

ออกแบบเครื่องตรวจวัดจุดบกพร่องของสัญญาณ CP ของ EVSE สำหรับการพัฒนาเครื่องชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า

Design of EVSE's CP debugger for EVSE development

สุปวีร์ บัวผัน¹ และ ธีรธรรม บุญยะกุล^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
s6701011812048@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

การสื่อสารระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้าอาศัยสัญญาณ Control Pilot (CP) เป็นปัจจัยสำคัญ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาเครื่องตรวจวัดเพื่อประเมินความถูกต้องของสัญญาณดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบความถูกต้องของสัญญาณ CP เพื่อสนับสนุนการพัฒนาเครื่องชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าที่มีความปลอดภัยของกระบวนการชาร์จ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32H723VGT6 สำหรับการวัดและวิเคราะห์สัญญาณ CP ร่วมกับ ESP32 สำหรับควบคุมการทดสอบและเชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัญญาณ CP ที่ตรวจวัดได้จาก EVSE ในแต่ละสถานะมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำและใกล้เคียงกับมาตรฐาน IEC 61851 ยืนยันว่าเครื่องตรวจวัดนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการพัฒนาและตรวจสอบการทำงานของ EVSE ตามมาตรฐานสากลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องตรวจวัดจุดบกพร่องของสัญญาณ CP, เครื่องชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า, การตรวจวัดสัญญาณ

Abstract

Since the Control Pilot (CP) signal plays a critical role in communication between EVSE and electric vehicles, this research proposes the development of a dedicated debugger for its verification. The objective is to assess the of CP signals to develop EVSE with proper operation and safety during the charging process. The system integrates an STM32H723VGT6 microcontroller for CP signal measurement and analysis, and an ESP32 for test control and host computer communication. Experimental results indicate that the measured CP signals in different operating states closely match IEC 61851 standards, with only minor deviations. These results confirm that the proposed debugger can effectively serve as a tool for EVSE development and compliance testing with international standards.

Keywords: Control Pilot debugger, Electric Vehicle Supply Equipment, signal measurement

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์กำลังเปลี่ยนผ่านจากการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในไปสู่การใช้พลังงานไฟฟ้า ยานยนต์ไฟฟ้า(Electric Vehicle: EV) จึงกลายเป็นทางเลือกสำคัญที่ช่วยลดการปล่อยมลพิษ ในการใช้งานจริง ระบบอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า หรือ EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวกลางในการควบคุมการส่งกำลังระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าและยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้กระบวนการชาร์จเป็นไปอย่างปลอดภัย และมีเสถียรภาพ

หนึ่งในสัญญาณหลักที่ใช้ในการสื่อสารและควบคุมระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้าคือสัญญาณ Control Pilot (CP) ซึ่งทำหน้าที่กำหนดโหมดการชาร์จ ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อ และควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับยานยนต์ไฟฟ้าได้โดยการจำกัดกระแสในการชาร์จ[1] อย่างไรก็ตาม หากสัญญาณ CP เกิดความบกพร่อง เช่น รูปคลื่นผิดเพี้ยน ค่าระดับแรงดันไม่ถูกต้องตามมาตรฐาน IEC 61851[2] หรือมีสัญญาณรบกวน[3][4] อาจส่งผลให้การชาร์จทำงานผิดพลาด หรือเกิดความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของทั้งตัวผู้ใช้งานและระบบชาร์จไฟฟ้า

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสำหรับการตรวจวัดความผิดปกติของสัญญาณ CP การทดสอบการทำงานของ EVSE เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับผู้พัฒนา EVSE ให้เป็นไปตามมาตรฐานตามหลักสากล

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความบกพร่องของสัญญาณ CP

ตามมาตรฐาน IEC 61851 สัญญาณ Control Pilot (CP) ที่ส่งจาก EVSE จะอยู่ในรูปคลื่นสัญญาณพัลส์วidthมอดูเลชั่น (PWM) ความถี่ 1 kHz โดยมีแรงดันพีคประมาณ +12 V ถึง -12 V ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะการทำงาน ระดับแรงดันและรูปคลื่นของสัญญาณดังกล่าวถูกใช้เพื่อระบุสถานะการเชื่อมต่อและการชาร์จของระบบ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 สถานะ ได้แก่ สถานะ A ($\approx +12$ V) หมายถึงยังไม่มี การเชื่อมต่อยานยนต์ไฟฟ้า, สถานะ B ($\approx +9$ V) แสดงถึงการที่ยานยนต์ไฟฟ้าเชื่อมต่อกับ EVSE แล้ว แต่ยังไม่เริ่มกระบวนการชาร์จ, สถานะ C ($\approx +6$ V) แสดงถึงการที่ระบบอยู่ในช่วงการชาร์จพลังงาน, และสถานะ D ($\approx +3$ V) ใช้สำหรับการชาร์จที่ต้องการระบบระบายอากาศเพิ่มเติม ส่วน สถานะ E (≈ 0 V) และ สถานะ F (≈ -12 V) ใช้เพื่อบ่งบอกถึงความผิดปกติของระบบหรือการเชื่อมต่อที่ล้มเหลว นอกจากนี้ การปรับค่า duty cycle ของสัญญาณ

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

PWM ยังถูกใช้เพื่อสื่อสารค่ากระแสสูงสุดที่ EVSE สามารถจ่ายไปยังยานยนต์ไฟฟ้าอีกด้วย

สัญญาณควบคุม CP ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดสัญญาณ PWM ซึ่งต่ออนุกรมกับตัวต้านทานค่าคงที่ 1 kΩ เพื่อส่งสัญญาณไปยังยานยนต์ไฟฟ้า ขณะที่ฝั่งยานยนต์ไฟฟ้าจะมีไดโอดและสวิตช์สำหรับเลือกค่าตัวต้านทานเพื่อต่อเข้ากับสัญญาณ CP โดยการเลือกค่าตัวต้านทานดังกล่าวจะทำให้ระดับแรงดันของสัญญาณ CP เปลี่ยนแปลง และแรงดันที่ปรากฏนี้ใช้เป็นตัวบ่งชี้สถานะการชาร์จของยานยนต์ไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม หากแรงดันพิกัดด้านบวกของสัญญาณ CP มีค่าคลาดเคลื่อนจากมาตรฐาน อาจทำใหยานยนต์ไฟฟ้าบางรุ่นตีความสถานะการชาร์จผิดพลาดได้ เนื่องจากเกณฑ์การตีความสถานะตามระดับแรงดันอาจแตกต่างกันไปตามผู้ผลิต สาเหตุของความผิดพลาดนี้อาจเกิดจากค่าความต้านทานภายในของ EVSE ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน หรือจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นใน EVSE ที่ไม่มีคุณภาพ การตรวจสอบและวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องอาศัยการวัดแรงดันของสัญญาณ CP ระหว่างกระบวนการชาร์จ โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือหลักในการประเมินรูปคลื่นและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

2.2 หลักการของการทดสอบเวลาหน่วงในการทำงานของ

EVSE

ในการจ่ายพลังงานจาก EVSE ไปยังยานยนต์ไฟฟ้า ความรวดเร็วในการจ่ายและตัดกำลังไฟมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยความล่าช้าในการจ่ายไฟฟ้าแม้อาจไม่ก่อให้เกิดผลกระทบรุนแรงนัก แต่หากล่าช้าเกินไปอาจทำใหยานยนต์ไฟฟ้าตรวจจ้งว่าเกิดความผิดปกติระหว่างกระบวนการชาร์จได้ ขณะที่ความล่าช้าในการตัดไฟมีผลกระทบมากกว่า เนื่องจากอาจทำให้ผู้ให้บริการสถานีชาร์จสูญเสียพลังงานเกินกว่าที่กำหนด รวมทั้งในแง่ความปลอดภัย หากเกิดความผิดปกติระหว่างการชาร์จ EVSE จำเป็นต้องตัดกำลังไฟในทันที

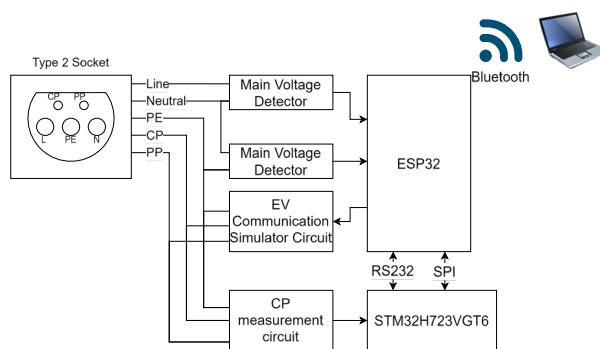
การทดสอบเวลาหน่วงในการจ่ายกำลังไฟของ EVSE สามารถทำได้โดยการส่งคำสั่งให้ EVSE เปลี่ยนสถานะจาก สถานะ B ไปเป็น สถานะ C จากนั้นทำการจับเวลาตั้งแต่จังหวะที่เริ่มเปลี่ยนแปลงสถานะจนถึงช่วงที่ EVSE เริ่มจ่ายพลังงานมายังยานยนต์ไฟฟ้า ในทำนองเดียวกัน การทดสอบเวลาหน่วงในการตัดกำลังไฟสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนสถานะจาก สถานะ C กลับไปเป็น สถานะ B และทำการจับเวลาตั้งแต่จังหวะที่เริ่มเปลี่ยนสถานะจนถึงช่วงที่ EVSE หยุดจ่ายกำลังไฟให้กับยานยนต์ไฟฟ้า

3. การออกแบบระบบ และการทดสอบ EVSE

รูปที่ 1 แสดงถึงแผนภาพรวมของวงจรที่ใช้ในการทดสอบเครื่อง EVSE โดยจะประกอบไปด้วยส่วนควบคุม 2 ส่วนได้แก่

1. ESP32 ทำหน้าที่ในการสื่อสารระหว่างซอฟต์แวร์ควบคุมการทดสอบ ในการส่งการแจ้งการสื่อสารของยานยนต์ไฟฟ้าแล้วจับเวลาในการทำงานของหน้าสัมผัส

2. STM32H723VGT6 ทำหน้าที่ในการตรวจวัดสัญญาณ CP และประมวลผลสัญญาณเพื่อคำนวณแรงดันสูงสุด แรงดันต่ำสุด Duty ratio และความถี่ของสัญญาณ CP

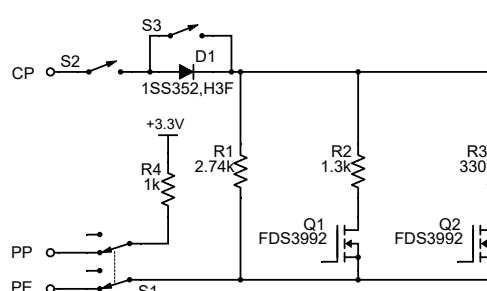


รูปที่ 1. แผนภาพรวมของวงจรเครื่องทดสอบ EVSE

โดยในส่วนของ ESP32 จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างซอฟต์แวร์ในการทดสอบ กับ STM32 และทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของวงจรจำลองการสื่อสารของยานยนต์ไฟฟ้า และทำหน้าที่ในการจับเวลาในการจ่ายกำลังไฟ และหยุดจ่ายกำลังไฟของ EVSE

ส่วนของ STM32H723VGT6 จะถูกออกแบบให้หน้าที่วัดสัญญาณ CP ซึ่งจะใช้อัตราการสุ่มค่าสัญญาณอยู่ที่ 4Msps เพื่อใช้ในการวัดสัญญาณ CP และสัญญาณรบกวนที่ผสมอยู่ในสัญญาณ CP โดยในการสุ่มค่าสัญญาณ CP 1 รอบจะทำการสุ่มค่า 8000 ตัวอย่างเพื่อใช้ในการแสดงผลและการประมวลผลสัญญาณเพื่อคำนวณหาค่าแรงดันสูงสุด และค่าต่ำสุดของสัญญาณ CP

3.1 วงจรจำลองการทำงานระหว่าง EVSE และยานยนต์ไฟฟ้า

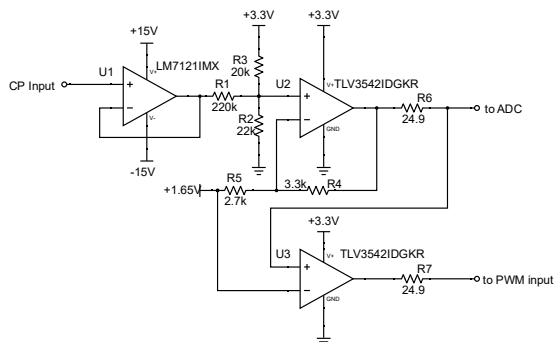


รูปที่ 2. วงจรจำลองการสื่อสารภายในยานยนต์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 2 แสดงถึงวงจรที่ใช้สำหรับการจำลองการสื่อสารระหว่างยานยนต์ไฟฟ้า และ EVSE โดยจะประกอบไปด้วยค่าตัวต้านทานและไดโอดดังที่ได้กล่าวถึงในส่วนที่ 2.1 โดยค่าตัวต้านทานในแต่ละค่าใช้ในการกำหนดสถานะในการชาร์จของ EVSE ซึ่งจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61851

ในการสร้างวงจรจริงวัสดุของค่าต้านทานจะเลือกใช้เป็นตัวต้านทานชนิดฟิล์มบาง เนื่องจากความเสถียรภาพทางต้านอุณหภูมิและค่าความคลาดเคลื่อนของค่าต้านทานมีค่าต่ำกว่าค่าต้านทานชนิดฟิล์มหนา และไดโอดจะเลือกใช้เป็นไดโอดสำหรับสัญญาณขนาดเล็กเนื่องจากไดโอดชนิดดังกล่าวมีความสามารถในการคืนตัวที่เร็วกว่าไดโอดเรียงกระแสทั่วไป

3.2 วงจรวัดแรงดันสัญญาณ CP



รูปที่ 3. วงจรปรับระดับสัญญาณ CP

จากที่กล่าวมาแล้วเกี่ยวกับสัญญาณ CP ซึ่งเป็นสัญญาณ PWM ที่มีระดับแรงดันสูงสุดเท่ากับ +12V และแรงดันต่ำสุดเท่ากับ -12V ซึ่งการประมวลผลสัญญาณด้วยตัวแปลงสัญญาณอนาล็อก-เป็น-ดิจิทัล (ADC) สัญญาณ CP จำเป็นต้องอยู่ในช่วงแรงดัน 0-3.3 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับระดับแรงดันของสัญญาณ CP ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมก่อนนำเข้าสู่ ADC

รูปที่ 3 แสดงวงจรปรับระดับสัญญาณ ซึ่งสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

- 1) วงจรบัฟเฟอร์ ทำหน้าที่วัดแรงดันที่ขั้วสัญญาณ CP เพื่อไม่ให้อิมพีแดนซ์ขาเข้าของวงจรปรับระดับแรงดันมีผลกับสัญญาณ CP
- 2) วงจรปรับระดับแรงดัน ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันและเลื่อนระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงบวกและมีระดับที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของ ADC
- 3) วงจรแปลงสัญญาณ PWM เป็นสัญญาณพัลส์ใช้ในการประมวลผลเพื่อหาความถี่และความกว้างพัลส์

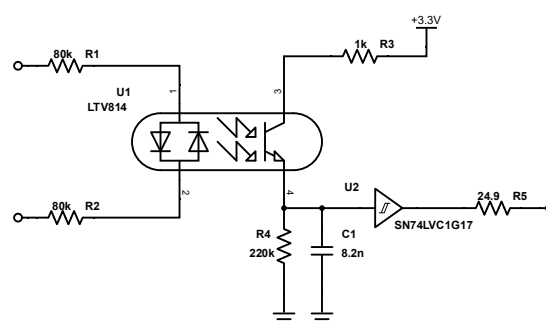
3.3 วงจรตรวจจับแรงดันไลน์

การตรวจจับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 230V จะใช้วงจรดังรูปที่ 4 โดยวงจรตรวจพบแรงดันไลน์วงจรจะไหลจิก 1 และหากวงจรตรวจไม่พบแรงดันไลน์วงจรจะไหลจิก 0

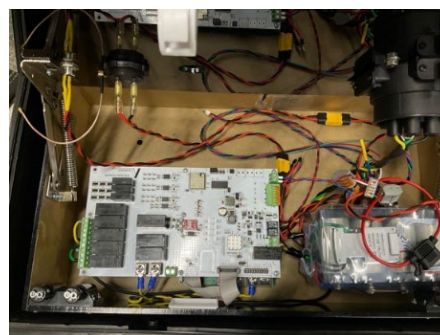
3.4 การทดสอบ EVSE

รูปที่ 5 แสดงถึงวงจรของเครื่องทดสอบ EVSE โดยการทดสอบ EVSE จะทำการต่อเครื่องทดสอบ EVSE ผ่านหัวชาร์จ CCS Type 2 ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6 จากนั้นทำการควบคุมการทดสอบโดยใช้ซอฟต์แวร์ในการสั่งการเครื่องทดสอบ EVSE และแสดงผลที่ได้จากการทดสอบ

ในกระบวนการทดสอบ เริ่มจากการสั่งให้ EVSE อยู่ที่สถานะ A และทำการวัดแรงดันของสัญญาณ CP จากนั้นเปลี่ยนไปที่สถานะ B แล้วตามด้วยสถานะ B2 ซึ่งสามารถทำได้โดยการแตะบัตรที่ EVSE ก่อนจะทำการวัดแรงดันของสัญญาณ CP ที่สถานะ B ต่อมาเปลี่ยนสถานะจาก B ไปเป็น C โดยในช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้ เครื่องทดสอบจะทำการจับเวลา ในการเชื่อมต่อแรงดันไลน์เข้าสู่หัวชาร์จ เมื่อเข้าสู่สถานะ C จะทำการวัดแรงดันของสัญญาณ CP ต่อด้วยการเปลี่ยนไปยังสถานะ D เพื่อวัดแรงดันสัญญาณในสถานะ D หลังจากนั้นเปลี่ยนกลับเป็นสถานะ C ต่อมาทำการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะ C ไปเป็นสถานะ B เพื่อจำลองการหยุดการชาร์จโดยยานยนต์ไฟฟ้า พร้อมทั้งจับเวลาที่ใช้ในการหยุดชาร์จด้วย จากนั้น เปลี่ยนสถานะกลับไปสถานะ A เพื่อสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ



รูปที่ 4. วงจรตรวจจับแรงดันไลน์



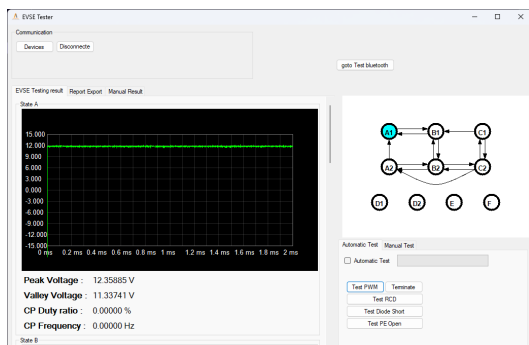
รูปที่ 5 วงจรเครื่องทดสอบ EVSE



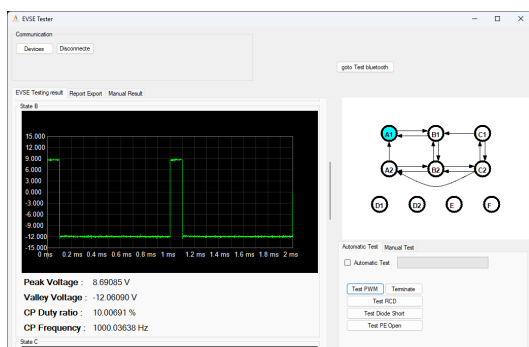
รูปที่ 6 การทดสอบ EVSE

4. ผลลัพธ์ และอภิปราย

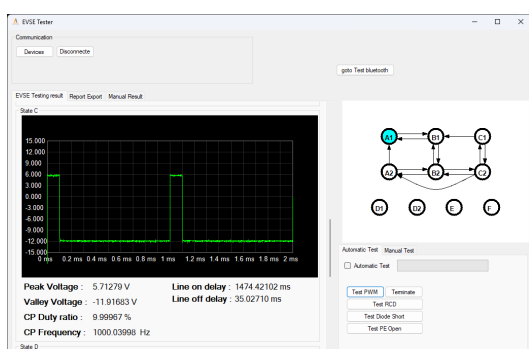
จากผลการทดสอบ EVSE ดังรูปที่ 7 แสดงสัญญาณ CP ในสถานะ A ซึ่งเครื่องทดสอบตรวจวัดได้ +12.36V ซึ่งคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานอยู่ที่ 2.99%



รูปที่ 7 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ A



รูปที่ 8 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ B



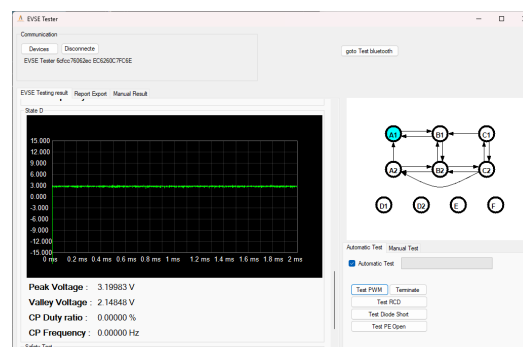
รูปที่ 9 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ C

รูปที่ 8 แสดงสัญญาณ CP ในสถานะ B ซึ่งมีแรงดันสูงสุดอยู่ที่ +8.69V ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานอยู่ที่ 3.435% สัญญาณมีความถี่ 1000.04Hz ซึ่งคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานไป 0.00368% และมีค่าดีทีซีเคิล 10.01%

รูปที่ 9 แสดงถึงสัญญาณ CP ในสถานะ C ซึ่งเป็นสถานการณ์ชาร์จจะได้ว่าสัญญาณ CP จะอยู่ในรูปแบบพัลส์เช่นเดียวกันกับรูปที่ 8 โดย

ความถี่และค่าดีทีซีเคิล มีความแตกต่างกันอยู่ที่ 0.036% และ 0.072% ตามลำดับซึ่งนับว่าไม่ต่างกันมาก และมีระดับแรงดันสูงสุดอยู่ที่ +5.71V ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากมาตรฐานอยู่ที่ 4.787% มีเวลาหน่วงในการจ่ายแรงดัน 1474.42ms และเวลาหน่วงในการหยุดจ่ายแรงดันไลน์ 35.04ms

รูปที่ 10 แสดงถึงสัญญาณ CP ในสถานะ D โดยมีแรงดันสูงสุดอยู่ที่ +3.2V ซึ่งคลาดเคลื่อนไปจากมาตรฐานอยู่ที่ 6.661%



รูปที่ 10 ผลการทดสอบ EVSE ในสถานะ D

5. สรุป

จากผลการทดสอบเครื่อง EVSE โดยใช้เครื่องตรวจวัดจุดบกพร่องของสัญญาณ CP จะพบว่าสัญญาณ CP ของ EVSE ที่ทำการทดสอบในแต่ละสถานะมีความใกล้เคียงกับมาตรฐานและการทำงานของ EVSE ในแต่ละสถานะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61851-1

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. B. Pedersen, S. Martinenas, P. B. Andersen, T. M. Sørensen and H. S. Høj, "A method for remote control of EV charging by modifying IEC61851 compliant EVSE based PWM signal," *2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Miami, FL, USA, 2015, pp. 539-544,
- [2] IEC 61851-1: Electric vehicle conductive charging system Part 1: General requirements. 3rd ed, 2017.
- [3] S. Jeschke, M. Maarleveld, J. Baerenfaenger, B. Schmuellinger and A. Burkert, "Challenges in EMC Testing of EV and EVSE Equipment for Inductive Charging," *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Amsterdam, Netherlands, 2018, pp. 967-971,
- [4] C. Lewandowski, S. Gröning, J. Schmutzler and C. Wietfeld, "Interference analyses of Electric Vehicle charging using PLC on the Control Pilot," *2012 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, Beijing, China, 2012, pp. 350-355,