การออกแบบเครื่องตรวจวัดข้อบกพร่องของสัญญาณคอนโทรลไพล็อตสำหรับการพัฒนาเครื่องอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า

นายสุปวีร์ บัวผัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การออกแบบเครื่องตรวจวัดข้อบกพร่องของสัญญาณคอนโทรลไพล็อตสำหรับการพัฒนาเครื่องอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า

นายสุปวีร์ บัวผัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การออกแบบเครื่องตรวจวัดข้อบกพร่องของสัญญาณคอนโทรลไพล็อตสำหรับการพัฒนาเครื่องอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า

โดย นายสุปวีร์ บัวผัน

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.เสาวณิต สุขภารังษี)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนวัช แสงสว่าง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรธรรม บุณยะกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุสลี่ สุทธวีร์กูล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพดล ฉาบแก้ว)

ชื่อ : นายสุปวีร์ บัวผัน
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบเครื่องตรวจวัดข้อบกพร่องของสัญญาณคอนโทรลไพล็อตสำหรับการพัฒนาเครื่องอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรธรรม บุณยะกุล
ปีการศึกษา : 2568

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงการพัฒนาเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์และตรวจสอบการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Supply Equipment: EVSE) โดยมุ่งเน้นการศึกษากลไกการสื่อสารของสัญญาณ Control Pilot (CP) ซึ่งเป็นสัญญาณหลักในการกำหนดโหมดการอัดประจุและตรวจสอบความปลอดภัยระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้า งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความผิดเพี้ยนของแรงดันและสัญญาณรบกวนที่อาจทำให้การตีความสถานะการอัดประจุผิดพลาด รวมถึงออกแบบวงจรตรวจวัดสัญญาณ CP ที่ประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรจำลองความผิดปกติ เช่น การเกิดกระแสรั่วหรือลัดวงจร วงจรทดสอบระบบป้องกันกระแสรั่ว (RCD) ทั้งแบบกระแสสลับ (AC) และกระแสตรง (DC) ตลอดจนวงจรวัดค่าความต้านทานฉนวนของสายอัดประจุเพื่อประเมินความปลอดภัยทางไฟฟ้า ผลการทดสอบกับ EVSE ที่ใช้งานจริง พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถตรวจวัดและระบุความผิดปกติของการสื่อสารและระบบป้องกันได้อย่างถูกต้อง งานนี้สามารถนำไปใช้พัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์การทำงานของ EVSE เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61851 และ IEC 60364

(มีจำนวนทั้งสิ้น 71 หน้า)

คำสำคัญ : อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า สัญญาณคอนโทรลไพล็อต ความปลอดภัยในการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า ระบบป้องกันกระแสไฟรั่ว การทดสอบความเป็นฉนวน การจำลองความความผิดพร่อง ความปลอดภัยของสายอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Supawee Buapun
Thesis Title : Design of a Control Pilot Analyser for electric vehicle supply equipment development
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Teratam Bunyagul
Academic Year : 2025

ABSTRACT

This thesis aims to develop a tool for analyzing the operation of Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE). The study focuses on the communication mechanisms of the Control Pilot (CP) signal, which serves as the primary signal for determining charging modes and monitoring safety between the EVSE and the electric vehicle (EV). The research investigates the effects of distortion and noise that may lead to the misinterpretation of charging states. Furthermore, the study includes the design of a CP signal measurement circuit using a microcontroller. It also involves the development of fault simulation circuits for both AC and DC Residual Current Devices (RCDs), as well as insulation resistance measurement circuits for charging cables to evaluate electrical safety. Experimental testing with EVSE systems demonstrated that the prototype could measure and identify communication faults and protection system anomalies. The outcomes of this research can be applied to the development of EVSE diagnostic and analytical tools, thereby enhancing the safety of EV charging systems in compliance with IEC 61851 and IEC 60364 standards.

(Total 71 Pages)

Keywords: Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE), Control Pilot (CP) signal, EV charging safety, Residual Current Device (RCD), Insulation resistance

measurement, Fault simulation, IEC 61851, Charging cable safety, EVSE diagnostics.

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเรียบร้อย เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ธีรธรรม บุณยะกุล อาจารย์รุสลี สุทธวีร์กูล และอาจารย์นพดล ฉาบแก้ว ที่ได้สละเวลาเป็นที่ปรึกษา คอยให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดการดำเนินงาน นอกจากนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ รวมถึงผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนๆ ที่คอยให้การสนับสนุน เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือเสมอมา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากผลงานฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบเพื่อเป็นกตัญญูกตเวทีแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุปวีร์ บัวผัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูปภาพ ..... ฌ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 เครื่องอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า 1
1.2 มาตรฐานการสื่อสารระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้า 4
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 6
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 8
2.1 วงจรจำลองการสื่อสารของยานยนต์ไฟฟ้า 8
2.2 วงจรตรวจจับแรงดัน 10
2.3 วงจรวัดสัญญาณคอนโทรลไพล็อต 11
2.4 อัลกอลิทึมการคำนวณค่าแอมพลิจูดของสัญญาณคอนโทรลไพล็อต 12
2.5 การทดสอบระบบป้องกันในกรณีไดโอดลัดวงจรของEVSE 15
2.6 การทดสอบระบบป้องกันในกรณีกราวถูกตัดการเชื่อมต่อของEVSE 16
2.7 การทดสอบระบบป้องกันในกรณีเกิดกระแสรั่วไหลของ EVSE 17
2.8 การทดสอบความเป็นฉนวนของสายอัดประจุ 19
บทที่ 3 การออกแบบและการเตรียมการทดสอบเครื่องทดสอบการทำงานของ EVSE 26
3.1 การออกแบบวงจรทดสอบการทำงานของ EVSE 26
3.2 การออกแบบวงจรวัดสัญญาณ CP 27
3.3 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดัน 28
3.4 การออกแบบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหล 32
3.5 การทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบการทำงานของ EVSE 36
3.6 การทดสอบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหล 37
3.7 การออกแบบวงจรทดสอบความเป็นฉนวน 39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8 การทดสอบวงจรทดสอบความเป็นฉนวน 41

บทที่ 4 ผลการวิจัย 43

4.1 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบEVSE 43

4.2 ผลการทดสอบของวงจรทดสอบระบบป้องกันของ EVSE 49

4.3 ผลการทดสอบของวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิดไฟฟ้ากระแสตรง 49

4.4 ผลการทดสอบของวงจรวัดค่าความเป็นฉนวน 50

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 52

5.1 สรุปผลงานวิจัย 52

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนางานวิจัย 53

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 1-1 สถานะการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้า 5
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบวงจรวัดค่าต้านทานของฉนวน 51

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ หน้า

1-1 โหมดการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า 3
1-2 ภาพรวมส่วนประกอบของ EVSE และยานยนต์ไฟฟ้า 3
1-3 ตัวอย่างสัญญาณคอนโทรลไพล็อต 4
1-4 แผนภาพสถานะจำกัดของสถานะการอัดประจุ 6
2-1 วงจรสมมูลของภาคสื่อสารระหว่าง EVSE และ EV 8
2-2 วงจรจำลองการสื่อสารของยานยนต์ไฟฟ้า 9
2-3 วงจรตรวจจับแรงดัน 10
2-4 วงจรวัดสัญญาณ CP 12
2-5 อัลกอลิทึมการหาค่าสูงสุด และต่ำสุดในอาเรย์ 13
2-6 อัลกอลิทึมการหาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณภายในอาเรย์โดยใช้ค่าเฉลี่ยฝั่งบวก 15
2-7 วงจรเทียบเคียงในกรณีที่ขั้ว PP ถูกต่อเข้ากับ EVSE ขณะที่ตัดการเชื่อมต่อกับ PE 16
2-8 วงจรเทียบเคียงการจำลองกระแสรั่วไหลชนิด AC 18
2-9 วงจรเทียบเคียงการจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC 19
2-10 แผนผังภาพโดยรวมของระบบการทดสอบความเป็นฉนวนแบบออฟไลน์ 20
2-11 แผนภาพโดยรวมวิธีการวัดค่าต้านทานฉนวน โดยใช้วงจรแบ่งแรงดัน 21
2-12 แผนภาพโดยรวมวิธีการวัดค่าต้านทานฉนวน โดยการวัดกระแสด้วยค่าต้านทานชันต์ 22
2-13 แผนผังภาพโดยรวมของระบบการทดสอบความเป็นฉนวนแบบออนไลน์ 23
2-14 วงจรเทียบเคียงระบบการวัดค่าต้านทานของฉนวน 24
3-1 โครงสร้างภาพรวมของเครื่องทดสอบ EVSE 26
3-2 วงจรปรับระดับสัญญาณ CP 27
3-3 อัตราการส่งผ่านกระแสของ LTV-814S-TA1 29
3-4 แผนผังวงจรตรวจจับแรงดันสำหรับแรงดันไลน์ 30
3-5 แผนผังวงจรตรวจจับแรงดันสำหรับการตรวจจับการต่อกราว 31
3-6 วงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC 33
3-7 แผนผังวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC 34
3-8 วงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC 34
3-9 แผนผังวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC 35
3-10 การทดสอบ EVSE ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อการออกแบบเครื่องทดสอบ EVSE 36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3-11 การทดสอบ EVSE ที่มาขายตามท้องตลาด 37
3-12 อุปกรณ์ตรวจจับกระแสรั่วไหล 38
3-13 สภาพแวดล้อมในการทดลองวงจรจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC 39
3-14 การทดลองวงจรจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC 39
3-15 วงจรทดสอบค่าความเป็นฉนวน 41
3-16 การทดลองวงจรวัดค่าความเป็นฉนวน 42
4-1 ส่วนการแสดงผลของแอปพลิเคชันฟอร์มสำหรับการแสดงผลการทดสอบ 44
4-2 ผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ในสถานะ A 44
4-3 ผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ในสถานะ B 45
4-4 ผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ในสถานะ C 45
4-5 ผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ในสถานะ D 46
4-6 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ A 47
4-7 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ B 48
4-8 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ C 48
4-9 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ D 49
4-10 ผลการทดสอบระบบป้องกันของ EVSE 49
4-11 ผลการทดสอบวงจรจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC 50

บทที่ 1
บทนำ

ระบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า (Brown, 2013) หรือ EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวกลางในการควบคุมการส่งกำลังระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้กระบวนการอัดประจุเป็นไปอย่างปลอดภัย และ มีเสถียรภาพ

สัญญาณหลักที่ใช้ในการสื่อสาร ระหว่าง EVSE และ ยานยนต์ไฟฟ้า คือ สัญญาณคอนโทรลไพล็อต (Control Pilot: CP) สัญญาณนี้ทำหน้าที่ กำหนดโหมดการอัดประจุ ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อ และกำหนดกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายให้กับยานยนต์ไฟฟ้าโดยการกำหนดกระแสสูงสุดในการอัดประจุ หากสัญญาณ CP เกิดความบกพร่อง เช่น รูปคลื่นผิดเพี้ยน ค่าระดับแรงดันไม่ถูกต้องตามมาตรฐาน IEC 61851 (International Standard IEC 62196, 2017) หรือมีสัญญาณรบกวน (Jeschke et al., 2018) อาจส่งผลให้การอัดประจุทำงานผิดพลาด หรือเกิดความไม่ความปลอดภัย ของทั้งตัวผู้ใช้งาน และระบบอัดประจุไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ มีจุดมุ่งหมายในการออกแบบ และพัฒนาเครื่องมือ สำหรับการตรวจวัดความผิดปกติ ของสัญญาณ CP การทดสอบการทำงานของ EVSE เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับผู้พัฒนา EVSE ให้เป็นไปตามมาตรฐานตามหลักสากล

1.1 เครื่องอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้า มีบทบาทสำคัญ ในการบรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อม และ ปัญหาอันเนื่องมาจากวิกฤติการณ์พลังงาน องค์ประกอบที่ขาดไม่ได้ในการขับเคลื่อนระบบนิเวศของยานยนต์ไฟฟ้าคือ ระบบอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า หรือที่คุ้นเคยกันในชื่อ EVSE

การทำความเข้าใจระบบ EVSE จำเป็นต้องอาศัยการศึกษาตั้งแต่พื้นฐานรูปแบบการจ่ายพลังงาน กลไกการควบคุม และองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ โดยสามารถแบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ การจำแนกโหมดการอัดประจุตามมาตรฐานสากล หลักการทำงานของการสื่อสารระหว่างตัวรถกับ EVSE และโครงสร้างภายในของ EVSE

การประจุพลังงานให้กับยานยนต์ไฟฟ้าถูกจำแนกตามระดับความปลอดภัยและการควบคุมระบบตามมาตรฐาน IEC 61851-1 โดยแบ่งออกเป็น 4 โหมดหลักดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 1-1

โหมดที่ 1 คือการอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยการเชื่อมต่อเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ภายในตัวยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าผ่านเต้ารับมาตรฐานโดยตรง ปัจจุบันการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าในโหมดที่ 1 ถูกระงับการใช้งานในหลายพื้นที่เนื่องจากความเสี่ยงด้านความปลอดภัย

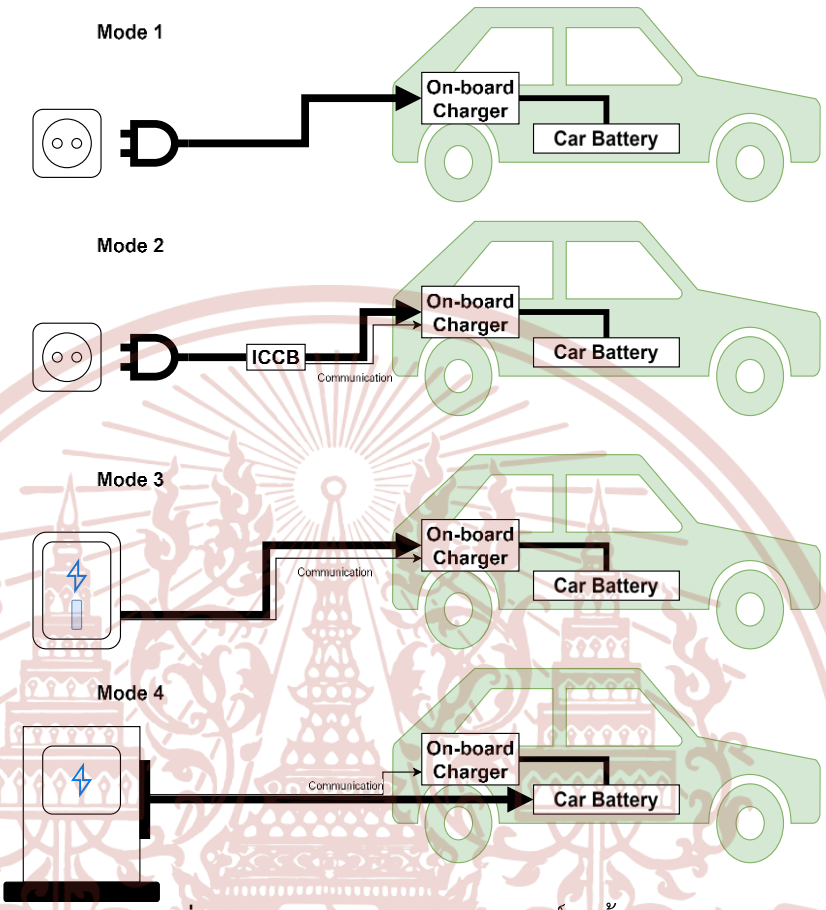
โหมดที่ 2 คือการอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยการเชื่อมต่อเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ภายในตัวยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าผ่านเต้ารับมาตรฐาน โดยมีการเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมและป้องกันภายในสายเรียกว่า In-Cable Control and Protection Device (IC-CPD) อุปกรณ์ IC-CPD ทำหน้าที่ตรวจจับกระแสรั่วไหล จำกัดกระแสสูงสุด และสื่อสารสถานะผ่านสัญญาณ CP โหมดนี้มักใช้เป็นระบบชาร์จสำรองสำหรับการใช้งานภายในที่พักอาศัย

โหมดที่ 3 คือการอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) โดยยานยนต์ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์จ่ายไฟสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างจากโหมดที่ 2 ตรงที่อุปกรณ์ควบคุมและป้องกันความปลอดภัยทั้งหมดจะถูกติดตั้งรวมอยู่ในตัวเครื่องชาร์จที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังอย่างถาวรแทนการใช้อุปกรณ์ IC-CPD บนสายชาร์จ โดยระบบนี้จะมาพร้อมกับฟังก์ชันความปลอดภัยเต็มรูปแบบ และใช้สัญญาณ CP ในการสื่อสารเพื่อควบคุมในการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า

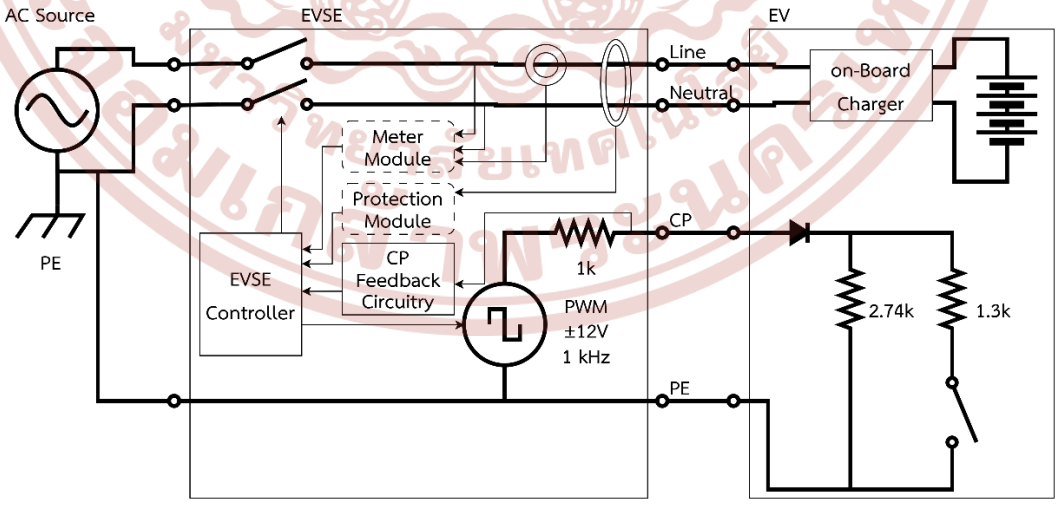
โหมดที่ 4 เป็นการอัดประจุด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC) โดยการเชื่อมต่อวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ติดตั้งอยู่ภายในสถานีชาร์จ เข้าสู่แบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่ผ่านเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ภายในตัวยานยนต์ไฟฟ้า ในระบบนี้จะใช้วิธีสื่อสารระดับสูง เช่น โปรโตคอล ISO 15118 หรือ DIN 70121 ร่วมกับการสื่อสารโดยใช้สัญญาณ CP เพื่อกำหนดพารามิเตอร์การชาร์จ

EVSE ในโหมดที่ได้ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ EVSE ในโหมดที่ 3 ซึ่งเป็นโหมดที่นิยมติดตั้งภายในสถานีอัดประจุโดยทั่วไป กลไกการสื่อสารระหว่าง EVSE กับยานยนต์ไฟฟ้าผ่านขั้วสัญญาณ CP

เพื่อให้วงจรการทำงานและการสื่อสารดังกล่าวเป็นไปอย่างสมบูรณ์ โครงสร้างภายในของ EVSE โหมด 3 ดังแสดงในภาพที่ 1-2 มีองค์ประกอบทางฮาร์ดแวร์ที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนควบคุมการอัดประจุ (EVSE Controller) ที่เปรียบเสมือนสมองกลคอยสร้างและประมวลผลสัญญาณ CP พร้อมทั้งสั่งการระบบต่างๆ ถัดมาคืออุปกรณ์ตัดต่อกำลังไฟฟ้าหรือคอนแทคเตอร์ (Contactor) ที่ทำหน้าที่ตัดต่อกระแสไฟฟ้าสายหลักไปยังตัวรถ นอกจากนี้ยังมีระบบป้องกันทางไฟฟ้า เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์และอุปกรณ์ป้องกันไฟรั่ว (RCD) ที่ออกแบบมาเพื่อตัดวงจรทันทีเมื่อเกิดความผิดปกติ



ภาพที่ 1-1 โหมดการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า



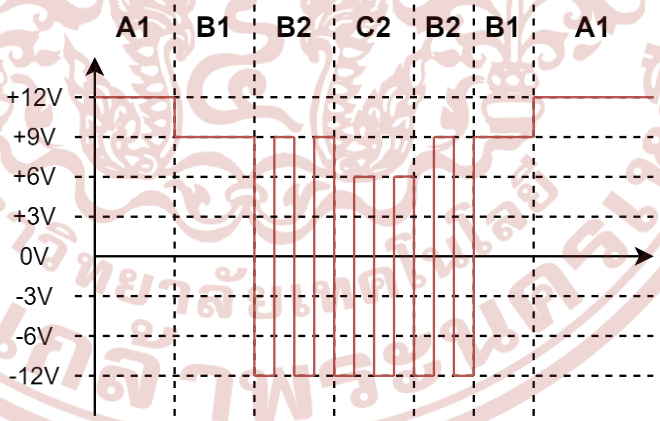
ภาพที่ 1-2 ภาพรวมส่วนประกอบของ EVSE และยานยนต์ไฟฟ้า

การศึกษาและพัฒนาระบบอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าหรือ EVSE นั้น ไม่ได้เป็นเพียงการนำแหล่งจ่ายไฟมาต่อเข้ากับตัวรถ แต่จำเป็นต้องมีการออกแบบระบบการสื่อสารผ่านสัญญาณ CP ที่แม่นยำ ไปจนถึงการสร้างฮาร์ดแวร์ระบบป้องกันเพื่อความปลอดภัยสูงสุด การทำความเข้าใจองค์ประกอบเหล่านี้อย่างลึกซึ้ง ไม่เพียงแต่ช่วยให้ผู้พัฒนาสามารถออกแบบระบบที่สอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรม แต่ยังเป็นการยกระดับความน่าเชื่อถือและความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าในระยะยาวอีกด้วย

1.2 มาตรฐานการสื่อสารระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้า

สัญญาณหลักที่ใช้ในการสื่อสารและควบคุมการทำงานระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้า คือสัญญาณ CP ตามมาตรฐาน IEC 61851-1 สัญญาณนี้มีหน้าที่สำคัญ ได้แก่ การควบคุมกระบวนการจ่ายและตัดการจ่ายพลังงานไฟฟ้า และการกำหนดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อนุญาตให้ยานยนต์ไฟฟ้าดึงไปใช้งานได้

ในด้านหลักการทำงาน วงจรสื่อสารผ่านสัญญาณคอนโทรลไพล็อตจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) ซึ่งมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ +12 V และต่ำสุดที่ -12 V EVSE จะประเมินและปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (Duty cycle) ของสัญญาณ PWM เพื่อสื่อสารขนาดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อนุญาตให้ยานยนต์ไฟฟ้าทราบ ในขณะเดียวกัน ยานยนต์ไฟฟ้าจะอาศัยการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานในวงจรเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าลง ซึ่งจะเป็นการระบุสถานะการทำงานของตนเองกลับไปยังEVSE



ภาพที่ 1-3 ตัวอย่างสัญญาณคอนโทรลไพล็อต

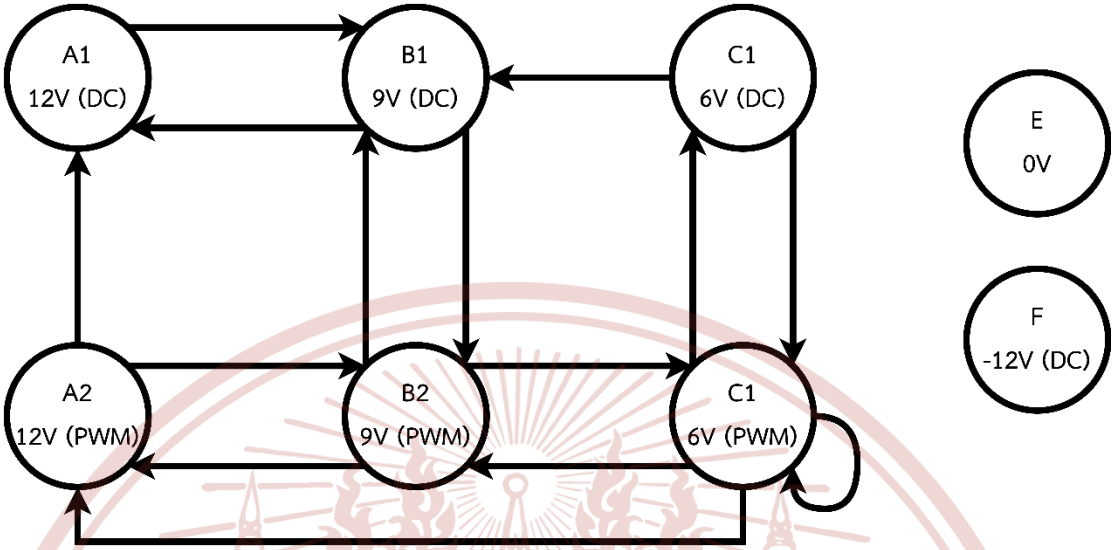
มาตรฐาน IEC 61851-1 ได้มีการจำแนกสถานะการทำงานของสัญญาณ CP แบ่งออกเป็น 6 สถานะหลัก ได้แก่ สถานะ A, B, C, D, E และ F ดังตัวอย่างลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณในแต่ละสถานะ ในภาพที่ 1-3 โดยระดับแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ถูกใช้ เพื่อบ่งชี้สภาวะการทำงานของระบบดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 สถานะการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้า

สถานการทำงาน	แรงดันบวก (V)			ความหมาย
	ต่ำสุด	ปกติ	สูงสุด	
สถานะ A	11.4	12	12.6	ยังไม่มีการเชื่อมต่อ
สถานะ B	8.37	9	9.59	มีการเชื่อมต่อ
สถานะ C	5.47	6	6.53	การอัดประจุ
สถานะ D	2.59	3	3.28	ต้องการระบบระบายอากาศ
สถานะ E	-	0	-	เกิดความผิดพร่องที่ฝั่งยานยนต์ไฟฟ้า
สถานะ F	-	-12	-	เกิดความผิดพร่องที่ฝั่งเครื่องอัดประจุ

สัญญาณ CP ในสถานะ A, B, C และ D ยังสามารถควบคุมกระบวนการทำงานผ่านรูปแบบของสัญญาณ 2 ลักษณะ ได้แก่ สัญญาณแบบ PWM และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าคงที่ (DC) ซึ่งการปรากฏของสัญญาณรูปแบบ PWM จะเป็นเครื่องบ่งชี้ว่า EVSE มีความพร้อมและอนุญาตให้ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถดึงกระแสไฟฟ้าเพื่อเข้าสู่กระบวนการอัดประจุได้ สัญญาณรูปแบบ DC จะมีความหมายว่า EVSE ไม่อนุญาตให้ยานยนต์ไฟฟ้าทำการอัดประจุ กระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพสถานะจำกัด (Finite State Machine) ดังแสดงในภาพที่ 1-4

ตัวอย่างเช่น เมื่อ EVSE จ่ายสัญญาณในสถานะ B1 (รูปแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่) ยานยนต์ไฟฟ้าจะยังคงรักษาสถานะเดิมไว้ แต่เมื่อ EVSE เปลี่ยนการส่งสัญญาณจากสถานะ B1 เป็น B2 (รูปแบบพัลส์ หรือ PWM) ยานยนต์ไฟฟ้าจะตอบสนองโดยการลดความต้านทานในวงจรเพื่อเปลี่ยนสถานะเข้าสู่สถานะ C2 และเริ่มต้นการอัดประจุ ในทำนองเดียวกัน หากระบบกำลังทำงานอยู่ในสถานะ C2 และ EVSE ต้องการสั่งการให้หยุดกระบวนการ EVSE จะเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณจาก PWM กลับเป็น DC ส่งผลให้สัญญาณเข้าสู่สถานะ C1 ซึ่งยานยนต์ไฟฟ้าจะต้องตอบสนองด้วยการหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและเปลี่ยนสถานะของตนเองกลับคืนสู่สถานะ B1 ในลำดับต่อไป



ภาพที่ 1-4 แผนภาพสถานะจำกัดของสถานะการอัดประจุ

มาตรฐาน IEC 61851-1 ระบุถึงระบบป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าดูดด้วย โดยมีข้อกำหนดให้ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตัดวงจรเมื่อกระแสไฟฟ้ารั่ว (Residual Current Device: RCD) อย่างน้อยชนิด Type A ที่ฝั่งขาเข้าของ EVSE

จะต้องมีมาตรการป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วไหลแบบกระแสตรงเพิ่มเติม โดยระบบอาจเลือกใช้ RCD ชนิด Type B หรือใช้ RCD ชนิด Type A ร่วมกับอุปกรณ์ที่สามารถตัดวงจรเมื่อตรวจพบกระแสไฟฟ้ารั่วไหลแบบกระแสตรงเกิน 6 มิลลิแอมแปร์ (mA) เพื่อรับประกันความปลอดภัยสูงสุดแก่ผู้ใช้งาน

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.3.1 เพื่อศึกษากลไกการสื่อสารระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้าผ่านสัญญาณ CP และสร้างวงจรตรวจวัดสัญญาณ CP ซึ่งสามารถวัด และแสดงค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ

1.3.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของความผิดเพี้ยนของระดับแรงดันสัญญาณ CP ที่อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบในวงจร เช่น ค่าต้านทานที่ใช้ในการสื่อสารระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้าหรือแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ของสัญญาณ CP ซึ่งอาจส่งผลต่อการตีความสถานะการอัดประจุผิดพลาดของ EVSE หรือ ยานยนต์ไฟฟ้า

1.3.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวน (Noise) ที่แทรกในสัญญาณ CP ต่อความถูกต้องของการสื่อสารระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้าโดยเฉพาะในกรณีที่สัญญาณรบกวนมีความถี่ใกล้เคียงกับสัญญาณ PWM หรือมีลักษณะการรบกวนแบบสัญญาณสุ่ม

1.3.4 เพื่อศึกษาความสามารถของระบบป้องกันใน EVSE และสร้างเครื่องทดสอบระบบป้องกันของ EVSE ในการทดสอบการตอบสนองต่อความผิดปกติของ EVSE

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ออกแบบและสร้างวงจรตรวจวัดสัญญาณ CP ซึ่งสามารถวัด และแสดงค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ เช่น ความถี่ ความกว้างพัลส์ แรงดันสูงสุด แรงดันต่ำสุด และรูปคลื่นของสัญญาณ CP

1.4.2 ออกแบบและสร้างวงจรทดสอบระบบป้องกันของ EVSE ซึ่งรวมถึงการจำลองสภาวะผิดปกติ เช่น การเกิดกระแสรั่วไหล หรือเกิดความผิดปกติที่สัญญาณ CP เพื่อทดสอบการทำงานของรีเลย์ป้องกันและระบบตัดไฟ

1.4.3 ออกแบบและสร้างวงจรทดสอบการทำงานของ RCD ทั้งชนิด Type A ที่ใช้ตรวจจับกระแส AC และ Type B ที่สามารถตรวจจับได้ทั้งกระแส AC และ DC โดยใช้วงจรจำลองการรั่วไหลของกระแสทั้งสองชนิด

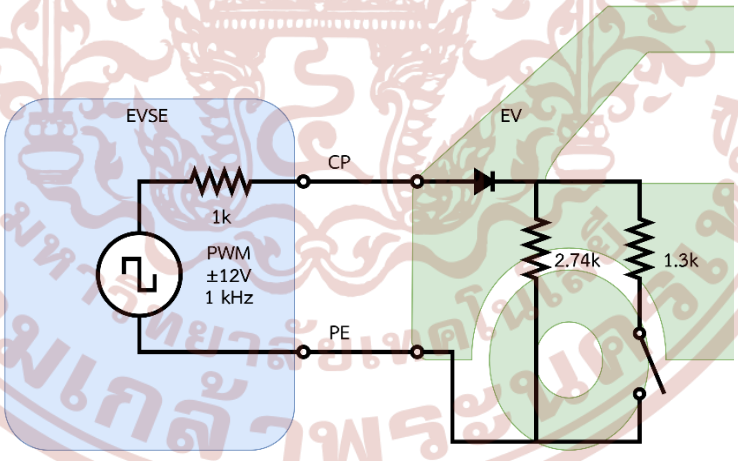
1.4.4 ออกแบบและสร้างวงจรวัดค่าความเป็นฉนวนของสายอัดประจุ EVSE (Insulation Resistance Measurement) เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวนไฟฟ้าโดยใช้วงจรสร้างแรงดันสูงและวงจรวัดกระแสรั่วที่เกิดขึ้น เพื่อคำนวณค่าความต้านทานฉนวนตามมาตรฐานความปลอดภัย

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้นำเสนอแนวคิดทางทฤษฎีที่เป็นรากฐานสำคัญของงานวิจัย ได้แก่ หลักการทำงานของระบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษา แนวคิดเกี่ยวกับการประมวลผลสัญญาณในรูปแบบดิจิตอล และทฤษฎีการทดสอบระบบป้องกันของ EVSE

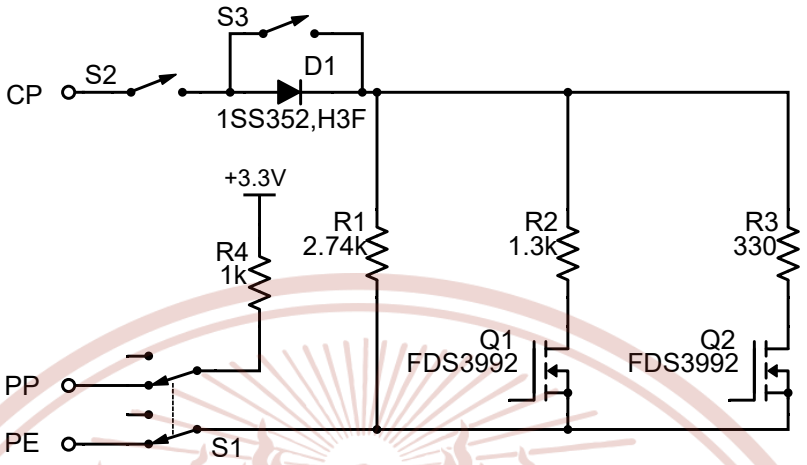
2.1 วงจรจำลองการสื่อสารของยานยนต์ไฟฟ้า

การสื่อสารระหว่างยานยนต์ไฟฟ้าและ EVSE อาศัยวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ดังที่แสดงในภาพที่ 2-1 โครงสร้างภายในของ EVSE จะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation: PWM) และตัวต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์ม (kΩ) ที่ต่ออนุกรมอยู่ภายในวงจร ในขณะเดียวกัน ทางฝั่งของยานยนต์ไฟฟ้าจะประกอบด้วยเครือข่ายไดโอด ตัวต้านทานและสวิตช์ควบคุม ซึ่งทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานรวมที่ต่อขนานอยู่ระหว่างสายสัญญาณ CP และสายกราวด์ (Protective Earth หรือ PE)



ภาพที่ 2-1 วงจรสมมูลของภาคสื่อสารระหว่าง EVSE และ EV

หลักการทำงานของระบบคือ EVSE จะทำการปรับเปลี่ยนค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM เพื่อกำหนดกระแสสูงสุด ที่ระบบสามารถจ่ายให้กับยานยนต์ไฟฟ้าได้ หลังจากนั้นยานยนต์ไฟฟ้าจะสั่งการสวิตช์เพื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานรวมระหว่างสาย CP และ PE ตามรายละเอียดวงจรในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 วงจรจำลองการสื่อสารของยานยนต์ไฟฟ้า

ในการทดสอบระบบและจำลองสถานการณ์ทำงานของ EVSE จะมีการใช้สวิตช์เพื่อจำลองสภาวะต่างๆ ดังนี้:

2.1.1 สถานะ A (Not Connected): สวิตช์ S_2 จะเปิดวงจร เพื่อจำลองสถานการณ์ที่ยานยนต์ไฟฟ้ายังไม่ถูกเชื่อมต่อเข้ากับ EVSE ณ ขณะนี้แรงดันตกคร่อมระหว่าง CP และ PE จะอยู่ที่ 12 โวลต์ ซึ่งโดยมากแล้วสัญญาณในสถานะนี้จะอยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

2.1.2 สถานะ B (Vehicle Connected): สวิตช์ S_2 จะถูกสับวงจรเพื่อจำลองการเสียบหัวอัดประจุเข้ากับตัวรถ โดยวงจรจะทำการต่อตัวต้านทานขนาด 2.74 กิโลโอห์ม เข้ากับสาย CP และ PE การต่อโหลดนี้ทำให้เกิดการแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ส่งผลให้แรงดันสูงสุดในซีกบวกของสัญญาณลดลงจาก 12 โวลต์ เป็น 9 โวลต์ ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณให้ EVSE รับรู้ว่ามีการเชื่อมต่อกับยานยนต์ไฟฟ้าแล้ว

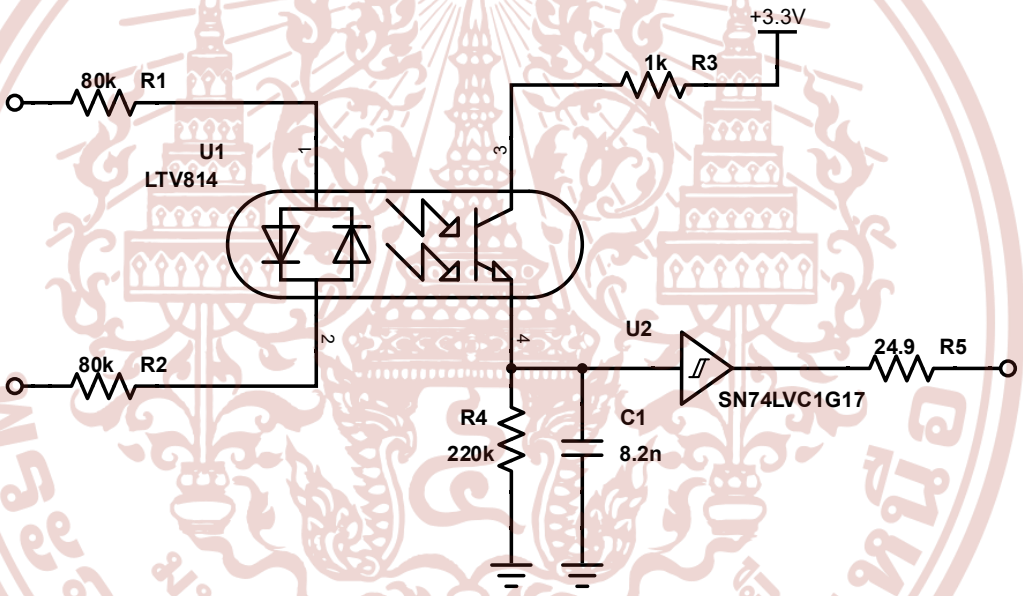
2.1.3 สถานะ C (Charging): เมื่อยานยนต์ไฟฟ้าพร้อมที่จะรับการประจุไฟ มอสเฟต Q_1 จะทำงานเพื่อจำลองการเข้าสู่สถานะ C โดยจะทำการต่อตัวต้านทานขนาด 1.3 กิโลโอห์ม ขนานเพิ่มเข้าไปกับตัวต้านทาน 2.74 กิโลโอห์มเดิม ส่งผลให้ค่าความต้านทานรวมในวงจรลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้แรงดันสูงสุดของสาย CP ถูกดึงลดลงอีกครั้งจาก 9 โวลต์ เป็น 6 โวลต์ EVSE จะตรวจจับระดับแรงดันนี้และทำการสั่งจ่ายกระแสไฟ เพื่อเริ่มต้นกระบวนการอัดประจุ

2.1.4 สถานะ D (Ventilation required): ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้ากำลังทำการอัดประจุสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าบางรุ่นจาเป็นต้องมีการระบายอากาศสำหรับแบตเตอร์รี่ ในการจำลองสถานะ D มอสเฟต Q_2 จะทาการต่อตัวต้านทานขนาด 330 โอห์มขนานเพิ่มเข้าไปที่ขั้วต่อระหว่าง CP และ PE ส่งผลให้แรงดันสูงสุดของสัญญาณ CP ลดลงจาก 6 โวลต์ เหลือ 3 โวลต์ อย่างไรก็ดี การจำลองสถานะ D จะถูกใช้สำหรับการทดสอบ EVSE ในรุ่นเก่า เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันโดยมากจะ

ไม่มีการใช้งานสถานะ D แล้วเนื่องจากเทคโนโลยีการอัดประจุแบตเตอร์รี่ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ดีขึ้น กล่าวคือการตอบสนองของ EVSE ในกรณีที่ทำการทดสอบอาจมีความแตกต่างกัน

2.2 วงจรตรวจจับแรงดัน

วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบสถานะการจ่ายพลังงานไฟฟ้าจาก EVSE ว่ามีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ยานยนต์ไฟฟ้าหรือไม่ โดยวงจรดังกล่าวมีหน้าที่ในการทดสอบ การตอบสนองของ EVSE ทั้งในสภาวะเริ่มต้นกระบวนการอัดประจุ และในสภาวะ การยุติการอัดประจุ นอกจากนี้ วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ยังถูกนำไปใช้สำหรับการประเมินระยะเวลาในการตอบสนอง (Response Time) ของ EVSE ในกรณีที่เกิดสภาวะความผิดปกติใดๆ ขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดประจุอีกด้วย



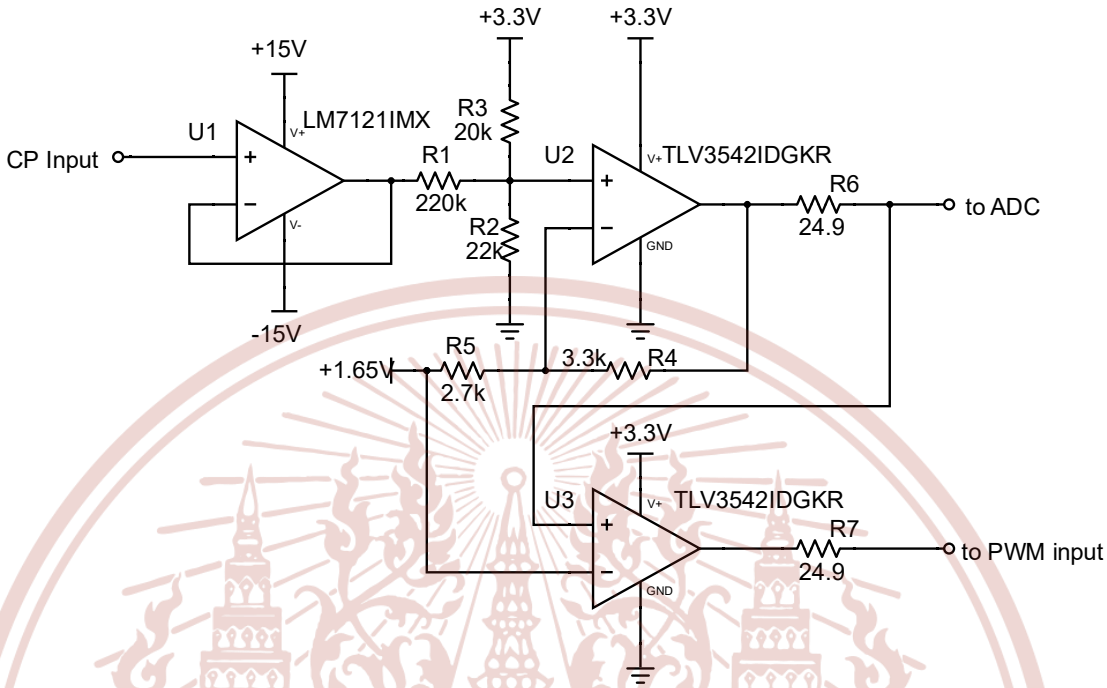
ภาพที่ 2-3 วงจรตรวจจับแรงดัน

จากภาพที่ 2-3 ซึ่งแสดงถึงวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า โดยมีหลักการทำงานพื้นฐานคือ เมื่อมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ปรากฏ ขึ้น ที่ จุดรับสัญญาณ ด้านเข้า อุปกรณ์ เชื่อมโยงทางแสง หรือ ออปโตคัปเปลอร์ (Optocoupler) จะเริ่มทำงาน ซึ่งจะส่งผลให้ทรานซิสเตอร์ที่อยู่ทางด้านออก ของออปโตคัปเปลอร์เกิดการนำกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์นี้จะถูกนำไปใช้ในการประจุไฟฟ้าเข้าสู่ตัวเก็บประจุอย่างต่อเนื่อง และเมื่อตัวเก็บประจุได้รับการประจุไฟฟ้าจนกระทั่งมีระดับแรงดันไฟฟ้าสะสมเพิ่มสูงขึ้นเหนือกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยน ของวงจรชมิตต์ทริกเกอร์ (Schmitt Trigger) จะส่งผลให้วงจรชมิตต์ทริกเกอร์เปลี่ยนสถานะและส่งสัญญาณทางตรรกะระดับสูง (Logic 1) ออกไปยังจุดส่งออกสัญญาณของวงจร จากสถานะทางตรรกะที่ปรากฏบริเวณด้านออกของวงจรนี้เอง ระบบประมวลผลจึงสามารถนำมาตีความและยืนยันได้อย่างแน่ชัดว่ามีแรงดันไฟฟ้าถูกจ่ายเข้ามาที่บริเวณด้านเข้าของวงจรตรวจจับ

2.3 วงจรวัดสัญญาณคอนโทรลไพล็อต

จากมาตรฐาน IEC61851 จะได้ว่าระดับแรงดันของสัญญาณคอนโทรลไพล็อตจะมีลักษณะเป็นพัลส์ โดยมีค่าระดับแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 12 โวลต์ และต่ำสุดอยู่ที่ -12 โวลต์ จะสังเกตได้ว่าระดับแรงดันของสัญญาณคอนโทรลไพล็อตไม่สามารถวัดได้โดยใช้ตัวแปลงอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิตอลของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรง เนื่องจากสัญญาณคอนโทรลไพล็อตทีระดับแรงดันสูง และมีแรงดันในช่วงบวกและแรงดันในช่วงลบ วงจรวัดสัญญาณคอนโทรลไพล็อตจึงมีหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันจาก ±12 โวลต์ ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 3.3 โวลต์

ภาพที่ 2-4 แสดงถึงวงจรวัดค่าสัญญาณ CP โดยจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนได้แก่ ส่วนบัฟเฟอร์ มีหน้าที่ในการส่งผ่านแรงดันที่ขั้ว CP ไปยังวงจรปรับระดับแรงดันในส่วนต่อไป เพื่อป้องกันไม่ให้ค่าต้านทานขาเข้าของวงจรปรับระดับแรงดันมีผลกับค่าต้านทานระหว่างขั้ว CP และ PE ส่วนต่อมาคือส่วนปรับระดับแรงดัน โดยวงจรในส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการลดขนาดของแรงดัน และเลื่อนจุดศูนย์ของสัญญาณ CP เพื่อให้สัญญาณอยู่ในช่วงแรงดันบวกเพื่อนำไปใช้ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อใช้ในการประมวลผลในส่วนต่อไป ส่วนสุดท้ายคือส่วนของวงจรเปรียบเทียบ หน้าที่ของวงจรในส่วนสุดท้ายคือการแปลงสัญญาณ CP ที่ถูกปรับระดับแล้วให้อยู่ในรูปของพัลส์ที่มีระดับแรงดัน 2 ระดับนั่นคือ 3.3 โวลต์และ 0 โวลต์ กล่าวคือวงจรในส่วนสุดท้ายนี้มีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณ CP ที่อยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อกให้กลายเป็นสัญญาณพัลส์ดิจิตอล โดยสัญญาณนี้จะถูกนำไปใช้ในการวัดความถี่ของสัญญาณและ Duty cycle ของสัญญาณ ซึ่งจะถูกวัดโดยใช้ไทม์เมอร์ (Timer) ซึ่งถูกตั้งค่าให้ทำงานในโหมดอินพุตแคปเจอร์ (Input Capture) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำงานกับสัญญาณดิจิตอลเท่านั้น



ภาพที่ 2-4 วงจรวัดสัญญาณ CP

2.4 อัลกอลิทึมการคำนวณค่าแอมพลิจูดของสัญญาณคอนโทรลไพล็อต

สัญญาณคอนโทรลไพล็อตเป็นสัญญาณที่มีลักษณะเป็นพัลส์ซึ่งโดยมากจะมีขอบขาที่ชัน นอกจากนี้เนื่องจากสัญญาณคอนโทรลไพล็อตเป็นสัญญาณแรงดันระหว่างจุดต่อ CP และ PE ซึ่งจุดต่อ PE ดังนั้นสัญญาณ CP จึงมีโอกาสที่จะเกิดการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนโหมดร่วม (Common-mode noise) ซึ่งโดยมากจะอยู่ในย่านความถี่สูง เข้ามายังสัญญาณ CP ซึ่งเป็นอุปสรรคในการคำนวนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ

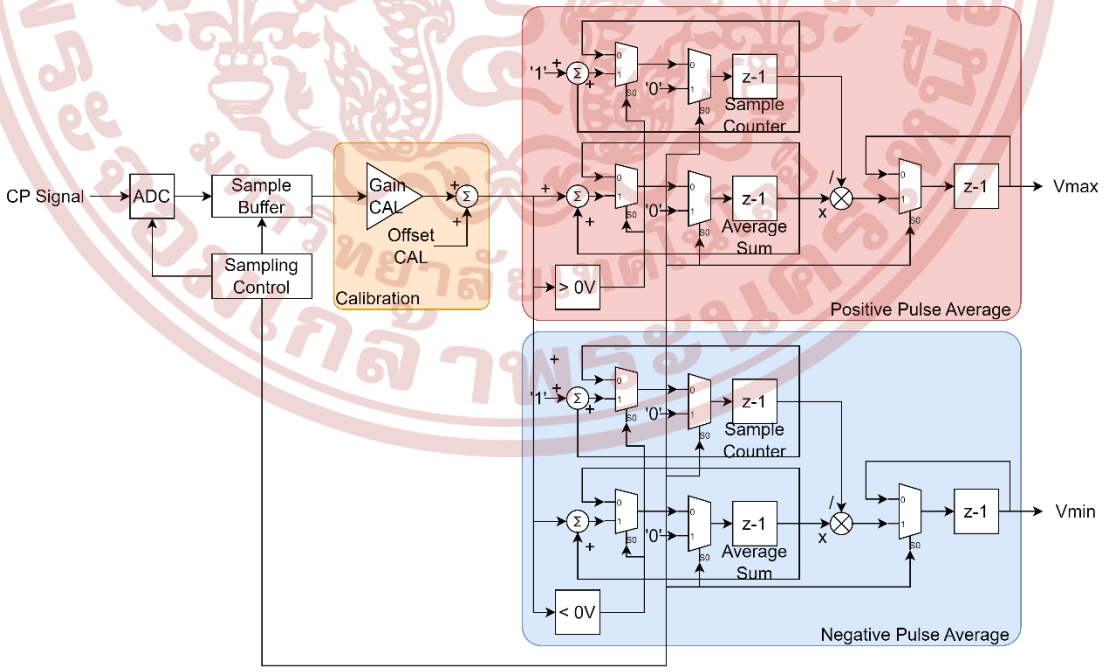
ขั้นตอนแรกในการคำนวณค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ คือการสุ่มตัวอย่างสัญญาณ (Signal Sampling) อย่างต่อเนื่องจนกว่าบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลจะเต็ม จึงจะนำกลุ่มข้อมูลตัวอย่างดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการประมวลผลในลำดับถัดไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการสุ่มอ่านค่าสัญญาณ CP โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล STM32 ซึ่งมีจุดเด่นที่โมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter: ADC) สามารถตั้งค่าให้โอนถ่ายข้อมูลที่สุ่มได้ลงสู่หน่วยความจำได้โดยตรงผ่านอุปกรณ์ Direct Memory Access (DMA) โดยไม่ต้องอาศัยการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง คุณสมบัติดังกล่าวช่วยลดภาระการทำงานของระบบ และทำให้สามารถใช้งานโมดูล ADC สุ่มตัวอย่างสัญญาณด้วยความถี่ที่สูงถึง 4 เมกะแซมเปิลต่อวินาที (MSPS)

ลำดับต่อมาคือกระบวนการชดเชยความคลาดเคลื่อนของ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของข้อมูล ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของอัตราขยาย (Gain Error) และความคลาดเคลื่อนจุดศูนย์ (Offset Error) การชดเชยความคลาดเคลื่อนเหล่านี้สามารถดำเนินการได้โดยการสอบเทียบ (Calibration) โมดูล ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน เพื่อนำค่าที่ได้มาเป็นเกณฑ์ในการปรับแก้ชุดข้อมูล

หลังจากข้อมูลตัวอย่างผ่านกระบวนการชดเชยความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ชุดข้อมูลดังกล่าวจะมีความถูกต้องเพียงพอที่จะนำมาประมวลผลเพื่อหาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ และเมื่อผ่านกระบวนการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลแล้ว ค่าแอมพลิจูดที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อแปลงเป็นค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ CP ที่เกิดขึ้นจริงได้

2.4.1 อัลกอลิทึมการหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณภายในอาเรย์ทั่วไป

อัลกอลิทึมพื้นฐานในการหาค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของสัญญาณคือการตรวจสอบค่าของสมาชิกแต่ละตัวที่อยู่ในอาเรย์เพื่อหาตัวที่มีค่าสูงสุดในอาเรย์ ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 2-5 วิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้กับการหาแอมพลิจูดของสัญญาณได้ แต่อย่างไรก็ดีตามที่ได้กล่าวไปถึงคุณลักษณะของสัญญาณ CP ในทางปฏิบัติ ซึ่งอาจประกอบไปด้วยสัญญาณรบกวนความถี่สูง หรือในบางครั้งอาจประกอบไปด้วยทรานเซียนที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งสามารถถูกเหนี่ยวนำมายังสัญญาณ CP ได้



ภาพที่ 2-5 อัลกอลิทึมการหาค่าสูงสุด และต่ำสุดในอาเรย์

ด้วยปัญหาที่กล่าวมาการนำอัลกอลิทึมการหาค่าสูงสุดและต่ำสุดภายนอาเรย์ไม่เหมาะแก่การนำมาใช้ในการหาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ CP แต่อย่างไรก็ดีในการวิเคราะห์สัญญาณ CP ในสภาวะที่เป็นสัญญาณ DC ซึ่งโดยมากมักจะมีสัญญาณรบกวนซึ่งถูกเหนี่ยวนำเข้ามาจากระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้ง EVSE อยู่ด้วย อัลกอลิทึมการหาค่าสูงสุดและต่ำสุดภายนอาเรย์สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของสัญญาณรบกวนดังกล่าวได้

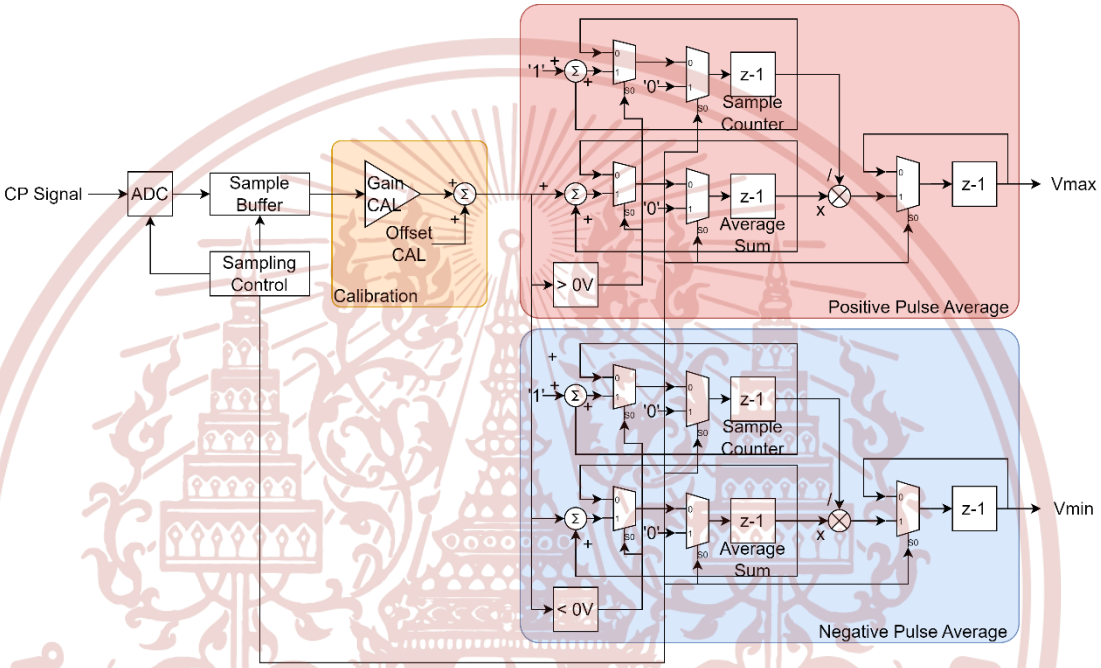
2.4.2 อัลกอลิทึมการหาค่าแอมพริจูดของสัญญาณภายในอาเรย์โดยใช้ค่าเฉลี่ยฝั่งบวก

สืบเนื่องจากปัญหาอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่ขั้ว CP อันเป็นผลทำให้การคำนวนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ PWM เกิดความคลาดเคลื่อน เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงการแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน ในย่านความถี่สูง ซึ่งโดยมากหากสัญญาณรบกวนดังกล่าวถูกสร้างโดยสวิตซ์ชิงพาวเวอร์ซัพพลาย(Switching Power Supply) (Jeschke et al., 2018) ที่ต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังเดียวกันกับ EVSE ความถี่ของสัญญาณรบกวนดังกล่าวมักจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 500 กิโลเฮิรตซ์ หรือสัญญาณรบกวนในอีกรูปแบบหนึ่งนั่นคือสัญญาณพาวเวอร์ไลน์คอมมิวนิเคชัน (Power Line Communication : PLC) (Lewandowski et al., 2012) ซึ่งจะถูกใช้ในการสื่อสารสำหรับ EVSE ในโหมดที่ 4 แต่อย่างไรก็ดีสัญญาณสื่อสารดังกล่าวสามารถถูกเหนี่ยวนำเข้ามายังสัญญาณ CP ได้ ซึ่งสัญญาณสื่อสารดังกล่าวจะมีช่วงความถี่อยู่ในย่าน 2 ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์

แนวทางในการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนตามที่ได้กล่าวมาคือการเพิ่มระบบการกรองความถี่ต่ำผ่านให้กับสัญญาณ โดยจะใช้การหาค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นวิธีการในการกรองความถี่ต่ำผ่านที่พื้นฐานที่สุด โดยอัลกอลิทึมการคำนวนค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ PWM แสดงในภาพที่ 2-6 โดยหลักการคือหลังจากที่ได้ทำการสุ่มค่าตัวอย่างสัญญาณ และทำการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากเครื่องมือวัดมาแล้ว ขั้นตอนในการวิเคราะห์ขั้นตอนแรกคือการแยกตัวอย่างสัญญาณในซีกบวก และสัญญาณในซีกลบ จากนั้นสัญญาณซีกบวก และสัญญาณในซีกลบจะถูกนำไปคำนวนหาค่าเฉลี่ยแยกกัน จากนั้นจึงจะได้มาซึ่งค่าเฉลี่ยของสัญญาณในซีกบวก และค่าเฉลี่ยของสัญญาณในซีกลบ จะได้มาซึ่งแอมพลิจูดของสัญญาณ PWM ที่สามารถนำมาใช้ในการคำนวนย้อนกลับมาเป็นค่าแรงดันเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของ EVSE ในส่วนต่อไป

อีกหนึ่งปัญหาของวิธีการดังภาพที่ 2-6 คือในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนผ่านระหว่างสัญญาณในช่วงบวกไปเป็นสัญญาณในช่วงลบ เนื่องจากค่าของตัวอย่างในช่วงเปลี่ยนผ่านจำเป็นจะต้องถูกนำไปใช้ในการหาค่าเฉลี่ยด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ค่าแอมพลิจูดในฝั่งบวกที่คำนวนได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย เช่นเดียวกันกับค่าแอมพลิจูดในฝั่งลบซึ่งจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง อีกทั้ง EVSE ที่สามารถสร้างสัญญาณ PWM ที่มีช่วงเวลาในการเปลี่ยนผ่านของขอบขาที่ต่างกันจะส่งผลให้ค่าที่วัดได้มีความต่างด้วยเช่นกัน ซึ่งแนวทางในการแก้ปัญหาที่สามารถทำได้คือการลดทอนอัตราการสุ่มค่าสัญญาณ (Down Sampling) อาทิเช่น หากทำการสุ่มค่าสัญญาณด้วยอัตราการสุ่มค่า 4 เมกะแซมเปิลต่อวินาที เป็นเวลา 2 มิลลิวินาที จะได้ตัวอย่างมาทั้งสิ้น 8000 ตัวอย่าง ซึ่งในการคำนวณค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ CP จะทำการเลือกตัวอย่างที่ 1 41 81 121 ไป

จนถึงตัวอย่างที่ 7961 จะเป็นการลดทอนอัตราการสุ่มค่าสัญญาณ 40 เท่า จะได้สัญญาณ CP ที่มีอัตราการสุ่มค่าอยู่ที่ 100 กิโลแซมเปิลต่อวินาที ซึ่งเพียงพอต่อการวิเคราะห์สัญญาณ CP ซึ่งมีความถี่อยู่ที่ 1 กิโลเฮิรตซ์



ภาพที่ 2-6 อัลกอลิทึมการหาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณภายในอาเรย์โดยใช้ค่าเฉลี่ยฝั่งบวก

นอกจากนี้สืบเนื่องมาจากการลดทอนอัตราการสุ่มค่าของสัญญาณ CP แทนที่การวิเคราะห์สัญญาณในแต่ละวงรอบจะต้องคำนวนตัวอย่างถึง 8000 ตัวอย่าง จะเหลือภาระในการคำนวณตัวอย่างเพียง 200 ตัวอย่าง ซึ่งจะส่งผลให้เวลาในการประมวลผลสัญญาณน้อยลง ซึ่งเทคนิคดังกล่าวสามารถนำไปต่อยอดในส่วนของการอ่านค่าสัญญาณ CP สำหรับการสร้าง EVSE ได้

2.5 การทดสอบระบบป้องกันในกรณีไดโอดลัดวงจรของEVSE

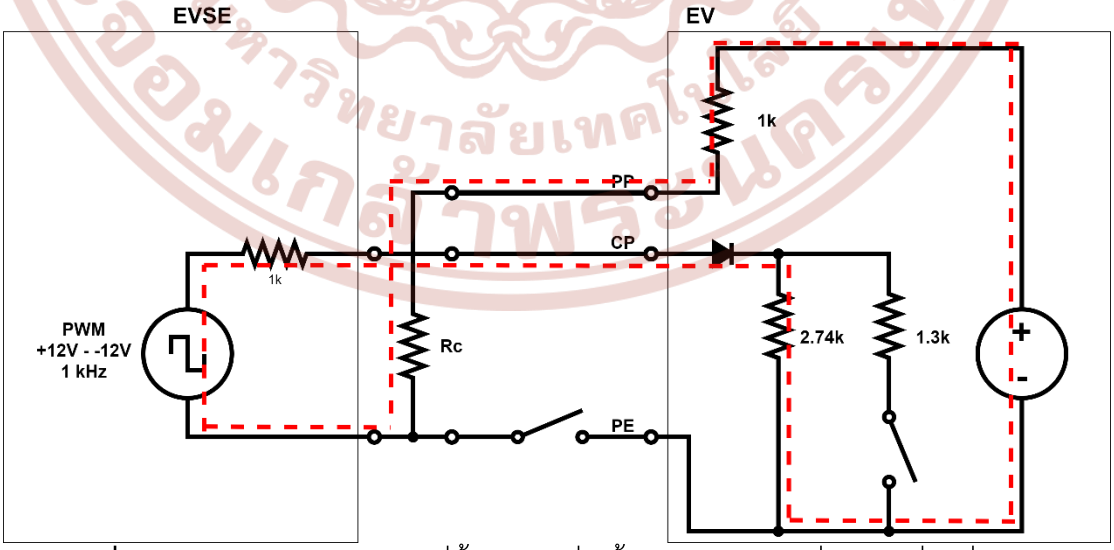
จากภาพที่ 1-2 ซึ่งแสดงถึงภาพรวมของ EVSE จะพบว่าองค์ประกอบในการสื่อสารด้วยสัญญาณ CP จะประกอบไปด้วยไดโอดซึ่งจะต่ออนุกรมกับเครือข่ายของค่าต้านทานที่ฝั่งของยานยนต์ไฟฟ้า หน้าที่ของไดโอดตัวดังกล่าวคือการใช้ในการตรวจสอบของ EVSE (Soponoudomsit et al., 2022) เพื่อให้ EVSE รับรู้ว่าสิ่งที่กำลังเชื่อมต่ออยู่กับหัวอัดประจุคือยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากในทางธรรมชาติวัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าจะไม่มีความสามารถในการเรียงกระแสเช่นเดียวกันกับไดโอด ดังนั้นหากเกิดกรณีที่หัวอัดประจุถูกวางไว้ในน้ำ หรือหัวอัดประจุตกลงไปในโคลน EVSE จะสามารถตรวจสอบได้ว่าหัวอัดประจุไม่ได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับยานยนต์ไฟฟ้า และ EVSE จะต้องตัดการจ่ายไฟฟ้าในทันทีที่ตรวจพบ

ในการทดสอบกรณีดังกล่าวคือการจำลองสภาวะการเกิดไดโอดลัดวงจรซึ่งจะทำการทดสอบในขณะที่ EVSE กำลังทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับยานยนต์ไฟฟ้า จากวงจรการจำลองการสื่อสารของสัญญาณ CP ที่ฝั่งของยานยนต์ไฟฟ้าดังภาพที่ 2-2 ในการจำลองกรณีของไดโอดลัดวงจรจะสามารถทำได้โดยการลัดวงจรสวิตซ์ S_3 โดยการทดสอบกรณีที่ไดโอดลัดวงจรจะทำการจับเวลาที่ใช้ในการตัดวงจรควบคู่กันไปด้วยเพื่อใช้ในการประเมินคุณภาพของระบบป้องกันของ EVSE

2.6 การทดสอบระบบป้องกันในกรณีกราวถูกตัดการเชื่อมต่อของEVSE

การทดสอบระบบป้องกันกรณีดังกล่าวจะถูกใช้ในการจำลองในกรณีที่หัวอัดประจุเกิดหลุดออกจากตัวรถในระหว่างที่กำลังทำการอัดประจุ ซึ่งในกรณีดังกล่าว EVSE จะต้องตัดการจ่ายกระแสไฟในทันทีภายในเวลา 100 มิลลิวินาที

จากภาพที่ 2-2 S_1 ถูกใช้ในการจำลองความผิดพร่องในกรณีกราวถูกตัดการเชื่อมต่อ โดยจะใช้สวิตซ์ 2 ขั้ว โดย ขั้ว แรก จะใช้ในการตัดการเชื่อมต่อ ของ สาย PE อีกขั้วหนึ่งจะใช้ในการตัดการเชื่อมต่อของขั้ว PP (Proximity Pilot) ซึ่งถูกใช้ในการตรวจสอบพิกัดกระแสสูงสุดของสายอัดประจุ เนื่องจากวงจรที่ใช้ในการจำลองการสื่อสารในฝั่งยานยนต์ไฟฟ้าขั้วต่อ PP จะถูกต่อเข้ากับค่าต้านทานครอมขา PP และ แรงดัน 3.3 โวลต์ ซึ่งหลักการที่ EVSE ใช้ในการตรวจสอบว่าสาย PE ขาดการเชื่อมต่อคือการตรวจวัดสัญญาณ CP โดยหากสาย PE มีการตัดการเชื่อมต่อจะส่งผลให้สัญญาณ CP กลับไปอยู่ในสถานะ A เนื่องจากมีการตัดเครือข่ายของค่าต้านทานที่ฝั่งของตัวรถออกไป แต่หากขั้ว PP ยังคงถูกต่อเข้ากับ EVSE สัญญาณ CP จะยังคงครบวงจรอยู่ จากภาพที่ 2-7 แสดงให้เห็นว่า EVSE มีโอกาสที่จะสามารถอ่านค่าของสัญญาณ CP ได้อยู่ และอาจส่งผลให้ EVSE ไม่ตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับยานยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 2-7 วงจรเทียบเคียงในกรณีที่ขั้ว PP ถูกต่อเข้ากับ EVSE ขณะที่ตัดการเชื่อมต่อกับ PE

2.7 การทดสอบระบบป้องกันในกรณีเกิดกระแสรั่วไหลของ EVSE

การใช้งาน EVSE เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแรงดันสูงและกระแสไฟฟ้าปริมาณมาก ซึ่งนำมาสู่ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยต่อผู้ใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในกรณีที่เกิดการรั่วของกระแสไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ ระบบป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วไหล จึงมีความสำคัญในแง่ของระบบป้องกันด่านสุดท้ายที่จะช่วยป้องกันผู้ใช้งานจากอันตรายของภาวะไฟฟ้าดูด ตลอดจนลดความเสี่ยงในการเกิดอัคคีภัย มาตรฐานความปลอดภัยระดับสากล เช่น IEC 61851 และ IEC 60364 จึงได้กำหนดข้อบังคับให้ EVSE ยานยนต์ไฟฟ้าจำเป็นต้องมีการติดตั้งการระบบตรวจจับและตัดวงจร ในกรณีที่เกิดกระแสรั่วไหล เพื่อสร้างความเชื่อมั่นด้านความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

อย่างไรก็ตาม ระบบอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้ามีลักษณะเป็นโหลดทางไฟฟ้าที่มีความซับซ้อน เนื่องจากประกอบไปด้วยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power Converter) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวนมากอยู่ภายในระบบ ลักษณะดังกล่าวทำให้สภาวะการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจาก EVSE มีความแตกต่างจากเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปในครัวเรือน โดยสภาวะความผิดพร่องทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลได้ 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ กระแสรั่วไหลชนิดกระแสสลับ และกระแสรั่วไหลชนิดกระแสตรง ซึ่งระบบป้องกันใน EVSE จำเป็นต้องสามารถตรวจจับกระแสรั่วไหลได้ทั้ง 2 รูปแบบที่กล่าวมา

กระแสรั่วไหลชนิดกระแสสลับ เป็นสภาวะความผิดพร่องที่มักมีสาเหตุทางกายภาพ เช่น การเสื่อมสภาพหรือการชำรุดของฉนวนหุ้มสายอัดประจุ การปนเปื้อนของฝุ่นละอองและความชื้นบริเวณหน้าสัมผัสของหัวอัดประจุ หรืออาจเกิดจากความผิดพร่องลัดวงจรลงดิน บริเวณภาคอินพุตกระแสสลับของวงจร EVSE ออนบอร์ด (On-Board Charger: OBC) ภายในตัวรถ หากผู้ใช้งานบังเอิญไปสัมผัสเข้ากับโครงสร้างโลหะของอุปกรณ์ในขณะที่เกิดไฟรั่วชนิดนี้ จะทำให้กระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านร่างกายลงสู่ดิน ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายถึงขั้นเสียชีวิตได้โดยตรงหากไม่มีอุปกรณ์ตัดวงจร

ในขณะเดียวกัน กระแสรั่วไหลชนิดกระแสตรง ถือเป็นกรณีที่มีความซับซ้อนและก่อให้เกิดความเสี่ยงแอบแฝงที่รุนแรงกว่า โดยมักเกิดจากความผิดพร่องภายในวงจรเรียงกระแส หรือเกิดการรั่วไหลจากระบบแบตเตอรี่แรงดันสูงที่ไหลย้อนกลับ มาสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งทางคือ เมื่อเกิดกระแสไฟรั่วไหลชนิด DC แบบเรียบ ในปริมาณเพียง 6 มิลลิแอมแปร์ขึ้นไป กระแสไฟฟ้านี้จะเข้าไปทำให้แกนแม่เหล็กทอรอยด์ภายในอุปกรณ์ RCD ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าภายในอาคารทั่วไปเกิดสภาวะอิ่มตัวทางแม่เหล็ก ส่งผลให้อุปกรณ์เกิดไม่สามารถตรวจจับการเกิดกระแสรั่วไหลชนิดกระแสตรง และสูญเสียความสามารถในการตัดวงจรเมื่อมีกระแสรั่วไหลชนิด DC

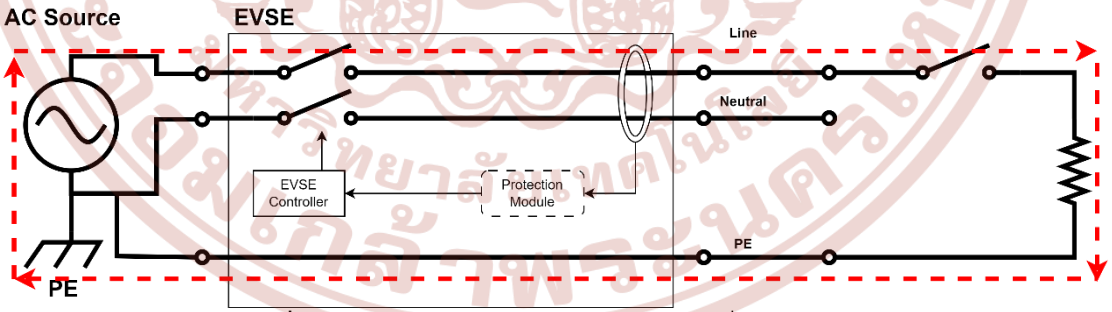
2.7.1 การทดสอบกระแสรั่วไหลชนิดกระแสสลับ

หลักการพื้นฐานในการทดสอบการทำงานของ RCD ชนิด AC คือ การสร้างกระแสรั่วไหลเพื่อเป็นการจำลองการเกิดความผิดพร่องในทางไฟฟ้า การจำลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าระบบสามารถตรวจจับ

ความผิดปกติและสั่งตัดวงจรได้หรือไม่ โดยรูปแบบของกระแสไฟฟ้ารั่วไหลที่นำมาจำลองในกรณีนี้ จะต้องมีลักษณะของสัญญาณเป็นไฟฟ้ากระแสสลับรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Waveform)

สำหรับวิธีการสร้างกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจำลองรูปไซน์ สามารถดำเนินการได้โดยการนำตัวต้านทานไปต่อวงจรคร่อมระหว่างสายไลน์ (Line) และสาย PE การเชื่อมต่อในลักษณะนี้จะเป็นการสร้างเส้นทางลัดให้กระแสไฟฟ้าไหลลงสู่สายดินแทนที่จะไหลกลับทางสายนิวทรัล (Neutral) ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในภาพที่ 2-8 ตามปกติ การออกแบบวงจรทดสอบด้วยวิธีนี้ จะทำให้เกิดสภาวะความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าในระบบและก่อให้เกิดกระแสรั่วไหลชนิดกระแสสลับที่สามารถคำนวณและควบคุมปริมาณได้จากการเลือกค่าความต้านทาน โดยทั่วไปแล้ว RCD ชนิด AC ที่ใช้สำหรับงานติดตั้งในระบบไฟฟ้าภายในอาคารทั่วไปจะทำงานที่กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ โดยสำหรับระบบไฟฟ้า 230 โวลต์ จะใช้ค่าต้านทาน 7.67 กิโลโอห์ม และค่าต้านทานจะต้องสามารถทนกำลังไฟฟ้าได้ 6.9 วัตต์ เป็นเวลาอย่างน้อย 500 มิลลิวินาที ซึ่งในการทดสอบโดยมากแล้ว หากทำการจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลเป็นเวลาเกิน 300 มิลลิวินาทีแล้วแต่ยังคงพบว่าระบบยังไม่มีการตัดกระแสไฟฟ้า จะสามารถอนุมานได้ว่าระบบที่กำลังทำการทดสอบไม่ได้ติดตั้ง RCD

ด้วยข้อกำหนดดังกล่าว เงื่อนไขสำคัญที่สุดคือจะต้องดำเนินการทดสอบในขณะที่ EVSE "กำลังอยู่ในสภาวะจ่ายกระแสไฟฟ้า" เท่านั้น กล่าวคือ จะต้องมีการจำลองให้ระบบเข้าสู่สถานะพร้อมอัดประจุและคอนแทคเตอร์ (Contactor) ภายในเครื่องได้สับวงจรเพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า AC ออกมาแล้ว หากทำการทดสอบในขณะที่EVSEยังอยู่ในสถานะสแตนด์บาย จะไม่มีแรงดันไฟฟ้าในระบบหลักเพื่อสร้างกระแสไฟรั่วไหลจำลองไปกระตุ้นให้ RCD ทำงานได้



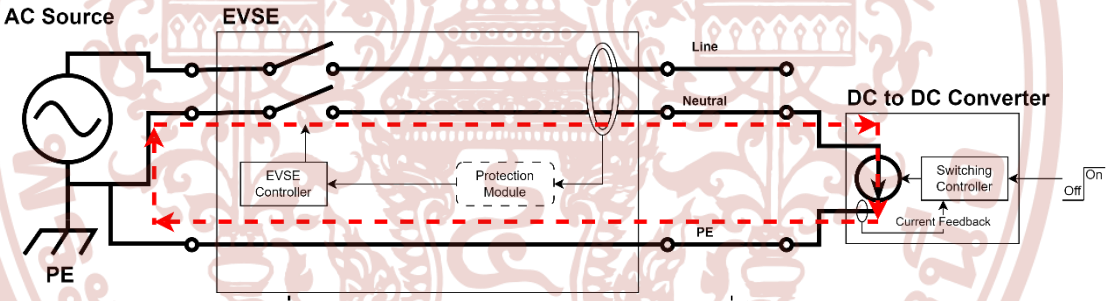
ภาพที่ 2-8 วงจรเทียบเคียงการจำลองกระแสรั่วไหลชนิด AC

2.7.2 การทดสอบกระแสรั่วไหลชนิดกระแสตรง

สำหรับการจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC เพื่อทดสอบการทำงานของ RCD ชนิด B จะยังคงอาศัยหลักการในการจำลองในรูปแบบเดียวกันกับการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC นั่นคือการจำลองการเกิดความไม่สมดุลของกระแสที่ไหลในสายไลน์ กับกระแสที่ไหลในสายนิวทรัล โดยหลักการในการสร้างกระแสรั่วไหลจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งทางด้านของรูปแบบของกระแสซึ่งจะอยู่ในรูปกระแสตรง หรือ

ทางด้านของขนาดซึ่งโดยทั่วไป RCD ชนิด B ที่ถูกใช้สำหรับการติดตั้ง EVSE จะทำงานที่กระแส 6 มิลลิแอมแปร์

นอกจากนี้ในการจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC จะมีลักษณะการต่อวงจรสร้างกระแสรั่วไหลที่แตกต่างจากการจำลองกระแสรั่วไหลชนิด AC จากภาพที่ 2-9 เนื่องจากการสร้างกระแสรั่วไหลโดยการเชื่อมแหล่งจ่ายกระแสจากสายไลน์ กับสาย PE วงจรที่ทำหน้าที่ในการสร้างกระแสจำลองในรูป DC (Tariq et al., 2023) จะต้องรับภาระกำลังสูญเสียในปริมาณมาก อีกทั้งการควบคุมกระแสให้อยู่ในรูป DC ในสภาวะที่แรงดันอยู่ในรูปคลื่นไซน์แล้วยังเป็นแรงดันที่มีค่า 230 โวลต์ การออกแบบวงจรควบคุมกระแสจะทำได้ยากมาก อย่างไรก็ดี หากทำการต่อวงจรจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC ที่สายนิวทรัล และสาย PE ก็ยังคงสามารถจำลองการเกิดกระแสที่ไม่สมดุลกันของกระแสที่ไหลในสายไลน์ กับกระแสที่ไหลในสายนิวทรัลได้เช่นกัน อีกทั้งยังเป็นการง่ายกว่าในแง่ของการออกแบบวงจร เนื่องจากที่ขั้วของนิวทรัล และ PE ไม่มีความต่างศักย์กัน เนื่องจากระบบการเชื่อมต่อกราวของประเทศไทยจะใช้มาตรฐานการต่อสายดินแบบ TN-C-S ซึ่งจะมีการต่อสายนิวทรัลร่วมกับสาย PE ที่ตู้ประทาน



ภาพที่ 2-9 วงจรเทียบเคียงการจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC

2.8 การทดสอบความเป็นฉนวนของสายอัดประจุ

หลักการพื้นฐานของการทดสอบความเป็นฉนวน คือ การประเมิน "ค่าความต้านทานของฉนวน" (Insulation Resistance) ระหว่าง ตัวนำไฟฟ้ากับสาย PE หรือ ระหว่างตัวนำไฟฟ้าแต่ละเส้น ภายในสายอัดประจุ โดยปกติวัสดุฉนวนที่ดีจะต้องมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูงมาก เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลทะลุผ่านออกมาได้ การทดสอบนี้มักกระทำโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ในระดับที่สูงกว่าแรงดันใช้งานปกติ เข้าไปในสายอัดประจุ จากนั้น เครื่องมือทดสอบจะทำการตรวจจับและวัดค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล (Leakage Current) ในระดับไมโครแอมป์ เพื่อนำไปใช้ในการประเมินคุณภาพของฉนวน โดยหากค่าความต้านทานที่ คำนวณได้มีระดับสูง ผ่านเกณฑ์ มาตรฐานที่กำหนด จะถือว่าสายอัดประจุเส้นนั้นมีคุณภาพการหุ้มฉนวนที่ปลอดภัย

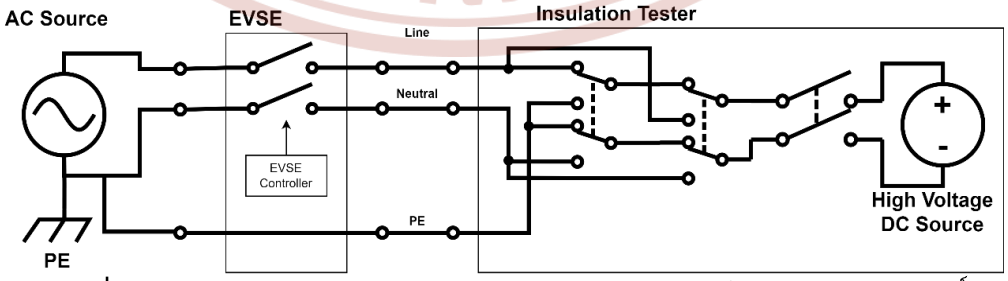
แม้สายอัดประจุจะถูกผลิตขึ้นด้วยวัสดุเกรดอุตสาหกรรมที่ออกแบบมาให้มีความทนทานสูง แต่การเสื่อมสภาพของฉนวนเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เมื่อผ่านการใช้งานจริง ปัจจัยที่ส่งผลให้ฉนวนเสื่อมสภาพมี

หลากหลายประการ ทั้งปัจจัยทางกล เช่น การถูกดึงแรงๆ การบิดงอซ้ำๆ การถูกรถทับ หรือการลากครูดไปกับพื้น ซึ่งอาจทำให้เนื้อฉนวนเกิดรอยปริแตกหรือฉีกขาด นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางสภาพแวดล้อม เช่น การถูกแสงแดดและรังสี UV เป็นเวลานาน ความร้อนสะสมจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า ตลอดจนความชื้นและน้ำฝน ปัจจัยเหล่านี้ล้วนค่อยๆ ทำลายโครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ การทดสอบความเป็นฉนวนจึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการตรวจหาความผิดปกติและประเมินความเสียหายที่อาจมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า

สรุปได้ว่า การทดสอบความเป็นฉนวนของสายอัดประจุ เป็นมาตรการเชิงป้องกันที่สำคัญในการควบคุมคุณภาพและยกระดับมาตรฐานความปลอดภัย ของระบบนิเวศยานยนต์ไฟฟ้า การตรวจสอบนี้ไม่เพียงแต่ช่วยป้องกันอันตรายร้ายแรงต่อชีวิต และทรัพย์สินจากภาวะไฟฟ้าดูด (Electric Shock) หรือเหตุอัคคีภัยที่เกิดจากการลัดวงจรเท่านั้น แต่ยังเป็นการสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภคในการใช้งานเทคโนโลยีการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า การตรวจสอบให้มั่นใจว่าสายอัดประจุมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่สมบูรณ์อยู่เสมอ จึงเป็นหัวใจสำคัญที่ช่วยให้ผู้ใช้งานได้รับประสบการณ์การอัดประจุที่ปลอดภัยในทุกสถานการณ์

2.8.1 การทดสอบความเป็นฉนวนแบบออฟไลน์

การทดสอบความเป็นฉนวนแบบออฟไลน์ (*TIDA-00440 Reference Design | TI.Com*, n.d.) เป็นกระบวนการประเมินสภาพของวัสดุฉนวนที่ต้องดำเนินการในขณะที่อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือระบบสายนำไฟฟ้าถูกตัดออกจากแหล่งจ่ายพลังงานหลักอย่างสมบูรณ์หลักการสำคัญของกระบวนการนี้ คือการจำลองสภาวะความเครียดทางไฟฟ้า ให้กับวัสดุฉนวน โดยเครื่องมือทดสอบจะทำการสร้าง และจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Test Voltage) ในระดับที่สูงกว่าแรงดันใช้งานปกติ เข้าไประหว่างตัวนำไฟฟ้ากับโครงสร้างกราวด์ โดยวงจรเทียบเคียงในการทดสอบ ความเป็นฉนวนแบบออฟไลน์ จะแสดงดังภาพที่ 2-10 การเลือกใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแทนกระแสสลับนั้น มีเหตุผลที่สำคัญคือ เพื่อกำจัดผลกระทบของกระแสอัดประจุประจุที่เกิดขึ้นในระบบ AC ซึ่งจะรบกวนการวัดค่ากระแสที่แท้จริงได้ ทำให้ระบบสามารถตรวจจับและวัดเฉพาะ "กระแสไฟฟ้ารั่วไหล" ที่ซึมผ่านโครงสร้างเนื้อฉนวนออกมาได้ปริมาณกระแสรั่วไหลนี้ จะเป็นตัวชี้วัดโดยตรงถึง ความสมบูรณ์ หรือการเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวน



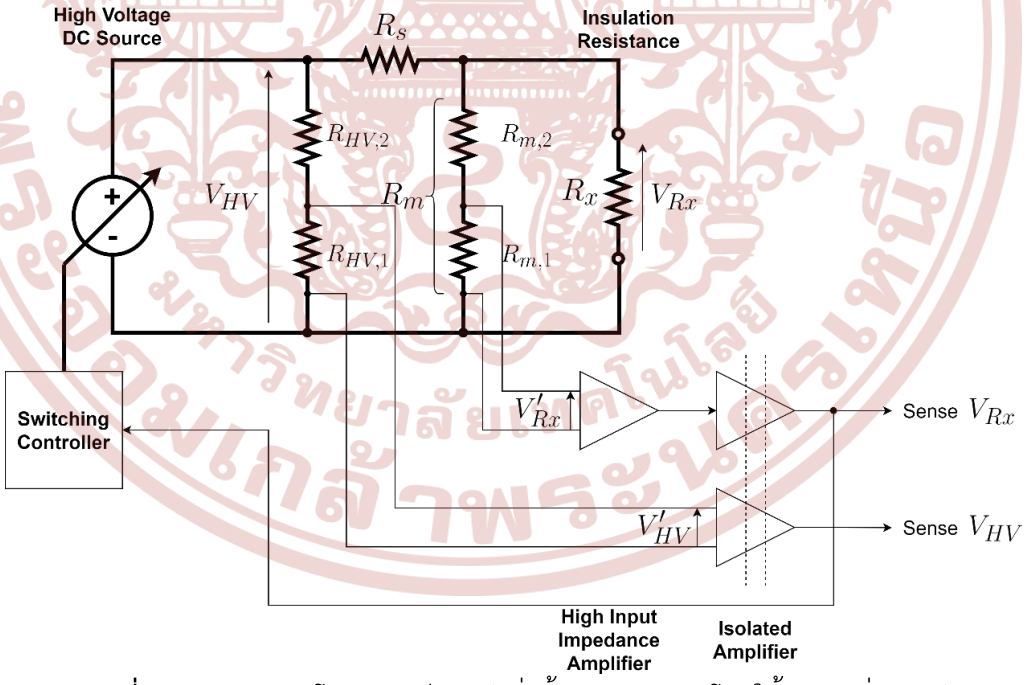
ภาพที่ 2-10 แผนผังภาพโดยรวมของระบบการทดสอบความเป็นฉนวนแบบออฟไลน์

วิธีการในการวัดค่าต้านทานสามารถดำเนินการได้ 2 วิธีคือ การวัดค่าต้านทานฉนวนโดยใช้วงจรแบ่งแรงดัน และการวัดค่าต้านทานฉนวนโดยการวัดกระแสด้วยค่าต้านทานชันต์

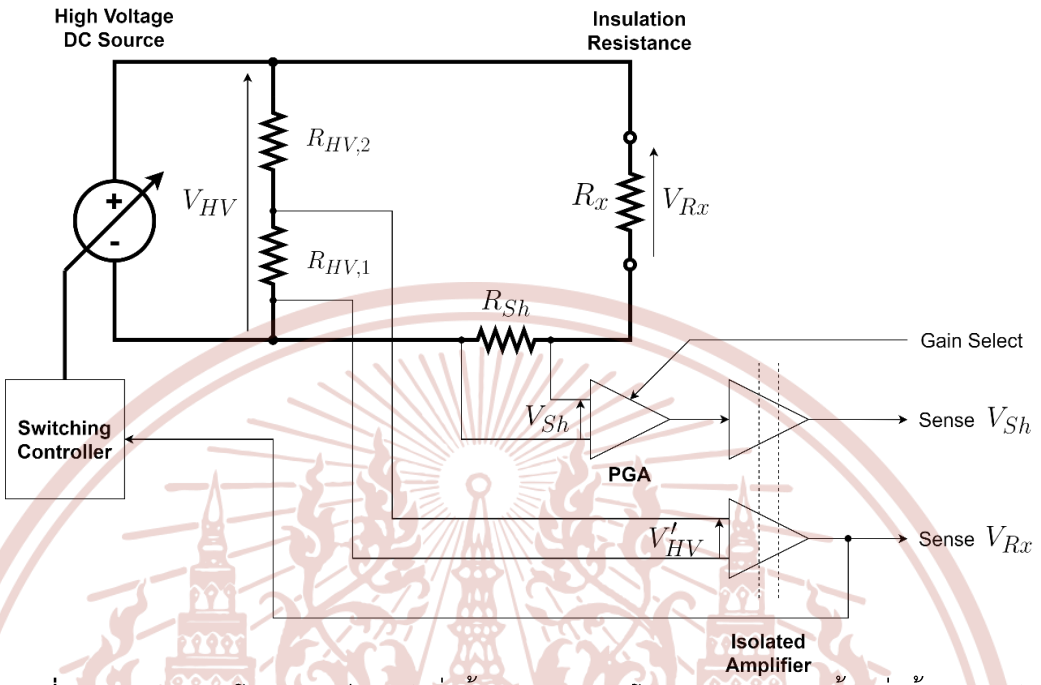
หลักการของวิธีการวัดค่าต้านทานฉนวนโดยใช้วงจรแบ่งแรงดันคือการเชื่อมต่อค่าต้านทานที่ทราบค่ามาอนุกรมเข้ากับค่าต้านทานที่ต้องการวัด จากภาพที่ 2-11 แสดงวงจรเทียบเคียงของวิธีการวัดค่าต้านทานโดยใช้วิธีการแบ่งแรงดัน โดยที่ R_s คือค่าต้านทานที่ทราบค่า R_m คือค่าต้านทานขาเข้าของวงจรวัดแรงดันตกคร่อมค่าต้านทาน และ R_x คือค่าต้านทานของฉนวนที่ต้องการวัดค่า โดยค่าต้านทานของฉนวนจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-1)

$$R_X = \frac{V_{Rx} R_s R_m}{(V_{HV} - V_{Rx}) R_m - V_{Rx} R_s} \tag{2-1}$$

ข้อดีของการวัดค่าต้านทานฉนวนโดยใช้วงจรแบ่งแรงดันคือระดับแรงดันในจุดที่วัดจะอยู่ในช่วงแรงดันสูง ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่ถูกรบกวนได้ยาก แต่ข้อเสียของวิธีการดังกล่าวคือในกรณีที่ค่าต้านทานของฉนวนมีค่าสูง ความเที่ยงตรงของวงจรจะมีค่าลดลงตามค่าต้านทานฉนวนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นวิธีการดังกล่าวจึงเหมาะสำหรับการวัดค่าต้านทานฉนวนที่มีค่าต่ำในหลัก 1 ถึง 10 เมกะโอห์ม



ภาพที่ 2-11 แผนภาพโดยรวมวิธีการวัดค่าต้านทานฉนวน โดยใช้วงจรแบ่งแรงดัน



ภาพที่ 2-12 แผนภาพโดยรวมวิธีการวัดค่าต้านทานฉนวน โดยการวัดกระแสด้วยค่าต้านทานชันต์

อีกหนึ่งวิธีการในการวัดค่าต้านทานของฉนวนคือการวัดค่าต้านทานของฉนวนผ่านการวัดกระแสที่ไหลผ่านฉนวนเมื่อมีการจ่ายแรงดันทดสอบให้กับฉนวน โดยวิธีการวัดกระแสที่ใช้ในการวัดค่าต้านทานฉนวนจะใช้วิธีการวัดกระแสด้วยตัวต้านทานชันต์ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-12 เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านฉนวนมีปริมาณกระแสที่ต่ำมาก โดยค่าต้านทานของฉนวนจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-2)

$$R_x = R_{sh}\left(\frac{V_{HV}}{V_{sh}} - 1\right) \qquad (2\text{-}2)$$

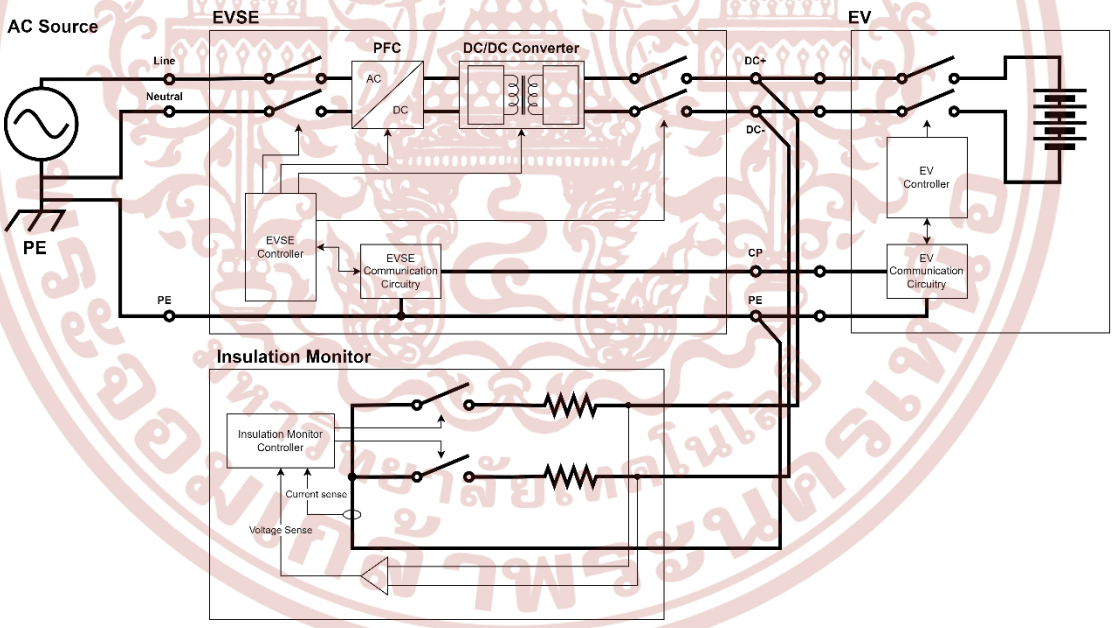
ข้อดีของวิธีการวัดค่าต้านทานผ่านการวัดค่าต้านทานค่าต้านทานฉนวน โดยการวัดกระแสด้วยค่าต้านทานชันต์ คือความเที่ยงตรงในการวัดของวงจรวัดในย่านที่ค่าต้านทานฉนวนมีค่าสูงกว่า 10 เมกะโอห์ม จะมีความเที่ยงตรงมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการวัดค่าต้านทานฉนวนโดยใช้วงจรแบ่งแรงดัน ส่วนของข้อเสียคือระดับแรงดันตกคร่อมค่าต้านทานชันต์จะมีระดับแรงดันต่ำซึ่งจะส่งผลให้การวัดค่าสัญญาณทำได้ยากเนื่องจากสัญญาณสามารถถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนได้ง่าย

ในการทดสอบความเป็นฉนวนของสายอัดประจุสำหรับ EVSE ค่าต้านทานของฉนวนที่เป็นที่สนใจในการวัดจำอยู่ในช่วงที่ค่าต้านทานมีค่าต่ำกว่า 10 เมกะโอห์ม ดังนั้นในการออกแบบวงจรวัดค่าต้านทานของฉนวนเพื่อใช้ในการประเมินความเป็นฉนวนของสายอัดประจุ EVSE จะต้องออกแบบวงจรวัดสำหรับค่าต้านทานในช่วงต่ำ ดังนั้นวิธีการวัดค่าต้านทานของฉนวนโดยใช้วงจรแบ่งแรงดันจึงมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนของสายอัดประจุ EVSE

2.8.2 การทดสอบความเป็นฉนวนแบบออนไลน์

วิธีการทดสอบความเป็นฉนวนแบบออนไลน์ (*TIDA-010232 Reference Design | TI.Com*, n.d.) จะนิยมใช้กับ EVSE โหมด 4 หรือที่รู้จักกันในชื่อของ EVSE ชนิด DC โดยจะใช้ในการตรวจสภาพความเป็นฉนวนของสายอัดประจุในระหว่างที่กำลังทำการอัดประจุแบตเตอรี่ หลักการของการทดสอบความเป็นฉนวนของสายอัดประจุแบบออนไลน์คือการใช้แรงดันที่ EVSE จ่ายให้กับยานยนต์ไฟฟ้า มาใช้ในการทดสอบความเป็นฉนวนของสายอัดประจุเอง

จาก ภาพที่ 2-13 ส่วนประกอบภาคส่งกำลังของ EVSE โหมด 4 จะประกอบไปด้วยวงจรแก้ตัวประกอบกำลัง ซึ่งจะทำหน้าที่ในการแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมทั้งแก้ตัวประกอบกำลัง ส่วนต่อมาคือส่วนแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันที่ได้จากวงจรแก้ตัวประกอบกำลัง ซึ่งจะมีระดับแรงดันสูงถึง 600 ถึง 900 โวลต์ ไปเป็นระดับแรงดันที่ใช้ในการอัดประจุแบตเตอรี่ ซึ่งจะใช้ระดับแรงดันอยู่ในช่วง 400 ถึง 600 โวลต์ รวมถึงมีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างส่วนระบบไฟฟ้าในฝั่งของวงจรแก้ตัวประกอบกำลัง กับวงจรในฝั่งของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

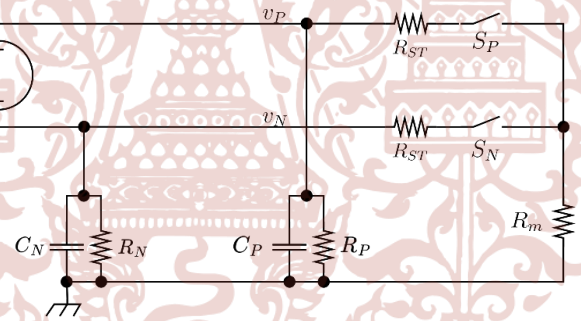


ภาพที่ 2-13 แผนผังภาพโดยรวมของระบบการทดสอบความเป็นฉนวนแบบออนไลน์

ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับสายดิน (IT Systems) เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้ากระแสตรง มาตรฐานความปลอดภัย IEC 61557-8 ได้กำหนดให้ต้องมีระบบการเฝ้าระวังสถานะทางไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 61851-23 ที่ระบุข้อกำหนดเฉพาะสำหรับความปลอดภัยของ EVSE ชนิดกระแสตรง ว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องติดตั้งระบบตรวจสอบสภาพความเป็นฉนวน (Insulation Monitoring System) ของสายอัดประจุและอุปกรณ์

เชื่อมต่อ ทั้งนี้เพื่อเป็นมาตรการความปลอดภัยในการป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าแรงดันสูง โดยระบบดังกล่าวจะทำหน้าที่ ประเมินค่าความต้านทานฉนวนอย่างต่อเนื่อง และจะตัดการทำงานหรือแจ้งเตือนทันทีหากพบว่าค่าต้านทานของฉนวนมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เพื่อป้องกันการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหล ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งาน

ลักษณะการเชื่อมต่อของระบบตรวจสภาพความเป็นฉนวนจะมีการเชื่อมต่อกับขั้วต่อ 3 จุดได้แก่ ขั้วบวกและ ขั้วลบของแรงดันขาออกของระบบไฟฟ้ากระแสตรง และสาย PE เพื่อตรวจสภาพความเป็นฉนวนระหว่างขั้วบวก และขั้วลบซึ่งต่อเข้ากับแบตเตอรี่แรงดันสูงภายในยานยนต์ไฟฟ้า กับสาย PE โดยหลักการตรวจสอบความเป็นฉนวนคือการเชื่อมต่อขั้วบวกและลบของ EVSE เข้ากับขั้ว PE จากนั้นทำการวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานดังกล่าวจากนั้นจึงทำการคำนวนย้อนกลับมาเป็นค่าต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วบวกของ EVSE ไปยังสาย PE และค่าต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วลบของ EVSE ไปยังสาย PE โดยในการวัดค่ากระแสจะทำการเชื่อมต่อทีละขั้ว จะได้วงจรเทียบเคียงดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 วงจรเทียบเคียงระบบการวัดค่าต้านทานของฉนวน

ในการวัดค่าต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วบวกกับสาย PE จะเริ่มที่การเชื่อมต่อสวิตซ์ S_P จะได้ว่ากระแสที่ไหลจากขั้วบวกไปยังสาย PE จะเป็นไปดังสมการ (2-3) จากนั้นจึงสลับการเชื่อมต่อมายังสวิตซ์ S_N จะได้ว่ากระแสที่ไหลจากขั้วลบไปยังสาย PE จะเป็นไปดังสมการที่ (2-4)

$$I_P = \frac{V_P}{R_P \| (R_{ST}+R_m)} \tag{2-3}$$

$$I_N = \frac{V_N}{R_N \| (R_{ST}+R_m)} \tag{2-4}$$

จากวงจรเทียบเคียงดังภาพที่ 2-14 ทำการวิเคราะห์แรงดันภายในลูปในสภาวะที่ S_P เชื่อมต่อจะได้ดังสมการที่ (2-5) และในสภาวะที่ S_N เชื่อมต่อจะได้ดังสมการที่ (2-6)

$$V_P = V_{DC} - I_P R_N \tag{2-5}$$

$$V_N = -V_{DC} - I_N R_P \tag{2-6}$$

แทนค่าสมการที่ (2-3) และ (2-4) ในสมการที่ (2-5) และ (2-6) จากนั้นทำการจัดรูปจะได้ดังสมการที่ (2-7) และ (2-8)

$$V_P \left(1 + \frac{R_N}{R_P \| (R_{ST} + R_m)} \right) = V_{DC} \tag{2-7}$$

$$V_N \left(1 + \frac{R_P}{R_N \| (R_{ST} + R_m)} \right) = -V_{DC} \tag{2-8}$$

จะได้ว่าค่าต้านทานของฉนวนจะเป็นไปดังสมการที่ (2-9) และ (2-10)

$$R_P = \frac{-(R_{ST} + R_m)(V_{DC} + V_N - V_P)}{V_N} \tag{2-9}$$

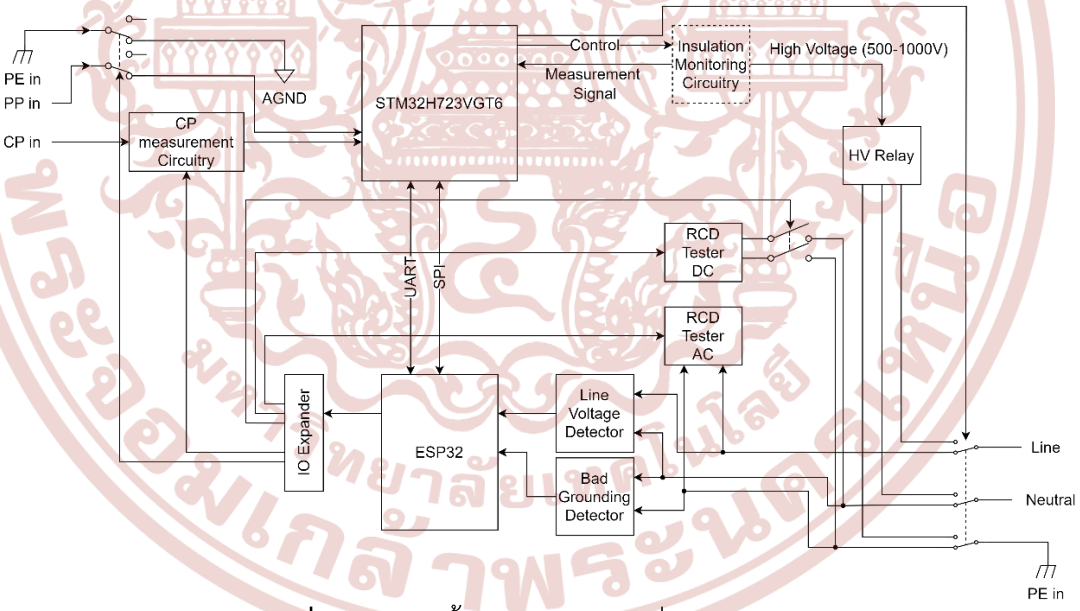
$$R_N = \frac{(R_{ST} + R_m)(V_{DC} + V_N - V_P)}{V_P} \tag{2-10}$$

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

บทที่ 3
การออกแบบและการเตรียมการทดสอบเครื่องทดสอบการทำงานของ EVSE

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการในการออกแบบวงจรที่ใช้ในการสร้างเครื่องทดสอบ EVSE โดยจะมีการเชื่อมโยงหลักการ และทฤษฎีการทำงานของวงจรที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 เข้ากับการออกแบบวงจร โดยจะมีการยกตัวอย่างการคำนวณค่าของอุปกรณ์อย่างง่าย ไปจนถึงการเลือกค่าของอุปกรณ์ที่สอดคล้องกับการคำนวณ นอกจากนี้ในบทนี้ยังกล่าวถึงการเตรียมการทดสอบวงจรที่ได้ทำการออกแบบ โดยในบางวงจรจำเป็นต้องมีการทดสอบร่วมกับวงจรในระบบใหญ่ หรือในบางวงจรอาจมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบแยก โดยหลักการและเหตุผลประกอบในการทดสอบ จะมีการกล่าวถึงภายในเนื้อหาในส่วนท้ายของบท

3.1 การออกแบบวงจรทดสอบการทำงานของ EVSE



ภาพที่ 3-1 โครงสร้างภาพรวมของเครื่องทดสอบ EVSE

ภาพที่ 3-1 แสดงภาพรวมของระบบในการทดสอบการทำงานของ EVSE อันประกอบไปด้วยส่วนควบคุม 2 ส่วนคือ ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP-WROOM-32 ซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานในระดับสูง และส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32H723VGT6 ซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานในระดับต่ำ

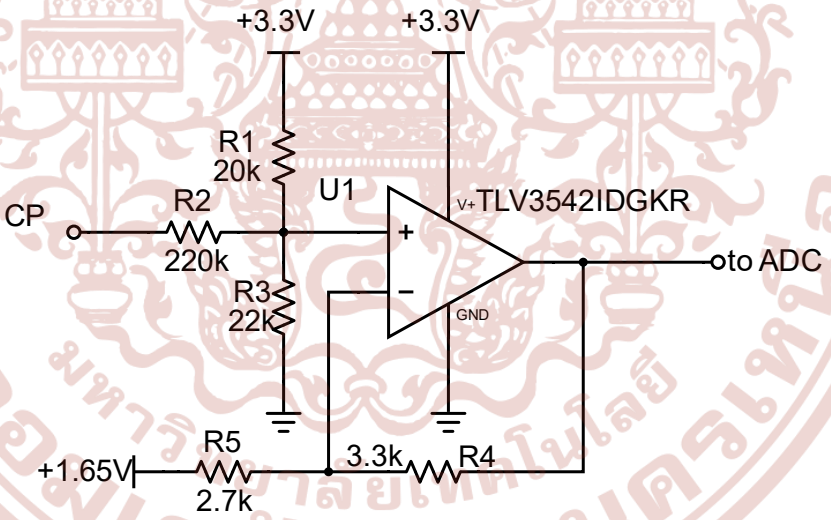
ในส่วนการทำงานของ ESP-WROOM-32 จะทำหน้าที่ในการสื่อสารระหว่างซอฟต์แวร์ในการควบคุมและแสดงผลลัพธ์ในการทดสอบ นอกจากนี้ยังมีการควบคุมกระบวนการในการทดสอบด้วย

อาทิเช่น การสั่งการวงจรควบคุมการเปลี่ยนสถานะของ EVSE วงจรตรวจจับแรงดัน ไปจนถึงวงจรทดสอบ RCD ทั้งแบบ AC และ DC นอกจากนี้ ESP-WROOM-32 ยังทำหน้าที่ในการจับเวลาในหน่วงของคอนแทคเตอร์ของ EVSE

ในส่วนของซอฟต์แวร์แอปพริเคชันในการทดสอบจะมีการสื่อสารกับ ESP-WROOM-32 โดยใช้ Bluetooth Classic ซึ่งเป็นวิธีการสื่อสารแบบไร้สายแบบพื้นฐานสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพา ซึ่งสาเหตุที่เครื่องทดสอบ EVSE จำเป็นต้องมีการสื่อสารด้วยระบบไร้สาย เพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดมาจากการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนจากสายสื่อระหว่างเครื่องทดสอบกับคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการสั่งการและแสดงผลในการทดสอบ

ส่วนต่อมาคือส่วนของไปโครคอนโทรลเลอร์ STM32H723VGT6 จะทำหน้าที่ในการสุ่มค่าสัญญาณ CP รวมไปถึงการดำเนินการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลของสัญญาณ CP รวมถึงการประมวลผลค่าที่ได้จากวงจรทดสอบความเป็นฉนวน

3.2 การออกแบบวงจรวัดสัญญาณ CP



ภาพที่ 3-2 วงจรปรับระดับสัญญาณ CP

ในการออกแบบวงจรที่ใช้ในการปรับระดับแรงดันจากแรงดันในช่วง ±12 โวลต์ ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 3.3 โวลต์ จากวงจรดังภาพที่ 2-4 ในส่วนสำคัญของวงจรซึ่งทำหน้าที่ในการลดระดับแรงดัน และเลื่อนระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงบวก คือวงจรดังภาพที่ 3-2

พิจารณาจากเครือข่ายตัวต้านทานทางด้านขาเข้าของวงจรออปแอมป์จะได้ดังสมการที่ (3-1)

$$V_P = V_{CC}\frac{R_2R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1} + V_{CP}\frac{R_1R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1} \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ V_P คือแรงดันขาเข้าไม่กลับเฟสของออปแอมป์ และ V_{CP} คือแรงดันของสัญญาณ CP จากแรงดันขาออกของวงจรออปแอมป์จะได้ดังสมการที่ (3-2)

$$V_{ADC}=V_P\left(1+\frac{R_4}{R_5}\right)-V_N\frac{R_4}{R_5} \tag{3-2}$$

เมื่อ V_N คือแรงดันขาเข้ากลับเฟสของวงจรออปแอมป์ โดย ณ ที่นี้ V_N = 1.65V แทนสมการที่ (3-1) ลงในสมการที่ (3-2) จะได้ดังสมการที่ (3-3)

$$V_{ADC}=V_{CP}\frac{R_2R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}\left(1+\frac{R_4}{R_5}\right)+\left(V_{CC}\frac{R_2R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}\left(1+\frac{R_4}{R_5}\right)-V_N\frac{R_4}{R_5}\right) \tag{3-3}$$

ทำการแทนค่าของอุปกรณ์จากภาพที่ 3-2 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_{ADC} และ V_{CP} เป็นไปดังสมการที่ (3-4)

$$V_{ADC}=V_{CP}\frac{10}{99}+1.65 \tag{3-4}$$

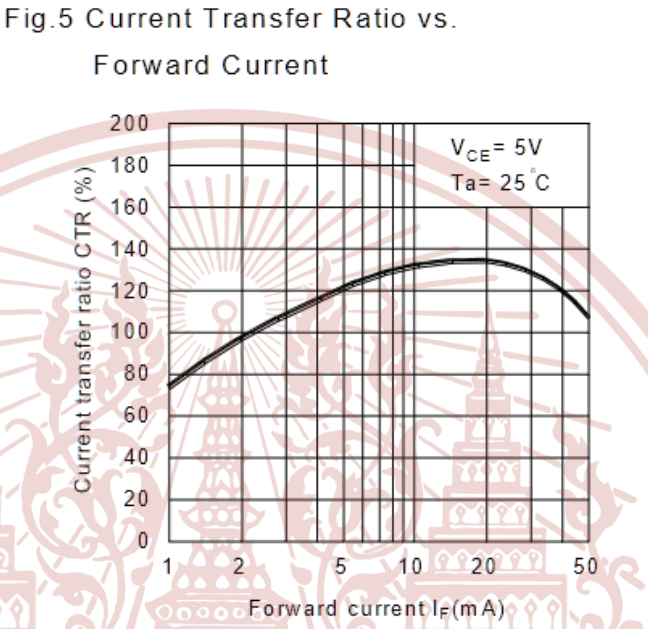
สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว CP นั้น แม้จะมีความสมบูรณ์ในเชิงทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติ ข้อมูลที่ได้รับจากการสุ่มตัวอย่างผ่านโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ยังคงมีความคลาดเคลื่อนแฝง สาเหตุหลักมาจากค่าความคลาดเคลื่อน ของอุปกรณ์พื้นฐานอย่างตัวต้านทาน รวมถึงคุณลักษณะที่ไม่เป็นอุดมคติของออบแอมป์ ในวงจรปรับระดับสัญญาณ ด้วยเหตุปัจจัยเหล่านี้ การแปลงค่าดิจิทัลกลับไปเป็นระดับแรงดันที่ขั้ว CP จึงมีความจำเป็นที่จะต้องผ่านกระบวนการสอบเทียบ (Calibration) และการปรับชดเชยค่าความคลาดเคลื่อน (Error Compensation) เพื่อให้ผลการวัดมีความถูกต้องแม่นยำ

3.3 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดัน

ในการประยุกต์ใช้งานวงจรตรวจจับแรงดัน ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะมีการใช้งานอยู่ 2 ลักษณะ คือ การใช้งานวงจรตรวจจับแรงดันสำหรับการตรวจสอบแรงดันไลน์ เพื่อใช้ในการตรวจสอบการจ่ายไฟฟ้า และหยุดจ่ายไฟฟ้า ไปจนถึงตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการจ่ายไฟฟ้าและหยุดจ่ายไฟฟ้าของ EVSE อีกหนึ่งการใช้งาน คือการตรวจจับการต่อกราว เพื่อใช้ในการตรวจสอบการติดตั้งของ EVSE ว่ามีการติดตั้งระบบกราวอย่างถูกต้องหรือไม่

อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบจะใช้ LTV-814S-TA1 ในการทำหน้าที่ในการแยกแรงดันโดยใช้แสง โดยในฝั่งขาเข้าของวงจรตรวจจับแรงดันจะทำการออกแบบให้กระแสยอดทางด้านขาเข้าอยู่ที่ 2 มิลลิแอมแปร์โดยมีเหตุผลมาจากภาพที่ 3-3 เนื่องจากที่กระแส 2 มิลลิแอมแปร์คือปริมาณกระแสต่ำสุดที่ LTV-814-TA1 จะ

ทำงานโดยมีอัตราการส่งผ่านกระแสจากกระแสที่ไหลผ่านไดโอดทางด้านขาเข้า ไปยังทรานซิสเตอร์ทางด้านขาออก ที่ 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3-3 อัตราการส่งผ่านกระแสของ LTV-814S-TA1

3.3.1 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันสำหรับแรงดันไลน์

ในการออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันไลน์ ที่พิกัดแรงดัน 230 โวลต์ หากกำหนดให้กระแสยอด (Peak Current) ทางฝั่งขาเข้ามีค่าเท่ากับ 2 มิลลิแอมแปร์ จากการคำนวณจะได้ค่าความต้านทานขาเข้าที่ 162.635 กิโลโอห์ม เพื่อความเหมาะสมในการเลือกใช้อุปกรณ์ในทางปฏิบัติ จึงได้กำหนดค่าความต้านทานรวมไว้ที่ 160 กิโลโอห์ม ซึ่งส่งผลให้กระแสยอดขาเข้าขยับเป็น 2.033 มิลลิแอมแปร์ ทั้งนี้ ดังแสดงในภาพที่ 3-4 การจัดวงจรฝั่งขาเข้าได้เลือกใช้ตัวต้านทานขนาด 20 กิโลโอห์ม จำนวน 8 ตัวนำมาต่ออนุกรมกัน การออกแบบในลักษณะนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยกระจายแรงดันตกคร่อม และ ลดภาระการทนแรงดันของอุปกรณ์ เนื่องจากตัวต้านทานแต่ละตัวมีขนาดทางกายภาพและพิกัดกำลังไฟฟ้าที่จำกัด

ส่วนของภาคขาออกของวงจรในจังหวะที่แรงดันขาเข้าของวงจรมีค่ามากกว่าแรงดันไบอัสไปหน้าของ LTV-814S จะส่งผลให้เกิดกระแสไหลที่ฝั่งขาข้าวของวงจร จากนั้นทรานซิสเตอร์ที่ฝั่งขาออกของ LTV-814S จะนำกระแส จะได้สมการคุณสมบัติเฉพาะของระบบดังสมการที่ (3-5)

$$v_c(t)+C_{44}\frac{R_{79}R_{84}}{R_{79}+R_{84}}\frac{dv_c(t)}{dt}=V_{CC}\frac{R_{84}}{R_{79}+R_{84}} \qquad (3\text{-}5)$$

จะได้ผลเฉลยดังสมการที่ (3-6)

$$v_c(t)=V_{cc}\frac{R_{84}}{R_{79}+R_{84}}\left(1-e^{-\frac{t}{C_{44}\frac{R_{79}R_{84}}{R_{79}+R_{84}}}}\right) \quad (3\text{-}6)$$

จะได้ว่าเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของวงจรตรวจจับแรงดัน เมื่อตรวจพบแรงดันไลน์ จะเป็นไปดังสมการ (3-7)

$$t_{on}=C_{44}\frac{R_{79}R_{84}}{R_{79}+R_{84}}\ln\left(\frac{V_{cc}R_{84}}{V_{cc}R_{84}-V_{T+}(R_{84}+R_{79})}\right) \quad (3\text{-}7)$$

จากวงจรดังภาพที่ 3-4 แทนค่าลงในสมการที่ (3-7) จะได้ว่าวงจรจะใช้เวลาในการตอนสนองอยู่ที่ 4.888 ถึง 7.169 ไมโครวินาที

ในส่วนของ เวลา ใน การตอบสนอง ใน จังหวะ ที่ ตัวเก็บประจุ ทำการคายประจุ จะได้ สมการคุณสมบัติ เฉพาะของระบบดังสมการที่ (3-8)

$$v_c(t)+C_{44}R_{84}\frac{dv_c(t)}{dt}=0 \quad (3\text{-}8)$$

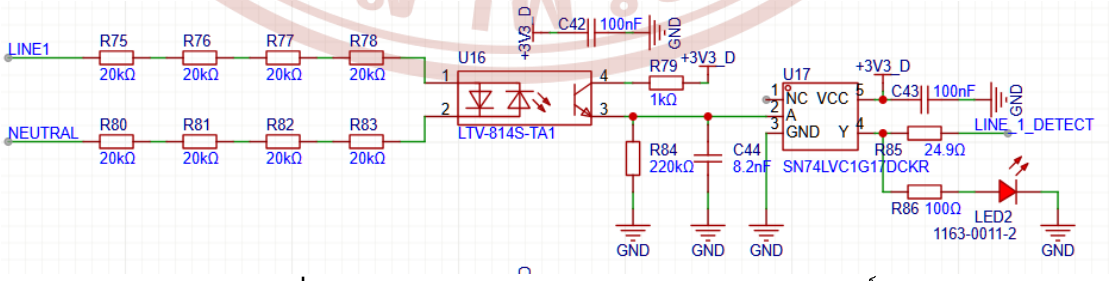
จะได้ผลเฉลยดังสมการที่ (3-9)

$$v_c(t)=V_{cc}\frac{R_{84}}{R_{84}+R_{79}}e^{-\frac{t}{R_{84}C_{44}}} \quad (3\text{-}9)$$

จะได้ว่าเวลาในการตอบสนองของวงจรตรวจจับแรงดัน เมื่อแรงดันหายไป จะเป็นไปดังสมการที่ (3-10)

$$t_{off}=C_{44}R_{84}\ln\left(\frac{V_{cc}}{V_{T-}}\frac{R_{84}}{R_{84}+R_{79}}\right) \quad (3\text{-}10)$$

ทำการแทนค่าของอุปกรณ์ดังภาพที่ 3-4 ลงในสมการที่ (3-10) จะได้ว่าวงจรจะใช้เวลาในการตอนสนองอยู่ที่ 1.817 ถึง 2.356 มิลลิวินาที



ภาพที่ 3-4 แผนผังวงจรตรวจจับแรงดันสำหรับแรงดันไลน์

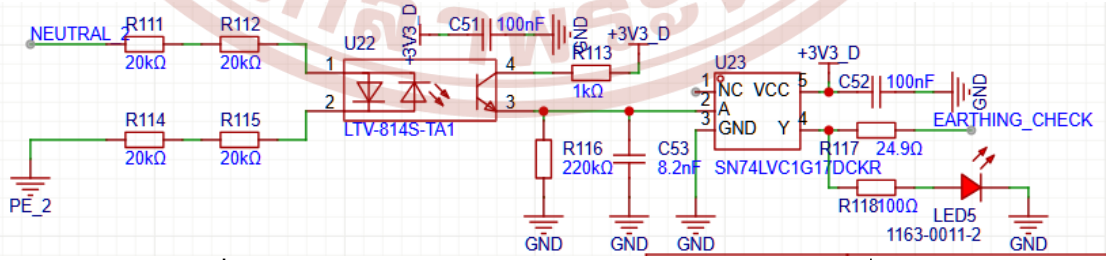
ในการออกแบบเวลาที่ใช้ในการตอบสนองทั้งในจังหวะที่ตรวจพบแรงดัน และในจังหวะที่แรงดันหายไปจะถูกเลือกให้อยู่ในช่วงเวลาที่น้อยกว่า 1 ใน 4 ของคาบเวลาของแรงดันไลน์ สำหรับแรงดัน 50 เฮิร์ต วงจรตรวจจับแรงดันจะถูกออกแบบมาเพื่อให้มีเวลาตอบสนองไม่เกิน 5 มิลลิวินาที เพื่อให้สัญญาณที่ได้จากการตอบสนองของวงจรตรวจจับแรงดัน มีความไกล้เคียงกับเวลาในการตอบสนองของคอนแทคเตอร์ของ EVSE เพื่อให้ได้มาซึ่งความเที่ยงตรงในการวัดเวลาในการตอบสนองเมื่อ EVSE เริ่มจ่ายไฟ และเวลาในการตอบสนองเมื่อ EVSE เริ่มตัดไฟ

3.3.2 การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันสำหรับการตรวจจับการต่อกราว

วงจรตรวจจับแรงดันสำหรับใช้ในการตรวจสอบการต่อกราวจะใช้วงจรและหลักการออกแบบ ในแบบเดียวกันกับวงจรตรวจจับแรงดันที่ใช้สำหรับการตรวจจับแรงดัน 230 โวลต์ ข้อแตกต่างคือค่าต้านทานขาเข้าที่ใช้จะเลือกค่าต้านทานที่น้อยกว่า เนื่องมาจากหลักการทำงานของวงจร ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

มาตรฐานในการติดตั้งระบบไฟฟ้าภายในอาคาร ประเทศไทยจะใช้การต่อกราวในระบบ TN-C-S ตามที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.7.1. ที่ผ่านมา กล่าวคือหากระบบไฟฟ้ามีการต่อกราวอย่างถูกต้อง ที่ขั้ว PE และนิวตรอน สมควรจะไม่มีความต่างศักย์ เนื่องจากสาย PE และสายนิวตรอนจะมีการต่อถึงกันที่ตู้ประทานของระบบ หรือในบางกรณีแม้ว่าภายในระบบจะมีการต่อระบบกราวอย่างถูกต้อง ที่ขั้วของ PE และนิวตรอนจะมีโอกาสที่จะมีความต่างศักย์อยู่ในช่วง 30 ถึง 60 โวลต์ เนื่องมาจากการเหนี่ยวนำภายในสายส่งของระบบไฟฟ้าภายในอาคาร แต่หากแรงดันที่ขั้ว PE และนิวตรอนมีค่า 115 โวลต์ หรือมากกว่า และระดับแรงดันดังกล่าวสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 2 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งเป็นระดับกระแสที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้ จะสามารถสรุปได้ว่าระบบดังกล่าวไม่มีการต่อสาย PE

หลักการทำงานของวงจรคือการนำวงจรตรวจจับแรงดันมาต่อเข้ากับขั้ว PE และ นิวตรอน และหากวงจรสามารถตรวจจับแรงดันได้ จะสามารถสรุปได้ว่าภายในระบบไฟฟ้าของ EVSE ที่กำลังทำการทดสอบไม่ได้มีการต่อกราว ซึ่งการทดสอบจะต้องสั่งให้ EVSE ทำงานในสถานะ C เพื่อให้ EVSE ทำการเชื่อมต่อเครื่องทดสอบเข้ากับระบบไฟฟ้าของเครื่องทดสอบ



ภาพที่ 3-5 แผนผังวงจรตรวจจับแรงดันสำหรับการตรวจจับการต่อกราว

3.4 การออกแบบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหล สำหรับใช้ในการทดสอบ RCD โดยประกอบไปด้วยกระแส 2 รูปแบบ ได้แก่วงจรจำลองกระแสรั่วไหลชนิด AC สำหรับใช้ในการทดสอบ RCD ชนิด AC และวงจรจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC สำหรับใช้ในการทดสอบ RCD ชนิด B

3.4.1 การออกแบบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC

วงจรดังภาพที่ 3-6 ประกอบไปด้วยวงจร 4 ส่วนได้แก่ ส่วนการจำลองกระแสรั่วไหลประกอบไปด้วยตัวต้านทาน R_1 และหน้าสัมผัสแบบปกติเปิดของรีเลย์ K_1 ส่วนการขับรีเลย์ประกอบไปด้วยมอสเฟต Q_1 และตัวต้านทาน R_3 และ R_2 ส่วนการจำกัดเวลาในการเปิดหน้าสัมผัสของรีเลย์ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ C_1 ตัวต้านทาน R_4 ไดโอด D_1 และชมิตต์ทริกเกอร์บัฟเฟอร์ U_1 และสุดท้ายส่วน แคลมป์แรงดัน (Voltage Clamper) ของรีเลย์ประกอบไปด้วยไดโอด D_2 ซีเนอร์ไดโอด D_3 ตัวต้านทาน R_5 และตัวเก็บประจุ C_2

หน้าที่ของส่วนการจำลองกระแสรั่วไหลคือการดึงกระแส AC จากสายไลน์ไปยังสาย PE โดยการต่อ ตัวต้านทานค่า 7.5 กิโลโอห์ม คร่อม ระหว่าง สายไลน์กับ PE ซึ่งจะเป็นการจำกัดกระแสอยู่ที่ 30.667 มิลลิแอมแปร์ ต่อมาคือส่วนของการขับรีเลย์มีหน้าที่ในการกระตุ้นให้รีเลย์ทำงาน โดยจะใช้มอสเฟตเบอร์ 2N7002 ในการกระตุ้น โดยสัญญาณที่สั่งให้มอสเฟตทำงานจะมาจากชมิตต์ทริกเกอร์บัฟเฟอร์ U_1 ในส่วนต่อมา ซึ่งจะทำหน้าที่ในการจำกัดเวลาสูงสุดที่รีเลย์จะสามารถค้างหน้าสัมผัสไว้ได้ เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวต้านทาน R_1 เกิดความร้อน หลักการทำงานคือสัญญาณแรงดันขาเข้าจะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันประกอบไปด้วย C_1 และ R_4 โดยมีสมการ (3-11)

$$v_C(t)+R_4C_1\frac{dv_c(t)}{dt}=v_i(t) \tag{3-11}$$

ทำการแก้สมการจะได้ผลเฉลยเฉพาะของแรงดัน v_c โดยกำหนดให้ $v_i = V_{cc}$ สำหรับกรณีที่สั่งให้รีเลย์ทำงาน จะได้ดังสมการที่ (3-12)

$$v_C(t)=V_{cc}\left(1-e^{-\frac{t}{C_1R_4}}\right) \tag{3-12}$$

จากแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_4 ตามสมการที่ (3-13)

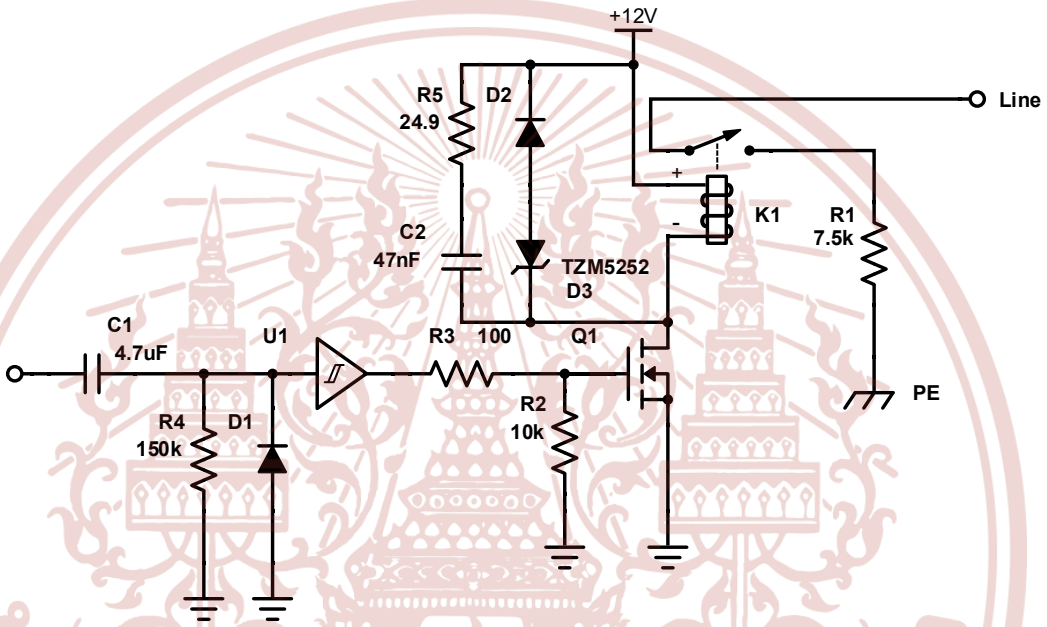
$$v_i(t)=v_C(t)+v_{R4}(t) \tag{3-13}$$

จะได้ สมการที่ (3-14)

$$v_{R4}(t)=V_{cc}e^{-\frac{t}{C_1R_4}} \tag{3-14}$$

จัดรูปสมการที่ (3-14) จะได้ว่าเวลาสูงสุดที่รีเลย์สามารถเปิดค้างไว้ได้ จะเป็นไปตามสมการที่ (3-15) เมื่อ V_{T-} คือแรงดันเปลี่ยนผ่านขาลง (Negative-going Threshold Voltage) ของชมิตต์ทริกเกอร์บัฟเฟอร์

$$t_{on\text{-}max}=R_4C_1 \ln\left(\frac{V_{CC}}{V_{T-}}\right) \qquad (3\text{-}15)$$

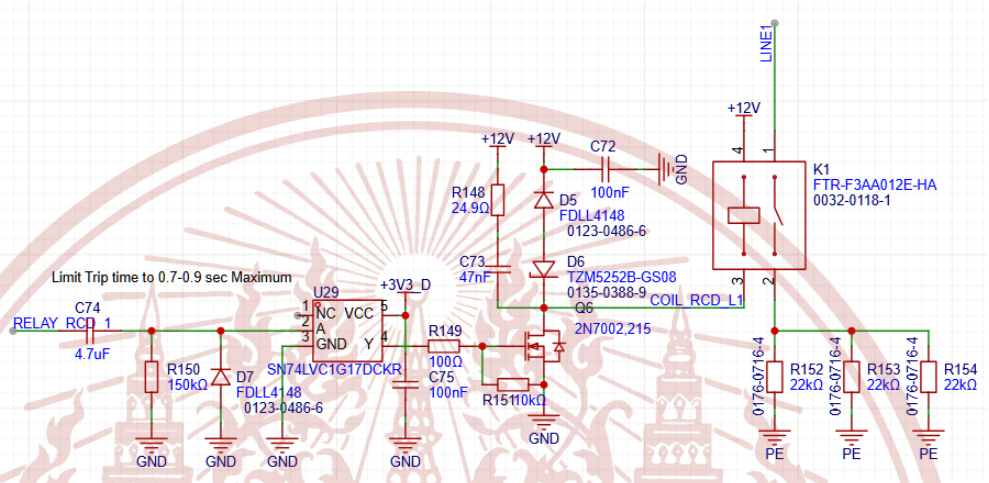


ภาพที่ 3-6 วงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC

ภาพที่ 3-7 แสดง แผนผังวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC ที่ ออกแบบ มา เพื่อ ใช้ สำหรับการทดสอบ EVSE สำหรับ งานวิจัยโดยค่าที่ใช้ในการออกแบบ จะเลือกใช้ C_1 = 4.7 µF ค่าต้านทาน R_4 = 150 kΩ ระดับแรงดันเปลี่ยนผ่านขาลงของชมิตต์ทริกเกอร์บัฟเฟอร์เบอร์ SN74LVC1G17 ที่ไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ จะอยู่ที่ 0.89 ถึง 1.2 โวลต์ แทนค่าในสมการที่ (3-15) จะได้เวลาสูงสุดในการเปิดรีเลย์จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.7 ถึง 0.9 วินาที ซึ่งในการทดสอบหากทำการจ่ายกระแสรั่วไหลเป็นเวลามากกว่า 500 มิลลิวินาที แต่ EVSE ยังคงไม่ตัดการจ่ายไฟ ก็สามารถสรุปได้แล้วว่า EVSE ที่กำลังทำการทดสอบไม่ได้มีการติดตั้ง RCD และส่วนของไดโอด D_1 จะใช้ในการคายประจุของตัวเก็บประจุ C_1 หลังจากที่สั่งให้รีเลย์หยุดทำงาน

ในส่วนสุดท้ายคือส่วนของการแคลมป์แรงดันมีหน้าที่ในการจำกัดแรงดันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำในกรณีที่ตัดการทำงานของรีเลย์ เนื่องจากโครงสร้างของรีเลย์มีลักษณะเป็นขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า หลักการทำงานคือไดโอด D_2 จะทำหน้าที่ในการกำหนดทิศทางของกระแสรีเลย์ โดยไดโอด D_2 จะนำกระแสในจังหวะที่มอสเฟตหยุดนำกระแส และเมื่อไดโอด D_2 นำกระแส จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านซีเนอร์ไดโอด D_3 โดยจะใช้ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ TZM5252 ซึ่งมีระดับแรงดันซีเนอร์ที่ 24 โวลต์ จะได้ว่าในจังหวะที่มอสเฟตหยุดนำกระแสจะเกิดแรงดันตกคร่อมที่ขดรีเลย์ 24.7 โวลต์ ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวดรีเลย์ลดลงอย่างรวดเร็ว และ

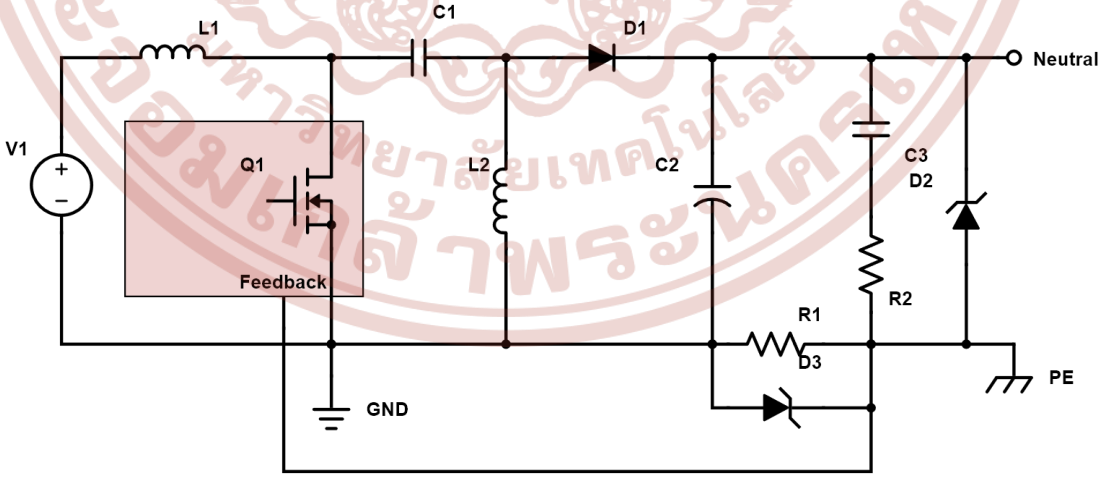
ส่งผลให้หน้าสัมผัสของรีเลย์จากกัน ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมที่ขดลวดของรีเลย์ในจังหวะที่มอสเฟตหยุดนำกระแสจะมีทิศทรงเสริมกับแรงดันของไฟเลี้ยงที่ใช้ในการขับรีเลย์ ส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่มอสเฟต 36.7 โวลต์ ซึ่งน้อยกว่า 60 โวลต์ ซึ่งเป็นระดับแรงดันเบรกดาวน์ของมอสเฟต 2N7002



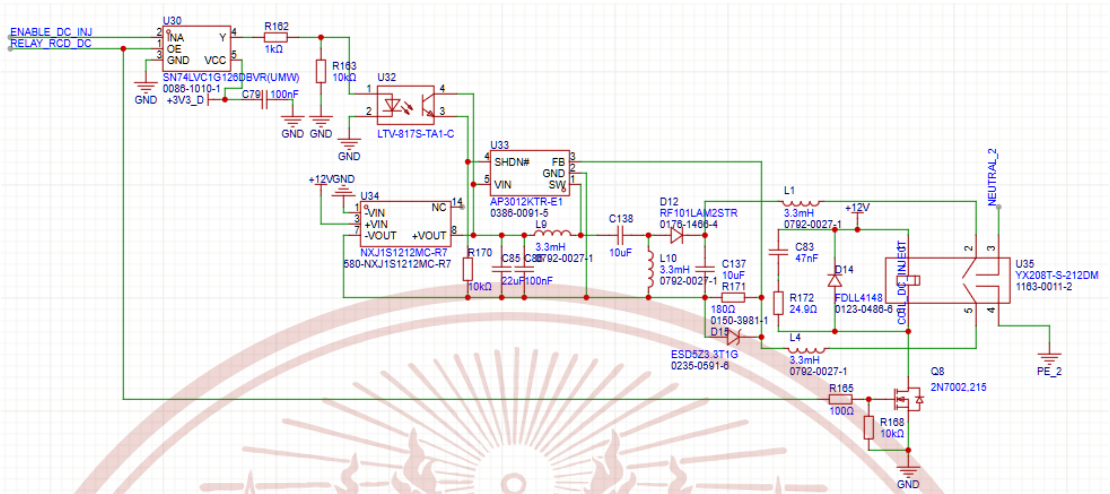
ภาพที่ 3-7 แผนผังวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC

3.4.2 การออกแบบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC

ภาพที่ 3-8 แสดงแผนผังโดยรวมของวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วงจร SEPIC คอนเวอร์เตอร์ในการจ่ายกระแสเนื่องจากวงจร SEPIC คอนเวอร์เตอร์มีคุณสมบัติทางด้านการแปลงผันแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงได้ โดยจะใช้ไอซีควบคุม AP3012 โดยภาพที่ 3-9 แสดงวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 3-8 วงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC



ภาพที่ 3-9 แผนผังวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC

วงจร SEPIC คอนเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้เป็น SEPIC คอนเวอร์เตอร์ในโหมดนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode : CCM) จะได้ว่าการเลือกค่าความเหนี่ยวนำของ L_1 และ L_2 จะเป็นไปตามสมการที่ (3-16) และ (3-17) เมื่อ V_{in} = 12 V, V_{out} = 1.25 V , F_{sw} = 1.5 MHz , L_1 = L_2 = 3.3 mH จะได้ว่า กระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ Δi_1 = Δi_2 = 228.702 µA เมื่อกระแสทางด้านขาออกของวงจรอยู่ที่ 6 มิลลิแอมแปร์ จะได้ว่ากระแสทางด้านขาเข้าของวงจรจะได้ 625 ไมโครแอมแปร์ ซึ่งกระแสกระเพื่อมของตัวเหนี่ยวนำทั้งสองยังคงอยู่ในช่วง CCM

$$\Delta i_1 = \frac{V_{in} V_{out}}{V_{in} + V_{out}} \frac{1}{L_1 F_{sw}} \tag{3-16}$$

$$\Delta i_2 = \frac{V_{in} V_{out}}{V_{in} + V_{out}} \frac{1}{L_2 F_{sw}} \tag{3-17}$$

ส่วนต่อมาคือการเลือกค่า C_1 เมื่อแรงดันกระเพื่อมของ C_1 จะเป็นไปดังสมการที่ (3-18)

$$\Delta V_t = \frac{I_{in} V_{in}}{V_{in} + V_{out}} \frac{1}{C_1 F_{sw}} \tag{3-18}$$

เมื่อเลือกใช้ C_1 = 10 µF จะได้ ΔV_t =37.736 µV และ C_2 จะทำการเลือกจากสมการที่ (3-19)

$$\Delta V_{out} = \frac{I_{out} V_{in}}{V_{in} + V_{out}} \frac{1}{C_2 F_{sw}} \tag{3-19}$$

เมื่อ C_2 = 10 µF จะได้ ΔV_{out} =362.264 µV

ในการกำหนดค่ากระแสขาออกของวงจรจะสามารถกำหนดได้จากการเลือกค่าต้านทานป้อนกลับโดยในภาพที่ 3-8 จะทำการเลือกค่าต้านทาน R_1 โดยที่แรงดันป้อนกลับของไอซี AP3012 จะอยู่ที่ 1.25 โวลต์ ดังนั้นหากเลือกค่าต้านทาน R_1 = 180 Ω จะได้กระแสขาออกอยู่ที่ 6.944 มิลลิแอมแปร์

3.5 การทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบการทำงานของ EVSE

การทดสอบเครื่องทดสอบการทำงานของ EVSE ภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้ดำเนินการทดสอบกับ EVSE 2 เครื่องได้แก่ EVSE ที่ทำการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการวิจัยดังภาพที่ 3-10 โดยจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบพื้นฐานตามภาพที่ 1-2 เพื่อเป็นการควบคุมตัวแปรในการทดสอบ และ EVSE ที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-10 การทดสอบ EVSE ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อการออกแบบเครื่องทดสอบ EVSE



ภาพที่ 3-11 การทดสอบ EVSE ที่มาขายตามท้องตลาด

3.6 การทดสอบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหล

เนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงกระบวนการในการทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับกระแสรั่วไหลที่ถูกติดตั้งไว้ภายใน EVSE โดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การทดสอบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC และ การทดสอบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC ซึ่งการทดสอบการทำงานของวงจรทั้ง 2 จะมีการดำเนินการที่แตกต่างกัน โดยส่วนของหลักการและเหตุผลจะกล่าวถึงอีกทีในส่วนต่อไป

3.6.1 ทดสอบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC

ในการทดสอบการทำงานของวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC จากที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.7.1 การทดสอบการทำงานของวงจรจำลองเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC มีความจำเป็นต้องทดสอบในขณะที่ EVSE กำลังทำการจ่ายไฟอยู่ ดังนั้นในส่วนของกระบวนการทดสอบขั้นตอนแรงคือการสั่งการให้ EVSE ทำการจ่ายไฟโดยการสั่งให้ EVSE เปลี่ยนสถานะจาก A B ไปจนถึง C ตามลำดับขั้นตอนต่อมาจะเป็นการเตรียมการจับเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของระบบการตัดไฟของ EVSE โดยจะใช้ตัวจับเวลาที่อยู่ภายใน ESP-WROOM-32 ในการจับเวลา จากนั้นจะทำการสั่งให้วงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC เริ่มทำงานพร้อมกับทำการจับเวลาที่ใช้นับจากเวลาจังหวะที่เริ่มสั่งให้วงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลเริ่มทำงานไปจนถึงช่วงเวลาที่ EVSE ตัดไฟ และในระหว่างที่กำลังทำการทดสอบ หาก EVSE ใช้เวลาเกิน

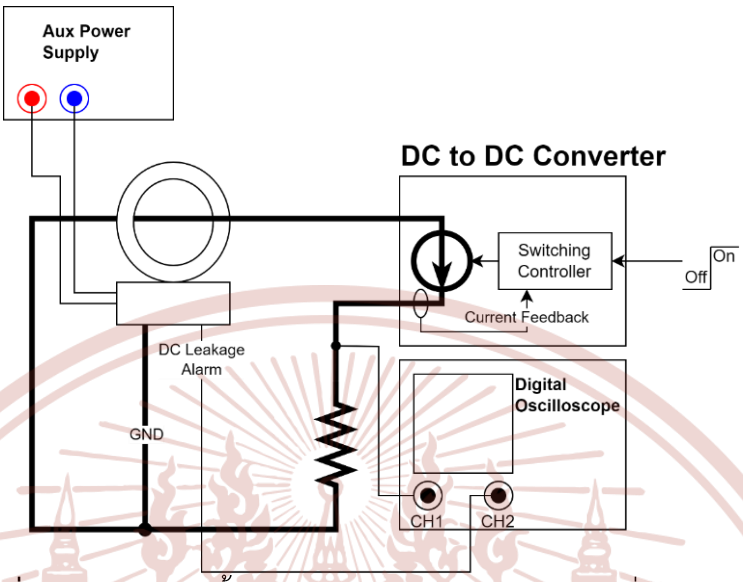
3.6.2 ทดสอบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC

ในการทดสอบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับกระแสรั่วไหลชนิดไฟฟ้า DC และไฟฟ้ากระแสสลับ MD0630T41A-1 ดังแสดงในภาพที่ 3-12 ในการทดสอบเนื่องจากตัวตรวจจับกระแสรั่วไหล MD0630T41A-1 มีหลักการทำงานในการตรวจจับกระแสรั่วไหลหลักการเดียวกันกับ RCD ชนิด B ซึ่งถูกใช้ในการออกแบบระบบป้องกันกระแสรั่วไหลสำหรับ EVSE

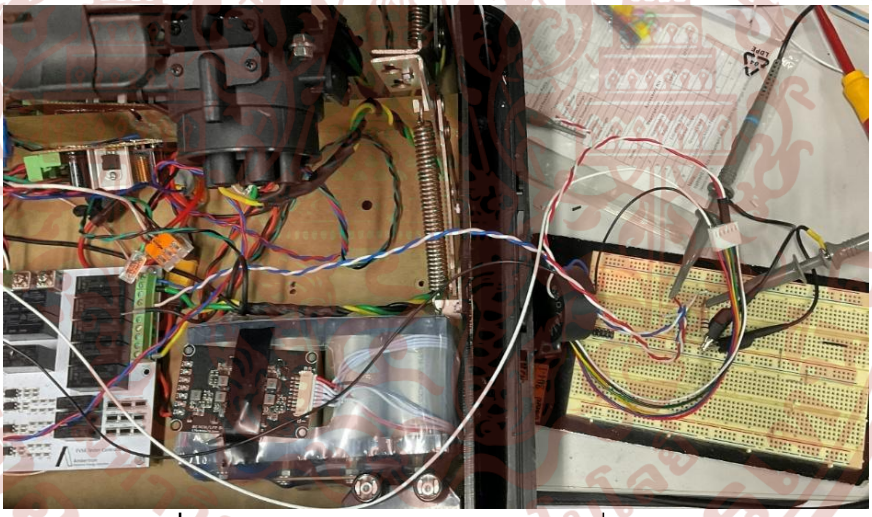


ภาพที่ 3-12 อุปกรณ์ตรวจจับกระแสรั่วไหล

ภาพที่ 3-13 แสดงสภาพแวดล้อมในการทดลองสำหรับการทดสอบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC โดยการทดลองจะทำการจ่ายกระแสรั่วไหล DC ให้ไหลผ่านตัวตรวจจับกระแส MD0630T41A-1 จากนั้นทำการวัดการตอบสนองผ่านขา DC Leakage Alarm ของตัวตรวจจับกระแสเทียบกับกระแสที่ถูกสร้างจากวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหล โดยการวัดกระแสจะใช้วิธีการวัดแรงดันตกคร่อมค่าต้านทานชันต์ด้วยค่าต้านทานค่า 10 โอห์ม ในการวัดแรงดันจะใช้ออสซิลโลสโคปในการวัดสัญญาณโดยจะวัดเทียบกระแสที่จ่ายเพื่อใช้ในการทดสอบ เทียบกับสัญญาณที่ตอบสนองมาจากตัวตรวจจับกระแสรั่วไหล การจัดเตรียมการทดลองจะเป็นไปดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-13 สภาพแวดล้อมในการทดลองวงจรจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC



ภาพที่ 3-14 การทดลองวงจรจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC

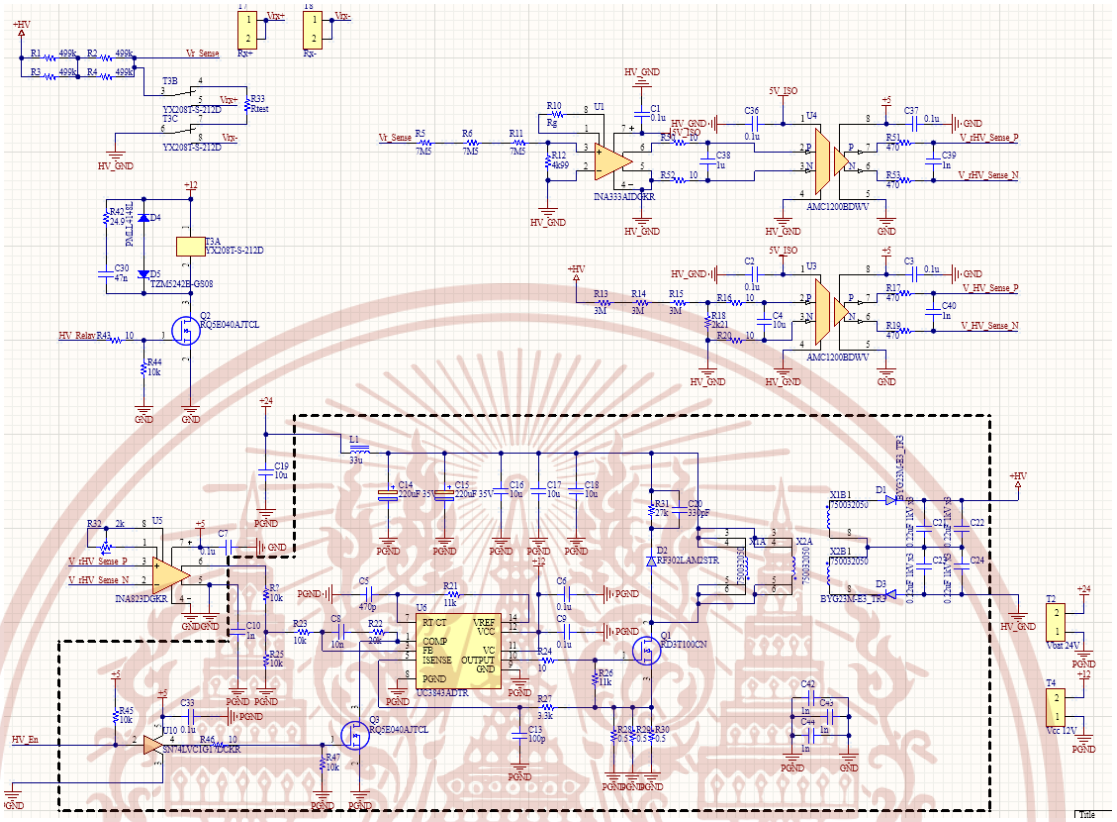
3.7 การออกแบบวงจรทดสอบความเป็นฉนวน

วงจรทดสอบความเป็นฉนวนดังภาพที่ 3-15 ประกอบไปด้วยวงจรสร้างแรงดันสูง ซึ่งสามารถปรับแรงดันได้ตั้งแต่ 200 ถึง 1000 โวลต์ วงจรวัดแรงดันตกคร่อมแหล่งจ่ายแรงดันสูง และวงจรวัดแรงดันตกคร่อมฉนวน โดยวงจรวัดแรงดันตกคร่อมแหล่งจ่ายแรงดันสูงจะถูกใช้ในการแปรผันเมื่อค่าต้านทานของฉนวนมีค่าเปลี่ยนไป และวงจรวัดแรงดันตกคร่อมฉนวนที่ทำการทดสอบ จะใช้งานร่วมกันแรงดันตกคร่อมแหล่งจ่ายแรงดันสูง ในการคำนวณค่าต้านทานของฉนวน อีกทั้งแรงดันตกคร่อมฉนวนยังใช้ในการควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันสูง เพื่อควบคุมให้แรงดันตกคร่อมแหล่งจ่ายมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งในการทดสอบค่าต้านทานฉนวนจะควบคุมแรงดันที่ใช้ในการทดสอบค่าต้านทานฉนวน อยู่ที่ 500 โวลต์

ในการออกแบบ วงจร วัดแรงดันตกคร่อม แหล่งจ่าย แรงดันสูง จะ ใช้ ไอซีขยายสัญญาณแบบแยก กราวเบอร์ AMC1200 ร่วมกับวงจรแบ่งแรงดันเพื่อใช้ในการลดระดับแรงดันจาก 200 ถึง 1000 โวลต์ ให้อยู่ในช่วง 250 มิลลิโวลต์ เช่นเดียวกันกับการวัดแรงดันตกคร่อมฉนวน ซึ่งมีความแตกต่างคือ ที่วงจรแบ่งแรงดันของวงจร วัด แรงดัน ตกคร่อม ฉนวน จะ ใช้ ไอซี ขยายเครื่องมือวัด(Instrument Amplifier) ใน การ ส่งผ่านแรงดัน เนื่องจากค่าต้านทานขาเข้าของ AMC1200 จะมีค่า 28 กิโลโอห์ม ซึ่งสามารถกระทบกับระดับแรงดันที่วัดได้

สำหรับ วงจร แหล่งจ่าย แรงดันสูง จะ ใช้ วงจร ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback Converter) โดยจะ ใช้ ไอซีควบคุมเบอร์ UC3843 ในการควบคุมการสวิตซ์ของมอสเฟตด้วยความถี่ในการสวิตซ์อยู่ที่ 300 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถปรับค่าได้จาก R_{21}, C_5 โดยส่วนควบคุมจะใช้ระบบควบคุมชนิด PI ซึ่งสามารถปรับจูนได้ผ่านการปรับค่า R_{23} ,C_5 และ R_{22} นอกจากนี้วงจรยังประกอบไปด้วยส่วนเปิดและปิดการทำงานของวงจรสวิตซ์ชิง โดยจะควบคุมผ่านมอสเฟต Q_3 เพื่อควบคุมให้วงจรจ่ายแรงดันสูงมาในจังหวะที่กำลังทำการทดสอบเท่านั้น ซึ่งสัญญาณสั่งให้สวิตซ์ชิงทำงานจะถูกสั่งโดยไมโครคอนโทลเลอร์ที่ควบคุมการทดสอบความเป็นฉนวน

ในส่วนภาคกำลังของฟลายแบคจะใช้การต่อหม้อแปลงโดยการขนานขดปฐมภูมิ และอนุกรมขดทุติยภูมิเพื่อเพิ่มอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง อีกทั้งเป็นการกระจายภาระการจ่ายโหลดให้กับหม้อแปลง 2 ลูก เพื่อกระจายความร้อนของอุปกรณ์ ส่วนของสวิตซ์จะใช้มอสเฟต RD3T100CN ซึ่งสามารถทนแรงดันสูงสุดได้ 200 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 10 แอมแปร์ ซึ่งในการใช้งานไอซี UC3843 จะมีการออกแบบส่วนควบคุมกระแสในจำกัดกระแสไว้ที่ 6 แอมแปร์ เพื่อป้องกันไม่ให้หม้อแปลงฟลายแบคเสียหาย จะได้ว่าวงจรฟลายแบค จะสามารถจ่ายกำลังได้สูงสุด 27 วัตต์



ภาพที่ 3-15 วงจรทดสอบค่าความเป็นฉนวน

3.8 การทดสอบวงจรทดสอบความเป็นฉนวน

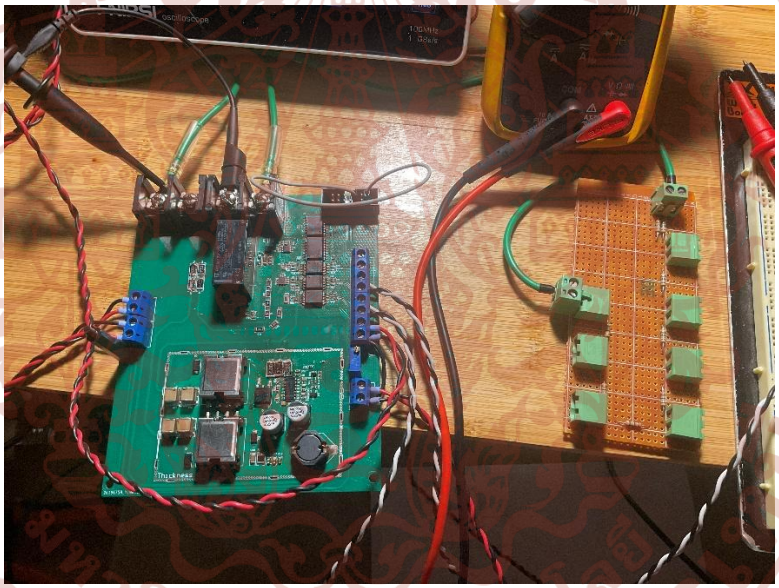
การทดสอบวงจรทดสอบความเป็นฉนวนที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีวิจัยโดยเลือกใช้การทดสอบกับชุดตัวต้านทานอ้างอิงที่ทราบค่าจริง ดังภาพที่ 3-16 แทนการทดสอบกับสายอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าโดยตรง การตัดสินใจเลือกใช้วิธีการทดสอบดังกล่าวอาศัยเหตุผลและข้อจำกัดในทางปฏิบัติ 2 ประการหลัก ดังต่อไปนี้

3.8.1 ข้อจำกัดด้านช่วงการวัด และ การสอบเทียบเครื่องมือ

โดยธรรมชาติของคุณสมบัติทางกายภาพ วัสดุฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานที่สูงมาก สายอัดประจุที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์และไม่มีการเสื่อมสภาพมักมีค่าความต้านทานฉนวนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 เมกะโอห์ม ไปจนถึงระดับ 1 กิกะโอห์ม หรือมากกว่า ด้วยช่วงการวัด ที่กว้างและมีค่าความต้านทานสูงระดับนี้ ทำให้การตรวจวัดมีความซับซ้อนและมีความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนสูง นอกจากนี้ การจัดหาเครื่องมือวัดมาตรฐานที่มีความแม่นยำระดับสูงเพื่อนำมาใช้สอบเทียบในย่านความต้านทานระดับกิกะโอห์มนั้นมีข้อจำกัดและดำเนินการได้ค่อนข้างยากในทางปฏิบัติ

3.8.2 ความท้าทายในการจำลองสภาวะความผิดพร่อง

ในการประเมินขีดความสามารถของวงจรทดสอบ จำเป็นต้องมีการวัดค่าในสภาวะที่ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพในระดับต่างๆ อย่างไรก็ตาม การจัดหาสายอัดประจุที่มีความบกพร่องทางกายภาพจริง หรือการจงใจสร้างความเสียหายให้กับสายอัดประจุเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานการเสื่อมสภาพที่ตรงตามต้องการนั้น เป็นกระบวนการที่ควบคุมตัวแปรได้ยากและขาดความแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว การใช้เครือข่ายตัวต้านทาน ที่มีความเที่ยงตรงสูงมาต่อวงจรเพื่อจำลองค่าความเป็นฉนวน ถือเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากผู้วิจัยสามารถกำหนดและเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำลองได้อย่างแม่นยำ สามารถทำการทดสอบซ้ำได้ และช่วยให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือทางสถิติมากกว่าการทดสอบกับสายอัดประจุจริง



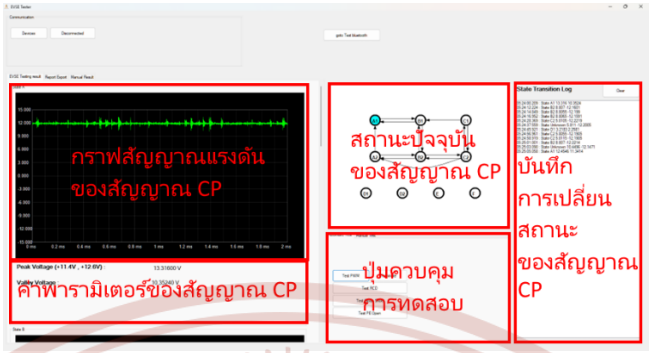
ภาพที่ 3-16 การทดลองวงจรวัดค่าความเป็นฉนวน

บทที่ 4
ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบการทำงานของวงจรโดยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นผลการทดสอบเครื่องทดสอบการทำงานของEVSE ซึ่งเป็นการทดสอบระบบหลักของงานวิจัย โดยจะทำการทดสอบกับEVSEที่ถูกพัฒนาขึ้นเองภายในแลปสำหรับการทดสอบวงจรที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนที่สองคือการทดสอบการทำงานของวงจรจำลองการเกิดข้อผิดพร่องในระหว่างการอัดประจุ อาทิเช่น การจำลองในกรณีไดโอดลัดวงจร การจำลองในกรณีที่สาย PE ขาดการเชื่อมต่อ และการจำลองในกรณีการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC ในระหว่างการอัดประจุ ส่วนที่สามคือผลการทดสอบวงจรสร้างกระแสรั่วไหลชนิด DC ซึ่งจะถูกนำไปรวมเข้ากับระบบการทดสอบEVSEในส่วนแรก โดย จะทำการ ทดสอบ กับ เครื่องตรวจจับ กระแส รั่วไหล ซึ่งถูกออกแบบมาสำหรับการติดตั้งภายใน EVSE

4.1 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบEVSE

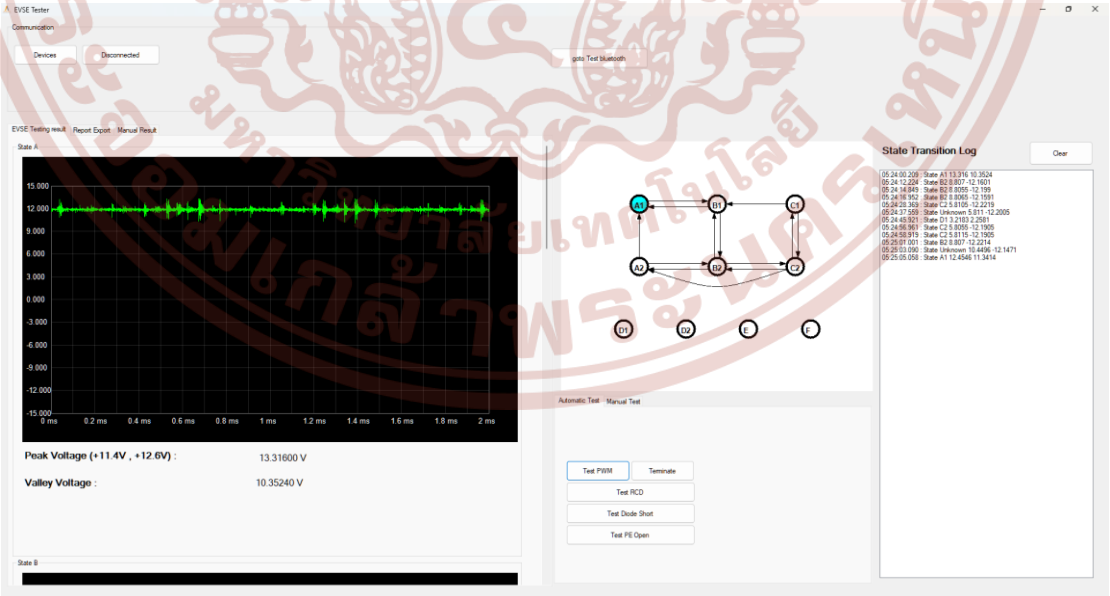
ในการเก็บ ผลการทดสอบ จาก เครื่องทดสอบ EVSE จะทำการ เขียนแอปพลิเคชันฟอร์ม โดยใช้ .NET Framework ในภาษา C# เพื่อใช้ในการสื่อสารกับเครื่องทดสอบในการส่งคำสั่งในการเริ่มการทดสอบและการรับผลการทดสอบเพื่อแสดงที่หน้าจอของผู้ใช้ โดยส่วนที่แสดงผลลัพธ์จะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนดังแสดงไว้ในภาพที่ 4-1 ได้แก่ ส่วนการแสดงผลกราฟสัญญาณแรงดันของสัญญาณ CP จะใช้สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนภายในสัญญาณ CP โดยสัญญาณจะถูกสุ่มค่าด้วยอัตราการสุ่มค่าอยู่ที่ 4 เมกะแซมเปิลต่อวินาที ส่วนค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ CP จะใช้ในการแสดงค่าระดับแรงดันของสัญญาณ CP เพื่อใช้ในการสอบมาตรฐาน ส่วนแสดงสถานะปัจจุบันของสัญญาณ CP ใช้ในการแสดงสถานะปัจจุบันที่เครื่องทดสอบตรวจจับได้ เพื่อใช้ในการติดตามผลการทำงานของ EVSE ส่วนแสดงบันทึกการเปลี่ยนสถานะของสัญญาณ CP ใช้ในการตรวจสอบลำดับการเปลี่ยนแปลงสถานะของ EVSE และส่วนควบคุมการทดสอบ เพื่อใช้ในการสั่งการเครื่องทดสอบในการดำเนินการทดสอบหรือหยุดการทดสอบกลางคันในกรณีที่ EVSE ขัดข้องระหว่างที่กำลังทำการทดสอบ



ภาพที่ 4-1 ส่วนการแสดงผลของแอปพลิเคชันฟอร์มสำหรับการแสดงผลการทดสอบ

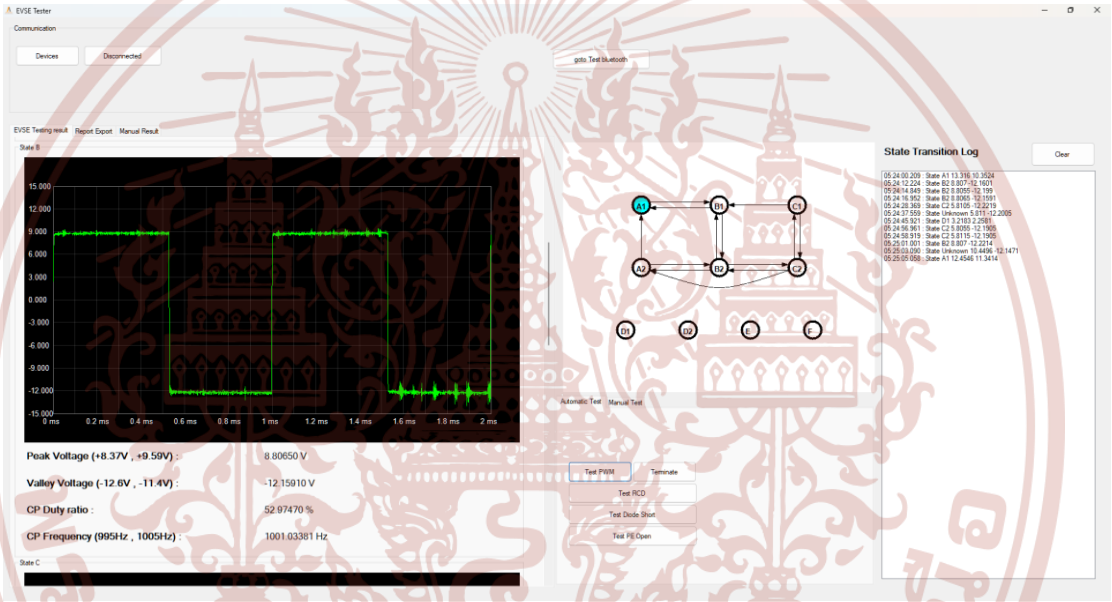
4.1.1 ผลการทดสอบ EVSE ที่พัฒนามาสำหรับการทดสอบงานวิจัย

จากผลการทดสอบดังภาพที่ 4-2 แสดงผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ A1 โดยผลลัพธ์จะได้ว่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณ CP จะอยู่ที่ 13.316 โวลต์ และแรงดันต่ำสุดอยู่ที่ 10.352 โวลต์ ซึ่งสังเกตจากกราฟของสัญญาณจะพบว่าสัญญาณ CP มีการเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงเข้ามา ซึ่งลักษณะของสัญญาณรบกวนที่สังเกตได้ดังภาพที่ 4-2 เป็นลักษณะของสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากวงจรสวิตช์ชิง ดังนั้นหากทำการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณจากแรงดันต่ำสุด และแรงดันสูงสุดจะได้แรงดัน 11.834 โวลต์ ซึ่งคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานอยู่ที่ร้อยละ 1.383 และระดับแรงดันยังคงอยู่ในช่วง 11.4 ถึง 12.6 ตามมาตรฐาน IEC 61851

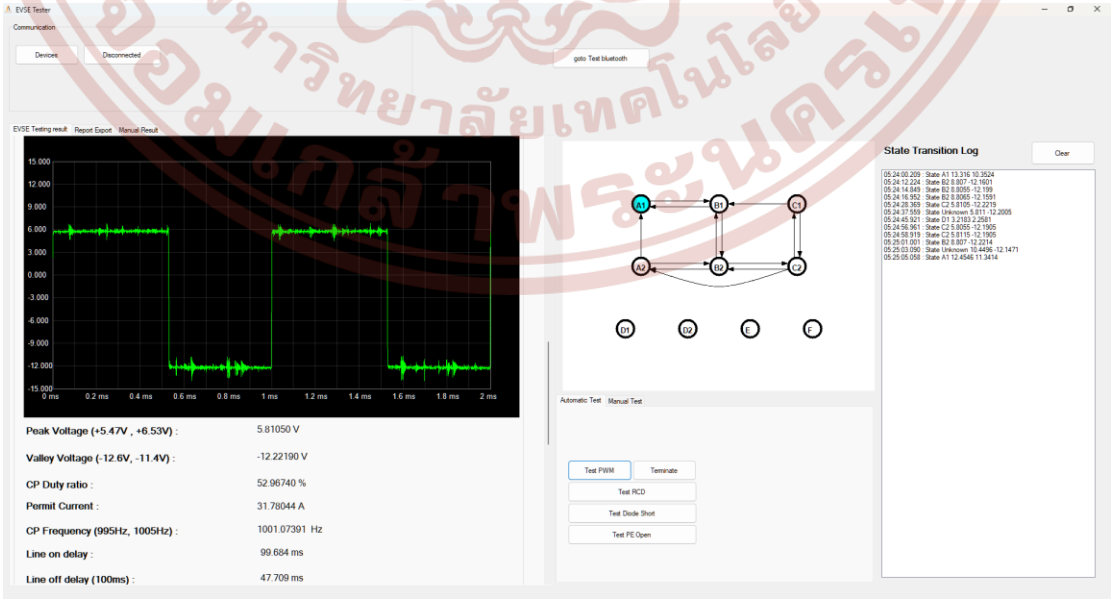


ภาพที่ 4-2 ผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ในสถานะ A

ภาพที่ 4-3 แสดงผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ในสถานะ B จะได้แรงดันสูงสุดของสัญญาณ CP อยู่ที่ 8.906 โวลต์ ซึ่งคลาดเคลื่อนจากแรงดันมาตรฐานร้อยละ 1.044 และระดับแรงดันดังกล่าวยังคงอยู่ในช่วง 8.37 ถึง 9.59 โวลต์ ตามมาตรฐาน IEC61851 แรงดันต่ำสุดของสัญญาณ CP อยู่ที่ -12.159 โวลต์ ซึ่งคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐานร้อยละ 1.325 และยังคงอยู่ในช่วงแรงดัน -12.6 ถึง -11.4 โวลต์ ตามมาตรฐาน IEC61851 และความถี่ของสัญญาณ CP อยู่ที่ 1001.034 เฮิรตซ์ ซึ่งคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานร้อยละ 0.1034 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน IEC61851



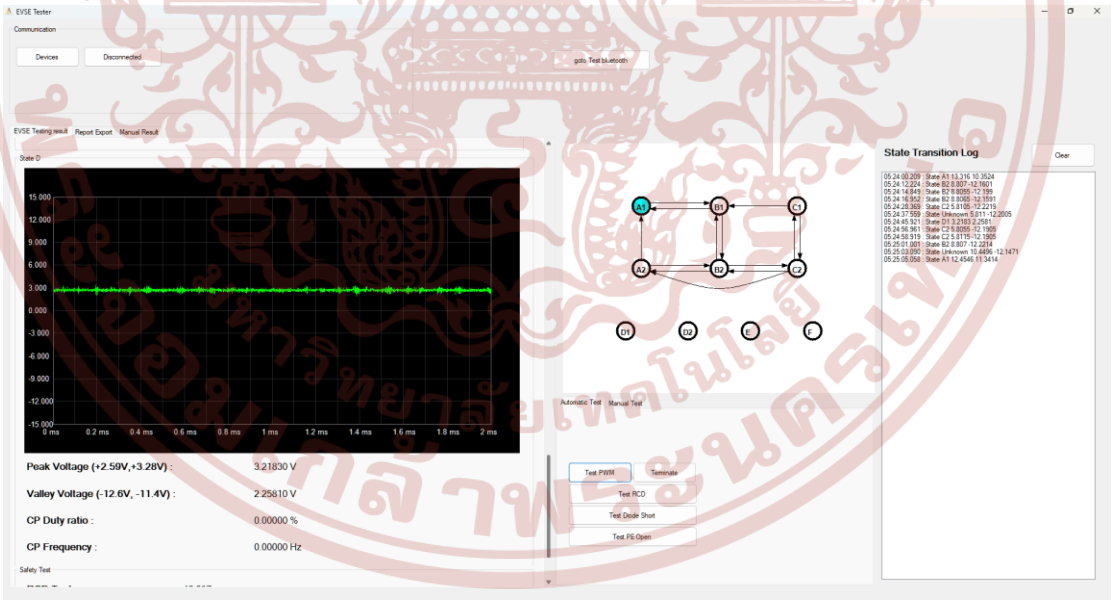
ภาพที่ 4-3 ผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ในสถานะ B



ภาพที่ 4-4 ผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ในสถานะ C

ภาพที่ 4-4 แสดงผลลัพธ์การทำงานของวงจรในสถานะ C รวมไปถึงเวลาหน่วงในการตัด และต่อของคอนแทคเตอร์ของ EVSE ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะ B2 ไปสถานะ C2 และจากสถานะ C2 ไปสถานะ B2 จากผลลัพธ์จะได้ว่าระดับแรงดันสูงสุดของสัญญาณ CP จะอยู่ที่ 5.811 โวลต์ ซึ่งคลาดเคลื่อนจากมาตรฐาน ร้อยละ 3.15 และค่าของแรงดันสูงสุดยังอยู่ในช่วง 5.47 ถึง 6.53 โวลต์ตามมาตรฐาน IEC61851 และ Duty cycle ของสัญญาณอยู่ที่ร้อยละ 52.967 ซึ่งจะสามารถคำนวณย้อนกลับมาได้ว่า EVSE ยินยอมให้รถสามารถดึงกระแสจาก EVSE ได้ 31.78 แอมแปร์ เวลาหน่วงที่ EVSE ใช้ในการจ่ายไฟให้กับยานยนต์ไฟฟ้าอยู่ที่ 99.654 มิลลิวินาที และเวลาที่ใช้ในการตัดไฟ เมื่อหยุดอัดประจุอยู่ที่ 47.709 มิลลิวินาที ซึ่งน้อยกว่า 300 มิลลิวินาทีตามมาตรฐาน IEC61851

ในส่วนสุดท้ายดังภาพที่ 4-5 ผลลัพธ์การทำงานของ EVSE ในสถานะ D ซึ่ง EVSE ที่ใช้ในการทดลองจะมีการตอบสนองในการเปลี่ยนสถานะจาก D2 ไปเป็นสถานะ D1 ซึ่งจะได้แรงดันสูงสุดอยู่ที่ 3.2183 โวลต์ และแรงดันต่ำสุดอยู่ที่ 2.2581 โวลต์ จะได้ว่าค่าเฉลี่ยของแรงดันอยู่ที่ 2.7382 โวลต์ ซึ่งคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานอยู่ที่ร้อยละ 8.727 ซึ่งนับว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ดี ระดับแรงดันที่ตรวจวัดได้ยังคงอยู่ในช่วง 2.59 ถึง 3.28 โวลต์ ยังคงนับว่า EVSE ที่ทำการทดสอบผ่านมาตรฐาน IEC61851

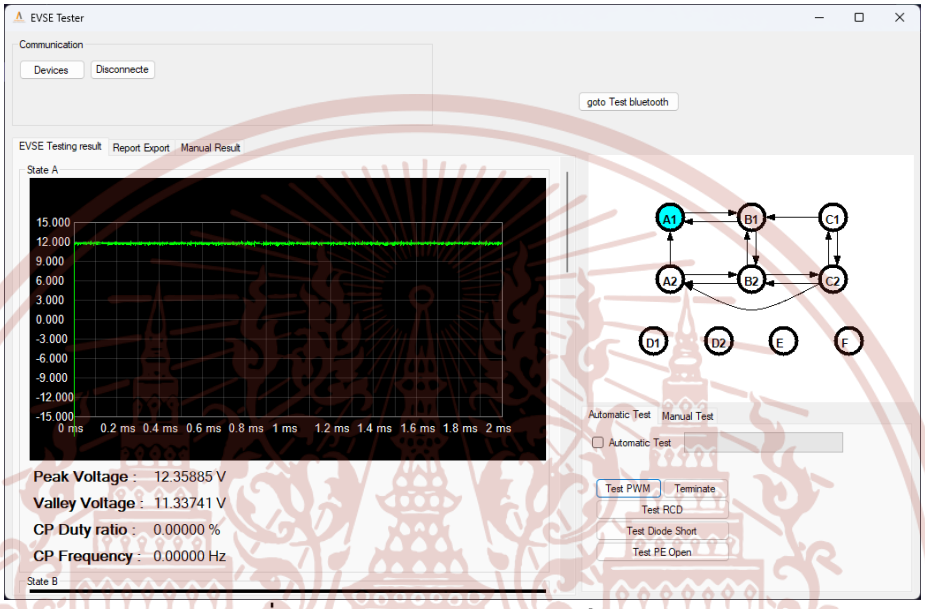


ภาพที่ 4-5 ผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ในสถานะ D

4.1.2 ผลการทดสอบ EVSE ที่มีขายตามท้องตลาด

ผลการทดสอบการทำงานของ EVSE ที่สามารถตามท้องตลาด สามารถวิเคราะห์ผ่านการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ CP ในแต่ละสถานะการทำงานได้ดังนี้ จากภาพที่ 4-6 แสดงลักษณะของสัญญาณ CP เมื่อระบบอยู่ในสถานะ A ซึ่งเป็นสแตนด์บายและยังไม่มีการเชื่อมต่อกับยานยนต์ไฟฟ้า ผลการตรวจวัดพบว่าสัญญาณมี

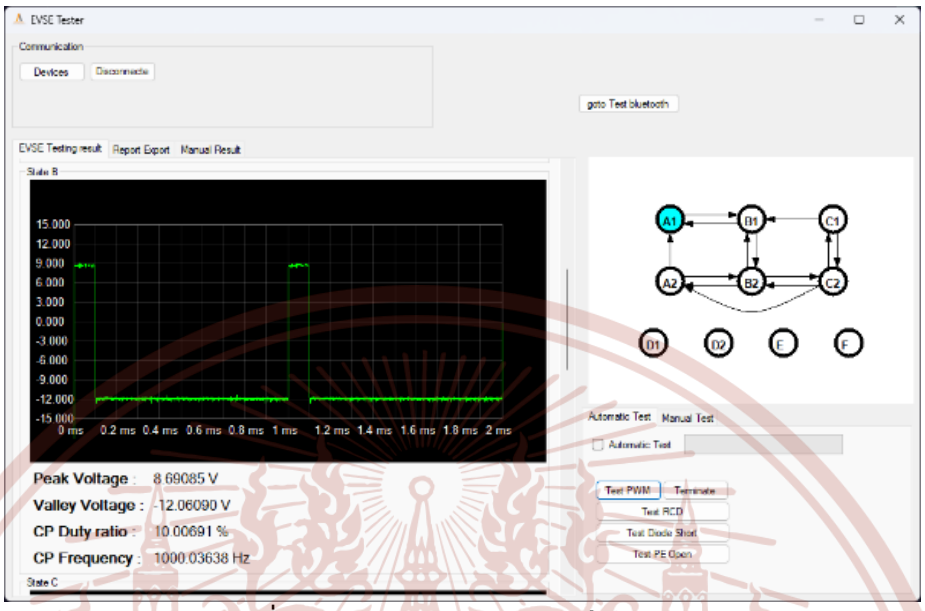
ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่อยู่ที่ +12.36 โวลต์ (V) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ +12 โวลต์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) อยู่ที่ร้อยละ 2.99



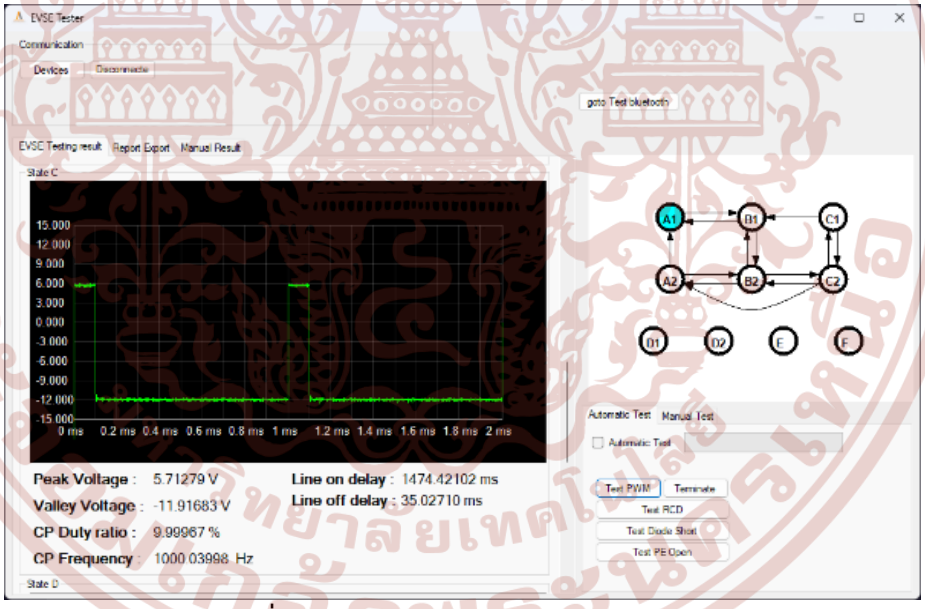
ภาพที่ 4-6 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ A

เมื่อจำลองการเชื่อมต่อเข้าสู่สถานะ B หรือสถานะที่ EVSE ตรวจพบยานยนต์แต่ยังไม่พร้อมรับการประจุไฟ ดังแสดงในภาพที่ 4-7 สัญญาณ CP จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (PWM) โดยมีแอมพลิจูดของสัญญาณ ลดลงมาอยู่ที่ +8.69 โวลต์ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 3.435 จากค่ามาตรฐาน (+9 โวลต์) ในส่วนของคุณสมบัติเชิงความถี่ พบว่าสัญญาณมีความถี่อยู่ที่ 1000.04 เฮิรตซ์ (Hz) ซึ่งคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานเพียงร้อยละ 0.00368 และมีอัตราส่วนการทำงาน (Duty Ratio) อยู่ที่ร้อยละ 10.01 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบควบคุมในการสร้างสัญญาณเพื่อสื่อสารพิกัดกระแสไฟฟ้ากับตัวรถ

สำหรับภาพที่ 4-8 แสดงลักษณะของสัญญาณ CP เมื่อเข้าสู่สถานะ C หรือสถานะกำลังดำเนินการอัดประจุไฟฟ้า สัญญาณยังคงรักษาลักษณะความเป็นพัลส์เช่นเดียวกับในสถานะ B โดยความถี่และดิวตี้ไซเคิลมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย มีความแตกต่างกันอยู่ที่ร้อยละ 0.036 และ 0.072 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ระดับแรงดันสูงสุดของสัญญาณได้ถูกดึงลงมาอยู่ที่ +5.71 โวลต์ ซึ่งคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐาน (+6 โวลต์) อยู่ที่ร้อยละ 4.787 นอกจากนี้ ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาหน่วงของระบบการทำงาน (Time Delay) โดยระบบใช้เวลาหน่วงในการสั่งต่อคอนแทคเตอร์เพื่อจ่ายแรงดันสาย (Turn-on Delay) ที่ 1474.42 มิลลิวินาที และมีเวลาหน่วงในการสั่งหยุดจ่ายแรงดัน (Turn-off Delay) อยู่ที่ 35.04 มิลลิวินาที

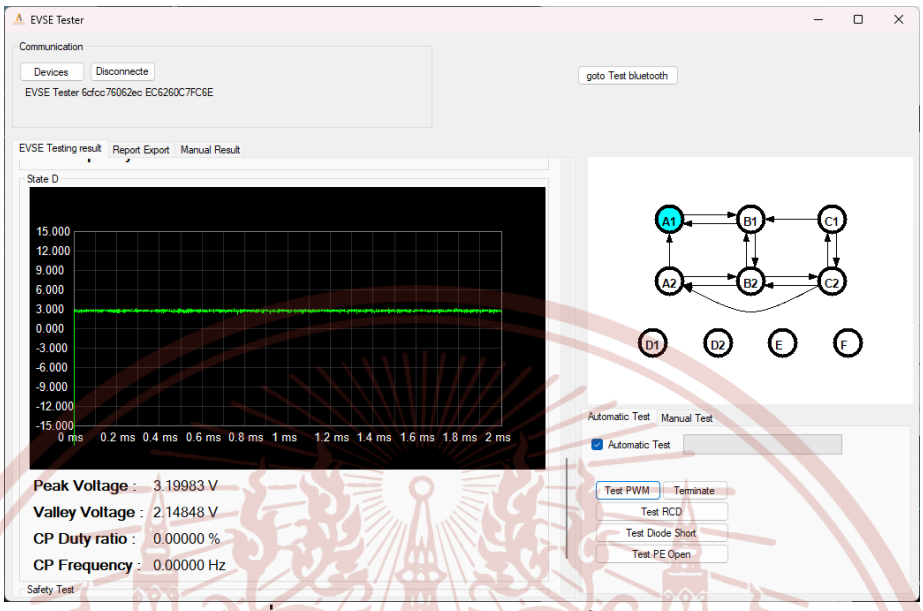


ภาพที่ 4-7 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ B



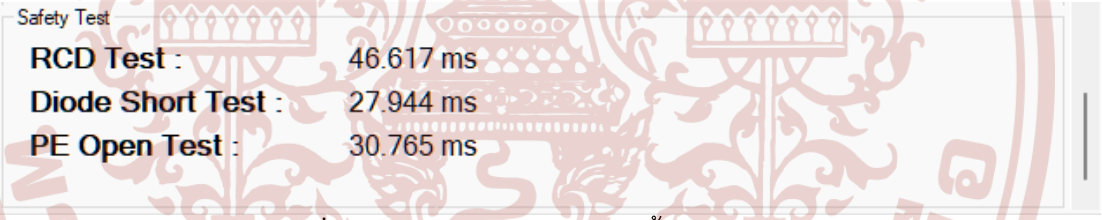
ภาพที่ 4-8 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ C

ท้ายที่สุด ภาพที่ 4-9 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ CP เมื่อจำลองการเข้าสู่สถานะ D ซึ่งเป็นสถานะที่ยานยนต์ไฟฟ้ามีความต้องการการระบายอากาศ (Ventilation Required) ในพื้นที่ทำการอัดประจุ ผลการตรวจวัดพบว่าระดับแรงดันสูงสุดของสัญญาณจะถูกลดระดับลงมาอยู่ที่ +3.2 โวลต์ เมื่อทำการประเมินความคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐาน (+3 โวลต์) พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 6.661 โดยภาพรวมแล้ว ระดับแรงดันและการตอบสนองเชิงเวลาที่วัดได้จากชุดทดสอบต้นแบบในทุกสถานะ สามารถใช้อ้างอิงและระบุสถานะการทำงานของ EVSE ได้อย่างครบถ้วนตามข้อกำหนดเบื้องต้น



ภาพที่ 4-9 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ D

4.2 ผลการทดสอบของวงจรทดสอบระบบป้องกันของ EVSE



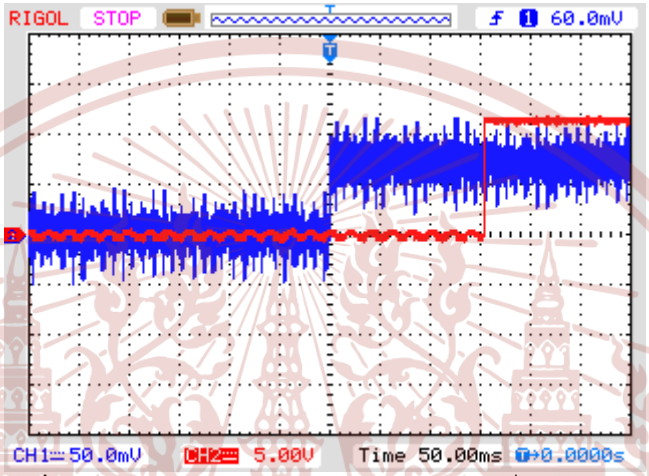
ภาพที่ 4-10 ผลการทดสอบระบบป้องกันของ EVSE

ภาพที่ 4-10 แสดงผลการทดสอบระบบป้องกันของ EVSE ที่ทำการพัฒนาขึ้นมาเพื่อการทดสอบเครื่องทดสอบการทำงานของ EVES โดยผลลัพธ์จากการทดสอบจะได้ว่าเวลาที่ใช้ในการตัดการจ่ายไฟของ EVSE ในกรณีที่ตรวจพบว่าไดโอดเกิดการลัดวงจร อยู่ที่ 27.944 มิลลิวินาที และเวลาที่ใช้ในการตัดการจ่ายไฟในกรณีที่ตรวจพบว่าสาย PE ขาดการเชื่อมต่ออยู่ที่ 30.765 มิลลิวินาที ซึ่งน้อยกว่า 100 มิลลิวินาทีตามมาตรฐาน IEC61851 และเวลาที่ใช้ในการตัดไฟในกรณีที่เกิดกระแสรั่วไหลชนิด AC อยู่ที่ 46.617 มิลลิวินาที ซึ่งน้อยกว่า 300 มิลลิวินาที ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ระบบป้องกันของ EVSE ที่ทำการทดสอบผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกรายการที่ทำการทดสอบ

4.3 ผลการทดสอบของวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิดไฟฟ้ากระแสตรง

จากผลการทดสอบดังภาพที่ 4-11 โดยกราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงกระแสที่เครื่องจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลที่วงจรจ่ายเพื่อทดสอบโดยวิธีการวัดกระแสจะใช้ค่าต้านทานชันต์ค่า 10 โอห์ม ซึ่งจากกราฟจะได้ว่าวงจรได้ทำการจ่ายกระแสในรูปแบบ DC ขนาด 6 มิลลิแอมแปร์ และในกราฟเส้นสีแดงคือสัญญาณลอจิกที่ได้

จากตัวตรวจจับกระแสรั่วไหลชนิด DC จะเป็นได้ว่าหลังจากที่วงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลชนิด DC จ่ายกระแสเป็นเวลาประมาณ 150 มิลลิวินาทีจากนั้นตัวตรวจจับกระแสรั่วไหลได้มีการตอบสนองเป็นลอจิก 12 โวลต์ ซึ่งสามารถชี้วัดได้ว่าวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหลสามารถใช้ในการทดสอบ RCD ชนิด B ได้



ภาพที่ 4-11 ผลการทดสอบวงจรจำลองกระแสรั่วไหลชนิด DC

4.4 ผลการทดสอบของวงจรวัดค่าความเป็นฉนวน

จากผลการทดสอบ วงจรวัดค่าต้านทาน ฉนวนดังตารางที่ 4-1 จะได้ว่า ความคลาดเคลื่อนของค่าต้านทานที่วัดได้จะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 5 ในช่วงที่ค่าต้านทานมีค่าต่ำกว่า 4.5 เมกะโอห์ม ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของค่าต้านทานที่วัดได้จะแปรผกผันกับความต่างของแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดัน กับแรงดันตกคร่อมค่าต้านทานฉนวน กล่าวคือยิ่งค่าต้านทานของแหล่งจ่ายมีค่ามากจะส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนของค่าต้านทานมีค่าน้อยลง ดังนั้นในการทดสอบค่าความเป็นฉนวนของสายอัดประจุ จะได้ว่า หากระดับแรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าน้อยกว่า 789.546 โวลต์ จะสามารถสรุปได้ว่าค่าต้านทานของฉนวนมีค่ามากกว่า 1 เมกะโอห์ม ซึ่งผ่านมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับฉนวนในคลาส I และหากแรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าน้อยกว่า 555.2856 โวลต์ จะสามารถ สรุปได้ว่าค่าต้านทานของฉนวนมีค่ามากกว่า 7 เมกะโอห์ม ซึ่งผ่านมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับฉนวนในคลาส II

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบวงจรวัดค่าต้านทานของฉนวน

ค่าต้านทานที่ทดสอบ	V_{HV}	V_r	ค่าต่านทานที่วัดได้	ค่าความคลาดเคลื่อน
900 kΩ	789.5468	502.0214	906345.8121	-0.705
2.7 MΩ	607.3437	502.0214	2659580.748	1.497
4.5 MΩ	570.4692	501.2885	4307927.776	4.2683
6.3 MΩ	555.2856	502.0214	5945662.987	5.6244
8.1 MΩ	545.8863	501.2885	7470796.535	7.7679
9.9 MΩ	541.5481	500.5556	8355506.835	15.6009
11.7 MΩ	537.2099	500.5556	9773890.988	16.4625
เปิดวงจร	516.2421	502.0214	81084229.18	-

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบการทำงานของ EVSE โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบ และ บำรุงรักษา ระบบหน้างาน เนื่องจาก กระบวนการ สื่อสารระหว่างEVSEและตัวรถเป็นขั้นตอนที่ซับซ้อนและต้องมีความปลอดภัยสูงสุด เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นจึงถูกออกแบบมาให้เป็นเสมือนอุปกรณ์ช่วยวิเคราะห์และจำลองสภาวะต่างๆ เพื่ออำนวยความสะดวกให้วิศวกรในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาที่ระบบหน้างาน

หัวใจสำคัญของการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้อยู่ที่สัญญาณ CP ซึ่งเป็นกลไกหลักในการกำหนดโหมดการอัดประจุและการตรวจสอบความปลอดภัย ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบวงจรวัดสัญญาณที่สามารถประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อตรวจวัดระดับแรงดันและความถี่ของสัญญาณ PWM การศึกษานี้ยังครอบคลุมไปถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของสัญญาณรบกวน (Noise) และความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Distortion) ที่อาจเกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมหน้างาน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มักนำไปสู่การตีความสถานะการอัดประจุที่ผิดพลาดและส่งผลให้ระบบหยุดการทำงานโดยหาสาเหตุได้ยาก

นอกจากการวิเคราะห์สัญญาณสื่อสารแล้ว งานวิจัยยังได้รวมระบบทดสอบความปลอดภัยทางไฟฟ้าเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีการออกแบบวงจรจำลองการเกิดกระแสรั่วไหล เพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันไฟรั่ว (RCD) ทั้งในรูปแบบกระแสไฟฟ้ารั่วไหลชนิดกระแสสลับ (AC) และกระแสตรง (DC) กระบวนการนี้มีความสำคัญในการยืนยันว่าระบบป้องกันภายในEVSEจะสามารถสั่งตัดวงจรได้อย่างทันท่วงทีเมื่อเกิดเหตุการณ์ไม่คาดฝัน ซึ่งเป็นการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัย

ในส่วนของการตรวจวัดความเป็นฉนวน งานวิจัย นี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการในการตรวจวัดความเป็นฉนวนของสายอัดประจุทั้งการทดสอบความเป็นฉนวนแบบออฟไลน์ ซึ่งสามารถ นำไปใช้งานการตรวจสอบความเป็นฉนวนของ EVSE โหมด 3 หรือการตรวจสภาพความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่นมอเตอร์ หรือหม้อแปลงไฟฟ้า หรือวิธีการในการตรวจวัดความเป็นฉนวนของสายอัดประจุแบบออนไลน์ ซึ่งจะพบได้มากในการตรวจสอบความปลอดภัยสำหรับระบบโซล่า หรือระบบของEVSEแบบ DC ผ่านวงจรวัดที่มีความแม่นยำ การตรวจสอบความเป็นฉนวนถือเป็นมาตรการป้องกันที่ช่วยคัดกรองความเสี่ยงจากไฟฟ้าลัดวงจรหรือไฟฟ้ารั่วไหลอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของวัสดุหุ้มสายไฟ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถประเมินค่าความต้านทานฉนวนและแจ้งเตือนเมื่อค่าดังกล่าวลดต่ำลงกว่าเกณฑ์ความปลอดภัย ช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายร้ายแรงต่อทั้งตัวรถและผู้ใช้งาน

จากการทดสอบเครื่องมือต้นแบบร่วมกับEVSEยานยนต์ไฟฟ้าในสภาวะการทำงานจริง ผลการวิจัยยืนยันว่าอุปกรณ์สามารถระบุข้อบกพร่องของการสื่อสารและประเมินประสิทธิภาพของระบบป้องกันได้อย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากสัญญาณ CP และระบบจำลองข้อบกพร่องต่างๆ มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง ทำให้การวินิจฉัยปัญหาที่เกิดขึ้นหน้างานทำได้โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องมือวัดราคาแพงจากต่างประเทศเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นการส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีภายในประเทศให้มีความยั่งยืน

ท้ายที่สุด งานวิจัยฉบับนี้ไม่เพียงแต่ตอบโจทย์การพัฒนาเครื่องมือทางวิศวกรรม แต่ยังเป็นการสร้างมาตรฐานใหม่ในการตรวจสอบระบบอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล เช่น IEC 61851 และ IEC 60364 องค์ความรู้ที่ได้จากการออกแบบวงจรวัดและการวิเคราะห์สัญญาณในครั้งนี้ สามารถนำไปต่อยอดสู่การผลิตเครื่องมือวิเคราะห์เชิงพาณิชย์ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการเติบโตของระบบนิเวศยานยนต์ไฟฟ้าและสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ใช้งานในระยะยาวได้อย่างแท้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนางานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือต้นแบบสำหรับการทดสอบการทำงานของ EVSE โดยระบบสามารถตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณ CP เพื่อระบุสถานะการทำงานตามมาตรฐาน IEC 61851 ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังได้เพิ่มส่วนของวงจรจำลองกระแสไฟฟ้ารั่วไหลและวงจรประเมินค่าความต้านทานฉนวนเข้าไว้ในระบบเดียวกัน ซึ่งผลการทดสอบเชิงประจักษ์ยืนยันว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถประเมินประสิทธิภาพของระบบสื่อสารและระบบป้องกันอันตรายทางไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม ในการนำเครื่องมือไปใช้งานจริงที่ภาคสนาม ระบบยังคงเผชิญกับข้อจำกัดบางประการทั้งในด้านรูปแบบการเชื่อมต่อเพื่อสั่งการ ขอบเขตของการวิเคราะห์สัญญาณที่มีความซับซ้อน และข้อจำกัดในการจำลองสภาวะความผิดพร่องทางไฟฟ้าแบบจำเพาะเจาะจง ดังนั้น เพื่อยกระดับเครื่องมือต้นแบบให้มีศักยภาพทัดเทียมกับเครื่องวิเคราะห์ระดับอุตสาหกรรม และสามารถตอบสนองต่อปัญหาในระบบโครงข่ายยานยนต์ไฟฟ้ายุคใหม่ ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัยในระยะต่อไปดังนี้

5.2.1 การเพิ่มส่วนควบคุมการทดสอบที่ตัวเครื่องเพื่อเป็นตัวเลือกนอกเหนือจากการเชื่อมต่อ Bluetooth

ปัจจุบันการสั่งการและการแสดงผลของเครื่องมือทดสอบพึ่งพาการเชื่อมต่อผ่านระบบบลูทูธ (Bluetooth) ไปยังคอมพิวเตอร์แบบพกพาเป็นหลัก ซึ่งในการปฏิบัติงานภาคสนาม ผู้ปฏิบัติงานจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพกพาคอมพิวเตอร์แลปท็อปสำหรับใช้ในการทดสอบด้วย ส่งผลให้การดำเนินการทดสอบ EVSE ในภาคสนามดำเนินการไปด้วยความยากลำบากต่อผู้ปฏิบัติงาน ข้อเสนอแนะในส่วนนี้คือการพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface) ให้ฝังอยู่บนตัวเครื่องโดยตรง เช่น การติดตั้งหน้าจอแสดงผลขนาด

กะทัดรัด พร้อมชุดปุ่มกดหรือปุ่มหมุน (Encoder) เพื่อให้เป็นตัวเลือกการควบคุมแทนการพึ่งพาการสั่งการผ่านระบบ Bluetooth เพียงอย่างเดียว

การพัฒนาให้ระบบสามารถทำงานได้ด้วยตนเอง (Standalone Operation) จะช่วยเพิ่มความคล่องตัวให้กับวิศวกรผู้ปฏิบัติงาน ทำให้สามารถดำเนินการตั้งค่ากระบวนการทดสอบ สั่งจำลองสภาวะข้อบกพร่อง และอ่านผลการวิเคราะห์ได้ทันทีที่หน้างาน การออกแบบในลักษณะนี้จะช่วยขจัดความล่าช้าจากปัญหาการจับคู่สัญญาณสื่อสาร ช่วยอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานซ่อมบำรุงที่ต้องการความรวดเร็ว

5.2.2 การปรับปรุงวงจรเครื่องมือวัดให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและมีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาด้านฮาร์ดแวร์ คือการปรับปรุงการออกแบบวงจรเครื่องมือวัดให้มีลักษณะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Design) โดยรักษาสมดุลระหว่างความแม่นยำ และต้นทุนการผลิต ควรมีการ เลือก ใช้อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ ที่ มี ความคลาดเคลื่อนต่ำ เฉพาะ ในจุดที่เหมาะสม ควบคู่ไปกับการนำเทคนิคการชดเชยค่าทางซอฟต์แวร์ (Digital Compensation) มาใช้เพื่อลดภาระและชดเชยความไม่เป็นอุดมคติของฮาร์ดแวร์ เพื่อช่วยให้เครื่องมือมีความแม่นยำสูงขึ้น ในขณะที่สามารถควบคุมต้นทุนให้เอื้อต่อการผลิตเชิงพาณิชย์และการเข้าถึงของผู้ประกอบการทั่วไป

5.2.3 การเพิ่มเครื่องมือประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเพื่อการวิเคราะห์ปัญหาภาคสนาม

เพื่อยกระดับขีดความสามารถของเครื่องมือจากการตรวจสอบสถานะพื้นฐานไปสู่เครื่องวิเคราะห์ปัญหาเชิงลึก ควรมีการเพิ่มเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing: DSP) เข้าไว้ในระบบปฏิบัติการ เนื่องจากในสภาวะการใช้งานจริง สัญญาณ CP มักถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้า การวัดเพียงระดับแรงดันหรือความถี่ในโดเมนเวลา (Time Domain) แบบดั้งเดิม อาจไม่เพียงพอต่อการหาสาเหตุที่แท้จริงของความล้มเหลวในการสื่อสารระหว่างรถและEVSE
โดยมีแนวทางการพัฒนาเครื่องมือย่อยดังนี้:

5.2.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่ด้วย FFT และ Wavelet Transform

ควรเพิ่มฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว (FFT) และ Wavelet Transform เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) เครื่องมือนี้จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถแยกแยะองค์ประกอบความถี่หลักของสัญญาณ CP ออกจากความถี่แฝงอื่นๆ ทำให้สามารถมองเห็นพฤติกรรมของฮาร์มอนิกและทรานเซียนต์ (Transient) ที่รบกวนการสื่อสารได้

5.2.3.2 การออกแบบตัวกรองสัญญาณดิจิทัล (Custom Pole/Zero Digital Filter)

ควรพัฒนาฟังก์ชันจำลองตัวกรองสัญญาณดิจิทัลที่ผู้ใช้งานสามารถกำหนดตำแหน่ง Pole และ Zero ได้อย่างอิสระ ฟังก์ชันนี้ออกแบบมาเพื่อทดสอบการจำลองระบบกรองสัญญาณของ CP ที่เก็บค่ามาจากหน้างาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับนักพัฒนาในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบกรองสัญญาณ (Filter Design) สำหรับสร้าง EVSE รุ่นใหม่ให้มีความเสถียร

5.2.3.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio Analyzer)

ควรเพิ่มเครื่องมือคำนวณและประเมินค่าอัตราส่วน SNR เพื่อใช้ในการแยกแยะองค์ประกอบของกำลังสัญญาณสื่อสารหลักเปรียบเทียบกับระดับพลังงานของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ข้อมูลเชิงตัวเลขนี้จะเป็นดัชนีชี้วัดในการประเมินคุณภาพของสัญญาณ CP ณ จุดติดตั้ง

5.2.3.4 การจำแนกประเภทสัญญาณรบกวน (Noise Classification) ด้วย Machine Learning

ควรพัฒนาระบบประเมินและระบุแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเบื้องต้น โดยนำเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดกลุ่ม (Classification) คลาสของสัญญาณรบกวน ระบบจะทำการเรียนรู้รูปแบบความผิดเพี้ยนและแบ่งคลาสออกเป็น Switching Noise, Thermal Noise, RF Noise, Harmonic Interference และสัญญาณสื่อสารจาก Power-Line-Carrier (PLC)

การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางปัญญาประดิษฐ์นี้จะเปลี่ยนการวิเคราะห์ที่ต้องอาศัยประสบการณ์เฉพาะบุคคล ให้กลายเป็นกระบวนการอัตโนมัติ ระบบสามารถประมวลผลรูปคลื่นและทำการวินิจฉัยเบื้องต้นได้ทันทีว่าความผิดปกตินั้นอาจเกิดจากแหล่งกำเนิดใด ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการวินิจฉัยและวางแผนซ่อมบำรุงสถานีอัดประจุไฟฟ้า

5.2.4 การเพิ่มวงจรทดสอบกระแสรั่วไหลที่สามารถควบคุมรูปคลื่นของกระแสได้

สำหรับการประเมินระบบป้องกัน ควร พัฒนา วงจร ทดสอบ กระแสรั่วไหล จาก ระบบ ที่ จำกัดเฉพาะรูปคลื่นคงที่ ให้เป็นระบบที่สามารถสร้างและควบคุมรูปคลื่นของการจ่ายกระแสได้อย่างอิสระ (Controllable Waveform Current Source) การพัฒนาในส่วนนี้จะทำให้เครื่องมือสามารถจำลองรูปแบบกระแสรั่วไหลที่มีความซับซ้อน เพื่อทดสอบอุปกรณ์ RCD ได้ครอบคลุมทุกประเภทตามมาตรฐานความปลอดภัย ได้แก่ Type AC, Type A, Type F รวมถึง Type B ที่ใช้ในระบบการติดตั้ง EVSE

ความสามารถ ใน การ ปรับแต่งรูปคลื่น และ ปริมาณกระแสไฟฟ้ารั่วไหลจำลอง จะ ช่วยให้ เครื่องมือสามารถวิเคราะห์หา "จุดวิกฤต" หรือพิกัดกระแสที่ทำให้ RCD เริ่มทำงาน (Tripping Current) ตลอดจนวัดเวลาในการตัดวงจร (Tripping Time) ภายใต้สภาวะความผิดพร่องรูปแบบต่างๆ ได้อย่างละเอียด การยกระดับฟังก์ชันนี้จะช่วยให้เครื่องมือสามารถทดสอบและรับรองความปลอดภัยของกลไกการตัดวงจรได้อย่างสมบูรณ์แบบ

5.2.5 การเพิ่มวงจรทดสอบค่าความจุของฉนวน (Insulation Capacitance)

นอกเหนือจากการวัดค่าความต้านทานแล้ว ควรมีการเพิ่มวงจรสำหรับการประเมินค่าความจุไฟฟ้าของฉนวน (Capacitance) เข้าไปในระบบ เนื่องจากในการใช้งานEVSEโหมด 3 ซึ่งเป็นวิธีการอัดประจุด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลไหลผ่านค่าความจุแฝง

(Stray Capacitance) ของเนื้อฉนวนและโครงสร้างสายอัดประจุได้ การทราบค่าความจุนี้จึงมีความสำคัญไม่แพ้ค่าความต้านทานในการประเมินความปลอดภัยของระบบ AC โดยรวม

นอกจากความสำคัญด้านการเกิดกระแสรั่วไหลเหนี่ยวนำแล้ว ค่าความจุของฉนวนยังทำหน้าที่เป็นดัชนีชี้วัด ที่สำคัญในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของวัสดุ (Insulation Aging) เนื่องจาก รอยแผลที่ภายในของฉนวนตัวนำ ความชื้นภายในวัสดุฉนวน หรือ ความร้อนสะสม จะส่งผลให้โครงสร้างและค่าไดอิเล็กทริกของสายอัดประจุเปลี่ยนแปลงไป การติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุฉนวนจึงเป็นมาตรการเชิงป้องกันที่สามารถแจ้งเตือนความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ก่อนที่จะเกิดความเสียหายได้

5.2.6 การเพิ่มส่วนของการบันทึกข้อมูลรูปคลื่นสัญญาณและโหลดสัญญาณ (Data Logging & Loading)

เพื่อตอบโจทย์การแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน ควรเพิ่ม ฟังก์ชัน การบันทึกข้อมูล รูปคลื่น สัญญาณดิบ (Raw Waveform Data Logging) ลงในหน่วยความจำภายในหรือ SD Card โดยตรง ปัญหาการอัดประจุล้มเหลวหลายกรณีมักเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว (Intermittent Faults) การที่เครื่องมือสามารถดักจับและบันทึกรูปคลื่นสัญญาณ CP สัญญาณรบกวน หรือพฤติกรรมของกระแสรั่วไหล ณ วินาทีที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติได้ จะช่วยรักษาสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้า ณ หน้างานไว้เป็นหลักฐานดิจิทัล

นอกจากนี้ การพัฒนาระบบให้สามารถโหลดรูปคลื่นสัญญาณที่บันทึกไว้ (Signal Loading) กลับขึ้นมาเพื่อการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (Lab Analysis) วิศวกรสามารถนำสัญญาณที่เก็บจากภาคสนามมานำเข้าสู่โปรแกรมจำลองเพื่อทำการวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้า (Root Cause Analysis) ได้อย่างละเอียดโดยไม่จำเป็นต้องอยู่ที่หน้างาน ฟังก์ชันนี้ยังเอื้อต่อการส่งต่อข้อมูลทางวิศวกรรมไปยังผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้า หรือผู้ผลิต EVSE เพื่อร่วมกันแก้ปัญหาความเข้ากันได้ของระบบได้อย่างตรงจุดและเป็นรูปธรรมมากขึ้น

บรรณานุกรม

Brown, K. J. (2013). Electric vehicle supply equipment; a safety device. *2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/ITEC.2013.6573505

International Standard IEC 62196. (2017). *Electric vehicle conductive charging system: Part 1. General requirements* (3rd ed). International Standard IEC 62196.

Jeschke, S., Maarleveld, M., Baerenfaenger, J., Schmuelling, B., & Burkert, A. (2018). Challenges in EMC Testing ofยานยนต์ไฟฟ้าand EVSE Equipment for Inductive Charging. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, 967–971. https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8484999

Lewandowski, C., Gröning, S., Schmutzler, J., & Wietfeld, C. (2012). Interference analyses of Electric Vehicle charging using PLC on the Control Pilot. *2012 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 350–355. https://doi.org/10.1109/ISPLC.2012.6201296

Soponoudomsit, P., Charbkaew, N., Bunyagul, T., & Chompusri, Y. (2022). Safety Function Designs in Mode 3 EVSE. *2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/ECTI-CON54298.2022.9795477

Tariq, H., Czapp, S., & Levashenko, V. (2023). RCDs Tripping in the Range from DC to AC 50 kHz for Slowly Rising Residual Current. *2023 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, 207–212. https://doi.org/10.1109/IDT59031.2023.10194402

TIDA-00440 reference design | TI.com. (n.d.). Retrieved May 11, 2026, from https://www.ti.com/tool/TIDA-00440

บรรณานุกรม (ต่อ)

TIDA-010232 reference design | TI.com. (n.d.). Retrieved May 11, 2026, from https://www.ti.com/tool/TIDA-010232



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสุปวีร์ บัวผัน
ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบเครื่องตรวจวัดข้อบกพร่องของสัญญาณคอนโทรลไพล็อตสำหรับการพัฒนาเครื่องอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ประวัติ	เกิดเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2562 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2566