

ผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็ว

ศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพัฒน์ พันธุ์ วัฒนพล เรืองทรัพย์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 15 ธันวาคม 2565 แก้ไขบทความ 9 เมษายน 2566 ตอรับบทความ 10 พฤษภาคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็ว ในงานนี้ข้อมูลที่น่าสนใจได้มาจากการตรวจวัดค่าที่ส่งผลโดยตรงต่อระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ด้านอินพุตของสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ค่าที่ทำการตรวจวัดได้แก่ ค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย ค่ากระแสรากกำลังสองเฉลี่ย ค่าความถี่แรงดันฮาร์มอนิกรวม และค่าความถี่กระแสฮาร์มอนิกรวม ในการเก็บข้อมูลจะทำการตั้งแตงยังไม่อัดประจุ ขณะเริ่มอัดประจุไปจนกระทั่งแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ามีประจุเต็ม โดยยานยนต์ที่ใช้ทดสอบเป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นรถมินิบัสขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนขนาด 120 กิโลวัตต์-ชั่วโมง สถานีอัดประจุที่ทดสอบเป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตประเทศไทยเช่นกัน โดยมีแรงดันด้านอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 400 โวลต์ แรงดันด้านเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 250 ถึง 750 โวลต์ และหัวปลั๊กที่ใช้อัดประจุเป็นแบบ CCS-Type 2 เมื่อได้ข้อมูลแล้วจึงนำข้อมูลเหล่านั้นมาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า จากการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้ทราบว่าขณะใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็วจะเกิดผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามด้านหลัก ๆ นั่นคือ ผลกระทบด้านแรงดัน ผลกระทบด้านการเกิดฮาร์มอนิก และผลกระทบด้านความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า

คำสำคัญ: คุณภาพกำลังไฟฟ้า; สถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า; ความถี่ของฮาร์มอนิก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 1353 6426, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: nattachote.r@rmutp.ac.th

Impact on Power Quality When Using Fast Charge Type of Battery Charging Station for Electric Vehicles

Sakhon Woothipatanapan Natchapol Ruangsap and
Nattachote Rugthaicharoencheep*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok, 10800

Received 15 December 2022; Revised 9 April 2023; Accepted 10 May 2023

Abstract

This article presents the impact on power system when operating fast charge type of battery charging stations for electric vehicles. In this work, the data analyzed were obtained from measurements that directly affect the three-phase power system at the input side of the electric vehicle battery charging station. The measured values were root mean square voltage (V_{rms}), root mean square current (I_{rms}), the total harmonic distortion of voltage ($\% THD_V$), and the total harmonic distortion of current ($\% THD_I$). To store data will be done since it has not been charged, while starting to charge until the electric vehicle battery is fully charged. The vehicles used for testing belong to the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), which is an electric powered minibus that uses a 120 kW-h lithium-ion battery. The charging station used for testing also belongs to the Electricity Generating Authority of Thailand, the input voltage is AC 400 V, the output voltage is DC 250 to 750 V, and the plug used for charging is a CCS-Type type 2. Once the data is complete, those data are then used to create a graph to analyze the impact on power system. The results of the data analysis revealed that while operating fast charge type of battery charging station for electric vehicles, there are three main effects on power quality of the power system: voltage effect, harmonic effect and the impact on unbalance of power system.

Keywords : Power System; Electric Vehicle Charging Station; Harmonic Distortion

* *Corresponding Author. Tel.: +666 1353 6426, E-mail Address: nattachote.r@rmutp.ac.th*

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ถูกนำขึ้นมาเป็นประเด็นสำคัญต่อการดำเนินกิจกรรมทางเศรษฐกิจในเวทีโลก และหลายประเทศให้การตอบรับที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยต่างเห็นพ้องว่าภาคขนส่งเป็นหนึ่งในตัวการของปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะมลภาวะที่ปลดปล่อยจากรถยนต์ที่วิ่งบนท้องถนน จึงนำมาสู่การส่งเสริมการใช้อยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ทดแทนยานยนต์พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล [1] โดยขณะนี้ทั่วโลกเริ่มมีแนวโน้มใช้อยานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้นทุกปี ในอนาคตคาดว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะเข้ามาแทนการใช้อยานยนต์พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลในอัตราส่วนที่มากขึ้น

การใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าที่คาดว่าจะมีแนวโน้มสูงมากขึ้นในอนาคตนั้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้าต้องการการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ด้วยกำลังไฟฟ้าที่สูง [2] ส่วนสำคัญซึ่งทำหน้าที่ดังกล่าวคือ สถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (EV Charging Station) โดยภายในก็คือเครื่องอัดประจุไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าด้านอินพุตให้เป็นพลังงานไฟฟ้าด้านเอาต์พุตที่เหมาะสมเพื่ออัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ จากนั้นแบตเตอรี่จะทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์และวงจรไฟฟ้าอื่น ๆ ภายในยานยนต์ไฟฟ้าต่อไป ซึ่งเครื่องอัดประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) ที่มีคุณสมบัติทางพลวัตต่างจากโหลดทั่วไป ดังนั้นการอัดประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าปริมาณมากโดยที่ไม่มีการควบคุมการอัดประจุไฟฟ้าจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ ผลกระทบหลักที่ผู้ดูแลระบบหรือการไฟฟ้าต้องประสบได้แก่ การเกิดภาระเกิน (Overload) การเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss), การเกิดแรงดันตก (Voltage Drop) การเกิดภาระไม่สมดุล (Unbalance Load) และการเกิดฮาร์มอนิก (Harmonic) [3] รวมทั้งอาจมี

ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าในบริเวณใกล้เคียงเกิดขัดข้อง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์งานจนเกิดความเสียหายได้

ปัญหาดังกล่าวข้างต้นนั้นเกิดในช่วงที่สถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าทำการอัดประจุนั่นเอง การอัดประจุจะแบ่งออกเป็นสองชนิดหลัก ๆ คือ การอัดประจุนิตปกติ และการอัดประจุนิตเร็ว แต่การอัดประจุนิตเร็วมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูง [4] จึงส่งผลกระทบมากกว่าการอัดประจุนิตปกติ

ในปี ค.ศ. 2016 [5] มีการประเมินการวัดคุณภาพกำลังไฟฟ้าของสถานีชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าในไต้หวัน โดยใช้ระบบตรวจสอบระยะไกล สถานีชาร์จที่ศึกษามีเสาชาร์จ 11 เสา รวมถึงเสาชาร์จแบบเร็ว 2 เสา และเสาชาร์จแบบช้า 9 เสา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าด้วยวิธีการที่เสนอนี้ สามารถตรวจสอบและประเมินคุณภาพกำลังไฟฟ้าของสถานีชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปี ค.ศ. 2017 [6] มีการวิเคราะห์หลักการทำงาน โครงสร้างทางไฟฟ้าของเครื่องชาร์จประจุแบบเร็ว และวัดค่าฮาร์มอนิกของเครื่องชาร์จประจุแบบเร็วแบบต่าง ๆ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสฮาร์มอนิกกับรถยนต์ไฟฟ้า และเครื่องชาร์จประจุแบบเร็ว กำหนดขอบเขตของประสิทธิภาพ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง จากนั้นประเมินอิทธิพลของสถานีชาร์จประจุแบบเร็วของกริด ในปี ค.ศ. 2018 [7] มีการศึกษาโหลดโปรไฟล์ และผลกระทบฮาร์มอนิกของสถานีชาร์จต่อแรงดันไฟฟ้าปานกลางในระบบจำหน่าย วัดอุปสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าและความแปรผันของโปรไฟล์ฮาร์มอนิกของสถานีชาร์จ โดยใช้การจำลองเครือข่ายเชิงใหม่ (ประเทศไทย) 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ใช้ DigSILENT Power Factory เป็นเครื่องมือจำลอง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิกสูงสุดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 9 ถึง 10 นาฬิกา

ในปี ค.ศ. 2021 [8] มีการศึกษาผลการตรวจวัดของเครื่องชาร์จที่แตกต่างกัน 20 แบบ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องชาร์จแบบเร็ว ซึ่งได้รับในประเทศจีนและในเยอรมนี มุ่งเน้นไปที่ทั้งการปล่อยฮาร์มอนิก รวมถึงการประเมินเทียบกับขีดจำกัดที่เกี่ยวข้อง และการปล่อยซูเปอร์ฮาร์มอนิกในช่วงความถี่ระหว่าง 10 kHz ถึง 50 kHz เครื่องชาร์จของทั้งสองประเทศจึงถูกนำมาเปรียบเทียบกัน ในปี ค.ศ. 2022 [9] มีการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าสำหรับการประกอบธุรกิจในภาคเอกชน ทดสอบวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของตัวอย่างระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วหลายมาตรฐาน รวมถึงค่าปริมาณทางไฟฟ้าอื่น ๆ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าก่อนเข้าเครื่องอัดประจุแบบ 3 เฟส ค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้าแบบ 3 เฟส ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้า ค่า %SOC ของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (THDV) ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (THDi) ค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า ค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ เป็นไปตามมาตรฐานของการไฟฟ้า โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างเฟสของระบบเท่ากับ 395.25 โวลต์ หรือค่าเฉลี่ยต่อเฟสเท่ากับ 228.2 โวลต์ ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.16% ค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.51% ค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 50.03 เฮิรตซ์ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของเครื่องอัดประจุเท่ากับ 0.99

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดประจุเร็ว โดยเก็บข้อมูลด้านอินพุตของสถานีประจุแบตเตอรี่ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ข้อมูลที่ทำการตรวจวัด คือ ค่าแรงดันรากกำลัง

สองเฉลี่ย ค่ากระแสรากกำลังสองเฉลี่ย ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม ซึ่งจะตรวจวัดตั้งแต่ยังไม่อัดประจุ ขณะเริ่มอัดประจุ ไปจนกระทั่งแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้ามีประจุเต็ม เมื่อได้ข้อมูลครบแล้วจึงนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าในบริเวณที่ทดสอบต่อไป

ก่อนจะทำการตรวจวัดค่าต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็ว จำเป็นต้องทราบข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยมีสามหัวข้อที่สำคัญ คือ ยานยนต์ไฟฟ้า สถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า และคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำเสนอในช่วงต้นของหัวข้อที่ 2 ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นแรกนำเสนอข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งมีสามหัวข้อหลัก คือ ยานยนต์ไฟฟ้า สถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า และคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า จากนั้นนำเสนอวิธีการวิจัยโดยแสดงวิธีการตรวจวัดเพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า พร้อมทั้งแสดงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด รายละเอียดของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ และรายละเอียดของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

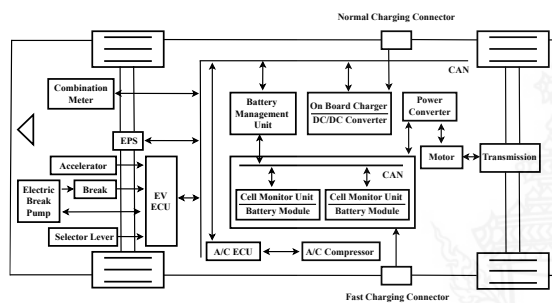
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้า หมายถึง ยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว หรือยานยนต์ที่อาศัยเครื่องยนต์มาใช้ร่วมกับมอเตอร์ทั้งในส่วนของการทำงานของขับเคลื่อนและผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อเก็บสะสมใน

แบตเตอรี่ หรือการอัดประจุไฟฟ้าจากภายนอก หรือการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง [10]

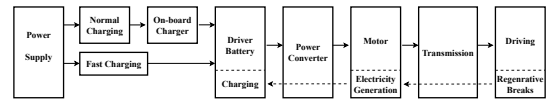
ยานยนต์ไฟฟ้ามีการใช้แบตเตอรี่เพื่อเก็บ และส่งพลังงานไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์โดยผ่านวงจรตัวแปลงกำลังไฟฟ้า (Power Converter) ซึ่งส่งพลังงานไฟฟ้าอย่างเหมาะสมให้กับมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนล้อของยานยนต์ไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ [11] โดยองค์ประกอบเบื้องต้นของยานยนต์ไฟฟ้าได้แสดงไว้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบเบื้องต้นของยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้าส่วนมากในปัจจุบัน เช่น ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบดังรูปที่ 1 สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้สองรูปแบบ รูปแบบแรก คือ การอัดประจุชนิดปกติผ่านหัวแบบอัดประจุปกติ (Normal Charging Connector) ซึ่งจะรับไฟฟ้ากระแสสลับเข้ามาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงและปรับให้มีค่าไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมด้วยวงจรอัดประจุภายในยานยนต์ไฟฟ้า (On-board Charger and DC/DC Converter) เพื่อทำการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ รูปแบบที่สอง คือ การอัดประจุชนิดเร็วผ่านหัวต่อแบบอัดประจุเร็ว ซึ่งสามารถอัดประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ได้โดยตรงจากรูปแบบการอัดประจุทั้งสองรูปแบบดังกล่าวจะสอดคล้องกับไดอะแกรมในรูปที่ 2 ที่แสดงถึงกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่เพื่อนำพลังงานไปขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้ารวมทั้งการคืนพลังงานกลับสู่แบตเตอรี่ หรืออาจเรียกโดยย่อว่า

กระบวนการอัดประจุไปสู่การขับเคลื่อน (Charging to Driving Process)



รูปที่ 2 กระบวนการอัดประจุไปสู่การขับเคลื่อน

2.1.2 สถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า

ปัจจุบันรูปแบบการใช้งานสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็นสามรูปแบบ คือ การอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบใช้สาย สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่และการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบใช้สายเป็นรูปแบบการอัดประจุหลักที่ทั่วโลกเลือกใช้เพราะมีความคุ้มค่าในการลงทุน มีประสิทธิภาพสูง และสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีการจัดการพลังงานได้ โดยสามารถจำแนกการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบใช้สายตามระดับกำลังไฟฟ้าที่ใช้เป็นสองชนิด คือ การอัดประจุชนิดปกติ และการอัดประจุชนิดเร็ว

2.1.2.1 การอัดประจุชนิดปกติ

การอัดประจุชนิดปกติ (Normal Charging) เป็นอัดประจุด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Charging) โดยทั่วไปมักจะใช้ประเภทกล่องติดตั้งที่ติดตั้งตามบ้านหรือห้างสรรพสินค้า เพราะการอัดประจุด้วยตู้อัดประจุแบบกล่องติดตั้งสามารถอัดประจุได้รวดเร็วกว่าการต่อจากเต้ารับภายในบ้านโดยตรง ซึ่งอาจใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 4 ถึง 7 ชั่วโมง หรืออาจถึง 9 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุและความจุพลังงานของแบตเตอรี่ โดยเวลาในการอัดประจุสามารถหาได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

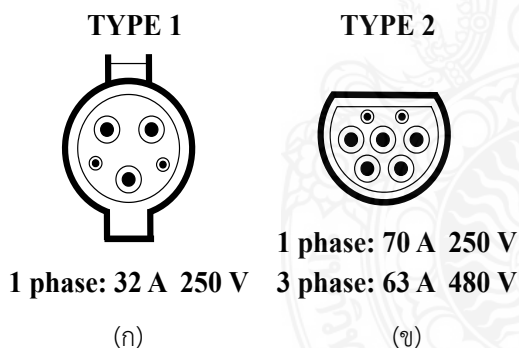
$$t_{charge} = \frac{C_{batt}}{P_{batt}} \quad (1)$$

โดยที่	t_{charge}	คือ เวลาในการอัดประจุ (ชั่วโมง: h)
	C_{batt}	คือ ความจุพลังงานขอ แบตเตอรี่ (กิโลวัตต์- ชั่วโมง: kW-h)
	P_{batt}	คือ กำลังไฟฟ้าของเครื่องอัด ประจุ (กิโลวัตต์: kW)

หัวอัดประจุชนิดปกติแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ Type 1 และ Type 2

- Type 1 ได้แสดงในรูปที่ 3 (ก) เป็นหัวอัดประจุที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในสหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น
- Type 2 ได้แสดงในรูปที่ 3 (ข) เป็นหัวอัดประจุที่นิยมใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศแถบยุโรป

สำหรับการติดตั้งตู้อัดประจุแบบติดตั้งเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าของบ้านที่ติดตั้งต้องสามารถรองรับกระแสไฟฟ้าขั้นต่ำที่ 30 (100) A



รูปที่ 3 หัวอัดประจุชนิดปกติ [12]

2.1.2.2 การอัดประจุชนิดเร็ว

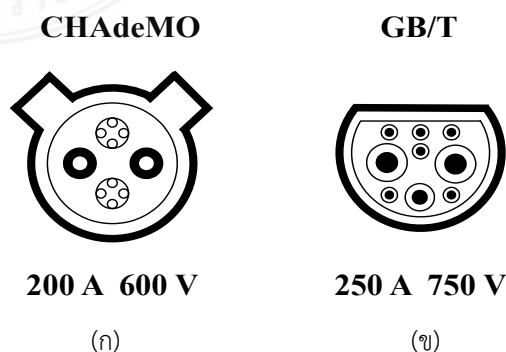
การอัดประจุชนิดเร็ว (Fast Charging) เป็นการอัดประจุอย่างรวดเร็วด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC Charging) สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าจาก 0 ถึง 80% ได้ในเวลาประมาณ 40 ถึง 60 นาที (ขึ้นอยู่กับความจุพลังงานแบตเตอรี่) สถานีอัดประจุชนิดนี้มักจะติดตั้งในสถานที่จำเพาะ เช่น สถานี

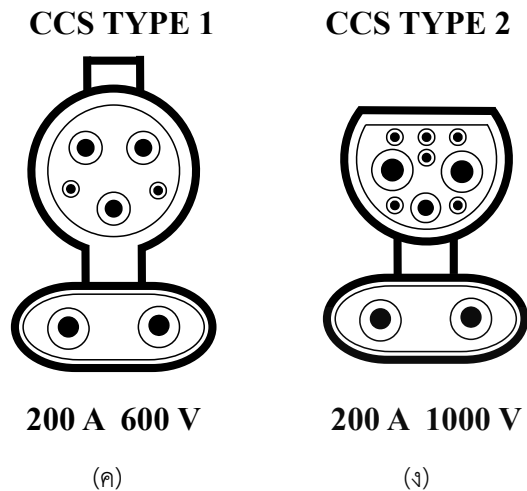
บริการน้ำมัน สาขาของการไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สถานีบริการรถยนต์ และที่จอดรถในห้างสรรพสินค้าหรือโรงแรมบางแห่ง การอัดประจุชนิดนี้เหมาะกับผู้ที่ต้องการความรวดเร็วในการอัดประจุ โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน หัวอัดประจุชนิดเร็วแบ่งออกเป็นสามประเภท คือ CHAdeMO, GB/T และ CCS

- CHAdeMO ย่อมาจาก "CHArge de MOve" อยู่ในมาตรฐาน IEC 62196-2 (Type 3) การอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรง มีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 62.5 กิโลวัตต์ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 500 โวลต์ และพิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุด 125 A [9] มีการใช้แพร่หลายในประเทศญี่ปุ่น หัวอัดประจุแบบนี้แสดงในรูปที่ 4 (ก)

- GB/T ได้แสดงในรูปที่ 4 (ข) โดยหัวอัดประจุแบบนี้ประเทศจีนเป็นผู้พัฒนาขึ้นเพื่อตอบรับการใช้นยานยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในประเทศจีน

- CCS ย่อมาจาก Combined Charging System ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท คือ CCS TYPE 1 ดังแสดงในรูปที่ 4 (ค) ซึ่งเป็นหัวอัดประจุที่ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ลักษณะของหัวอัดประจุมีขนาดเล็ก รองรับแรงดันไฟฟ้าที่ 200 ถึง 500 V ส่วนหัวอัดประจุ CCS TYPE 2 ได้แสดงในรูปที่ 4 (ง) เป็นหัวอัดประจุที่นิยมใช้ในประเทศแถบทวีปยุโรป หัวอัดประจุประเภทนี้จะมีขนาดใหญ่กว่าและมีกำลังไฟฟ้ามักกว่า CCS Type 1





รูปที่ 4 หัวอัดประจุชนิดเร็ว [12]

2.1.3 คุณภาพกำลังไฟฟ้า

คุณภาพกำลังไฟฟ้า คือ ความเสถียรของระบบไฟฟ้าที่ได้รับจากผู้ให้บริการ [13] โดยนิยามคุณภาพไฟฟ้าจากผู้ให้บริการและผู้ใช้อาจจะแตกต่างกัน แต่ถ้าอ้างอิงตามคำจำกัดความของคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE ก็คือ ลักษณะของแรงดันและกระแสที่ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดปกติหรือเสียหาย [14]

โดยแรงดันและกระแสที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ ดังนี้

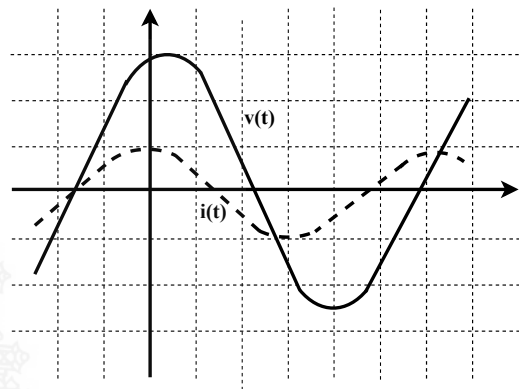
$$V_S(t) = \hat{V} \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

$$i_S(t) = \hat{I} \sin(\omega t + \beta_1) \quad (3)$$

โดยที่	$V_S(t)$	คือ แรงดันชั่วขณะ (โวลต์: V)
	$i_S(t)$	คือ กระแสชั่วขณะ (แอมแปร์: A)
	$\hat{V}$	คือ แรงดันค่ายอด (โวลต์: V)
	$\hat{I}$	คือ กระแสค่ายอด (แอมแปร์: A)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที: rad/sec)
	θ	คือ มุมแรงดัน (เรเดียน: rad)

β_1 คือ มุมกระแสที่ความถี่หลักมูล (เรเดียน: rad)

จากสมการที่ (2) และ (3) เมื่อพิจารณาในช่วง 1 คาบเวลา สามารถนำมาพล็อตเป็นรูปคลื่นทั่วไปของแรงดันและกระแสในหนึ่งเฟสได้ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปคลื่นทั่วไปของแรงดันและกระแสในหนึ่งเฟส

2.1.3.1 เหตุการณ์เกี่ยวข้องกับคุณภาพกำลังไฟฟ้า

1. สภาวะชั่วคราว (Transient) คือ ปรากฏการณ์ที่สัญญาณไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน แบ่งเป็นสองประเภท คือ

1.1 อิมพัลส์ชั่วคราว (Impulsive Transient) คือ แรงดันหรือกระแสที่มีค่าความชันสูงมากซึ่งเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดโดยความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง มีหัวหรือทิศทางเดียว บางครั้งเรียกว่าเสิร์จ (Surge) สาเหตุมักเกิดจากฟ้าผ่าซึ่งอาจเกิดขึ้นที่บริเวณนั้นหรือบริเวณใกล้เคียง โดยมีผลทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายจากแรงดันเกิน

1.2 ออสซิลเลทชั่วคราว (Oscillatory Transient) คือ แรงดันหรือกระแสที่มีค่าสูงซึ่งเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด โดยความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือรูปคลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วระหว่างชั่ววอก และชั่วลบ สาเหตุเกิดจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ผลที่เกิดขึ้นอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายหรือฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าสูญเสียความเป็นฉนวนเร็วขึ้น

2. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variation) คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย (Vrms) ที่มีระยะเวลาไม่เกิน 1 นาติ สาเหตุเนื่องจากสภาวะความผิดปกติของทางไฟฟ้า (Fault) ซึ่งสามารถทำให้เกิดสองเหตุการณ์ คือ

2.1 แรงดันตกช่วงสั้น (Voltage Sag) คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีขนาดลดลง 0.1 ถึง 0.9 เพอร์ยูนิต (p.u.) ในช่วงเวลา 10 มิลลิวินาที (ms) ถึง 1 นาติ มักเกิดขึ้นกับเฟสที่เกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้า ซึ่งทำให้แรงดันลดลงเหลือ 0.2 เพอร์ยูนิตของแรงดันปกติ (80% sag) ภายใน 3 คาบการทำงาน มีสาเหตุจากการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมอเตอร์เหล่านี้ขณะสตาร์ทจะใช้กระแสสูง 6 ถึง 10 เท่า ของกระแสปกติ ผลที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ในระบบที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงเกิดการ ทำงานผิดปกติหรือหยุดทำงานได้

2.2 แรงดันเกินช่วงสั้น (Voltage Swell) คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีขนาดเพิ่มขึ้น 1.1 ถึง 1.8 เพอร์ยูนิต ในช่วงเวลา 10 มิลลิวินาที ถึง 1 นาติ มักเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่เกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้า สาเหตุเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบหรือเมื่อเชื่อมต่อตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบ ผลที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ในระบบที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงเกิดการ ทำงานผิดปกติหรือหยุดทำงานได้

3. การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว (Long Duration Voltage Variation) คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีระยะเวลาเกิน 1 นาติ สาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถทำให้เกิดสามเหตุการณ์ คือ

3.1 แรงดันตก (Under Voltage) คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีค่าลดลงระหว่าง 0.8 ถึง 0.9 เพอร์ยูนิต ในช่วงเวลามากกว่า 1 นาติ เกิดจากการต่อโหลดขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบหรือปลดตัวเก็บประจุออกจากระบบ ผลที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายเนื่องจากเกิดการรับภาระเกิน

3.2 แรงดันเกิน (Over Voltage) คือ ค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่มีขนาดเพิ่มขึ้น 1.1 ถึง 1.2 เพอร์ยูนิต ในช่วงเวลามากกว่า 1 นาติ เกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบหรือมีการต่อตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบหรือการปรับแก้หม้อแปลงไม่เหมาะสมกับระบบ ผลที่เกิดขึ้นทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน

3.3 ไฟดับ (Voltage Interruption) คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยมีค่าเป็น 0 เพอร์ยูนิต ในช่วงเวลาเกิน 1 นาติ มีสาเหตุจากความผิดปกติของทางไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันเกิดการตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าออกจากระบบอย่างถาวร ถ้าความผิดปกติของทางไฟฟ้าในระบบยังคงอยู่ จะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ายังไม่สามารถทำงานได้

4. แรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance) คือ แรงดันในระบบสามเฟสมีขนาดแตกต่างกัน 0.5 ถึง 2% หรือมีมุมต่างกันไม่ใช่ 120 องศาไฟฟ้า ซึ่งมีผลทำให้กระแสโหลดในแต่ละเฟสไม่สมดุล เหตุการณ์นี้ทำให้มอเตอร์หรือหม้อแปลงร้อนเกินไปและทำให้อายุสั้นลง

5. ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform Distortion) คือ การเบี่ยงเบนในสภาวะคงตัวของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ทางกำลังไฟฟ้า สามารถอธิบายคุณลักษณะความผิดเพี้ยนรูปคลื่นโดยแยกเป็นองค์ประกอบทางความถี่ออกมาได้ห้าชนิด คือ

5.1 องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (DC Offset) คือ การที่มีกระแสหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นผลจากการใช้วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave Rectifier) ซึ่งทำให้เกิดความร้อนและกำลังสูญเสียที่หม้อแปลง รวมทั้งอาจทำให้เกิดการผุกร่อนของแท่งกรวดได้

5.2 ฮาร์โมนิก (Harmonic) ถูกกำหนดให้เป็นแรงดันและกระแสที่มีความถี่ที่เป็นจำนวนเต็มทวีคูณของความถี่มูลฐานที่สร้างขึ้น [15], [16] เช่น ระบบไฟฟ้ามีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ (Hz) ฮาร์โมนิกที่สามจะมีความถี่ 150 เฮิร์ตซ์ เมื่อฮาร์โมนิกรวมกับความถี่หลักมูล

ทั้งขนาด และมุมเฟส สัญญาณคลื่นไซน์ของระบบไฟฟ้าจะผิดเพี้ยนไปจากเดิม เหตุการณ์นี้เกิดจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ผลที่ได้รับคือจะทำให้อุปกรณ์ในระบบทำงานผิดปกติ [17] หากฮาร์โมนิกมีขนาดสูง อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ ตัวอย่างของกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้แสดงในรูปที่ 6

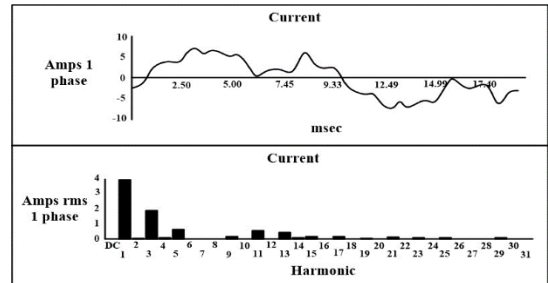
5.3 อินเตอร์ฮาร์โมนิก (Inter Harmonic) คือ ส่วนประกอบในคลื่นไซน์ของสัญญาณคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเต็มของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่ 104 เฮิร์ตซ์ 134 เฮิร์ตซ์ หรือ 147 เฮิร์ตซ์ โดย ผลกระทบของอินเตอร์ฮาร์โมนิกเหมือนกับฮาร์โมนิก

5.4 คลื่นรอยบาก (Notching) คือ การรบกวนทางแรงดันไฟฟ้า ลักษณะคล้ายกับฮาร์โมนิก และสภาวะทรานเซียนท์ มีลักษณะต่อเนื่องเป็นผลที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำให้กระแสถูกเปลี่ยนจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง มีผลทำให้อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์เกิดการทำงานผิดพลาด

5.5 สัญญาณรบกวน (Noise) คือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่ไม่ต้องการ ซึ่งมีความถี่ต่ำกว่า 200 กิโลเฮิร์ตซ์ปะปนมากับสัญญาณแรงดันหรือกระแสในสายเคเบิล โดยมีผลมาจากระบบไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ควบคุมที่มีการต่อสายดินไม่ถูกต้อง ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาดหรือไม่ทำงาน

6. แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยในช่วง 0.95 ถึง 1.05 เพอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากการใช้เตาหลอมชนิดอาร์ค หากแรงดันไฟฟ้าเกิดการกระเพื่อมมาก อาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

7. การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า (Power Frequency Variation) เป็นเหตุการณ์ที่ความถี่ของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนไป ซึ่งมีผลมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่เกิดความผิดพลาดหรือหลุดจากระบบไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้ ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับความถี่ของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 6 กระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า [17]

2.2 การตรวจวัดข้อมูล

2.2.1 ยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบ

ยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบเป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งยานยนต์ไฟฟ้าจะเป็นรถมินิบัสขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าที่มีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 1 ส่วนสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบมีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2 โดยภาพจริงของยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ข้อมูลของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลจำเพาะ	รายละเอียด
มิติ ยาวxกว้างxสูง	8.59 × 2.5 × 3.28 m
จำนวนที่นั่ง	20 ที่นั่ง
ความเร็วสูงสุดที่วิ่งได้	69 km/h
ตำแหน่งขับเคลื่อน	ล้อหลัง
ระยะทางที่วิ่งได้ต่อการประจุ 1 ครั้ง	> 100 km
กำลังสูงสุดของมอเตอร์	135 kW
แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์	2,100 N-m
ความจุพลังงานของแบตเตอรี่	120 kW-h
ชนิดของแบตเตอรี่	ลิเทียมไอออน (Li-ion)

ตารางที่ 2 ข้อมูลของสถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลจำเพาะ	รายละเอียด
มิติ ยาวxกว้างxสูง	800×800×1800 mm
พิกัดสูงสุดด้านอินพุต	แรงดันไลน์-ไลน์: 400 ± 10% Vac กระแส: 135 A ประสิทธิภาพ: >95%
พิกัดด้านเอาต์พุต	แรงดัน: 250 – 750 Vdc กระแส: 0 – 120 A หัวอัดประจุ: CCS-Type 2



รูปที่ 7 ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

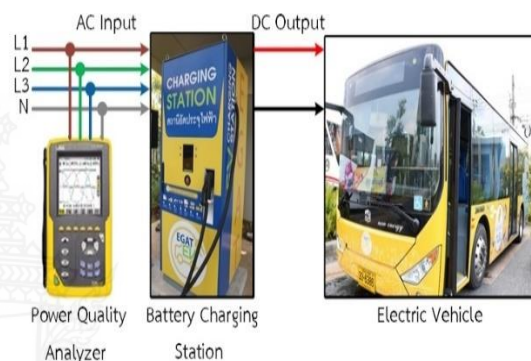


รูปที่ 8 สถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบ

จากรูปที่ 8 สถานีอัดประจุที่ใช้ทดสอบ DC Combo2 ขนาด 90 kW รองรับการอัดประจุไฟฟ้า รถปลั๊กไฟฟ้า/มินิบัสไฟฟ้าประเภทยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle: BEV ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ 100%) ใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 2 ชั่วโมง และสามารถรองรับการอัดประจุไฟฟ้ารถ BEV ส่วนใหญ่ที่มีจำหน่ายในประเทศไทยได้เช่น MG ZS EV, Hyundai Kona, BMW i3 เป็นต้น ใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 20 นาที

2.2.2 วิธีการวัดค่าและเก็บข้อมูล

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องจะอาศัยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality Analyzer) มาทำการวัดปริมาณทางไฟฟ้าด้านอินพุตของเครื่องอัดประจุสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยนำสายไฟของเครื่องวัดต่อเข้ากับช่อง L_1 L_2 L_3 และ N ของเครื่องวัด และนำปลายสายอีกด้านต่อเข้ากับสายไฟสามเฟสด้านอินพุตของเครื่องอัดประจุสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การวัดค่าเพื่อเก็บข้อมูล

ภายในของเครื่องอัดประจุจะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สายตัวนำ และอุปกรณ์สำหรับเพิ่มแรงดัน นอกจากนี้เครื่องอัดประจยังต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงเพื่อลดระยะเวลาในการอัดประจุ จึงควรต้องเริ่มจากการศึกษาค่าที่มีผลต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะสร้างแรงดันที่มีรูปคลื่นไซน์ออกมา แต่กระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบจะส่งผลให้รูปคลื่นแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงได้ เช่น กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการลัดวงจร ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะหรือไฟฟ้าดับ ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสที่เกิดจากอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เมื่อกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบจะทำให้รูปคลื่นแรงดันเกิดความผิดเพี้ยน ดังนั้นค่าที่จำเป็นในการตรวจวัด ได้แก่ ค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย (V_{rms}) ค่ากระแสรากกำลังสองเฉลี่ย (I_{rms})

ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวม (% THD_V) และ
ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวม (% THD_I)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้า
ซึ่งสามารถวัดแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย กระแสราก
กำลังสองเฉลี่ย ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวม และ
ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมได้โดยตรง จึงไม่
จำเป็นต้องใช้ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยมาคำนวณหา
ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม ซึ่งทั่วไปแล้วหากอยาก
ทราบค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวมและค่าความ
เพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมจำเป็นต้องคำนวณหาจาก
สมการที่ (4) และสมการที่ (5) ตามลำดับ

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{1,rms}} \cdot (100) \quad (4)$$

$$\%THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h,rms}^2}}{I_{1,rms}} \cdot (100) \quad (5)$$

โดยที่

%THD_V คือ ความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวม

%THD_I คือ ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวม

V_{h,rms} คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่ความถี่
ฮาร์โมนิกอันดับใด ๆ (โวลต์: V)

I_{h,rms} คือ กระแสรากกำลังสองเฉลี่ยที่ความถี่
ฮาร์โมนิกอันดับใด ๆ (แอมแปร์: A)

V_{1,rms} คือ แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่ความถี่
หลักมูล (โวลต์: V)

I_{1,rms} คือ กระแสรากกำลังสองเฉลี่ยที่ความถี่
หลักมูล (แอมแปร์: A)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในการตรวจวัด แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย
กระแสรากกำลังสองเฉลี่ย ความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก
รวมและความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมนั้น จะทำ
อย่างต่อเนื่อง แต่มองเป็นสามช่วงที่สำคัญได้ คือ

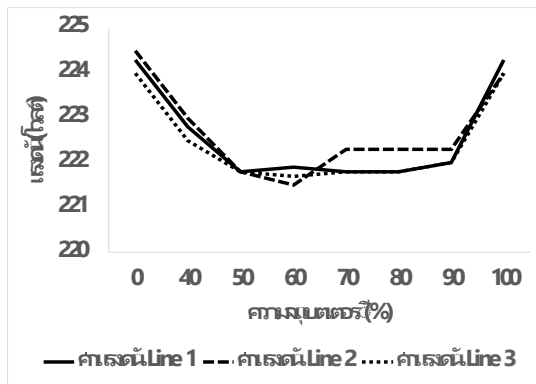
- ช่วงเวลาที่ยังไม่อัดประจุ
- ช่วงเวลาเริ่มอัดประจุ แบตเตอรี่ที่ทดสอบใช้ใน
ยานยนต์ไฟฟ้าของ กฟผ. ซึ่งใช้รับส่งพลังงานด้วย
ระยะทางและช่วงเวลาเดิมประจำ และต้องการให้
แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานนานที่สุด จึงพยายามอัดประจุ
ขณะที่ยังเหลือประจุอยู่พอสมควร ทำให้ขณะทดสอบ
ประจุในแบตเตอรี่มักจะมีค่าประมาณ 40เปอร์เซ็นต์
- ช่วงเวลาที่แบตเตอรี่เต็ม หรือความจุ 100 เปอร์เซ็นต์

3.1 ค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ยที่วัดได้

จากการตรวจวัดค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย
ทั้งสามเฟสพร้อมทั้งจับเวลาในการประจุแบตเตอรี่ตาม
ช่วงเวลาที่กำหนด สามารถนำข้อมูลที่ได้อ่านบันทึกลงใน
ตารางที่ 3 โดยนำค่าจากตารางที่ 3 สร้างกราฟแสดง
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเทียบกับความจุแบตเตอรี่
ดังได้รูปที่ 10 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 10
สังเกตได้ว่าแรงดันทั้งสามเฟสจะลดลงเล็กน้อยจากค่า
แรงดันก่อนอัดประจุซึ่งแบตเตอรี่มีความจุ 40 ถึง 50
เปอร์เซ็นต์ และแรงดันจะค่อนข้างคงที่ไปจนแบตเตอรี่มี
ความจุ 90 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นแรงดันจะค่อย ๆ สูงขึ้น
ไปจนแบตเตอรี่ประจุเต็มหรือมีความจุ 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3 ค่าแรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย

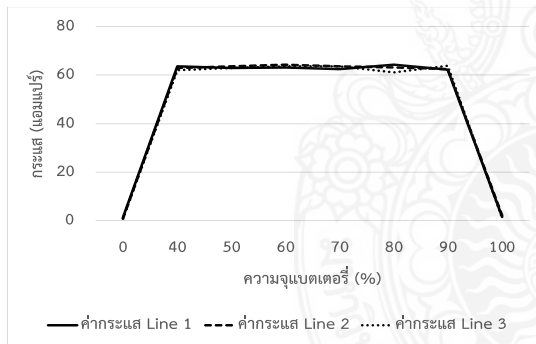
ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาท)	แรงดันรากกำลังสองเฉลี่ย ไลน์-นิวทรัล (โวลต์: V)		
		L1	L2	L3
ยังไม่ประจุ	0	224.3	224.5	224.0
40 (เริ่มประจุ)	3	222.8	223.0	222.5
50	15	221.8	221.8	221.8
60	29	221.9	221.5	221.7
70	43	221.8	222.3	221.8
80	57	221.8	222.3	221.8
90	71	223.9	223.9	223.6
100 (ประจุเต็ม)	80	224.3	224.0	224.0



รูปที่ 10 แรงดันเทียบกับความจุแบตเตอรี่

3.2 ค่ากระแสรกกำลังสองเฉลี่ยที่วัดได้

จากการตรวจวัดค่ากระแสรกกำลังสองเฉลี่ยทั้งสามเฟสพร้อมทั้งจับเวลาในการประจุแบตเตอรี่ตามช่วงเวลาที่กำหนด สามารถนำข้อมูลที่ได้มาบันทึกลงในตารางที่ 4 โดยนำค่าจากตารางที่ 4 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเทียบกับความจุแบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 กระแสเทียบกับความจุแบตเตอรี่

ตารางที่ 4 ค่ากระแสรกกำลังสองเฉลี่ย

ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาท)	กระแสรกกำลังสองเฉลี่ย (แอมแปร์: A)		
		L1	L2	L3
ยังไม่ประจุ	0	1.2	0.9	0.9
40 (เริ่มประจุ)	3	63.6	63.0	62.1
50	15	63.0	63.5	63.0
60	29	63.2	64.3	63.5
70	43	62.4	63.5	63.5
80	57	64.2	63.2	61.2

ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาท)	กระแสรกกำลังสองเฉลี่ย (แอมแปร์: A)		
		L1	L2	L3
90	71	62.3	62.5	63.8
100	80	1.4	2.1	1.1
(ประจุเต็ม)				

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 11 สังเกตได้ว่ากระแสทั้งสามเฟสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากค่าก่อนประจุในช่วงเริ่มการประจุซึ่งแบตเตอรี่มีความจุ 40 เปอร์เซ็นต์ จนกระแสมีค่าประมาณ 62 ถึง 64 แอมแปร์ และคงค่าประมาณนี้ไปจนแบตเตอรี่มีความจุ 90 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าประมาณ 1.1 ถึง 2.1 แอมแปร์ ซึ่งแบตเตอรี่ประจุเต็มหรือมีความจุ 100 เปอร์เซ็นต์

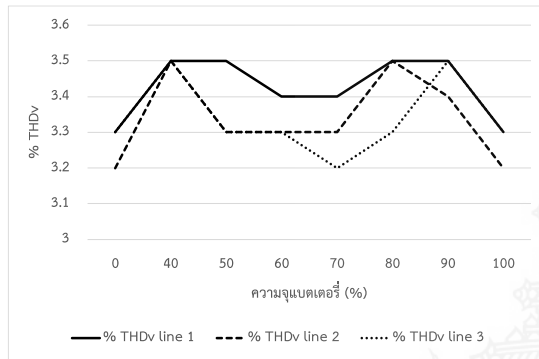
3.3 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่วัดได้

จากการตรวจวัดความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกทั้งสามเฟสพร้อมทั้งจับเวลาในการประจุแบตเตอรี่ตามช่วงเวลาที่กำหนด สามารถนำข้อมูลที่ได้มาบันทึกลงในตารางที่ 5 โดยนำค่าจากตารางที่ 5 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกเทียบกับความจุแบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 12 สังเกตได้ว่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกทั้งสามเฟสจะอยู่ในช่วง 3.2 ถึง 3.5 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และมีค่าค่อนข้างคงที่ตั้งแต่เริ่มอัดประจุ (ความจุแบตเตอรี่ 40 เปอร์เซ็นต์) ไปจนแบตเตอรี่มีประจุเต็ม (100 เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 5 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก

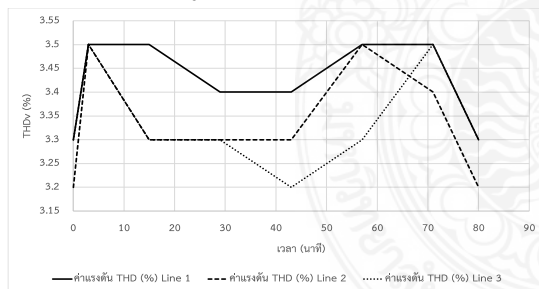
ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาท)	ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (THD _V : %)		
		L1	L2	L3
ยังไม่ประจุ	0	3.3	3.2	3.3
40 (เริ่มประจุ)	3	3.5	3.5	3.5
50	15	3.5	3.3	3.3
60	29	3.4	3.3	3.3
70	43	3.4	3.3	3.2

ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาทื)	ความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก (THD _v : %)		
		L1	L2	L3
80	57	3.5	3.5	3.3
90	71	3.5	3.4	3.5
100 (ประจุเต็ม)	80	3.3	3.2	3.3
เฉลี่ย		3.42	3.33	3.33



รูปที่ 12 ความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกเทียบกับ
ความจุแบตเตอรี่

การเปรียบเทียบ %THD_v และเวลาในการอัด
ประจุได้แสดงไว้ดังรูปที่ 13



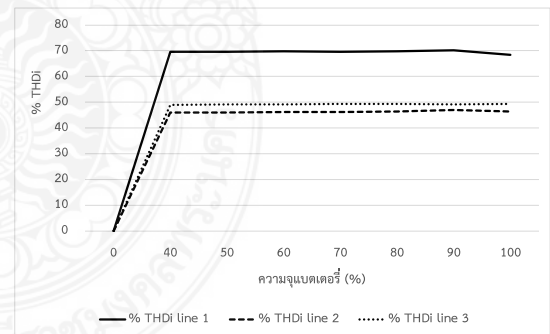
รูปที่ 13 การเปรียบเทียบ %THD_v และเวลา

เมื่อตรวจวัดความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกทั้งสาม
เฟสพร้อมทั้งจับเวลาในการประจุแบตเตอรี่ตามช่วงเวลา
ที่กำหนด สามารถนำมาข้อมูลที่ได้มาบันทึกลงในตาราง
ที่ 6 โดยนำค่าจากตารางที่ 6 มาสร้างกราฟแสดง
ความสัมพันธ์ระหว่างความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกเทียบ
กับความจุแบตเตอรี่ดังในรูปที่ 14 ซึ่งจากกราฟแสดง
ความสัมพันธ์ในรูปที่ 14 สังเกตได้ว่าที่เฟส L1 มีค่า

ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกสูงสุด คือ ช่วง 68.5 ถึง
70.1 เปอร์เซ็นต์ และที่เฟส L2 จะมีค่าความเพี้ยน
กระแสฮาร์โมนิกต่ำสุด คือช่วง 46.1 ถึง 47 เปอร์เซ็นต์
ส่วนที่เฟส L3 มีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิก
ปานกลาง คือ ช่วง 49 ถึง 49.4 เปอร์เซ็นต์ โดยทั้งสาม
เฟสจะมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกค่อนข้างคงที่
ตั้งแต่เริ่มอัดประจุ (ความจุแบตเตอรี่ 40 เปอร์เซ็นต์) ไป
จนกระทั่งแบตเตอรี่มีประจุเต็ม (100 เปอร์เซ็นต์)

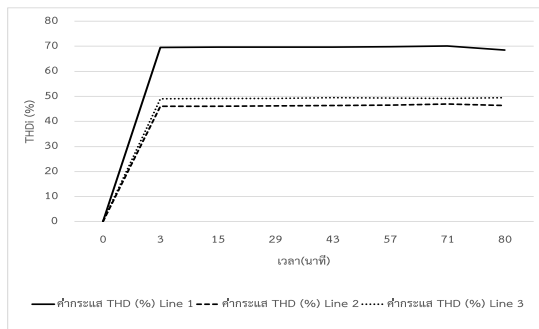
ตารางที่ 6 ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิก

ความจุ แบตเตอรี่ (%)	เวลา (นาทื)	ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิก (THD _i : %)		
		L1	L2	L3
ยังไม่ประจุ	0	0	0	0
40 (เริ่มประจุ)	3	69.5	46.1	49.0
50	15	69.6	46.0	49.1
60	29	69.7	46.2	49.1
70	43	69.6	46.3	49.4
80	57	69.8	46.5	49.3
90	71	70.1	47.0	49.1
100 (ประจุเต็ม)	80	68.5	46.4	49.4
เฉลี่ย		69.54	46.35	49.2



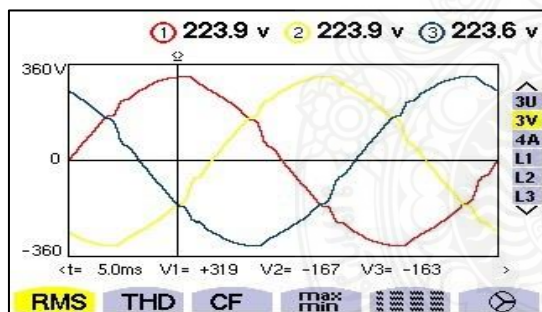
รูปที่ 14 ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกเทียบกับ
ความจุแบตเตอรี่

จากรูปที่ 13 พบว่าความเพี้ยนกระแส
ฮาร์โมนิกเทียบกับความจุแบตเตอรี่ของเฟสที่ 1 มีค่าสูง
กว่าเฟสอื่น เนื่องจากมีการต่อโหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
แบบสวิตชิงในจำนวนมากกว่าเฟสอื่นพอสมควร ส่วน
การเปรียบเทียบ %THD_i และเวลา ดังแสดงในรูปที่ 15



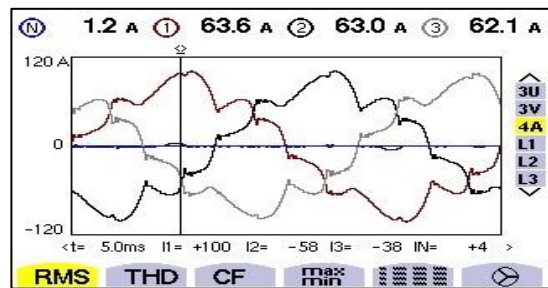
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบ %THDi และเวลา

ตัวอย่างรูปคลื่นของแรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ย และกระแสรบกวนกำลังสองเฉลี่ยทั้งสามเฟสที่ตรวจวัดได้จากเครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าขณะทำการอัดประจุแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 16 และรูปที่ 17 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างขนาดแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละส่วนประกอบสมมาตร และขนาดกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ ทั้งสามเฟสที่ตรวจวัดได้จากเครื่องวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ตามลำดับ

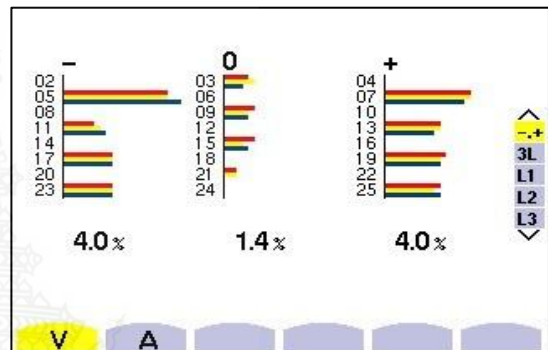


รูปที่ 16 รูปคลื่นแรงดันรบกวนกำลังสองเฉลี่ย

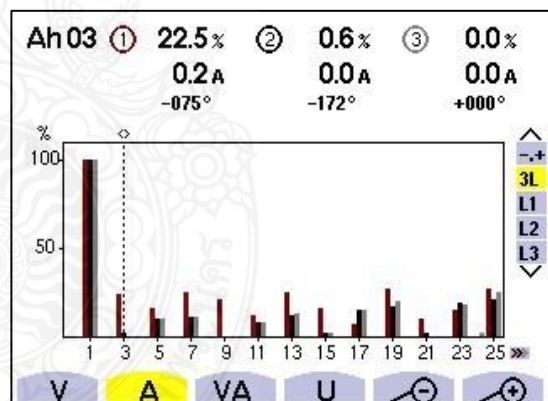
จากรูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นแรงดันขณะอัดประจุจะเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับขนาดแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละส่วนประกอบสมมาตรที่แสดงในรูปที่ 18 ส่วนรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสรบกวนกำลังสองเฉลี่ยขณะอัดประจุจะเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ค่อนข้างมาก ซึ่งสอดคล้องกับขนาดกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 17 รูปคลื่นกระแสรบกวนกำลังสองเฉลี่ย



รูปที่ 18 ขนาดแรงดันฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ



รูปที่ 19 ขนาดกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ

การเปรียบเทียบผลการทดสอบ %THDv และ %THDi เฉลี่ยกับบทความการศึกษาผลกระทบจากการทำงานของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าสำหรับการประกอบธุรกิจในภาคเอกชน [9] ดังแสดงในตารางที่ 7 และ 8 โดยที่บทความอ้างอิงใช้หัวปลี๊กประเภท CHAdeMO พิกัด 50 kW ใช้ SOC ช่วง 20-80 % ในขณะที่บทความ

วิจัยนี้ใช้หัวปลั๊กประเภท CCS-Type 2 พิกัด 90 kW ใช้ SOC ช่วง 40-100 % สังเกตว่าพิกัดกำลังขณะอัดประจุ และ SOC อาจมีผลต่อการเปรียบเทียบในกรณีนี้

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบ %THDv เฉลี่ยจาก 3 เฟส

บทความอ้างอิง	บทความผู้วิจัย
0.16	3.36

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบ %THDi เฉลี่ยจาก 3 เฟส

บทความอ้างอิง	บทความผู้วิจัย
0.51	55.03

4. สรุป

ผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการใช้งานสถานีประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดอัดประจุเร็วสรุปได้สามส่วน ส่วนแรกคือผลกระทบด้านแรงดัน เมื่อมีการอัดประจุพร้อมกันจำนวนมากจะทำให้เกิดสภาวะแรงดันตกในระบบไฟฟ้า และหากหยุดอัดประจุพร้อมกันจะทำให้เกิดสภาวะแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า ส่วนที่สองคือผลกระทบด้านฮาร์มอนิก โดยขณะอัดประจุจะทำให้แรงดันเกิดความเพี้ยนเล็กน้อย แต่กระแสจะเกิดความเพี้ยนสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นโดยทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดพลาด ส่วนที่สามคือผลกระทบด้านความไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า กรณีสถานีอัดประจุแบบสามเฟสที่ทดสอบมักจะไม่เกิดปัญหานี้ แต่กรณีใช้สถานีอัดประจุแบบหนึ่งเฟส หากเฟสใดมีการอัดประจุจะทำให้เฟสนั้นใช้กระแสมาก ทำให้ปลายสายของเฟสนั้นมีแรงดันต่ำกว่าเฟสอื่น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลและอุปกรณ์เพื่อการทดสอบในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Policy Research Department, National Science and Technology Development Agency (NSTDA), "Electric Vehicle Industry," *Study Report*, pp. 11–18, Sep. 2017.
- [2] Office of Policy and Planning, Ministry of Energy, "Report on The Performance According to The Plan to Drive Thailand's Smart Grid in The Short Term for The Year 2020," *Annual Report*, pp. 1–38, Feb. 2021.
- [3] Joint Working Group: Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Metropolitan Electricity Authority (MEA) and Provincial Electricity Authority (PEA), "Electrical Infrastructure Development Plan Report," *Annual Report*, pp. 5–20, Nov. 2016.
- [4] Office of Policy and Planning, Ministry of Energy, "EV Charging Station," *Handbook for Developing Battery Charging Stations for Electric Vehicles to Support the Country's Goals for the Promotion of Electric Vehicles*, pp. 4–5, Feb. 2022.
- [5] C.-L. Su, J.-T. Yu, H.-M. Chin and C.-L. Kuo, "Evaluation of power-quality field measurements of an electric bus charging station using remote monitoring systems," in proceeding of 2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Bydgoszcz, Poland, 2016, pp. 58–63.
- [6] T. Fujun, X. Ruiheng, C. Dong, R. Lijia, Y. Quanning and Z. Yan, "Research on the harmonic characteristics of electric vehicle fast charging stations," in proceeding of 2017 2nd International Conference on

- Power and Renewable Energy (ICPRE), Chengdu, China, 2017, pp. 805-809.
- [7] T. Pothinun and S. Premrudeepreechacharn, "Power Quality Impact of Charging Station on MV Distribution Networks: A Case Study in PEA Electrical Power System," 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, UK, 2018.
- [8] F. Chen, Q. Zhong, H. Zhang, M. Zhu, S. Müller, J. Meyer and W. Huang, "SURVEY OF HARMONIC AND SUPRAHARMONIC EMISSION OF FAST CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES IN CHINA AND GERMANY," CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Online Conference, 2021.
- [9] P. Khemmook, S. Thongsuk and P. Inban "The Impact Study of Electric Vehicle Quick Charger to Electrical System for Business in Private Sector," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 32, no. 4, pp. 843-853, Oct-Dec 2022.
- [10] King Mongkut's University of Technology Thonburi, "Study on Technology and Innovations in Electric Vehicles," *The Complete Report of The Electric Vehicle Technology Education Project*, pp. 1-29, Nov. 2017.
- [11] U. Vaidya, *Composites for Automotive, Truck and Mass Transit: Materials, Design, Manufacturing*, 1st ed. Lancaster, PA: Destech Publications Inc., 2010.
- [12] <https://www.nissan.co.th/experience-nissan/Nissan-EV/EV-charger-type.html>
- [13] K. Bhummikittipich, *Power System Quality*, 1st ed. Bangkok: Triple Education Co., Ltd., 2015.
- [14] IEEE std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [15] S. Chaladying and N. Rugthaicharoencheep, "Implement of Harmonic Current Impact on Power Factor Correction Device," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 12, no. 1, pp.109-120, Jan-Apr 2016.
- [16] P. Ngamprasert, N. Chattranont and N. Rugthaicharoencheep, "The Analysis Harmonic for Connect Grid Photovoltaic Rooftop Synergy Distribution System," 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Khon Kaen, Thailand, 2022.
- [17] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso and H. Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2012.