

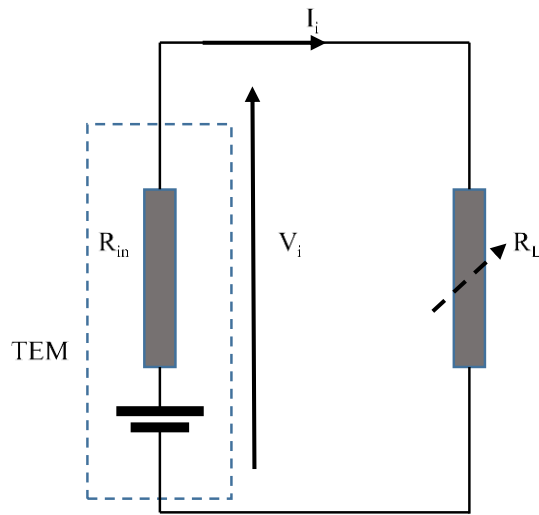
1. ความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกต้องถ่ายเทหรือส่งผ่านประจุไฟฟ้าให้มากที่สุด คือ ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ที่สูง
2. วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมีความต้านทานไฟฟ้านำหรือเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี มิเช่นนั้น กระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนกลับเป็นความร้อนได้ในเนื้อวัสดุนี้ ทำให้สูญเสียกระแสไฟฟ้า
3. วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกต้องเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี เนื่องจากโฟนอนจะเคลื่อนที่หรือส่งผ่านความร้อนสวนกับทิศทางของประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของตัวเทอร์โมอิเล็กทริกลดลง

2.1.8 วงจรสมมูลของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

วงจรเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์นั้นสามารถอธิบายด้วยวงจรสมมูลของเทวินิน ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับตัวต้านทานแบบอนุกรมดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 เทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์เชื่อมต่อโหลดปรับค่าได้

แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่แตกต่างกันของด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อนำกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟมาใช้กับวงจรดังรูปที่ 2.6 จะได้เป็นสมการ

$$V_{oc} = I_i R_{int} + I_i R_L = I_i \cdot (R_{int} + R_L) \quad (2.8)$$

ซึ่งจะได้ความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริก

$$R_{int} = \frac{V_{oc}}{I_i} - R_L \quad (2.9)$$

และกระแสที่ไหลผ่านในวงจรจะกำหนดให้เป็น

$$I_i = \frac{V_{oc}}{(R_{int} + R_L)} \quad (2.10)$$

เมื่อได้กระแสที่ไหลในวงจรจากสมการที่ 2.10 เราสามารถหาค่ากำลังที่สูญเสียในโหลดได้โดย

$$P_L = V_L I_i = R_L I_i^2 \quad (2.11)$$

และกำลังที่สูญเสียจากความต้านทานภายในจะเป็น

$$P_{int} = V_{rint}I_i = R_{int}I_i^2 \quad (2.12)$$

2.2 จุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด (Maximum power point)

ในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าทฤษฎีบทการถ่ายโอนพลังงานสูงสุด มีการให้คำนิยามว่าเพื่อให้ได้พลังงานสูงสุดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีความต้านทานภายในค่าหนึ่ง ความต้านทานของโหลดจะต้องเท่ากับค่าความต้านทานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานสูงสุดแต่ไม่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยรายละเอียดได้อธิบายดังหัวข้อต่อไป

2.2.1 ทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด

เมื่อพิจารณาแหล่งที่มาของโมเดล โดยใช้ทฤษฎีบทของเทวินิน (Thevenin's Theorem) เมื่อค่าความต้านทานต่อโหลด คือ R_L ความต้านทานของแหล่งคือ R_S และแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า คือ V_S สามารถหากระแสไฟฟ้าในวงจรนี้ได้โดยใช้กฎของโอห์ม (Ohm's Law) [8]

$$I = \frac{V_S}{R_L + R_S} \quad (2.13)$$

แรงดันไฟฟ้าผ่านโหลด (V_L) หาได้โดยใช้กฎการแบ่งแรงดันไฟฟ้า

$$V_L = V_S \frac{R_L}{R_L + R_S} \quad (2.14)$$

สามารถหาพลังงานที่กระจายไปในโหลด P_L ได้ดังนี้

$$P_L = V_S^2 \frac{R_L}{(R_L + R_S)^2} \quad (2.15)$$

สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้

$$P_L = \frac{V_S^2}{\frac{R_S^2}{R_L} + 2R_S + R_L} \quad (2.16)$$

เมื่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โหลดมีค่าสูงสุด สามารถหาค่าความต้านทานโหลดได้ดังสมการที่ 2.17

$$\frac{\partial P_L}{\partial R_L} = 0 \quad (2.17)$$

จากนั้นจะได้สมการใหม่ในรูปของผลรวมของความต้านทานโหลดกับความต้านทานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสองดังสมการที่ 2.18

$$(R_L + R_S)^2 = 2R_L(R_L + R_S) \quad (2.18)$$

เมื่อจัดรูปของสมการที่ 2.18 จะได้ดังสมการที่ 2.19

$$\frac{R_S^2}{R_L^2} = 1 \quad (2.19)$$

หากทำการย้ายข้างตัวแปรของความต้านทานโหลดกำลังสองและถอดรากทั้งสองข้างจะพบว่าค่าความต้านทานโหลดที่ทำให้กำลังสูงสุด คือ ความต้านทานโหลดเท่ากับความต้านทานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งได้แสดงดังสมการที่ 2.20

$$R_L = R_S \quad (2.20)$$

จากรูปที่ 2.7 เงื่อนไขของการถ่ายโอนพลังงานสูงสุดไม่ได้ผลทำให้ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าสูงสุด เมื่อเรากำหนดประสิทธิภาพ เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่กระจายไปยังโหลดต่อพลังงานรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและโหลด

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_S} \quad (2.21)$$

กรณีแรก เมื่อมีการถ่ายเทกำลังสูงสุดเข้าใกล้ 100% ประสิทธิภาพจะมีค่าเพียง 50% ดังสมการที่ 2.22

$$P_L = P_S ; \eta = 0.5 \quad (2.22)$$

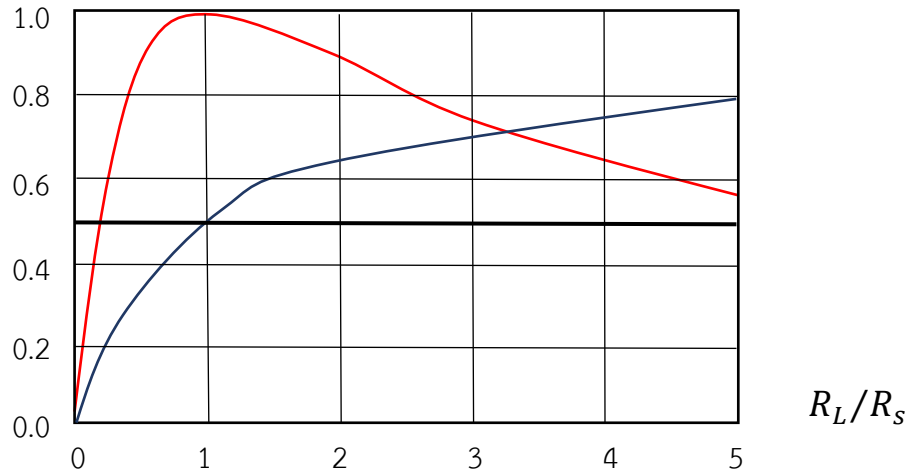
กรณีที่สอง ความต้านทานโหลดเข้าใกล้อนันต์ แม้ว่าระดับพลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ ประสิทธิภาพของระบบยังมีค่าเข้าใกล้ 100% ดังสมการที่ 2.23

$$P_L = \infty \text{ หรือ } P_L = 0 ; \eta = 1 \quad (2.23)$$

กรณีที่สาม ถ้าความต้านทานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้ประสิทธิภาพมีค่าเป็น 0% ถ้าค่าความต้านทานโหลดใกล้ศูนย์ ในกรณีหลังพลังงานทั้งหมดจะถูกนำมาใช้ภายในแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (ยกเว้นแหล่งกำเนิดไม่มีความต้านทาน) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่เกิดการลัดวงจรจะเป็นศูนย์ ดังสมการที่ 2.24

$$P_L = 0 ; \eta = 0 \quad (2.24)$$

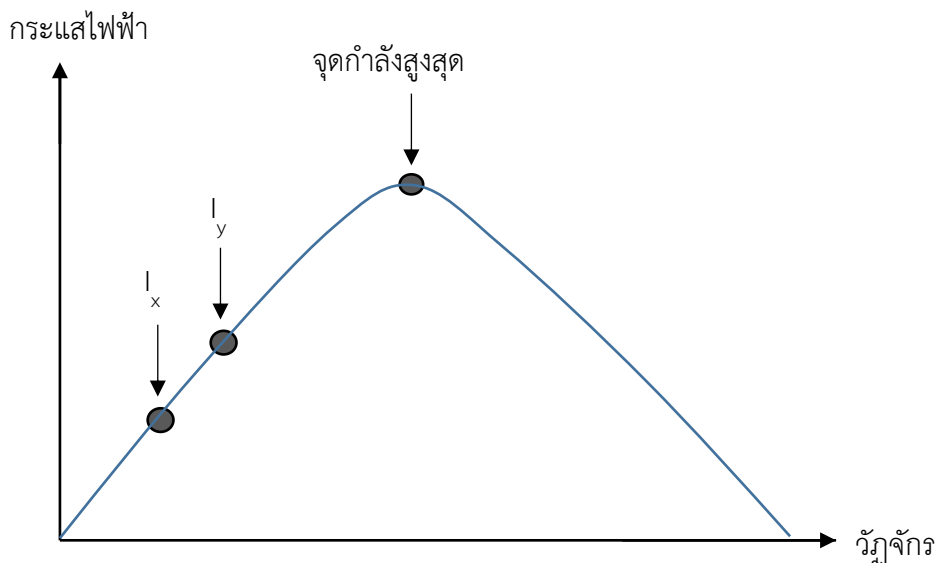
η & (P_L/P_S)



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของการถ่ายโอนกำลังสูงสุดและอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าโหลดต่อแหล่งกำเนิดกับอัตราส่วนความต้านทานโหลดต่อแหล่งกำเนิด

2.2.2 เทคนิคการถ่ายโอนกำลังสูงสุด

เป็นกระบวนการสำหรับการถ่ายโอนกำลังสูงสุดจากแหล่งกำเนิดพลังงานใด ๆ ไปยังโหลด การถ่ายโอนกำลังสูงสุดจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความต้านทานของโหลดใกล้เคียงกับความต้านทานของแหล่งกำเนิดพลังงานนั้น ๆ ($R_{in} = R_{th}$ หรือ R_n) การที่เกิดความต้านทานภายในโหลดใกล้เคียงกับความต้านทานของแหล่งพลังงานนั้น เรียกว่า ความต้านทานเข้าคู่กัน (impedance matching)



รูปที่ 2.8 จุดให้กำลังสูงสุดตามทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด

ในการส่งกำลังจากแหล่งพลังงานมักจะถูกใช้เพื่อให้แน่ใจว่ากำลังที่แหล่งพลังงานให้จะสามารถถ่ายโอนไปยังโหลดได้มากที่สุด ด้วยการพัฒนารูปแบบของวงจรรวมทั้งการสร้าง

โปรแกรมควบคุมวงจรแปลงผันกระแสตรง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลัง

จากวงจรสมมูลที่เชื่อมต่อโหลด การประจุพลังงานกลับไปยังแบตเตอรี่ ในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่มีค่าคงที่ ดังนั้นถ้ากระแสไฟฟ้าผ่านในวงจรมีค่าสูงจะส่งผลให้กำลังที่โหลดหรือแบตเตอรี่นั้นมีค่าสูงตามด้วย และจากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุตกับ Duty cycle ของสัญญาณขับสวิทช์ โดยจากหลักการถ่ายโอนกำลังสูงสุด Duty cycle ที่เหมาะสมจะทำให้แบตเตอรี่จะสามารถดึงพลังงานจากแหล่งกำเนิดได้ด้วยกำลังสูงสุด

2.2.3 วิธีการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด

ในการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดนั้นมีหลายวิธีโดยแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างในกระบวนการวิเคราะห์เพื่อให้ได้จุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมใช้ในงานชาร์จแบตเตอรี่จากทั้งโฟโตโวลตาอิก เทอร์โมอิเล็กทริก และในงานอื่น ๆ ได้แก่

1. เพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance, INC) [9][10]

เทคนิคนี้พิจารณาจากความชันของกราฟคุณลักษณะระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันของระบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิค INC สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบค่า Conductance ขณะนั้นๆ (I/V) กับค่า Conductance ที่เปลี่ยนแปลง ($\Delta I/\Delta V$) จากหลักการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเทคนิค INC การทำงานของระบบจะถูกคงค่าให้ทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงของกระแส (ΔI) เมื่อกระแสเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่แรงดันคงที่ ($\Delta V = 0$) ระบบจะกลับมาหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใหม่อีกครั้ง

2. รบกวนและสังเกต (Perturb Observe, P&O) [11]

เทคนิค P&O จะเป็นการปรับค่าแรงดันของระบบไปในทิศทางที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาไปตามกราฟคุณลักษณะเมื่อถึงจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (จุดยอด) ค่าแรงดันยังคงเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและแกว่งอยู่รอบจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั่นเอง หลักการเปลี่ยนแปลงแรงดันของเทคนิค P&O จะเห็นว่าถ้าหากกำลังไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าลดลงไปจากเดิม ระบบจะเปลี่ยนทิศทางการเปลี่ยนแปลงแรงดันไปในทิศตรงกันข้าม ทั้งนี้เพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการนี้จะถูกทำซ้ำไปซ้ำมา จนในที่สุดค่ากำลังไฟฟ้าของระบบจะแกว่งอยู่รอบๆจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งสามารถลดค่าการแกว่งนี้ได้โดยการลดค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลง (ΔV) อย่างไรก็ตามการลดค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้การเข้าสู่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดช้าลง แนวทางการแก้ปัญหาหนึ่งที่จะจัดการกับปัญหานี้ก็คือทำให้มีขนาดของ ΔV ที่เปลี่ยนแปลงได้ โดยให้ค่า ΔV น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อเข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3. อัตราส่วนแรงดันเปิดวงจร (Fractional Open Circuit Voltage, FOCV)

เทคนิคนี้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่าแรงดันเปิดวงจรของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ (2.25)

$$M_{PP} \approx V_{OC} k_1 \quad (2.25)$$

เมื่อ k_1 คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเซลล์พลังงาน

ค่า k_1 จะถูกคำนวณจากการสังเกตค่าสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับค่าแรงดันเปิดวงจรจากการทดสอบเซลล์พลังงาน

4. เทคนิคอัตราส่วนกระแสลัดวงจร (Fractional Short-Circuit Current)

เทคนิคนี้คล้ายกับเทคนิคอัตราส่วนแรงดันเปิดวงจรแต่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับค่ากระแสลัดวงจรของระบบดังสมการที่ (2.26)

$$M_{PP} \approx I_{SC} k_2 \quad (2.26)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเซลล์พลังงาน

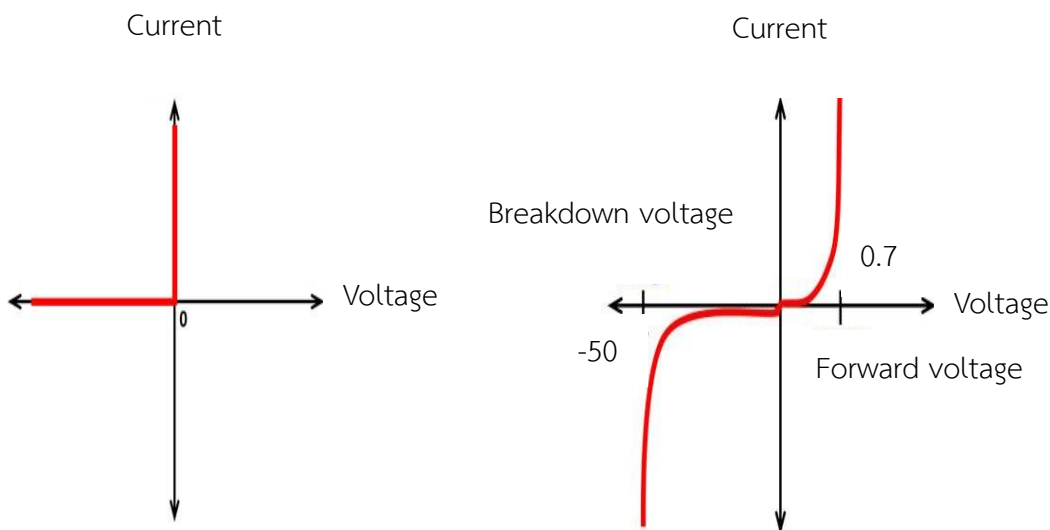
ค่า k_2 จะถูกคำนวณจากการสังเกตค่าสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับค่าแรงดันเปิดวงจรจากการทดสอบเซลล์พลังงาน

5. เทคนิคอื่นๆ เช่น เทคนิค improved perturbation & observation [12] เทคนิค climbing law [13] และ เทคนิค state space averaging method [14] เป็นต้น

2.3 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้กับงานอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยจะแสดง คุณสมบัติและการทำงานรวมทั้งหลักการประยุกต์เพื่อใช้งาน ได้แก่ Diode, BJT, MOSFET, IGBT รวมทั้งการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสีย (Power loss) ของอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งเป็นการคำนวณที่สำคัญในการเลือกอุปกรณ์สวิตชิง

2.3.1 ไดโอด (Diode)

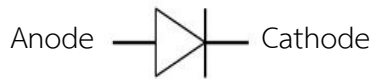


รูปที่ 2.9 กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดในอุดมคติและกราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดจริง

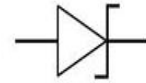
รูปที่ 2.9 แสดงสัญลักษณ์ของไดโอด เมื่อไดโอดนำกระแส (forward bias) แรงดันตกคร่อมจะมีค่าต่ำ (ประมาณ 1 โวลต์) ในทางตรงกันข้ามเมื่อเกิดไบอัสกลับกระแสจะไหลผ่านได้น้อยมาก (ประมาณ 1 ไมโครแอมป์) จากรูปที่ 2.9 (ด้านขวา) เมื่อไบอัสกลับ (Reverse Voltage) มีค่าสูงเกินแรงดันพังทลาย (Reverse Blocking region) จะทำให้ไดโอดพังและจะนำกระแสอย่างมาก รูปแบบของสมมุติว่าให้แรงดันไบอัสตรง (forward bias voltage) ไปยังไดโอดเท่ากับศูนย์และกำหนดให้ไม่มีบริเวณแรงดันพังทลาย ขณะที่ไดโอดกำลังจะหยุดการทำงาน กระแสที่ไหลซึ่งมีค่าบวก จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ไดโอดจะต้องการกระแสลบบางส่วนเพื่อให้ไดโอดสามารถหยุดทำงานได้ ซึ่งในขณะนั้นกระแสที่ไหลจะเป็นลบหรือมีกระแสย้อนกลับ (Reverse Current) และช่วงเวลาที่กระแสย้อนกลับ คือค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (Reverse-recovery time; t_r) ของไดโอดนั่นเอง โดยในงานของสวิตช์ซึ่งนั้น ช่วงเวลาที่กระแสที่มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับคาบเวลาในการสวิตช์ ซึ่งสามารถลดกำลังสูญเสียจากไดโอดให้มีค่าน้อยที่สุด

ประเภทของ Diode ที่สำคัญได้แก่

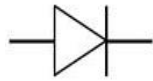
- 1) Schottky Diode มีค่าไบอัสตรงต่ำ (0.3 โวลต์) ใช้กับไฟแรงดันต่ำ (50 ~100 โวลต์)
- 2) Fast-Recovery Diode ออกแบบมาใช้กับวงจรสวิตช์ เพราะใช้งานกับความถี่สูงและมีค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับต่ำเป็นนาโนวินาที
- 3) Line-frequency diode มีค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับสูงจึงใช้ในความถี่ต่ำ (50 เฮิรตซ์) แต่อัตราของกระแสและแรงดัน สูงมาก โดยสัญลักษณ์ของไดโอดได้แสดงดังรูปที่ 2.10



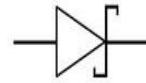
a. ขั้วของไดโอด



c. Zener diode



b. Diode

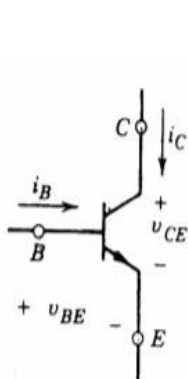


d. Schottky diode

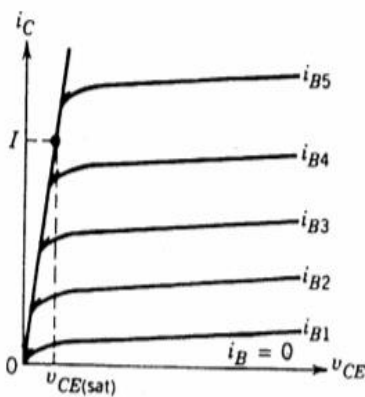
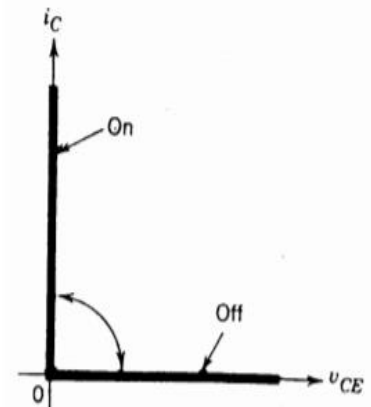
รูปที่ 2.10 สัญลักษณ์ของไดโอดชนิดต่างๆ

2.3.2 BJT (Bipolar Junction Transistor)

ค่าอัตราการขยาย (h_{FE}) ของกำลัง BJT อยู่ระหว่าง 5-10 ซึ่งมีค่าต่ำและเมื่อต้องการทำให้ค่าอัตราการขยายสูงขึ้น นิยมต่อแบบ Darlington หรือ Triple Darlington โดยที่ค่าอัตราการขยายสูงขึ้นตามการคูณค่าอัตราการขยายของ BJT แต่ละตัวดังแสดงใน รูปที่ 1-6 การใช้ BJT เป็นสวิตช์ จะต้องป้อนกระแสเบสให้มากจนอิ่มตัว (Saturated) เพื่อพอนที่จะขับโหลดได้ และจะต้องป้อนกระแสตลอดเวลาที่ทำงาน BJT มีค่าแรงดันเพื่อทำงานประมาณ 0.1-0.2 โวลต์

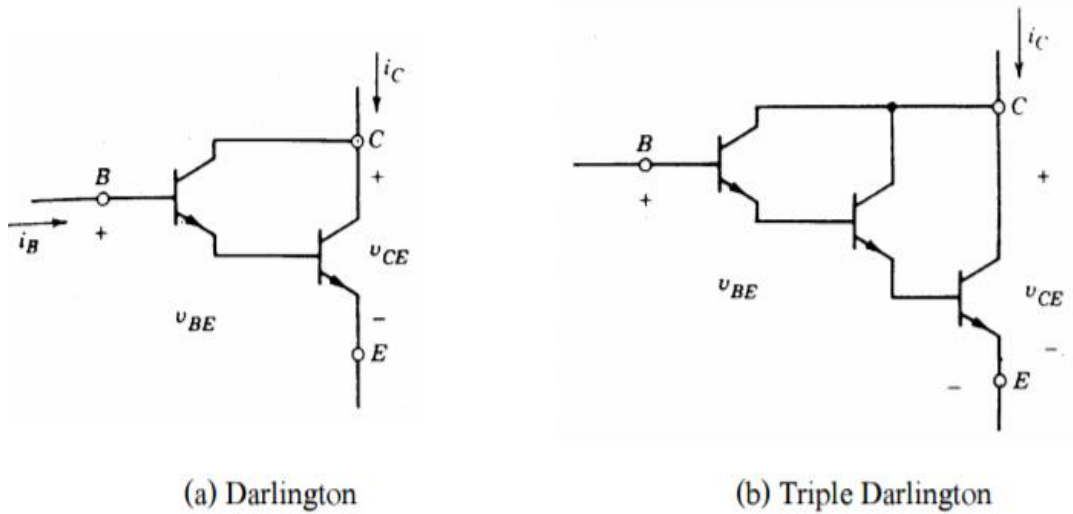


(a) Symbol

(b) i - v characteristic

(c) Idealized

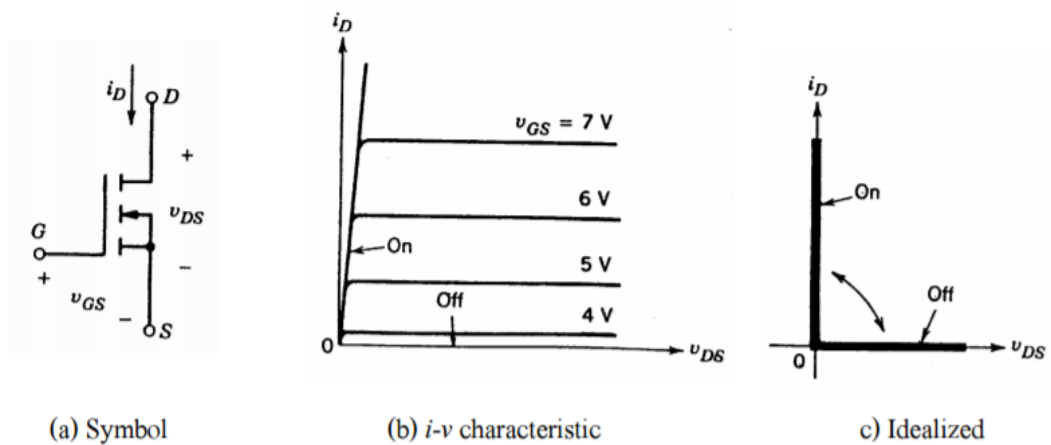
รูปที่ 2.11 BJT (a) symbol, (b) i - v characteristic, (c) idealized characteristics



รูปที่ 2.12 การเพิ่มค่าอัตราขยายของ Power BJT

2.3.3 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-Field Effect Transistor)

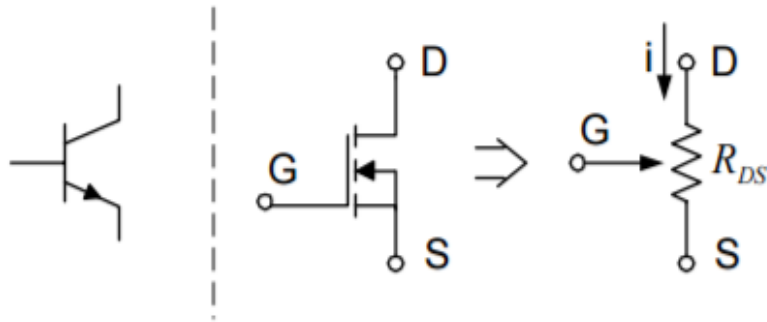
รูปที่ 2.13 แสดงสัญลักษณ์ของ MOSFET การทำงานของ MOSFET จะใช้แรงดันระหว่างเกต (Gate; G) กับซอส (Source; S) เพื่อไปควบคุมความต้านทานระหว่างเดรนกับซอสให้มีค่าลดลง ($R_{DS(ON)}$ เท่ากับ 1-100 มิลลิโอห์ม) และทำให้กระแสไหลผ่านไปได MOSFET มีค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับอยู่ประมาณ 10-100 นาโนวินาที ซึ่งถือว่าเป็นความเร็วสูงสุดในบรรดาอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งที่มีในปัจจุบัน ค่าความต้านทานระหว่างขาเกตกับซอสจะมีค่าสูงมากทำให้สามารถออกแบบวงจรขับได้ง่าย แต่ค่าประจุที่อยู่ระหว่างเกตกับซอสก็เป็นปัญหาสำหรับการขับในความถี่สูงซึ่งจะต้องใช้กำลังสูงขึ้น



รูปที่ 2.13 MOSFET (a) symbol, (b) I-V characteristic, (c) idealized characteristics

เนื่องจาก MOSFET มีค่าเวลาฟื้นตัวย้อนกลับที่สั้นมากจึงทำให้ค่ากำลังสูญเสียต่ำ แต่เนื่องจากโครงสร้างภายในและคุณสมบัติของวัสดุของสารกึ่งตัวนำทำให้ MOSFET ส่วนใหญ่ใช้ได้ในช่วง 1000 โวลต์ 100 แอมป์ MOSFET แตกต่างกับ BJT ตรงที่ขาเดรนกับซอสสามารถมองเป็น

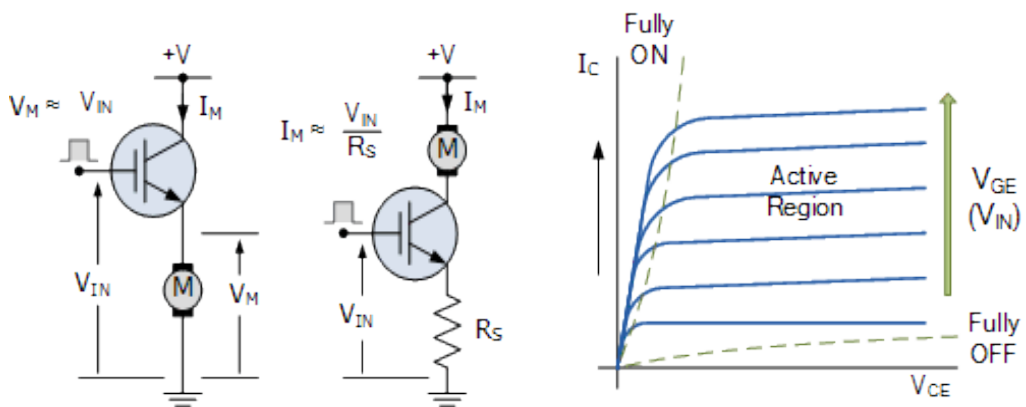
ความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ตามแรงดันของขาเกตกับซอสตามรูปที่ 2.14 เราสามารถต่อขานานขาของ MOSFET เพื่อเพิ่มกระแสได้ เพราะเดรนกับซอสสามารถมองเป็นความต้านทาน ได้นั่นเองแต่การต่อขาเกตกับซอสขนานกันหลายตัวจะทำให้ความจุรวมของขาเกตกับซอสสูงขึ้นมีผลให้วงจรถับ (Drive circuit) ต้องจ่ายกระแสมากขึ้น ข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่งระหว่าง MOSFET กับ BJT คือ MOSFET จะมีอัตราขยายต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งตรงกันข้ามกับ BJT จุดนี้เองทำให้ MOSFET มีความเสถียรทางด้านอุณหภูมิมากกว่า BJT



รูปที่ 2.14 ขาเดรนซอสของ MOSFET สามารถมองเป็นความต้านทาน

2.3.4 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)

รูปที่ 2.15 แสดงสัญลักษณ์ของ IGBT ซึ่งมีสัญลักษณ์คล้ายกับ MOSFET กับ BJT รวมกัน โดยที่ขาเกต มีสัญลักษณ์คล้าย MOSFET เพราะมีค่าความต้านเกต (Gate Impedance) สูง (10 เมกะโอห์ม) เหมือน MOSFET และมีสัญลักษณ์ คล้าย BJT ที่ขาเดรนกับซอสเพราะมีโครงสร้างคล้าย BJT และมีค่าแรงดันเกตซอสเริ่มทำงาน ($V_{CE(ON)}$) ต่ำ (0.2 โวลต์) เหมือน BJT และ IGBT นิยมใช้กันมากในงาน สวิตชิงเพราะมีคุณสมบัติที่ดีของ MOSFET และ BJT รวมกันอยู่

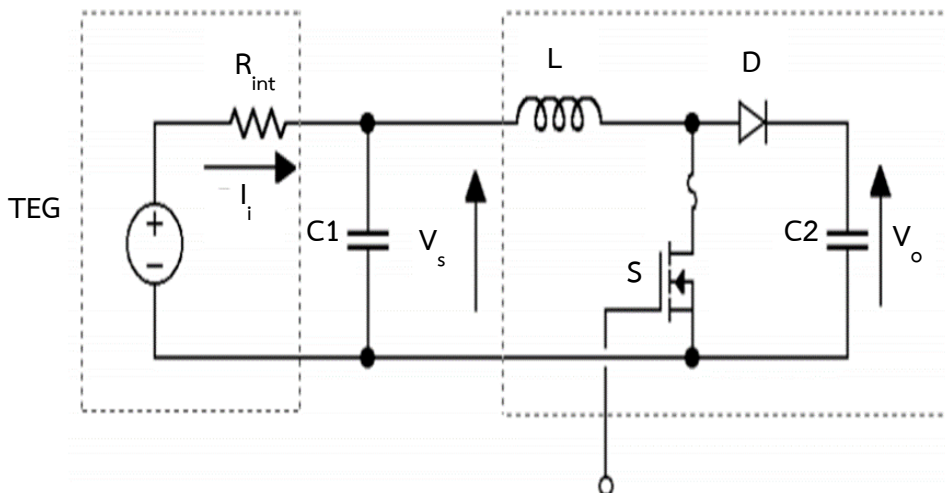


รูปที่ 2.15 IGBT (a) symbol, (b) I-V characteristic

2.4 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC converter)

2.4.1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง

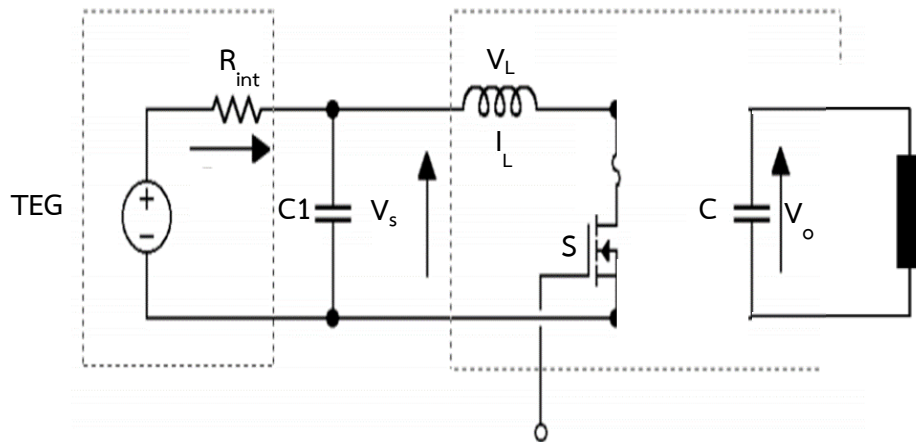
วงจรแปลงผันหลายแบบสามารถใช้ในการให้กำลังสูงสุดจากเทอร์โมอิเล็กทริกได้เช่น วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทอนระดับ วงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ และวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทอนและทบระดับ แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดพลังงานในงานวิจัยนี้ เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ที่สร้างแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำกว่าแรงดันแบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ใช้นั้นมีแรงดันถึง 12 โวลต์ แต่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตแรงได้ไฟฟ้าได้เพียง 4 โวลต์ ดังนั้นเพื่อให้ประจุสามารถเคลื่อนที่ไปยังแบตเตอรี่ได้ แรงดันของแหล่งจ่ายต้องสูงกว่าแรงดันของแหล่งเก็บประจุ ดังนั้นจึงเลือกใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ (Boost Converter) เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงมากพอให้สามารถประจุแบตเตอรี่ได้



รูปที่ 2.16 เทอร์โมอิเล็กทริกที่ต่อกับวงจรทบระดับ

2.4.2 หลักการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ

วงจรทบระดับ เป็นวงจรที่ใช้สำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (Output) ให้มีค่ามากกว่าแรงดันทางด้านอินพุต (Input) ที่ป้อนเข้ามาในวงจรหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวงจรทบระดับ (Step-up Converter) วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับจะใช้ MOSFET หรือ IGBT ดังรูปที่ 2.8 ทำหน้าที่แทนสวิตช์โดยจังหวะหรือความถี่ในการสวิตช์จะถูกควบคุมจากวงจรขับจากรูปที่ 2.8 เราสามารถพิจารณาการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ ในแต่ละโหมด (Mode) การทำงานตามการปิด-เปิดของสวิตช์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของวงจรทระดับขณะสวิตช์ปิด (Switch On)

โหมด 1 เมื่อปิดสวิตช์ (Mode 1 Switch On) ดังรูปที่ 9. การทำงานในโหมดนี้ของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทระดับจะเห็นได้ว่า เมื่อสวิตช์ปิด (Switch On) พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (V_s) จะจ่ายให้ไปสะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ในระยะเวลาที่สวิตช์ปิดอยู่โดยแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟ

$$V_s + v_L = 0 \quad (2.27)$$

$$V_s = v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.28)$$

$$\frac{V_s}{L} = \frac{di_L}{dt} \quad (2.29)$$

เมื่อสวิตช์นำกระแส ค่า $dt = DT$ ค่ากระแสเปลี่ยนแปลงคงที่

$$di_{L,on} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.30)$$

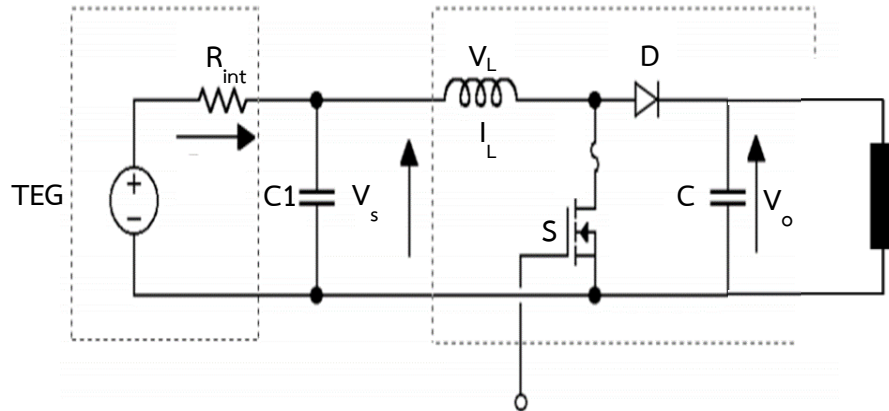
เมื่อ D คือ Duty cycle

T คือ คาบเวลาในการทำงานของสวิตช์

$di_{L,on}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส

โหมด 2 เปิดสวิตช์ (Mode 2 Switch Off) ดังรูปที่ 2.10 การทำงานในโหมดนี้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย และพลังงานไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำจะถูกส่งมาให้ยังโหลด โดยพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากตัวเหนี่ยวนำเกิดจากการคายพลังงานไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ หลังจากที่ได้สะสมพลังงานไว้

ในช่วงเวลาที่ทำงานในโหมดสวิตช์เปิดและจากการที่โหลดได้รับพลังงานไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและการคายพลังงานของตัวเหนี่ยวนำนี้เอง ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (Output) มีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต (Input)



รูปที่ 2.18 แสดงวงจรสมมูลย์ของวงจรขณะสวิตช์เปิด (Switch Off)

จากการทำงานของวงจรทั้ง 2 โหมดนี้ทำให้เห็นได้ชัดว่าวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับจะมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดอยู่ตลอดเวลาถึงแม้ว่าจะมีบางส่วนที่สวิตช์ไม่ได้ออกทำงานก็ตาม และจากความสัมพันธ์ของการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับทั้ง 2 โหมดนี้เราสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกได้จากสมการ

$$-V_s + v_L + V_o = 0 \quad (2.31)$$

$$v_L = V_s - V_o \quad (2.32)$$

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.33)$$

$$\frac{V_s - V_o}{L} = \frac{di_L}{dt} \quad (2.34)$$

เมื่อสวิตช์นำกระแส ค่า $dt = (1 - D)T$ ค่ากระแสเปลี่ยนแปลงลดลงแบบคงที่

$$di_{L,off} = \frac{(V_s - V_o)(1 - D)T}{L} \quad (2.35)$$

เมื่อ $di_{L,off}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ไม่นำกระแสที่สภาวะคงตัวการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับศูนย์

$$di_{L,on} + di_{L,off} = 0 \quad (2.36)$$

$$\frac{V_s DT}{L} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (2.37)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (2.38)$$

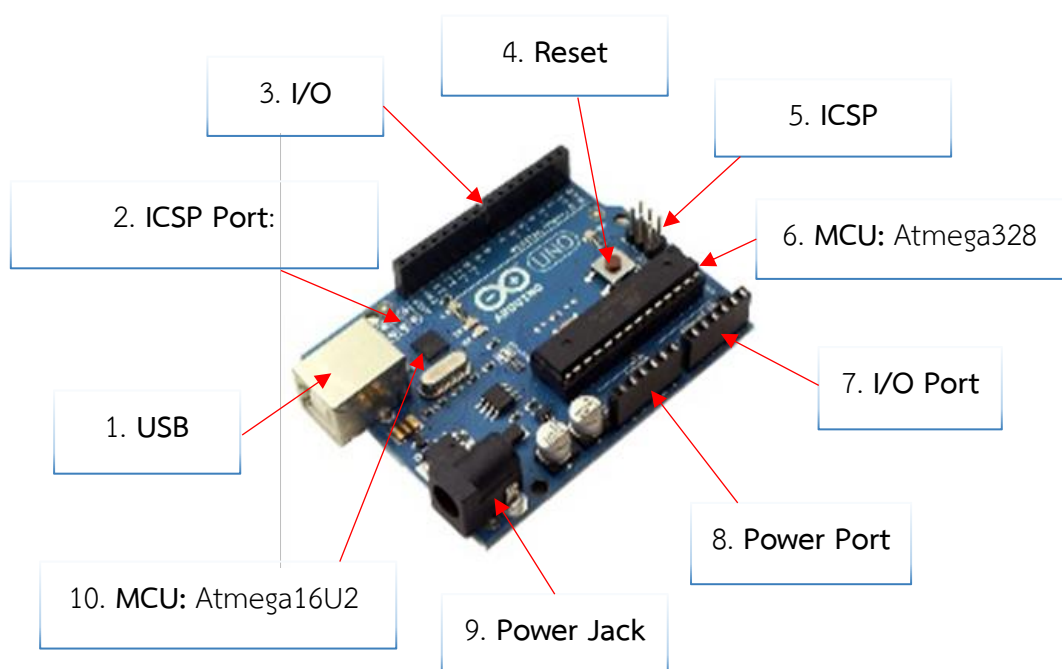
จากสมการ 2.38 สามารถนำไปหาอัตราขยายแรงดันระหว่างแรงดันขาเข้ากับแรงดันขาออก ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันขาออกขึ้นกับการปรับค่า D (Duty Cycle) โดยสามารถหาได้จากสมการ 2.39

$$D = \frac{t_{on}}{t_{tol}} \quad (2.39)$$

เมื่อ t_{on} คือ เวลาในการเปิดสวิตช์ (s)

t_{tol} คือ คาบเวลาทั้งหมด (s)

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

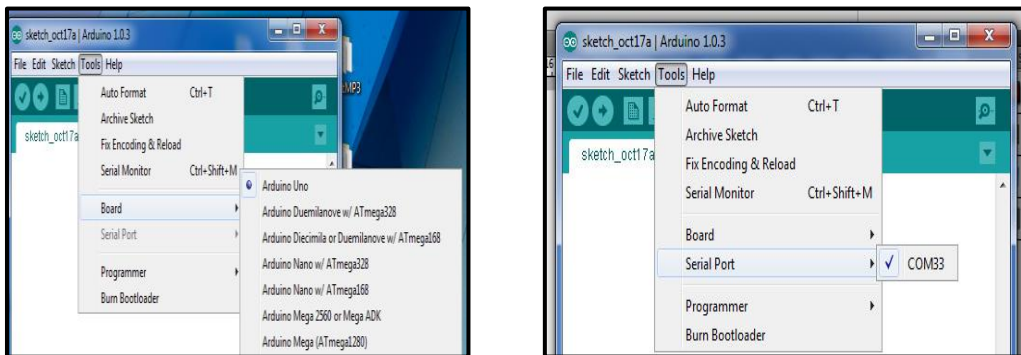


รูปที่ 2.19 บอร์ด Arduino R3

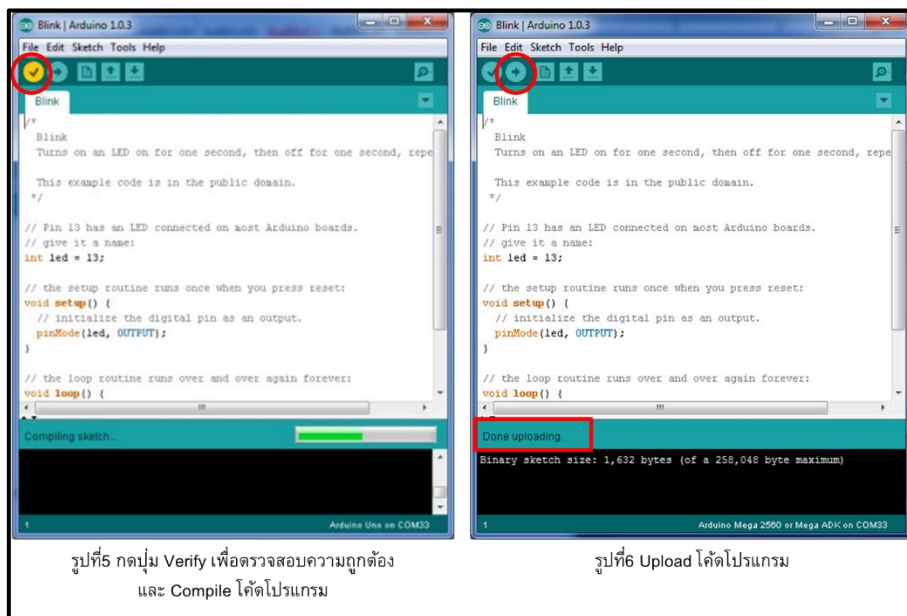
Arduino หรือ อะดุยโน้ เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัว บอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้มีจุดเด่น ได้แก่ 1.) ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อน 2.) Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแกร่ง 3.) Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้านราคาไม่แพง Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้ โดยในส่วนของประกอบของบอร์ดอะดุยโน้ (โมเดล อาร์ 3) นั้นได้ถูกแสดงดังรูปที่ 2.19

2.5.1 ขั้นตอนพื้นฐานของการเขียนโปรแกรมบน Arduino คือ

เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรม Arduino IDE หลังจากที่เขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้และหมายเลข Com port



รูปที่ 2.20 เลือกุ่นบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload และ เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด



รูปที่ 2.21 การตรวจสอบความถูกต้องและอัปโหลดโค้ดโปรแกรม

กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม จากนั้นกดปุ่ม Upload โค้ดโปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง Done uploading และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที

2.6 แบตเตอรี่ (Battery)

แบตเตอรี่เป็นตัวเก็บประจุชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานหรือประจุไฟฟ้าที่ถูกเก็บไว้ในรูปแบบทางเคมี และสามารถนำพลังงานที่กักเก็บไว้นั้นออกมาได้โดยผ่านกระบวนการคายประจุ (discharge) ของแบตเตอรี่เพื่อใช้งาน

2.6.1 ประเภทของแบตเตอรี่

ประเภทที่หนึ่ง คือ แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (Primary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ทำการประจุจนเต็มมาจากแหล่งผลิต เช่น ถ่านนาฬิกา ถ่านไฟฉาย เป็นต้น โดยแบตเตอรี่ประเภทนี้เมื่อใช้งานไปจนประจุไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่หมดลงแล้วไม่สามารถกลับนำมาใช้ได้อีก



A

B

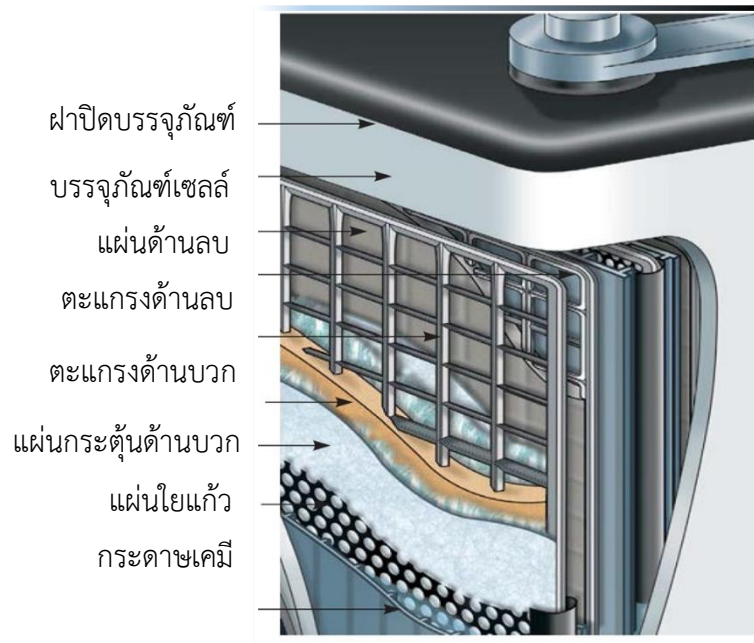
รูปที่ 2.22 A) แบตเตอรี่ปฐมภูมิ B) แบตเตอรี่ทุติยภูมิ

และอีกประเภท คือ แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่เมื่อแบตเตอรี่มีประจุไฟฟ้าที่อ่อนลง สามารถทำการประจุได้ใหม่ เช่น แบตเตอรี่รถยนต์ เป็นต้นโดยในระบบผลิตหรือระบบการประจุไฟฟ้านั้นจะต้องใช้แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิซึ่งสามารถประจุได้ใหม่เมื่อแบตเตอรี่มีกำลังไฟที่อ่อนลงดังรูปที่ 2.22

2.6.2 แบตเตอรี่แบบลีดเอซิด (Lead-Acid Battery)

ในปัจจุบันมีแบตเตอรี่หลายชนิดที่ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ลีดเอซิด (Lead-Acid Battery) แบตเตอรี่อัลคาไลน์ (Alkaline) แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (Nickel-cadmium) แต่ที่นิยม

ใช้กันมากที่สุดก็คือ แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน เพราะมีอายุการใช้งานที่ยืนยาวและมีการปล่อยประจุ (กระแสไฟฟ้า) ที่สูง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน



รูปที่ 2.23 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

โดยโครงสร้างภายในลิเธียมไอออนแบตเตอรี่จะแสดงดังรูปที่ 2.23 ประกอบด้วยเซลล์อยู่ภายใน แบตเตอรี่ โดยต่อกันแบบอนุกรม จำนวนเซลล์นั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดจากผู้ผลิต ว่าให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าใช้งานที่เท่าไร ซึ่งโดยทั่วไปมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 2 โวลต์ต่อหนึ่งเซลล์ ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่รถยนต์ที่มีแรงดันไฟฟ้าใช้งานที่ 12 โวลต์ ดังนั้นภายในแบตเตอรี่จึงประกอบด้วยเซลล์ 6 เซลล์ต่ออนุกรมกันอยู่ภายใน

2.7 หลักการประจุแบตเตอรี่แบบ 2 สถานะ

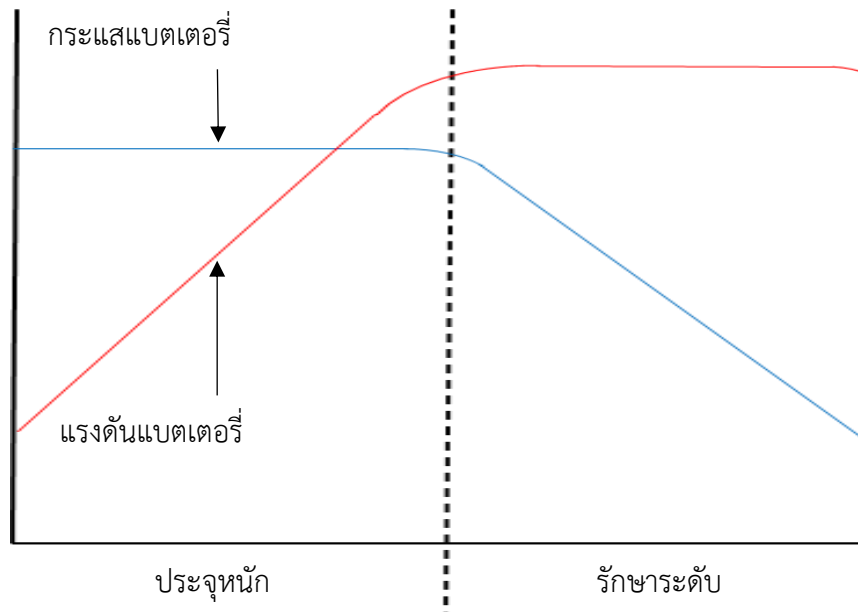
การประจุแบตเตอรี่ที่นิยมใช้กัน คือ การประจุแบบ 2 สถานะ ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับ แบตเตอรี่กรดตะกั่ว เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการประจุกลับไปยังแบตเตอรี่ให้เต็มและยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ในรูปที่ 2.24 แสดงสถานการณ์การประจุแบตเตอรี่แบบ 2 สถานะ คือ

1) สถานะประจุหนัก (Bulk mode) เป็นการประจุในโหมดกระแสคงตัว ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น โดยแบตเตอรี่จะถูกประจุกลับไปในแบตเตอรี่ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ในสถานะนี้

2) รักษาระดับ (Float mode) เป็นการประจุอย่างต่อเนื่อง ในสถานะนี้แบตเตอรี่จะถูกประจุกลับเข้าไปอีก 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่าประมาณ 2.4 โวลต์ต่อเซลล์หรือ

14.6 โวลต์สำหรับแบตเตอรี่ 12 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าจะรักษาระดับในขณะที่กระแสไฟฟ้าจะถูกลดระดับลงไปเรื่อย ๆ



รูปที่ 2.24 การประจุแบตเตอรี่ 2 สถานะ

ซึ่งสามารถหาเวลาในการประจุแบตเตอรี่ได้จากสูตร

$$t_{ch} = \frac{Ah}{I} \quad (2.40)$$

โดย t_{ch} คือ เวลาในการประจุแบตเตอรี่ (hour, h)

Ah คือ ค่ากระแสชั่วโมงของแบตเตอรี่ (Ah)

I คือ กระแสในการประจุ (A)

ตัวอย่างเช่น ในแบตเตอรี่ 120 Ah

คำนวณกระแสในการประจุแบตเตอรี่ 120 Ah เมื่อทราบค่ากระแสในการประจุจะต้องเป็น 10% ของ Ah ของแบตเตอรี่ ดังนั้นกระแสในการประจุแบตเตอรี่จะเท่ากับ

$$120 \text{ Ah} = 120 \times (10/100) = 12 \text{ แอมป์}$$

เนื่องจากการสูญเสียจึงสามารถใช้ 12-14 แอมป์ แต่สมมติว่ามีค่าเป็น 13 แอมป์สำหรับประจุ เวลาในการประจุแบตเตอรี่ในกรณีที่มีความเหมาะสมจะได้เป็น

$$T = 120/13 = 9.23 \text{ ชั่วโมง}$$

ในความเป็นจริงอาจจะมีการสูญเสียมากถึง 40% ในการประจุแบตเตอรี่ซึ่งก็คือ

$$120 (40/100) = 48 \text{ แอมป์}$$

ดังนั้นจึงได้เวลาการประจุแบตเตอรี่ในความเป็นจริงคือ

$$168/13 = 13 \text{ ชั่วโมง}$$

ดังนั้นแบตเตอรี่ 120 Ah ต้องใช้เวลา 13 ชั่วโมงสำหรับการประจุที่สมบูรณ์ด้วยกระแสไฟฟ้า 13 A

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่กล่าวมาแล้วว่าการประจุแบตเตอรี่ด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานทางเลือกนั้นได้รับความสนใจในปัจจุบันอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำพลังงานที่สูญเสียหรือพลังงานได้เปล่ามาใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยได้ทำการพัฒนาระบบการประจุแบตเตอรี่โดยมีดังนี้

จากงานวิจัย Wei Xie และคณะ ได้มีการออกแบบตัวควบคุมการติดตามจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด ด้วยเทคนิคครบวงจรและสังเกต โดยการวิเคราะห์จากกำลังไฟฟ้าขาออกของเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งตัวควบคุมการติดตามจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์วัดแรงดัน เซ็นเซอร์วัดกระแส ไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรแปลงผันแบบ SEPIC ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถใช้งานได้ประมาณ 5 โวลต์ทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกสูงขึ้น 2 วัตต์เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิ 75 °C [15]

Montecucco A. และ Knox A. ได้นำเสนอวิธีการคำนวณแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดระหว่างการทำงานแบบ Pseudonormal ของวงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้าบัค-บูทแบบซิงโครนัสผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์และประจุใส่แบตเตอรี่ตะกั่วกรด ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถติดตามจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดได้อย่างแม่นยำ [16]

Nisha K S. และ Mini V P. นำเสนอโดยใช้เทคนิคครบวงจรและสังเกตในการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดที่ได้จากแหล่งกำเนิดพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริก TEC1-12706. ที่ได้รับความร้อนปานกลาง และทำการจำลองสภาพแวดล้อมผ่าน MATLAB / Simulink ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมในการเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาคยานยนต์ [17]

Ssennoga Twaha, และคณะ ได้วิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการวัดกำลังไฟสูงสุด โดยใช้เทคนิคเพิ่มค่าความนำ เพื่อเปรียบเทียบผลจากการใช้เทคนิคครบวงจร

และสังเกตในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าเทคนิคเพิ่มค่าความนำมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเทคนิคרבวณและสังเกต โดยระบบทำงานในช่วงอุณหภูมิ 200 °C - 300 °C [18]

Jensak Eakburanawat และ Itsda Boonyaroonate ได้อธิบายถึงการเครื่องประจุแบบเตอรี โดยใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ SEPIC และควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยเทคนิคการติดตามจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด ซึ่งกำลังที่ใช้ประจุสูงที่สุดดีกว่าการประจุโดยตรงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหลักการของการผลิตไฟฟ้าและพัฒนาเครื่องประจุแบบเตอรีที่ใช้ความร้อนเหลือทิ้งหรือแหล่งความร้อนอื่น ๆ ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก [19]

Hayati Mamur และ Rasit Ahiska ได้ใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และเทคนิคרבวณและสังเกต เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเทอร์โมอิเล็กทริกแบบพกพา ซึ่งพบว่าเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกแบบพกพาสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [20]

S. Lyden และ M.E. Haque ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบเทคนิคต่าง ๆ ในการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด ในด้านความแม่นยำ ความเร็วภายในแสงอาทิตย์ ความเร็วในสภาวะปกติ ความเสถียร ความเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับพารามิเตอร์ในระบบ และความซับซ้อนของเทคนิคดังกล่าว [21]

จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการประจุแบบเตอรีด้วยเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด ซึ่งเลือกใช้เทคนิค 2 เทคนิค คือ 1. เทคนิคרבวณและสังเกต 2. เทคนิคเพิ่มค่าความนำ และใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบทบระดับ เพื่อประจุแบบเตอรี 12 โวลต์ จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดเล็ก เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำ ไม่มีความซับซ้อนมาก และเป็นเทคนิคที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วในการทำงานได้

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่กล่าวมาดังบทที่ 2 เป็นวงจรเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีตัวต้านทานเชื่อมต่อแบบอนุกรมอยู่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแหล่งจ่ายแหล่งต้นไฟฟ้าจะมีความต้านทานภายในเสมอ โดยเมื่อต่อกับโหลดแล้วจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าถูกแบ่งไปตกคร่อมยังบริเวณตัวต้านทานภายในของแหล่งจ่ายแหล่งต้นไฟฟ้าอยู่ส่วนหนึ่งเสมอ ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลได้จากการต่อวงจรทดสอบความต้านทานภายใน และหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้จากวงจรสมมูลเทวินิน ซึ่งในการทดสอบพารามิเตอร์ของเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

3.1.1 ฮีตเตอร์ (Heater)



รูปที่ 3.1 ฮีตเตอร์ชนิดแท่ง

มีอยู่หลายประเภทซึ่งแบ่งตามคุณลักษณะการใช้งาน เช่น 1. ฮีตเตอร์จุ่ม-ฮีตเตอร์ต้มน้ำ (Immersion Heater) คือ ฮีตเตอร์ที่ใช้ให้ความร้อนกับของเหลว เช่น ต้มน้ำ หรือ อุ่นน้ำมันของเหลวต่างๆ ได้เกือบทุกประเภทที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสแตนเลส ซึ่งเหมาะสำหรับทุกงานอุตสาหกรรมที่มีการอุ่น หรือต้มของเหลวหลายชนิด และยังอุ่นหรือต้มของเหลวที่เหนียวข้น เช่น อุ่นกาวยางมะตอย การติดตั้งสามารถทำได้โดยเชื่อมเกลียวตัวเมียติดกับถังแล้วใส่ฮีตเตอร์แบบเกลียวเข้าไปโดยตัวฮีตเตอร์ขนานกับพื้นถัง 2. ฮีตเตอร์บอบบิ้น (Bobbin Heater) คือ ฮีตเตอร์แบบจุ่มชนิดหนึ่ง ถูกรอกแบบให้ความร้อนกับของเหลวสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายใช้ให้ความร้อนกับของเหลว เช่น งานชุบ งานแช่ในกรด หรือสารละลายวัสดุที่เป็นควอทซ์สำหรับกรดหรือสารละลายกัดกร่อนพิเศษและยังนำไปใช้อุ่น

หรือต้มน้ำยาเคมี และของเหลวเกือบทุกชนิด ให้ความร้อนคงที่สม่ำเสมอ ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีเกือบทุกประเภท ลักษณะของฮีตเตอร์บอบบี้ (Bobbin Heater) คือ ฮีตเตอร์จะสอดเข้ากับท่อสำหรับให้ความร้อนกับของเหลว โดยไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีเกือบทุกประเภท สามารถถอดออกมาซ่อมบำรุงได้สะดวก เหมาะกับงานอุ่นน้ำ หรือต้มน้ำยาเคมี น้ำมัน แวกซ์ หรือไขมัน 3. ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge heater) แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ฮีตเตอร์แท่งแบบไฮเดนมักใช้กับงานที่ไม่ร้อนเกิน 350°C และฮีตเตอร์แท่งแบบโลเดนใช้กับงานที่ไม่ควรร้อนเกิน 150°C แต่เนื่องจากฮีตเตอร์ไฮเดนดีกว่า ใช้งานได้นานกว่า ราคาแพงกว่าแต่ไม่มากจึงได้รับความนิยมมากกว่า ฮีตเตอร์แท่งนี้ใช้ในการอุ่นและให้ความร้อนให้แก่แม่พิมพ์ ชิ้นงานเหล็ก หัวพ่นกาว เครื่องพิมพ์ทอง เครื่องรีดถุงพลาสติกและสามารถนำมาใส่เกลียวเพื่อต้มน้ำเคมีกาวในท่อหรือถาด ซึ่งนอกจากฮีตเตอร์ที่ได้กล่าวไป 3 ประเภท ยังมีฮีตเตอร์อีกหลายประเภท เช่น ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) เซอร์คูเรชั่นฮีตเตอร์ (Circulation Heater) คอยล์ฮีตเตอร์ (Coil Heater) เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของฮีตเตอร์

| | |
|----------------------------|-----|
| เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm) | 6.0 |
| ความยาวท่อของฮีตเตอร์ (mm) | 50 |
| แรงดัน (V) | 220 |
| กำลังวัตต์ (W) | 200 |

ซึ่งในการวิจัยนี้เลือกใช้ฮีตเตอร์แท่งในการให้ความร้อน โดยสอดฮีตเตอร์ไปยังแผ่นอลูมิเนียมขนาด 5.6 x 5.6 x 1.2 เซนติเมตร และต่อเครื่อง Source Meter เพื่อให้พลังงานกับฮีตเตอร์และวัดอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล

3.1.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45



รูปที่ 3.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TELBP1-12656-0.45

โมดูลกำลังสำหรับการแปลงแหล่งความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง เป็นโมดูลที่ผลิตจากส่วนประกอบของตะกั่ว ดีบุก เทลลูเรียมและบิสมัท เทลลูเรียม โดยสารประกอบทั้งสองมีข้อดีเนื่องจากทนต่อแหล่งความร้อน 200-360 °C ซึ่งสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้ในอุณหภูมิที่สูงถึง 360 °C (680 °F) และทำงานเป็นระยะ ๆ ที่อุณหภูมิสูงถึง 400 °C (752 °F) โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจะผลิตไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิทั่วทั้งโมดูล กำลังในการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านมีค่ามากขึ้น โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกจะติดอยู่กับแผ่นตัวนำความร้อนกราไฟท์ทั้งสองด้านและติดกับแผ่นเซรามิกที่มีความต้านทานความร้อนต่ำ ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้สารประกอบในการช่วยถ่ายเทความร้อนอื่น ๆ กับโมดูลนี้

ตารางที่ 3.2 ลักษณะจำเพาะของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

| TELBP1-12656-0.45 Size: 56 mm x 56 mm | |
|--|------|
| อุณหภูมิด้านร้อน (°C) | 350 |
| อุณหภูมิด้านเย็น (°C) | 30 |
| แรงดันขณะเปิดวงจร (volts) | 9.2 |
| ความต้านทานขาออกที่เหมาะสม (ohms) | 0.97 |
| ศักย์ไฟฟ้าขาออกของโหลดที่เหมาะสม (volts) | 4.6 |
| กระแสไฟฟ้าขาออกของโหลดที่เหมาะสม (amperes) | 4.7 |
| กำลังไฟฟ้าขาออกของโหลดที่เหมาะสม (watts) | 21.7 |
| ความร้อนที่ไหลผ่านโมดูล (watts) | 247 |
| ฮีทฟลักซ์ (watts/cm ²) | 7.9 |

3.1.3 ฮีตซิงก์หรือแผงระบายความร้อน (Heat Sink)

เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนออกจากตัวอุปกรณ์โดยอาศัยหลักของการถ่ายเทความร้อนโดยเพิ่มพื้นที่สัมผัสอากาศ ทำให้การพาความร้อนจากตัวอุปกรณ์สู่อากาศโดยรอบทำได้เร็วขึ้น ส่วนใหญ่เป็นวัสดุประเภทโลหะประสิทธิภาพของฮีตซิงก์จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) พื้นที่ผิวสัมผัส การออกแบบรูปร่าง และจำนวนครีระบายความร้อนที่เหมาะสม โดยปกติจะมีการติดตั้งแผงระบายความร้อนกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความร้อนสูง เช่น ทรานซิสเตอร์กำลัง หลอดเลเซอร์ เป็นต้น วัสดุที่นิยมนำมาทำฮีตซิงก์ในปัจจุบันมีอยู่ 3 ชนิดคือ อะลูมิเนียม ทองแดง และทองแดงผสมอะลูมิเนียม ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป โดยในการทดสอบพารามิเตอร์ของเทอร์โมอิเล็กทริกนี้เลือกใช้อะลูมิเนียม เนื่องจากคุณสมบัติของอะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักเบา มีราคาถูกกว่าทองแดง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.3 คือ เป็นฮีตซิงก์ที่ทำการสร้างโดยภายในเป็นท่อทองแดงและต่อกับสายยางที่มีการฉีบน้ำเย็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อน



รูปที่ 3.3 ฮีตซิงก์

3.1.4 เทอร์โมคัปเปิล

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า ทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้เกิดการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง โดยเรียกอุณหภูมิคงที่ที่ใช้อ้างอิงนี้ว่า Reference Junction และได้มีการกำหนด Reference Junction ให้เป็น 0°C คือโลหะ 2 ชนิดต่างกันที่นำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกันที่ด้านหนึ่ง ซึ่งเป็นด้านที่ใช้วัดอุณหภูมิ ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ใช้งาน เช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิ, เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เป็นต้น เทอร์โมคัปเปิลถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ เป็นชนิดหัววัด เช่น เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค เทอร์โมคัปเปิล RTD Pt100 เป็นต้น จากการจับคู่ของโลหะที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีคุณสมบัติในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลเลือกใช้ให้ถูกต้อง และเหมาะสมกับงานนั้น ๆ โดยสิ่งที่ควรพิจารณามีหลายข้อ เช่น ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน ราคา ความกีดกร่อนของสารที่เทอร์โมคัปเปิลสัมผัส ดังนั้นจึงเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด k ในการทดสอบเนื่องจากเป็นที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่า สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -250 จนถึง 1300°C มีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูง



รูปที่ 3.4 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

3.1.5 เครื่องทำความเย็น (Chiller)

เครื่องทำความเย็นมีหน้าที่ในการผลิตน้ำส่งไปเย็น หรือปรับอุณหภูมิน้ำเย็น มีปุ่มปรับระดับความเย็นได้ 7 ระดับ ซึ่งในระบบนี้ใช้ในการสร้างน้ำเย็นเพื่อยังฮีตซิงก์เพื่อช่วยในการระบายความร้อนจากฮีตซิงก์ เป็นส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน โดยมีการต่อ Chiller เข้ากับปั๊มเพื่อสร้างแรงดันในการนำน้ำจาก Chiller ไปยังฮีตซิงก์และนำน้ำร้อนจากฮีตซิงก์ไปยัง Chiller เพื่อให้เกิดระบบน้ำเย็นแบบหมุนเวียนแกฮีตซิงก์



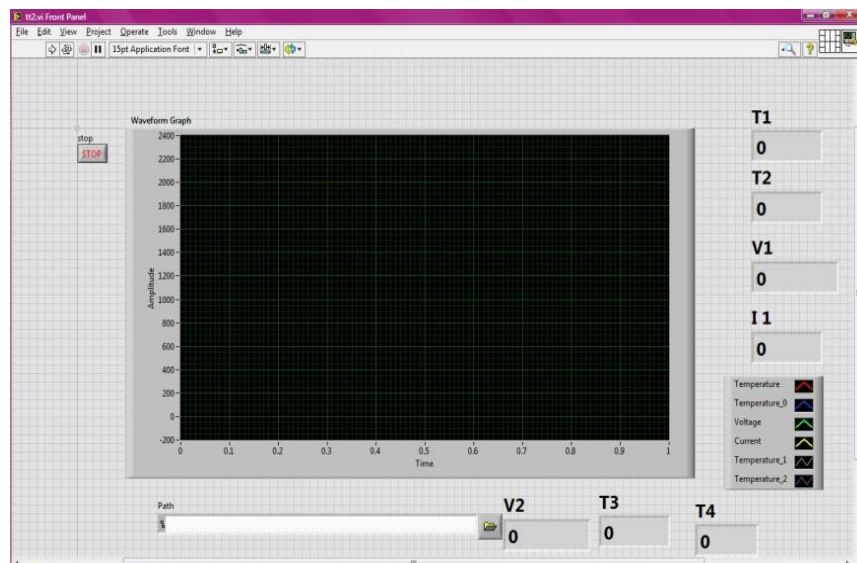
รูปที่ 3.5 เครื่องทำความเย็น

3.1.6 เครื่องบันทึกข้อมูล NI9211 NI9201 NI922



รูปที่ 3.6 เครื่องบันทึกข้อมูล NI9211 NI9201 NI9227

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยเครื่องบันทึกข้อมูล NI9211 ใช้ในการบันทึกอุณหภูมิ เครื่องบันทึกข้อมูล NI9201 ใช้ในการบันทึกแรงดันไฟฟ้า และเครื่องบันทึกข้อมูล NI9227 ใช้ในการบันทึกกระแสไฟฟ้า เครื่องวัดทั้ง 3 ชนิดเป็นเครื่องวัดที่มีความละเอียดสูงและมีการป้องกันสัญญาณรบกวน รวมทั้งระบบป้องกันความปลอดภัยในการใช้งาน โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม LABVIEW ซึ่งจะทำการบันทึกข้อมูลที่วัดได้ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LABVIEW ตามช่วงเวลาที่เรา กำหนดไว้

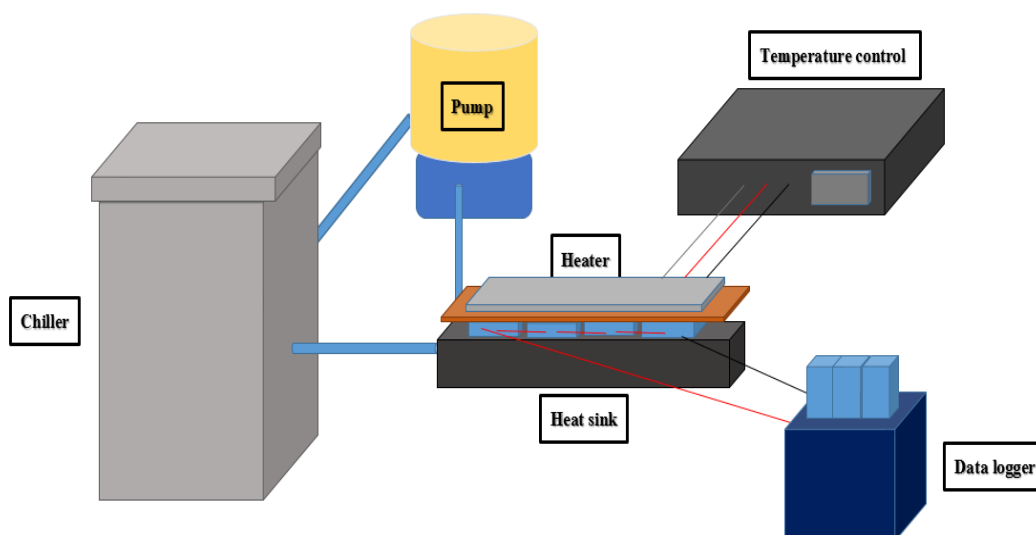


รูปที่ 3.7 โปรแกรม LAB VIEW

ในส่วนของโปรแกรม LAB VIEW เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในด้านการควบคุมและตรวจสอบข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ โดยในงานนี้ได้ใช้โปรแกรมในการเก็บสัญญาณและ

แสดงผลแบบ Real Time ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บและนำมาวิเคราะห์ ซึ่งลักษณะของ front panel ของโปรแกรมได้แสดงดังรูปที่ 3.7 ประกอบด้วยส่วนแสดงผลต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และลักษณะของรูปสัญญาณที่ได้จากระบบ

3.1.7 ขั้นตอนการประกอบระบบและเก็บค่าตัวพารามิเตอร์ของเทอร์โมอิเล็กทริก



รูปที่ 3.8 แผนภาพระบบเก็บค่าเทอร์โมอิเล็กทริก

การประกอบระบบเก็บค่าเทอร์โมอิเล็กทริกดังรูปที่ 3.8 มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในหัวข้อ 3.11 – 3.17 ซึ่งสามารถอธิบายดังต่อไปนี้ คือ ทำการต่อเครื่องทำความเย็นเข้ากับปั้มน้ำ โคนเลือกช่องปล่อยน้ำด้านบนเข้าสู่ปั้มน้ำเนื่องจากได้คำนึงถึงการลดเศษตะกอนบริเวณถังเก็บน้ำของเครื่องทำความเย็นไปสะสมในปั้มน้ำ และต่อท่อจากช่องปล่อยน้ำของปั้มน้ำไปยังด้านหนึ่งของแผ่นระบายความร้อนหรือฮีตซิงก์ โดยอีกด้านหนึ่งของแผ่นระบายความร้อนจะถูกต่อไปยังช่องรับน้ำของเครื่องทำความเย็นเพื่อนำน้ำที่มีอุณหภูมิสูงไปลดอุณหภูมิลงเพิ่มที่จะนำมาระบายความร้อนที่แผ่นระบายความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกครั้ง จากนั้นทาซิลิโคนนำความร้อนลงบนแผ่นระบายความร้อนให้มีปริมาณตามความเหมาะสมกับเทอร์โมอิเล็กทริก นำเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นวางลงบนแผ่นระบายความร้อนดังกล่าวกลดเล็กน้อยและจัดให้มีระยะพอดีกับแผ่นระบายความร้อนและบริเวณซิลิโคนนำความร้อนที่ทา ต่อมานำแผ่นทองแดงที่ขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดและทาซิลิโคนนำความร้อนลงบนมาวางบนด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก นำแผ่นทำความร้อนหรือฮีตเตอร์มาวางบนแผ่นทองแดงอีกชั้น โดยแผ่นทำความร้อนจะถูกควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งวัดอุณหภูมิจากแผ่นทองแดง และในส่วนของการเก็บข้อมูลจะใช้เครื่องบันทึกข้อมูลของบริษัท National Instruments ในการ

บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิทั้งด้านร้อนและด้านระบายความร้อน โดยมีความถี่ในการบันทึกทุก 1 วินาที ซึ่งระบบที่สร้างขึ้นได้แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ภาพระบบการทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก

จากรูปที่ 3.9 ทำการทดสอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล ขณะทดสอบจึงพบว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังมีค่าไม่เพียงพอต่อความต้องการในการประจุแบตเตอรี่ จึงทำการเพิ่มเทอร์โมอิเล็กทริกเป็น 4 โมดูล โดยต่อผสมระหว่างวงจรอนุกรมและวงจรขนาน นอกจากนี้ยังเพิ่มแคลมป์จับระหว่างฮีตเตอร์และฮีตซิงก์เพื่อลดความต้านทานระหว่างรอยต่อของทั้งด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก และทดสอบอีกครั้ง

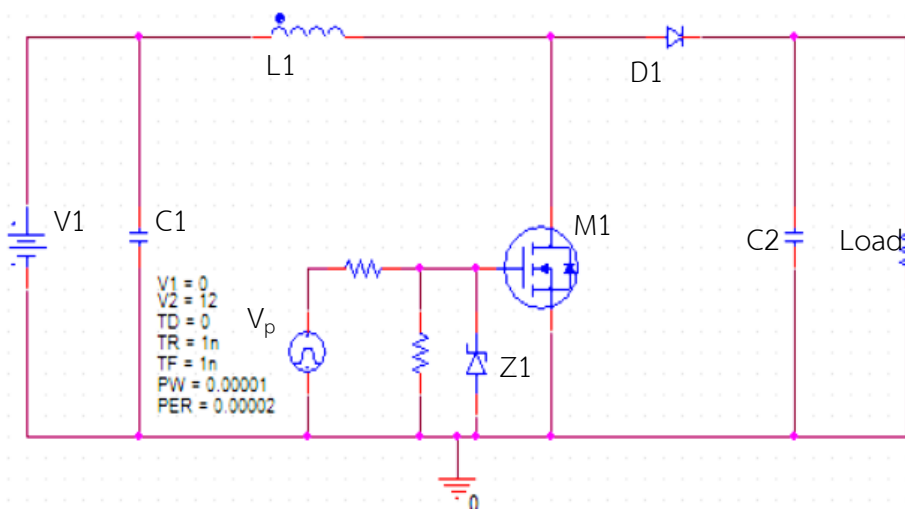
3.2 การออกแบบวงจรทระดับ

จากหัวข้อที่ 2.3 สามารถออกแบบวงจรทระดับกำหนดคุณสมบัติให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีค่าสุดที่ 5 ถึง 9.2 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกมีค่า 13 ถึง 18 โวลต์ กระแสขาเข้ามีค่า 9.4 แอมป์ กำลังที่ได้ 100 วัตต์ ซึ่งเมื่อคำนวณออกมาจะได้คุณสมบัติของอุปกรณ์เป็นดังนี้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของอุปกรณ์จากการออกแบบโดยการคำนวณ

| สัญลักษณ์ | ค่าที่คำนวณได้ | ความหมาย |
|--------------------|----------------------------|------------------------------------|
| I_{out} | 6.65 A | กระแสขาออกจากวงจรทบทระดับ |
| D_{max} | 72 % | วัฏจักรสูงสุดของพัลส์สัญญาณ |
| D_{min} | 29 % | วัฏจักรต่ำสุดของพัลส์สัญญาณ |
| t_{on} | 14.44 μs | เวลาของการเกิดพัลส์สัญญาณ |
| $I_{mosfet,diode}$ | ≥ 25 A | กระแสสูงสุดของมอสเฟตและไดโอด |
| $I_{forward}$ | $\geq I_{out} \geq 6.65$ A | กระแสไบแอสตรงของไดโอด |
| V_{rms} | $\geq V_{out} \geq 18V$ | แรงดันเฉลี่ยของไดโอด |
| C_{out} | ≥ 1920 μf | ค่าของตัวเก็บประจุขาออก |
| ESR | ≤ 0.200 $m\Omega$ | ความต้านทานภายในที่ทำให้กระแสเรียบ |

3.3 การจำลองวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบทระดับ



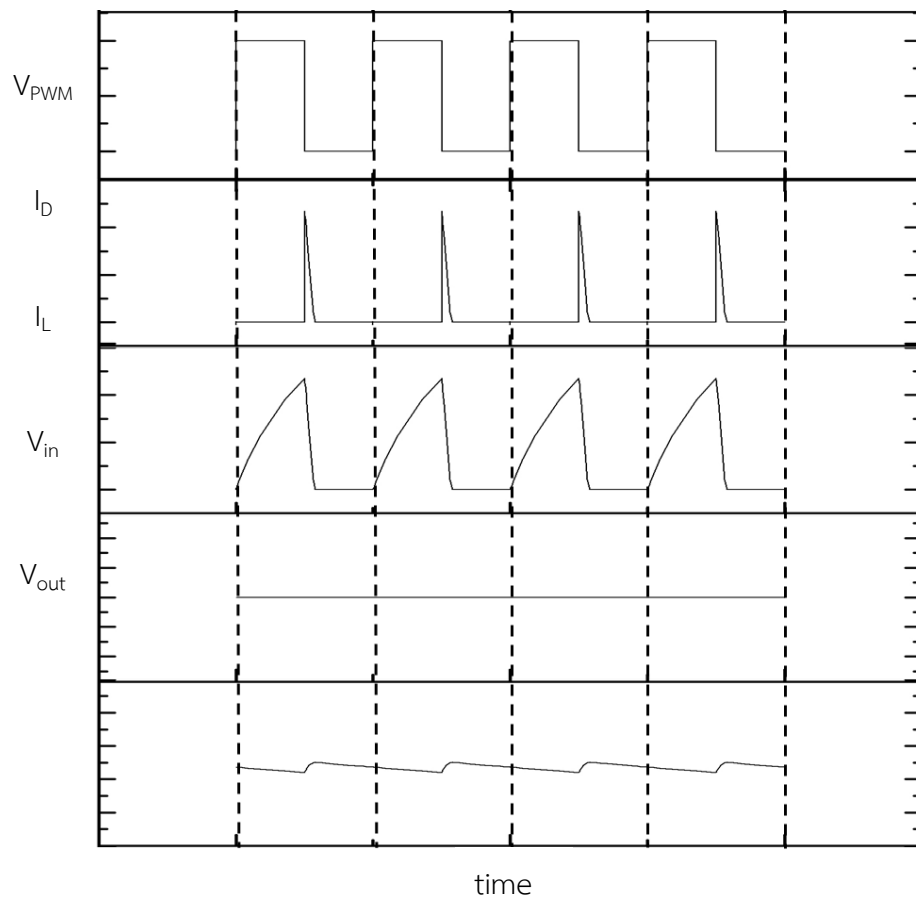
รูปที่ 3.10 การจำลองวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบทระดับ

จากรูปที่ 3.10 เป็นการจำลองวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบทระดับด้วยโปรแกรม Orcad Pspice ในวงจรมีส่วนประกอบ คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ตัวนำ ตัวเก็บประจุ ไดโอด

ไอจีบีที ตัวต้านทานโหลด และแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งเมื่อทำการวัดสัญญาณไฟฟ้าในบริเวณต่าง ๆ จะได้รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสของส่วนต่าง ๆ ออกมาดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 3.11 เป็นกราฟระหว่างพารามิเตอร์กับเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแต่ละว่าในช่วงของวงจรที่มีการนำกระแสและไม่นำกระแสของไอจีบีทีนั้น ทำให้เกิดแรงดันและกระแสไฟฟ้าภายในวงจรมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร โดยจากรูปที่ 3.11 พบว่าเมื่อไอจีบีทีนำกระแส ไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอด ขณะที่เกิดการเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ แรงดันขาเข้ามีค่าคงที่ และแรงดันขาออกมีลักษณะเป็นระลอกคลื่น เนื่องจากการสวิตช์ของตัวไอจีบีทีทำให้เกิดแรงดันเป็นคลื่นและเมื่อผ่านตัวเก็บประจุทำให้เกิดระลอกคลื่นขนาดเล็ก

เมื่อไอจีบีทีไม่นำกระแส ทำให้เกิดกระแสไหลไปยังไดโอด ไดโอดจึงสามารถนำกระแสเมื่อเกิดการไบแอสไปข้างหน้า ขณะที่ตัวเหนี่ยวนำเกิดการคลายพลังงาน แรงดันขาเข้ายังมีค่าคงที่ และแรงดันขาออกมีลักษณะเป็นระลอกคลื่นเช่นเดียวกับขณะไอจีบีทีนำกระแส

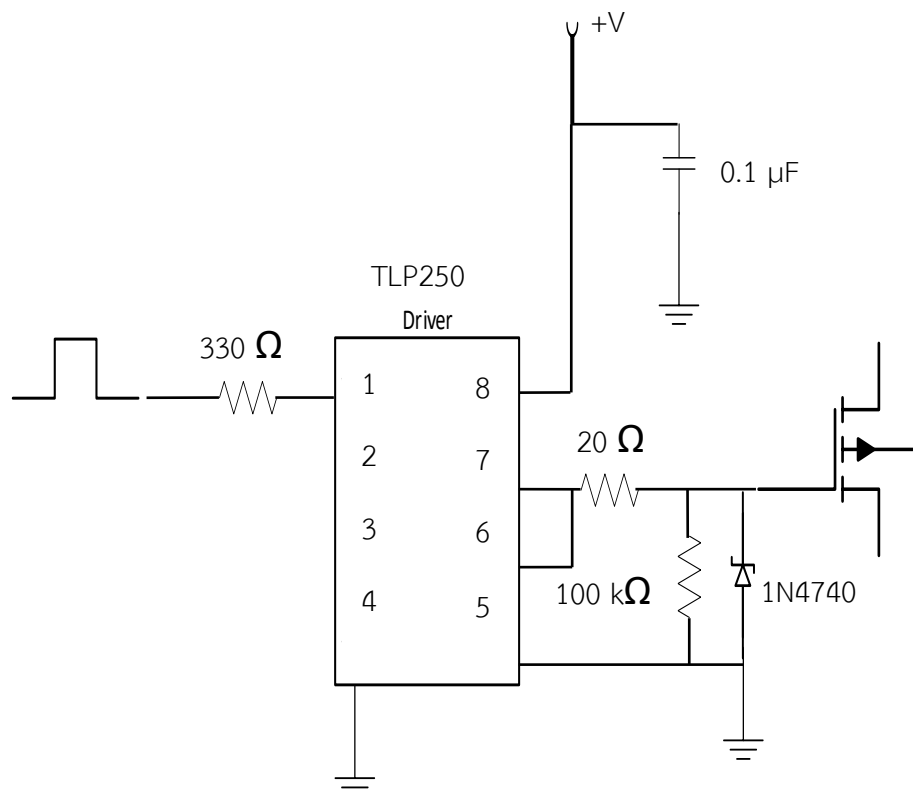


รูปที่ 3.11 สัญญาณของวงจรแปลงผันกระแสตรงแบบทบระดับ

3.4 การสร้างวงจรทบทระดับ

เมื่อทำการจำลองวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้างวดหัวข้อที่ 3.3 จากนั้นคัดเลือกอุปกรณ์ตามค่าที่ได้จากการออกแบบ เพื่อให้เหมาะสมกับวงจรในงานวิจัยนี้ ซึ่งในหัวข้อที่ 3.4 จะกล่าวถึงวงจรขั้วเกตของวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้าและวงจรทบทระดับที่ได้สร้างขึ้น

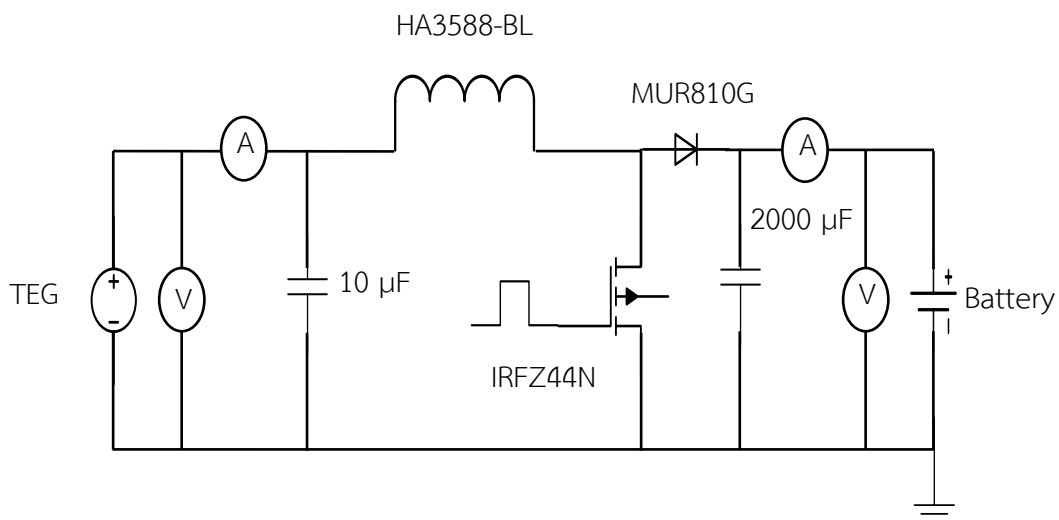
จากรูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพของวงจรขั้วเกตซึ่งประกอบด้วย Opto isolator TPL250 โดยด้านซ้ายของวงจร ขาของ Opto isolator หมายเลข 1 เชื่อมต่อกับตัวต้านทาน 330 โอห์ม และมีการให้สัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ ขาหมายเลข 4 เชื่อมต่อกับกราวด์ของบอร์ดอะดุยโน ส่วนด้านขวาของ Opto isolator ขาหมายเลข 8 เป็นขารับแรงดันไฟฟ้าในการขั้วเกตมอสเฟต ซึ่งต่อกับตัวเก็บประจุขนาด 0.1 ไมโครฟารัด ขาหมายเลข 6 และ 7 ทำหน้าที่เป็นขาให้แรงดันไฟฟ้าในการขั้วเกตมีลักษณะตามสัญญาณพัลส์จากบอร์ดอะดุยโน โดยเชื่อมต่อกับตัวต้านทาน 20 โอห์ม 100 กิโลโอห์ม ซีเนอร์ไดโอด 10 โวลต์ และเชื่อมต่อไปยังมอสเฟตกำลัง ส่วนขาหมายเลข 5 ทำหน้าที่เป็นกราวด์ของวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.12 วงจรขั้วเกตของวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า

ส่วนต่อไปคือวงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งคือแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้วงจรทบทระดับแรงดันไฟฟ้า เชื่อมต่อออกมากับเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าและเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าและตัวเก็บประจุของ 10 ไมโครฟารัด ต่อมาขั้วบวกของตัวเก็บประจุตัวแรกจะเชื่อมต่อ

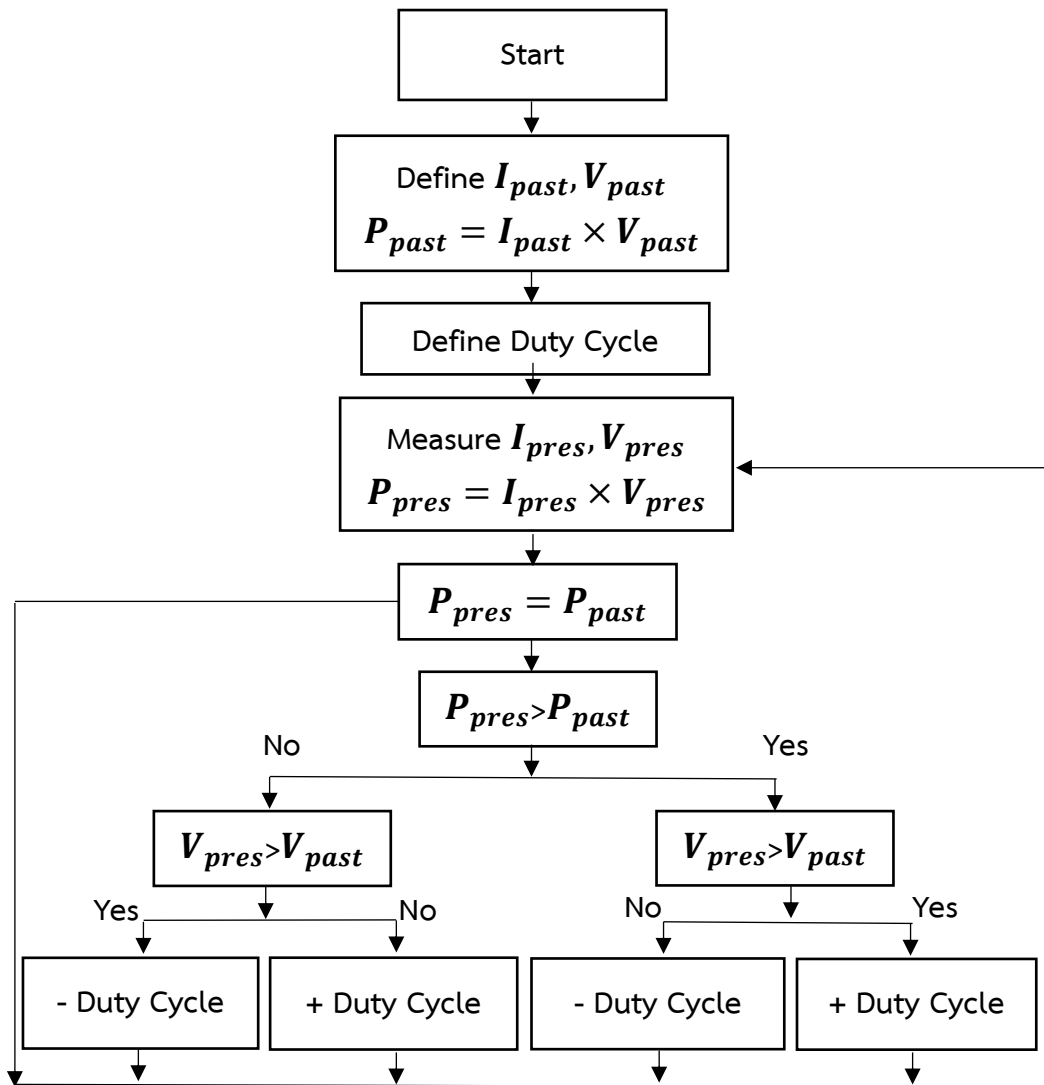
มายังขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า อีกด้านของขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้าถูกเชื่อมต่อกับไดโอดความเร็วสูงกับ ขาแคทรนของมอสเฟตกำลัง ขั้วลบของไดโอดความเร็วสูงเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุ 2000 ไมโครฟารัด เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า และเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเชื่อมต่อไปยังส่วนสุดท้ายของวงจรคือ แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 7 แอมป์ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แผนภาพระบบประจุแบตเตอรี่

3.5 โปรแกรมควบคุมการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด

เทคนิค P&O มีกระบวนการดังรูปที่ 3.14 คือ เริ่มจากการกำหนดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า เริ่มต้นและค่ากำลังอ้างอิงให้มีค่าเท่ากับ 0 ขั้นตอนที่สอง คือ การกำหนดค่าวัฏจักรให้มีค่า 20 % ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกเคลื่อนที่ไปยังโหลดและเกิดกำลังขึ้น โดยจะกำลังที่ได้จะถูกเปรียบเทียบในเงื่อนไขดังนี้



รูปที่ 3.14 แผนภาพเทคนิค P&O

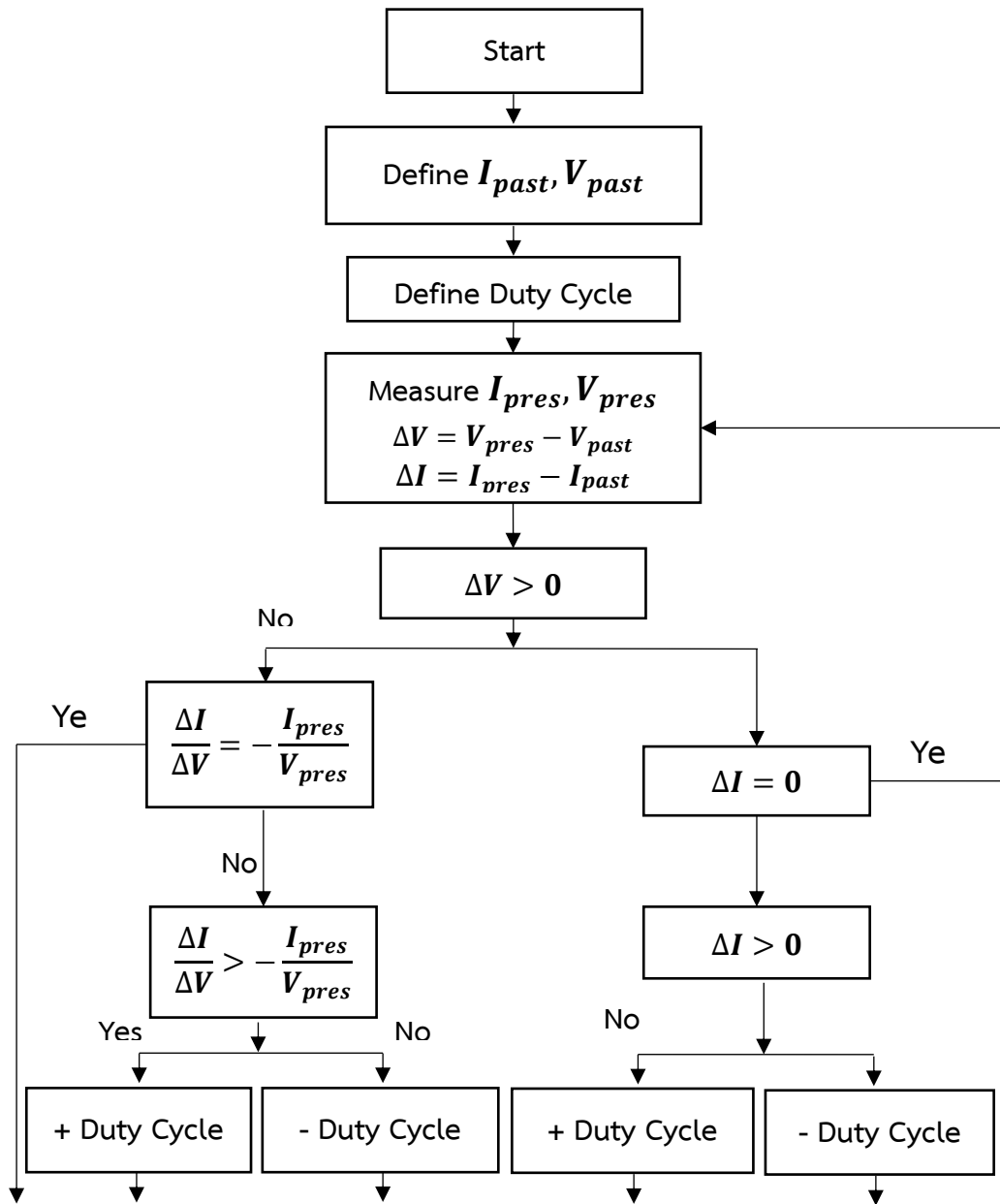
เงื่อนไขที่ 1 เมื่อกำลังที่ได้เท่ากับกำลังอ้างอิง โปรแกรมจะกลับไปวัดค่ากระแสและกำลังใหม่อีกครั้ง ถ้าไม่เท่ากับกำลังอ้างอิงให้ดูเงื่อนไขต่อไป

เงื่อนไขที่ 2 ถ้ากำลังที่ได้มากกว่ากำลังอ้างอิง โปรแกรมจะทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ได้กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงให้ลดค่าวัฏจักรลง 1 % แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงให้เพิ่มค่าวัฏจักรขึ้น 1 %

เงื่อนไขที่ 3 ถ้ากำลังที่ได้น้อยกว่ากำลังอ้างอิง โปรแกรมจะทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ได้กับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงให้ลดค่าวัฏจักรลง 1 % แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยกว่าแรงดันอ้างอิงให้เพิ่มค่าวัฏจักรขึ้น 1 %

เงื่อนไขที่ 4 กำหนดให้กำลังและแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเป็นกำลังและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการเพิ่มค่าวัฏจักรและกลับไปทำการวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะซ้ำเงื่อนไขต่อไปจนได้กำลังสูงสุดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

เทคนิคที่สอง INC มีกระบวนการดังรูปที่ 3.15 คือ เริ่มจากการกำหนดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 0 ขั้นตอนที่สอง คือ การกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ให้มีค่าเท่ากับ 20 % ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกเคลื่อนที่ไปยังโหลด และวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ จากนั้นหาความแตกต่างของกระแสและแรงดันไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบตามเงื่อนไข



รูปที่ 3.15 แผนภาพเทคนิค INC

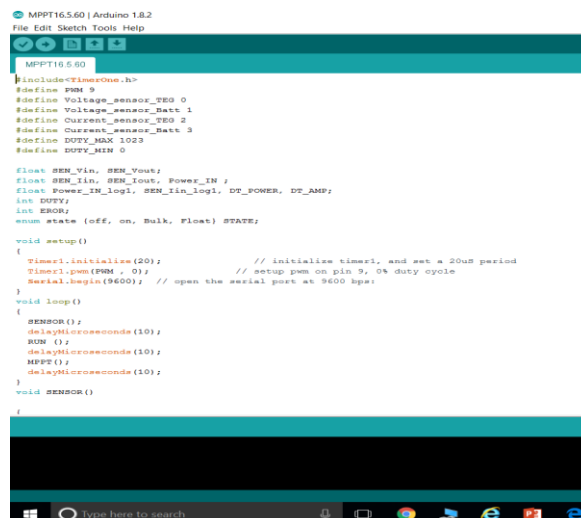
เงื่อนไขที่ 1 เมื่อความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้ามักค่ามากกว่า 0 หรือไม่ ถ้ามากกว่า 0 ให้ตรวจสอบเงื่อนไขทางขวา แต่ถ้าน้อยกว่าให้ตรวจสอบเงื่อนไขทางซ้าย

เงื่อนไขที่ 2 ความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0 ให้ตรวจสอบเงื่อนไขว่าความแตกต่างของกระแสมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าเท่ากับ 0 ให้กลับไปวัดแรงดันกับกระแสไฟฟ้า ถ้าความแตกต่างของกระแสมีค่าไม่เท่ากับ 0 ให้ตรวจสอบความแตกต่างของกระแสไฟฟ้า เมื่อมีค่ามากกว่า 0 ให้ลดค่าวัฏจักรลง 1 % แต่ถ้าความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยกว่า 0 ให้เพิ่มค่าวัฏจักรขึ้น 1 %

เงื่อนไขที่ 3 ความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0 ให้ตรวจสอบเงื่อนไขว่าอัตราส่วนความแตกต่างของกระแสต่อความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ(-)อัตราส่วนกระแสต่อแรงดันไฟฟ้าหรือไม่ ถ้าเท่ากันให้กลับไปวัดแรงดันกับกระแสไฟฟ้า ถ้าอัตราส่วนความแตกต่างของกระแสต่อความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากับ(-)อัตราส่วนกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีค่ามากกว่า(-)อัตราส่วนกระแสต่อแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มค่าวัฏจักรลง 1 % แต่ถ้าเมื่อมีค่าน้อยกว่า(-)อัตราส่วนกระแสต่อแรงดันไฟฟ้าให้ลดค่าวัฏจักรขึ้น 1 %

เงื่อนไขที่ 4 กำหนดให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเป็นกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการเพิ่มหรือลดวัฏจักร และกลับไปทำการวัดแรงดันกับกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะซ้ำเงื่อนไขต่อไปจนได้กำลังสูงสุดจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

เทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดทั้งเป็นเทคนิคที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสร้างกระบวนการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านบอร์ดอะดุยโน ซึ่งตัวอย่างการสร้างโปรแกรมได้แสดงดังรูปที่ 3.16 โดยประกอบด้วย 1.การกำหนดฟังก์ชันจากไลบรารีที่ต้องการใช้งาน 2.การกำหนดค่าคงที่ของตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรม 3.การกำหนดประเภทของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหรือตัวแปรที่ถูกใช้ เช่น ค่าประเภททศนิยม จำนวนเต็ม เป็นต้น 4.การตั้งค่าฟังก์ชันหลักของส่วนหัวโปรแกรม 5.การสร้างฟังก์ชันหลักของการทำซ้ำ 5.ส่วนสุดท้ายเป็นการสร้างฟังก์ชันย่อยสำหรับเรียกใช้งาน



```

MPPPT16.550 | Arduino 1.8.2
File Edit Sketch Tools Help

MPPPT16.550
#include<TimeOne.h>
#define PGM 9
#define Voltage_sensor_TEG 0
#define Voltage_sensor_Batt 1
#define Current_sensor_TEG 2
#define Current_sensor_Batt 3
#define DUFFY_MAX 1023
#define DUFFY_MIN 0

float SEN_Vin, SEN_Vout;
float SEN_Iin, SEN_Iout, Power_IN ;
float Power_IN_log1, SEN_Iin_log1, DP_POWER, DP_AMP;
int DUFFY;
int ERROR;
enum state {off, on, Bulk, Float} STATE;

void setup()
{
  Timer1.initialize(20); // initialize timer1, and set a 20us period
  pinMode(PGM, OUTPUT); // setup pwm on pin 9, 0% duty cycle
  Serial.begin(9600); // open the serial port at 9600 bps;
}

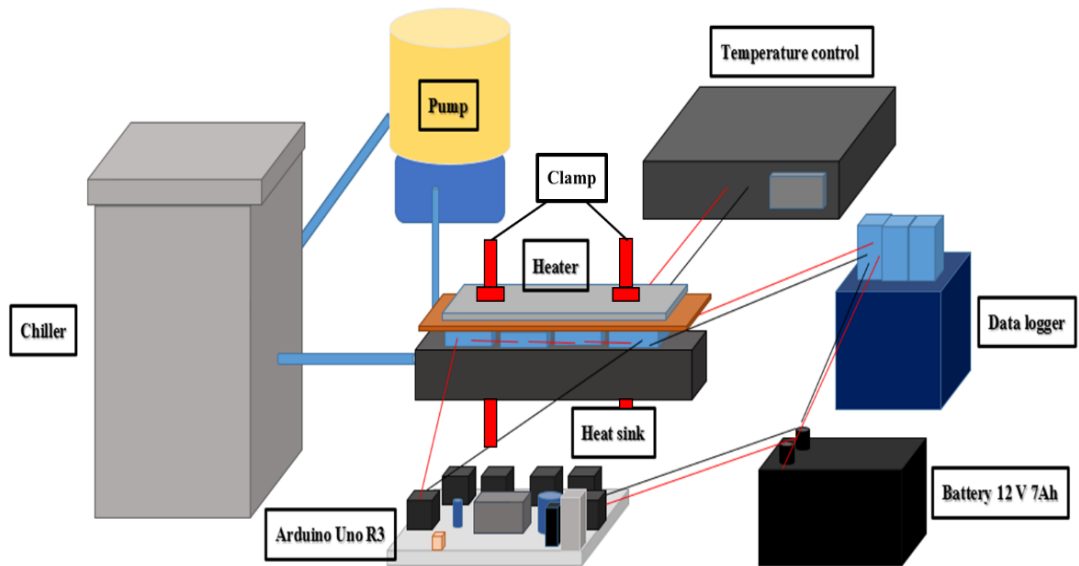
void loop()
{
  SENSOR();
  delayMicroseconds(10);
  RUN ();
  delayMicroseconds(10);
  MPPPT();
  delayMicroseconds(10);
}

void SENSOR()
{
}

```

รูปที่ 3.16 ตัวอย่างการสร้างโปรแกรมหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด

3.6 ขั้นตอนการประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด



รูปที่ 3.17 แผนภาพระบบประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด

การสร้างระบบประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดได้แสดงดังรูปที่ 3.17 ประกอบไปด้วย 1.เครื่องทำน้ำเย็น 2.ปั้มน้ำ 3.เครื่องควบคุมอุณหภูมิ 4.เครื่องบันทึกข้อมูล 5. แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 7 แอมป์ชั่วโมง 6. ฮีตเตอร์ 7.ฮีตซิงก์ 8.เทอร์โมอิเล็กทริก 9.บอร์ดอะดุยโน ยูโน อาร์สาม 10.คอมพิวเตอร์ 11.แคลมป์

ในส่วนขั้นตอนการเก็บข้อมูลนั้น สามารถอธิบายอย่างเป็นลำดับได้ดังนี้

1. ทำการเปิดเครื่องทำความเย็นทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้นเริ่มทำการเก็บค่าโดยเปิดปั้มน้ำให้น้ำเย็นไหลไปยังบริเวณแผ่นระบายความร้อน

2. เปิดฮีตเตอร์ ตั้งค่าอุณหภูมิตามต้องการ และรอจนอุณหภูมิของฮีตเตอร์มีค่าคงที่ ในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิของฮีตเตอร์ จำเป็นต้องคอยปรับค่าเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิที่ต้องการ

3. เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้ว ทำการเปิดโปรแกรมของอะดุยโนและเปิดโปรแกรม Labview สำหรับบันทึกผลด้วยเครื่องบันทึกผล โดยตั้งชื่อไฟล์ประเภทโน้ตและเลือกไฟล์โน้ตที่จะบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิด้านเย็นและด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก

4. เริ่มการบันทึกผลการทดลอง เมื่อครบเวลาหรือได้ข้อมูลตามที่ต้องการแล้วให้หยุดโปรแกรมเก็บค่าและบันทึกไฟล์

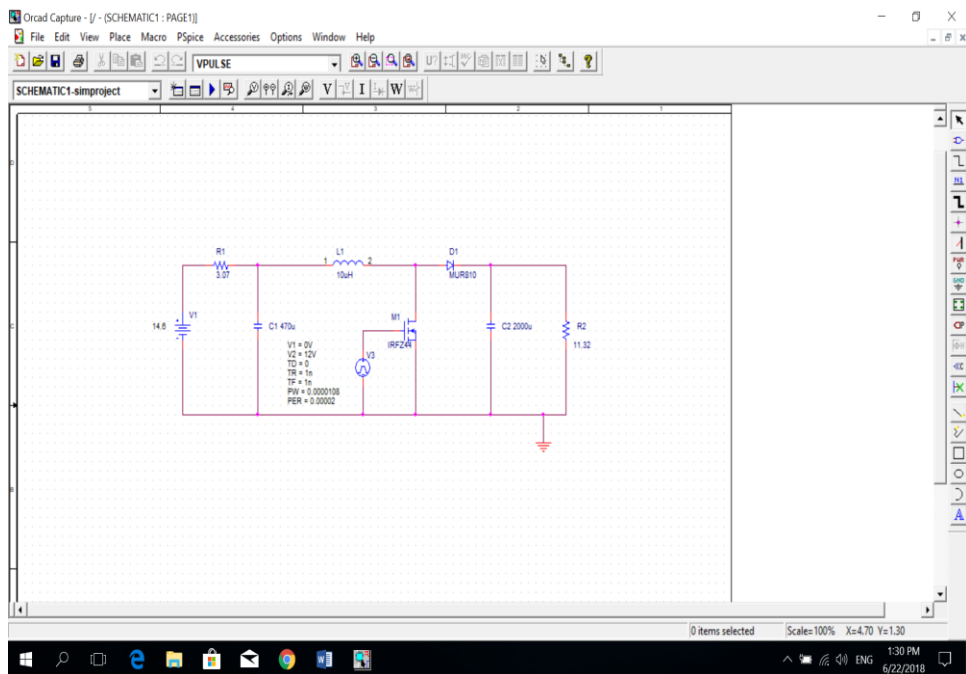
5. เมื่อเครื่องทำความเย็นเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น ให้ทำการหยุดการทดลองและพักเครื่อง จากนั้นรอให้ความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นต่ำลงเป็นเวลา 1 คืนจึงเริ่มทำการทดลองครั้งต่อไป

6. ในการเก็บข้อมูลนั้น ประกอบไปด้วยการเก็บข้อมูลคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกโดยไม่ต่อโหลด ข้อมูลเมื่อต่อโหลดที่ความต้านทานต่างๆ จนได้ค่าความต้านทานที่เหมาะสมกับเทอร์โมอิเล็กทริก ข้อมูลการใช้เทคนิค P&O และ INC

7. เมื่อได้ค่าจากการทดลองแล้วจึงนำค่าที่ได้วิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพของวงจรบรระดับแรงดันและโปรแกรมหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด

3.7 การจำลองระบบประจุแบตเตอรี่เมื่อเกิดการถ่ายโอนกำลังสูงสุดโดยใช้ Pspice

โปรแกรม Pspice เป็นโปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นโปรแกรมที่สามารถจะวาดรูปวงจรเพื่อใช้ทดลอง และวิเคราะห์วงจรได้ ซึ่งคล้ายกับโปรแกรม Electronics Workbench โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ Pspice เวอร์ชัน 9.2 ในการทำการศึกษ เพื่อนำผลที่ได้ระหว่างโปรแกรม Pspice ที่กำหนดตัวแปรของเทอร์โมอิเล็กทริกให้สามารถส่งผ่านกำลังสูงสุดไปยังโหลดและผลจากการทดลองโดยใช้เทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดมาเปรียบเทียบ ให้เห็นถึงค่าในอุดมคติจากโปรแกรมกับค่าจริงในการทดลองของระบบที่ได้ใช้เทคนิคทั้งสอง



รูปที่ 3.18 หน้าต่างสำหรับวาดวงจรจากโปรแกรม Pspice

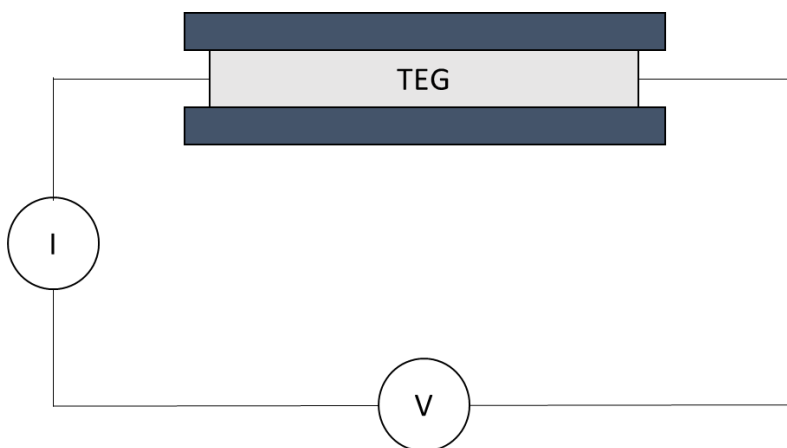
ในการวิเคราะห์วงจรจะต้องทำการสร้างไฟล์ Netlist ก่อน เมื่อการสร้าง Netlist ผ่านแล้วจึงสามารถจะวิเคราะห์ด้วย Pspice การวิเคราะห์ทำได้โดย เลือกคำสั่ง Analysis/Simulate จากนั้นก็จะเข้าสู่โปรแกรม Probe และเมื่อออกมาที่โปรแกรม Group ของ Pspice for windows แล้วเลือกไอคอนตามคำสั่ง File/Open แล้วเลือกชื่อไฟล์ Test.cir เสร็จแล้วจะแสดงผลพีธีในการวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทที่จะกล่าวถึงผลการวิจัยจากการประจุแบตเตอรี่โดยแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกขณะเปิดวงจร เมื่อทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของแหล่งกำเนิดพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริก ส่วนที่ 2 ผลการประจุแบตเตอรี่โดยผ่านวงจรทระดับโดยกำหนดวัฏจักรการสวิตช์ 0 เปอร์เซ็นต์หรือการประจุโดยตรง ส่วนที่ 3 ผลการประจุแบตเตอรี่โดยปรับค่าวัฏจักรการสวิตช์ตั้งแต่ 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ 4 ผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดแบบ P&O และผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดแบบ INC

4.1 คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกขณะเปิดวงจร



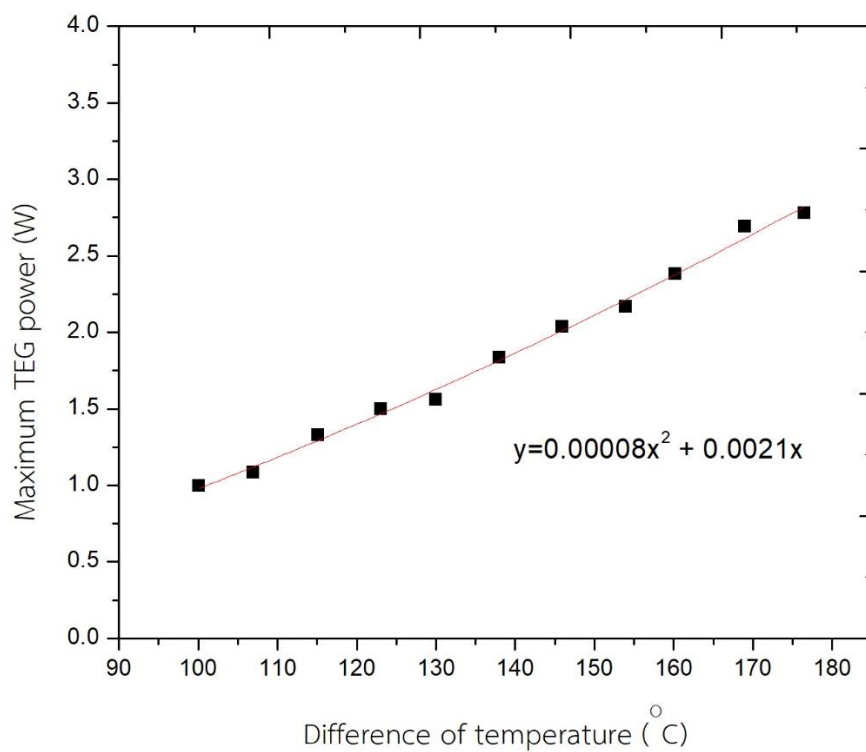
รูปที่ 4.1 แผนภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล

รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพการหาสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล ซึ่งในการทดลองเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ได้ทดสอบคุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริกที่เลือกมาใช้ในการทำงานวิจัย ซึ่งได้ทำการทดสอบคุณสมบัติแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและเก็บผลการทดลองเพื่อวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อการประจุแบตเตอรี่ โดยกำหนดให้อุณหภูมิด้านร้อนมีค่าในช่วง 100 ถึง 250 องศาเซลเซียส และระบายความร้อนด้านเย็นด้วยเครื่องทำน้ำเย็น ซึ่งค่าความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริกและได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งทำให้ทราบว่า

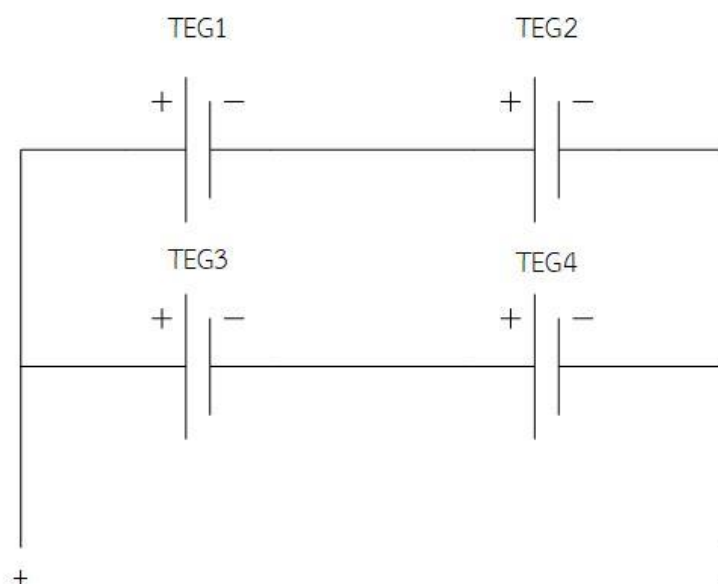
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 3.66 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.76 แอมแปร์ และมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากระบบที่สร้างขึ้น 2.78 W จึงไม่เพียงพอต่อการประจุแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ดังนั้นจึงเลือกใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลให้เป็น 4 โมดูล โดยเลือกต่อวงจรแบบผสมเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าของระบบ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวงจรแบบผสมของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล ขณะเปิดวงจร

| ΔT (°C) | V_{OC} (Volt) | I_{SC} (Amp) | P_{TEG} (Watt) |
|-----------------|-----------------|----------------|------------------|
| 100 | 2.43 | 0.40 | 0.99 |
| 107 | 2.58 | 0.41 | 1.08 |
| 115 | 2.73 | 0.48 | 1.32 |
| 123 | 2.87 | 0.52 | 1.49 |
| 130 | 2.99 | 0.55 | 1.64 |
| 138 | 3.14 | 0.58 | 1.83 |
| 146 | 3.28 | 0.61 | 2.03 |
| 154 | 3.41 | 0.63 | 2.16 |
| 160 | 3.49 | 0.68 | 2.37 |
| 169 | 3.57 | 0.75 | 2.68 |
| 178 | 3.66 | 0.76 | 2.78 |



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล



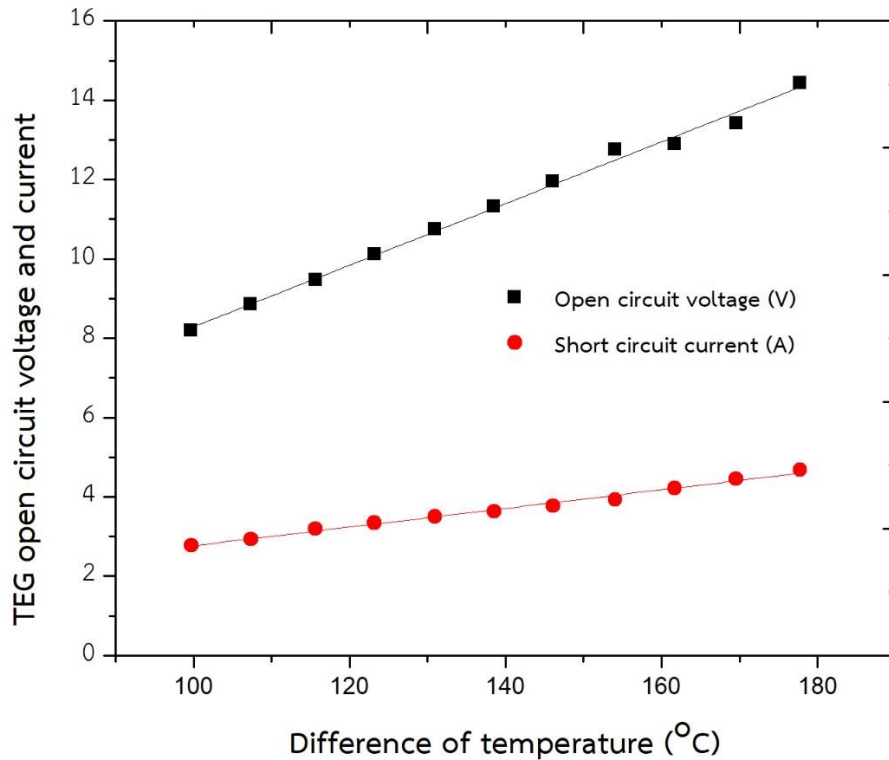
รูปที่ 4.3 แผนภาพวงจรแบบผสมของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล

แผนภาพดังรูปที่ 4.3 ประกอบด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล โดยเทอร์โมอิเล็กทริกตัวที่ 1 (TEG1) ต่ออนุกรมกับเทอร์โมอิเล็กทริกตัวที่ 2 (TEG2) และเทอร์โมอิเล็กทริกตัวที่ 3 (TEG3) ต่อ

อนุกรมกับเทอร์โมอิเล็กทริกตัวที่ 4 (TEG4) จากนั้นนำชุดเทอร์โมอิเล็กทริกที่ต่ออนุกรมทั้งสองชุดมาต่อขนานกันเป็นวงจรแบบผสม เพื่อให้เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอสำหรับวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้าในการประจุแบตเตอรี่ 12 โวลต์ และใช้แคลมป์เพิ่มแรงกดระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ลดความต้านทานความร้อนระหว่างรอยต่อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนไปยังเทอร์โมอิเล็กทริก จึงทำให้ได้กำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างมากจากในตอนที่ 4.1 ดังตารางที่ 4.2

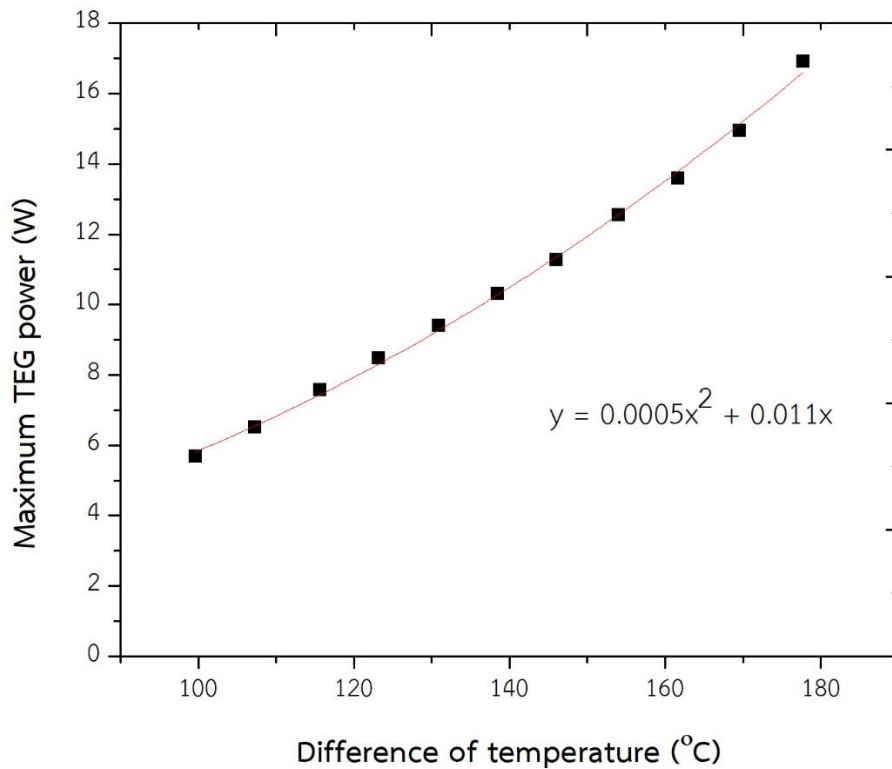
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวงจรแบบผสมของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล ขณะเปิดวงจร

| ΔT (°C) | V_{oc} (Volt) | I_{sc} (Amp) | P_{TEG} (Watt) |
|-----------------|-----------------|----------------|------------------|
| 100 | 8.19 | 2.78 | 5.69 |
| 107 | 8.85 | 2.94 | 6.50 |
| 115 | 9.47 | 3.20 | 7.57 |
| 123 | 10.11 | 3.35 | 8.46 |
| 130 | 10.75 | 3.50 | 9.40 |
| 138 | 11.32 | 3.64 | 10.29 |
| 146 | 11.96 | 3.77 | 11.27 |
| 154 | 12.76 | 3.93 | 12.54 |
| 161 | 12.90 | 4.22 | 13.59 |
| 169 | 13.42 | 4.45 | 14.94 |
| 178 | 14.44 | 4.68 | 16.91 |



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจร กับค่าความแตกต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล

ในแหล่งกำเนิดพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถหาคุณสมบัติได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร เพื่อนำมาคำนวณหาค่ากำลังสูงสุดที่ระบบสามารถผลิตได้ ณ ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น โดยกำหนดให้อุณหภูมิด้านร้อนมีค่าตั้งแต่ 150 - 250 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิด้านเย็นมีค่าตั้งแต่ 50 - 72 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร กระแสลัดวงจร กับความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น โดยพบว่าเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรมีค่าแปรผันกับความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ในลักษณะกราฟเส้นตรงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานของเจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์ และคณะ [11]



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริก 4 โมดูล

จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรมาคำนวณหาค่ากำลังสูงสุด ณ ความแตกต่างของอุณหภูมิต่าง ๆ ดังสมการที่ (4.1)

$$P_{TEGmax} = \frac{V_{oc}I_{sc}}{4} \quad (4.1)$$

โดยที่ P_{TEGmax} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้

V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเทอร์โมอิเล็กทริก

I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้าเปิดวงจรของเทอร์โมอิเล็กทริก

เมื่อนำค่ากำลังสูงสุดของแหล่งกำเนิดพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริกที่คำนวณมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นดังรูปที่ (4.5) จากรูปสามารถหาสมการความสัมพันธ์ของกำลังสูงสุดกับความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นได้ กำลังสูงสุดที่ได้จะมีค่าแปรผันกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิดังสมการ (4.2) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีกำลังสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกในสมการที่ (4.3)

$$P_{max} = 0.0005\Delta T^2 + 0.011\Delta T \quad (4.2)$$

$$P_{max} = \frac{(\alpha\Delta T)^2}{4R_L} = \frac{\alpha^2\Delta T^2}{4R_L} \quad (4.3)$$

โดยที่ P_{max} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริก

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของเทอร์โมอิเล็กทริก

ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

R_L คือ ค่าความต้านทานของเทอร์โมอิเล็กทริกหรือของโหลดซึ่งมีค่าเท่ากัน

จากสมการที่ (4.3) กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าแปรผันกับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกและแปรผกผันกับค่าความต้านทานภายในของโหลดหรือเทอร์โมอิเล็กทริก และหากนำสมการที่ (4.2) มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีจากสมการที่ (4.3) เมื่อพิจารณาพจน์หลังของสมการที่ (4.2) และเนื่องจากตัวคูณในพจน์ ทำให้พจน์นี้มีค่าน้อยมาก จึงไม่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นคิดเฉพาะพจน์ของความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นกำลังสอง จะทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างสมการทั้งสองดังสมการที่ (4.3)

$$0.0005\Delta T^2 = \frac{\alpha^2\Delta T^2}{4R_L} \quad (4.4)$$

ซึ่งจะได้เป็นสมการที่ (4.5)

$$0.0005 = \frac{\alpha^2}{4R_L} \quad (4.5)$$

และเมื่อจัดรูปดังสมการที่ (4.6)

$$\alpha^2 = 0.0005 \times 4 \times R_L \quad (4.6)$$

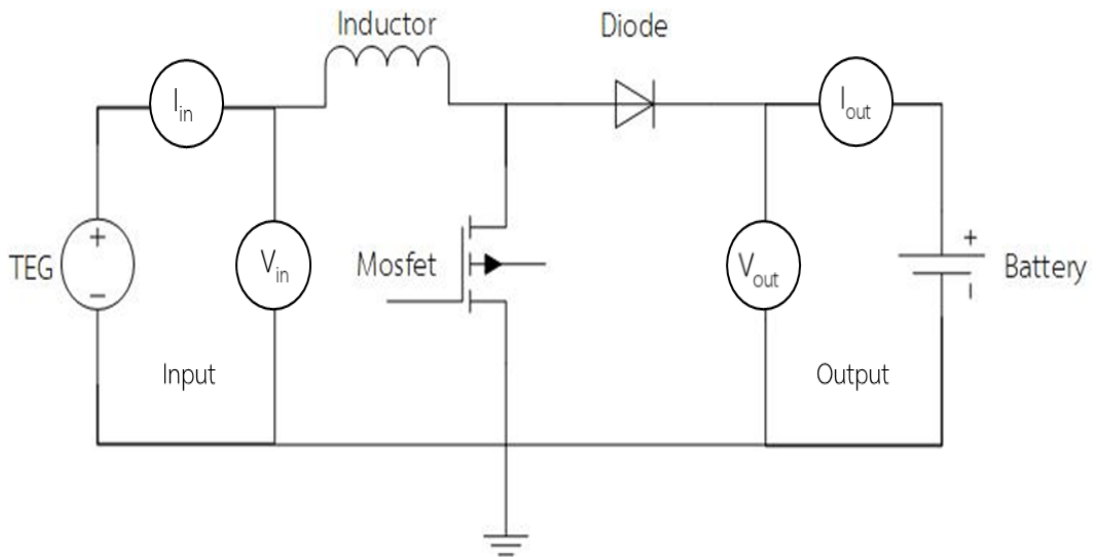
$$\alpha = \sqrt{0.0005 \times 4 \times R_L} \quad (4.7)$$

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกดังสมการที่ (4.8)

$$\alpha = 0.045R_L \quad (4.8)$$

ซึ่งจากสมการที่ (4.8) แสดงให้ทราบได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบกของเทอร์โมอิเล็กทริกในระบบที่คำนวณได้มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริกดังสมการที่ (4.8)

4.2 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยไม่เกิดการสวิตช์ของวงจรทระดับ



รูปที่ 4.6 ระบบประจุแบตเตอรี่โดยไม่มีการสวิตช์ (ค่าวัฏจักรเท่ากับ 0)

ในหัวข้อ 4.2 เป็นผลจากการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยกำหนดให้ไม่มีการสวิตช์ของมอสเฟต (ค่าวัฏจักรการสวิตช์เท่ากับศูนย์เปอร์เซ็นต์) ซึ่งเปรียบเสมือนการประจุแบตเตอรี่ผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ทำให้พลังงานทั้งหมดที่สามารถผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกส่งไปยังแบตเตอรี่โดยตรง จากนั้นทำการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าอินพุต (I_{in}, V_{in}) และวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (I_{out}, V_{out}) เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกและกำลังไฟฟ้าที่ผ่านวงจรทระดับ ดังรูปที่ 4.6

จากผลที่ได้จากการประจุแบตเตอรี่โดยไม่มีการสวิตช์ พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตได้ (กำลังอินพุต) และค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุไปยังแบตเตอรี่ (กำลังเอาต์พุต) มีค่ากำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเกิดการสูญเสียพลังงานไปยังขดลวดเหนี่ยวนำเพียงเล็กน้อย ขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับความแตกต่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นนั้นมีค่าสูงกว่าการประจุแบตเตอรี่ในการทดลองมาก โดยเป็นผลมาจากความแตกต่างของความต้านทานภายในของเทอร์โมอิเล็กทริก (มีค่าเท่ากับ 2.4 โอห์ม) กับความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (19 มิลลิโอห์ม) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันมาก ทำให้แหล่งกำเนิดพลังงานไม่สามารถส่งผ่านพลังงานไปยังโหลดได้เต็มอัตรา เนื่องจากตามทฤษฎีของการถ่ายโอนกำลังสูงสุด เมื่อความต้านทานภายในแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากับความต้านทานโหลด การถ่ายโอนกำลังสูงสุดจึงไม่

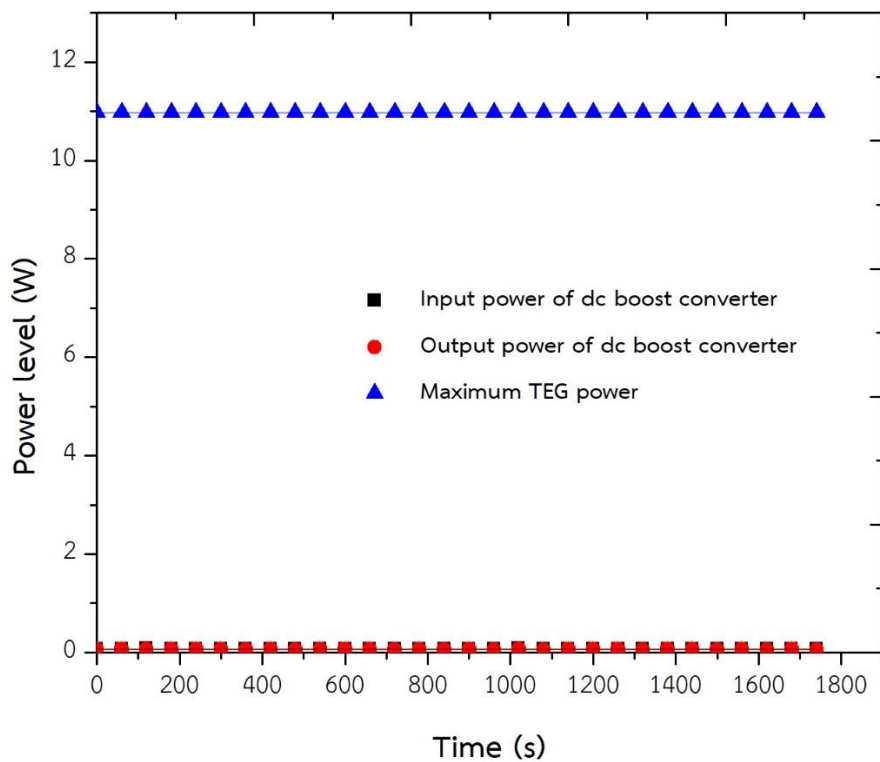
เกิดขึ้น การถ่ายโอนกำลังสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความเท่ากันของความต้านทานแหล่งกำเนิดพลังงาน และโหลดเท่านั้น

เมื่อทำการทดลองโดยกำหนดให้อุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเป็น 200 220 และ 250 องศาเซลเซียส และด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมีการระบายความร้อนทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 144 152 และ 180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาค่ากำลังสูงสุดตามความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริก โดยนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ 144 152 และ 180 องศาเซลเซียสมาคำนวณตามสมการที่ 4.2 ทำให้ได้ค่ากำลังสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 10.97 12.23 และ 17.77 วัตต์ ซึ่งจากการทดลองการประจุแบตเตอรี่ผ่านขดลวดโดยตรง กำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถผลิตให้กับระบบมีค่าเพียง 0.07 1.62 และ 5.28 วัตต์ และกำลังที่สามารถประจุไปยังแบตเตอรี่เมื่อผ่านขดลวดเหนี่ยวนามีค่าเพียง 0.06 1.55 และ 4.83 วัตต์ ซึ่งค่าของผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และแสดงกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.7 – 4.9

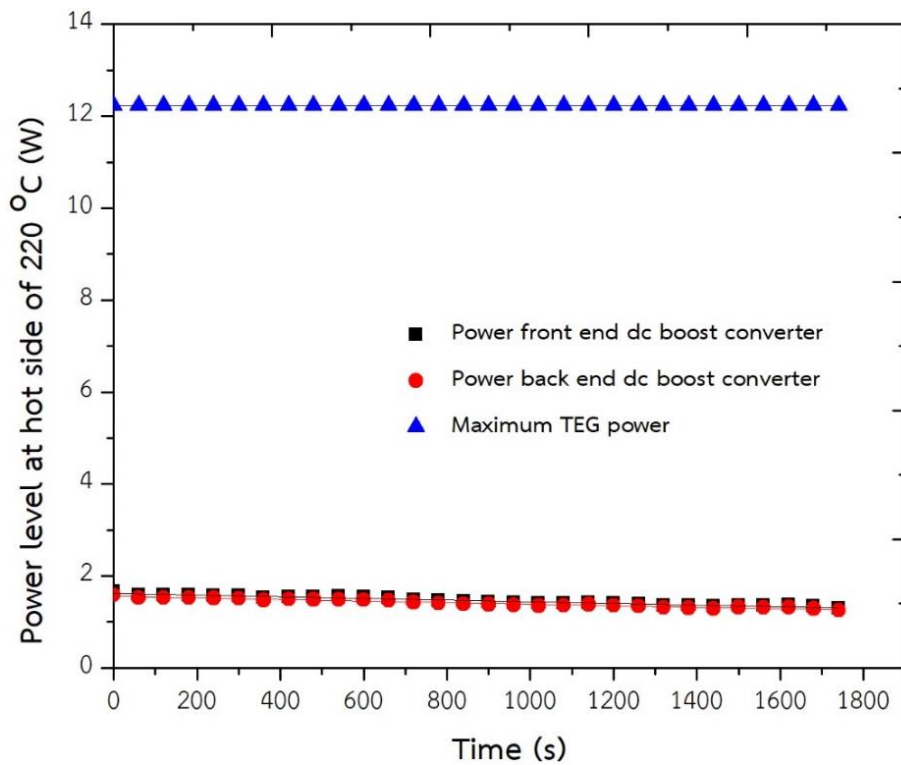
ตารางที่ 4.3 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยกำหนดให้ไม่มีการสวิตช์ของมอสเฟต

| ΔT ($^{\circ}C$) | Power input (W) | Power output (W) | Maximum TEG power (W) | $\%P_{inloss}$ | $\%P_{outloss}$ |
|-------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|----------------|-----------------|
| 144 | 0.07 | 0.06 | 10.97 | 99.36 | 99.45 |
| 152 | 1.62 | 1.55 | 12.23 | 86.75 | 87.32 |
| 180 | 5.28 | 4.83 | 17.77 | 70.28 | 72.82 |

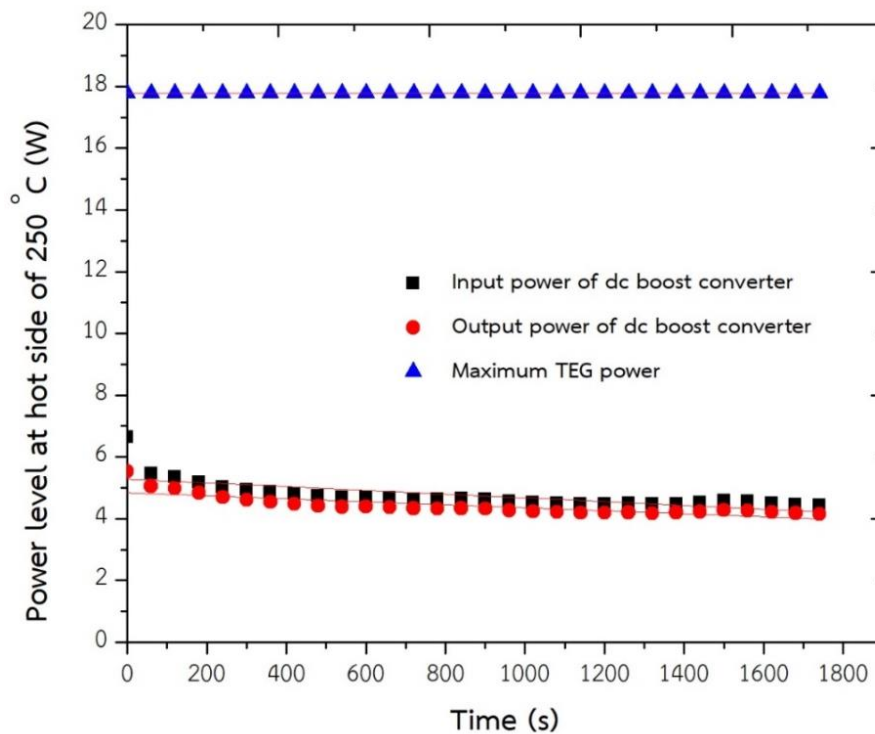
จากตารางที่ 4.3 ผลของกำลังไฟฟ้าอินพุต (ก่อนวงจรทระดับ) กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (หลังวงจรทระดับ) และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ควรจะได้รับจากเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตและกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ผลที่ได้รับแสดงถึงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียกำลังไฟฟ้าทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งมีค่าในช่วง 70.28 ถึง 99.45 ที่ค่าความแตกต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริก 144 ถึง 180 องศาเซลเซียส และเมื่อความแตกต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียกำลังไฟฟ้าทั้งด้านอินพุตและเอาต์พุตมีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นเหตุจากการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าที่สูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จึงทำให้กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียนั้นมีคาลดลง



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อประจุโดยไม่มีการสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส

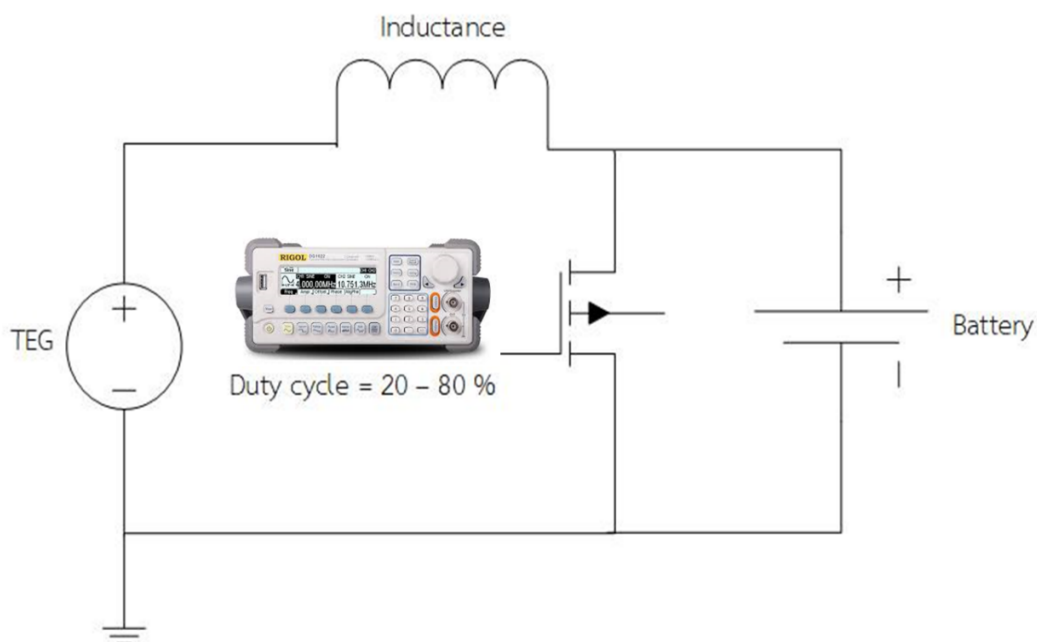


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อประจุโดยไม่มีการสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 220 องศาเซลเซียส



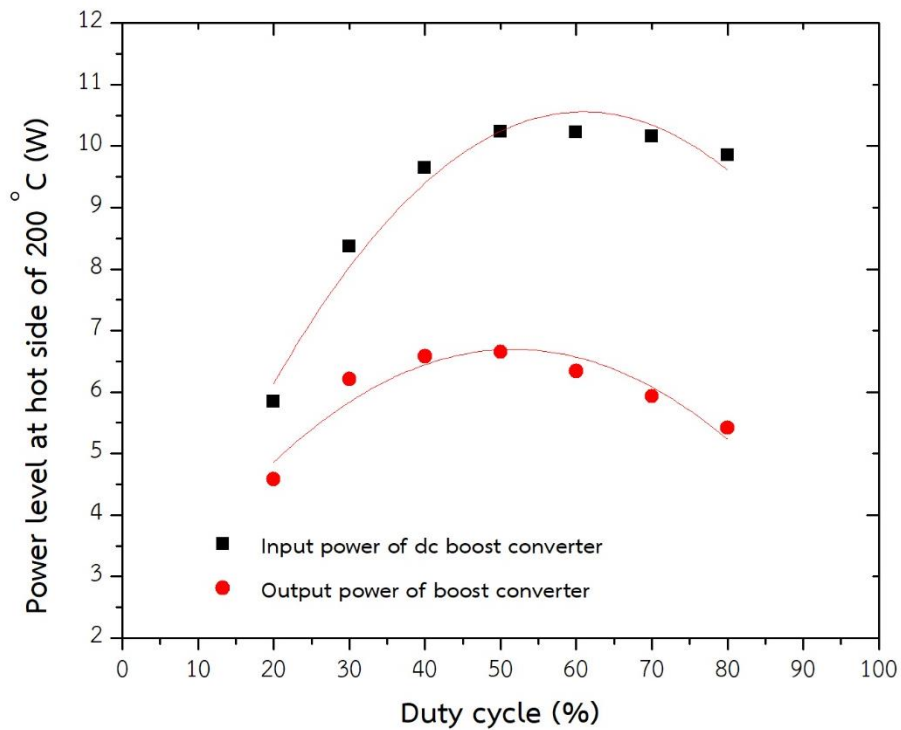
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อประจุโดยไม่มีการสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 250 องศาเซลเซียส

4.3 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทบระดับโดยกำหนดค่าวัฏจักรการสวิตช์

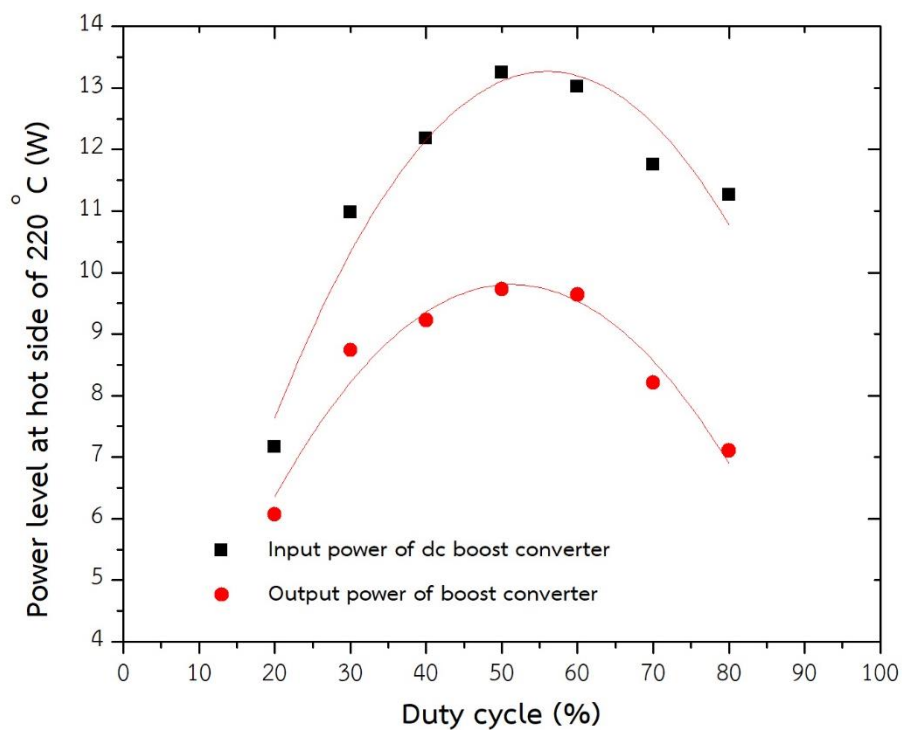


รูปที่ 4.10 ระบบประจุแบตเตอรี่โดยกำหนดค่าวัฏจักรการสวิตช์

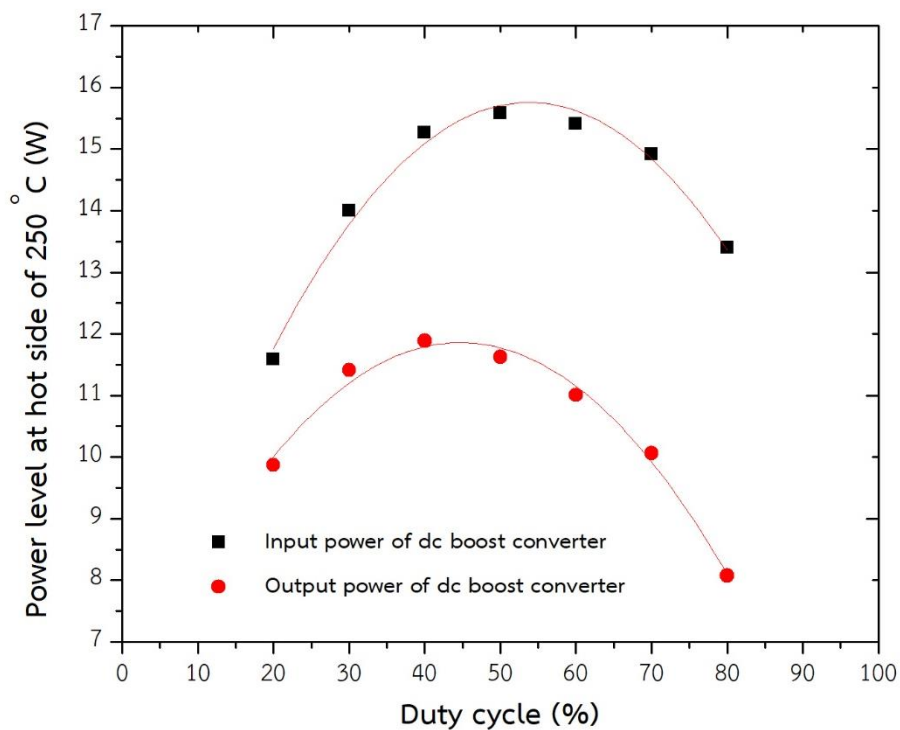
ผลการทดลองในตอนที 4.3 เป็นการกำหนดค่าวัฏจักรการสวิตช์ของวงจรทระดับตั้งแต่ 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์และกำหนดให้ด้านร้อนมีอุณหภูมิ 200 220 และ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ความแตกต่างของอุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 140 157 และ 179 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยเลือกใช้ function generator รุ่น DG1022 ของบริษัท RIGOL เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีค่าวัฏจักรการสวิตช์ตั้งแต่ 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ให้กับวงจรทระดับเพื่อปรับค่าความต้านทานภายในระหว่างแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกและแบตเตอรี่ให้มีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนกำลังสูงสุดจากแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกไปยังแบตเตอรี่ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ (4.11 - 4.13)



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าวัฏจักรการสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าวัฏจักรการสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 220 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าวัฏจักรการสวิตช์ ที่อุณหภูมิด้านร้อน 250 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ (4.11 – 4.13) พบว่าค่าวัฏจักรการสวิตช์ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังสูงสุดของเทอร์โมอิเล็กทริกที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 40 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ในผลการทดลองในตอนี่ 4.3 พบว่าประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าแปรผกผันกับค่าวัฏจักรการสวิตช์กำลังสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของวงจรแปลงผันดังสมการ [22]

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_{inductor}}{(1-D)^2 \times R_{load}}} \quad (4.9)$$

โดยที่ η คือ ค่าประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า

$R_{inductor}$ คือ ค่าประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า (โอห์ม)

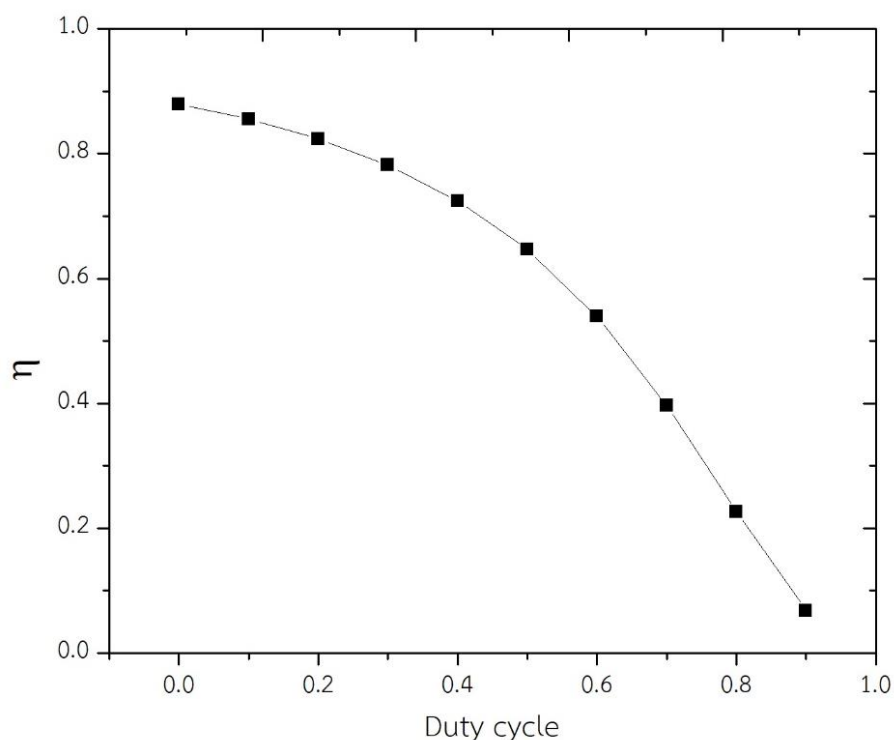
D คือ ค่าวัฏจักรการสวิตช์

R_{load} คือ ค่าประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้า (โอห์ม)

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าวัฏจักรการสวิตช์และประสิทธิภาพพวงจรถดับจากสมการที่ (4.9)

| Duty cycle | $\frac{R_{inductor}}{(1-D)^2 \times R_{load}}$ | Converter efficiency |
|------------|--|----------------------|
| 0 | 0.136 | 0.879 |
| 0.1 | 0.168 | 0.855 |
| 0.2 | 0.213 | 0.823 |
| 0.3 | 0.279 | 0.781 |
| 0.4 | 0.380 | 0.724 |
| 0.5 | 0.547 | 0.646 |
| 0.6 | 0.855 | 0.539 |
| 0.7 | 1.520 | 0.396 |
| 0.8 | 3.421 | 0.226 |
| 0.9 | 13.684 | 0.068 |
| 1 | ∞ | 0 |

เมื่อนำค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของแบตเตอรี่มาแทนค่าในสมการที่ 4.9 จะได้ค่าดังตารางที่ 4.4 เมื่อนำค่าจากตารางไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรการสวิตช์และค่าประสิทธิภาพของวงจรทบระดับ จากได้แนวโน้มของความสัมพัทธ์ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจากการทดลองข้างต้น พบว่าเมื่อปรับค่าวัฏจักรการสวิตช์ให้มีค่าในช่วง 40 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์จะทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบกับผลในตารางที่ 4.6 พบว่าค่าวัฏจักรการสวิตช์ที่ 40 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ จากการคำนวณมีค่าประสิทธิภาพของวงจรทบระดับในช่วง 72.4 ถึง 64.6 เปอร์เซ็นต์ จากการคำนวณ

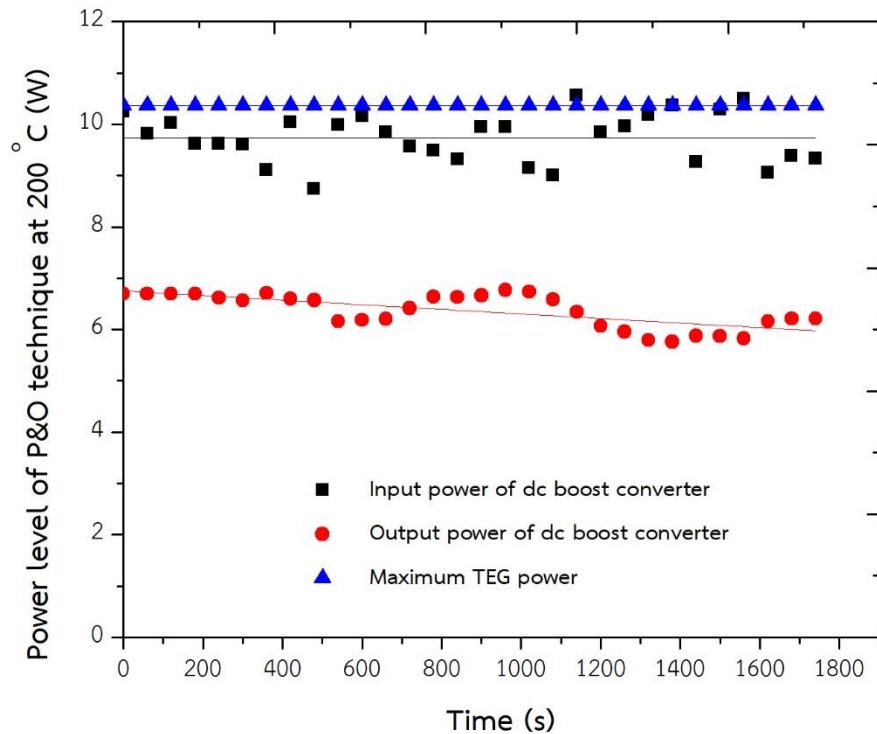


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัฏจักรการสวิตช์และประสิทธิภาพของวงจรทบระดับ

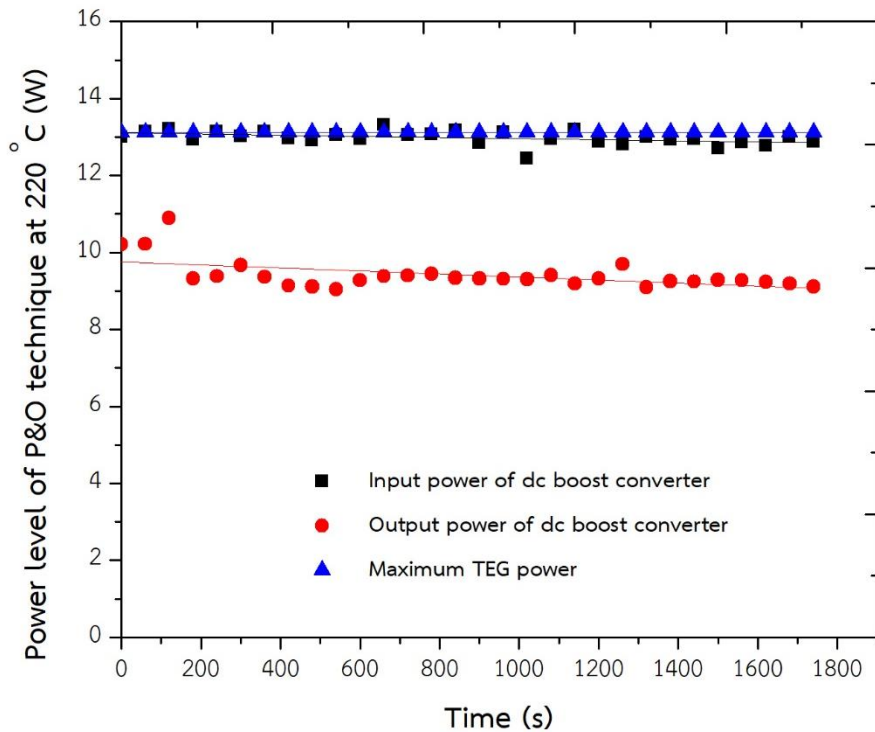
4.4 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทบระดับโดยใช้เทคนิคหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด

ในหัวข้อ 4.4 เป็นผลจากการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทบระดับโดยโดยใช้เทคนิคหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเป็น 200 220 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกมีการระบายความร้อนตลอดเวลา โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1. ผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคการรบกวนและสังเกต มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 140 157 และ 179 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นนำค่าความแตกต่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสามค่ามาคำนวณหาค่ากำลังสูงสุดตามความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกตามสมการที่ได้จากการทดลองตอนที่ 4.1 ทำให้ได้ค่ากำลัง

สูงสุดจากความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 10.36 13.12 และ 17.52 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองการประจุแบตเตอรี่ผ่านขดลวดโดยตรง กำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถผลิตให้กับระบบมีค่า 9.73 13.10 และ 15.44 วัตต์ ตามลำดับ และกำลังที่สามารถประจุไปยังแบตเตอรี่เมื่อผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมีค่า 6.75 9.75 และ 11.22 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15 – 4.1

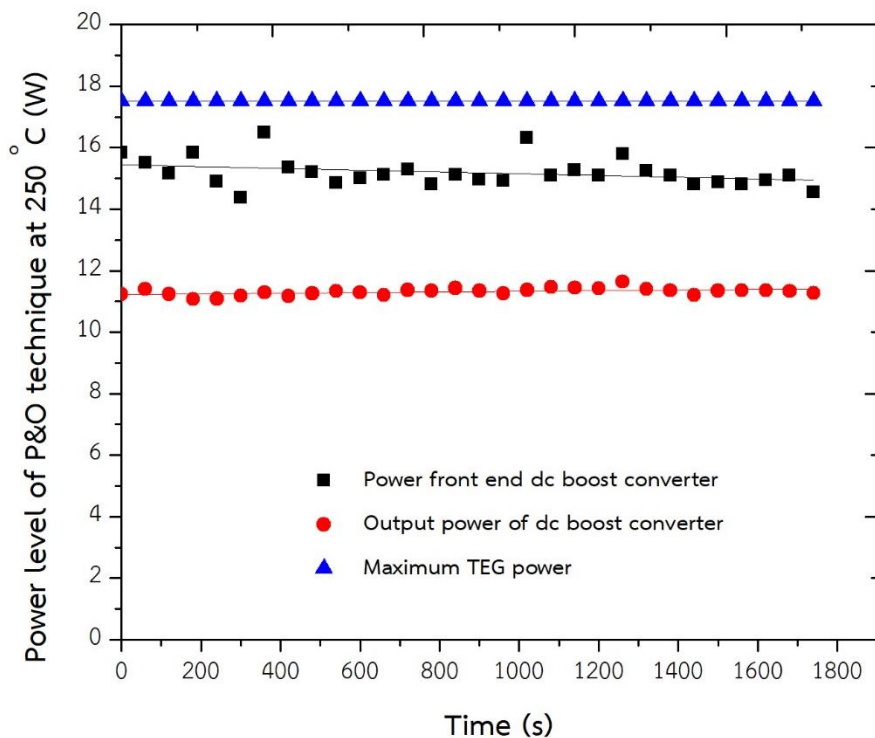


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคปรับจูนและสังเกต ที่อุณหภูมิ ด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส

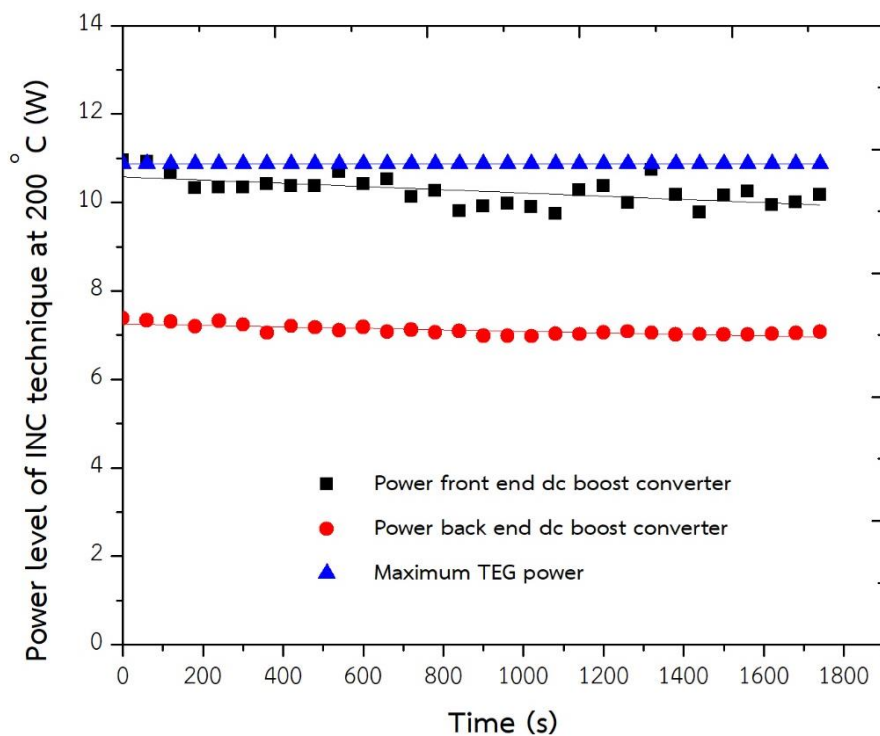


รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคปรับและสังเกต ที่อุณหภูมิ ด้านร้อน 220 องศาเซลเซียส

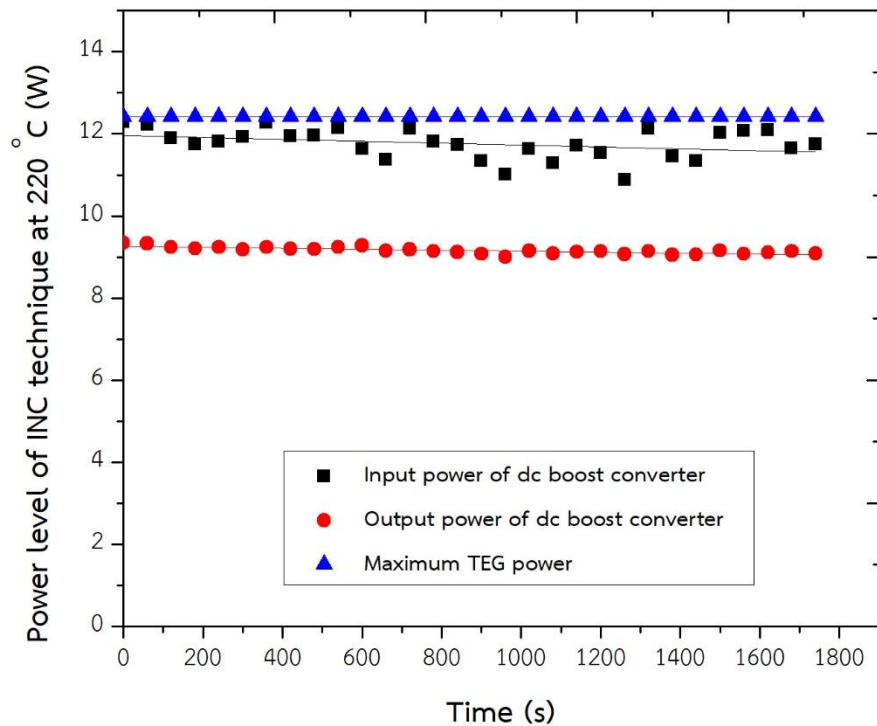
ส่วนที่ 2. ผลจากการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทบทวนระดับโดยใช้เทคนิคเพิ่มค่าความนำโดย มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 143 153 และ 177 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคปรับและสังเกต ที่อุณหภูมิด้านร้อน 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสามค่ามาคำนวณหาค่ากำลังสูงสุดตามความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกตามสมการที่ได้จากผลการทดลองตอนที่ 4.1 ทำให้ได้ค่ากำลังสูงสุดจากความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิของเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 10.88 12.42 และ 17.13 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองการประจุแบตเตอรี่ผ่านขดลวดโดยตรง กำลังไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกที่สามารถผลิตให้กับระบบมีค่า 10.58 11.96 และ 15.40 วัตต์ ตามลำดับ และกำลังที่สามารถประจุไปยังแบตเตอรี่เมื่อผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมีค่า 7.25 9.26 และ 11.23 วัตต์ ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18 – 4.20



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคครบวงและสังเกตุ ที่อุณหภูมิ
ด้านร้อน 250 องศาเซลเซียส



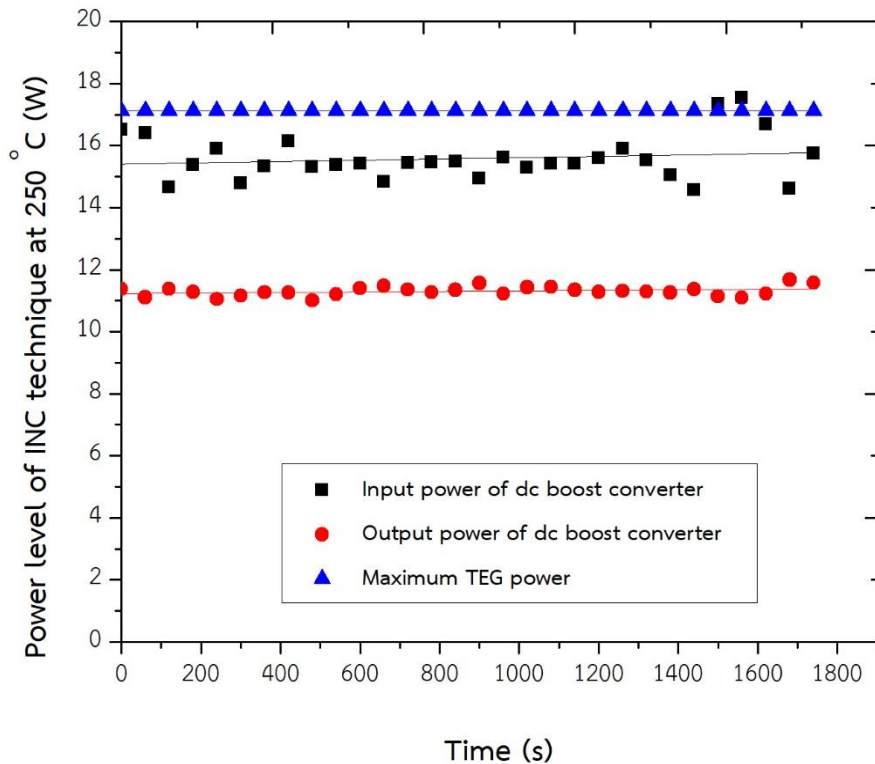
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคเพิ่มค่าความนำ ที่อุณหภูมิ
ด้านร้อน 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคเพิ่มค่าความนำ ที่อุณหภูมิ ด้านร้อน 220 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อนำผลการประจุแบตเตอรี่มาเปรียบเทียบกัน ระหว่างผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิครบกวนและสังเกต และผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคเพิ่มค่าความนำ พบว่าเทคนิครบกวนและสังเกตมีประสิทธิภาพในการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย 93.95 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 72.15 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่เทคนิคเพิ่มค่าความนำมี ประสิทธิภาพในการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย 94.47 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของวงจรทระดับ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 73.80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยมากกว่าเทคนิครบกวนและสังเกต แม้ว่าเทคนิคเพิ่มค่าความนำมีความซับซ้อนมากกว่าเทคนิครบกวนและสังเกต แต่ส่งผลให้มีความ มั่นยำในการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดมากกว่า

โดยจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าจากงานวิจัย Wei Xie และคณะ ได้ประสิทธิภาพของ เทคนิคการถ่ายโอนกำลังสูงสุดแบบรบกวนและสังเกตที่ดีที่สุด 99.8 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพใน การประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ 89.65 เปอร์เซ็นต์ [15]



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา เมื่อใช้เทคนิคเพิ่มค่าความนำ ที่อุณหภูมิ ด้านร้อน 250 องศาเซลเซียส

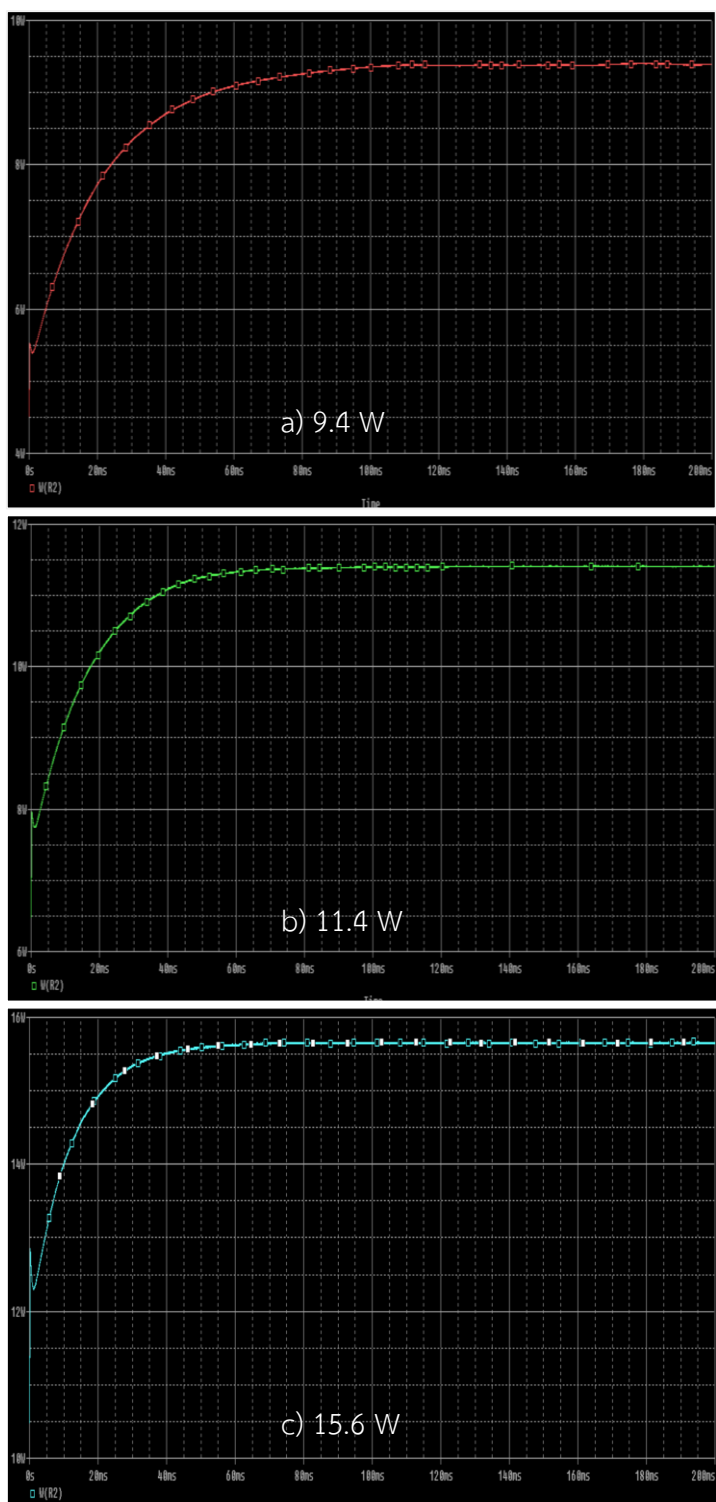
จากงานวิจัย Montecucco, A., และ Knox, A. ได้ประสิทธิภาพของเทคนิคการถ่ายโอนกำลังสูงสุดแบบวัดแรงดันเปิดวงจรที่ดีที่สุด 99.85 เปอร์เซ็นต์ [16]

Nisha K S และ Mini V P ได้ประสิทธิภาพของเทคนิคการถ่ายโอนกำลังสูงสุดแบบรบกวนและสังเกตที่ดีที่สุด 99.8 เปอร์เซ็นต์ [17]

Ssenoga Twaha และคณะ ได้ประสิทธิภาพของเทคนิคการถ่ายโอนกำลังสูงสุดแบบรบกวนและสังเกตที่ดีที่สุด 99.95 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพในการประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ 81.00 เปอร์เซ็นต์ ได้ประสิทธิภาพของเทคนิคการถ่ายโอนกำลังสูงสุดแบบเพิ่มค่าความนำที่ดีที่สุด 99.97 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพในการประจุไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ 88.70 เปอร์เซ็นต์ [18]

Hayati Mamur และ Rasit Ahiska ได้ใช้เทคนิครบกวนและสังเกตในการดึงกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกแบบพกพา ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพของการให้กำลังสูงสุด 99.95 เปอร์เซ็นต์ จากกำลังสูงสุดที่ควรจะได้ [20]

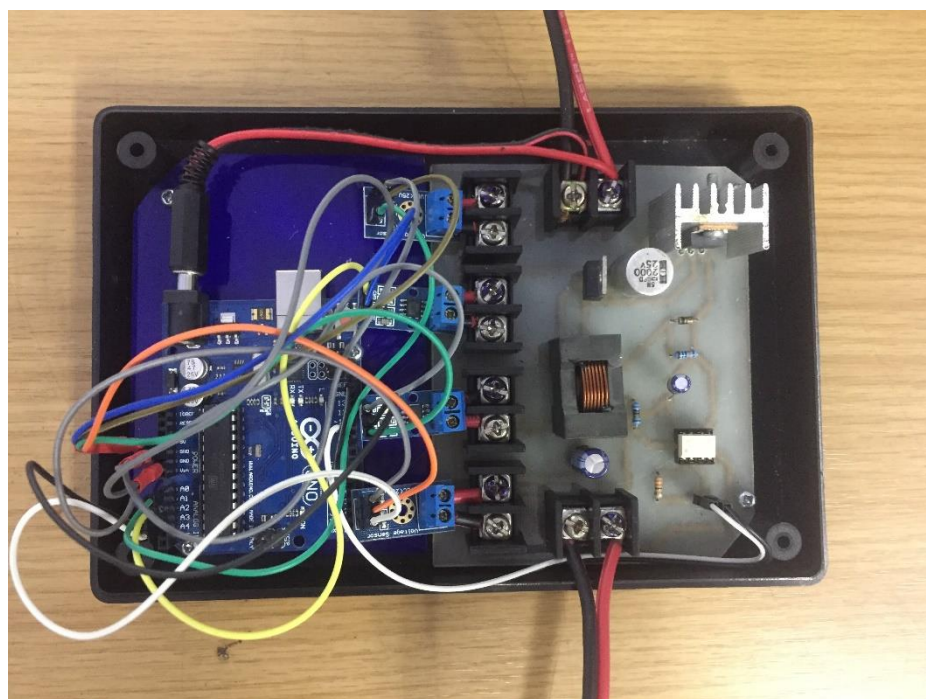
ขณะที่ในงานวิจัยนี้ได้ค่าประสิทธิภาพในการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเทคนิครบกวนและสังเกต 99.84 เปอร์เซ็นต์ และของเทคนิคเพิ่มค่าความนำ 97.24 เปอร์เซ็นต์ที่ ในส่วนของประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 72.15 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่เทคนิคเพิ่มค่าความนำมีประสิทธิภาพในการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย 94.47 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพของวงจรทระดับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 73.80 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลาจากโปรแกรม Pspice ที่อุณหภูมิ
 ด้านร้อน : a) 200 องศาเซลเซียส b) 220 องศาเซลเซียส c) 250 องศาเซลเซียส

ในส่วนสุดท้ายในงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลจากเทคนิคครบวงจรและสังเกต และเทคนิคเพิ่มค่าความนำกับผลจากจำลองจากโปรแกรม Pspice ที่มีการกำหนดพารามิเตอร์ตาม

อุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกที่ 200 220 และ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ ด้านร้อน 200 220 และ 250 องศาเซลเซียส สามารถประจุกำลังไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ได้ 9.4 11.4 และ 15.6 วัตต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.21 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจาก เทคนิคทั้งสอง พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่จากเทคนิคครบวงจรและสังเกตมีค่าอยู่ในช่วง 71.7 – 85.0 % และเทคนิคเพิ่มค่าความนำมีค่ากำลังไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่อยู่ในช่วง 72.0 – 81.2 % ของผลจากโปรแกรม Pspice เนื่องจากการจำลองของโปรแกรม Pspice เป็นค่าในอุดมคติจึงทำให้ไม่เกิดกำลังสูญเสียในวงจรไฟฟ้า จึงส่งผลให้ได้กำลังไฟฟ้ามักมากกว่าเทคนิคทั้งสองในงานวิจัย นอกจากนี้ประสิทธิภาพของการประจุกำลังไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ของงานวิจัยนี้ ยังมีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sennoga Twaha และคณะ [18]



รูปที่ 4.22 ภาพชุดควบคุมการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดในงานวิจัยนี้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบประจุแบตเตอรี่โดยใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทวิระดับร่วมกับเทคนิคการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุด สองเทคนิค ได้แก่ เทคนิคครบวงจรและสังเกต และเทคนิคเพิ่มค่าความนำ ในขั้นตอนต่อไปคือทำการประจุแบตเตอรี่โดยกำหนดวัฏจักรการสวิตช์ เพื่อตรวจสอบแนวโน้มของกำลังไฟฟ้าขณะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรการสวิตช์ ซึ่งผลที่ได้คือ ในช่วงค่าวัฏจักรการสวิตช์ 40-50 เปอร์เซ็นต์ มีค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงที่สุดและกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าแปรผกผันกับค่าวัฏจักรการสวิตช์ จากนั้นทำการประจุแบตเตอรี่โดยตรง ประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคครบวงจรและสังเกต และประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคเพิ่มค่าความนำ พบว่าการประจุแบตเตอรี่โดยตรงมีค่าประสิทธิภาพในการดึงกำลังไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริก สูงสุดเพียง 29.71 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ ขณะที่การใช้เทคนิคครบวงจรและสังเกต และเทคนิคเพิ่มค่าความนำ มีค่าประสิทธิภาพในการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเทอร์โมอิเล็กทริก 99.84 และ 97.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และกำลังไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคครบวงจรและสังเกต 74.42 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเทคนิคเพิ่มค่าความนำมีค่า 77.42 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้ ดังนั้นเทคนิคครบวงจรและสังเกตมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงเดียวกับเทคนิคเพิ่มค่าความนำคือ 69 ถึง 77 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ประจุไปยังแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคเพิ่มค่าความนำมีความเสถียรที่จุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดมากกว่าเทคนิคครบวงจรและสังเกต จากเหตุผลดังกล่าวจึงให้เทคนิคเพิ่มค่าความนำเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับระบบของงานวิจัยนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากงานวิจัยนี้ พบว่าวงจรทวิระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น สามารถนำไปเป็นต้นแบบเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของวงจรทวิระดับแรงดันไฟฟ้าให้ดีขึ้น
2. สามารถพัฒนาในการใช้เทคนิคอื่นหรือหาเทคนิคใหม่ในการหาจุดถ่ายโอนกำลังสูงสุดในระบบประจุแบตเตอรี่โดยใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบอื่นเข้ามาใช้ในระบบ
3. สามารถพัฒนาไปใช้ในระบบหรือโรงงานที่มีพลังงานความร้อนจากการผลิต เพื่อนำพลังงานที่สูญเสียในรูปความร้อนกลับใช้ใหม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] H.J. Goldsmid, Introduction to Thermoelectricity, Springer Series in Materials Science 121, DOI 10.1007/978-3-662-49256-7_1
- [2] ดุสิต เครื่องาม. 2521. “โซลิตสเททฟิสิกส์” วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [3] Akihiro Ishida, Tomohiro Yamada, Takayuki Nakano, Yasushi Takano and Sadao Takaoka¹, Seebeck Effects and Electronic Thermal Conductivity of IV–VI Materials., Japanese Journal of Applied Physics, Vol.3. 2011. Pp.031302-1-031302-5
- [4] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ผศ.ดร.นวกัศรา หนูนาถ, Seebeck effect / ปรากฎการณ์ซีเบค, <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6808/seebeck-effect-ปรากฎการณ์ซีเบค>
- [5] A. Fukushima; H. Kubota; A. Yamamoto; Y. Suzuki; S. Yuasa. Peltier effect in metallic CPP structures. 2005 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG). Year: 2005. Pages: 9 – 10
- [6] Ian Laird; Dylan D. C. Lu, SPICE steady state modelling of thermoelectric generators involving the Thomson effect, IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Year: 2011, Pages: 1584 – 1589, Cited by: Papers (3)
- [7] F. J. Donahoe, Theoretical bound on the thermoelectric figure of merit, Electrical Engineering, Year: 1960, Volume: 79, Issue: 6, Pages: 488 – 490, Cited by: Papers (1)
- [8] James C. McLaughlin and Kenneth L. Kaiser, “Deglorifying” the Maximum Power Transfer Theorem and Factors in Impedance Selection, IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 50, NO. 3, AUGUST 2007
- [9] Ratna Ika Putria,* , Supto Wibowob, Muhamad Rifa'ia, Maximum power point tracking for photovoltaic using incremental conductance method, 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA 2014, Energy Procedia 68 (2015) 22 – 30

- [10] M.Lokanadham, K.Vijaya Bhaskar / International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622 www.ijera.com Vol. 2, Issue 2, Mar-Apr 2012, pp.1420-1424
- [11] X. Zhang, L. Wenlong, J. Li, Thermoelectric power generation with maximum power point tracking, International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. IET, 2009: 1–6.
- [12] LX.Ni, K.Sun, L.Zhang, et al, A power conditioning system for thermoelectric generator based on interleaved Boost converter with MPPT control, International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011: 1–6.
- [13] A. Hidaka, T. Tsuji, S. Matsumoto, A thermoelectric generators with ultra-low input voltage boost converter with maximum power point tracking, International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 2012: 1–5.
- [14] H. Yamada, K. Kimura, T. Hanamoto and T. Ishiyama, A novel MPPT control method of thermoelectric power generation using state space averaging method, IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE, 2011: 895–900.
- [15] Wei Xie^{1,2},Guangyue Huang³, Xiao Zhang³,Fang Deng^{1,2} ,A maximum power point tracking controller for thermoelectric generators, Proceedings of the 36th Chinese Control Conference July 26-28, 2017, Dalian, China
- [16] Montecucco, A., and Knox, A. (2015) Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators. IEEE Transactions on Power Electronics, 30 (2). pp. 828-839. ISSN 0885-899
- [17] Nisha K S, Mini V P, Battery-less Boost Converter for Thermal Energy Harvesting System., 2015 International Conference on Control, Communication & Computing India (ICCC) | 19-21 November 2015 | Trivandrum
- [18] Ssenoga Twaha, Jie Zhu, etc., Performance analysis of thermoelectric generator using dc-dc converter with incremental conductance based maximum power point tracking, Energy for Sustainable Development 37 (2017) 86-98

- [19] Jensak Eakburanawat, Itsda Boonyaroonate, Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique, *Applied Energy*, Volume 83, Issue 7, July 2006, Pages 687-704
- [20] Hayati Mamur, Rasit Ahiska, Application of a DC–DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators, *Energy Conversion and Management*, Volume 97, June 2015, Pages 265-272.
- [21] S. Lyden, M.E. Haque, Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review and comparative analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (2015) 1504–1518
- [22] Robert W. Erickson, DC-DC Power Converters, Article in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0425

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.4 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยไม่มีการสวิตซ์ที่อุณหภูมิด้านร้อน 200 °C

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 60 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 120 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 180 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 240 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 300 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 360 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 420 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 480 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 540 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 600 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 660 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 720 | 0.06 | 0.05 | 10.97 |
| 780 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 840 | 0.06 | 0.05 | 10.97 |
| 900 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 960 | 0.06 | 0.05 | 10.97 |
| 1020 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 1080 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 1140 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 1200 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 1260 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 1320 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 1380 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 1440 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 1500 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |
| 1560 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1620 | 0.06 | 0.05 | 10.97 |
| 1680 | 0.07 | 0.06 | 10.97 |
| 1740 | 0.07 | 0.05 | 10.97 |

ตารางที่ 4.5 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยไม่มีการสวิตซ์ที่อุณหภูมิด้านร้อน 220 °C

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 1.66 | 1.58 | 12.23 |
| 60 | 1.59 | 1.52 | 12.23 |
| 120 | 1.59 | 1.52 | 12.23 |
| 180 | 1.59 | 1.52 | 12.23 |
| 240 | 1.57 | 1.51 | 12.23 |
| 300 | 1.56 | 1.51 | 12.23 |
| 360 | 1.53 | 1.47 | 12.23 |
| 420 | 1.54 | 1.49 | 12.23 |
| 480 | 1.54 | 1.49 | 12.23 |
| 540 | 1.55 | 1.49 | 12.23 |
| 600 | 1.54 | 1.48 | 12.23 |
| 660 | 1.52 | 1.46 | 12.23 |
| 720 | 1.47 | 1.42 | 12.23 |
| 780 | 1.46 | 1.40 | 12.23 |
| 840 | 1.44 | 1.39 | 12.23 |
| 900 | 1.43 | 1.38 | 12.23 |
| 960 | 1.42 | 1.37 | 12.23 |
| 1020 | 1.41 | 1.35 | 12.23 |
| 1080 | 1.40 | 1.35 | 12.23 |
| 1140 | 1.42 | 1.37 | 12.23 |
| 1200 | 1.40 | 1.36 | 12.23 |
| 1260 | 1.38 | 1.34 | 12.23 |
| 1320 | 1.35 | 1.31 | 12.23 |

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1380 | 1.35 | 1.30 | 12.23 |
| 1440 | 1.34 | 1.28 | 12.23 |
| 1500 | 1.36 | 1.31 | 12.23 |
| 1560 | 1.36 | 1.31 | 12.23 |
| 1620 | 1.37 | 1.31 | 12.23 |
| 1680 | 1.33 | 1.29 | 12.23 |
| 1740 | 1.30 | 1.25 | 12.23 |

ตารางที่ 4.6 ผลการประจุแบตเตอรี่ผ่านวงจรทระดับโดยไม่มีการสวิตซ์ที่อุณหภูมิห้อง 250 °C

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 6.63 | 5.53 | 17.77 |
| 60 | 5.44 | 5.05 | 17.77 |
| 120 | 5.35 | 4.97 | 17.77 |
| 180 | 5.16 | 4.83 | 17.77 |
| 240 | 5.02 | 4.69 | 17.77 |
| 300 | 4.93 | 4.60 | 17.77 |
| 360 | 4.87 | 4.54 | 17.77 |
| 420 | 4.79 | 4.47 | 17.77 |
| 480 | 4.73 | 4.40 | 17.77 |
| 540 | 4.68 | 4.37 | 17.77 |
| 600 | 4.69 | 4.38 | 17.77 |
| 660 | 4.67 | 4.36 | 17.77 |
| 720 | 4.63 | 4.33 | 17.77 |
| 780 | 4.63 | 4.32 | 17.77 |
| 840 | 4.64 | 4.33 | 17.77 |
| 900 | 4.62 | 4.31 | 17.77 |
| 960 | 4.56 | 4.26 | 17.77 |
| 1020 | 4.52 | 4.23 | 17.77 |
| 1080 | 4.49 | 4.20 | 17.77 |

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1140 | 4.48 | 4.18 | 17.77 |
| 1200 | 4.48 | 4.19 | 17.77 |
| 1260 | 4.48 | 4.20 | 17.77 |
| 1320 | 4.48 | 4.17 | 17.77 |
| 1380 | 4.48 | 4.19 | 17.77 |
| 1440 | 4.50 | 4.22 | 17.77 |
| 1500 | 4.57 | 4.28 | 17.77 |
| 1560 | 4.55 | 4.25 | 17.77 |
| 1620 | 4.50 | 4.21 | 17.77 |
| 1680 | 4.45 | 4.17 | 17.77 |
| 1740 | 4.43 | 4.14 | 17.77 |

ตารางที่ 4.8 ผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคบวมนและสังเกตที่อุณหภูมิห้อง 200 °C

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 10.24 | 6.69 | 10.36 |
| 60 | 9.82 | 6.69 | 10.36 |
| 120 | 10.02 | 6.69 | 10.36 |
| 180 | 9.61 | 6.69 | 10.36 |
| 240 | 9.62 | 6.61 | 10.36 |
| 300 | 9.61 | 6.56 | 10.36 |
| 360 | 9.11 | 6.70 | 10.36 |
| 420 | 10.03 | 6.59 | 10.36 |
| 480 | 8.73 | 6.56 | 10.36 |
| 540 | 9.99 | 6.16 | 10.36 |
| 600 | 10.16 | 6.18 | 10.36 |
| 660 | 9.84 | 6.20 | 10.36 |
| 720 | 9.56 | 6.41 | 10.36 |
| 780 | 9.48 | 6.63 | 10.36 |
| 840 | 9.31 | 6.62 | 10.36 |

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 900 | 9.94 | 6.66 | 10.36 |
| 960 | 9.94 | 6.76 | 10.36 |
| 1020 | 9.15 | 6.73 | 10.36 |
| 1080 | 9.00 | 6.58 | 10.36 |
| 1140 | 10.55 | 6.33 | 10.36 |
| 1200 | 9.84 | 6.06 | 10.36 |
| 1260 | 9.95 | 5.95 | 10.36 |
| 1320 | 10.18 | 5.78 | 10.36 |
| 1380 | 10.36 | 5.76 | 10.36 |
| 1440 | 9.26 | 5.87 | 10.36 |
| 1500 | 10.28 | 5.87 | 10.36 |
| 1560 | 10.49 | 5.82 | 10.36 |
| 1620 | 9.05 | 6.15 | 10.36 |
| 1680 | 9.38 | 6.21 | 10.36 |
| 1740 | 9.33 | 6.21 | 10.36 |

ตารางที่ 4.9 ผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคרבกวนและสังเกตที่อุณหภูมิห้อง 220 °C

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 13.00 | 10.21 | 13.12 |
| 60 | 13.13 | 10.22 | 13.12 |
| 120 | 13.20 | 10.89 | 13.12 |
| 180 | 12.93 | 9.32 | 13.12 |
| 240 | 13.14 | 9.38 | 13.12 |
| 300 | 13.01 | 9.67 | 13.12 |
| 360 | 13.13 | 9.36 | 13.12 |
| 420 | 12.95 | 9.13 | 13.12 |
| 480 | 12.91 | 9.11 | 13.12 |
| 540 | 13.05 | 9.04 | 13.12 |
| 600 | 12.95 | 9.27 | 13.12 |

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 660 | 13.31 | 9.38 | 13.12 |
| 720 | 13.05 | 9.39 | 13.12 |
| 780 | 13.07 | 9.44 | 13.12 |
| 840 | 13.17 | 9.33 | 13.12 |
| 900 | 12.85 | 9.31 | 13.12 |
| 960 | 13.11 | 9.31 | 13.12 |
| 1020 | 12.43 | 9.30 | 13.12 |
| 1080 | 12.94 | 9.41 | 13.12 |
| 1140 | 13.19 | 9.18 | 13.12 |
| 1200 | 12.88 | 9.32 | 13.12 |
| 1260 | 12.81 | 9.69 | 13.12 |
| 1320 | 12.99 | 9.09 | 13.12 |
| 1380 | 12.93 | 9.25 | 13.12 |
| 1440 | 12.94 | 9.23 | 13.12 |
| 1500 | 12.69 | 9.28 | 13.12 |
| 1560 | 12.86 | 9.27 | 13.12 |
| 1620 | 12.77 | 9.23 | 13.12 |
| 1680 | 13.00 | 9.19 | 13.12 |
| 1740 | 12.88 | 9.11 | 13.12 |

ตารางที่ 4.10 ผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคครบวงจรและสังเกตที่อุณหภูมิห้อง 250 °C

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 15.83 | 11.24 | 17.52 |
| 60 | 15.51 | 11.40 | 17.52 |
| 120 | 15.16 | 11.24 | 17.52 |
| 180 | 15.83 | 11.06 | 17.52 |
| 240 | 14.89 | 11.07 | 17.52 |
| 300 | 14.37 | 11.18 | 17.52 |
| 360 | 16.50 | 11.29 | 17.52 |

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 420 | 15.35 | 11.16 | 17.52 |
| 480 | 15.19 | 11.26 | 17.52 |
| 540 | 14.85 | 11.33 | 17.52 |
| 600 | 15.00 | 11.29 | 17.52 |
| 660 | 15.11 | 11.20 | 17.52 |
| 720 | 15.29 | 11.37 | 17.52 |
| 780 | 14.80 | 11.34 | 17.52 |
| 840 | 15.12 | 11.43 | 17.52 |
| 900 | 14.96 | 11.34 | 17.52 |
| 960 | 14.92 | 11.25 | 17.52 |
| 1020 | 16.31 | 11.36 | 17.52 |
| 1080 | 15.08 | 11.46 | 17.52 |
| 1140 | 15.25 | 11.44 | 17.52 |
| 1200 | 15.09 | 11.42 | 17.52 |
| 1260 | 15.79 | 11.64 | 17.52 |
| 1320 | 15.24 | 11.40 | 17.52 |
| 1380 | 15.09 | 11.35 | 17.52 |
| 1440 | 14.81 | 11.20 | 17.52 |
| 1500 | 14.87 | 11.34 | 17.52 |
| 1560 | 14.81 | 11.35 | 17.52 |
| 1620 | 14.94 | 11.35 | 17.52 |
| 1680 | 15.09 | 11.33 | 17.52 |
| 1740 | 14.55 | 11.27 | 17.52 |

ตารางที่ 4.11 ผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคเพิ่มค่าความนำที่อุณหภูมิห้อง 200 °C

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 10.95 | 7.37 | 10.88 |
| 60 | 10.91 | 7.33 | 10.88 |
| 120 | 10.67 | 7.30 | 10.88 |

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 180 | 10.32 | 7.20 | 10.88 |
| 240 | 10.33 | 7.32 | 10.88 |
| 300 | 10.34 | 7.23 | 10.88 |
| 360 | 10.41 | 7.05 | 10.88 |
| 420 | 10.37 | 7.20 | 10.88 |
| 480 | 10.37 | 7.17 | 10.88 |
| 540 | 10.68 | 7.10 | 10.88 |
| 600 | 10.42 | 7.17 | 10.88 |
| 660 | 10.51 | 7.07 | 10.88 |
| 720 | 10.12 | 7.12 | 10.88 |
| 780 | 10.26 | 7.06 | 10.88 |
| 840 | 9.81 | 7.08 | 10.88 |
| 900 | 9.91 | 6.98 | 10.88 |
| 960 | 9.96 | 6.98 | 10.88 |
| 1020 | 9.88 | 6.97 | 10.88 |
| 1080 | 9.75 | 7.02 | 10.88 |
| 1140 | 10.27 | 7.02 | 10.88 |
| 1200 | 10.37 | 7.05 | 10.88 |
| 1260 | 9.98 | 7.08 | 10.88 |
| 1320 | 10.74 | 7.05 | 10.88 |
| 1380 | 10.16 | 7.01 | 10.88 |
| 1440 | 9.77 | 7.02 | 10.88 |
| 1500 | 10.15 | 7.01 | 10.88 |
| 1560 | 10.24 | 7.01 | 10.88 |
| 1620 | 9.93 | 7.02 | 10.88 |
| 1680 | 9.99 | 7.04 | 10.88 |
| 1740 | 10.16 | 7.07 | 10.88 |

ตารางที่ 4.12 ผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคเพิ่มค่าความนำที่อุณหภูมิด้านร้อน 220 °C

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 12.28 | 9.34 | 12.42 |
| 60 | 12.21 | 9.32 | 12.42 |
| 120 | 11.89 | 9.24 | 12.42 |
| 180 | 11.74 | 9.20 | 12.42 |
| 240 | 11.80 | 9.23 | 12.42 |
| 300 | 11.93 | 9.18 | 12.42 |
| 360 | 12.26 | 9.23 | 12.42 |
| 420 | 11.94 | 9.19 | 12.42 |
| 480 | 11.96 | 9.18 | 12.42 |
| 540 | 12.14 | 9.24 | 12.42 |
| 600 | 11.62 | 9.27 | 12.42 |
| 660 | 11.37 | 9.14 | 12.42 |
| 720 | 12.13 | 9.17 | 12.42 |
| 780 | 11.81 | 9.14 | 12.42 |
| 840 | 11.72 | 9.11 | 12.42 |
| 900 | 11.33 | 9.07 | 12.42 |
| 960 | 11.00 | 8.99 | 12.42 |
| 1020 | 11.63 | 9.14 | 12.42 |
| 1080 | 11.29 | 9.08 | 12.42 |
| 1140 | 11.71 | 9.12 | 12.42 |
| 1200 | 11.53 | 9.14 | 12.42 |
| 1260 | 10.88 | 9.06 | 12.42 |
| 1320 | 12.11 | 9.14 | 12.42 |
| 1380 | 11.45 | 9.04 | 12.42 |
| 1440 | 11.32 | 9.05 | 12.42 |
| 1500 | 12.01 | 9.15 | 12.42 |
| 1560 | 12.07 | 9.07 | 12.42 |
| 1620 | 12.09 | 9.10 | 12.42 |
| 1680 | 11.64 | 9.14 | 12.42 |

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1740 | 11.74 | 9.08 | 12.42 |

ตารางที่ 4.13 ผลการประจุแบตเตอรี่โดยเทคนิคเพิ่มค่าความนำที่อุณหภูมิด้านร้อน 250 °C

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 16.50 | 11.38 | 17.13 |
| 60 | 16.40 | 11.11 | 17.13 |
| 120 | 14.65 | 11.38 | 17.13 |
| 180 | 15.36 | 11.27 | 17.13 |
| 240 | 15.89 | 11.04 | 17.13 |
| 300 | 14.78 | 11.16 | 17.13 |
| 360 | 15.34 | 11.27 | 17.13 |
| 420 | 16.13 | 11.26 | 17.13 |
| 480 | 15.31 | 11.01 | 17.13 |
| 540 | 15.38 | 11.19 | 17.13 |
| 600 | 15.42 | 11.40 | 17.13 |
| 660 | 14.82 | 11.47 | 17.13 |
| 720 | 15.45 | 11.35 | 17.13 |
| 780 | 15.46 | 11.27 | 17.13 |
| 840 | 15.47 | 11.35 | 17.13 |
| 900 | 14.93 | 11.56 | 17.13 |
| 960 | 15.62 | 11.22 | 17.13 |
| 1020 | 15.28 | 11.42 | 17.13 |
| 1080 | 15.41 | 11.44 | 17.13 |
| 1140 | 15.41 | 11.34 | 17.13 |
| 1200 | 15.60 | 11.27 | 17.13 |
| 1260 | 15.89 | 11.31 | 17.13 |
| 1320 | 15.52 | 11.29 | 17.13 |
| 1380 | 15.04 | 11.25 | 17.13 |
| 1440 | 14.56 | 11.36 | 17.13 |

| เวลา (วินาที) | กำลังไฟฟ้าอินพุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต (วัตต์) | กำลังไฟฟ้าที่คำนวณ (วัตต์) |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1500 | 17.34 | 11.14 | 17.13 |
| 1560 | 17.54 | 11.10 | 17.13 |
| 1620 | 16.68 | 11.22 | 17.13 |
| 1680 | 14.61 | 11.67 | 17.13 |
| 1740 | 15.75 | 11.57 | 17.13 |

ภาคผนวก ข

Specification of Thermoelectric Module

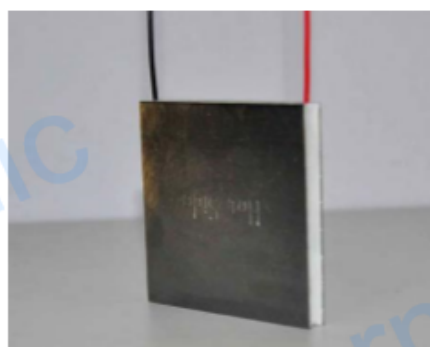
TEHP1-24156-1.2

Description

The power module is designed and manufactured by our patented technology for converting heat source directly into electricity. The module is Bi-Te based thermoelectric module that can work at the temperature of as high as 330 °C (626 K) heat source continuously, and up to 400 °C (752 K) intermittently. The thermoelectric module will generate DC electricity as long as there is a temperature difference across the module. The more power will be generated when the temperature difference across the module becomes larger, and the efficiency of converting heat energy into electricity will increase therefore. The module is stuck with the high thermal conductivity graphite sheet on its both sides of the ceramic plates to provide low contact thermal resistance, hence you do not need to apply thermal grease or other heat transfer compound when you install the module. The graphite sheet can work well in extremely high temperature.

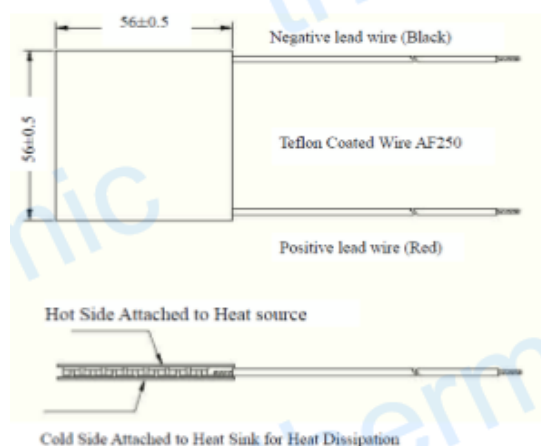
Patent NO.: ZL 2010 1 0193517.9

Specification of the Module

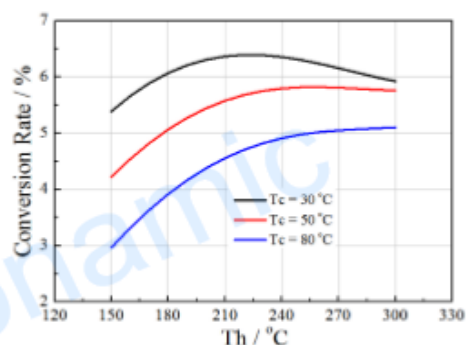


| | |
|--|----------|
| Hot Side Temperature (°C) | 300 |
| Cold Side Temperature (°C) | 30 |
| Open Circuit Voltage (V) | 14.4 |
| Matched Load Resistance (ohms) | 2.4 |
| Matched load output voltage (V) | 7.2 |
| Matched load output current (A) | 3.0 |
| Matched load output power (W) | 21.6 |
| Heat flow across the module (W) | ≈365 |
| Heat flow density (W cm ⁻²) | ≈13.2 |
| AC Resistance(ohms) Measured under 27 °C at 1000 Hz | 1.1~1.35 |

Geometric Characteristics Dimensions in millimeter



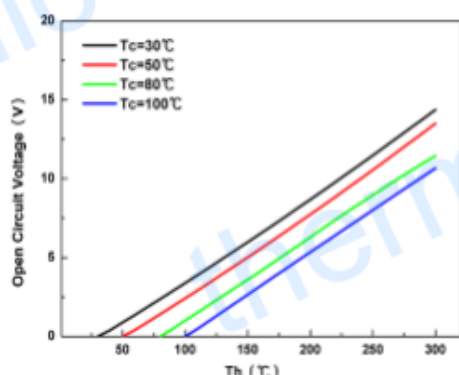
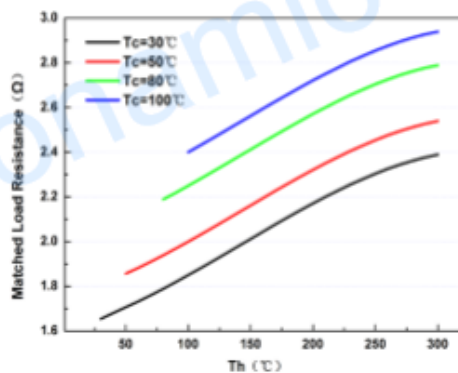
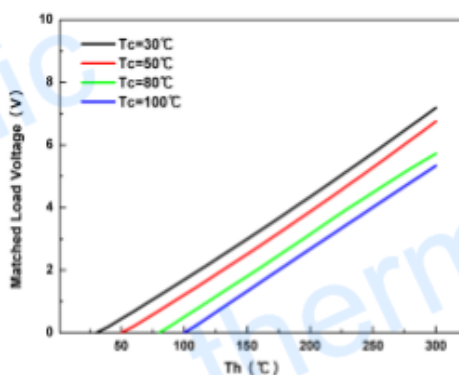
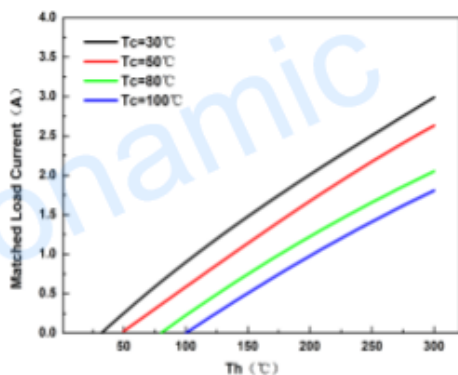
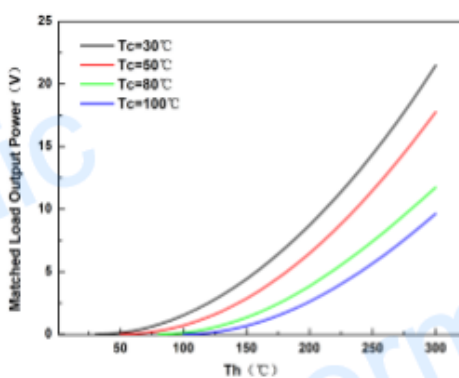
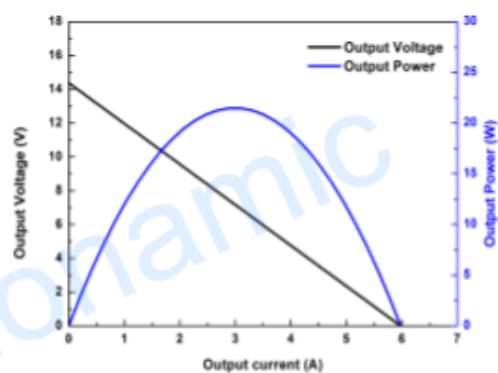
Conversion Rate of the modules Vs Th under various Tc



Note: Conversion rate = Matched load output power / Heat flow through the module

Performance Curves of the Module

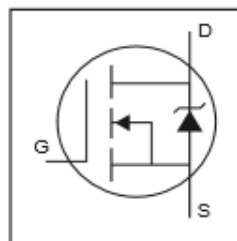
TEHP1-24156-1.2

The chart for open circuit voltage $V_s T_h$ under various T_c .The chart for matched load resistance $V_s T_h$ under various T_c .The chart for matched load voltage $V_s T_h$ under various T_c .The chart for matched load current $V_s T_h$ under various T_c .The chart for matched load output power $V_s T_h$ under various T_c .The chart for output voltage and output power V_s output currentunder $T_h=300\text{ }^\circ\text{C}$ and $T_c=30\text{ }^\circ\text{C}$

IRFZ44N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated

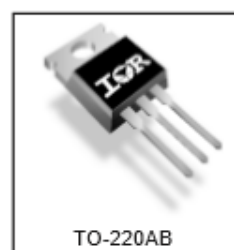


$V_{DS} = 55V$
 $R_{DS(on)} = 17.5m\Omega$
 $I_D = 49A$

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



TO-220AB

Absolute Maximum Ratings

| | Parameter | Max. | Units |
|---------------------------|--|--------------------|-------|
| $I_D @ T_C = 25^\circ C$ | Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ | 49 | A |
| $I_D @ T_C = 100^\circ C$ | Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ | 35 | |
| I_{DM} | Pulsed Drain Current ① | 160 | |
| $P_D @ T_C = 25^\circ C$ | Power Dissipation | 94 | W |
| | Linear Derating Factor | 0.63 | W/°C |
| V_{GS} | Gate-to-Source Voltage | ± 20 | V |
| I_{AR} | Avalanche Current ① | 25 | A |
| E_{AR} | Repetitive Avalanche Energy ① | 9.4 | mJ |
| dv/dt | Peak Diode Recovery dv/dt ③ | 5.0 | V/ns |
| T_J | Operating Junction and | -55 to +175 | °C |
| T_{STG} | Storage Temperature Range | | |
| | Soldering Temperature, for 10 seconds | | |
| | Mounting torque, 6-32 or M3 screw | 10 lbf-in (1.1N-m) | |

Thermal Resistance

| | Parameter | Typ. | Max. | Units |
|-----------------|-------------------------------------|------|------|-------|
| $R_{\theta JC}$ | Junction-to-Case | — | 1.5 | °C/W |
| $R_{\theta CS}$ | Case-to-Sink, Flat, Greased Surface | 0.50 | — | |
| $R_{\theta JA}$ | Junction-to-Ambient | — | 62 | |

IRFZ44N

International
IGOR RectifierElectrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

| | Parameter | Min. | Typ. | Max. | Units | Conditions |
|---------------------------------|--------------------------------------|------|-------|-------|-------|---|
| $V_{(BR)DSS}$ | Drain-to-Source Breakdown Voltage | 55 | — | — | V | $V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$ |
| $\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$ | Breakdown Voltage Temp. Coefficient | — | 0.058 | — | V/°C | Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$ |
| $R_{DS(on)}$ | Static Drain-to-Source On-Resistance | — | — | 17.5 | mΩ | $V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ① |
| $V_{GS(th)}$ | Gate Threshold Voltage | 2.0 | — | 4.0 | V | $V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$ |
| g_{fs} | Forward Transconductance | 19 | — | — | S | $V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ② |
| I_{DSS} | Drain-to-Source Leakage Current | — | — | 25 | μA | $V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$ |
| | | — | — | 250 | | $V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$ |
| I_{GSS} | Gate-to-Source Forward Leakage | — | — | 100 | nA | $V_{GS} = 20V$ |
| | Gate-to-Source Reverse Leakage | — | — | -100 | | $V_{GS} = -20V$ |
| Q_g | Total Gate Charge | — | — | 83 | nC | $I_D = 25A$ |
| Q_{gs} | Gate-to-Source Charge | — | — | 14 | | $V_{DS} = 44V$ |
| Q_{gd} | Gate-to-Drain ("Miller") Charge | — | — | 23 | | $V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13 |
| $t_{d(on)}$ | Turn-On Delay Time | — | 12 | — | ns | $V_{DD} = 28V$ |
| t_r | Rise Time | — | 60 | — | | $I_D = 25A$ |
| $t_{d(off)}$ | Turn-Off Delay Time | — | 44 | — | | $R_G = 12\Omega$ |
| t_f | Fall Time | — | 45 | — | | $V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ③ |
| L_D | Internal Drain Inductance | — | 4.5 | — | nH | Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact |
| L_S | Internal Source Inductance | — | 7.5 | — | | |
| C_{iss} | Input Capacitance | — | 1470 | — | pF | $V_{GS} = 0V$ |
| C_{oss} | Output Capacitance | — | 360 | — | | $V_{DS} = 25V$ |
| C_{riss} | Reverse Transfer Capacitance | — | 88 | — | | $f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5 |
| E_{AS} | Single Pulse Avalanche Energy ④ | — | 530 ⑤ | 150 ⑥ | | mJ |

Source-Drain Ratings and Characteristics

| | Parameter | Min. | Typ. | Max. | Units | Conditions |
|----------|---|---|------|------|-------|---|
| I_S | Continuous Source Current (Body Diode) | — | — | 49 | A | MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. |
| I_{SM} | Pulsed Source Current (Body Diode) ① | — | — | 160 | | |
| V_{SD} | Diode Forward Voltage | — | — | 1.3 | V | $T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ② |
| t_{rr} | Reverse Recovery Time | — | 63 | 95 | ns | $T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 25A$ |
| Q_{rr} | Reverse Recovery Charge | — | 170 | 260 | nC | $di/dt = 100A/\mu s$ ③ |
| t_{on} | Forward Turn-On Time | Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D) | | | | |

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)

② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 0.48\text{mH}$
 $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 25A$. (See Figure 12)

③ $I_{SD} \leq 25A$, $di/dt \leq 230A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$,
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$

④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.

⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.

⑥ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.

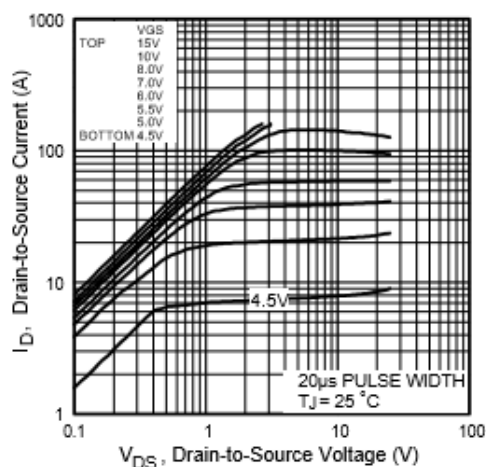


Fig 1. Typical Output Characteristics

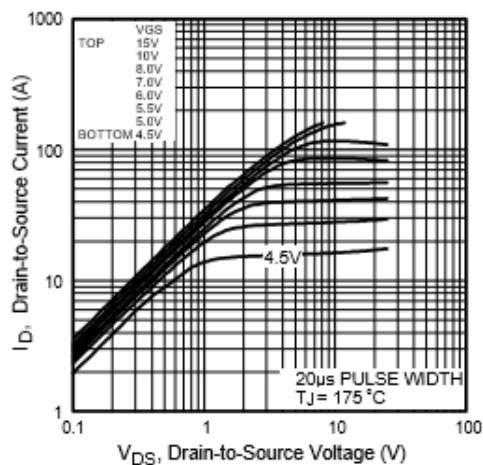


Fig 2. Typical Output Characteristics

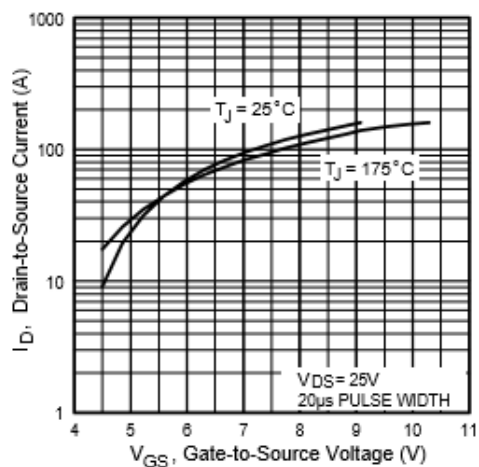
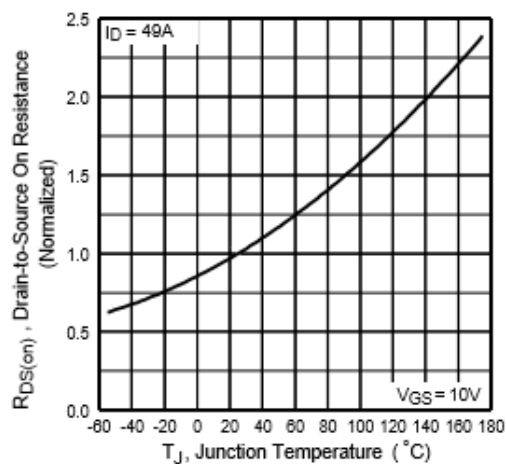


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

Fig 4. Normalized On-Resistance
Vs. Temperature

IRFZ44N

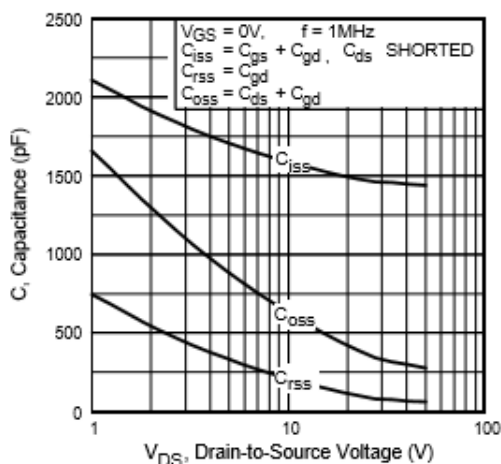
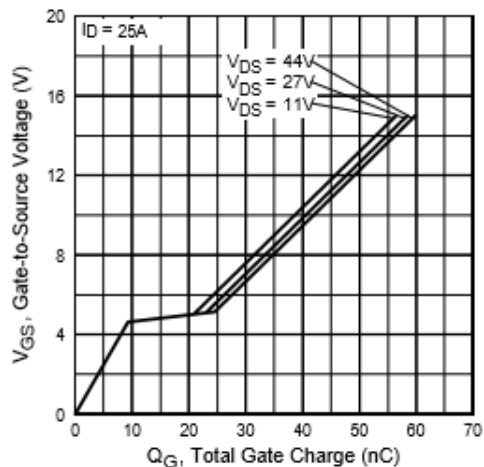
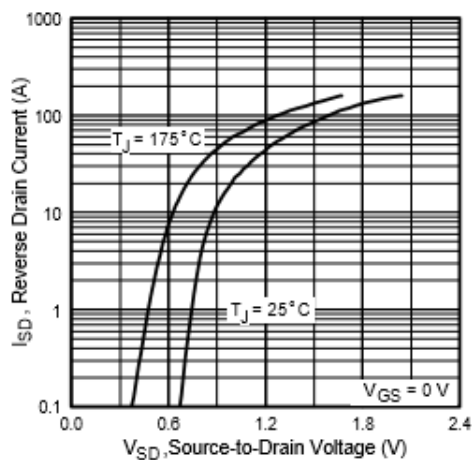
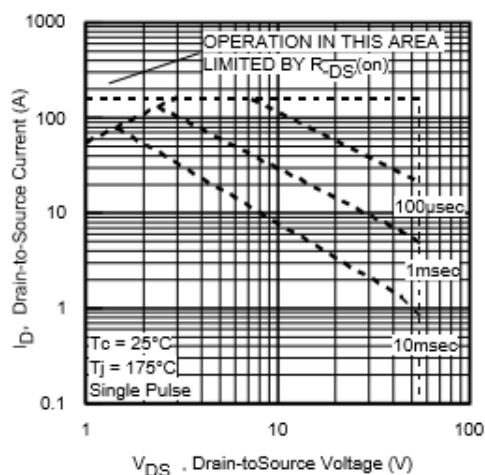
International
IGBT RectifierFig 5. Typical Capacitance Vs.
Drain-to-Source VoltageFig 6. Typical Gate Charge Vs.
Gate-to-Source VoltageFig 7. Typical Source-Drain Diode
Forward Voltage

Fig 8. Maximum Safe Operating Area

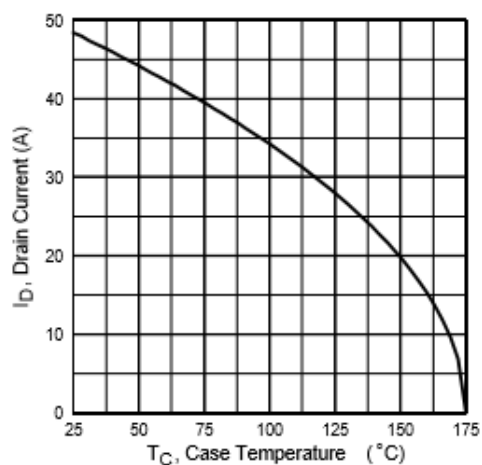


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

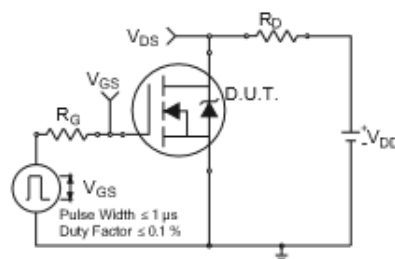


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

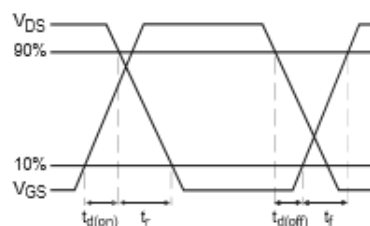


Fig 10b. Switching Time Waveforms

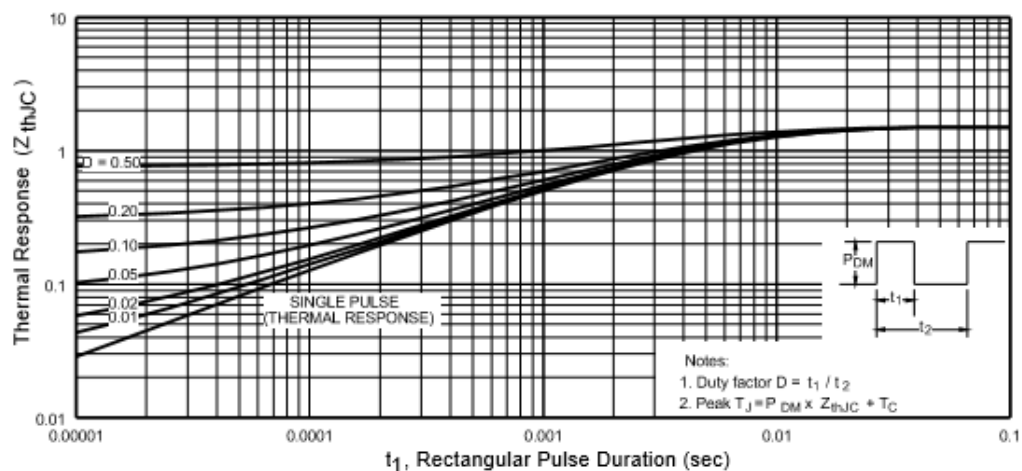


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRFZ44N

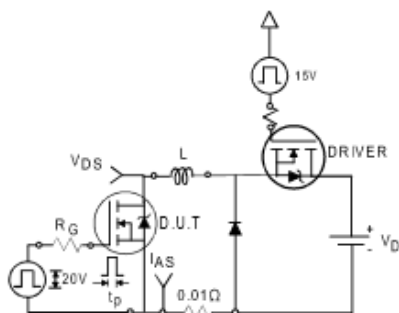
International
IGR Rectifier

Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

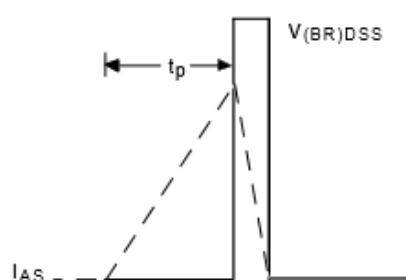


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

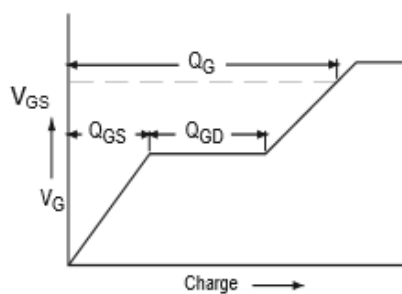


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

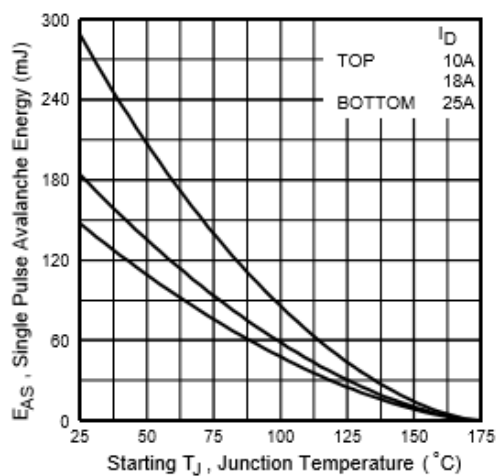
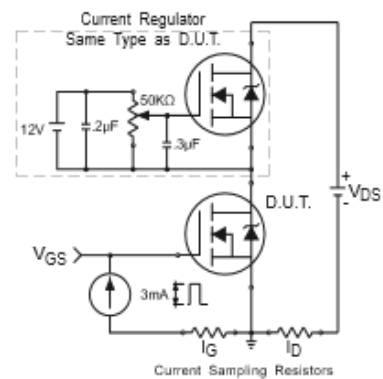
Fig 12c. Maximum Avalanche Energy
Vs. Drain Current

Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

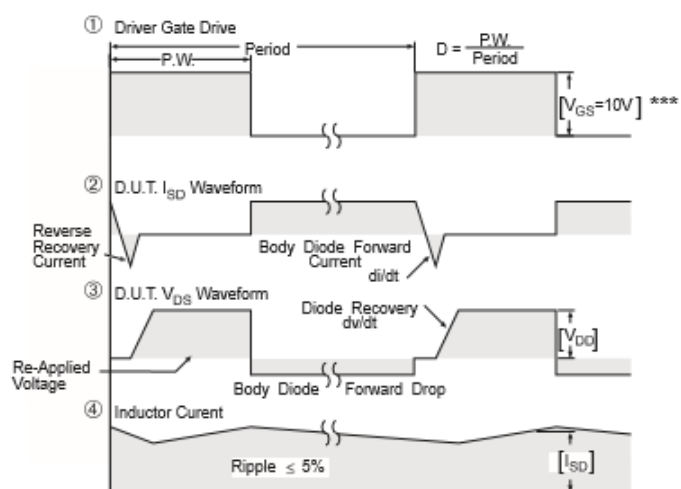
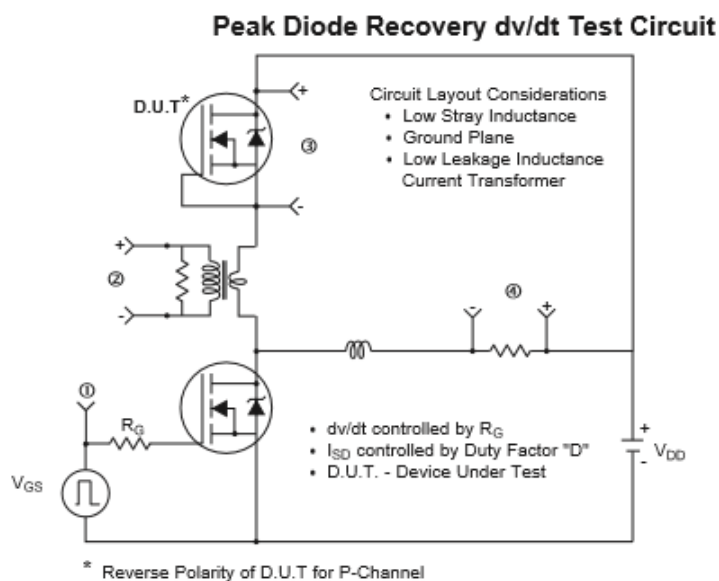


Fig 14. For N-channel HEXFET® power MOSFETs



Power Inductor – HA3588-BL



- Designed for high current power supply applications
- Saturation current of 37 Amps
- Flat wire windings provide exceptionally low DC resistance
- Vertical mounting provides a small footprint

Core material Ferrite

Terminations RoHS compliant tin-silver over copper. Other terminations available at additional cost.

Weight 37 g

Ambient temperature -40°C to +85°C with I_{rms} current, +85°C to +125°C with derated current

Storage temperature Component: -40°C to +85°C.
Tray packaging: -40°C to +80°C

Moisture Sensitivity Level (MSL) 1 (unlimited floor life at -30°C / 85% relative humidity)

Failures in Time (FIT) / Mean Time Between Failures (MTBF)
38 per billion hours / 26,315,789 hours, calculated per Telcordia SR-332

Packaging 25 parts per tray

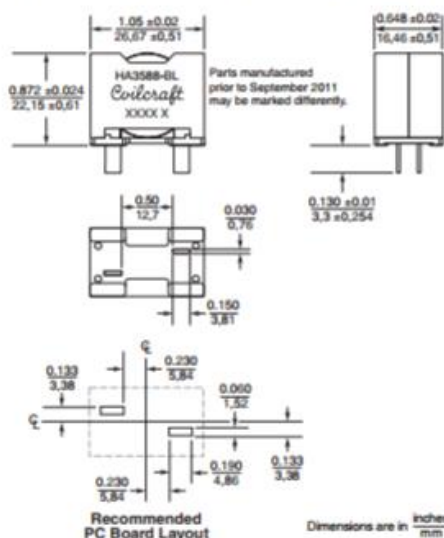
PCB washing Only pure water or alcohol recommended

| Part number | Inductance ¹ ±10% (µH) | DCR max ² (mOhms) | SRF typ ³ (MHz) | I_{sat} (A) ⁴ | | | I_{rms} (A) ⁵ | |
|-------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------------------------|-----------|
| | | | | 10% drop | 20% drop | 30% drop | 20°C rise | 40°C rise |
| HA3588-BL | 10.0 | 2.6 | 17 | 30 | 34 | 37 | 19 | 26 |

1. Inductance tested at 300 kHz, 0.1 Vrms on Agilent/HP 4192A.
2. DCR measured on a Keithley 580 micro-ohmmeter or equivalent.
3. SRF measured on an Agilent/HP 8753ES network analyzer.
4. DC current at which the inductance drops the specified amount from its value without current.
5. Current that causes the specified temperature rise of the winding from 25°C ambient. Temperature rise of the core is usually less than that of the winding.
6. Electrical specifications at 25°C.

Caution:

This series is not intended for use in high vibration or mechanical shock environments. We advise using additional means of securing the part to the circuit board to ensure its adhesion.



US +1-847-639-6400 sales@coilcraft.com
 UK +44-1236-730595 sales@coilcraft-europe.com
 Taiwan +886-2-2264 3646 sales@coilcraft.com.tw
 China +86-21-6218 8074 sales@coilcraft.com.cn
 Singapore +65-6484 8412 sales@coilcraft.com.sg

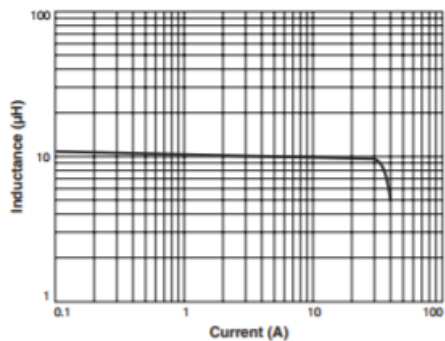
Document 716-1 Revised 10/19/11

© Coilcraft Inc. 2013
 This product may not be used in medical or high risk applications without prior Coilcraft approval. Specification subject to change without notice. Please check web site for latest information.

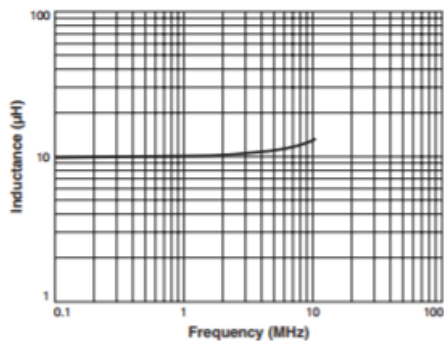


Power Inductor - HA3588-BL

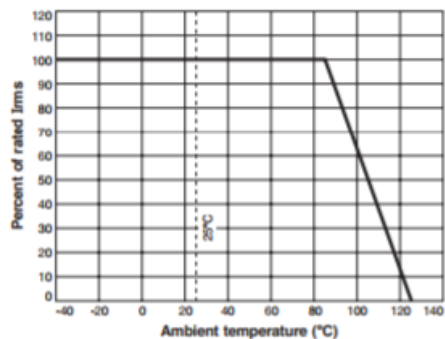
L vs Current



L vs Frequency



Irms Derating



US +1-847-639-6400 sales@coilcraft.com
 UK +44-1236-730595 sales@coilcraft-europe.com
 Taiwan +886-2-2264 3646 sales@coilcraft.com.tw
 China +86-21-6218 8074 sales@coilcraft.com.cn
 Singapore +65-6484 8412 sales@coilcraft.com.sg

Document 716-2 Revised 10/19/11
 © Coilcraft Inc. 2013
 This product may not be used in medical or high risk applications without prior Coilcraft approval. Specification subject to change without notice. Please check web site for latest information.


www.vishay.com

1N4728A to 1N4764A

Vishay Semiconductors

Zener Diodes



FEATURES

- Silicon planar power Zener diodes
- For use in stabilizing and clipping circuits with high power rating
- Standard Zener voltage tolerance is $\pm 5\%$
- AEC-Q101 qualified
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912


 RoHS
COMPLIANT
HALOGEN
FREE

APPLICATIONS

- Voltage stabilization

PRIMARY CHARACTERISTICS

| PARAMETER | VALUE | UNIT |
|-----------------------|---------------------|------|
| V_Z range nom. | 3.3 to 100 | V |
| Test current I_{ZT} | 2.5 to 76 | mA |
| V_Z specification | Thermal equilibrium | |
| Int. construction | Single | |

ORDERING INFORMATION

| DEVICE NAME | ORDERING CODE | TAPED UNITS PER REEL | MINIMUM ORDER QUANTITY |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 1N4728A to 1N4764A | 1N4728A to 1N4764A -series-TR | 5000 per 13" reel | 25 000/box |
| 1N4728A to 1N4764A | 1N4728A to 1N4764A-series-TAP | 5000 per ammpack (52 mm tape) | 25 000/box |

PACKAGE

| PACKAGE NAME | WEIGHT | MOLDING COMPOUND FLAMMABILITY RATING | MOISTURE SENSITIVITY LEVEL | SOLDERING CONDITIONS |
|--------------|--------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| DO-41 | 310 mg | UL 94 V-0 | MSL level 1 (according J-STD-020) | 260 °C/10 s at terminals |

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_{amb} = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified)

| PARAMETER | TEST CONDITION | SYMBOL | VALUE | UNIT |
|--|---|-------------|-------------|------|
| Power dissipation | Valid provided that leads at a distance of 4 mm from case are kept at ambient temperature | P_{tot} | 1300 | mW |
| Zener current | | I_Z | P_V/V_Z | mA |
| Thermal resistance junction to ambient air | Valid provided that leads at a distance of 4 mm from case are kept at ambient temperature | $R_{th,JA}$ | 110 | K/W |
| Junction temperature | | T_J | 175 | °C |
| Storage temperature range | | T_{stg} | -65 to +175 | °C |
| Forward voltage (max.) | $I_F = 200\text{ mA}$ | V_F | 1.2 | V |



| ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified) | | | | | | | | | |
|---|------------------------------------|--------------|-----------|-------------------------|------|---------------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------------|
| PART NUMBER | ZENER VOLTAGE RANGE ⁽¹⁾ | TEST CURRENT | | REVERSE LEAKAGE CURRENT | | DYNAMIC RESISTANCE $f = 1\text{ kHz}$ | | SURGE CURRENT ⁽²⁾ | REGULATOR CURRENT ⁽²⁾ |
| | V_Z at I_{ZT1} | I_{ZT1} | I_{ZT2} | I_R at V_R | | Z_{ZT} at I_{ZT1} | Z_{ZK} at I_{ZT2} | I_R | I_{ZM} |
| | V | mA | mA | μA | V | Ω | Ω | mA | mA |
| | NOM. | | | MAX. | | TYP. | MAX. | | MAX. |
| 1N4728A | 3.3 | 76 | 1 | 100 | 1 | 10 | 400 | 1380 | 276 |
| 1N4729A | 3.6 | 69 | 1 | 100 | 1 | 10 | 400 | 1260 | 252 |
| 1N4730A | 3.9 | 64 | 1 | 50 | 1 | 9 | 400 | 1190 | 234 |
| 1N4731A | 4.3 | 58 | 1 | 10 | 1 | 9 | 400 | 1070 | 217 |
| 1N4732A | 4.7 | 53 | 1 | 10 | 1 | 8 | 500 | 970 | 193 |
| 1N4733A | 5.1 | 49 | 1 | 10 | 1 | 7 | 550 | 890 | 178 |
| 1N4734A | 5.6 | 45 | 1 | 10 | 2 | 5 | 600 | 810 | 162 |
| 1N4735A | 6.2 | 41 | 1 | 10 | 3 | 2 | 700 | 730 | 146 |
| 1N4736A | 6.8 | 37 | 1 | 10 | 4 | 3.5 | 700 | 660 | 133 |
| 1N4737A | 7.5 | 34 | 0.5 | 10 | 5 | 4 | 700 | 605 | 121 |
| 1N4738A | 8.2 | 31 | 0.5 | 10 | 6 | 4.5 | 700 | 550 | 110 |
| 1N4739A | 9.1 | 28 | 0.5 | 10 | 7 | 5 | 700 | 500 | 100 |
| 1N4740A | 10 | 25 | 0.25 | 10 | 7.6 | 7 | 700 | 454 | 91 |
| 1N4741A | 11 | 23 | 0.25 | 5 | 8.4 | 8 | 700 | 414 | 83 |
| 1N4742A | 12 | 21 | 0.25 | 5 | 9.1 | 9 | 700 | 380 | 76 |
| 1N4743A | 13 | 19 | 0.25 | 5 | 9.9 | 10 | 700 | 344 | 69 |
| 1N4744A | 15 | 17 | 0.25 | 5 | 11.4 | 14 | 700 | 304 | 61 |
| 1N4745A | 16 | 15.5 | 0.25 | 5 | 12.2 | 16 | 700 | 285 | 57 |
| 1N4746A | 18 | 14 | 0.25 | 5 | 13.7 | 20 | 750 | 250 | 50 |
| 1N4747A | 20 | 12.5 | 0.25 | 5 | 15.2 | 22 | 750 | 225 | 45 |
| 1N4748A | 22 | 11.5 | 0.25 | 5 | 16.7 | 23 | 750 | 205 | 41 |
| 1N4749A | 24 | 10.5 | 0.25 | 5 | 18.2 | 25 | 750 | 190 | 38 |
| 1N4750A | 27 | 9.5 | 0.25 | 5 | 20.6 | 35 | 750 | 170 | 34 |
| 1N4751A | 30 | 8.5 | 0.25 | 5 | 22.8 | 40 | 1000 | 150 | 30 |
| 1N4752A | 33 | 7.5 | 0.25 | 5 | 25.1 | 45 | 1000 | 135 | 27 |
| 1N4753A | 36 | 7 | 0.25 | 5 | 27.4 | 50 | 1000 | 125 | 25 |
| 1N4754A | 39 | 6.5 | 0.25 | 5 | 29.7 | 60 | 1000 | 115 | 23 |
| 1N4755A | 43 | 6 | 0.25 | 5 | 32.7 | 70 | 1500 | 110 | 22 |
| 1N4756A | 47 | 5.5 | 0.25 | 5 | 35.8 | 80 | 1500 | 95 | 19 |
| 1N4757A | 51 | 5 | 0.25 | 5 | 38.8 | 95 | 1500 | 90 | 18 |
| 1N4758A | 56 | 4.5 | 0.25 | 5 | 42.6 | 110 | 2000 | 80 | 16 |
| 1N4759A | 62 | 4 | 0.25 | 5 | 47.1 | 125 | 2000 | 70 | 14 |
| 1N4760A | 68 | 3.7 | 0.25 | 5 | 51.7 | 150 | 2000 | 65 | 13 |
| 1N4761A | 75 | 3.3 | 0.25 | 5 | 56 | 175 | 2000 | 60 | 12 |
| 1N4762A | 82 | 3 | 0.25 | 5 | 62.2 | 200 | 3000 | 55 | 11 |
| 1N4763A | 91 | 2.8 | 0.25 | 5 | 69.2 | 250 | 3000 | 50 | 10 |
| 1N4764A | 100 | 2.5 | 0.25 | 5 | 76 | 350 | 3000 | 45 | 9 |

Notes

⁽¹⁾ Based on DC measurement at thermal equilibrium while maintaining the lead temperature (T_L) at $30\text{ }^{\circ}\text{C} + 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 9.5 mm (3/8") from the diode body

⁽²⁾ Valid provided that electrodes at a distance of 4 mm from case are kept at ambient temperature

⁽³⁾ $t_p = 10\text{ ms}$.



www.vishay.com

1N4728A to 1N4764A

Vishay Semiconductors

BASIC CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)

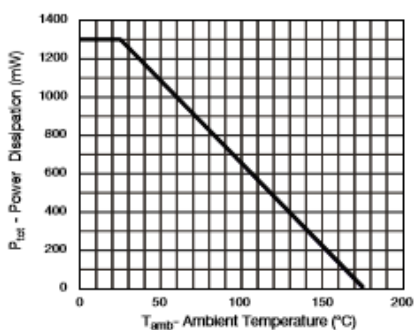
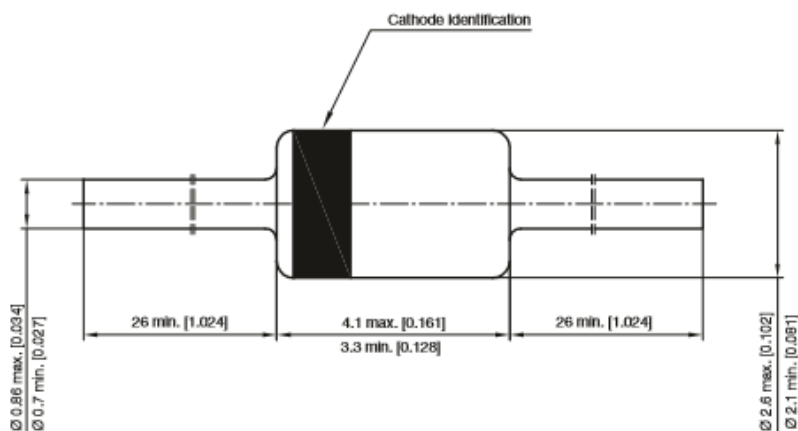


Fig. 1 - Admissible Power Dissipation vs. Ambient Temperature
 $P_{tot} = f(T_{amb})$

PACKAGE DIMENSIONS in millimeters (inches): **DO-41_1N47xx**



Document no. SB-V-3901.04-001(4)
 Rev. 1 - Date: 30. Nov. 2011
 22624



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

MUR805, MUR810, MUR815, MUR820, MUR840, MUR860

Preferred Devices

SWITCHMODE™ Power Rectifiers

This series is designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes, these state-of-the-art devices have the following features:

Features

- Ultrafast 25, 50 and 75 Nanosecond Recovery Time
- 175°C Operating Junction Temperature
- Popular TO-220 Package
- Epoxy Meets UL 94 V-0 @ 0.125 in
- Low Forward Voltage
- Low Leakage Current
- High Temperature Glass Passivated Junction
- Reverse Voltage to 600 Volts
- Pb-Free Packages are Available*

Mechanical Characteristics

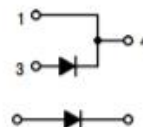
- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 1.9 grams (approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds
- Shipped 50 units per plastic tube



ON Semiconductor®

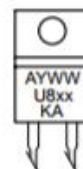
<http://onsemi.com>

ULTRAFAST RECTIFIERS 8.0 AMPERES 50-600 VOLTS



CASE 221B
TO-220AC
PLASTIC

MARKING DIAGRAM



A = Assembly Location
Y = Year
WW = Work Week
U8 = Device Code
xx = 10, 15, 20, 40 or 60
KA = Location Code

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 2 of this data sheet.

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

MUR805, MUR810, MUR815, MUR820, MUR840, MUR860

MAXIMUM RATINGS

| Rating | Symbol | MUR | | | | | | Unit |
|---|---------------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------|
| | | 805 | 810 | 815 | 820 | 840 | 860 | |
| Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage | V_{RRM} V_{RWM} V_R | 50 | 100 | 150 | 200 | 400 | 600 | V |
| Average Rectified Forward Current Total Device, (Rated V_R), $T_C = 150^\circ\text{C}$ | $I_{F(AV)}$ | 8.0 | | | | | | A |
| Peak Repetitive Forward Current (Rated V_R , Square Wave, 20 kHz), $T_C = 150^\circ\text{C}$ | I_{FM} | 16 | | | | | | A |
| Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions halfwave, single phase, 60 Hz) | I_{FSM} | 100 | | | | | | A |
| Operating Junction Temperature and Storage Temperature Range | T_J, T_{stg} | -65 to +175 | | | | | | $^\circ\text{C}$ |

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

THERMAL CHARACTERISTICS

| | | | | |
|--|-----------------|-----|-----|--------------------|
| Maximum Thermal Resistance, Junction-to-Case | $R_{\theta JC}$ | 3.0 | 2.0 | $^\circ\text{C/W}$ |
|--|-----------------|-----|-----|--------------------|

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

| | | | | | |
|---|----------|----------------|--------------|--------------|---------------|
| Maximum Instantaneous Forward Voltage (Note 1) ($I_F = 8.0$ Amps, $T_C = 150^\circ\text{C}$) ($I_F = 8.0$ Amps, $T_C = 25^\circ\text{C}$) | V_F | 0.895 0.975 | 1.00 1.30 | 1.20 1.50 | V |
| Maximum Instantaneous Reverse Current (Note 1) (Rated dc Voltage, $T_J = 150^\circ\text{C}$) (Rated dc Voltage, $T_J = 25^\circ\text{C}$) | I_R | 250 5.0 | 500 10 | | μA |
| Maximum Reverse Recovery Time ($I_F = 1.0$ Amp, $di/dt = 50$ Amps/ μs) ($I_F = 0.5$ Amp, $I_R = 1.0$ Amp, $I_{REC} = 0.25$ Amp) | t_{rr} | 35 25 | 60 50 | | ns |

1. Pulse Test: Pulse Width = 300 μs , Duty Cycle $\leq 2.0\%$.

ORDERING INFORMATION

| Device | Package | Shipping† |
|---------|---------------------|-----------------|
| MUR805 | TO-220 | 50 Units / Rail |
| MUR810 | TO-220 | 50 Units / Rail |
| MUR815 | TO-220 | 50 Units / Rail |
| MUR815G | TO-220 (Pb-Free) | 50 Units / Rail |
| MUR820 | TO-220 | 50 Units / Rail |
| MUR820G | TO-220 (Pb-Free) | 50 Units / Rail |
| MUR840 | TO-220 | 50 Units / Rail |
| MUR840G | TO-220 (Pb-Free) | 50 Units / Rail |
| MUR860 | TO-220 | 50 Units / Rail |
| MUR860G | TO-220 (Pb-Free) | 50 Units / Rail |

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

MUR805, MUR810, MUR815, MUR820, MUR840, MUR860

MUR805, MUR810, MUR815, MUR820

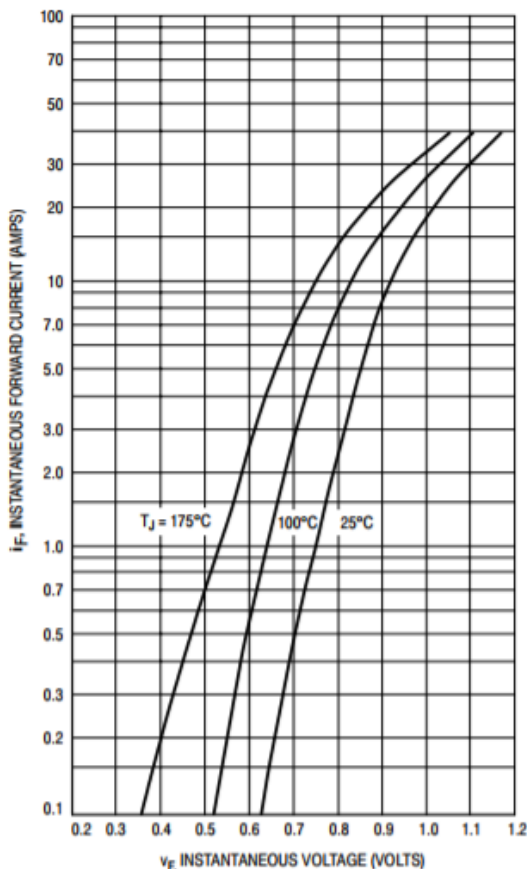


Figure 1. Typical Forward Voltage

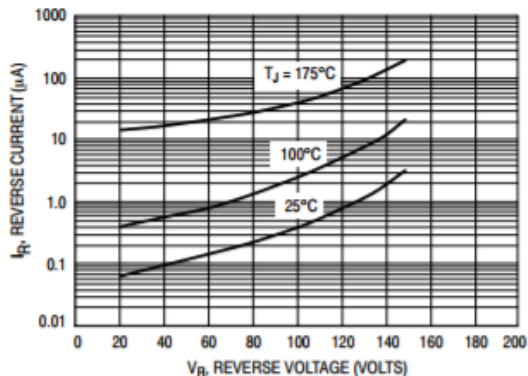


Figure 2. Typical Reverse Current*

* The curves shown are typical for the highest voltage device in the grouping. Typical reverse current for lower voltage selections can be estimated from these same curves if V_R is sufficiently below rated V_R .

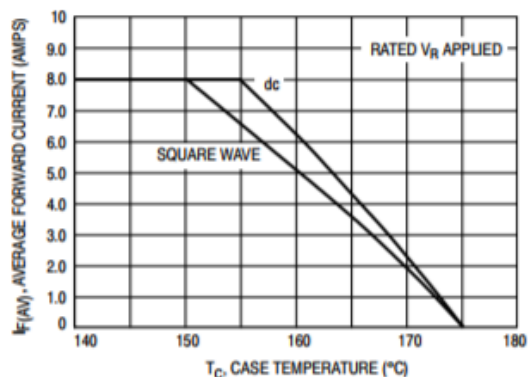


Figure 3. Current Derating, Case

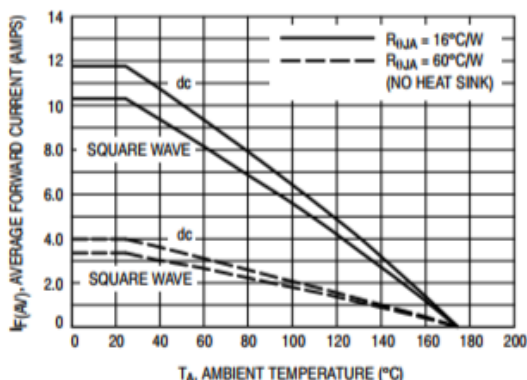


Figure 4. Current Derating, Ambient

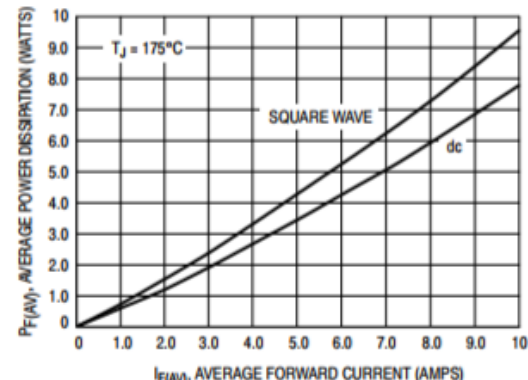


Figure 5. Power Dissipation

MUR805, MUR810, MUR815, MUR820, MUR840, MUR860

MUR840

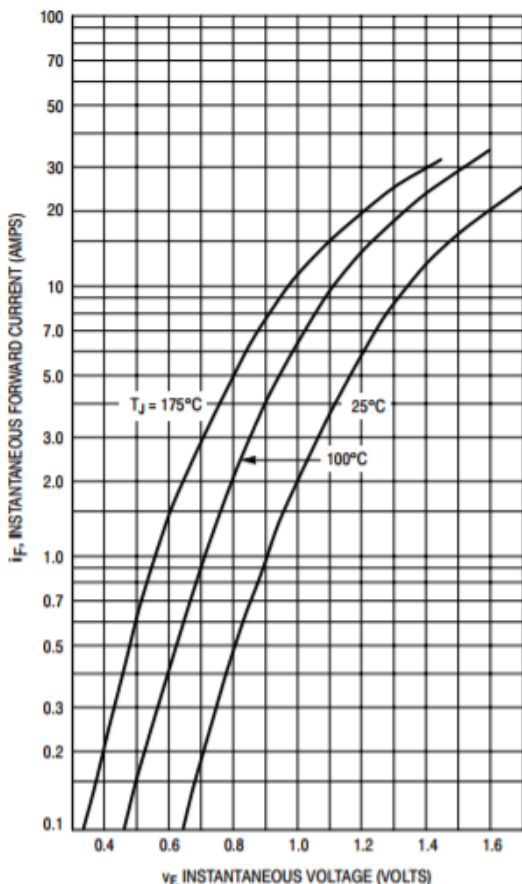


Figure 6. Typical Forward Voltage

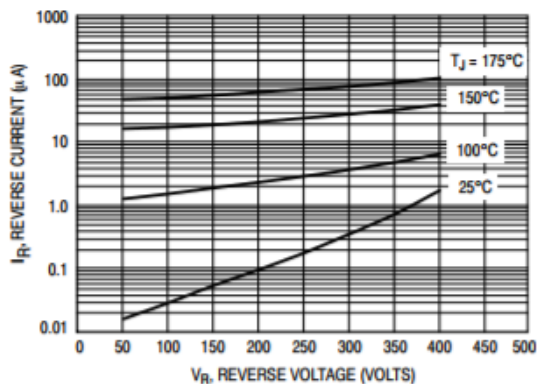


Figure 7. Typical Reverse Current*

* The curves shown are typical for the highest voltage device in the grouping. Typical reverse current for lower voltage selections can be estimated from these same curves if V_R is sufficiently below rated V_R .

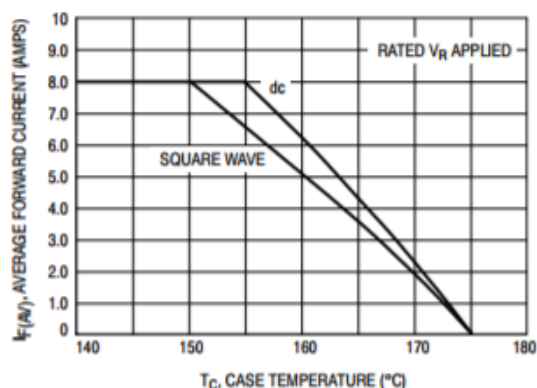


Figure 8. Current Derating, Case

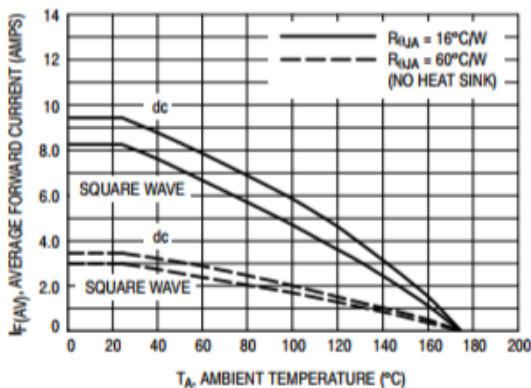


Figure 9. Current Derating, Ambient

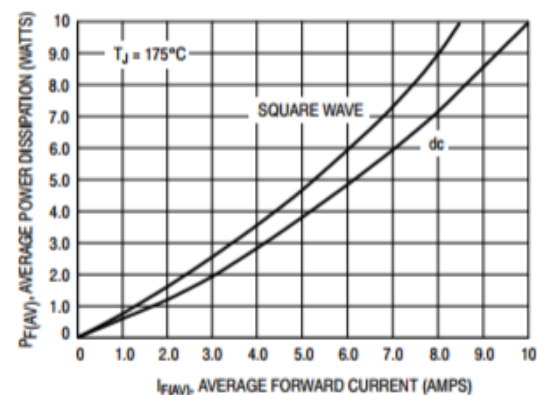


Figure 10. Power Dissipation

MUR805, MUR810, MUR815, MUR820, MUR840, MUR860

MUR860

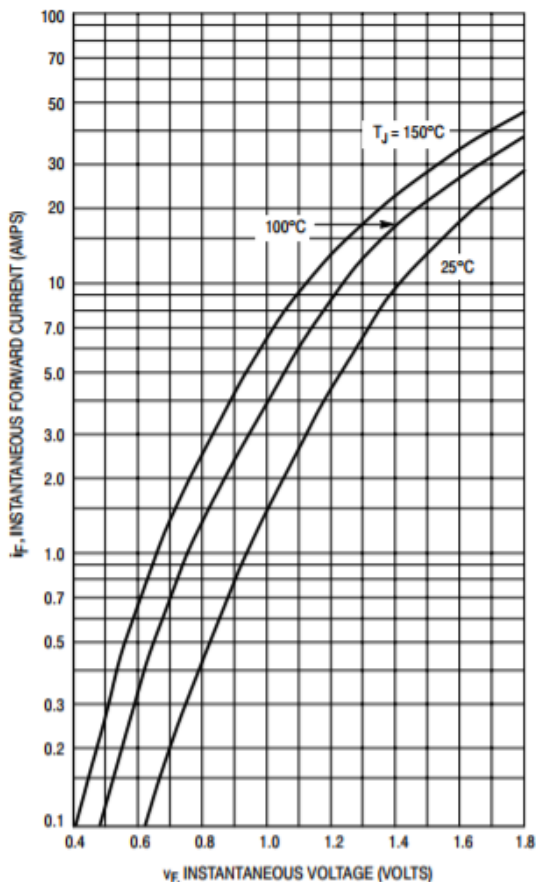


Figure 11. Typical Forward Voltage

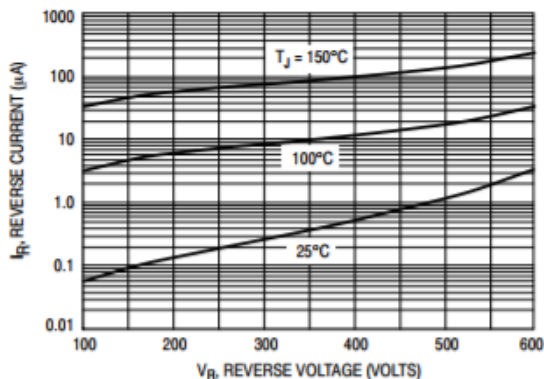


Figure 12. Typical Reverse Current*

* The curves shown are typical for the highest voltage device in the grouping. Typical reverse current for lower voltage selections can be estimated from these same curves if V_R is sufficiently below rated V_R .

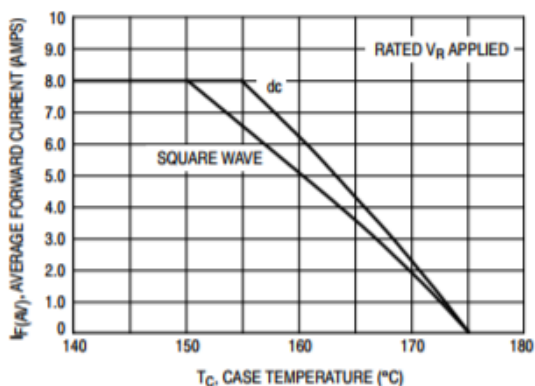


Figure 13. Current Derating, Case

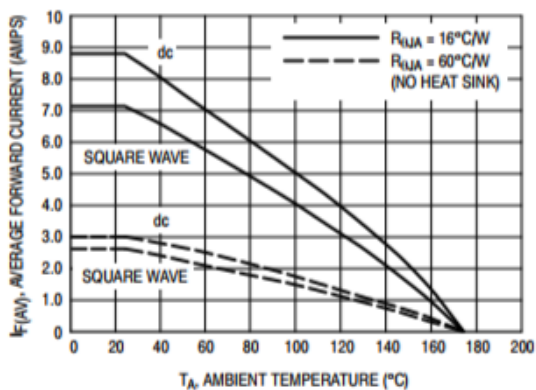


Figure 14. Current Derating, Ambient

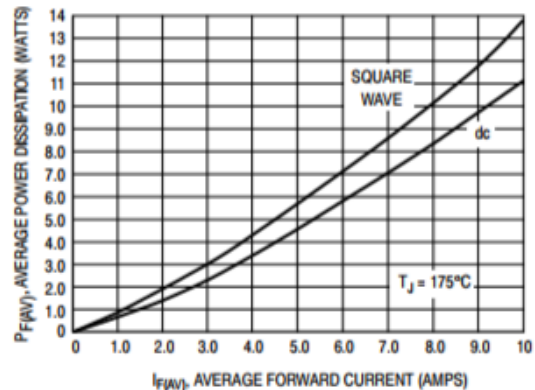


Figure 15. Power Dissipation

MUR805, MUR810, MUR815, MUR820, MUR840, MUR860

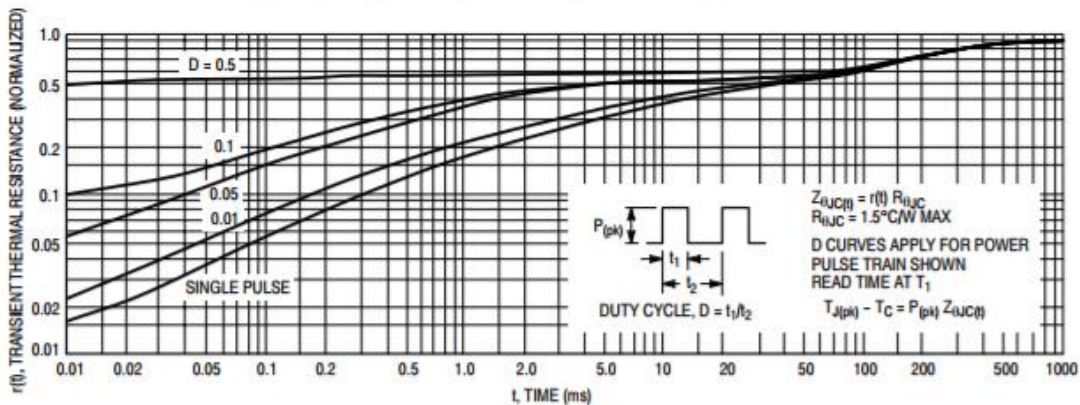


Figure 16. Thermal Response

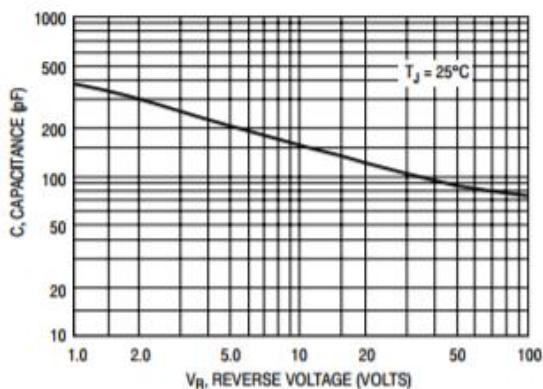
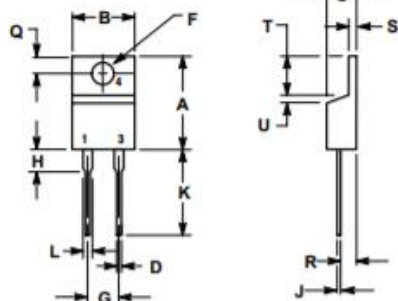


Figure 17. Typical Capacitance

MUR805, MUR810, MUR815, MUR820, MUR840, MUR860

PACKAGE DIMENSIONS

TO-220 TWO-LEAD
CASE 221B-04
ISSUE D



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

| DIM | INCHES | | MILLIMETERS | |
|-----|--------|-------|-------------|-------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX |
| A | 0.595 | 0.620 | 15.11 | 15.75 |
| B | 0.380 | 0.405 | 9.65 | 10.29 |
| C | 0.150 | 0.190 | 4.06 | 4.82 |
| D | 0.025 | 0.035 | 0.64 | 0.89 |
| F | 0.142 | 0.147 | 3.61 | 3.73 |
| G | 0.190 | 0.210 | 4.83 | 5.33 |
| H | 0.110 | 0.130 | 2.79 | 3.30 |
| J | 0.018 | 0.025 | 0.46 | 0.64 |
| K | 0.500 | 0.562 | 12.70 | 14.27 |
| L | 0.045 | 0.050 | 1.14 | 1.52 |
| Q | 0.100 | 0.120 | 2.54 | 3.04 |
| R | 0.080 | 0.110 | 2.04 | 2.79 |
| S | 0.045 | 0.055 | 1.14 | 1.39 |
| T | 0.235 | 0.255 | 5.97 | 6.48 |
| U | 0.050 | 0.050 | 0.900 | 1.27 |



SEALED LEAD ACID CALCIUM BATTERY DATA SHEET

HGL7.0-12



Applications:

- UPS power systems
- Portable Electronic Instruments
- Emergency Lighting Systems
- Mining Search Light Products
- Portable Camping Equipments
- Remote Scientific Instruments

Electrical Specification

| Capacity | Load | Duration | Final Voltage |
|---------------------------------------|-------|----------|---------------|
| Rated Capacity @ 25 °C (77 °F) | | | |
| 7.00Ah | 0.35A | 20 Hours | 10.50V |
| 6.51Ah | 0.65A | 10 Hours | 10.20V |
| 5.95Ah | 1.19A | 5 Hours | 10.02V |
| 4.20Ah | 4.20A | 1 Hour | 9.60V |
| 3.50Ah | 7.00A | 0.5 Hour | 9.00V |

Physical Specification

| Length | Width | Height | Overall Height |
|--|---------|---------|----------------|
| 5.94 in | 2.56 in | 3.70 in | 3.86 in |
| 151 mm | 65 mm | 94 mm | 98 mm |
| Internal Resistance@25°C Fully Charged | | | 19 mΩ |

Weight: 2.64 Kg.
Case Material: ABS Resin

Capacity ~ Temperature

| 104°F(40°C) | 77°F(25°C) | 32°F(0°C) | 5°F(-15°C) |
|-------------|------------|-----------|------------|
| 102% | 100% | 85% | 65% |

Self Discharge

| 4 Mo. 20°C | 8 Mo. 20°C | 4 Mo. 30°C | 8 Mo. 30°C |
|------------|------------|------------|------------|
| 14% | 26% | 24% | 40% |

Charging - Constant Voltage

| @25°C (77°F) | Standby Usage: | Cyclic Usage: |
|-----------------------|----------------|---------------|
| Voltage | 13.6 ~ 13.8V | 14.4 ~ 14.8V |
| Current | 0.70~0.88A | 0.70~0.88A |
| Current (max.) | N/A | 1.40A |

Life Expectancy

| Standby Usage: | @25 °C | 3 - 4 Years |
|----------------------|-----------------|----------------------|
| Cyclic Usage: | 100% Discharged | 200 ~ 250 Cycles |
| | 50% Discharged | 500 ~ 600 Cycles |
| | 30% Discharged | 1,100 ~ 1,200 Cycles |

TLP250

Transistor Inverter

Inverter For Air Conditioner

IGBT Gate Drive

Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.

This unit is 8-lead DIP package.

TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\text{--}35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $0.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500V_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option(D4)

VDE Approved : DIN EN60747-5-2

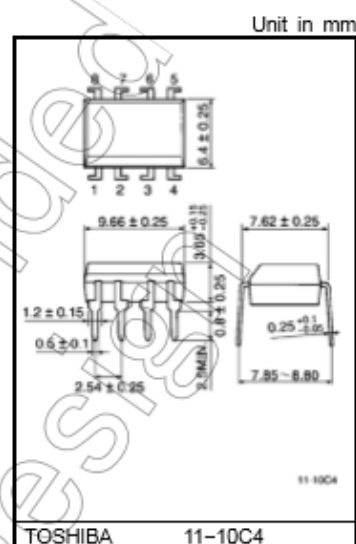
Maximum Operating Insulation Voltage : $890V_{\text{PK}}$

Highest Permissible Over Voltage : $4000V_{\text{PK}}$

(Note):When a EN60747-5-2 approved type is needed,
Please designate "Option(D4)"

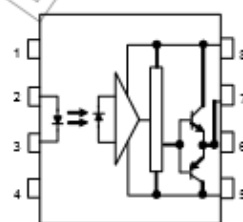
Truth Table

| Input LED | Tr1 | | Tr2 |
|-----------|-----|----|-----|
| | On | On | Off |
| Off | Off | On | |



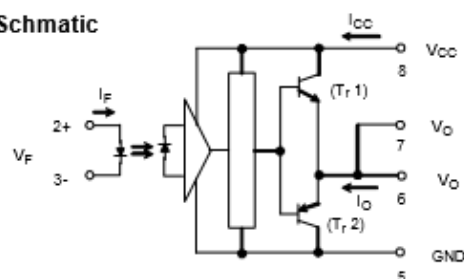
Weight: 0.54 g (typ.)

Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C. 5 : GND
2 : Anode 6 : V_O (Output)
3 : Cathode 7 : V_O
4 : N.C. 8 : V_{CC}

Schematic



A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

| Characteristic | | Symbol | Rating | Unit | |
|---|---|------------------------------|----------|---------|------|
| LED | Forward current | I_F | 20 | mA | |
| | Forward current derating (Ta ≥ 70°C) | $\Delta I_F / \Delta T_a$ | -0.36 | mA / °C | |
| | Peak transient forward current (Note 1) | I_{FPT} | 1 | A | |
| | Reverse voltage | V_R | 5 | V | |
| | Junction temperature | T_j | 126 | °C | |
| Detector | *H*peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$) (Note 2) | I_{OPH} | -1.5 | A | |
| | *L*peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$) (Note 2) | I_{OPL} | +1.5 | A | |
| | Output voltage | (Ta ≤ 70°C) | V_O | 35 | V |
| | | (Ta = 85°C) | | 24 | |
| | Supply voltage | (Ta ≤ 70°C) | V_{CC} | 35 | V |
| | | (Ta = 85°C) | | 24 | |
| | Output voltage derating (Ta ≥ 70°C) | $\Delta V_O / \Delta T_a$ | -0.73 | V / °C | |
| | Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C) | $\Delta V_{CC} / \Delta T_a$ | -0.73 | V / °C | |
| | Junction temperature | T_j | 125 | °C | |
| | Operating frequency (Note 3) | f | 25 | kHz | |
| Operating temperature range | T_{opr} | -20~85 | | | °C |
| Storage temperature range | T_{stg} | -55~125 | | | °C |
| Lead soldering temperature (10 s) | T_{sol} | 260 | | | °C |
| Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 4) | BV_S | 2500 | | | Vrms |

Note: Using continuously under heavy loads (e.g. the application of high temperature/current/voltage and the significant change in temperature, etc.) may cause this product to decrease in the reliability significantly even if the operating conditions (i.e. operating temperature/current/voltage, etc.) are within the absolute maximum ratings.

Please design the appropriate reliability upon reviewing the Toshiba Semiconductor Reliability Handbook ("Handling Precautions"/"Derating Concept and Methods") and individual reliability data (i.e. reliability test report and estimated failure rate, etc.).

Note 1: Pulse width $P_W \leq 1\mu s$, 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform, $I_{OPH} \leq -1.0A$ ($\leq 2.5\mu s$), $I_{OPL} \leq +1.0A$ ($\leq 2.5\mu s$)

Note 4: Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 5: A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

| Characteristic | Symbol | Min | Typ. | Max | Unit |
|----------------------------|-------------------|-----|------|---------|------|
| Input current, on (Note 6) | $I_{F(ON)}$ | 7 | 8 | 10 | mA |
| Input voltage, off | $V_{F(OFF)}$ | 0 | — | 0.8 | V |
| Supply voltage | V_{CC} | 15 | — | 30 20 | V |
| Peak output current | I_{OPH}/I_{OPL} | — | — | ±0.5 | A |
| Operating temperature | T_{opr} | -20 | 25 | 70 85 | °C |

Note: Recommended operating conditions are given as a design guideline to obtain expected performance of the device. Additionally, each item is an independent guideline respectively. In developing designs using this product, please confirm specified characteristics shown in this document.

Note 6: Input signal rise time(fall time) $<0.5\mu s$.

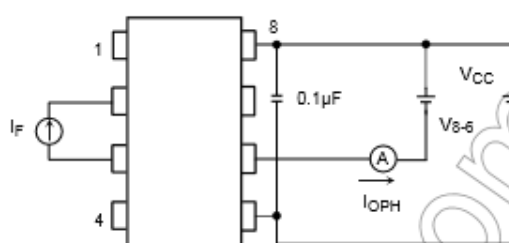
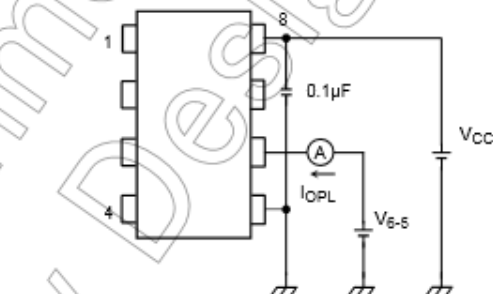
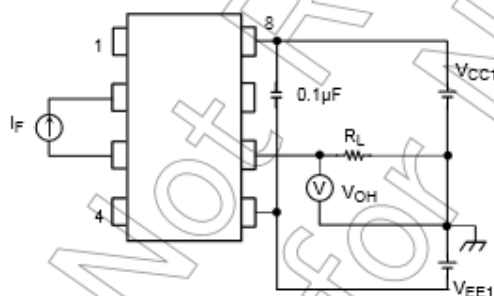
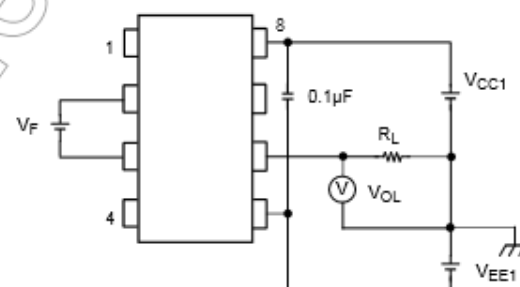
Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

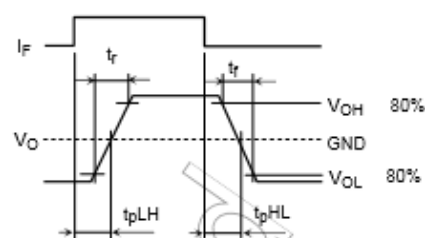
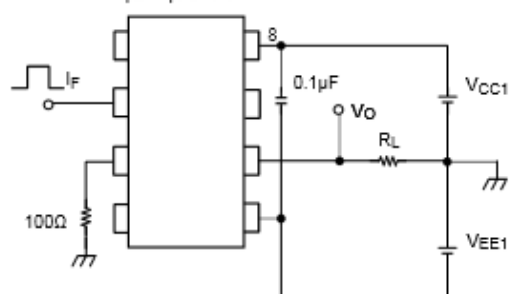
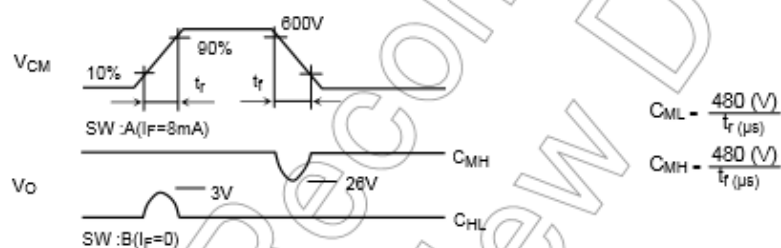
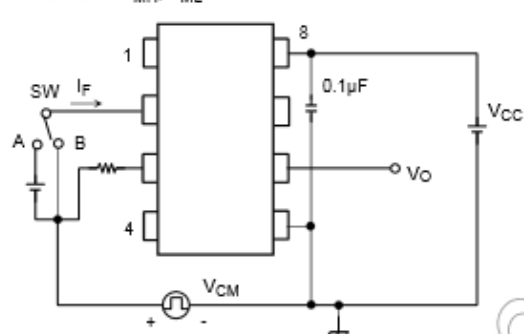
| Characteristic | | Symbol | Test Circuit | Test Condition | Min | Typ.* | Max | Unit |
|--|--------------|-----------------------|--------------|--|---|------------------|-------|---------|
| Input forward voltage | | V _F | — | I _F = 10 mA, Ta = 25°C | — | 1.6 | 1.8 | V |
| Temperature coefficient of forward voltage | | ΔV _F / ΔTa | — | I _F = 10 mA | — | -2.0 | — | mV / °C |
| Input reverse current | | I _R | — | V _R = 5V, Ta = 25°C | — | — | 10 | μA |
| Input capacitance | | C _T | — | V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C | — | 45 | 250 | pF |
| Output current | "H" level | I _{OPH} | 1 | V _{CC} = 30V (*1) | I _F = 10 mA V _{S-6} = 4V | -0.5 | -1.5 | A |
| | "L" level | I _{OPL} | 2 | | I _F = 0 V _{S-5} = 2.5V | 0.5 | 2 | |
| Output voltage | "H" level | V _{OH} | 3 | V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA | 11 | 12.8 | — | V |
| | "L" level | V _{OL} | 4 | V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V | — | -14.2 | -12.5 | |
| Supply current | "H" level | I _{CCH} | — | V _{CC} = 30V, I _F = 10mA Ta = 25°C | — | 7 | — | mA |
| | | | | V _{CC} = 30V, I _F = 10mA | — | — | 11 | |
| | "L" level | I _{CCL} | — | V _{CC} = 30V, I _F = 0mA Ta = 25°C | — | 7.5 | — | |
| | | | | V _{CC} = 30V, I _F = 0mA | — | — | 11 | |
| Threshold input current | "Output L→H" | I _{FLH} | — | V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O ≥ 0V | — | 1.2 | 5 | mA |
| Threshold input voltage | "Output H→L" | V _{FHL} | — | V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O < 0V | 0.8 | — | — | V |
| Supply voltage | | V _{CC} | — | | 10 | — | 35 | V |
| Capacitance (input-output) | | C _S | — | V _S = 0, f = 1MHz Ta = 25°C | — | 1.0 | 2.0 | pF |
| Resistance(input-output) | | R _S | — | V _S = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60% | 1×10 ¹² | 10 ¹⁴ | — | Ω |

* All typical values are at Ta = 25°C (*1): Duration of IO time ≤ 50μs

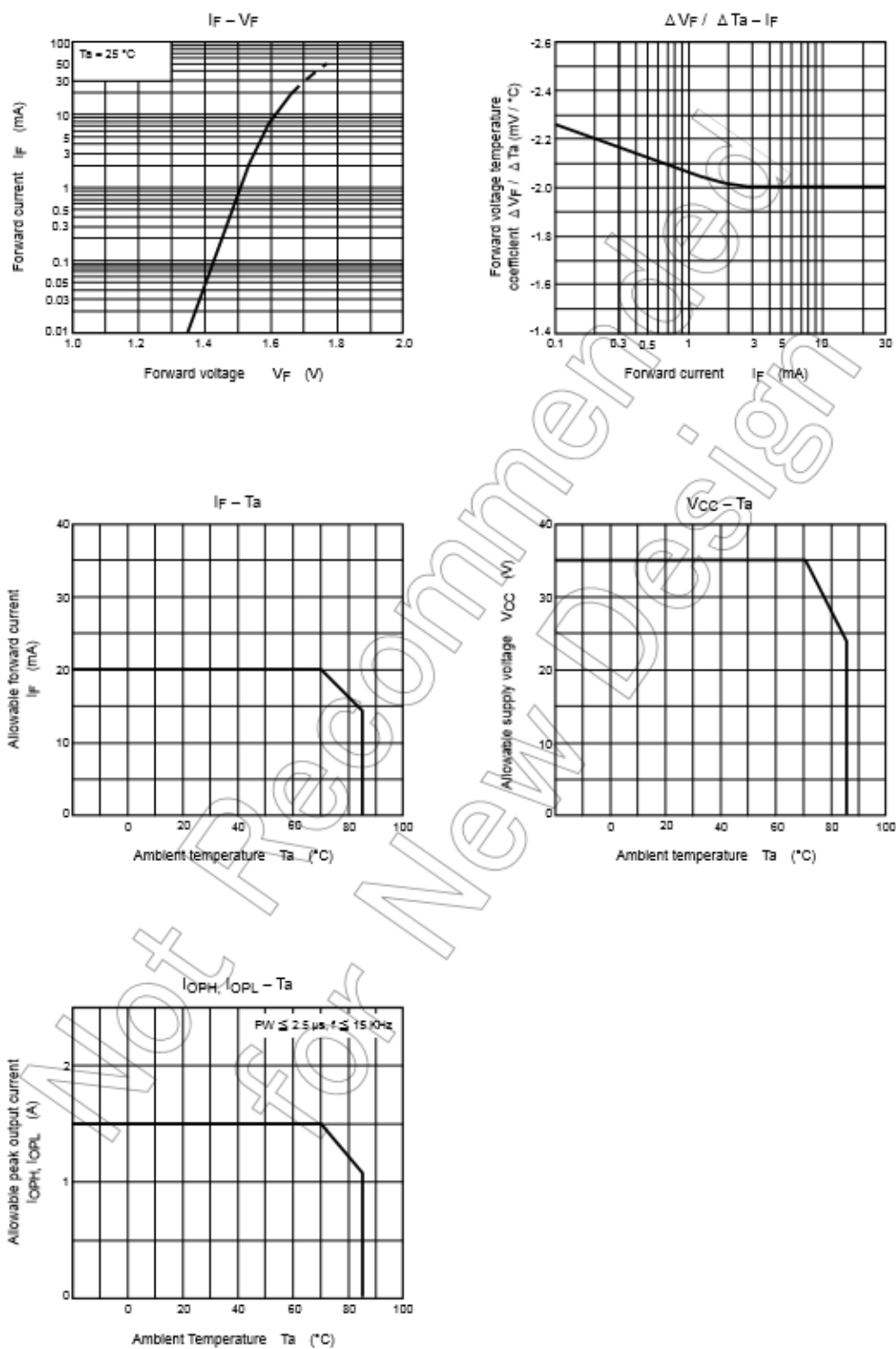
Switching Characteristics ($T_a = -20\sim 70^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)

| Characteristic | Symbol | Test Circuit | Test Condition | Min | Typ.* | Max | Unit |
|---|----------|--------------|---|-------|-------|-----|--------------------------|
| Propagation delay time | L→H | t_{pLH} | $I_F = 8\text{mA}$ $V_{CC1} = +15\text{V}$, $V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$ | — | 0.15 | 0.5 | μs |
| | H→L | t_{pHL} | | — | 0.15 | 0.5 | |
| Output rise time | t_r | | | — | — | — | |
| Output fall time | t_f | | | — | — | — | |
| Common mode transient immunity at high level output | C_{MH} | 6 | $V_{CM} = 800\text{V}$, $I_F = 8\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$ | -5000 | — | — | $\text{V} / \mu\text{s}$ |
| Common mode transient immunity at low level output | C_{ML} | | $V_{CM} = 800\text{V}$, $I_F = 0\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$ | 5000 | — | — | $\text{V} / \mu\text{s}$ |

All typical values are at $T_a = 25^\circ\text{C}$ Test Circuit 1 : I_{OPH} Test Circuit 2 : I_{OPL} Test Circuit 3 : V_{OH} Test Circuit 4 : V_{OL} 

Test Circuit 5: t_{pLH} , t_{pHL} , t_r , t_f Test Circuit 6: C_{MH} , C_{ML} 

$C_{ML}(C_{MH})$ is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.



RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

- Toshiba Corporation, and its subsidiaries and affiliates (collectively "TOSHIBA"), reserve the right to make changes to the information in this document, and related hardware, software and systems (collectively "Product") without notice.
- This document and any information herein may not be reproduced without prior written permission from TOSHIBA. Even with TOSHIBA's written permission, reproduction is permissible only if reproduction is without alteration/omission.
- Though TOSHIBA works continually to improve Product's quality and reliability, Product can malfunction or fail. Customers are responsible for complying with safety standards and for providing adequate designs and safeguards for their hardware, software and systems which minimize risk and avoid situations in which a malfunction or failure of Product could cause loss of human life, bodily injury or damage to property, including data loss or corruption. Before creating and producing designs and using, customers must also refer to and comply with (a) the latest versions of all relevant TOSHIBA information, including without limitation, this document, the specifications, the data sheets and application notes for Product and the precautions and conditions set forth in the "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" and (b) the instructions for the application that Product will be used with or for. Customers are solely responsible for all aspects of their own product design or applications, including but not limited to (a) determining the appropriateness of the use of this Product in such design or applications; (b) evaluating and determining the applicability of any information contained in this document, or in charts, diagrams, programs, algorithms, sample application circuits, or any other referenced documents; and (c) validating all operating parameters for such designs and applications. **TOSHIBA ASSUMES NO LIABILITY FOR CUSTOMERS' PRODUCT DESIGN OR APPLICATIONS.**
- Product is intended for use in general electronics applications (e.g., computers, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robots and home electronics appliances) or for specific applications as expressly stated in this document. Product is neither intended nor warranted for use in equipment or systems that require extraordinarily high levels of quality and/or reliability and/or a malfunction or failure of which may cause loss of human life, bodily injury, serious property damage or serious public impact ("Unintended Use"). Unintended Use includes, without limitation, equipment used in nuclear facilities; equipment used in the aerospace industry, medical equipment, equipment used for automobiles, trains, ships and other transportation, traffic signaling equipment, equipment used to control combustions or explosions, safety devices, elevators and escalators, devices related to electric power, and equipment used in finance-related fields. Do not use Product for Unintended Use unless specifically permitted in this document.
- Do not disassemble, analyze, reverse-engineer, alter, modify, translate or copy Product, whether in whole or in part.
- Product shall not be used for or incorporated into any products or systems whose manufacture, use, or sale is prohibited under any applicable laws or regulations.
- The information contained herein is presented only as guidance for Product use. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringement of patents or any other intellectual property rights of third parties that may result from the use of Product. No license to any intellectual property right is granted by this document, whether express or implied, by estoppel or otherwise.
- **ABSENT A WRITTEN SIGNED AGREEMENT, EXCEPT AS PROVIDED IN THE RELEVANT TERMS AND CONDITIONS OF SALE FOR PRODUCT, AND TO THE MAXIMUM EXTENT ALLOWABLE BY LAW, TOSHIBA (1) ASSUMES NO LIABILITY WHATSOEVER, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, INDIRECT, CONSEQUENTIAL, SPECIAL, OR INCIDENTAL DAMAGES OR LOSS, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, LOSS OF PROFITS, LOSS OF OPPORTUNITIES, BUSINESS INTERRUPTION AND LOSS OF DATA, AND (2) DISCLAIMS ANY AND ALL EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AND CONDITIONS RELATED TO SALE, USE OF PRODUCT, OR INFORMATION, INCLUDING WARRANTIES OR CONDITIONS OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ACCURACY OF INFORMATION, OR NONINFRINGEMENT.**
- GaAs (Gallium Arsenide) is used in Product. GaAs is harmful to humans if consumed or absorbed, whether in the form of dust or vapor. Handle with care and do not break, cut, crush, grind, dissolve chemically or otherwise expose GaAs in Product.
- Do not use or otherwise make available Product or related software or technology for any military purposes, including without limitation, for the design, development, use, stockpiling or manufacturing of nuclear, chemical, or biological weapons or missile technology products (mass destruction weapons). Product and related software and technology may be controlled under the Japanese Foreign Exchange and Foreign Trade Law and the U.S. Export Administration Regulations. Export and re-export of Product or related software or technology are strictly prohibited except in compliance with all applicable export laws and regulations.
- Please contact your TOSHIBA sales representative for details as to environmental matters such as the RoHS compatibility of Product. Please use Product in compliance with all applicable laws and regulations that regulate the inclusion or use of controlled substances, including without limitation, the EU RoHS Directive. TOSHIBA assumes no liability for damages or losses occurring as a result of noncompliance with applicable laws and regulations.

การออกแบบและการสร้างระบบพัลส์ดีซีผ่านการควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW

Design and construction pulsed-DC system controlled by LabVIEW program

อานันท์ กังวาลไกล¹ อภาภรณ์ สกฤตการะเวก² ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ³ วิชิต ศิริโชติ⁴

บทคัดย่อ

ระบบพัลส์ดีซีเป็นที่ยอมรับสำหรับใช้ในกระบวนการรีแอคทีฟแมกเนตรอนสปัตเตอริง เนื่องจากฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอ มีคุณภาพสูง และให้อัตราในการเคลือบที่สูงกว่าระบบ AC ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจำลองวงจรพัลส์ดีซีด้วยโปรแกรม OrCAD Pspice ระบบพัลส์ดีซีถูกควบคุมโดยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งสามารถปรับสัญญาณพัลส์โดยอัตโนมัติ ส่วนประกอบหลักของระบบพัลส์ดีซีประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดไฟฟ้า กระแสตรงวงจรสวิตช์เอชบริดจ์ และ NI myDAQ จากนั้นได้ทำการทดสอบการใช้งานระบบที่สร้างเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองพัลส์จากโปรแกรม ซึ่งระบบได้ถูกทดสอบและเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองโดยตัวแปรในการทดสอบคือความถี่ในช่วง 10 เฮิร์ต ถึง 10 กิโลเฮิร์ต พัลส์แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์และ % Duty cycle ระหว่าง 10-40 % พบว่าระบบนี้มีประสิทธิภาพสำหรับการสร้างสัญญาณพัลส์ดีซีซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลอง

ABSTRACT

Pulsed-DC system is established for reactive magnetron sputtering process because of their film uniformity, high quality and better deposition rate than AC system. In this work, the pulsed-dc circuit was designed and simulated with OrCAD Pspice program. The system was controlled via by LabVIEW program which could adjust the pulsed-signal automatically. The components of pulsed-dc system consist of DC power supply, H-bridge switch circuit and NI myDAQ. The system was tested and compared with the simulation results. Test parameters were frequency range of 10 Hz – 10 kHz, voltage pulse of 30 V, and duty cycle between 10 – 40 %. We found that the system is efficient to generate pulsed DC signal which is consistent to simulation results.

คำสำคัญ: ระบบพัลส์ดีซี โปรแกรมแล็บวิว

Keywords: Pulsed-DC system LabVIEW program

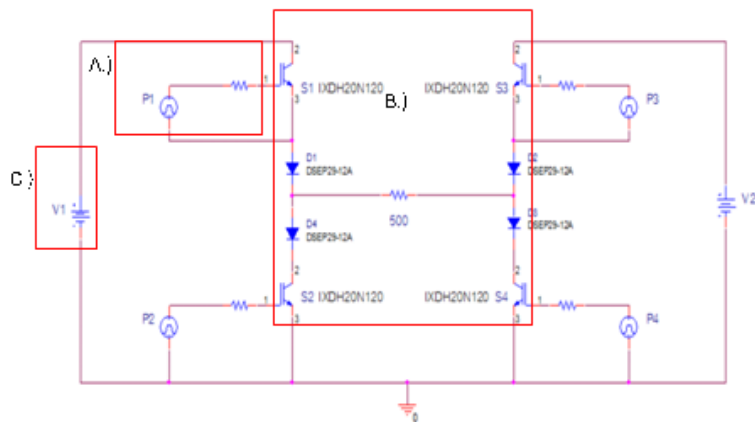
บทนำ

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพัลส์ดีซีที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปใช้สำหรับกระบวนการรีแอคทีฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง เนื่องจากระบบพัลส์ดีซีมีอัตราการเคลื่อนที่สูงกว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้า AC พัลส์ที่ได้มีคุณภาพสูงและลดปัญหาการอาร์คซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายบริเวณสวารเคลือบ [1] ดังนั้นจึงได้รับความนิยมใช้ในการวิจัย เทคโนโลยีการเคลือบแข็งและฟิล์มบางสวารกึ่งตัวนำรวมถึงในงานอุตสาหกรรม เช่น โบรอนคาไบด์ (B_4C) โครเมียมไนไตรด์/ไททาเนียมไนไตรด์ (CrN/TiN) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นต้น [2-4] ซึ่งจากงานวิจัยของคุณวิระศักดิ์ ชอมขุนทด [5] ได้ทำการสร้างระบบพัลส์ดีซีสองขั้วโดยวงจรสวิตช์โดย power mosfet 2 ตัว เป็นสวิตช์ และใช้วงจรกำเนิดพัลส์แบบดิจิตอลผ่านวงจรมีลติเพล็กซ์เซอร์แบบ 1 input 8 output เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์เอทพุต 2 สัญญาณในการขับเคลื่อน ซึ่งผลที่ได้ คือ ช่วงความกว้างของพัลส์ตั้งแต่ 10 ถึง 100 ไมโครวินาที ความถี่สูงสุด 30 กิโลเฮิร์ตและแรงดันไฟฟ้าด้านลบและด้านบวกรวมสูงสุด 1250 โวลต์

แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบวงจรไฟฟ้าผ่านโปรแกรมและทำการจำลองสัญญาณที่ได้ผ่านโปรแกรม OrCAD Pspice เพื่อตรวจสอบปัญหาและข้อจำกัดเบื้องต้นของวงจรก่อนทำการสร้างระบบพัลส์ดีซีรวมทั้งเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองสัญญาณพัลส์กับการทดสอบระบบพัลส์ดีซีที่สร้าง โดยระบบพัลส์ดีซีสร้างขึ้นได้ทดสอบในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 เฮิร์ต ถึง 10 กิโลเฮิร์ต คาบเวลาของพัลส์สัญญาณอยู่ในช่วง 10 ไมโครวินาที ถึง 40 มิลลิวินาที โดยระบบพัลส์ที่สร้างขึ้นจะควบคุมผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW และนำตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์ NI myDAQ เข้ามาใช้งานร่วมกับโปรแกรม เพื่อลดส่วนวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์หลาย ๆ ส่วน ซึ่งง่ายต่อการตรวจสอบกรณีเกิดปัญหากับระบบ นอกจากนั้นผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงการใช้งานระบบพัลส์ดีซีผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

1. การออกแบบและการจำลองระบบพัลส์ดีซี



A.) ตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์ B.) วงจรสวิตช์เอชบริดจ์ C.) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบพัลส์ดีซีได้ถูกออกแบบวงจรผ่านโปรแกรม OrCAD Pspice ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับจำลองวงจรไฟฟ้ารวมถึงการตรวจสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรที่ออกแบบขึ้น จากรูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบพัลส์ดีซี ประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่สำคัญได้แก่

ระบบพัลส์ดีซีได้ถูกออกแบบวงจรผ่านโปรแกรม OrCAD Pspice ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับจำลองวงจรไฟฟ้ารวมไปถึงการตรวจสอบสัญญาณที่ได้จากวงจรที่ออกแบบขึ้น จากรูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบต่างๆของระบบพัลส์ดีซี ประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่สำคัญได้แก่

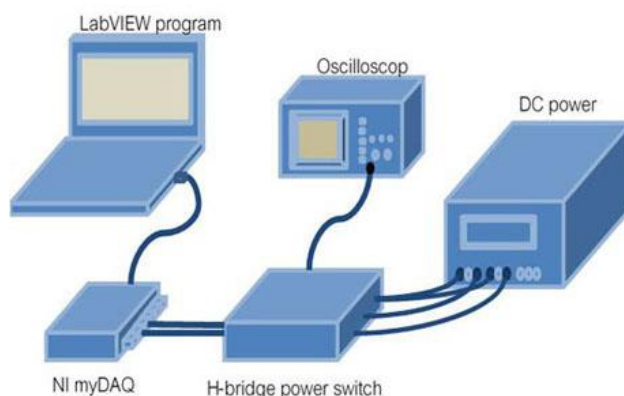
A.) ตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์ มีทั้งหมด 4 ตัว โดยแบ่งเป็นสองชุดคือ P1 กับ P4 (เกิดสัญญาณพร้อมกัน) และ P2 กับ P3 (เกิดสัญญาณพร้อมกัน) ซึ่งทั้งสองชุดเกิดสัญญาณพัลส์ห่างกันครึ่งคาบเวลาหรือเฟสของพัลส์ต่างกัน 180 องศา และมีตัวแปรในการควบคุมพัลส์ของโปรแกรมซึ่งประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น (V1; Volts) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V2; Volts) ค่าหน่วงเวลา (TD; seconds) ช่วงเวลาขอบขาขึ้นของพัลส์ (TR; seconds) ช่วงเวลาขอบขาลงของพัลส์ (TF; seconds) ความกว้างของพัลส์ (PW; seconds) และสุดท้ายคาบเวลา (PER; seconds) โดยส่วนนี้จะเปรียบเหมือนตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ขั้วเกต IGBT ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิทช์ในระบบพัลส์ดีซี

B.) วงจรสวิทช์ไอชบริดจ์ใช้ IGBT เบอร์ IXDH20N120D1 เป็นสวิทช์ให้กับวงจรโดยมีจำนวนทั้งหมด 4 ตัว เมื่อกำหนดให้เกิดสัญญาณพัลส์ที่สวิทช์ซ้ายบน (S1) และล่างขวา (S4) จะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างโหนดเป็นฝั่งบวก จากนั้นให้สัญญาณพัลส์ที่สวิทช์ซ้ายบน (S1) และล่างซ้าย (S4) หยุดลง ขณะที่ให้เกิดสัญญาณพัลส์ที่สวิทช์ขวาบน (S3) และล่างขวา (S2) จะทำให้แรงดันตกคร่อมเป็นฝั่งลบระหว่างโหนดของระบบ (ตัวต้านทานขนาด 500 โอห์ม)

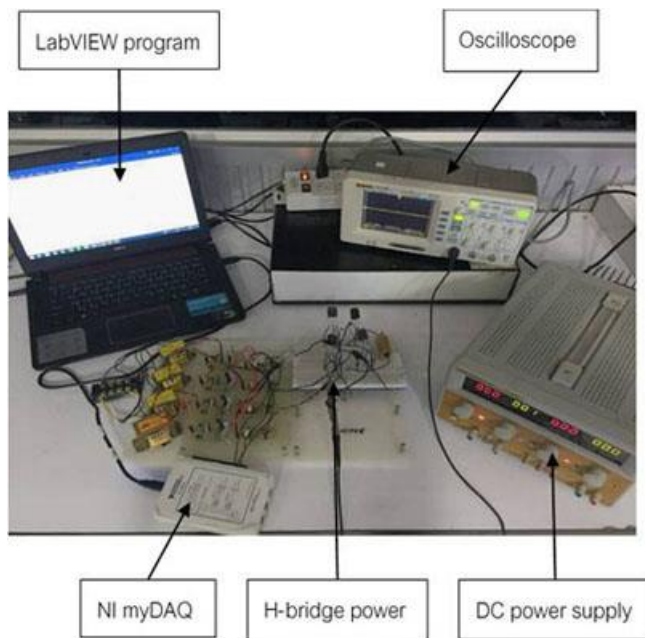
C.) แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ในส่วนของนี้จะถูกแบ่งเป็นสองแหล่งคือ V1 และ V2 เพื่อต้องการใช้สำหรับกรณีที่ต้องการสัญญาณพัลส์สองขั้วแบบไม่สมมาตร โดย V1 ใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าฝั่งบวกและ V2 ใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าฝั่งลบให้กับโหลด นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าทั้งสองฝั่งรวมกันต้องมีค่าไม่เกิน 1200 โวลต์ ซึ่งเป็นขีดจำกัดของ IGBT เบอร์ IXDH20N120D1

2. การสร้างระบบพัลส์ดีซี

จากรูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงแผนภาพของระบบและภาพของระบบจริงที่ได้สร้างขึ้น ตามลำดับ โดยประกอบด้วยส่วนโปรแกรมควบคุม (NI LabVIEW) เชื่อมต่อกับ NI myDAQ โดยส่งสัญญาณพัลส์เพื่อขับขาเกตของสวิทช์กำลังที่มีการให้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และสุดท้ายคือตรวจสอบสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าด้วยเครื่องดิจิตอลออสซิลอโคป RIGOL DS1102D โดยแสดงรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2 แผนภาพระบบพัลส์ดีซี



รูปที่ 3 ต้นแบบระบบพัลส์ดีซี

2.1. ตัวกำเนิดสัญญาณ NI myDAQ และโปรแกรม LabVIEW ควบคุมตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์

NI myDAQ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW มีความสามารถในการวัดสัญญาณต่างๆ รวมถึงเป็นตัวกำเนิดสัญญาณ โดยการเชื่อมต่อกับโปรแกรม LabVIEW และรับข้อมูลจากโปรแกรม LabVIEW ผ่านสาย USB จากนั้น NI myDAQ จะทำการส่งสัญญาณพัลส์ออกมาทางช่อง Analog Output ทั้งสองช่อง คือ AO (0) และ AO (1) หรือเรียกได้ว่า NI myDAQ เป็นตัวแสดงเอาต์พุตของโปรแกรม LabVIEW โดยในงานนี้ได้นำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์ (จำกัดที่ 20 kHz) จากการควบคุมโดยโปรแกรมของเรา

ในส่วนของการควบคุมสัญญาณพัลส์ของระบบพัลส์ดีซี ได้เลือกใช้โปรแกรม LabVIEW เชื่อมต่อกับตัวกำเนิดสัญญาณ NI myDAQ เนื่องจากโปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ผู้ใช้งานระบบเข้าถึงได้ง่ายทำให้สะดวกต่อการใช้งานและแก้ไขในภายหลัง โดยเราจะเขียนโปรแกรมผ่านหน้าต่าง Front panel ซึ่งเป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมกับผู้ใช้โปรแกรม ซึ่งทำการสร้างโปรแกรมจากการนำอุปกรณ์แต่ละชิ้นมาเชื่อมต่อกันเป็นจนได้แผนผังทั้งหมดของระบบ จากนั้นตัวอุปกรณ์ที่เราสร้างขึ้นทั้งหมดจะถูกนำไปแสดงไว้ในหน้าต่าง Control panel ที่เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมกับผู้ใช้โปรแกรม LabVIEW

2.2. วงจรสวิตช์ไอชบริดจ์

สวิตช์ของระบบใช้ตัว IGBT เบอร์ IXDH20N120D1 ที่ในตัวมันมีการเพิ่มไดโอดเข้ามาด้วย และต่อวงจรเป็นสวิตช์ไอชบริดจ์ที่ใช้ IGBT ทั้งหมด 4 ตัว โดยควบคุมสัญญาณให้พัลส์ให้สวิตช์เป็นคู่ นอกจากนั้นใช้วงจรขับเคลื่อนเป็นแบบแยกกราวด์เพื่อลดความเสียหายในระบบบางส่วนเมื่อเกิดการช็อตของระบบ และมีไดโอดช่วยในการเรียงกระแสให้กับวงจรสวิตช์ 4 ตัว โดยไหลจะถูกต่อเข้ากับวงจรสวิตช์บริเวณรอยต่อของสวิตช์ IGBT บนและล่างทั้งสองด้าน

2.3. ออสซิลโลสโคป

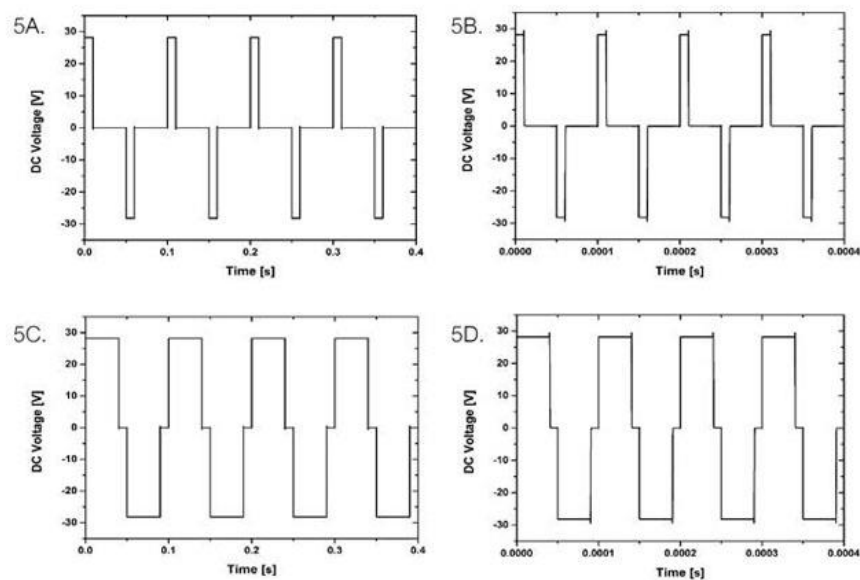
ออกซิไลสโคปที่ใช้ในการทดลองมีช่วงความถี่ต่อเนื่องสูงสุด 100 เมกะเฮิร์ต ช่วงความถี่แบบ Single-shot สูงสุด 80 เมกะเฮิร์ตและสามารถทนแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสูงสุด 300 โวลต์ (RMS) นอกจากนั้นสามารถตรวจวัดสัญญาณได้ทั้งพัลส์บวกและพัลส์ลบ ความกว้างของพัลส์อยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 นาโนวินาที – 10 วินาที ของบริษัท RIGOL (โมเดล DS1102D) ซึ่งใช้ในการวัดสัญญาณพัลส์บริเวณโหลดของระบบพัลส์ดีซี

2.4. แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองนี้มีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 30 โวลต์และกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ มีหน้าตาแสดงผลของค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบดิจิทัล 4 ช่อง นอกจากนั้นยังมีระบบป้องกันการ Over Load ที่จะทำให้เกิดความเสียหายให้แก่ระบบ รุ่น UP-3005T ของบริษัท UNICORN

ผลการศึกษา

1. ผลการออกแบบวงจรเซมิคอนดักต์ด้วยโปรแกรม OrCAD Pspice



รูปที่ 4 กราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับคาบเวลาจากโปรแกรม OrCAD Pspice

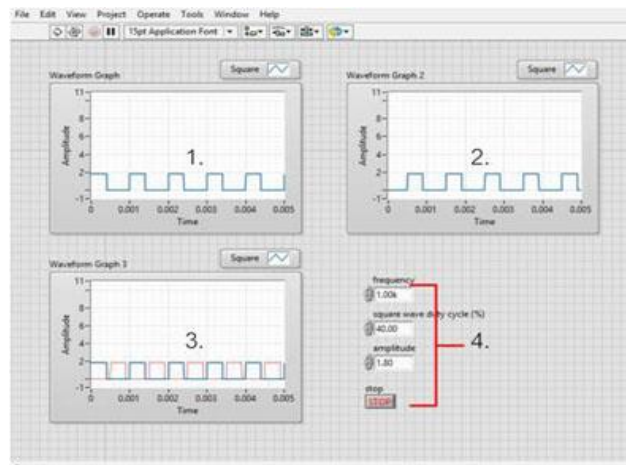
รูป 4A และ 4C สัญญาณพัลส์ความถี่ 10 เฮิร์ต กำหนด % Duty cycle 10 % และ 40 % ตามลำดับ

รูป 4B และ 4D สัญญาณพัลส์ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ต กำหนด % Duty cycle 10 % และ 40 % ตามลำดับ

รูปที่ 4 แสดงกราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้าในหน่วยโวลต์กับคาบเวลาในหน่วยไมโครวินาที รูปสัญญาณที่ได้จากการออกแบบวงจรเซมิคอนดักต์ด้วยโปรแกรม OrCAD Pspice เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงทั้งสองให้มีค่าเท่ากันที่ 30 โวลต์ ในรูปที่ 4A และ 4C กำหนดความถี่ 10 เฮิร์ตเป็นสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการกำหนด % Duty cycle เท่ากับ 10 % และจากการกำหนด % Duty cycle เท่ากับ 40 % ตามลำดับ ในส่วนรูปที่ 4B และ 4D กำหนดความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตเป็นสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการกำหนด % Duty cycle เท่ากับ 10 % และจากการกำหนด % Duty cycle เท่ากับ 40 % ตามลำดับ ซึ่งวัดได้จากบริเวณโหลดขนาด 500 โอห์ม

2. โปรแกรม LabVIEW

รูปที่ 5 แสดงหน้าต่างควบคุมของโปรแกรมประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ 1.เป็นช่องแสดงผลของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นจากช่องเอาต์พุต AO (0) ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่กำหนดให้เกิดขึ้นในช่องเอาต์พุตนี้จะไม่มีการตั้งค่า Delay time ของสัญญาณพัลส์ ซึ่งใช้งานเป็นสัญญาณพัลส์บวกของระบบ 2.เป็นช่องแสดงผลของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นจากช่องเอาต์พุต AO (1) สัญญาณพัลส์ในช่องเอาต์พุตนี้จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่ถูกเป็นช่วงสัญญาณพัลส์ลบ เนื่องจากเราต้องการให้สัญญาณพัลส์ลบเกิดภายหลังสัญญาณพัลส์บวกตั้งค่า Delay time ให้มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของช่วงคาบเวลาทั้งหมด ซึ่งจะทำให้เฟสของพัลส์ต่างกัน 180 องศา และไม่เกิดการทับซ้อนกันระหว่างสัญญาณพัลส์ทั้งสอง 3.เป็นช่องแสดงผลรวมสัญญาณเอาต์พุตระหว่าง AO (0) และ AO (1) โดยทั้ง 3 ช่องที่ได้กล่าวมานั้นเป็นกราฟแสดงผลระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณ (แกนตั้ง) กับคาบเวลา (แกนนอน) 4.ช่องกำหนดความถี่และค่า % Duty Cycle ของสัญญาณพัลส์ เพื่อป้องกันการช็อตของพัลส์บวกและลบ นอกจากการตั้งค่าให้เฟสของพัลส์ทั้งสองต่างกัน 180 องศาแล้วยังต้องกำหนด % Duty Cycle ให้มีค่าสูงสุดโดยคำนึงถึงช่วงเวลาในการสวิทช์ของพัลส์ทั้งสอง (Dead time) ให้สวิทช์ทั้งสองไม่เกิดสัญญาณซ้อนกัน ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่ระบบพัลส์ดีซี

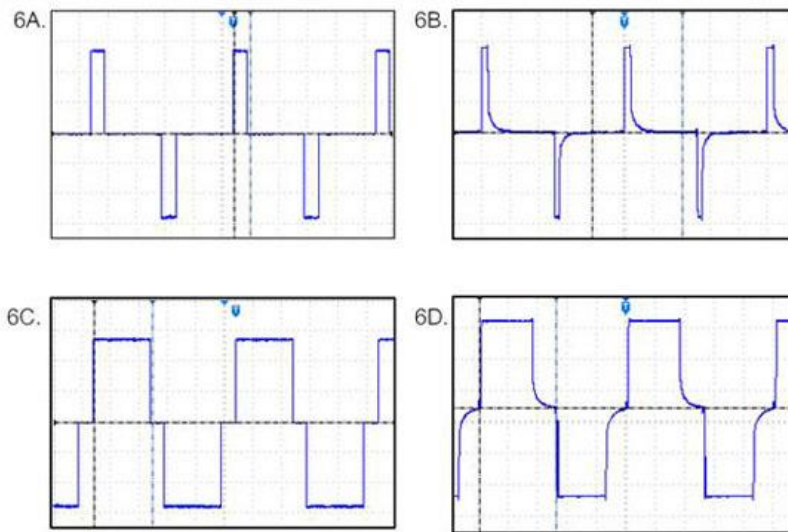


รูปที่ 5 หน้าต่างควบคุมของโปรแกรม LabVIEW

3. ผลการทดลองระบบพัลส์ดีซีที่ควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW

รูปที่ 6 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ได้เป็นพัลส์สองขั้วแบบสมมาตร (Symmetry Bipolar Pulsed) ที่มีแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่พัลส์บวกและพัลส์ลบเป็น 60 โวลต์ ซึ่งกำหนดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งกำเนิดเป็น 30 โวลต์และวัดสัญญาณพัลส์เอาต์พุตจากโหลดขนาด 500 โอห์ม 50 วัตต์ ด้วยเครื่องออสซิลโคปโดยตั้งค่าสเกลของแรงดันไฟฟ้า (แกนตั้ง) ของออสซิลโคปเป็น 1:10 โวลต์ ซึ่งจากรูปที่ 6 ในรูป 6A และ 6C ใช้สเกลของคาบเวลาในการวัด (แกนนอน) เป็น 1:20 มิลลิวินาที ใช้สัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 10 เฮอร์ต % Duty cycle เท่ากับ 10 % และจากการกำหนด % Duty cycle เท่ากับ 40 % ตามลำดับ และจากรูป 6B และ 6D นั้นใช้สเกลของคาบเวลาในการวัดเป็น 1:20 ไมโครวินาที ใช้เป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 10 กิโลเฮอร์ต % Duty cycle เท่ากับ 10 % และจากการกำหนด % Duty cycle เท่ากับ 40 % ตามลำดับเช่นกัน ซึ่งเป็นการทดลองตามค่าที่ได้ออกแบบ

วงจรถ่ายจากโปรแกรม OrCAD Pspice เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการออกแบบผ่านโปรแกรมและสัญญาณพัลส์ที่ได้จากการสร้างระบบพัลส์ดีซี



รูปที่ 6 กราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับคาบเวลาจากการทดลองระบบพัลส์ดีซีที่ควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW
รูป 6A และ 6C สัญญาณพัลส์ความถี่ 10 เฮิรต กำหนด %Duty cycle 10% และ 40% ตามลำดับ
รูป 6B และ 6D สัญญาณพัลส์ความถี่ 10 กิโลเฮิรต กำหนด %Duty cycle 10% และ 40% ตามลำดับ

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบพัลส์ดีซีด้วยการควบคุมจากโปรแกรม LabVIEW โดยจากการออกแบบวงจรถ่ายผ่านโปรแกรม OrCAD Pspice ทำให้ได้สามารถทราบถึงลักษณะของผลการออกแบบวงจรถ่ายอิเล็คทรอนิคส์ที่ต้องการสร้างเพื่อใช้งานในระบบพัลส์ดีซี ในช่วงความถี่สูงสุด 10 กิโลเฮิรตและ % Duty cycle ตั้งแต่ 10 ถึง 40 % ที่แรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ พบว่าผลจากโปรแกรมวงจรถ่ายที่ออกแบบสามารถใช้งานได้ในช่วงที่กำหนด จากนั้นทำการเขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อควบคุมลักษณะของสัญญาณพัลส์และใช้ควบคุมระบบพัลส์ดีซีที่สร้างขึ้น จากผลการทดลองสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลอสโคป เมื่อกำหนดตัวแปรของสัญญาณพัลส์ตามการออกแบบในโปรแกรม OrCAD Pspice ได้สัญญาณเป็นพัลส์สองขั้วแบบสมมาตรที่มีความสูงของแรงดันไฟฟ้าทั้งหมด 60 โวลต์ และมีลักษณะที่ตรงกับการออกแบบจากโปรแกรม โดยในงานนี้เป็นการสร้างระบบพัลส์ดีซีต้นแบบ ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างระบบพัลส์ดีซีที่มีความถี่สูงขึ้นและทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อนำไปใช้ในระบบแมกนีตรอนสปีดเตอร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณในความอนุเคราะห์จากภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์และคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในความช่วยเหลือด้านสถานที่และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Este, G.O., Westwood, W.D. (1998). Reactive Sputtering. Handbook of Thin Film Process Technology, vol. 98/1, p. A5.2:1-9.
- [2] Chen, W., Yanqing, Y., Yip-Wah, Ch., Yingchun, Zh., Sheng, O., Zhiyuan, X., Kexin, S., Pengtao, L. (2016). Hardness and toughness of boron carbide thin films deposited by pulse dc magnetron sputtering. *Ceramics International Microstructure*, Volume 42, Issue 5, Pages 6342–6346.
- [3] Oua, Y.X., Linb, J., Chea, H.L., Sproulb, W.D., Mooreb, J.J., Leia, M.K. (2015). Mechanical and tribological properties of CrN/TiN multilayer coatings deposited by pulsed dc magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, Volume 276, Pages 152–159.
- [4] Sridharana, M., Sillassena, M., Bottigera, J., Chevalliera, J., Birkedalb, H. (2007). Pulsed DC magnetron sputtered Al₂O₃ films and their hardness. *Surface and Coatings Technology*, Volume 202, Issues 4–7, Pages 920–924.
- [5] Weerasak, S., Thanusit, B., Ian, Thomas., Vittaya, A., Tosawat, S., Zhang, Ch. (2006). Design and Construction of Bipolar Pulsed-DC Power Supply for Magnetron Sputtering System. *Pacific Science Review*, vol.8, pp.37-40.

ประวัติผู้เขียน

| | |
|------------------|---|
| ชื่อ | นาย อานันท์ กังวาลไกล |
| วัน เดือน ปีเกิด | 6 กันยายน 2535 |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 162/285 หมู่ 5 ซอยมังกร-นาคดี ถนนแพรกษา ตำบลแพรกษา อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10280 |
| ประวัติการศึกษา | (ปีที่จบ) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 2.92 (ชื่อสถานศึกษา) สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (ปีที่จบ) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.87 (ชื่อสถานศึกษา) สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ผลงานทางวิชาการ | 1. งานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 40 The 40 th Congress on Science and Technology of Thailand Title name “Plasma Parameters of Direct-Current Glow Discharge obtained by Single Langmuir Probe Technique” 2. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 40 ชื่อบทความ “การออกแบบและการสร้างระบบพัลส์ดีซีผ่านการควบคุม ด้วยโปรแกรม LabVIEW” The 40 th National Graduate Research Conference “Higher Education Harmonization” Title name “Design and Construction Pulsed-DC system controlled by LabVIEW Program |