



## รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การศึกษา ออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้า  
ของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม

A Study, Design and Develop Battery Management System for  
Lithium Battery

นายฉัตรดนัย ก้อนทอง

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การศึกษา ออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของเซลล์  
แบตเตอรี่ลิเทียม

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายฉัตรดนัย ก้อนทอง

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

ภาควิชา วิศวกรรมการวัดและควบคุม

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ รศ.ดร.เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นายเจริญพร พูลสุข

ชื่อสถานประกอบการ บริษัท เดอะ เทอร์มินอล เอฟ แอนด์ บี จำกัด

### บทคัดย่อ

รายงานสหกิจฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของเซลล์  
แบตเตอรี่ลิเทียม (Battery Management System, BMS) เพื่อป้องกันความเสียหายของเซลล์แบตเตอรี่  
ลิเทียม (Battery Lithium) และประยุกต์ใช้งานกับยานยนต์ไฟฟ้า (Electrical Vehicle) อาทิเช่น รถกอล์ฟ  
(Golf cart) หรือรถยก (Forklift) เป็นต้น ในกรณีนี้พิจารณาระบบป้องกัน 3 ระบบจาก 5 ระบบ ซึ่ง  
ประกอบด้วย 1) ระบบป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูงเกิน (Over Voltage Protection System) 2) ระบบป้องกัน  
แรงดันไฟฟ้าต่ำเกิน (Lower Voltage Protection System) และ 3) ระบบป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลสูงเกิน  
(Over Current Protection System) โดยทำการศึกษา ออกแบบ และทดลองประสิทธิภาพในการทำงาน  
ที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับการพัฒนาระบบภายในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: ระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม, แบตเตอรี่ลิเทียม, ยานยนต์  
ไฟฟ้า

**Co-operative Title:** A Study, Design and Develop Battery Management System for Lithium Battery

**Student Intern Name:** Mr. Chaddanai Konthong

**Faculty:** Engineering

**Department:** Instrumentation and Control Engineering

**Advisor Name:** Assoc. Prof. Dr. Kaset Sirisantisamrid

**Mentor Name:** Mr. Jarernpor Poonsuk

**Company:** The Terminal F&B Co., Ltd.

## ABSTRACT

This cooperative education report presents a study design and develop battery management system for lithium battery to protect damage of battery and it is applied to electrical vehicle for example, golf cart and forklift. In this case, three protection systems from five systems are considered that consist of 1) over voltage protection system 2) lower voltage protection system and 3) over current protection system. This project started from study of battery management system, design and experiment for future development.

**Keywords:** BMS, lithium battery, electrical vehicle

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการสหกิจศึกษาเรื่องการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของ เซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมสำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยการสนับสนุนจากหลายฝ่ายที่ให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทาง ทำให้โครงการสหกิจศึกษาบรรลุวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี ผู้เขียนจึงขอกราบขอบ พระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท เดอะ เทอร์มินอล เอฟ แอนด์ บี จำกัด ที่มอบโอกาสในการเข้ามาทำสหกิจ ศึกษาประจำปีการศึกษา 2562 รวมถึง ผศ.ดร.สุรพงษ์ พงษ์ยุพินพานิช (อาจารย์ที่ปรึกษาประจำบริษัท) และนายเจริญพร พูลสุข (วิศวกร) ซึ่งเป็นผู้ดูแลที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนว ทางตลอดการทำโครงการ สหกิจศึกษา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ อาจารย์นิเทศโครงการสหกิจศึกษาที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะ และดูแลตลอดระยะเวลาในการปฏิบัติสหกิจศึกษา รวมถึงช่วยตรวจทานรายงานสหกิจศึกษาและ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้โครงการสหกิจศึกษา และรายงานสหกิจศึกษาเสร็จสิ้นสมบูรณ์

นายฉัตรดนัย ก้อนทอง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
บทที่ 1 .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	1
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 .....	3
2.1 แบตเตอรี่แบบลิเทียม (Lithium Battery-Cell).....	3
2.1.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม .....	3
2.2 วงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยการใช้โอปแอมป์ (Voltage Comparator Circuit with Op-amp)..	3
2.2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโอปแอมป์.....	3
2.2.2 โครงสร้างพื้นฐานของโอปแอมป์ (Op-Amp).....	4
2.2.3 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator).....	4
2.3 มอสเฟต (MOSFET) .....	5
2.3.1 โครงสร้างของมอสเฟต (MOSFET) .....	5
2.3.2 ชนิดของมอสเฟต (Type MOSFET).....	6
2.3.3 การไบแอสทางไฟฟ้าของมอสเฟต .....	7
2.3.3.1 การไบแอสมอสเฟตแบบดีพลีชัน (D-MOSFET).....	7
2.3.3.2 การไบแอสของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ (E-MOSFET).....	9
2.3.4 ย่านการทำงานของมอสเฟต.....	10
บทที่ 3 .....	12
3.1 ศึกษาข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium Battery Specification) .....	12
3.2 ศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ .....	13
3.2.1 การแปลงเชิงปริพันธ์ของแบบจำลอง .....	13
3.3 ศึกษาการออกแบบของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection).....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4	ศึกษาการออกแบบของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Lower Voltage Protection).....	19
3.5	ศึกษาการออกแบบวงจรป้องกันการไหลของกระแสที่มากเกินไปจนขณะกักเก็บและคายประจุไฟฟ้าของ เซลล์แบตเตอรี่ (Over Current Protection).....	20
3.5.1	คุณลักษณะเฉพาะของมอสเฟต (Characteristic MOSFET) ที่ได้จากการทดลอง.....	21
3.5.1.1	1CRST005N08N.....	22
3.5.1.2	IRFP150N.....	22
3.5.1.3	IRFP4227.....	22
3.5.1.4	IRF3710.....	22
3.5.1.5	IRF510.....	23
3.5.2	วงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ของเซลล์แบตเตอรี่.....	36
3.5.3	วงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) ของเซลล์แบตเตอรี่.....	42
<b>บทที่ 4</b>	.....	<b>45</b>
4.1	ผลลัพธ์จากการจำลองผลการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์ แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection).....	45
4.2	ผลลัพธ์จากการจำลองผลการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์ แบตเตอรี่ (Lower Voltage Protection).....	46
<b>บทที่ 5</b>	.....	<b>49</b>
5.1	สรุปผล.....	49
5.2	ปัญหาและอุปสรรค.....	50
5.3	แนวทางการแก้ไข.....	50
5.4	ข้อเสนอแนะ.....	50
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>		<b>51</b>
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>		<b>52</b>

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบริเตอร์ลิเทียม	3
รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของออปแอมป์ (Op-Amp)	4
รูปที่ 2.3 สถานะการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน	5
รูปที่ 2.4 โครงสร้างมอสเฟตแบบดีฟลิชั่น (D-MOSFET) ชนิด N-Channel และ P-Channel	6
รูปที่ 2.5 โครงสร้างมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ (P-MOSFET) ชนิด P-Channel และ N-Channel	6
รูปที่ 2.6 ลักษณะการไปแอสของมอสเฟตแบบดีฟลิชั่นชนิด P-Channel	7
รูปที่ 2.7 ลักษณะการไปแอสของมอสเฟตแบบดีฟลิชั่นชนิด N-Channel	7
รูปที่ 2.8 ลักษณะการไปแอสของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด N-Channel	9
รูปที่ 2.9 ลักษณะการไปแอสของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด P-Channel	9
รูปที่ 2.10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของมอสเฟต (MOSFET Characteristic Curve )	10
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงย่านการทำงานในช่วงต่าง ๆ ของมอสเฟต	11
รูปที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบริเตอร์ลิเทียม	12
รูปที่ 3.2 ค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง $R_p$ และ $C_p$ เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งแรก	14
รูปที่ 3.3 แรงดันสุดท้ายของแบริเตอร์ที่วัดได้ เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งแรก	14
รูปที่ 3.4 ค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง $R_p$ และ $C_p$ เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งที่สอง	15
รูปที่ 3.5 แรงดันสุดท้ายของแบริเตอร์ที่วัดได้ เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งที่สอง	15
รูปที่ 3.6 ค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง $R_p$ และ $C_p$ เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งที่สาม	16
รูปที่ 3.7 แรงดันสุดท้ายของแบริเตอร์ที่วัดได้ เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งที่สาม	16
รูปที่ 3.8 วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบริเตอร์	18
รูปที่ 3.9 วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินค่าน้อยสุดของเซลล์แบริเตอร์	20
รูปที่ 3.10 วงจรสำหรับการทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต	21
รูปที่ 3.11 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข CRST05N08N	24
รูปที่ 3.12 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข CRST05N08N	24
รูปที่ 3.13 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข CRST05N08N	25

รูปที่ 3.14 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP150N	26
รูปที่ 3.15 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP150N	27
รูปที่ 3.16 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP150N	27
รูปที่ 3.17 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP4227	29
รูปที่ 3.18 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP4227	29
รูปที่ 3.19 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP4227	30
รูปที่ 3.20 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF3710	31
รูปที่ 3.21 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF3710	32
รูปที่ 3.22 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF3710	32
รูปที่ 3.23 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF510	34
รูปที่ 3.24 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF510	34
รูปที่ 3.25 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF510	35
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างการต่อขานานมอสเฟตขานานกันแบบ 2 ตัว	37
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่	46
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่	47

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข CRST05N08N	23
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP150N	26
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP4227	28
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710	31
ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF510	33
ตารางที่ 3.6 การทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 12 A โดยใช้ มอสเฟต (MOSFET) 1 ตัว	37
ตารางที่ 3.7 การทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 12 A โดยใช้ มอสเฟต (MOSFET) 2 ตัว	38
ตารางที่ 3.8 การทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 24 A โดยใช้ มอสเฟต (MOSFET) 1 ตัว	38
ตารางที่ 3.9 การทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 24 A โดยใช้ มอสเฟต (MOSFET) 2 ตัว	39
ตารางที่ 3.10 แสดงการคาคะเนมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 270 A โดยใช้ มอสเฟต (MOSFET) 1 ตัว	40
ตารางที่ 3.11 แสดงการคาคะเนมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 270 A โดยใช้ มอสเฟต (MOSFET) 24 ตัว	41
ตารางที่ 3.12 แสดงการคาคะเนมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 180 A โดยใช้ มอสเฟต (MOSFET) 1 ตัว	43
ตารางที่ 3.13 แสดงการคาคะเนมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 180 Amp. โดย ใช้มอสเฟต (MOSFET) 16 ตัว	44
ตารางที่ 4.1 ค่าผลการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของ เซลล์แบตเตอรี่	45
ตารางที่ 4.2 ค่าผลการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินค่าน้อยสุดของ เซลล์แบตเตอรี่	47

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

บริษัทเดอะเทอร์มินอล เอพแอนด์บี จำกัด ก่อตั้งมาตั้งแต่ปี 2016 โดยเกิดจากการรวมกลุ่มของผู้เชี่ยวชาญทางด้านการพัฒนาและออกแบบระบบไฟฟ้าและระบบควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ลิเทียม การวิจัย การศึกษาทดลอง การร่วมรับรู้เพื่อแก้ปัญหา ระบบควบคุมทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมถูกดำเนินในช่วง 2 ปีแรกของบริษัทฯ ด้วยองค์ความรู้ของบริษัทฯที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้บริษัทฯ มีความพร้อมในการตอบสนองต่อความต้องการ การของผู้ประกอบการด้านพลังงานในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน ดังนั้นหัวข้อโครงการสหกิจที่ได้รับมอบหมายจากบริษัทฯ คือ การศึกษา ออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมที่มีสมรรถภาพสูง (Battery Management System, BMS) เพื่อประยุกต์ใช้งานกับยานยนต์ไฟฟ้า (Electrical Vehicle) อาทิเช่น รถกอล์ฟ (Golf Cart) หรือ รถยก (Forklift) เป็นต้น โครงการนี้อยู่ในช่วงวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของ BMS ให้ดีขึ้นและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมตามการใช้งาน

ระบบจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่ลิเทียมประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลักคือ 1) เซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม 2) ระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้า (Battery Management System, BMS) 3) ระบบป้องกันกำลังไฟฟ้าเกิน และ 4) ภาระทางไฟฟ้า (Load) อย่างไรก็ตามโครงการที่ได้รับมอบหมายมุ่งเน้นให้ศึกษาระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าเฉพาะการจัดการเซลล์ของแบตเตอรี่ลิเทียมให้สมดุล

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและแบบจำลองของระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้า (Battery Management System, BMS) ของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และนำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้า (Battery Management System, BMS)

1.2.3 ออกแบบ พัฒนาและทดสอบเพื่อใช้งานเชิงพาณิชย์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เนื่องด้วยโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าเพื่อป้องกันความเสียหายต่อเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม ความเสียหายต่อเซลล์แบตเตอรี่เกิดจาก 5 กรณีด้วยกัน คือ 1) แรงดันไฟฟ้าเกิน 2) แรงดันไฟฟ้าต่ำ 3) กระแสไฟฟ้าเกิน 4) กระแสไฟฟ้าต่ำ และ 5) อุณหภูมิสูงเกินขีดความสามารถทางด้านฟิสิกส์ของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม ดังนั้นกรอบของงานโครงการวิจัยครอบคลุมการ

แก้ปัญหาของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมกรณี 1 ถึง 4 คือ พัฒนาแบบจำลองทางไฟฟ้า วิเคราะห์นำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพ ออกแบบ พัฒนาและทดสอบเพื่อใช้งานเชิงพาณิชย์

#### 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม
- 1.4.2 วิเคราะห์แบบจำลองทางไฟฟ้าเพื่อหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพของระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้า
- 1.4.3 ออกแบบระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้า
- 1.4.4 ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้า
- 1.4.5 พัฒนาระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้า

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เข้าใจแบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม
- 1.5.2 สามารถหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพ
- 1.5.3 สามารถออกแบบระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม
- 1.5.4 สามารถกำหนดรูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม

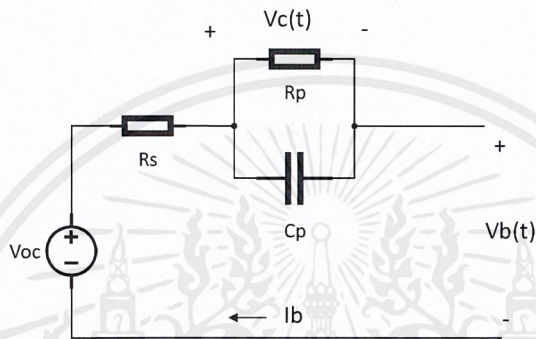
## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แบตเตอรี่แบบลิเทียม (Lithium Battery-Cell)

##### 2.1.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม

แบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมถูกอธิบายด้วยวงจรสมมูล ประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน เช่น แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เพื่อประมาณค่าอินพุตและเอาต์พุตของเซลล์แบตเตอรี่



รูปที่ 2.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียม

วงจรสมมูลจากรูปที่ 2.1 แบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1) ตัวต้านทานภายใน  $R_s$  2) วงจรต่อขนานกันระหว่างตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Circuit) ที่ใช้จำลองผลตอบสนองชั่วขณะเมื่อทำการปล่อยหรือกักเก็บประจุชั่วคราว และ 3) วงจรแรงดันแบบเปิด (OCV) โดยแบบจำลองวงจรสมมูลจะพิจารณากระแสเป็นอินพุต และแรงดันเป็นเอาต์พุตที่สามารถวัดค่าได้

การวิเคราะห์วงจรสมมูลจากรูปที่ 2.1 สามารถใช้กฎของ Kirchhoff's Law ได้ การเปลี่ยนแปลงของวงจรสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$v_b(t) = v_{oc} - R_s i_b - v_c(t) \quad (2.1)$$

$$i_b = i_{R_p} + i_{C_p} = \frac{v_c(t)}{R_p} + C_p \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (2.2)$$

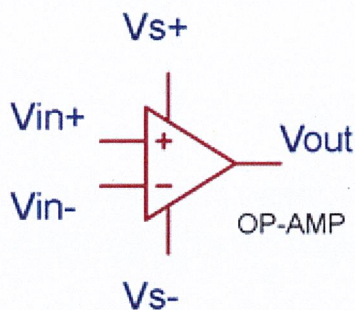
เมื่อ  $v_b(t)$  และ  $i_b(t)$  คือ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ปลายขั้วไฟฟ้า ตามลำดับ และ  $v_c(t)$  คือแรงดันคร่อมวงจร RC ที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง จากแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่เราสามารถนำไปวิเคราะห์ผลกระทบของวงจรที่นำมาใช้กับแบตเตอรี่ได้

#### 2.2 วงจรเปรียบเทียบแรงดันโดยใช้โอปแอมป์ (Voltage Comparator Circuit with Op-amp)

##### 2.2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโอปแอมป์

โอปแอมป์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง โดยโครงสร้างภายในประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำหลายชนิด เช่น อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ อุปกรณ์มอสเฟต (MOSFET) ไดโอด (Diode) รวมถึงมีตัวต้าน

ทานทั้งหมดจะถูกประกอบและต่อรวมกันกลายเป็นวงจรรวมหรือเรียกว่าไอซี (Integrated Circuit, IC) โดยลักษณะการทำงานของวงจรจะเป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีอัตราขยายสัญญาณที่สูง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของออปแอมป์ (Op-Amp)

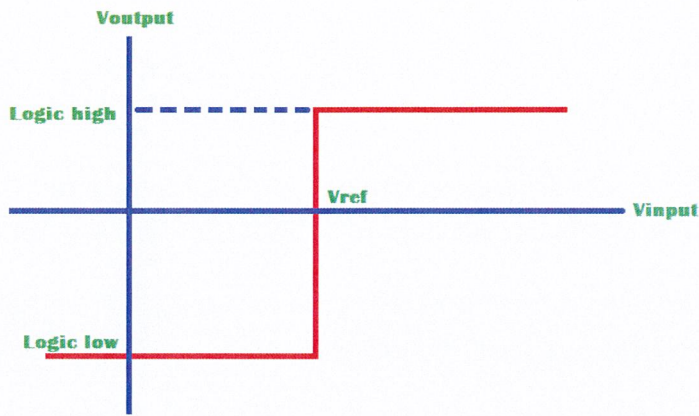
### 2.2.2 โครงสร้างพื้นฐานของออปแอมป์ (Op-Amp)

โดยทั่วไปออปแอมป์มีขาที่ใช้งานด้วยกัน 5 ขา สามารถแบ่งได้เป็นขาสำหรับไฟเลี้ยงออปแอมป์ 2 ขา เป็นขาอินพุตแบบกลับเฟส (Inverting Input) 1 ขา เป็นขาอินพุตแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Input) 1 ขา และขาเอาต์พุต (Output) 1 ขา โดยแต่ละโครงสร้างพื้นฐานของออปแอมป์สามารถอธิบายการใช้งานได้ดังต่อไปนี้

1. ขาอินพุตแบบกลับเฟส (Inverting Input) เป็นขาอินพุตของออปแอมป์ มีไว้สำหรับป้อนสัญญาณอินพุตที่ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสัญญาณที่ป้อนเข้าไปที่ขา Inverting Input จะได้สัญญาณที่ตรงข้าม หรือกลับเฟสที่จะออกทางขา Output
2. ขาอินพุตแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Input) เป็นขาอินพุตของออปแอมป์เช่นกัน มีไว้สำหรับป้อนสัญญาณอินพุตทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ โดยสัญญาณที่ป้อนเข้าไปที่ขา Inverting Input จะได้สัญญาณที่ตรงข้ามหรือกลับเฟสที่จะออกทางขาเอาต์พุต (Output)
3. ขาเอาต์พุต (Output) มีหน้าที่แสดงสภาวะการทำงานของออปแอมป์ ซึ่งเกิดจากการป้อนสัญญาณเข้าทางขาอินพุตแบบกลับเฟส (Inverting Input) และขาอินพุตแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Input)
4. ขาแหล่งจ่ายไฟบวก ( $V+$ ) เป็นขาสำหรับใช้ป้อนไฟบวก
5. ขาแหล่งจ่ายไฟลบ ( $V-$ ) เป็นขาสำหรับใช้ป้อนไฟลบ

### 2.2.3 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator)

หลักการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดันคือทำการเปรียบเทียบแรงดันอินพุตที่ป้อนในหัวขงกับแรงดันอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้ ทำให้แรงดันเอาต์พุตสามารถเกิดสถานะได้ 2 สถานะคือ สถานะลอจิกสูง (Logic High) และ สถานะลอจิกต่ำ (Logic Low) เท่านั้น



รูปที่ 2.3 สถานะการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อแรงดันอินพุต ( $V_{input}$ ) น้อยกว่าแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ที่กำหนด ทำให้แรงดันเอาต์พุต ( $V_{output}$ ) อยู่ในสถานะลอจิกต่ำ (Logic Low) เมื่อแรงดันอินพุต ( $V_{input}$ ) มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) ที่กำหนดไว้ทำให้แรงดันเอาต์พุต ( $V_{output}$ ) อยู่ในสถานะสูง (Logic High) โดยจากหลักการทำงานของวงจรแบ่งแรงดันเราสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรตรวจจับแรงดัน (Voltage Detector)

## 2.3 มอสเฟต (MOSFET)

### 2.3.1 โครงสร้างของมอสเฟต (MOSFET)

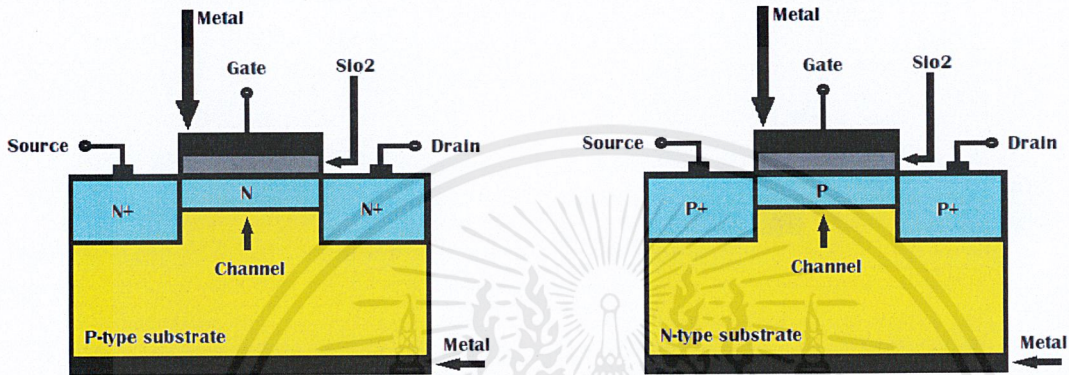
มอสเฟตมีชื่อเต็มคือ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET หรือ เฟตชนิดออกไซด์ของโลหะ โดยสามารถทนต่อกำลังสูงได้ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีการทำงานแบบแปลงแรงดันเป็นกระแส กระแสที่ได้เป็นอิทธิพลที่มาจากอิเล็กตรอนหรือโฮลที่เป็นพาหะข้างใน ขึ้นอยู่กับว่าอุปกรณ์ชนิดนั้นเป็นมอสเฟตชนิดเอ็น (Negative-MOSFET) หรือมอสเฟตชนิดพี (Positive-MOSFET)

โครงสร้างของมอสเฟตประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1) Gate เป็นส่วนที่ทำมาจากออกไซด์ของโลหะ ทำงานโดยการเกิดความต่างศักย์บริเวณแผ่นโลหะสองแผ่น เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าควบคุมการเข้าออกของสัญญาณไฟฟ้าระหว่าง Source และ Drain 2) Source เป็นส่วนขาเข้าของสัญญาณ และ 3) Drain เป็นส่วนขาออกของสัญญาณ ในทางดิจิทัลมอสเฟตถูกเปรียบเสมือนสวิตช์ โดยมอสเฟตชนิดเอ็น (Negative-MOSFET) เมื่อมีสัญญาณเข้าที่ขา Gate เป็น 1 (Logic High) สวิตช์จะปิดลง แต่ถ้าไม่มีสัญญาณเข้ามาหรือสัญญาณเข้าที่ขา Gate เป็น 0 (Logic Low) สวิตช์จะคงเปิดอยู่ (Normal Opened Switch) ส่วนมอสเฟตชนิดพี (Positive-MOSFET) เมื่อมีสัญญาณเข้าที่ขา Gate เป็น 1 (Logic High) สวิตช์จะเปิดขึ้น แต่ถ้าไม่มีสัญญาณเข้ามาหรือสัญญาณเข้าที่ขา Gate เป็น 0 (Logic Low) สวิตช์จะคงปิดอยู่ (Normal Closed Switch)

### 2.3.2 ชนิดของมอสเฟต (Type MOSFET)

มอสเฟตถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ มอสเฟตแบบดีพลีชัน (Depletion type MOSFET, D-MOSFET) และ มอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ (Enhancement type MOSFET, E-MOSFET) โดยทั้งสองจะถูกแบ่งออกเป็น มอสเฟตชนิดเอ็น (Negative-MOSFET, N-MOSFET) และมอสเฟตชนิดพี (Positive-MOSFET, P-MOSFET)

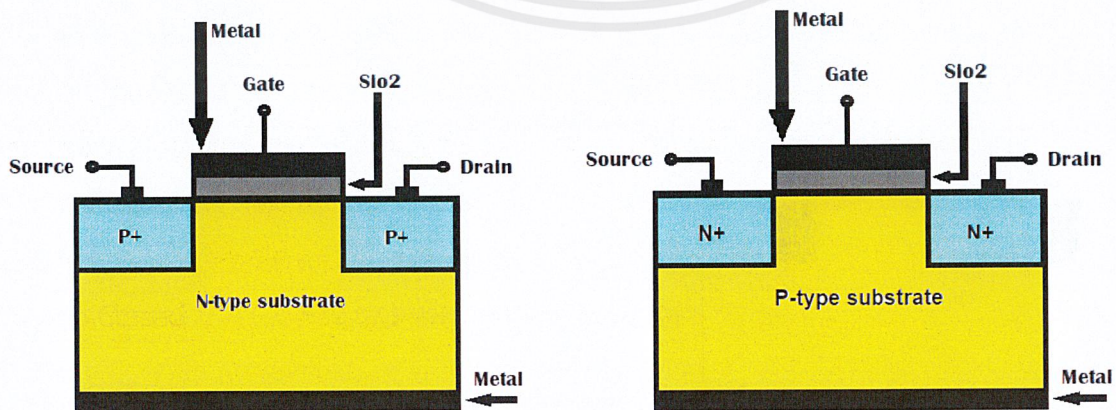
1) มอสเฟตแบบดีพลีชัน (Depletion type MOSFET, D-MOSFET) โครงสร้างประกอบด้วยขาหรือขั้วที่ต่อใช้งานด้วยกัน 3 ขาคือขา Drain (D) ขา Source (S) และขา Gate (G)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างมอสเฟตแบบดีพลีชัน (D-MOSFET) ชนิด N-Channel และ P-Channel

จากรูปที่ 2.4 โครงสร้างของมอสเฟตแบบดีพลีชันชนิด N-Channel จะมีสารกึ่งตัวนำหลักชนิด P (P-type Substrate) ส่วนโครงสร้างมอสเฟตแบบดีพลีชันชนิด P-Channel จะมีสารกึ่งตัวนำหลักชนิด N (N-type Substrate) สารกึ่งตัวนำหลักจะกว้างขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับกระแสที่ขา Gate โดยบริเวณ Channel จะมีฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) กั้นไว้ไม่ให้สัมผัสกับขา Gate โดยตรงและบริเวณขา Gate จะมีแผ่นโลหะที่สามารถทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมความกว้างของ Channel

2) มอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ (Enhancement type MOSFET, E-MOSFET) จะแตกต่างกับมอสเฟตแบบดีพลีชัน (Depletion type MOSFET, D-MOSFET) ตรงที่ไม่มี Channel แต่สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยการไบแอส

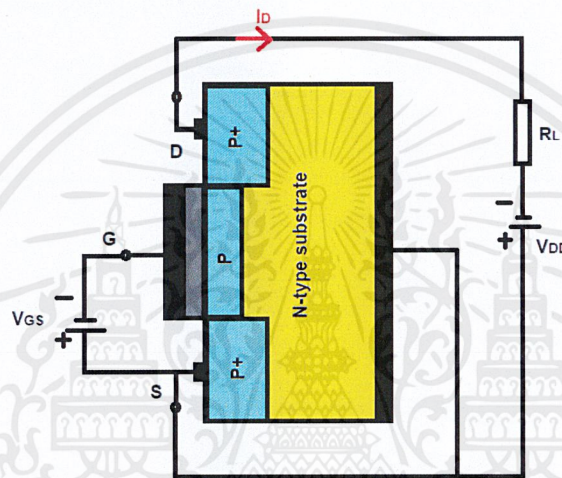


รูปที่ 2.5 โครงสร้างมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ (P-MOSFET) ชนิด P-Channel และ N-Channel เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

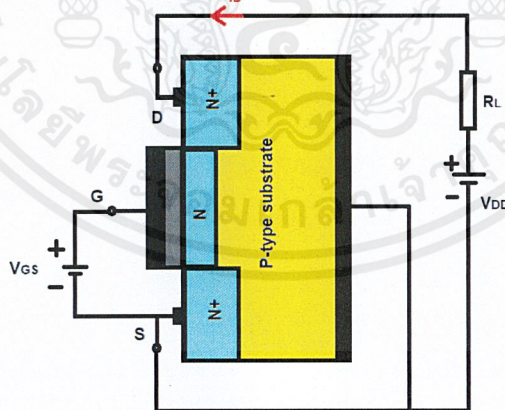
จากรูปที่ 2.5 โครงสร้างมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด N-Channel จะสังเกตได้ว่า โครงสร้างบริเวณขา Gate จะมีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันส่วนที่เป็น โลหะไม่ให้สัมผัสกับเนื้อสารหลักชนิด P (P-type substrate) โดยบริเวณเนื้อสารหลักจะยังไม่มี Channel แต่จะเห็นว่าขา Drain และ ขา Source ที่ส่วนหัวและส่วนท้าย ส่วนโครงสร้างมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด P-Channel จะมีโครงสร้างเหมือนชนิด N-Channel แต่เนื้อสารหลักเป็นชนิด N (N-type Substrate) เช่นเดียวกัน บริเวณเนื้อสารหลักจะยังไม่มี Channel

### 2.3.3 การไบแอสทางไฟฟ้าของมอสเฟต

#### 2.3.3.1 การไบแอสมอสเฟตแบบดีฟลิชั่น (D-MOSFET)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการไบแอสของมอสเฟตแบบดีฟลิชั่นชนิด P-Channel



รูปที่ 2.7 ลักษณะการไบแอสของมอสเฟตแบบดีฟลิชั่นชนิด N-Channel

พิจารณาการไบแอสของมอสเฟตแบบดีฟลิชั่นชนิด N-Channel กรณีที่ทำการจ่ายแรงดันที่ขา Drain ( $V_{DD}$ ) เป็นค่าหนึ่งแล้วให้แรงดันคร่อมขา Gate-Source ( $V_{GS}$ ) เป็น 0 ขณะนี้กระแส Drain ( $I_D$ ) ไหลผ่าน Drain ไป Source ได้ เนื่องจากขั้ว Drain และ Source เป็นสารชนิด N จึงเสมือนเป็นตัวต้านทานตัวหนึ่ง กระแสจึงสามารถไหลผ่านได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าลองเพิ่ม  $V_{GS}$  ให้มีค่าเป็นบวกมากขึ้น Channel N จะขยายกว้างมากขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าบวกที่แผ่นโลหะมีจำนวนมากขึ้น ทำให้เกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่ภายในเนื้อสารหลักชนิด P (P-type substrate) ให้เคลื่อนที่มารวมกันที่ Channel N ดังนั้น Channel N จึงขยายกว้างขึ้นและทำให้กระแส Drain ( $I_D$ ) มีปริมาณการไหลที่มากขึ้น

เช่นกันถ้าปรับลด  $V_{GS}$  ให้มีค่าลบมากขึ้น Channel N จะแคบลงจนเกือบหายไป เนื่องจากสนามไฟฟ้าลบที่แผ่นโลหะผลักดันกับอิเล็กตรอนบริเวณ Channel N ทำให้ Channel N เกิดพื้นที่ว่างขึ้น Channel N จึงแปรสภาพเข้าสู่ลักษณะสาร P และขวางทางเดินของกระแส Drain ( $I_D$ )

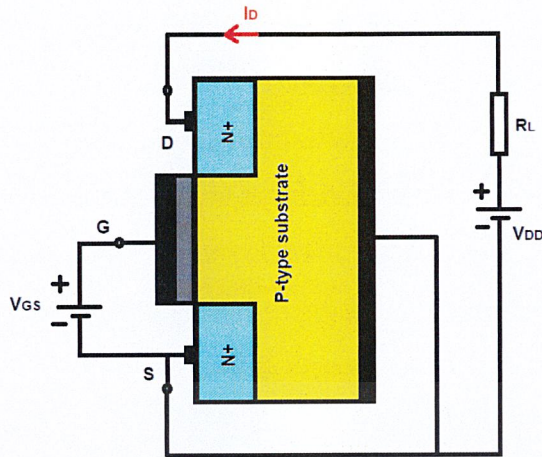
เมื่อพิจารณาการไบแอสของมอสเฟตแบบตีฟลิซันชนิด P-Channel กรณีที่ทำการจ่ายแรงดันที่ขา Source ( $V_{DD}$ ) เป็นค่าๆหนึ่งแล้วให้แรงดันคร่อมขา Gate-Source ( $V_{GS}$ ) เป็น 0 ขณะนี้กระแส Drain ( $I_D$ ) ไหลผ่าน Source ไป Drain ได้ เนื่องจากขั้ว Drain และ Source เป็นสารชนิด P จึงเสมือนเป็นตัวต้านทานตัวหนึ่งกระแสจึงสามารถไหลผ่านได้

ถ้าลองเพิ่ม  $V_{GS}$  ให้มีค่าเป็นลบมากขึ้น Channel P จะขยายกว้างมากขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าลบที่แผ่นโลหะมีจำนวนมากขึ้น ทำให้เกิดแรงผลักดันกับอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่ภายในเนื้อสารหลักชนิด N (N-type Substrate) ให้เคลื่อนที่ห่างออกจาก Channel P ดังนั้น Channel P จึงขยายกว้างขึ้นและทำให้กระแส Drain ( $I_D$ ) มีปริมาณการไหลที่มากขึ้น

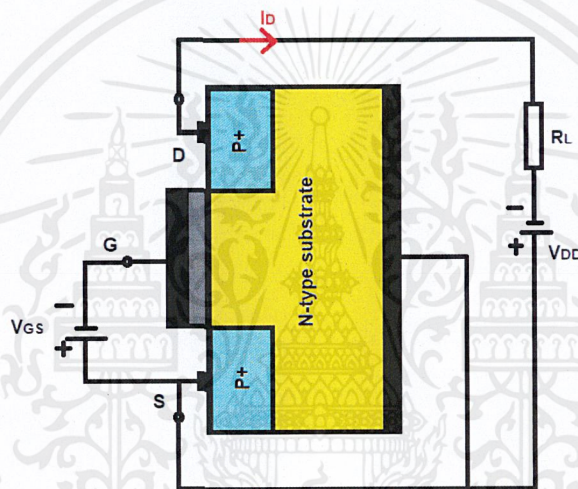
เช่นกันถ้าปรับเพิ่ม  $V_{GS}$  ให้มีค่าบวกมากขึ้น Channel P จะแคบลงจนเกือบหายไป เนื่องจากสนามไฟฟ้าบวกที่แผ่นโลหะดึงดูดอิเล็กตรอนบริเวณ Channel P ทำให้ Channel P เกิดพื้นที่ว่างขึ้น Channel P จึงแปรสภาพเข้าสู่ลักษณะสาร N และขวางทางเดินของกระแส Drain ( $I_D$ )

สรุปได้ว่ามอสเฟตแบบตีฟลิซัน (D-MOSFET) สามารถนำกระแสได้โดยการควบคุมการไบแอสที่ขา Gate และแรงดันที่ขา Gate ทำให้เกิดการไหลของกระแส Drain ( $I_D$ ) สามารถเป็นได้ทั้งแรงดันไฟบวกและลบ ในส่วนของการทำงานมอสเฟตแบบตีฟลิซัน (D-MOSFET) ชนิด N-Channel และ P-Channel จะมีหลักการำทำงานที่เหมือนกัน แต่แตกต่างกันเพียงตรงขา Gate ที่มีแหล่งจ่ายที่ตรงข้ามกัน

### 2.3.3.2 การไบแอสของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ (E-MOSFET)



รูปที่ 2.8 ลักษณะการไบแอสของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด N-Channel



รูปที่ 2.9 ลักษณะการไบแอสของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด P-Channel

พิจารณการไบแอสของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด N-Channel เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ขา Drain ( $V_{DD}$ ) เป็นค่าๆหนึ่งแล้วให้แรงดันคร่อมขา Gate-Source ( $V_{GS}$ ) เป็น 0 กระแส Drain ( $I_D$ ) ไม่มีการไหลจาก Drain ไป Source เนื่องจากบริเวณ Channel ยังเป็นสารชนิด P อยู่เสมือนรอยต่อเป็นไบแอสกลับ (Channel ยังไม่เกิด)

ถ้าลองปรับเพิ่มค่า  $V_{GS}$  ให้มีค่าเป็นบวกมากขึ้น สนามไฟฟ้าบวกที่แผ่นโลหะทำให้เกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่ภายในเนื้อสารหลักชนิด P (P-type Substrate) ให้มารวมตัวติดกันกับบริเวณฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) กลายเป็นสะพานเชื่อมทางเดินให้กระแส Drain ( $I_D$ ) ไหลผ่านจาก Drain ไป Source ได้ นั่นคือบริเวณติดกับฉนวนจะเกิด Channel N ขึ้นจากการไบแอสที่ขา Gate ยิ่งเพิ่มค่า  $V_{GS}$  ให้เป็นบวกมากขึ้น ก็จะทำให้เกิด Channel N ที่มากขึ้นกระแส Drain ( $I_D$ ) ก็จะสามารถไหลได้เพิ่มมากขึ้นตามด้วย แต่เมื่อปรับ  $V_{GS}$  ให้เป็นค่าลบจะไม่เกิด Channel N ขึ้น เพราะอิเล็กตรอนบริเวณที่ติดกับฉนวนจะยิ่งถูกผลักให้ห่างออกไป ดังนั้นการทำงานของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด N-Channel จะ

เกิดไหลของกระแส Drain ( $I_D$ ) ได้ ต่อเมื่อทำการไบแอสที่ขา Gate ด้วยไฟบวกเท่านั้น ทำนองเดียวกันมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด P-Channel จะมีหลักการทำงานเช่นเดียวกันกับมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิด N-Channel เพียงแต่ต้องไบแอสด้วยแรงดันไฟลบ จึงจะทำให้เกิดกระแส Drain ( $I_D$ ) ไหลผ่านวงจรถัดไป เพราะอำนาจไฟฟ้าลบลบจากขั้วลบของแหล่งจ่าย จะผลักดิ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้กับขั้วของขา Gate ให้ห่างออกไป ทำให้มีพื้นที่ว่างมากขึ้นเปรียบเสมือนเป็นพื้นที่ของ P ในเนื้อสารหลักชนิด N (N-type Substrate) ทำให้เกิดเป็น Channel P ขึ้นมาเชื่อมต่อทางเดินของกระแส Drain ( $I_D$ ) ให้สามารถไหลผ่านวงจรถัดไป

### 2.3.4 ย่านการทำงานของมอสเฟต

การแบ่งย่านการทำงานของมอสเฟตพิจารณาจากการจัดไบแอสของมอสเฟต ได้แก่ แรงดันคร่อมขา Gate-Source ( $V_{GS}$ ), แรงดันคร่อมขา Drain-Source ( $V_{DS}$ ) และแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage,  $V_T$ ) สามารถแบ่งช่วงการทำงานออกได้เป็น 3 ย่าน (Region) ดังต่อไปนี้

1. ช่วงคัทออฟ (Cutoff Region): ( $V_{GS} < V_T$ )

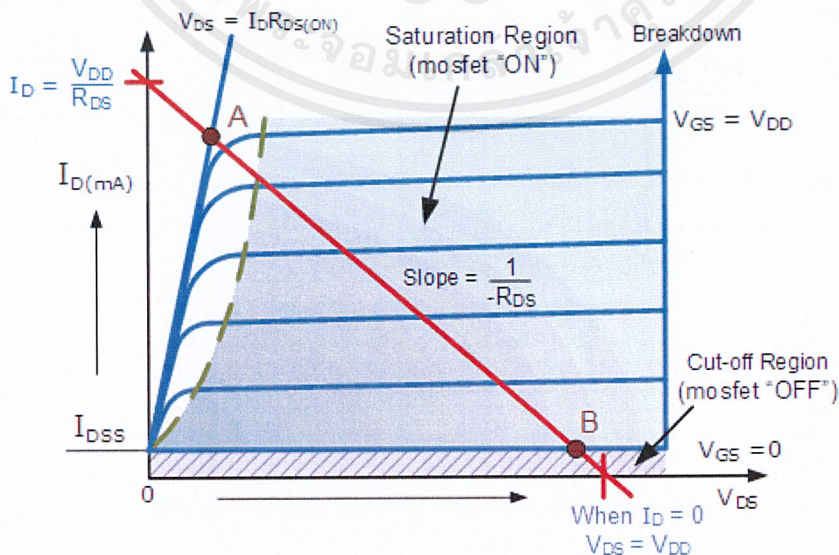
ช่วงคัทออฟคือช่วงที่มอสเฟตยังไม่มีการทำงาน กรณีนี้จะไม่เกิด Channel ของกระแสจึงทำให้มอสเฟตไม่สามารถนำกระแส Drain ( $I_D$ ) ให้ไหลผ่านได้

2. ช่วงเชิงเส้น (Linear Region): ( $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ )

ช่วงเชิงเส้น เป็นช่วงที่แรงดันไบแอสที่คร่อมขา Gate-Source มีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS} > V_T$ ) และแรงดันที่คร่อมขา Drain-Source มีค่าน้อยกว่าแรงดันคร่อมที่ขา Gate-Source ลบด้วยแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ )

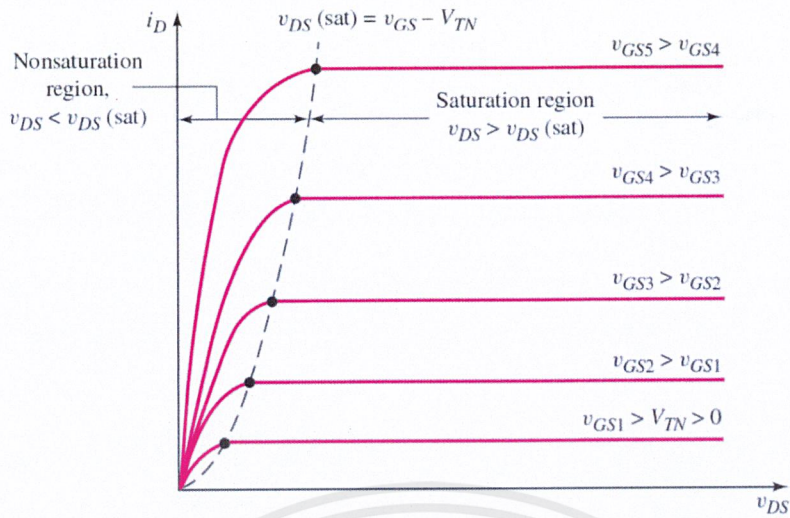
3. ช่วงอิ่มตัว (Saturation Region): ( $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ )

ช่วงอิ่มตัว เป็นช่วงที่แรงดันไบแอสที่คร่อมขา Gate-Source มีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS} > V_T$ ) และแรงดันที่คร่อมขา Drain-Source มีค่ามากกว่าแรงดันคร่อมที่ขา Gate-Source ลบด้วยแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ )



รูปที่ 2.10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของมอสเฟต (MOSFET Characteristic Curve)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงย่านการทำงานในช่วงต่าง ๆ ของมอสเฟต



### บทที่ 3 วิธีดำเนินการ

#### 3.1 ศึกษาข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียม (Lithium Battery Specification)

#### 3. Product specification (RT : 25±2°C)

No.	Item	Standard	Remark
3.1	Nominal capacity	90 Ah	RT 1C
3.2	Min capacity	89.5 Ah	
3.3	Internal impedance	0.5±0.1 mOhm	RT, 1000 Hz
3.4	Nominal voltage	3.2V	
3.5	Weight	1920 ± 20g	
3.6	Voltage range	3.65 ~ 2.00V	
3.7	Recommended charge current	≤ 1.0 C	
3.8	Recommended discharge current	≤ 1.0 C	
3.9	Max continuous charge current	2C	RT
3.10	Max continuous discharge current	3C	RT
3.11	Max pulse discharge current	5C	RT, 10x, SOC ≥20%
3.12	Cycle life	> 2000 cycle capacity retention ≥ 80%	RT, 1C, 100% DOD
3.13	Charging temperature	0 ~ 45°C	
3.14	Discharging temperature	-20 ~ 55°C	
3.15	Storage temperature	-10 ~ 30°C	
3.16	Terminal torsion	≤ 8.0 N.m	
3.17	Appearance	No break, scratch, contamination, leakage	

รูปที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม

จากรูปที่ 3.1 สังเกตได้ว่ามี 4 หัวข้อสำคัญที่มีความน่าสนใจ โดยในแต่ละหัวข้อถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาและออกแบบวงจรของระบบควบคุมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียม โดยจากข้อมูลจำเพาะสามารถนำมาออกแบบวงจรได้ด้วยทั้ง 3 วงจรได้แก่ 1) วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่สูงเกินจุดสูงสุด (Over Voltage Protection) 2) วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ที่แรงดันต่ำกว่าค่าน้อยสุดของตัวแบตเตอรี่ (Lower Voltage Protection) และ 3) วงจรป้องกันการไหลของกระแสที่มากเกินไป ขณะกักเก็บและคายประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Current Protection)

## 3.2 ศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่

### 3.2.1 การแปลงเชิงปริพันธ์ของแบบจำลอง

จากสมการแบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ที่ (2.1) และ (2.2) สามารถดูพฤติกรรมการคายประจุของแบตเตอรี่ได้ โดยการแปลงเชิงปริพันธ์จากการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) ทำให้เกิดความเป็นเชิงเส้นของโดเมนที่อยู่ในรูปเวลา  $f(t)$  แปลงให้อยู่ในโดเมน  $S$  ที่เป็นฟังก์ชัน  $F(S)$  ช่วยให้การหาผลลัพธ์ของอนุพันธ์ที่ซับซ้อนของโดเมนเวลา เป็นสมการเชิงพีชคณิตในรูปแบบที่ง่ายขึ้นในโดเมน  $S$

ผลการแปลงลาปลาซของสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะแสดงดังต่อไปนี้

$$-V_{oc}(S) + R_s I_b(S) + V_c(S) + V_b(S) = 0 \quad (3.1)$$

$$I_b(S) = \left[ \frac{1+sR_p C_p}{R_p} \right] V_c(S) \quad (3.2)$$

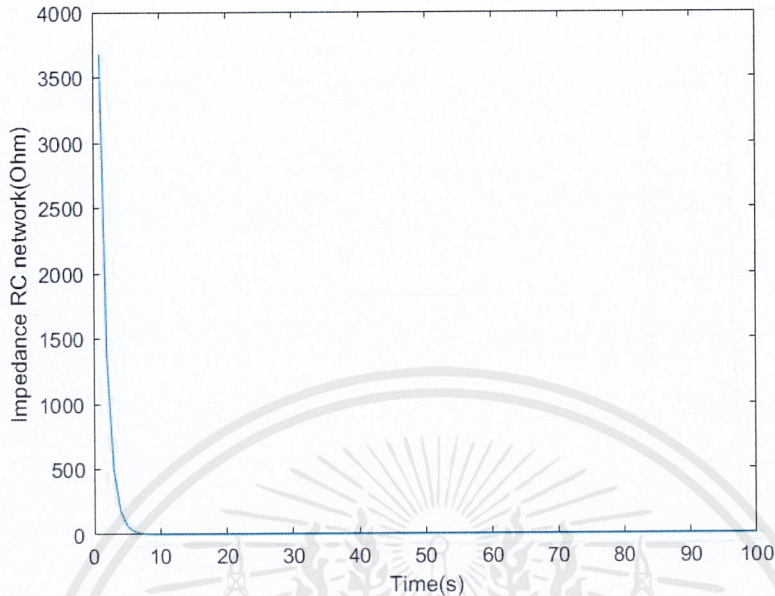
จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) สามารถหา Transfer Function ของแบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่แล้วทำการแปลงลาปลาซผกผัน (Inverse Laplace Transform) เพื่อหาสมการสุดท้ายในโดเมนเวลาที่ใช้ในการสร้างกราฟเพื่อดูพฤติกรรมของเซลล์แบตเตอรี่ โดยสมการสุดท้ายสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$v_b(t) = v_{oc}(t) - \left[ R_s + \frac{1}{C_p} e^{-t/R_p C_p} \right] I_b(t) \quad (3.3)$$

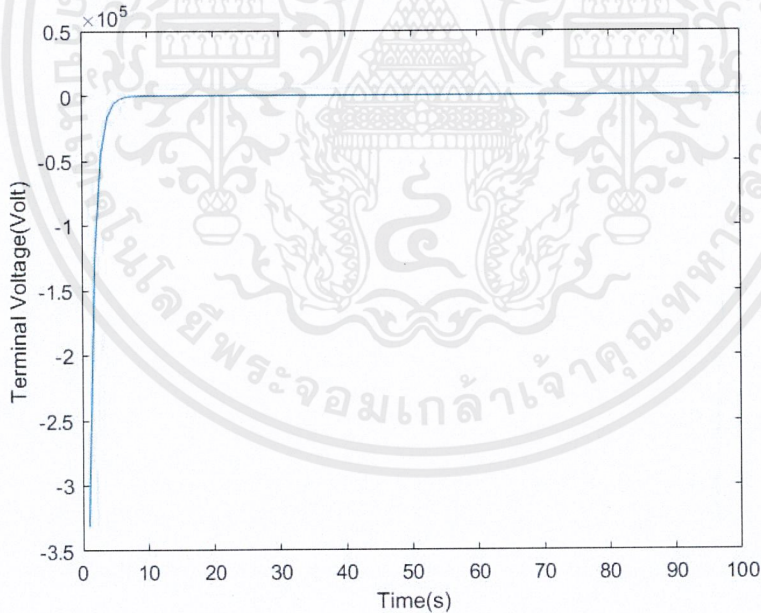
จากสมการที่ (3.3) จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรที่อยู่ในทอมเวลา 3 ตัวแปรกับอีก 1 พจน์คือพจน์ของค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  เมื่อกำหนดให้แรงดันเริ่มต้นของเซลล์แบตเตอรี่  $V_{oc}(t)$  เป็นค่าคงที่ที่มีค่าแน่นอน โดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.1 ในหัวข้อที่ 3.4 Nominal Voltage = 3.2 Volt ดังนั้น  $V_{oc}(t) = V_{oc} = 3.2$  Volt เช่นเดียวกัน เมื่อกำหนดให้กระแสที่ไหลออกจากเซลล์แบตเตอรี่  $I_b(t)$  เป็นค่าคงที่เช่นกันโดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.1 ในหัวข้อที่ 3.1 Nominal Capacitor = 90 Ah. ดังนั้นกระแสที่ไหลออกจากเซลล์แบตเตอรี่  $I_b(t) = I_b = 90$  Ah.

การดูพฤติกรรมของเซลล์แบตเตอรี่สามารถจำลองผ่านโปรแกรม MABTLAB โดยกำหนดตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับโดเมนเวลาเป็นค่าคงที่และสร้างกราฟเทียบกับเวลา เพื่อดูพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง ในที่นี้การดูพฤติกรรมจะสุ่มตัวแปรค่าคงที่หลายค่า เพื่อดูความเป็นได้ของการเปลี่ยนแปลงทางพฤติกรรมของเซลล์แบตเตอรี่ที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยค่าความต้านทานภายใน ( $R_s$ ) ของแบตเตอรี่จะมีค่าน้อยมาก ในที่นี้กำหนดให้เป็นค่าคงที่อีกตัวโดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.1 ในหัวข้อ 3.3 Internal Impedance มีค่าเท่ากับ  $0.5 \pm 0.1$  M $\Omega$  ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าความต้านทานภายใน ( $R_s$ ) มีค่าเท่ากับ 0.0005 M $\Omega$  ดังนั้นตัวแปรที่จะทำการสุ่มค่าเหลือเพียง 2 ตัวเท่านั้นคือ  $R_p$  และ  $C_p$  ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ดูพฤติกรรมตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันสำหรับแบตเตอรี่

การสุ่มครั้งแรก กำหนดให้ค่าความต้านทาน  $R_p$  และค่าความจุ  $C_p$  มีค่าสูง กำหนดให้เท่ากับ  $10,000 \Omega$  และ  $100 \mu F$  ตามลำดับ โดยพฤติกรรมจากการสุ่มครั้งแรกสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3. 2 ค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งแรก

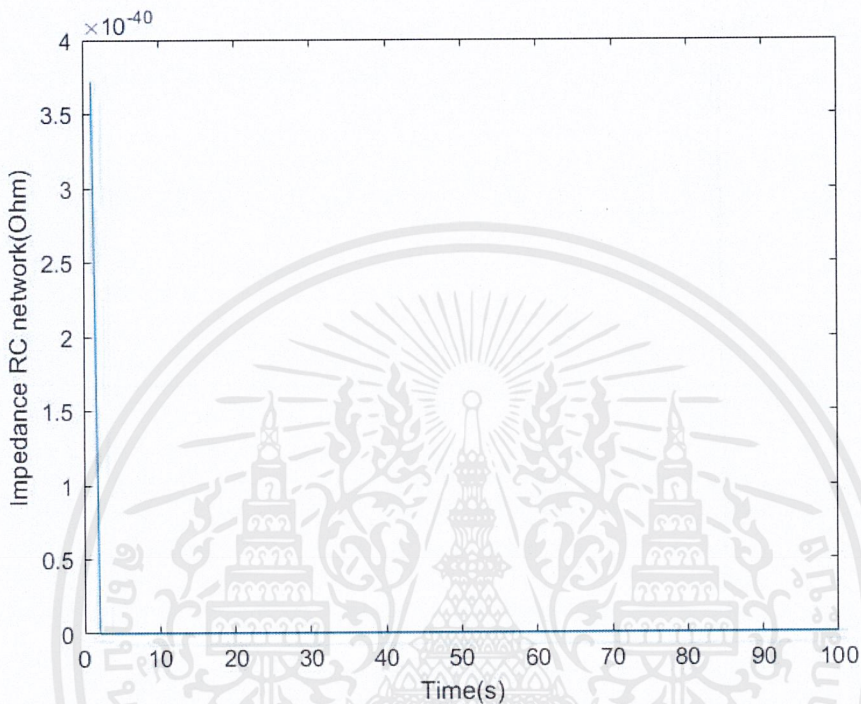


รูปที่ 3.3 แรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่วัดได้ เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งแรก

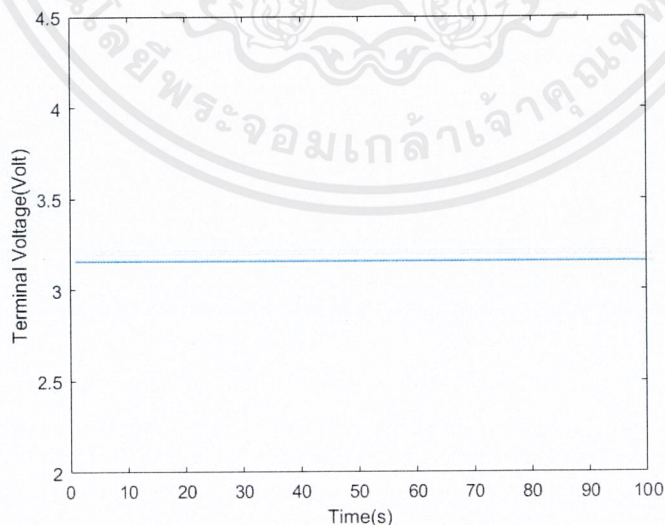
จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นค่าของค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะเห็นได้ว่าช่วง 17 วินาทีแรกค่าค่าของค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  มีค่าที่สูงมาก แต่หลังจากผ่านวินาทีที่ 17 ไป ค่าของค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลต่อแรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่วัดได้ดูได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 โดยในช่วง 23 วินาทีแรกแรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่วัดได้จะมีค่าน้อยมากแล้วค่อยๆเพิ่มขึ้นมาจนถึงวินาทีที่ 24 ค่าแรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่วัดได้จะเข้าสู่สถานะคงที่ที่แรงดันเท่ากับ 3.1550 V

การสุ่มครั้งที่สอง ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_p$  ให้มีค่าน้อยลง และค่าความจุ  $C_p$  มีค่าเท่าเดิม กำหนดให้เท่ากับ  $100 \Omega$  และ  $100 \mu F$  ตามลำดับ โดยพฤติกรรมจากการสุ่มครั้งที่สองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



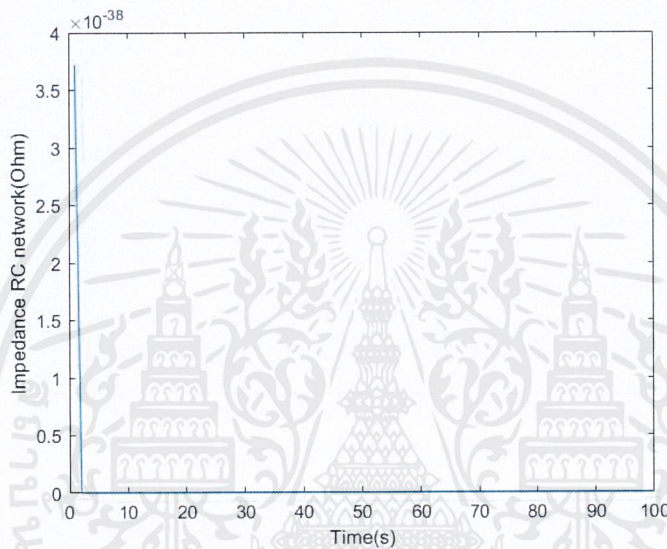
รูปที่ 3.4 ค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งที่สอง



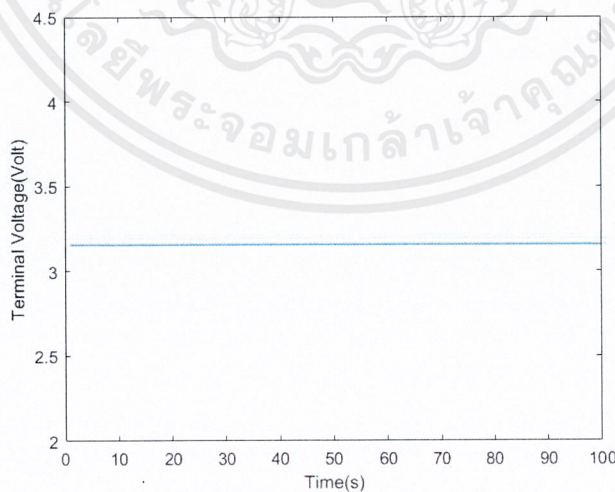
รูปที่ 3.5 แรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่วัดได้ เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งที่สอง

จากรูปที่ 3.4 สังเกตได้ว่าค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะมีความแตกต่างจากการสุ่มครั้งแรกหรือตามรูปที่ 3.3 อยู่มาก โดยในการสุ่มครั้งที่สองค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  ตั้งแต่เริ่มแรกมีค่าที่น้อยมากจนใกล้เคียงศูนย์จนพอถึงวินาทีที่ 8 ค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  มีค่าเป็น  $0 \Omega$  แต่เมื่อดูจากรูปที่ 3.5 สังเกตได้ว่าค่าแรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่วัดได้ มีค่าคงที่ตั้งแต่เริ่มต้นคือ  $3.1550 \text{ V}$

การสุ่มครั้งที่สาม ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_p$  ให้มีค่าเท่ากับการสุ่มครั้งแรก และค่าความจุ  $C_p$  มีค่าน้อยลง กำหนดให้เท่ากับ  $10,00 \Omega$  และ  $1 \mu\text{F}$  ตามลำดับ โดยพฤติกรรมจากการสุ่มครั้งที่สามสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 ค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งที่สาม



รูปที่ 3.7 แรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่วัดได้ เทียบกับเวลา (s) จากการสุ่มตัวแปรครั้งที่สาม

จากรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 สังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการสุ่มตัวแปรมีค่าที่เท่ากันกับการสุ่มตัวแปรครั้งที่สองหรือดูได้จากรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5

จากการสุ่มตัวแปรของค่าความต้านทาน  $R_p$  และค่าความจุ  $C_p$  ใน 3 แบบ สังเกตได้ว่าเมื่อมีค่าความต้านทาน  $R_p$  มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความจุ  $C_p$  หรือ ค่าความต้านทาน  $R_p$  มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าความจุ  $C_p$  จะทำให้ค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุดตั้งแต่เริ่มต้น แต่ถ้าค่าความต้านทาน  $R_p$  และค่าความจุ  $C_p$  มีความสมดุลกัน ส่งผลให้ค่าความต้านทานรวมของการต่อขนานกันระหว่าง  $R_p$  และ  $C_p$  มีค่ามากในช่วงแรกเริ่มแล้วค่อยลงจนเข้าใกล้ศูนย์ในเวลาต่อมา โดยมีผลต่อค่าแรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่วัดได้ ที่ในช่วงแรกจะมีค่าน้อยมากแล้วเพิ่มขึ้นจนถึงค่าคงที่โดยพฤติกรรมที่ได้จากการดูแรงดันสุดท้ายของแบตเตอรี่ที่วัดได้ สามารถนำมาประยุกต์ในการสร้างวงจรที่ใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ได้ในภายหน้า ว่ามีความต้องการลักษณะการใช้งานตัวแบตเตอรี่แบบไหน จึงจัดทำวงจรให้สอดคล้องต่อความต้องการในการใช้งาน

### 3.3 ศึกษาการออกแบบของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection)

จากรูปที่ 3.1 ในหัวข้อที่ 3.6 Voltage Range สังเกตได้ว่าค่ามากที่สุดของแรงดันไฟฟ้าสำหรับเซลล์แบตเตอรี่คือ 3.65 V ดังนั้นวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection) จะทำงานเมื่อแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าเท่ากับหรือสูงกว่า 3.65 V แต่ถ้าแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าต่ำกว่า 3.65 V วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection) จะยังไม่ทำงาน

ในทางดิจิทัล หลักการทำงานของวงจรเปรียบเสมือนสวิตช์ที่มีสัญญาณทางไฟฟ้าที่มาจากแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่อยู่ต่ำกว่า 3.65 V สวิตช์จะยังเปิดอยู่ (Normal Open Switch) ทำให้สัญญาณที่ส่งออกจากวงจรเป็นสถานะต่ำ (Logic Low) แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีเท่ากับหรือสูงกว่า 3.65 V สวิตช์จะปิดตัวลง แล้วทำให้สัญญาณที่ส่งออกจากวงจรมีสถานะสูง (Logic High)

สำหรับภายในวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ ใช้หลักการเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) ในการเปิดปิดสวิตช์ ซึ่งมีอุปกรณ์หลักทางอิเล็กทรอนิกส์คือออปแอมป์ (Op-Amp) ในการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแรงดันจากเซลล์แบตเตอรี่ และแรงดันอ้างอิงที่กำหนดไว้ภายในวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่

หลักการทำงานของออปแอมป์สำหรับการเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้คือ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขาอินพุตแบบไม่กลับเฟสมากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขาอินพุตแบบกลับเฟส แรงดันเอาต์พุตที่ออกมาจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงทางขาบวก ( $V_{s+}$ ) หรือก็คือมีสถานะทางสัญญาณแบบสูง (Logic High) แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ขาอินพุตแบบไม่กลับเฟสน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขาอินพุตแบบกลับเฟส แรงดันเอาต์พุตจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงทางขาลบ ( $V_{s-}$ ) หรือก็คือมีสถานะทางสัญญาณแบบต่ำ (Logic Low) ดังนั้นจึงกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางขาอินพุตแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Input) และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเข้าทางขาอินพุตแบบกลับเฟส (Inverting Input) เพื่อให้สถานะของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection) เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนด

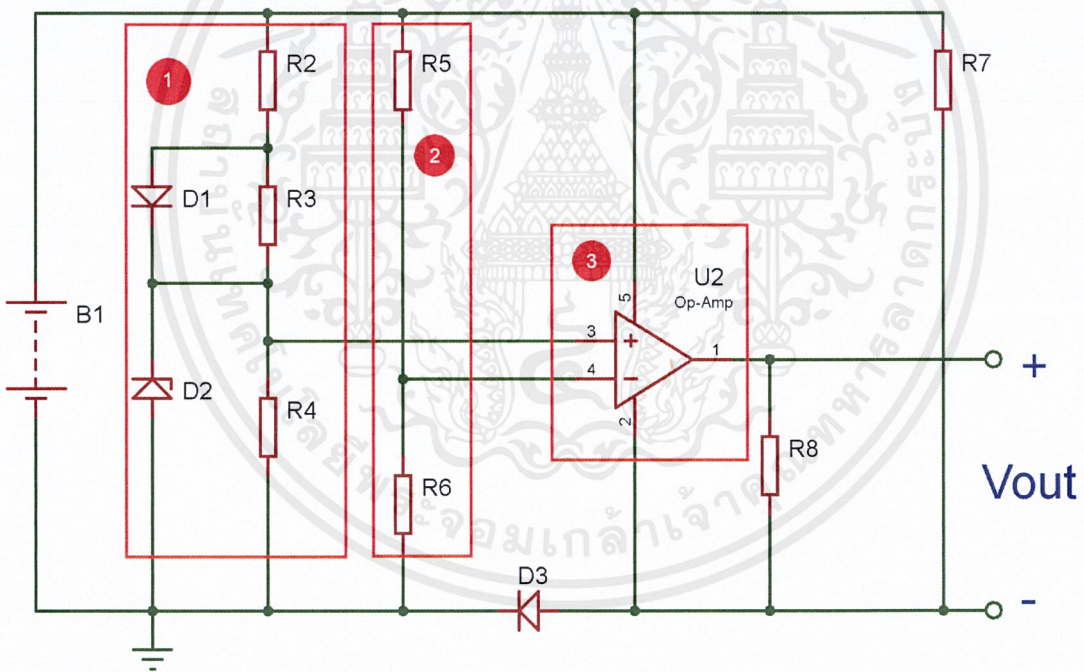
เงื่อนไขของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ สามารถเขียนในรูปพีชคณิตเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$v_{over}(t) = 1 \text{ when } v_{over}(t) \geq 3.65 \text{ volt.} \quad (3.4)$$

$$v_{over}(t) = 0 \text{ when } v_{over}(t) < 3.65 \text{ volt.} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $V_{over}(t)$  คือค่าเอาต์พุตของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection) มี 2 สถานะคือสถานะสูง (Logic High) และสถานะต่ำ (Logic Low)

จากการออกแบบวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection) สามารถแสดงโครงสร้างของวงจรได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่

จากรูปที่ 3.8 จะสังเกตเห็นว่ามีส่วนสำคัญสำหรับหลักการทำงานด้วยกัน โดยแต่ละส่วนมีความสำคัญดังต่อไปนี้คือ ส่วนที่ 1 เป็นส่วนของวงจรในการรับแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แบตเตอรี่ก่อนส่งแรงดันเข้าไปที่ขาอินพุตแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Input) ของออปแอมป์ (Op-Amp) ในส่วนที่ 2 เป็นส่วนของวงจรของแรงดันอ้างอิงในการเป็นเกณฑ์กำหนดของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในที่นี้เกณฑ์กำหนดคือ 3.65 V โดยส่งแรงดันเข้าที่ขาอินพุตแบบกลับเฟส (Inverting Input) และส่วนสุดท้ายคือส่วนที่ 3 เป็นส่วน

ของออปแอมป์ใช้สำหรับการเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) และเป็นส่วนที่ส่งสัญญาณออกจากวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ โดยสัญญาณมีสองสถานะคือสถานะสูง (Logic High) และสถานะต่ำ (Logic Low)

### 3.4 ศึกษาการออกแบบของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Lower Voltage Protection)

จากรูปที่ 3.1 ในหัวข้อที่ 3.6 Voltage Range สังเกตได้ว่าค่าต่ำสุดของแรงดันไฟฟ้าสำหรับเซลล์แบตเตอรี่คือ 2.00 V ดังนั้นวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Lower Voltage Protection) จะทำงานเมื่อแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่า 2.00 V แต่ถ้าแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าสูงกว่า 2.00 V วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ จะยังไม่ทำงาน

เช่นเดียวกันกับวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ ในทางดิจิทัล หลักการทำงานของวงจรเปรียบเสมือนสวิตช์ที่มีสัญญาณทางไฟฟ้าที่มาจากแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่อยู่สูงกว่า 2.00 V สวิตช์จะยังเปิดอยู่ (Normal Open Switch) ทำให้สัญญาณที่ส่งออกจากวงจรเป็นสถานะต่ำ (Logic Low) แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีเท่ากับหรือต่ำกว่า 2.00 V สวิตช์จะปิดตัวลงแล้วทำให้สัญญาณที่ส่งออกจากวงจรมีสถานะสูง (Logic High)

วงจรรายในจะเหมือนกับวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่คือมีออปแอมป์ทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) ระหว่างแรงดันจากเซลล์แบตเตอรี่และแรงดันอ้างอิงที่กำหนดไว้ในวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่

หลักการทำงานของออปแอมป์ (Op-Amp) จะแตกต่างจากวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ ตรงที่การจ่ายแรงดันเข้าออปแอมป์คือแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่เข้าทางขาอินพุตแบบกลับเฟส (Inverting Input) และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเข้าทางขาอินพุตแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Input) เพื่อให้สถานะของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนด

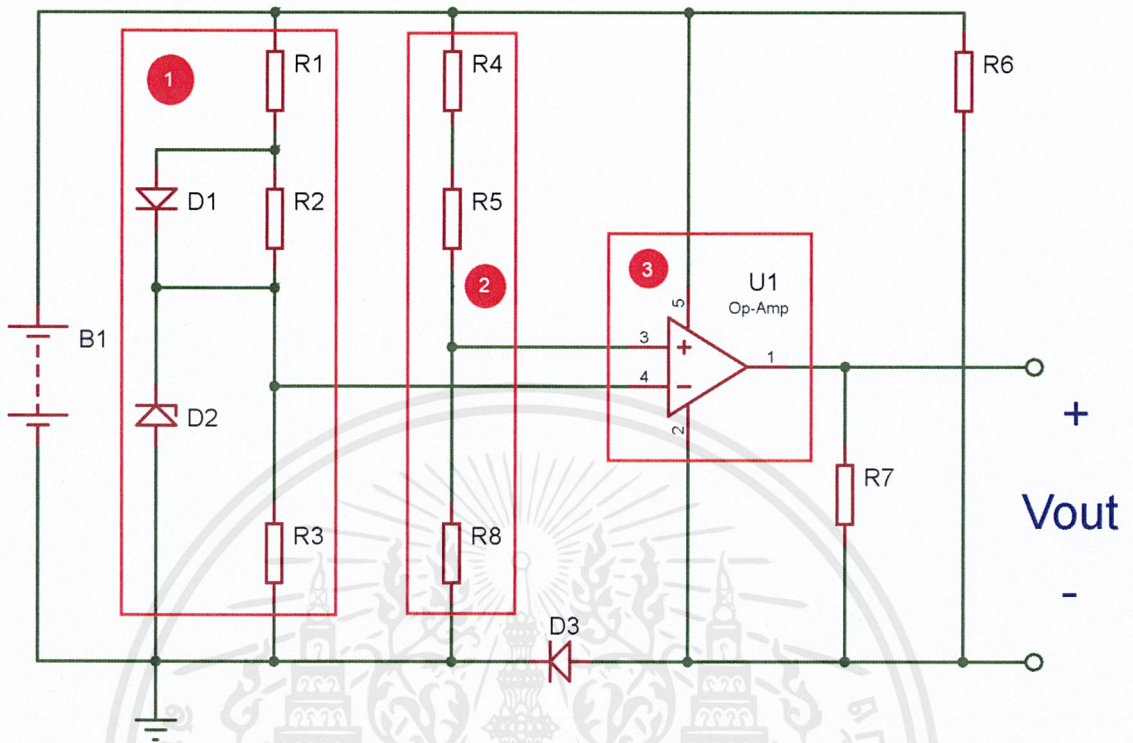
เงื่อนไขของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ สามารถเขียนในรูปพีชคณิต เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$v_{lower}(t) = 1 \text{ when } v_{lower}(t) \leq 2.00 \text{ volt.} \quad (3.6)$$

$$v_{lower}(t) = 0 \text{ when } v_{lower}(t) > 2.00 \text{ volt.} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $V_{lower}(t)$  คือค่าเอาต์พุตของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ มี 2 สถานะคือสถานะสูง (Logic High) และสถานะต่ำ (Logic Low)

จากการออกแบบวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินค่าร้อยละของเซลล์แบตเตอรี่ สามารถแสดงโครงสร้างของวงจรได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินค่าร้อยละของเซลล์แบตเตอรี่

จากรูปที่ 3.9 จะสังเกตเห็นว่ามีส่วนสำคัญสำหรับหลักการทำงานด้วยกัน โดยแต่ละส่วนมีความสำคัญดังต่อไปนี้คือ ส่วนที่ 1 เป็นส่วนของวงจรในการรับแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แบตเตอรี่ก่อนส่งแรงดันเข้าไปที่ขาอินพุตแบบกลับเฟส (Inverting Input) ของออปแอมป์ (Op-Amp) ในส่วนที่ 2 เป็นส่วนของวงจรของแรงดันอ้างอิงในการเป็นเกณฑ์กำหนดของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในที่นี้เกณฑ์กำหนดคือที่ 2.00 V โดยส่งแรงดันเข้าที่ขาอินพุตแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Input) และส่วนสุดท้ายคือส่วนที่ 3 เป็นส่วนของออปแอมป์ใช้สำหรับการเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) และเป็นส่วนที่ส่งสัญญาณออกจากวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินค่าร้อยละของเซลล์แบตเตอรี่ โดยสัญญาณมีสองสถานะคือสถานะสูง (Logic High) และสถานะต่ำ (Logic Low)

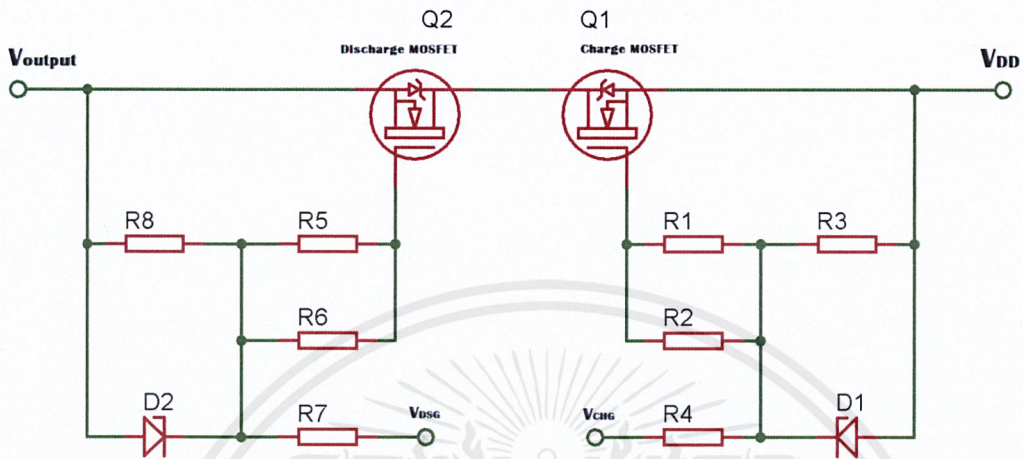
### 3.5 ศึกษาการออกแบบวงจรป้องกันการไหลของกระแสที่มากเกินไปขณะกักเก็บและคายประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Current Protection)

สำหรับการออกแบบวงจรป้องกันการไหลของกระแสที่มากเกินไป ขณะกักเก็บและคายประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Current Protection) อุปกรณ์หลักทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้คือมอสเฟต (MOSFET) โดยมอสเฟตแต่ละหมายเลขจะมีรายละเอียดในช่วงการใช้งานที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำการทดลองประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการใช้งานมอสเฟตในหลายๆหมายเลข เพื่อหามอสเฟตที่ใกล้เคียงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้องการใช้งานและมีต้นทุนในการทดลองหรือผลิตน้อยถึงน้อยที่สุด โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของวงจร

### 3.5.1 คุณลักษณะเฉพาะของมอสเฟต (Characteristic MOSFET) ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.10 วงจรสำหรับการทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต

จากรูปที่ 3.10 เป็นวงจรตัวอย่างสำหรับใช้ทดลองคุณสมบัติ (Specification) โดยรายละเอียดของวงจรแบ่งได้เป็น 2 ฝั่งคือ ฝั่งขวาเป็นวงจรขับเคลื่อนกระแสขณะกักเก็บประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ และฝั่งซ้ายเป็นวงจรขับเคลื่อนคายประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ โดยทั้งสองวงจรต่อกันอยู่ หลักการทำงานเบื้องต้นของวงจรแต่ละฝั่งคือเมื่อมีสัญญาณทางไฟฟ้าเข้ามาทางขา Gate ของมอสเฟต (MOSFET) ที่มีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage,  $V_T$ ) ของมอสเฟต (MOSFET) ทำให้ Channel ภายในมอสเฟต (MOSFET) เปิดและสามารถขับเคลื่อนกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้ แต่ถ้าสัญญาณทางไฟฟ้าที่เข้ามาทางขา Gate ของมอสเฟต (MOSFET) ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage,  $V_T$ ) ของมอสเฟต (MOSFET) ทำให้ Channel ของมอสเฟต (MOSFET) ปิดตัวลง ทำให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) ได้ และเมื่อนำวงจรขณะกักเก็บประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้ามาต่ออนุกรมกัน

การทำงานโดยรวมคือเมื่อวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้าหรือคายประจุไฟฟ้าวงจรใดวงจรหนึ่งทำงาน อีกวงจรหนึ่งจะไม่ทำงานเช่นมีสัญญาณทางไฟฟ้าที่มากกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage,  $V_T$ ) เข้าที่ขา Gate ของวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้าที่เข้าขา Gate ของวงจรคายประจุไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage,  $V_T$ ) เพื่อไม่ให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าของวงจรคายประจุไฟฟ้าไหลผ่านจากขา Drain ไปขา Source ได้ แต่กระแสและแรงดันไฟฟ้าของวงจรคายประจุไฟฟ้าสามารถไหลจากขา Source ไปขา Drain เนื่องจากมีไดโอด (Diode) เป็นทางเชื่อมคร่อมระหว่างขา Source ไป Drain เพื่อให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าไหลผ่านขา Source ไปขา Drain ได้ แต่จะไม่สามารถไหลย้อนกลับจากขา Drain

ไปหา Source ได้ กระแสและแรงดันไฟฟ้าจะไหลผ่านได้จำเป็นต้องมีสัญญาณทางไฟฟ้าที่มากกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage,  $V_T$ ) เข้าที่ขา Gate จึงจะสามารถไหลผ่านได้

### 3.5.1.1 CRST005N08N

มอสเฟต (MOSFET) หมายเลข CRST05N08N เป็นมอสเฟตที่ได้จากการศึกษามาจากวงจรบอร์ดที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันของบริษัท ผลิตมาจากประเทศจีน ดังนั้นรายละเอียดหรือ Datasheet ของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข CRST05N08N จึงไม่สามารถหาข้อมูลมาแนะนำได้ ดังนั้นคุณสมบัติจำเพาะ (Specification) ของมอสเฟตสามารถหาได้จากการทดลอง

สำหรับมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข CRST05N08N ค่าที่ได้จากการทดลอง เป็นค่าที่ใช้อ้างอิงในการหามอสเฟต (MOSFET) ที่นำมาใช้สร้างต้นแบบขึ้นใหม่ เพื่อพัฒนาเป็นของบริษัทเอง

ผลการทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข CRST05N08N สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 3.1 เมื่อโหลด (Load) ที่ใช้ในการทดลองมีค่าความต้านทานอยู่ที่  $3.66 \Omega$

### 3.5.1.2 IRFP150N

มอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP150N ตามรายละเอียดหรือ Datasheet แรงดันไฟฟ้าที่สามารถทนได้สูงสุด ( $V_{DSS}$ ) คือ 100 V การไหลของกระแส Drain ที่ต่อเนื่องได้มากที่สุด ( $I_D$ ) ที่ 42 A และความต้านทานภายในของมอสเฟตเมื่อมอสเฟตเริ่มทำงาน ( $R_{DS(ON)}$ ) คือ  $0.036 \Omega$  โดยรายละเอียดอื่น ๆ สามารถหาเพิ่มเติมได้ภายใน Datasheet ของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP150N

ผลการทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP150N สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 3.2 เมื่อโหลด (Load) ที่ใช้ในการทดลองมีค่าความต้านทานอยู่ที่  $3.66 \Omega$

### 3.5.1.3 IRFP4227

มอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP4227 ตามรายละเอียดหรือ Datasheet แรงดันไฟฟ้าที่สามารถทนได้สูงสุด ( $V_{DSS}$ ) คือ 200 V การไหลของกระแส Drain ที่ต่อเนื่องได้มากที่สุด ( $I_D$ ) ที่ 130 A และความต้านทานภายในของมอสเฟตเมื่อมอสเฟตเริ่มทำงาน ( $R_{DS(ON)}$ ) คือ  $0.021 \Omega$  โดยรายละเอียดอื่น ๆ สามารถหาเพิ่มเติมได้ภายใน Datasheet ของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP4227

ผลการทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP4227 สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 3.3 เมื่อโหลด (Load) ที่ใช้ในการทดลองมีค่าความต้านทานอยู่ที่  $3.66 \Omega$

### 3.5.1.4 IRF3710

มอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ตามรายละเอียดหรือ Datasheet แรงดันไฟฟ้าที่สามารถทนได้สูงสุด ( $V_{DSS}$ ) คือ 100 V การไหลของกระแส Drain ที่ต่อเนื่องได้มากที่สุด ( $I_D$ ) ที่ 57 A และความต้านทานภายในของมอสเฟตเมื่อมอสเฟตเริ่มทำงาน ( $R_{DS(ON)}$ ) คือ  $0.023 \Omega$  โดยรายละเอียดอื่น ๆ สามารถหาเพิ่มเติมได้ภายใน Datasheet ของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710

ผลการทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 3.4 เมื่อโหลด (Load) ที่ใช้ในการทดลองมีค่าความต้านทานอยู่ที่  $3.66 \Omega$

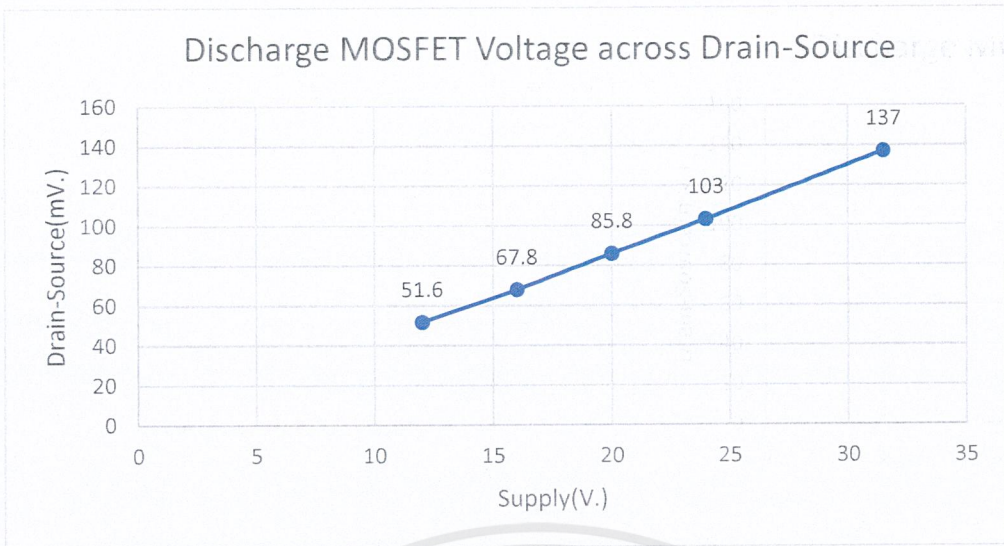
### 3.5.1.5 IRF510

มอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF510 ตามรายละเอียดหรือ Datasheet แรงดันไฟฟ้าที่สามารถทนได้สูงสุด ( $V_{DS}$ ) คือ 100 V การไหลของกระแส Drain ที่ต่อเนื่องได้มากที่สุด ( $I_D$ ) ที่ 5.6 A และความต้านทานภายในของมอสเฟตเมื่อมอสเฟตเริ่มทำงาน ( $R_{DS(ON)}$ ) คือ 0.54  $\Omega$  โดยรายละเอียดอื่น ๆ สามารถหาเพิ่มเติมได้ภายใน Datasheet ของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF510

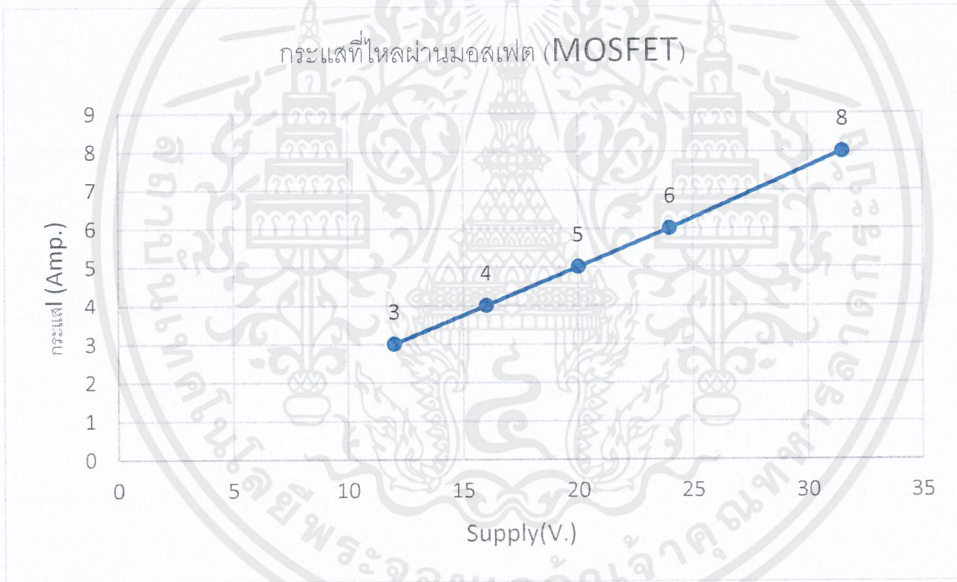
ผลการทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF510 สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 3.5 เมื่อโหลด (Load) ที่ใช้ในการทดลองมีค่าความต้านทานอยู่ที่ 3.66  $\Omega$

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข CRST05N08N

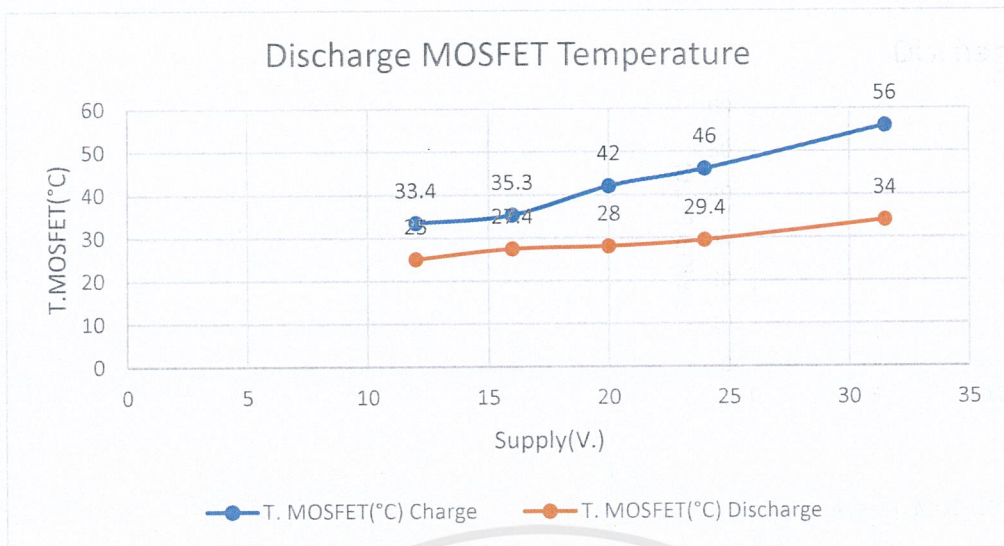
แรงดัน(V.)	12		16		20		24		31.5	
CRST05N08N	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET
แรงดันที่ขา Gate (V.)	0.0003	7.89	0.0003	7.86	0.0001	7.86	0.0002	7.86	0.0003	7.86
แรงดันที่ขา Drain (mV.)	182	146	273	212	584	553	600	580	471	556
แรงดันที่ขา Source (mV.)	939	95	1047	143.6	1360	473	1400	515	1408	418
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV.)	757	51.6	770	67.8	785	85.8	799	103	818	137
แรงดันคร่อมขา Gate-Source (V.)	0.93	7.8	1.04	7.71	1.355	7.39	1.38	7.43	1.444	7.44
อุณหภูมิที่ตัว MOSFET ( $^{\circ}C$ )	33.4	25	35.3	27.4	42	28	46	29.4	56	34
อุณหภูมิที่แผ่น Sink ( $^{\circ}C$ )	27.5	25	29.6	27	31.8	28	33	29.4	39	33.5
อุณหภูมิที่ตัว Load ( $^{\circ}C$ )	36		49		66		91		146	
แรงดันคร่อมที่ Load (V.)	11.11		14.75		18.56		22.3		29.24	
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (Amp.)	3		4		5		6		8	



รูปที่ 3.11 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่าย  
ของมอสเฟตหมายเลข CRST05N08N



รูปที่ 3.12 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่าย  
ของมอสเฟตหมายเลข CRST05N08N



รูปที่ 3.13 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข CRST05N08N

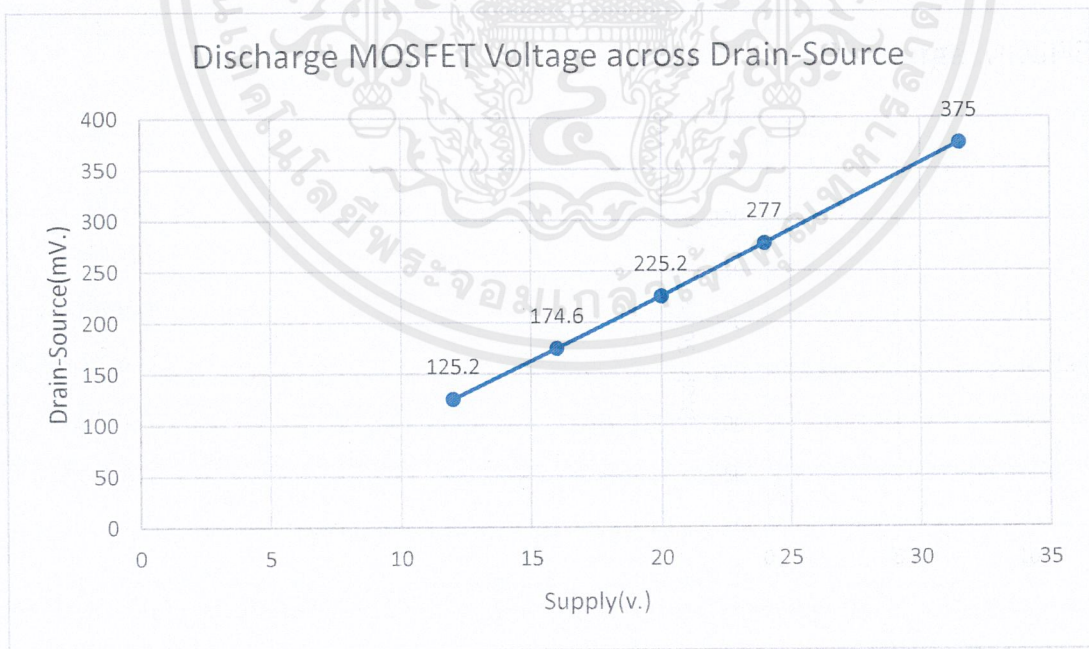
จากรูปที่ 3.11 สังเกตได้ว่าค่าแรงดันคร่อม Drain-Source มีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น (Linear) โดยที่แรงดันของแหล่งจ่ายเริ่มต้นที่ 12 V, 16 V, 20 V, 24 V และแรงดันของแหล่งจ่ายที่มากที่สุดเท่ากับ 31.5 V ได้แรงดันคร่อม Drain-source เท่ากับ 51.6 mV, 67.8 mV, 85.8 mV, 103 mV และ 137 mV ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 3.12 แสดงค่าของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) ของทั้งวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้าและวงจรคายประจุไฟฟ้า มีการเพิ่มขึ้นของกระแสแบบเป็นเชิงเส้น (Linear) ได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เท่ากับ 3, 4, 5, 6 และ 8 A ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย

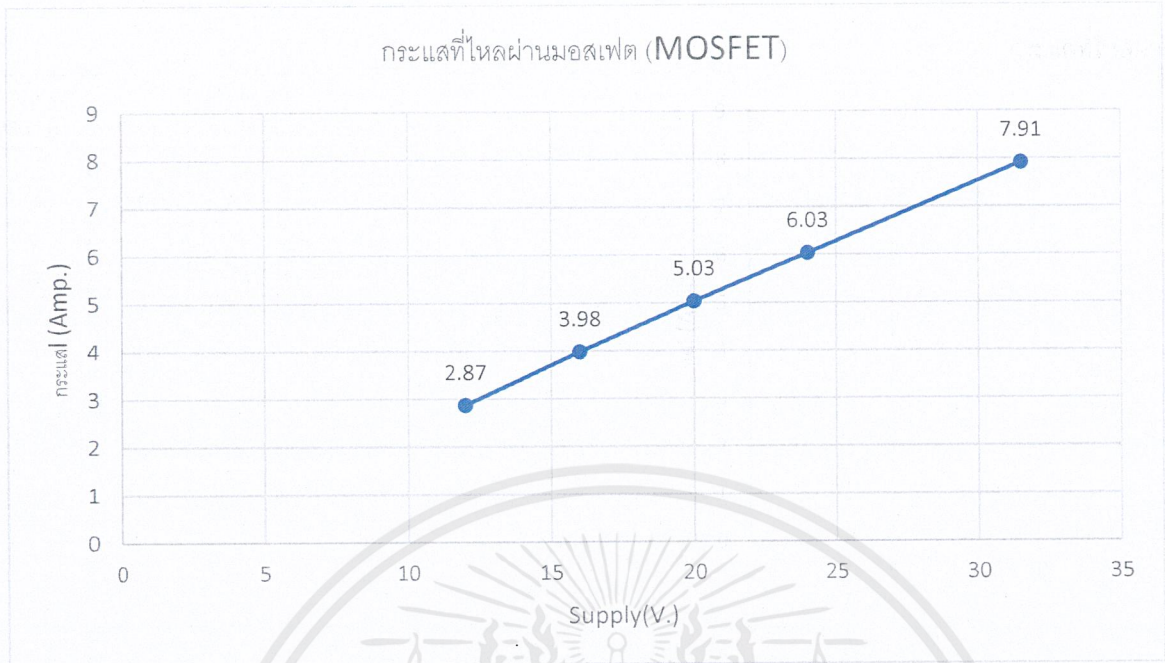
จากรูปที่ 3.13 แสดงค่าของอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟต (MOSFET) มีผลต่อการพิจารณาในการเลือกใช้งานมอสเฟต (MOSFET) ด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟต (MOSFET) ถ้ามีค่าสูงมากเกินไปจะลดประสิทธิภาพและอายุในการใช้งานของมอสเฟต (MOSFET) ให้น้อยลง ค่าของอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟต (MOSFET) ทางวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) เท่ากับ 33.4, 35.3, 42, 46 และ 56 °C ตามลำดับของแหล่งจ่าย ส่วนทางวงจรคายประจุไฟฟ้า (Discharge) เท่ากับ 25, 27.4, 28, 29.4 และ 34 °C ตามลำดับของแหล่งจ่ายเช่นกัน จากทั้งสองวงจรจะเห็นค่าการเพิ่มของอุณหภูมิที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากด้วยระยะเวลาในการทดลองแต่ละช่วงของแรงดันแหล่งใช้ระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของมอสเฟต (MOSFET) จึงมีการเพิ่มขึ้นไม่เป็นเชิงเส้นและสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP150N

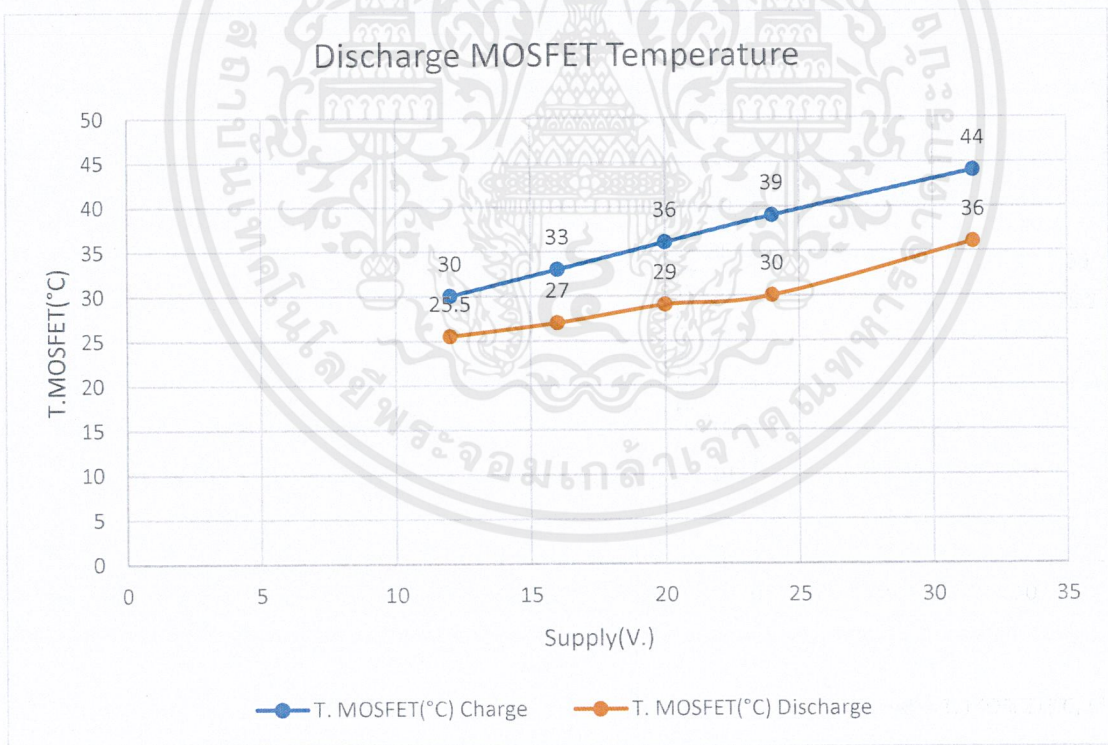
แรงดัน(V.)	12		16		20		24		31.5	
IRFP150N	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET
แรงดันที่ขา Gate (V.)	0.0002	7.96	0.0002	7.96	0.0001	7.96	0.0001	7.96	0.0003	7.96
แรงดันที่ขา Drain (mV.)	227.4	195.4	320	274.5	457	389	784	685	919	831
แรงดันที่ขา Source (mV.)	1003	70.2	1114	98	1269	166.5	1611	415	1.763	453
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV.)	775	125.2	794	174.6	809	225.2	823	277	847	375
แรงดันคร่อมขา Gate-Source (V.)	1.003	7.89	1.114	7.86	1.274	7.79	1.609	7.54	1.761	7.51
อุณหภูมิที่ตัว MOSFET (°C)	30	25.5	33	27	36	29	39	30	44	36
อุณหภูมิที่แผ่น Sink (°C)	27	25	29	27	32	29	35	30	37	33
อุณหภูมิที่ตัว Load (°C)	42		52		66		82		114	
แรงดันคร่อมที่ Load (V.)	10.46		14.5		18.3		21.91		28.95	
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (Amp.)	2.87		3.98		5.03		6.03		7.91	



รูปที่ 3.14 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP150N



รูปที่ 3.15 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP150N



รูปที่ 3.16 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP150N

จากรูปที่ 3.14 สังเกตได้ว่าค่าแรงดันคร่อม Drain-Source มีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น (Linear) โดยที่แรงดันของแหล่งจ่ายเริ่มต้นที่ 12 V, 16 V, 20 V, 24 V และแรงดันของแหล่งจ่ายที่มากที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

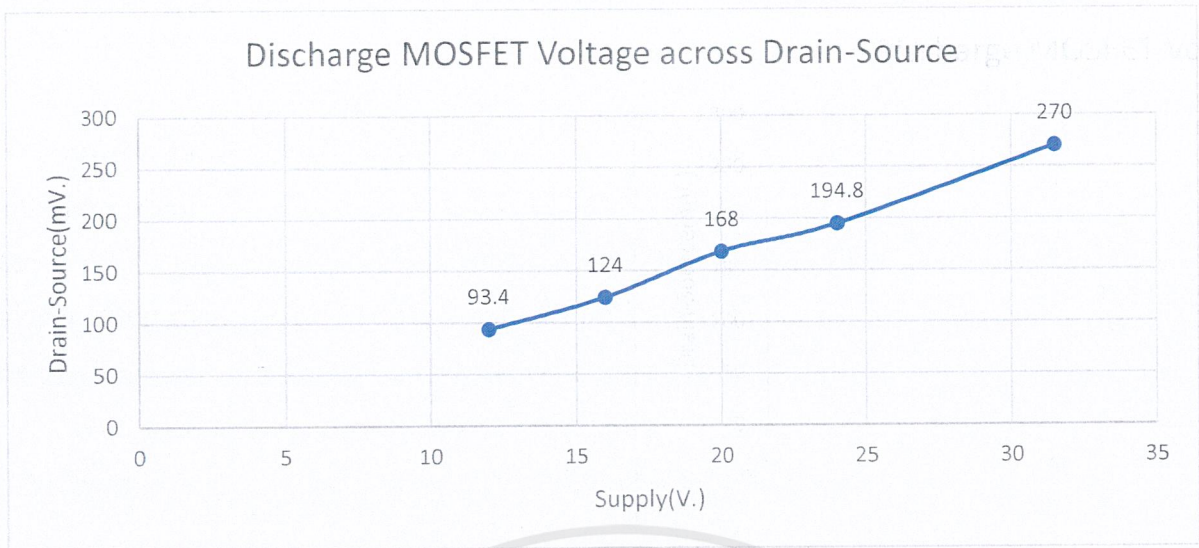
เท่ากับ 31.5 V ได้แรงดันคร่อม Drain-source เท่ากับ 125.2 mV, 174.6 mV, 225.2 mV, 277 mV และ 375 mV ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 3.15 แสดงค่าของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) ของทั้งวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า และวงจรคายประจุไฟฟ้า มีการเพิ่มขึ้นของกระแสแบบเป็นเชิงเส้น (Linear) ได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เท่ากับ 2.87, 3.98, 5.03, 6.03 และ 7.91 A ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย

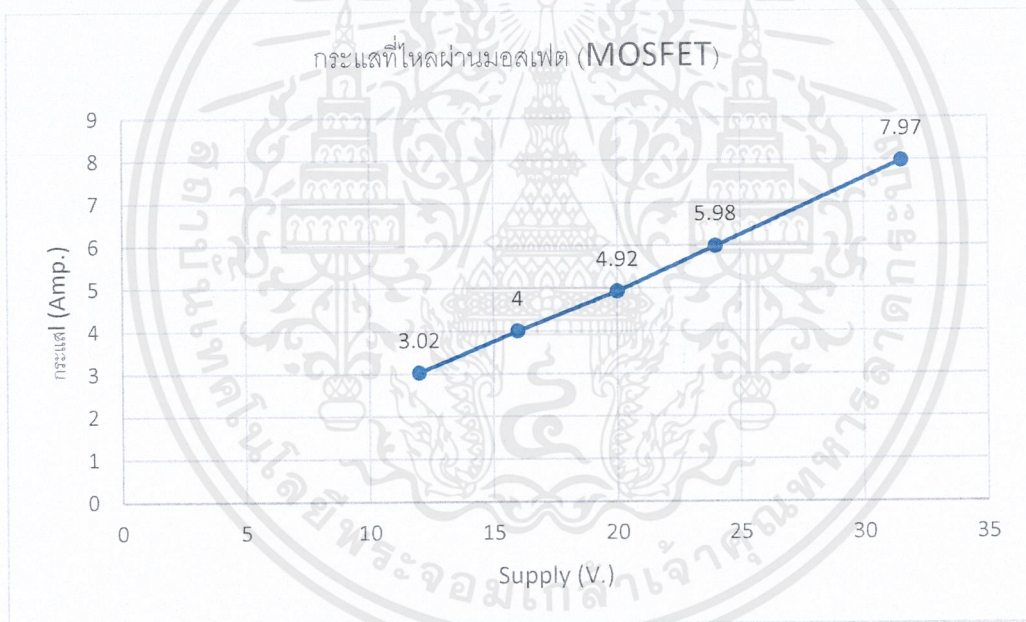
จากรูปที่ 3.16 ค่าของอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟต (MOSFET) ทางวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) เท่ากับ 30, 33, 36, 39 และ 44 °C ตามลำดับของแหล่งจ่าย ส่วนทางวงจรคายประจุไฟฟ้า (Discharge) เท่ากับ 25.5, 27, 29, 30 และ 36 °C ตามลำดับของแหล่งจ่ายเช่นกัน จากทั้งสองวงจรจะเห็นค่าการเพิ่มของอุณหภูมิที่มีความเป็นเชิงเส้นมากกว่ามอสเฟต (MOSFET) หมายเลข CRST05N08N ทั้งนี้เนื่องจากด้วยระยะเวลาในการทดลองแต่ละช่วงของแรงดันแหล่งใช้ระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของมอสเฟต (MOSFET) จึงสามารถคลาดเคลื่อนหรือเปลี่ยนแปลงไปได้

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP4227

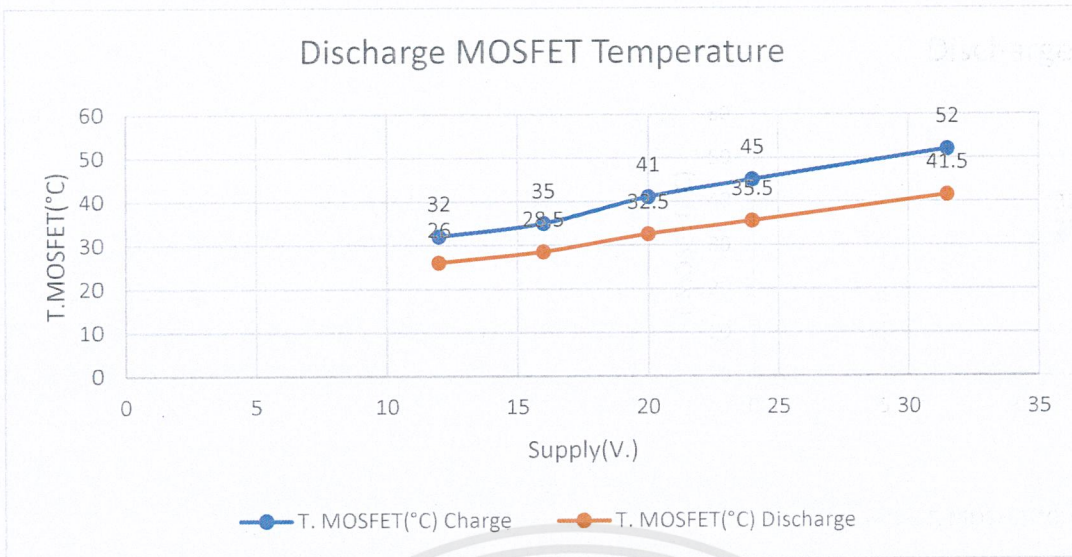
แรงดัน(V.)	12		16		20		24		31.5	
IRFP4227	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET
แรงดันที่ขา Gate (V.)	0.0004	8.01	0.0004	8.01	0.0004	8.01	0.0004	8.01	0.0004	8.01
แรงดันที่ขา Drain (mV.)	225.1	180.4	326	259.2	387	309.2	701	605	810	691
แรงดันที่ขา Source (mV.)	941	87.3	1055	136.3	1120	138.8	1448	408	1579	416
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV.)	715	93.4	729	124	737	168	750	194.8	769	270
แรงดันคร่อมขา Gate-Source (V.)	0.941	7.92	1.055	7.88	1.119	7.88	1.444	7.6	1.576	7.6
อุณหภูมิที่ตัว MOSFET (°C)	32	26	35	28.5	41	32.5	45	35.5	52	41.5
อุณหภูมิที่แผ่น Sink (°C)	27		29.5		33		35.5		39	
อุณหภูมิที่ตัว Load (°C)	35		44		62		81		123	
แรงดันคร่อมที่ Load (V.)	10.99		14.56		17.99		21.88		29.4	
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (Amp.)	3.02		4		4.92		5.98		7.97	



รูปที่ 3.17 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่าย  
ของมอสเฟตหมายเลข IRFP4227



รูปที่ 3.18 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่าย  
ของมอสเฟตหมายเลข IRFP4227



รูปที่ 3.19 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRFP4227

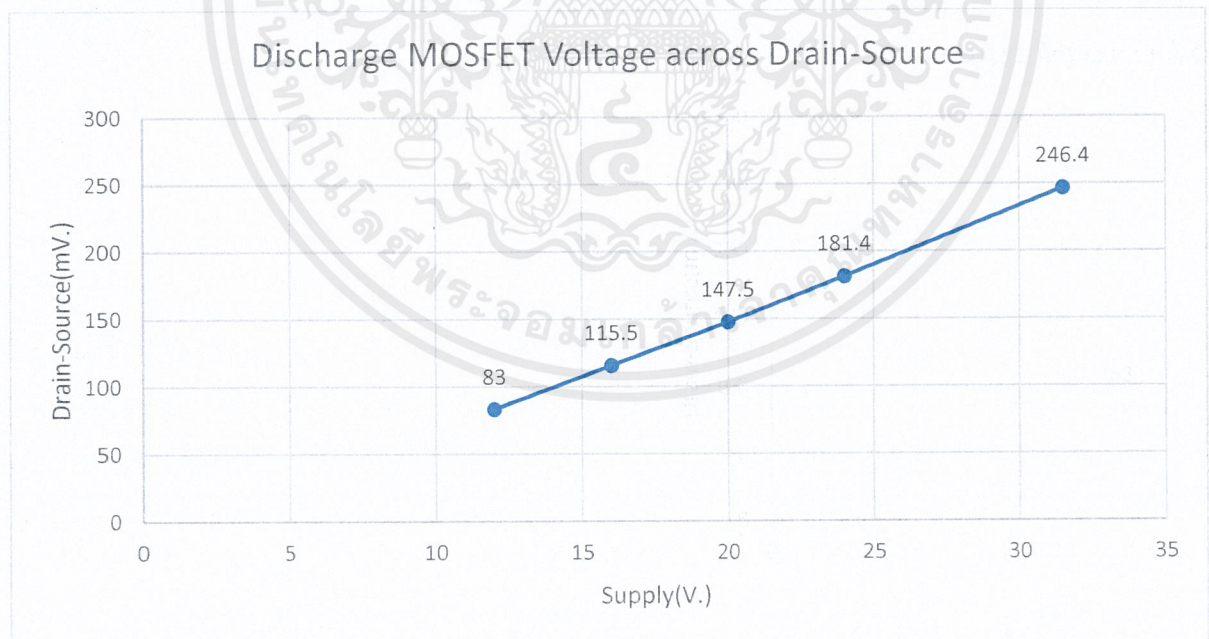
จากรูปที่ 3.17 สังเกตได้ว่าค่าแรงดันคร่อม Drain-Source มีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น (Linear) โดยที่แรงดันของแหล่งจ่ายเริ่มต้นที่ 12 V, 16 V, 20 V, 24 V และแรงดันของแหล่งจ่ายที่มากที่สุดเท่ากับ 31.5 V ได้แรงดันคร่อม Drain-source เท่ากับ 93.4 mV, 124 mV, 168 mV, 194.8 mV และ 270 mV ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 3.18 แสดงค่าของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) ของทั้งวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า และวงจรคายประจุไฟฟ้า มีการเพิ่มขึ้นของกระแสแบบเป็นเชิงเส้น (Linear) ได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เท่ากับ 3.02, 4, 4.92, 5.98 และ 7.97 A ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย

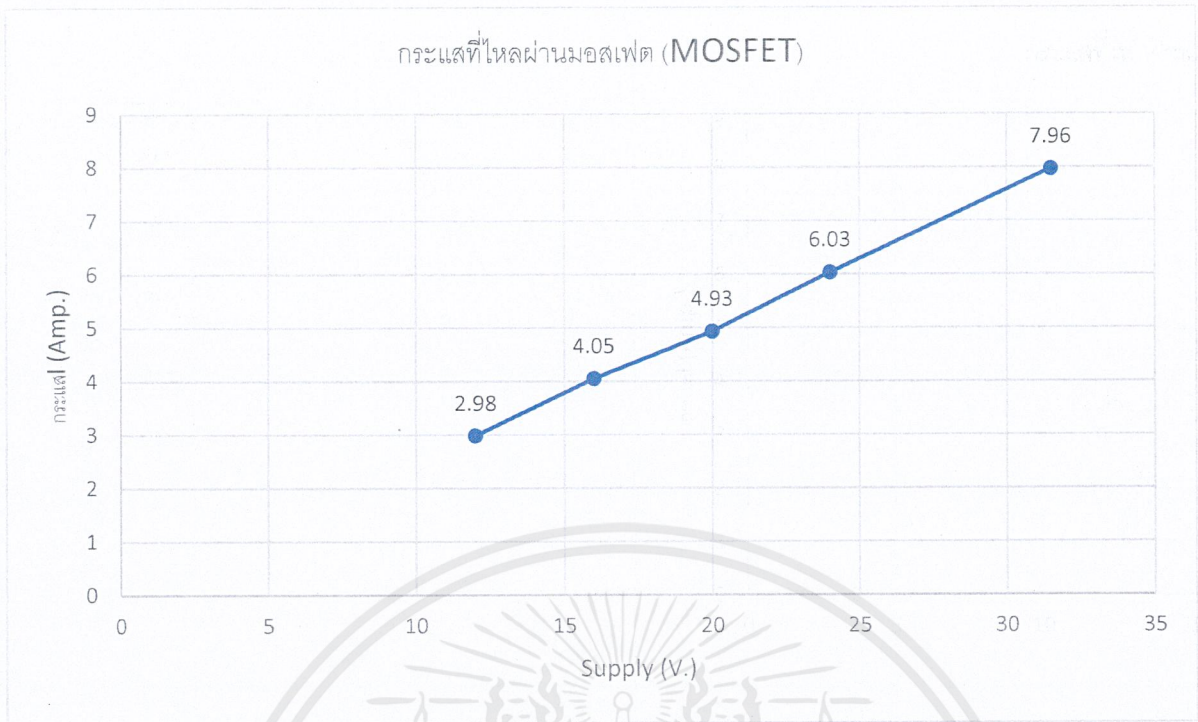
จากรูปที่ 3.19 ค่าของอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟต (MOSFET) ทางวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) เท่ากับ 32, 35, 41, 45 และ 52 °C ตามลำดับของแหล่งจ่าย ส่วนทางวงจรคายประจุไฟฟ้า (Discharge) เท่ากับ 26, 28.5, 32.5, 35.5 และ 41.5 °C ตามลำดับของแหล่งจ่ายเช่นกัน จากทั้งสองวงจรจะเห็นค่าการเพิ่มของอุณหภูมิที่มีความเป็นเชิงเส้นมากกว่ามอสเฟต (MOSFET) หมายเลข CRST05N08N แต่ใกล้เคียงมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP4227 ทั้งนี้เนื่องจากด้วยระยะเวลาในการทดลองแต่ละช่วงของแรงดันแหล่งใช้ระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของมอสเฟต (MOSFET) จึงสามารถคลาดเคลื่อนหรือเปลี่ยนแปลงไปได้

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710

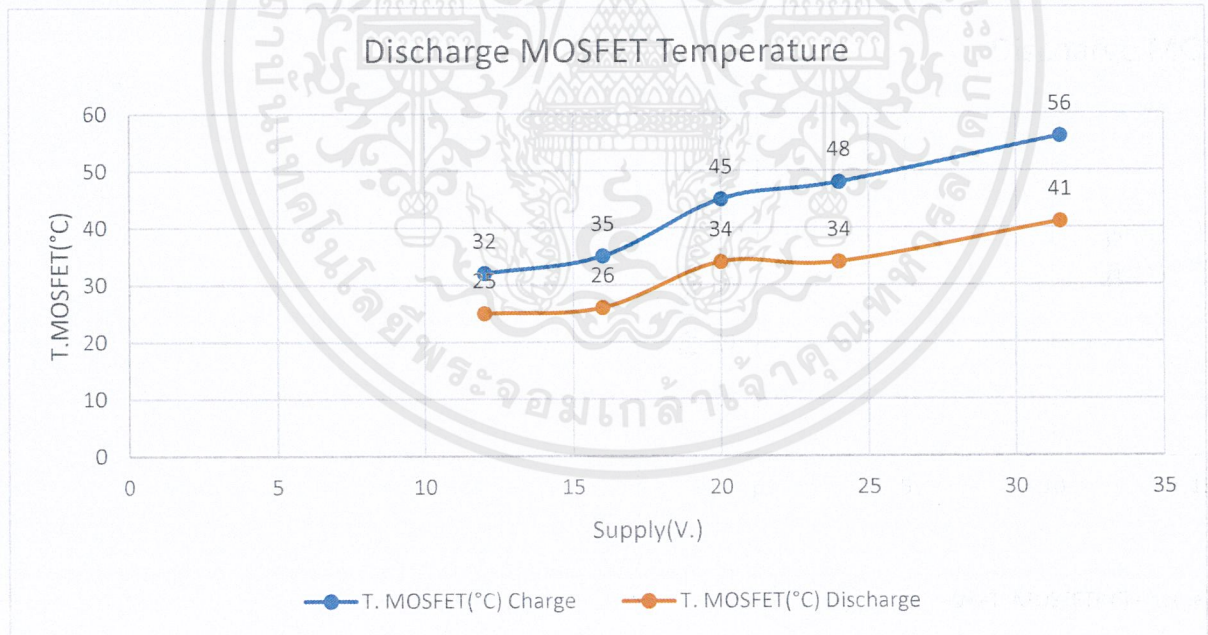
แรงดัน(V.)	12		16		20		24		31.5	
IRF3710	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET
แรงดันที่ขา Gate (V.)	0.0003	8.01	0.0002	8.01	0.0002	8.01	0.0002	8.01	0.0002	8.01
แรงดันที่ขา Drain (mV.)	216	169.6	308.5	246.7	591	515	647	568	824	718
แรงดันที่ขา Source (mV.)	983	87	1085	131.8	1366	352	1419	374	1625	461
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV.)	766	83	776	115.5	778	147.5	793	181.4	809	246.4
แรงดันคร่อมขา Gate-Source (V.)	0.982	7.93	1.085	7.88	1.373	7.83	1.438	7.65	1.628	7.55
อุณหภูมิที่ตัว MOSFET (°C)	32	25	35	26	45	34	48	34	56	41
อุณหภูมิที่แผ่น Sink (°C)	25		27.5		34		34		38.5	
อุณหภูมิที่ตัว Load (°C)	31		41		71		71		110	
แรงดันคร่อมที่ Load (V.)	10.87		14.71		17.95		21.94		29.04	
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (Amp.)	2.98		4.05		4.93		6.03		7.96	



รูปที่ 3.20 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF3710



รูปที่ 3.21 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF3710



รูปที่ 3.22 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF3710

จากรูปที่ 3.20 สังเกตได้ว่าค่าแรงดันคร่อม Drain-Source มีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น (Linear) โดยที่แรงดันของแหล่งจ่ายเริ่มต้นที่ 12 V, 16 V, 20 V, 24 V และแรงดันของแหล่งจ่ายที่มากที่สุด

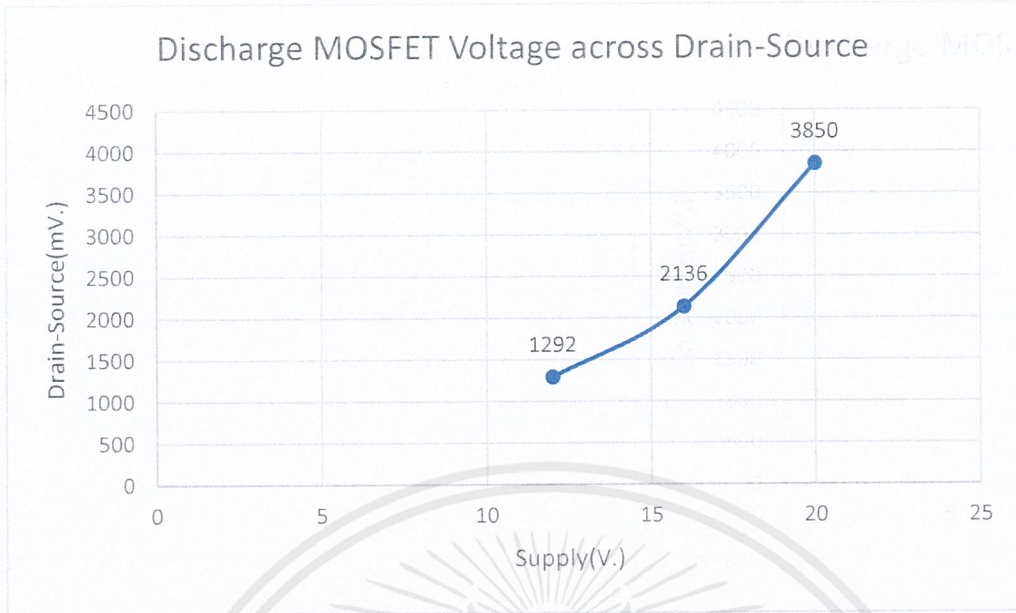
เท่ากับ 31.5 Volt ได้แรงดันคร่อม Drain-source เท่ากับ 83 mV, 115.5 mV, 147.5 mV, 181.4 mV และ 246.4 mV ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 3.21 แสดงค่าของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) ของทั้งวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า และวงจรคายประจุไฟฟ้า มีการเพิ่มขึ้นของกระแสแบบเป็นเชิงเส้น (Linear) ได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เท่ากับ 2.98, 4.05, 4.93, 6.03 และ 7.96 A ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย

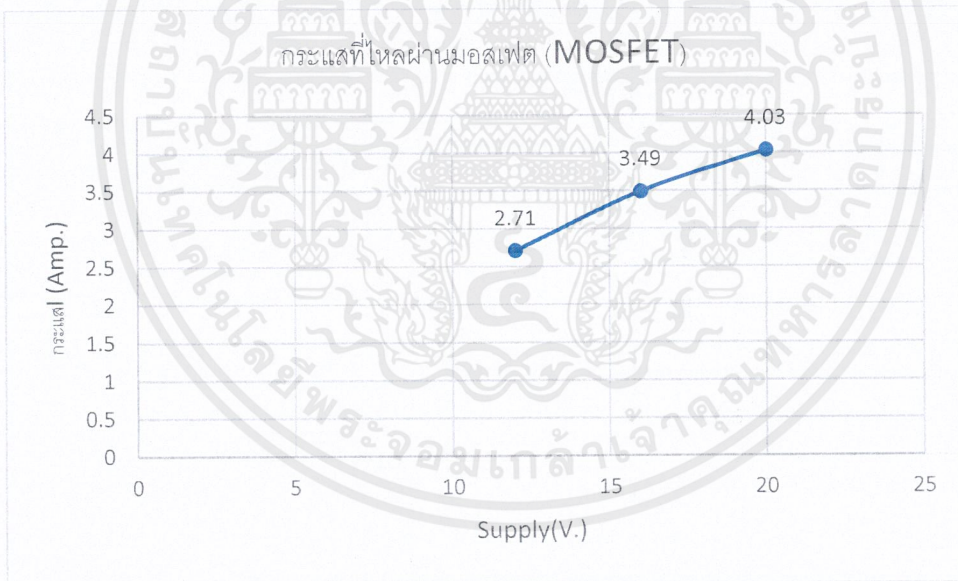
จากรูปที่ 3.22 ค่าของอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟต (MOSFET) ทางวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) เท่ากับ 32, 35, 45, 48 และ 56 °C ตามลำดับของแหล่งจ่าย ส่วนทางวงจรคายประจุไฟฟ้า (Discharge) เท่ากับ 25, 26, 34, 34 และ 41 °C ตามลำดับของแหล่งจ่ายเช่นกัน จากทั้งสองวงจรจะเห็นค่าการเพิ่มของอุณหภูมิใกล้เคียงความเป็นเชิงเส้นแต่มีช่วงที่แรงดันแหล่งจ่ายเท่ากับ 20 V ค่าอุณหภูมิจะมีค่าโดดขึ้นมา ทั้งนี้ เนื่องจากด้วยระยะเวลาในการทดลองแต่ละช่วงของแรงดันแหล่งจ่ายใช้ระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของมอสเฟต (MOSFET) จึงสามารถคลาดเคลื่อนหรือเปลี่ยนแปลงไปได้

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF510

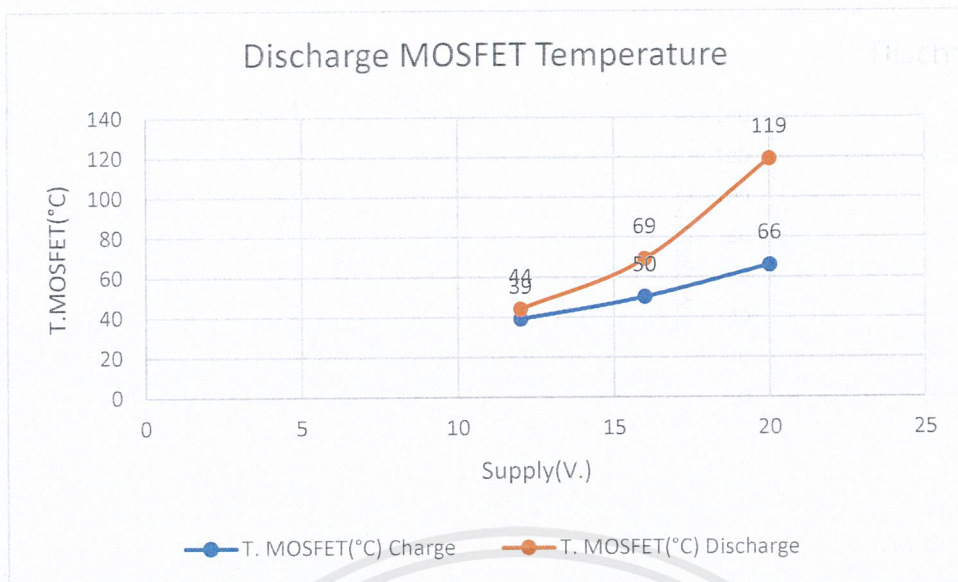
แรงดัน(V.)	12		16		20	
	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET	Charge MOSFET	Discharge MOSFET
IRF510						
แรงดันที่ขา Gate (V.)	0.0003	8.01	0.0002	8.01	0.0002	8.01
แรงดันที่ขา Drain (mV.)	1431	1362	2322	2225	4080	3900
แรงดันที่ขา Source (mV.)	2296	77	3200	101.1	4990	120
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV.)	862	1292	882	2136	891	3850
แรงดันคร่อมขา Gate-Source (V.)	2.29	7.94	3.219	7.92	5.05	7.9
อุณหภูมิที่ตัว MOSFET (°C)	39	44	50	69	66	119
อุณหภูมิที่แผ่น Sink (°C)	31.5		41.5		59	
อุณหภูมิที่ตัว Load (°C)	30		38		47	
แรงดันคร่อมที่ Load (V.)	9.86		12.66		14.64	
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (Amp.)	2.71		3.49		4.03	



รูปที่ 3.23 แรงดันคร่อม Drain-Source เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่าย  
ของมอสเฟตหมายเลข IRF510



รูปที่ 3.24 กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่าย  
ของมอสเฟตหมายเลข IRF510



รูปที่ 3.25 อุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) เทียบกับแรงดันของแหล่งจ่ายของมอสเฟตหมายเลข IRF510

จากรูปที่ 3.23 เมื่อสังเกตค่าแรงดันคร่อม Drain-Source ที่แรงดันของแหล่งจ่ายเริ่มต้น 12 V, 16 V และแรงดันของแหล่งจ่ายที่มากที่สุดเท่ากับ 20 V ได้แรงดันคร่อม Drain-source เท่ากับ 1292 mV, 2136 mV และ 3850 mV ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย ทั้งนี้ด้วยประสิทธิภาพสูงสุดของตัวมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF510 ทำให้ทดลองได้เพียงที่แรงดันแหล่งจ่าย 20 V

จากรูปที่ 3.24 แสดงค่าของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) ของทั้งวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า และวงจรคายประจุไฟฟ้า มีการเพิ่มขึ้นของกระแสใกล้เคียงความเป็นเชิงเส้น (Linear) ได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เท่ากับ 2.71, 3.49 และ 4.03 A ตามลำดับของแรงดันแหล่งจ่าย ทั้งนี้ด้วยประสิทธิภาพสูงสุดของตัวมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF510 ทำให้กระแสที่ไหลได้สูงสุดอยู่ที่ 4.03 A

จากรูปที่ 3.25 ค่าของอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟต (MOSFET) ทางวงจรกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) เท่ากับ 39, 50 และ 66 °C ตามลำดับของแหล่งจ่าย ส่วนทางวงจรคายประจุไฟฟ้า (Discharge) เท่ากับ 44, 69 และ 119 °C ตามลำดับของแหล่งจ่ายเช่นกัน จากทั้งสองวงจรจะเห็นค่าการเพิ่มของอุณหภูมิมิมีความเป็นเส้นโค้งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากด้วยระยะเวลาในการทดลองแต่ละช่วงของแรงดันแหล่งใช้ระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของมอสเฟต (MOSFET) จึงสามารถคลาดเคลื่อนหรือเปลี่ยนแปลงไปได้ แต่ยังคงมีอุณหภูมิสูงเกินไปเมื่อนำมาใช้งานจริง

จากการทดลองมอสเฟต (MOSFET) ตามตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.5 เพื่อหาหมายเลขมอสเฟต (MOSFET) ที่นำมาใช้เป็นต้นแบบทั้งหมด 4 หมายเลข ไม่รวมหมายเลข CRST05N08N ที่เป็นมอสเฟต (MOSFET) อ้างอิง สำหรับมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF510 เมื่อสังเกตค่าที่ได้จากตารางที่ 3.5 สามารถรับแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่ายที่ได้เพียง 20 V. แต่กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) มีค่า 4.03 A ซึ่งใกล้เคียงกับกระแสสูงสุดที่สามารถรับได้ตามข้อมูลจำเพาะ (Datasheet) ของมอสเฟต (MOSFET) ที่มี

ค่า 5.6 A รวมถึงค่าอุณหภูมิที่ตัวมอสเฟตอยู่ที่ 119 °C ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก โดยปกติแล้วอุณหภูมิขนาดใช้งานที่ตัวมอสเฟตไม่ควรเกินกว่า 60 °C เพื่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานที่ยืดยาว ดังนั้นสำหรับมอสเฟต หมายเลข IRF510 มีการทำงานเกือบเต็มประสิทธิภาพแล้ว จึงไม่เหมาะที่จะนำมาจัดทำต้นแบบสำหรับ วงจรป้องกันกระแสไหลของกระแสที่มากเกินไปเพราะประสิทธิภาพในการทำงานที่ต่ำไปและถ้านำมาใช้จริงจะมีความซับซ้อนในการประยุกต์ใช้งานที่มากเกินไป และสำหรับมอสเฟตทั้ง 3 หมายเลขที่เหลือ เมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสูงสุดคือ 31.5 V เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เห็นความแตกต่างในประสิทธิภาพของ การทำงานมอสเฟตแต่ละหมายเลข สำหรับกรณีแรกพิจารณาที่แรงดันคร่อม Drain-Source สังเกตได้ว่า ที่มอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 มีแรงดันคร่อม Drain-Source น้อยกว่ามอสเฟต (MOSFET) หมายเลขอื่นโดยมีค่าเท่ากับ 246.4 mV ซึ่งแรงดันคร่อม Drain-Source มีผลต่ออุณหภูมิของตัวมอสเฟตด้วย โดยยิ่งค่าแรงดันคร่อม Drain-Source น้อยเท่าไรอุณหภูมิก็จะน้อยหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้อุณหภูมิที่ตัวมอสเฟตจะมากหรือน้อยไม่ได้ขึ้นอยู่กับแรงดันคร่อม Drain-Source เท่านั้น แต่ยังสามารถ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพสูงสุดของแรงดันและกระแสที่อ้างอิงจากเอกสารข้อมูลจำเพาะ (Datasheet) ได้ด้วย สอดคล้องกับกรณีที่สองที่พิจารณาคืออุณหภูมิที่ตัวมอสเฟต (MOSFET) โดยมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRFP150N มีค่าอุณหภูมิที่มอสเฟตน้อยที่สุดคือ 33 °C ส่วนหมายเลข IRFP4227 และ IRF3710 มีค่า อุณหภูมิที่มอสเฟตใกล้เคียงกันคือ 41.5 และ 41 °C ทั้งนี้ด้วยระยะเวลาในการทดลองที่แรงดันไฟฟ้าจาก แหล่งจ่ายสูงสุดใช้ระยะเวลาไม่เท่ากัน ค่าของอุณหภูมิจึงมีความคลาดเคลื่อนได้จึงจำเป็น ต้องพิจารณาจาก กรณีอื่นเป็นหลักในการตัดสินใจ และเมื่อพิจารณาในกรณีสุดท้ายที่กระแสไหลผ่านตัวมอสเฟต มอสเฟตทั้ง 3 หมายเลขมีค่ากระแสไหลที่ใกล้เคียงหรือเกือบเท่ากัน ดังนั้นกรณีที่ใช้พิจารณาเป็นหลักในการเลือกใช้ มอสเฟตจึงเป็นกรณีของค่าแรงดันคร่อม Drain-Source เพราะฉะนั้นจึงเลือกใช้มอสเฟตหมายเลข IRF3710 เนื่องจากมีค่าแรงดันคร่อม Drain-Source น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับมอสเฟตอีกสองหมายเลข

### 3.5.2 วงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ของเซลล์แบตเตอรี่

จากรูปที่ 3.1 ในหัวข้อที่ 3.1 Nominal capacity มีค่าเท่ากับ 90 Ah. และในหัวข้อที่ 3.10 Max continous discharge current มีค่าเท่ากับ 3C โดยค่า C หรือ อัตราการคายประจุ (C-rate) ในการใช้งาน แบตเตอรี่คือหน่วยในการกักเก็บประจุไฟฟ้าหรือคายประจุไฟฟ้า คิดเป็นจำนวนเท่าของความจุแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่ มีค่าเท่ากับ 90 Ah. อัตราการคายประจุขณะคายประจุคือ 1C หมายความว่าที่การคายประจุ มีการจ่ายกระแส 90 A แบตเตอรี่จะสามารถใช้งานได้ 1 ชั่วโมงการประจุไฟฟ้าหมดไป และที่ 2C หมายความว่าที่การคายประจุมีการจ่ายกระแส 180 A แบตเตอรี่จะสามารถใช้งานได้ 30 นาที หรือที่ 0.5C หมายความว่าที่การคายประจุมีการจ่ายกระแส 45 A แบตเตอรี่จะสามารถใช้งานได้ 2 ชั่วโมง เป็นต้น ดังนั้น กระแสที่สามารถไหลได้สูงสุดขณะคายประจุตามคุณสมบัติของแบตเตอรี่คือ 3C จึงมีค่ากระแสที่ไหลได้มากที่สุดเท่ากับ 270 A วงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ของเซลล์แบตเตอรี่ต้อง ครอบคลุมในการป้องกันการขับกระแสสูงสุดนี้

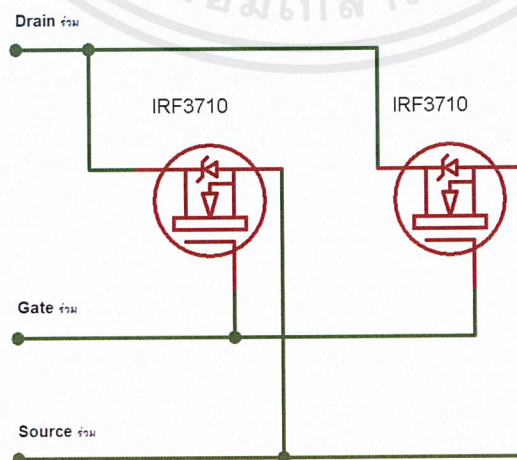
ในการออกแบบวงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ของเซลล์แบตเตอรี่อ้างอิงจากการทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต (MOSFET) โดยหมายเลขที่นำมาใช้ในการออกแบบคือหมายเลข IRF3710 จึงทำการต่อยอดการทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710

สำหรับการทดสอบแรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าเท่าเดิมเหมือนตอนทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต (MOSFET) คือที่ 12 V, 16 V, 20 V, 24 V และแรงดันของแหล่งจ่ายที่มากที่สุดเท่ากับ 31.5 V แต่เปลี่ยนค่าของกระแสที่มากที่สุดเป็น 12 A โดยเริ่มแรกใช้มอสเฟต (MOSFET) ในการขับกระแสเพียง 1 มอสเฟต (MOSFET) เท่านั้น ตารางจากการทดลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ โดยการเก็บค่าจะเก็บค่าเพียงแค่ค่าแรงดันตกคร่อม Drain-Source ( $V_{DS}$ ) และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) เนื่องจากอุณหภูมิสามารถอ้างอิงได้จากค่าแรงดันตกคร่อม Drain-Source ( $V_{DS}$ ) โดยยิ่งค่าแรงดันตกคร่อม Drain-Source ( $V_{DS}$ ) มีค่ามากเท่าไร ค่าของอุณหภูมิของมอสเฟต (MOSFET) จะสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 3.6 การทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 12 A โดยใช้มอสเฟต (MOSFET) 1 ตัว

ขนาดของแรงดันที่กระแสมากที่สุด 12 A	12V	16V	20V	24V	32V
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV)	83	115	147	181	246
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (A)	4.5	6	7.5	9	12

การทดลองต่อมาลองเพิ่มจำนวนมอสเฟต (MOSFET) เป็น 2 ตัวต่อขนานกันที่กระแสมากที่สุด 12 A แล้วลองสังเกตพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของมอสเฟต (MOSFET) ลักษณะการต่อขนานมอสเฟต 2 ตัวเป็นดังรูปที่ 3.26 โดยตารางการทดลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.26 ตัวอย่างการต่อขนานมอสเฟตขนานกันแบบ 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 การทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 12 A

โดยใช้มอสเฟต (MOSFET) 2 ตัว

ขนาดของแรงดันที่กระแสสูงสุด 12 A	12V	16V	20V	24V	32V
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV) ของมอสเฟตแต่ละตัว	41.5	57.5	73.5	90.5	123
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (A)	4.5	6	7.5	9	12
กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตแต่ละตัว (A)	2.25	3	3.75	4.5	6

จากตารางที่ 3.7 เมื่อเทียบกับตารางที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันคร่อมขา Drain-Source ของมอสเฟต (MOSFET) และค่าของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) ในแต่ละตัวมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง แต่กระแสที่ไหลภายในระบบยังคงเท่าเดิม

สำหรับการทดลองต่อมาปรับจำนวนมอสเฟต (MOSFET) ให้เหลือเพียง 1 ตัวแต่เพิ่มกระแสที่ไหลสูงสุดจาก 12 A เป็น 24 A แล้วลองสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของมอสเฟต (MOSFET) โดยตารางการทดลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.8 การทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 24 A

โดยใช้มอสเฟต (MOSFET) 1 ตัว

ขนาดของแรงดันที่กระแสสูงสุด 24 A	12V	16V	20V	24V	32V
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV)	166	230	294	362	492
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (A)	9	12	15	18	24

จากตารางที่ 3.8 เมื่อเทียบกับตารางที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันคร่อมขา Drain-Source ของมอสเฟต (MOSFET) และค่าของกระแสที่ไหลผ่านระบบ มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากเดิม

การทดลองต่อมาลองเพิ่มจำนวนมอสเฟต (MOSFET) เป็น 2 ตัวต่อขนานกันที่กระแสสูงสุด 24 A แล้วลองสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของมอสเฟต (MOSFET) ลักษณะการต่อขนานมอสเฟต 2 ตัวเป็นดังรูปที่ 3.26 โดยตารางการทดลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.9 การทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 24 A

โดยใช้มอสเฟต (MOSFET) 2 ตัว

ขนาดของแรงดันที่กระแสสูงสุด 24 A	12V	16V	20V	24V	32V
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV) ของมอสเฟตแต่ละตัว	83	115	147	181	246
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (A)	9	12	15	18	24
กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตแต่ละตัว (A)	4.5	6	7.5	9	12

จากตารางที่ 3.9 เมื่อเทียบกับตารางที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันคร่อมขา Drain-Source ของมอสเฟต (MOSFET) และค่าของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟต (MOSFET) ในแต่ละตัวมีค่าที่เท่ากัน แม้กระแสสูงสุดจะเพิ่มขึ้นจาก 12 A เป็น 24 A

จากตารางที่ 3.6 ถึง ตารางที่ 3.9 สามารถสรุปโดยรวมได้ว่าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสสูงสุดเท่าเดิมแต่เมื่อทำการเพิ่มจำนวนมอสเฟต (MOSFET) เป็น 2 เท่าจากจำนวนเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source ภายในมอสเฟตแต่ละตัวและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตแต่ละตัวจะลดลงครึ่งหนึ่ง ดังเช่นจากตาราง 3.6 การใช้มอสเฟตจำนวน 1 ตัวที่แรงดัน 12 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 83 mV และ 4.5 A ตามลำดับ แต่เมื่อใช้มอสเฟตจำนวน 2 ตัวที่แรงดันแหล่งจ่าย 12 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง โดยมีค่าเท่ากับ 41.5 mV และ 2.25 A ตามตารางที่ 3.7 เป็นต้น ในอีกทางหนึ่ง ที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าเท่าเดิมแต่กระแสสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของกระแสเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source ภายในมอสเฟตแต่ละตัวและกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตแต่ละตัวจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากค่าเดิมด้วย ดังเช่นจากตารางที่ 3.6 การใช้มอสเฟตจำนวน 1 ตัวที่แรงดัน 12 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 83 mV และ 4.5 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลจาก 12 A เป็น 24 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 12 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า โดยมีค่าเท่ากับ 166 mV และ 9 A ตามตารางที่ 3.8 เป็นต้น

ในวงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ของเซลล์แบตเตอรี่ เมื่อต้องการให้ลักษณะการทำงานของมอสเฟต (MOSFET) มีค่าเหมือนหรือใกล้เคียงกับค่าแรกเริ่มต้นที่ทำการทดลองตามตารางที่ 3.6 เมื่อวงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะคายประจุไฟฟ้า (Discharge) มีกระแสสูงสุด 270 A และแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายยังคงเท่าเดิม เมื่อดูจากกระแสสูงสุดเทียบกับตารางที่ 3.6 ที่มีค่ากระแสสูงสุดที่ 12 A มีค่ามากกว่า 22.5 เท่า ดังนั้นค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 22.5 เท่าของตารางที่ 3.6

จากการคาดคะเนสำหรับมอสเฟตหมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 270 A เมื่อใช้มอสเฟตจำนวน 1 ตัว ที่ 12 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 83 mV และ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 270 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 12 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 22.5 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 1867.5 mV และ 101.25 A ตามลำดับ

ที่ 16 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 115 mV และ 6 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 270 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 16 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 22.5 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 2587.5 mV และ 135 A ตามลำดับ

ที่ 20 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 147 mV และ 7.5 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 270 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 20 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 22.5 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 3307.5 mV และ 168.75 A ตามลำดับ

ที่ 24 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 181 mV และ 9 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 270 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 24 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 22.5 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 4072.5 mV และ 202.5 A ตามลำดับ

ที่ 32 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 246 mV และ 12 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 270 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 32 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 22.5 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 5535 mV และ 270 A ตามลำดับ

และจากการคาดคะเนค่าที่ได้ทั้งหมดในการใช้งานมอสเฟต (MOSFET) เพียงตัวเดียวที่กระแสสูงสุด 270 A จะสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.10 แสดงการคาดคะเนมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 270 A โดยใช้มอสเฟต (MOSFET) 1 ตัว

ขนาดของแรงดันที่กระแสสูงสุด 270 A	12V	16V	20V	24V	32V
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV)	1867.5	2587.5	3307.5	4072.5	5535
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (A)	101.25	135	168.75	202.5	270

จากตารางที่ 3.10 เมื่อเทียบการเพิ่มขึ้นของค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านในระบบ กับตารางที่ 3.6 สังเกตเห็นได้ว่า ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านในระบบเพิ่มขึ้นมาเป็นจำนวน 22.5 เท่า เพื่อให้ได้ลักษณะการทำงานของมอสเฟต (MOSFET) เป็นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 เหมือนเดิม จำเป็นต้องใช้มอสเฟต (MOSFET) จำนวน 22.5 ตัว แต่ในที่นี้ใช้ทั้งหมด 24 ตัวในการคำนวณเพื่อให้ครอบคลุมความปลอดภัยภายในการทดลองภายใต้ภาคน้ำ ซึ่งลักษณะการต่อมอสเฟตจำนวน 24 ตัวเป็นดังรูปที่ 3.26 แต่เพิ่มจำนวนมอสเฟตจากในรูปที่มี 2 ตัวเป็นจำนวน 24 ตัวด้วยกัน

จากการคาดคะเนสำหรับมอสเฟตหมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 270 A เมื่อใช้มอสเฟตจำนวน 24 ตัว จะทำให้ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตลดลงมา 24 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้มอสเฟตเพียงจำนวน 1 ตัวที่กระแสสูงสุด 270 A เมื่อแรงดันแหล่งจ่าย 12 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 1867.5 mV และ 101.25 A ตามลำดับ เมื่อมีค่าลดลง 24 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 77.8125 mV และ 4.21875 A

ที่แรงดันแหล่งจ่าย 16 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 2587.5 mV และ 135 A ตามลำดับ เมื่อมีค่าลดลง 24 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 107.8125 mV และ 5.625 A

ที่แรงดันแหล่งจ่าย 20 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 3307.5 mV และ 168.75 A ตามลำดับ เมื่อมีค่าลดลง 24 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 137.8125 mV และ 7.03 A

ที่แรงดันแหล่งจ่าย 24 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 4072.5 mV และ 202.5 A ตามลำดับ เมื่อมีค่าลดลง 24 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 169.6875 mV และ 8.4375 A

และที่แรงดันแหล่งจ่าย 32 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 5535 mV และ 270 A ตามลำดับเมื่อมีค่าลดลง 24 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 230.625 mV และ 11.25 A

โดยค่าที่ได้จากการคาดคะเนเมื่อใช้มอสเฟต (MOSFET) จำนวน 24 ตัวเมื่อกระแสสูงสุด 270 A สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.11 แสดงการคาดคะเนมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 270 A โดยใช้มอสเฟต (MOSFET) 24 ตัว

ขนาดของแรงดันที่กระแสสูงสุด 270 A	12V	16V	20V	24V	32V
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV) ของมอสเฟตแต่ละตัว	77.8125	107.8125	137.8125	169.6875	230.625
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (A)	101.25	135	168.75	202.5	270
กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตแต่ละตัว (A)	4.21875	5.625	7.03125	8.4375	11.25

จากตารางที่ 3.11 สังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการคาดคะเนจะมีค่าใกล้เคียง แต่น้อยกว่าตารางที่ 3.6 เล็กน้อย และในทางปฏิบัติมีความเป็นไปได้ที่ ค่าแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตสามารถเปลี่ยนแปลงไปจากที่คาดคะเนไว้ เนื่องจากปัจจัยภายนอก เช่น แรงดันที่ออกมาจากแหล่งจ่าย ขณะทดลองจริงอาจมีประ สิวภาพที่ลดลง หรือมอสเฟตหมายเลขเดียวกันแต่ประสิทธิภาพในการใช้งาน อาจมีความไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3 วงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) ของเซลล์แบตเตอรี่

จากรูปที่ 3.1 ในหัวข้อที่ 3.1 Nominal Capacity มีค่าเท่ากับ 90 Ah. และในหัวข้อที่ 3.9 Max Continous Charge Current มีค่าเท่ากับ 2C หรือเท่ากับกระแสสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ขณะทำการกักเก็บประจุเท่ากับ 180 A วงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) ของเซลล์แบตเตอรี่ครอบคลุมในการป้องกันการขับกระแสสูงสุดในหัวข้อนี้

เช่นเดียวกันในการออกแบบวงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) ของเซลล์แบตเตอรี่เหมือนการออกแบบวงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ของเซลล์แบตเตอรี่คืออ้างอิงจากการทดลองคุณสมบัติของมอสเฟต (MOSFET) โดยหมายเลขที่นำมาใช้ในการออกแบบคือหมายเลข IRF3710 จึงทำการต่อยอดการทดลองมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 และผลการทดลองจากตารางที่ 3.6 ถึง 3.9 ด้วย

ในวงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) ของเซลล์แบตเตอรี่ เมื่อต้องการให้ลักษณะการทำงานของมอสเฟต (MOSFET) มีค่าเหมือนหรือใกล้เคียงกับค่าแรกเริ่มต้นที่ทำการทดลองตามตารางที่ 3.6 เมื่อวงจรป้องกันกระแสไหลเกินขณะกักเก็บประจุไฟฟ้า (Charge) มีกระแสสูงสุด 180 A และแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายยังคงเท่าเดิม เมื่อดูจากกระแสสูงสุดเทียบกับตารางที่ 3.6 ที่มีค่ากระแสสูงสุดที่ 12 A มีค่ามากกว่า 15 เท่า ดังนั้นค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 15 เท่าของตารางที่ 3.6

จากการคาดคะเนสำหรับมอสเฟตหมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 270 A เมื่อใช้มอสเฟตจำนวน 1 ตัว ที่ 12 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 83 mV และ 4.5 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 180 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 12 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 15 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 1245 mV และ 67.5 A ตามลำดับ

ที่ 16 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 115 mV และ 6 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 180 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 16 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 15 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 1725 mV และ 90 A ตามลำดับ

ที่ 20 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 147 mV และ 7.5 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 180 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 20 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 15 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 2205 mV และ 112.5 A ตามลำดับ

ที่ 24 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 181 mV และ 9 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 180 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 24 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 15 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 2715 mV และ 135 A ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 32 V ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 246 mV และ 12 A ตามลำดับ เมื่อเพิ่มกระแสสูงสุดที่ไหลเป็น 180 A ที่แรงดันแหล่งจ่าย 32 V เท่าเดิม ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะมีค่าเพิ่มขึ้น 15 เท่าโดยมีค่าเท่ากับ 3690 mV และ 180 A ตามลำดับ

และจากการคาดคะเนค่าที่ได้ทั้งหมดในการใช้งานมอสเฟต (MOSFET) เพียงตัวเดียวที่กระแสสูงสุด 180 A จะสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.12 แสดงการคาดคะเนมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 180 A โดยใช้มอสเฟต (MOSFET) 1 ตัว

ขนาดของแรงดันที่กระแสสูงสุด 180 A	12V	16V	20V	24V	32V
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV)	1245	1725	2205	2715	3690
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (A)	67.5	90	112.5	135	180

จากตารางที่ 3.12 เมื่อเทียบการเพิ่มขึ้นของค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านในระบบ กับตารางที่ 3.6 สังเกตเห็นได้ว่า ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านในระบบเพิ่มขึ้นมาเป็นจำนวน 15 เท่า เพื่อที่ให้อัตราประสิทธิภาพการทำงานของมอสเฟต (MOSFET) เป็นดังตารางที่ 3.6 เหมือนเดิม จำเป็นต้องใช้มอสเฟต (MOSFET) จำนวน 15 ตัว แต่ในที่นี้ใช้ทั้งหมด 16 ตัวในการคาดคะเนเพื่อให้ครอบคลุมความปลอดภัยภายในการทดลองภายใต้สภาพหน้า ซึ่งลักษณะการต่อมอสเฟตจำนวน 16 ตัวเป็นดังรูปที่ 3.26 แต่เพิ่มจำนวนมอสเฟตจากในรูปที่มี 2 ตัวเป็นจำนวน 16 ตัวด้วยกัน

จากการคาดคะเนมอสเฟตหมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 180 A เมื่อใช้มอสเฟตจำนวน 16 ตัว จะทำให้ค่าของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตลดลงมา 16 เท่าเมื่อเทียบกับการใช้มอสเฟตเพียงจำนวน 1 ตัวที่กระแสสูงสุด 180 A เมื่อแรงดันแหล่งจ่าย 12 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 1245 mV และ 67.5 A ตามลำดับ เมื่อมีค่าลดลง 16 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 77.8125 mV และ 4.21875 A

ที่แรงดันแหล่งจ่าย 16 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 1725 mV และ 90 A ตามลำดับ เมื่อมีค่าลดลง 16 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 107.8125 mV และ 5.625 A

ที่แรงดันแหล่งจ่าย 20 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 2205 mV และ 112.5 A ตามลำดับ เมื่อมีค่าลดลง 16 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 137.8125 mV และ 7.03 A

ที่แรงดันแหล่งจ่าย 24 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 2715 mV และ 135 A ตามลำดับ เมื่อมีค่าลดลง 16 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 169.6875 mV และ 8.4375 A

และที่แรงดันแหล่งจ่าย 32 V มีของแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตมีค่า 3690 mV และ 180 A ตามลำดับ เมื่อมีค่าลดลง 16 เท่าจะมีค่าเท่ากับ 230.625 mV และ 11.25 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าที่ได้จากการคาคะเนเมื่อใช้มอสเฟต (MOSFET) จำนวน 16 ตัวเมื่อกระแสสูงสุด 180 A สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.13 แสดงการคาคะเนมอสเฟต (MOSFET) หมายเลข IRF3710 ที่กระแสสูงสุด 180 A โดยใช้มอสเฟต (MOSFET) 16 ตัว

ขนาดของแรงดันที่กระแสสูงสุด 180 A	12V	16V	20V	24V	32V
แรงดันคร่อมขา Drain-Source (mV) ของมอสเฟตแต่ละตัว	77.8125	107.8125	137.8125	169.6875	230.625
กระแสที่ไหลผ่านในระบบ (A)	67.5	90	112.5	135	180
กระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตแต่ละตัว (A)	4.21875	5.625	7.03125	8.4375	11.25

จากตารางที่ 3.13 สังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการคาคะเนจะมีค่าใกล้เคียง แต่น้อยกว่าตารางที่ 3.6 เล็กน้อย และในทางปฏิบัติมีความเป็นไปได้ที่ ค่าแรงดันคร่อมขา Drain-Source และกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตสามารถเปลี่ยนแปลงไปจากที่คาคะเนไว้ เนื่องจากปัจจัยภายนอก เช่น แรงดันที่ออกมาจากแหล่งจ่ายขณะทดลองจริงอาจมีประสิทธิภาพที่ลดลง หรือมอสเฟตหมายเลขเดียวกันแต่ประสิทธิภาพในการใช้งานอาจมีความไม่เท่ากัน

## บทที่ 4

### ผลดำเนินการ

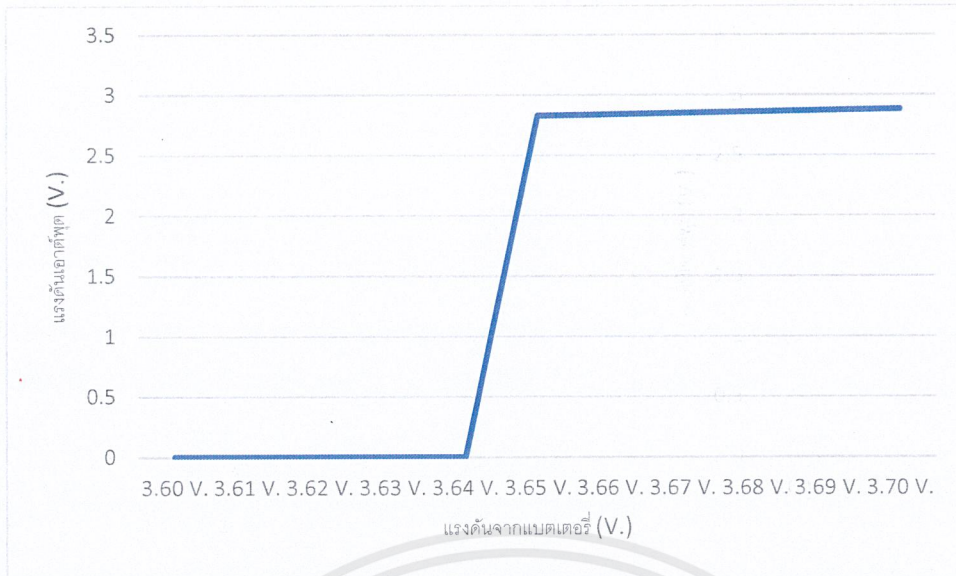
#### 4.1 ผลลัพธ์จากการจำลองผลการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection)

จากหัวข้อที่ 3.3 การออกแบบวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ แล้วเป็นไปตามรูปที่ 3.7 โดยหลักการทำงานของวงจรจะเสมือนเป็นสวิตช์ที่สถานะเปิด-ปิด เมื่อแรงดันมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3.65 V วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าแบบสถานะสูง (Logic High) ออกมา แต่เมื่อมีแรงดันน้อยกว่า 3.65 V วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าแบบสถานะต่ำ (Logic Low) ออกมาแทน

ผลจากการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection) จำลองผลผ่านโปรแกรม Proteus แล้วนำค่าที่ได้ใส่ในตาราง สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าผลการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่

แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่	Input Voltage (V)	Voltage Reference (V)	Volt-output (V)	Logic
3.70 V	1.51398	1.51025	2.879935	high(on)
3.69 V	1.50905	1.50617	2.869939	high(on)
3.68 V	1.50412	1.50209	2.859884	high(on)
3.67 V	1.4992	1.498	2.849721	high(on)
3.66 V	1.49427	1.49392	2.839341	high(on)
3.65 V	1.48934	1.48884	2.828123	high(on)
3.64 V	1.48469	1.48599	0	low(Off)
3.63 V	1.47976	1.48191	0	low(Off)
3.62 V	1.47484	1.47782	0	low(Off)
3.61 V	1.46991	1.47374	0	low(Off)
3.60 V	1.46498	1.46966	0	low(Off)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่

จากตารางที่ 4.1 สามารถนำมาสร้างกราฟดูความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันจากแบตเตอรี่และแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ ดังแสดงตามรูปที่ 4.1 สังเกตได้ว่าเมื่อแรงดันแบตเตอรี่ที่ต่ำกว่า 3.65 V นับตั้งแต่ 3.64 V ลงไปวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ จะยังไม่ทำงานมีค่าแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ หรือสถานะทางสัญญาณไฟฟ้าต่ำ (Logic Low) แต่เมื่อแรงดันจากแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 3.65 V หรือมากกว่า ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกับไฟเลี้ยงทางขาบวกของออปแอมป์ (Op-Amp) มีค่าเท่ากับ 2.828123 V และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแรงดันจากแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น หรือมีสถานะทางสัญญาณไฟฟ้าสูง (Logic High) โดยค่าแรงดันเอาต์พุตหรือสัญญาณทางไฟฟ้าจากวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ จะนำไปควบคุมระบบหรือวงจรอื่นที่มาใช้งานร่วมกันต่อไปภายในอนาคต เช่น เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ไปควบคุมวงจรจ่ายแรงดันที่เข้าขา Gate ของมอสเฟต (MOSFET) ที่ใช้ในการขับเคลื่อน เป็นต้น

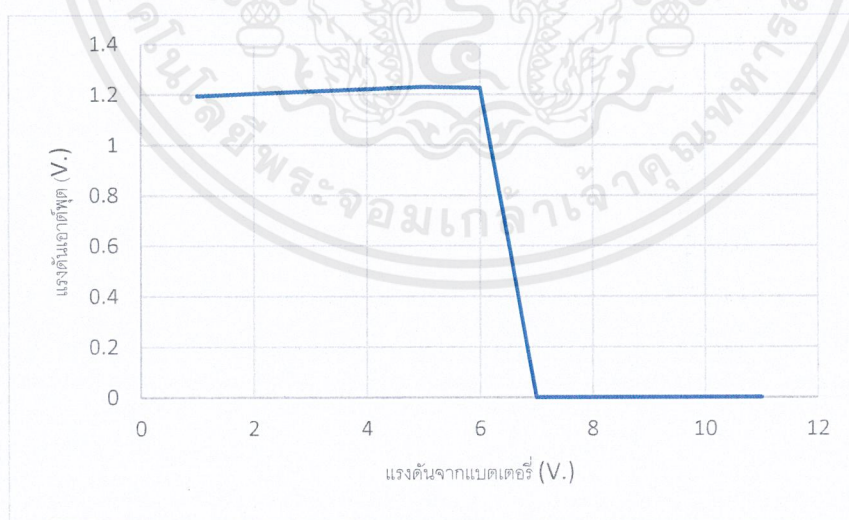
#### 4.2 ผลลัพธ์จากการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Lower Voltage Protection)

จากหัวข้อที่ 3.4 การออกแบบวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่แล้ว เป็นไปตามรูปที่ 3.8 โดยหลักการทำงานของวงจรจะเสมือนเป็นสวิตช์ที่สถานะเปิด-ปิด เมื่อแรงดันมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.00 V วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าแบบสถานะสูง (Logic High) ออกมา แต่เมื่อมีแรงดันมากกว่า 2.00 V วงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ จะส่งสัญญาณสถานะต่ำ (Logic Low) ออกมาแทน

ผลจากการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ จำลองผลผ่านโปรแกรม Proteus แล้วนำค่าที่ได้ใส่ในตาราง โดยสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าผลการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกิน  
ค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่

Volt-Battery	Input Voltage (V)	Voltage Reference (V)	Volt-output (V)	Logic
1.95 V	0.663754	0.657426	1.193429	high(on)
1.96 V	0.662264	0.667158	1.202569	high(on)
1.97 V	0.670561	0.667103	1.211634	high(on)
1.98 V	0.673965	0.671942	1.220537	high(on)
1.99 V	0.677369	0.676783	1.229055	high(on)
2.00 V	0.680773	0.680627	1.225571	high(on)
2.01 V	0.68426	0.686589	0	low(Off)
2.02 V	0.687665	0.691434	0	low(Off)
2.03 V	0.691069	0.69628	0	low(Off)
2.04 V	0.694473	0.701128	0	low(Off)
2.05 V	0.697877	0.705976	0	low(Off)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกิน  
ค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่

จากตารางที่ 4.2 สามารถนำมาสร้างกราฟดูความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันจากแบตเตอรี่และแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ ดังแสดงตามรูปที่ 4.2 สังเกตได้ว่าเมื่อแรงดันแบตเตอรี่ที่สูงกว่า 2.00 V นับตั้งแต่ 1.99 V ขึ้นไปวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่ จะยังไม่ทำงานมีค่าแรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์ หรือสถานะทางสัญญาณไฟฟ้าต่ำ (Logic Low) แต่เมื่อแรงดันจากแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 2.00 V หรือน้อยกว่า ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกับไฟเลี้ยงทางขาบวกของออปแอมป์ (Op-Amp) มีค่าเท่ากับ 1.225571 V และลดลงเล็กน้อยเมื่อแรงดันจากแบตเตอรี่ลดลง หรือมีสถานะทางสัญญาณไฟฟ้าสูง (Logic High) โดยค่าแรงดันเอาต์พุตหรือสัญญาณทางไฟฟ้าจากวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินกว่าค่าน้อยสุดของเซลล์แบตเตอรี่จะนำไปควบคุมระบบหรือวงจรอื่นที่มาใช้งานร่วมกันต่อไปภายในอนาคตเช่นเดียวกับวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่



## บทที่ 5

### สรุปผลดำเนินการ

ในบทนี้กล่าวถึงผลสรุปของการดำเนินงานโดยรวมทั้งหมด ปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน รวมถึงแนวทางการแก้ไขปัญหาที่พบ เพื่อให้ดำเนินงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

#### 5.1 สรุปผล

ขั้นตอนการออกแบบวงจรวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Voltage Protection) และวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินค่าร้อยละของเซลล์แบตเตอรี่ (Lower Voltage Protection) เซมิคอนดักเตอร์ทั้งสองวงจรมีหลักการทำงานเหมือนสวิตช์เปิด-ปิดโดยปกติสถานะของสวิตช์จะเป็นแบบเปิด (Normal Closed Switch) แต่เมื่อแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนดไว้ในวงจร จะมีสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นบวกออกมาเปรียบเสมือนสวิตช์ปิดตัวลงโดยแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะมากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง แล้วมีสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นบวกออกมาขึ้นอยู่กับวงจรมานั้น สำหรับวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันสูงเกินค่าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ สัญญาณทางไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกต่อเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิง โดยแรงดันอ้างอิงกำหนดไว้ในวงจรมีค่าเท่ากับ 3.65 V หมายความว่าเมื่อแรงดันจากแบตเตอรี่มีค่ามากกว่า 3.65 V สัญญาณทางไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นบวก ส่วนวงจรป้องกันการจ่ายแรงดันต่ำเกินค่าร้อยละของเซลล์แบตเตอรี่ สัญญาณทางไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกเมื่อแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง โดยแรงดันอ้างอิงกำหนดไว้ในวงจรมีค่าเท่ากับ 2.00 V หมายความว่าเมื่อแรงดันจากแบตเตอรี่มีค่าน้อยกว่า 2.00 V สัญญาณทางไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นบวก ค่าที่ใช้ในการกำหนดแรงดันอ้างอิงทั้งสองวงจรอ้างอิงจากข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ (Specification)

ขั้นตอนการออกแบบวงจรป้องกันการไหลของกระแสที่มากเกินไป ขณะกักเก็บและคายประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ (Over Current Protection) จากข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ (Specification) กระแสสูงสุดขณะกักเก็บประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าเท่ากับ 180 Ah. และ 270 Ah. โดยในวงจรป้องกันการไหลของกระแสที่มากเกินไป ใช้อุปกรณ์หลักทางอิเล็กทรอนิกส์คือ มอสเฟต (MOSFET) ในการขับกระแส ซึ่งมอสเฟตที่ใช้ภายในวงจรทั้งสองมีจำนวน 16 ตัวและ 24 ตัว ตามลำดับ

เนื่องจากการออกแบบของสามวงจรข้างบน เป็นเพียงผลการจำลองผลและคาดคะเนเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในทางปฏิบัติจริง อาจมีความคลาดเคลื่อนของค่าผลลัพธ์ที่ได้เนื่องจากปัจจัยที่นอกเหนือจากการจำลองและคาดคะเน เช่น ประสิทธิภาพในการทำงานของตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แม้ว่าจะมีหมายเลขแต่ประสิทธิภาพในการใช้งานอาจมีความไม่เท่ากัน หรือแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายอาจมีความเสื่อมสภาพได้ตามเวลาที่ใช้งานมาแล้ว ภายในอนาคตจึงจำเป็นต้องสร้างต้นแบบขึ้นมาเพื่อใช้วิเคราะห์ว่าการจำลองและการคาดคะเนมีความถูกต้องหรือใกล้เคียงมากน้อยเพียงใดเมื่อนำมาใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

- 1) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของวงจรไฟฟ้าและอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานไม่มากพอ
- 2) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลองหรือทดสอบมีความล่าช้าในการสั่งซื้อทำให้การทำงานมีความล่าช้าตาม
- 3) มีประสบการณ์ในการจัดทำและเตรียมเอกสารทำให้เกิดข้อผิดพลาดและเกิดความล่าช้า
- 4) ระยะเวลาในการทดลองตามหัวข้อโครงการมีน้อยเกินไปทำให้การเก็บข้อมูลสำหรับการออกแบบออกแบบบ้างหัวข้อมีไม่เพียงพอ

## 5.3 แนวทางการแก้ไข

- 1) ศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับทฤษฎี และหลักการทำงานของวงจรไฟฟ้าและอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ให้มากขึ้น
- 2) ทำการจัดซื้ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเป็นไปได้ในการทดลองล่วงหน้า
- 3) วางแผนในการทำงานให้ชัดเจนและศึกษาการจัดทำจากเอกสารอื่นๆที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว
- 4) ทำความเข้าใจในหัวข้อโครงการให้มากขึ้นเพื่อแนวทางที่ชัดเจนในการดำเนินงาน

## 5.4 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาหัวข้อของโครงการและลักษณะการดำเนินงานให้ชัดเจนก่อน เพื่อไม่ให้เกิดความล่าช้าในการทำงานและจัดเตรียมเอกสาร

## เอกสารอ้างอิง

- [1] แบบจำลองทางไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ แหล่งที่มา: (สืบค้นวันที่ 10 สิงหาคม 2562)  
Sheldon S. Williamson, ... Benjamin Blunier, in Power Electronics Handbook (Third Edition), 2011
- [2] ทฤษฎีเกี่ยวกับออปแอมป์ แหล่งที่มา: (สืบค้นวันที่ 22 สิงหาคม 2562)  
[http://myminiprojectkub.blogspot.com/2015/12/blog-post\\_3.html](http://myminiprojectkub.blogspot.com/2015/12/blog-post_3.html)
- [3] วงจรแบ่งแรงดันโดยใช้ออปแอมป์ แหล่งที่มา: (สืบค้นวันที่ 23 สิงหาคม 2562)  
[http://living-electronics.blogspot.com/2010/05/blog-post\\_5115.html](http://living-electronics.blogspot.com/2010/05/blog-post_5115.html)
- [4] ทฤษฎีเกี่ยวและคุณลักษณะเกี่ยวกับมอสเฟต แหล่งที่มา: (สืบค้นวันที่ 4 กันยายน 2562)  
<http://pws.npru.ac.th/thawatchait/data/files/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%205%20%E0%B8%84%E0%B8%B8%E0%B8%93%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%A9%E0%B8%93%E0%B8%B0%E0%B8%A1%E0%B8%AD%E0%B8%AA%E0%B9%80%E0%B8%9F%E0%B8%95%20%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%A7%E0%B8%87%E0%B8%88%E0%B8%A3%E0%B9%84%E0%B8%9A%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%AA.pdf>
- [5] ความหมายของอัตราการคายประจุ แหล่งที่มา: (สืบค้นวันที่ 10 กันยายน 2562)  
<http://bb-batteryasia.com/discharge-rate/>
- [6] ข้อมูลจำเพาะของมอสเฟตหมายเลข IRFP150N แหล่งที่มา: (สืบค้นวันที่ 25 กันยายน 2562)  
<https://www.es.co.th/Schemetic/PDF/IRFP150N.PDF>
- [7] ข้อมูลจำเพาะของมอสเฟตหมายเลข IRFP4227 แหล่งที่มา: (สืบค้นวันที่ 27 กันยายน 2562)  
<https://www.infineon.com/dgdl/irfp4227pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153562927642004>
- [8] ข้อมูลจำเพาะของมอสเฟตหมายเลข IRF3710 แหล่งที่มา: (สืบค้นวันที่ 3 พฤศจิกายน 2562)  
<https://www.es.co.th/Schemetic/PDF/IRF3710.PDF>
- [9] ข้อมูลจำเพาะของมอสเฟตหมายเลข IRF510 แหล่งที่มา: (สืบค้นวันที่ 5 พฤศจิกายน 2562)  
<https://www.es.co.th/Schemetic/PDF/IRF510.PDF>

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายฉัตรดนัย ก้อนทอง
วัน-เดือน-ปี เกิด	22 ธันวาคม พ.ศ 2540
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 39/723 หมู่บ้านเนอเบอร์โฮม ถนนสุขาภิบาล 5 ซอย 82 แขวงสามวาตะวันตก เขตคลองสามวา จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10510
อีเมล	guypcp@gmail.com
เบอร์โทรศัพท์ (มือถือ)	085-846-5588
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี ภาควิชา วิศวกรรมการวัดคุมและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร ระดับมัธยมปลาย โรงเรียน พระมารดานิจจานุเคราะห์ จังหวัด กรุงเทพมหานคร
สถานที่ฝึกงาน	บริษัท เดอะ เทอร์มินอล เอฟ แอนด์ บี จำกัด
สถานที่ฝึกสหกิจ	บริษัท เดอะ เทอร์มินอล เอฟ แอนด์ บี จำกัด