



ยานพาหนะไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด: กรณีศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนกับสถานประกอบการ

ประสิทธิ์ ภูสมมา^{1*} ประยุทธ์ นิสกุล¹ และ วรวิทย์ ลีลาวรรณ²

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

² สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E- mail: prasit.p@dru.ac.th

วันที่รับบทความ: 22 ตุลาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 15 กุมภาพันธ์ 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 10 มีนาคม 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอความเป็นไปได้ของการนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาใช้ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า โดยออกแบบความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีความเหมาะสมและสามารถใช้งานกับยานพาหนะไฟฟ้าขนาด 4 ที่นั่ง ที่มีน้ำหนักรวม 480 กิโลกรัม สำหรับวิ่งบนถนนรอบมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ เพื่อวิ่งบริการนักศึกษาระหว่างอาคารเรียนรวม 4 ถึงอาคารหอสมุด ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าคือ 97.06% ระยะทางที่วิ่งได้ 1100 เมตร ใช้เวลา 315 วินาที ความเร็วเฉลี่ย 12.57 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะตัดการจ่ายพลังงาน (Cut-off) ที่แรงดันต่ำสุด 30.10 โวลต์ เมื่อยานพาหนะวิ่งกลับมาถึงตัวอาคารจะต้องนำเข้าชาร์จประจุใหม่ทุกครั้ง ซึ่งความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาใช้ในการขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าในระยะเวลาที่เหมาะสมกับขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถทำได้เป็นที่น่าพอใจ โดยจุดคุ้มทุนจากการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าแทนแบตเตอรี่คือ 127 วัน

คำสำคัญ: ตัวเก็บประจุยิ่งยวด; ยานพาหนะไฟฟ้า; สถานประกอบการ

Electric Vehicle driven by Supercapacitor: Case Study the Possibility of Investing in the Establishment

Prasit Phoosomma^{1*}, Prayut Nisapakul¹ and Wolawit Leelawan²

¹ Department of Electrical Technology, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

² Department of Industrial Management Technology, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

* Corresponding author, E- mail: prasit.p@dru.ac.th

Received: 22 October 2021; Revised: 15 February 2022; Accepted: 10 March 2022

Online Published: 20 June 2022

Abstract: The concept of employing supercapacitors for electric vehicles is discussed in this paper. The design of the supercapacitor capacity is optimized and can be used in a four-seater electric vehicle with a total weight of 480 kg for driving on the roads around Dhonburi Rajabhat University, Samut Prakan to serve students between the school building 4 and the building library. The results showed that supercapacitors utilized as the power supply for electric vehicles have a maximum efficiency of 97.06%. It takes 315 s to traverse 1100 m at an average speed of 12.57 km/h. The minimal voltage at which the supercapacitor cut-off the power supply is 30.10 V. Every time the vehicle returns to the building, the vehicle must be recharged. The ability to drive electric vehicles with a supercapacitor at distances adequate for the supercapacitor's capacitance is satisfactory. The break-even point for employing supercapacitors instead of batteries to power electric vehicles is 127 days.

Keywords: Supercapacitor; Electric Vehicle; Establishment



1. บทนำ

แบตเตอรี่เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนารถยนต์ประหยัดพลังงานหรือรถไฟฟ้าระบบไฮบริด (Hybrid) การใช้แบตเตอรี่นั้นมีข้อจำกัดมากมาย เพราะแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดเก็บพลังงานเพื่อไว้ใช้ต่อไปถือเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานทางเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แต่แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าเท่านั้นไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยตัวของมันเอง เมื่อใช้พลังงานไฟฟ้าจนหมดจะต้องทำการเก็บประจุไฟฟ้าเข้าไปยังแบตเตอรี่ใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเก็บประจุไฟฟ้านี้จะต้องใช้เวลาในการเก็บประจุที่นานหลายชั่วโมงในการเก็บประจุแต่ละครั้ง วิธีการเก็บประจุหรือชาร์จ มีทั้งการเก็บประจุแบบช้าและการเก็บประจุแบบเร็ว โดยที่การเก็บประจุแบบเร็วนั้นประสิทธิภาพที่ได้จะไม่ถึง 60% และทำให้อายุในการใช้งานสั้นลง [6] เวลาที่ใช้ในการเก็บประจุหลายชั่วโมงจะขึ้นอยู่กับขนาดกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วย นอกจากนี้ที่ปริมาณความจุเดียวกันแบตเตอรี่จะมีน้ำหนักมากกว่าและมีราคาสูงกว่า ส่วนอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับ กรรมวิธีการเก็บประจุ การคายประจุ อุณหภูมิ และถ้าหากการบำรุงรักษาไม่ดีเพียงพอหรือใช้งานผิดวิธีอาจทำให้เสียหายได้ง่าย

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงหรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีการเรียงตัวของประจุแบบสองชั้น (Electrochemical Double-Layer Capacitors: EDLCs) หรือ อัลตราคาปาซิเตอร์ (Ultracapacitor: UC) หรือ ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor: SC) [1-3] หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์

ที่สามารถนำมาใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่ในการประจุพลังงานไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่สามารถเก็บประจุ (Charge) ได้อย่างรวดเร็วนี้จะนำมาใช้เก็บประจุไฟฟ้าร่วมกับแบตเตอรี่หรือแทนแบตเตอรี่ [3] เพื่อลดระยะเวลาในการประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่และจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น [4, 5, 14, 15] เนื่องจากใช้เวลาในการเก็บประจุเพียง 1-5 นาที ขึ้นกับกระแสในการชาร์จ และยังทำให้การเกิดความร้อนต่ำ ซึ่งทำให้การสูญเสียพลังงานลดลง [8-12] อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานกว่าแบตเตอรี่อีกด้วย

การลงทุนสร้างเพื่อประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับสำหรับรถขนส่งขนาดเล็ก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาการวิเคราะห์ทางการตลาดคือการนำเครื่องมือทางการตลาดต่างๆ มาใช้ในการวิเคราะห์ เช่น Demand Supply, Market, 4P, 4C, Five Forces Model เพื่อตั้งสมมติฐานถึงความเป็นไปได้ในด้านการแข่งขันมีการการวิเคราะห์ด้านรูปแบบโครงการ เช่น การศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลที่ดิน ท่าเล เพื่อให้ได้รูปแบบทางกายภาพของโครงการ เช่น ลักษณะโครงสร้าง และวัสดุ ประโยชน์ใช้สอย ในส่วนนี้วิเคราะห์เพื่อให้ได้รูปแบบทางกายภาพที่เหมาะสมและตรงตามความต้องการทางการตลาดมากที่สุดทำการการวิเคราะห์ทางการเงินคือการนำเครื่องมือทางการลงทุนต่างๆมาใช้ในการวิเคราะห์ NPV, IRR, PV, Cash Flow และ อื่นๆ เพื่อให้ได้ทราบว่ามีกำไรงบประมาณ และเวลาคืนทุน มากน้อยเพียงใด สุดท้ายการเพื่อวิเคราะห์ทางด้านงบประมาณการลงทุน จำรวนเงินลงทุน หรือจำนวนเงินกู้เงินเพียงพอหรือไม่ [16]

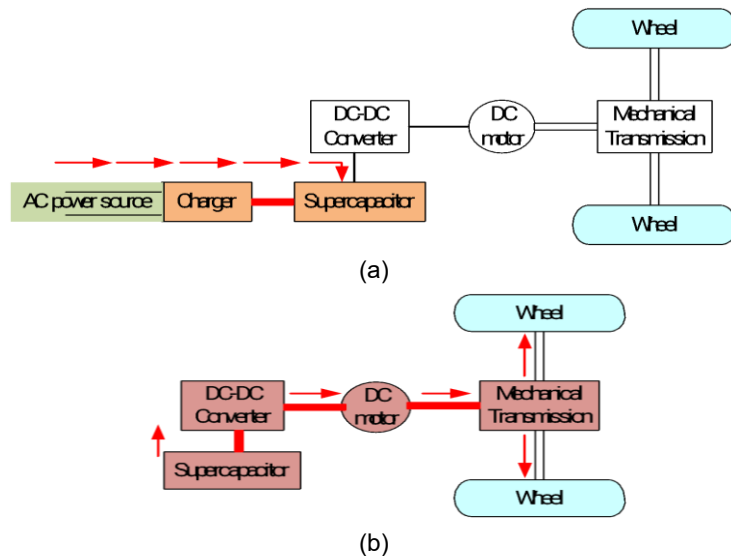
สถานประกอบการในจังหวัดสมุทรปราการและจังหวัดใกล้เคียง ที่มีพื้นที่มากกว่า 100-300 ไร่ และมีอาคารประกอบการหรือจุดทำการอยู่ห่างกันแต่ละอาคารไม่เกิน 500 เมตร ทำให้การเดินทางไปมาระหว่างอาคารไม่สะดวก ประกอบกับยานพาหนะไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันเกิดปัญหาที่ต้องใช้เวลาชาร์จแบตเตอรี่ไม่น้อยกว่า 5 ชั่วโมงต่อครั้ง ซึ่งทำให้การทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ และมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่ทุกๆ 1-2 ปี ซึ่งในการเปลี่ยนแบตเตอรี่แต่ละครั้งต้องใช้งบประมาณไม่น้อยกว่า 80,000 บาท ทำให้เสียรายได้ในการเปลี่ยนแบตเตอรี่เป็นเงินจำนวนมาก การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการเก็บประจุและการปล่อยประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่ใช้ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า และเหมาะสำหรับกับการใช้ยานพาหนะไฟฟ้าสำหรับวิ่งไป-กลับระหว่างอาคารได้ โดยการใช้ยานพาหนะไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากตัวเก็บประจุยิ่งยวด วิ่งจากอาคารหนึ่งไปยังอีกอาคารหนึ่ง สามารถทำการเก็บประจุได้

เพียงไม่กี่วินาที โดยที่ตัวอาคารจะติดตั้งสถานีชาร์จกระแสสูง และสามารถวิ่งกลับมายังอาคารได้ โดยทำการชาร์จพลังงานที่อาคารได้เพียง 1-5 นาที สามารถชาร์จพลังงานได้เต็มพิกัด การประเมินจุดคุ้มค่าและคุ้มทุนรวมทั้งประโยชน์ที่ได้รับจากทางเลือกต่างๆ ที่ศึกษาจะช่วยสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจของการทำธุรกิจและพัฒนาโครงการต่อไปในอนาคต

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การออกแบบระบบขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า

การออกแบบระบบขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าในครั้งนี้ได้แสดงรูปแบบการทำงานของระบบการเก็บพลังงานให้กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด (รูปที่ 1 (a)) และระบบการจ่ายพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (รูปที่ 1 (b)) ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้เป็นตัวส่งกำลังไปที่ล้อยานพาหนะไฟฟ้าโดยเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 2000 W, 48 V



รูปที่ 1 (a) ระบบการเก็บพลังงาน และ (b) ระบบการปล่อยพลังงาน



2.2 การออกแบบความจุตัวเก็บประจุยิ่งยวด

การออกแบบหาขนาดความจุตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้สามารถใช้กับรถกอล์ฟ ขนาด 4 นั่ง น้ำหนักรถ 290 kg น้ำหนักบรรทุกรวมทั้งหมด 480 kg เพื่อนำมาใช้วิ่งระหว่างอาคารเรียนรวม 4 ถึงอาคารหอสมุด มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ ซึ่งมีระยะทางระหว่างตัวอาคาร 505 m และระยะทางไป กลับรวม 1010 m โดยสามารถนำข้อมูลมาคำนวณหาขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมสามารถวิ่งได้มากกว่า 505 m ได้ดังนี้

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดของ Maxwell ขนาด 165F, 48V จำนวน 2 ลูก ต่อขนานได้ขนาดพิกัดรวม 330F, 48V จำนวน 1 ชุด ดังรูปที่ 2 ซึ่งมีคุณลักษณะความหนาแน่นกำลังงานสูง มีข้อจำกัดแรงดันในการประจุไม่เกิน 51V โดยเลือกใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดพิกัด 165F, 48Vdc จำนวน 2 ลูก ต่อแบบขนานได้ความจุรวมเป็น 330F, 48Vdc จำนวน 1 ชุด

จากสูตรพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

1. พลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$W_t = \int_0^t p dt = \int_0^t i V_c dt = \int_0^t (C \frac{dv}{dt}) v_c dt = C \int_0^t v dv$$

$$W_c = \frac{1}{2} C V_c^2 \quad (1)$$

เมื่อ W_c คือ พลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (J)

C คือ ความจุ (F)

V_c คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

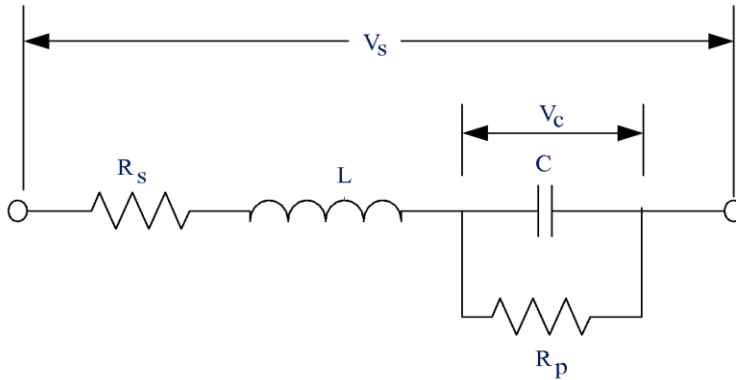


รูปที่ 2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดต่อขนานกันพิกัดรวม 330F, 48V

2. ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือ ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขึ้นอยู่กับระดับแรงดันและอุณหภูมิ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2)

$$\eta = \frac{W_c}{W_t} = \frac{W_c}{W_c + W_R} \quad (2)$$

วงจรมูลของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะคล้ายกับตัวเก็บประจุธรรมดาซึ่งมีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนประกอบของตัวเก็บประจุและส่วนประกอบของตัวต้านทาน R_s อนุกรมกับวงจร เรียกว่าค่าความต้านทานอนุกรมภายในตัวเก็บประจุ (Equivalent Series Resistance or ESR_{dc}) ซึ่งเป็นผลให้เกิดความร้อนในตัวเก็บประจุ ตัวต้านทานขนาน R_p (Equivalent Parallels Resistance or EPR_{dc}) เป็นผลจากกระแสรั่วไหล (Leakage Current) ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) และตัวต้านทาน R_p นี้จะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลาหรือเรียกว่าการปล่อยประจุในตัวเอง (Self-Discharge) ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับความเหนี่ยวนำซึ่งมีขนาดเล็กมากเป็นผลจากรูปทรงทางเรขาคณิตจากการผลิตตัวเก็บประจุดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรสมมูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด [9]

ค่า ESR_{dc} สามารถหาได้จากการจ่ายไฟในช่วงแรงดัน (ΔV) และกระแส (ΔI) ในระหว่างการปล่อยประจุ นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังมีผลต่อความจุและความต้านทานภายในเช่นเดียวกับในสายไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องนำมาต่อกับวงจร เพื่อดูผลการตอบสนองทางไฟฟ้า และสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในได้ดังนี้

$$ESR_{dc} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_f - V_{min}}{I_d} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{ความจุไฟฟ้า} &= (I_d \times t_d) / (V_w - V_f) \\ \text{(Capacitance)} &= (I_d \times t_d) / V_d \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อ V_w คือ แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นในการประจุ (V)
 V_{min} คือ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดภายใต้ต่อโหลด (V)
 I_d คือ กระแสช่วงการปล่อยประจุ (A)
 V_f คือ แรงดันไฟฟ้าหลังจากปลดโหลดออก
 5 วินาที (V)

2.3 เวลาที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดปล่อยประจุ

จากสูตรพลังงาน (W) ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถนำไปหาค่าเวลา (t) ที่ปล่อยประจุขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้ดังนี้

$$W = \frac{1}{2} \times C \times V^2 = \frac{1}{2} \times 330 \times 48^2 = 380160 \text{ J}$$

จากสูตรกำลังไฟฟ้า

$$P = \frac{W}{t} \quad (5)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (W or J/s) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 2000 W, 48V และเวลาที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดใช้ขับเคลื่อนยานพาหนะได้

$$t = \frac{380160 \text{ J}}{2000 \text{ (J/s)}} = 190.08 \text{ s}$$



2.4 ระยะทางที่ยานพาหนะไฟฟ้าวิ่งได้

เส้นรอบวงหรือวงล้อของยานพาหนะมีระยะ 3.7 m/cycle ความเร็วยานพาหนะไฟฟ้าเท่ากับ 12 km/h หรือ 54 rpm ซึ่งสามารถหารระยะทางการวิ่งต่อวินาทีได้ดังนี้

$$\frac{12\text{km}}{3600\text{s}} = 3.33 \text{ m/s}$$

ระยะทางที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวด 1 ชุด ใช้งานได้ดังนี้

ระยะทางที่วิ่งได้ = รอบ/นาที (rpm) × เวลาใช้งานตัวเก็บประจุยิ่งยวด (min) = 200 (rpm) × 3.168 min = 633.6 m

ดังนั้น จากการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด 1 ชุด ขนาด 330F, 48V กับยานพาหนะไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทาง 633.6 m

2.5 การออกแบบสถานีชาร์จ

ออกแบบสถานีชาร์จ ขนาดกระแส 0-100A, แรงดัน 51V และนำไปติดตั้งที่อาคารเรียนรวม 4

กับอาคารหอสมุด มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ ดังรูปที่ 4

การทดลองและเก็บข้อมูลการชาร์จของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เนื่องจากต้องใช้กระแสชาร์จสูง จึงต้องใช้ การควบคุมแบบสามเฟสเต็มคลื่น โดยเอสซีอาร์แต่ละตัวจะนำกระแสได้ เมื่อแรงดันในเฟสนั้นอยู่ในช่วงวัฏจักรบวกและมีพัลส์จุดชนวนเข้าเกิดเอสซีอาร์ พัลส์ที่ใช้จุดชนวนเอสซีอาร์แต่ละตัวจะต่างเฟสกันเป็นมุม 120° ดังนั้นเอสซีอาร์นำกระแสได้ไม่เกิน 120° และเรียงตามลำดับเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้าไหลจึงได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแต่ละเฟสเท่าๆ กันจากระบบไฟสามเฟส (V_{LL}) การควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายไหลทำได้โดยการปรับมุมจุดชนวนที่ป้อนให้กับเกตของเอสซีอาร์ แรงดันเออร์พุท (V_{dc}) ดังรูปที่ 5 และสมการที่ 6

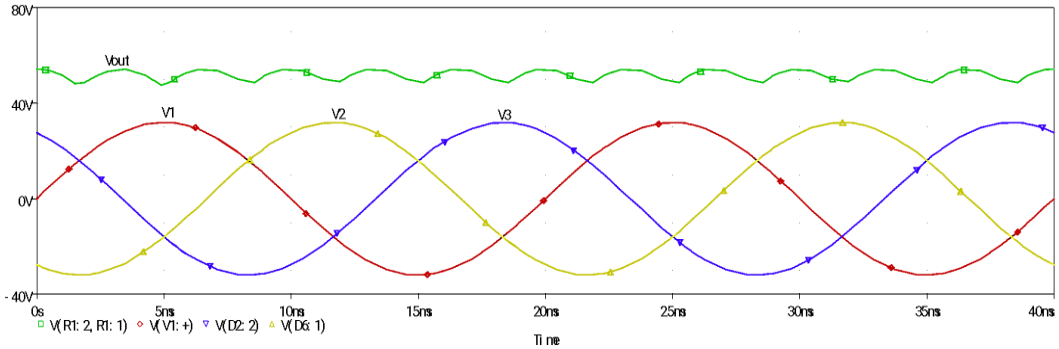
$$V_{dc}(\alpha) = \frac{3}{\sqrt{2}\pi} (V_{rms}) [1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)] \quad (6)$$



รูปที่ 4 สถานีชาร์จตัวเก็บประจุยิ่งยวด



บทความวิจัย



รูปที่ 5 (a) แรงดันอินพุต V_{rms} (b) แรงดันเออร์พุต V_{dc}

2.6 การทดลองยานพาหนะไฟฟ้า

ยานพาหนะไฟฟ้าขนาด 4 นิ้ว ดังรูปที่ 6 น้ำหนัก รถ 290 kg น้ำหนักบรรทุกรวม 480 kg เพื่อนำมาใช้วิ่งระหว่างอาคารเรียนรวม 4 ถึงอาคารหอสมุด มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ มีระยะทาง 505 m และระยะทางไปกลับรวม 1010 m แผนผังการทดลองวิ่งแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวด

2.7 จุดคุ้มทุนยานพาหนะไฟฟ้า

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนยานพาหนะไฟฟ้า (Break Even Point Electric Vehicle) (สมการที่ (7)) พบว่าในขณะที่รถยนต์ไฟฟ้ามีราคาสูงกว่ารถยนต์เครื่องยนต์เชื้อเพลิงฟอสซิลหรือน้ำมัน โดยในช่วงปีที่สองการใช้เชื้อเพลิงมีต้นทุนการที่สูงขึ้น ทำให้ต้นทุนของรถยนต์ไฟฟ้ามีค่าน้อยลง ปัจจัยการลดจุดคุ้มทุนของยานพาหนะไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

(1) ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าจะทำงานได้ไม่เกิน 85% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าเออร์พุต

(2) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา โดยทั่วไปค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษายานพาหนะไฟฟ้า (EV) ต่ำกว่าของรถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิง (DV) ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 แผนผังการทดลองวิ่งระยะทาง 505 เมตร



$$N = \frac{F}{P - V} \quad (7)$$

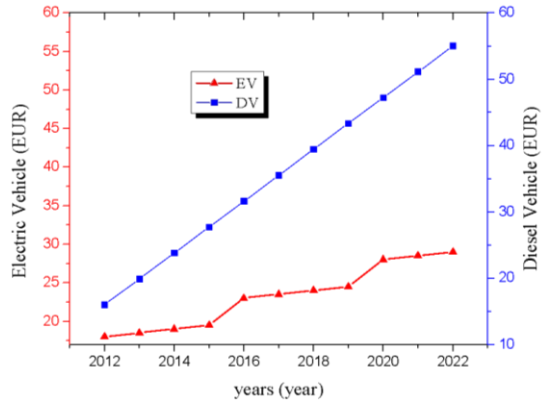
เมื่อ F คือ ต้นทุนคงที่
 V คือ ต้นทุนแปรผัน
 N คือ จำนวนที่ผลิตที่จุดคุ้มทุน
 P คือ ราคาขายต่อหน่วย

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า โดยการวิ่งทดสอบไป กลับระหว่างอาคารเรียนรวม 4 และอาคารหอสมุดมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ มีระยะทางไปกลับรวม 1010 m ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์ชาร์จที่แรงดันคงที่ 50.52V กระแส 20.33A

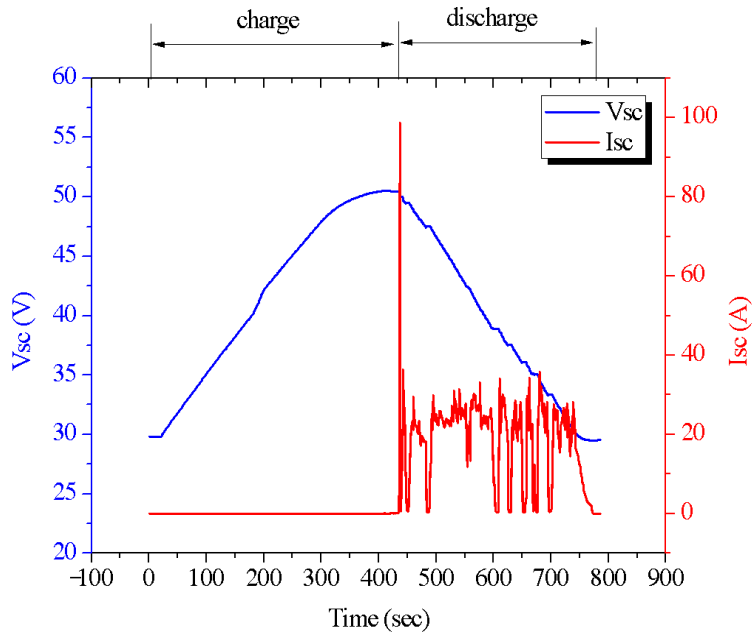
เมื่ออัดประจุจนเต็มที่แรงดันสุดท้ายของการชาร์จ 50.52V กระแส 20.33A เวลาชาร์จ 447s ใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 822.47W กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1384.03W กำลังไฟฟ้าต่ำสุด 502.65W จากนั้นทดลองวิ่งจริงตามเส้นทางที่กำหนดใช้เวลา 315 s ระยะทางที่วิ่งได้ 1100 m ความเร็วเฉลี่ย 12.57 km/h ใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 798.29W กำลังไฟฟ้าสูงสุด 4914.15W กำลังไฟฟ้าต่ำสุด 12.91W โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะตัดการจ่ายพลังงาน (Cut-off) ที่แรงดันต่ำสุด 30.10V และพบว่ากระแสช่วงออกตัวจะมีค่าสูงสุด ดังรูปที่ 9 และผลตอบสนองของกระแส แรงดัน และพลังงานช่วงการประจุและช่วงการปล่อยประจุ ดังรูปที่ 10



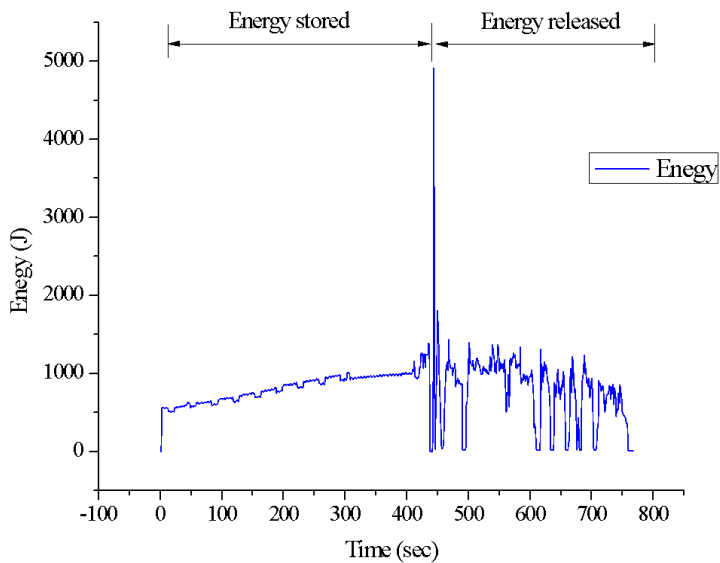
รูปที่ 8 จุดคุ้มทุน

3.2 ผลการวิเคราะห์ชาร์จที่แรงดันคงที่ 50.49V กระแส 79.15A

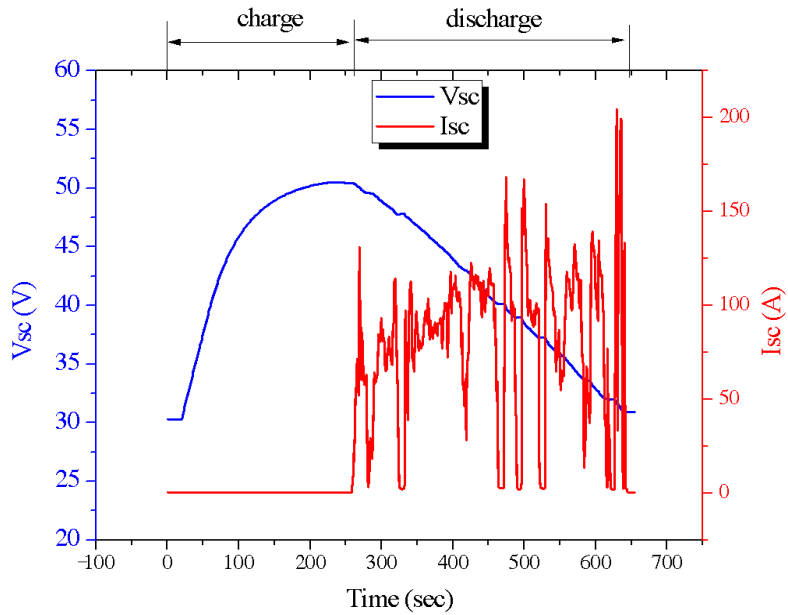
เมื่ออัดประจุจนเต็มที่แรงดันสุดท้ายของการชาร์จ 50.49V กระแส 79.15A เวลาชาร์จ 222 s ใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 3428.44W กำลังไฟฟ้าสูงสุด 4100.26W กำลังไฟฟ้าต่ำสุด 2052.51W จากนั้นทำการวิ่งทดลองจริงตามเส้นทางที่กำหนดโดยใช้เวลา 381 s ระยะทางที่วิ่งได้ 1150 m ความเร็วเฉลี่ย 10.86 km/h ใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 591.78W กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1216.17W กำลังไฟฟ้าต่ำสุด 3.69W และผลตอบสนองของแรงดัน กระแส ดังรูปที่ 11 และพลังงานช่วงการประจุและช่วงการปล่อยประจุ โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวด จะตัดการจ่ายพลังงานที่แรงดันต่ำสุด 30.82V และพบว่าช่วงยานพาหนะเริ่มออกตัวพลังงานจะมีค่ามาก ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ค่ากระแส แรงดันไฟฟ้า ช่วงเบรกหรือชะลอเบรก



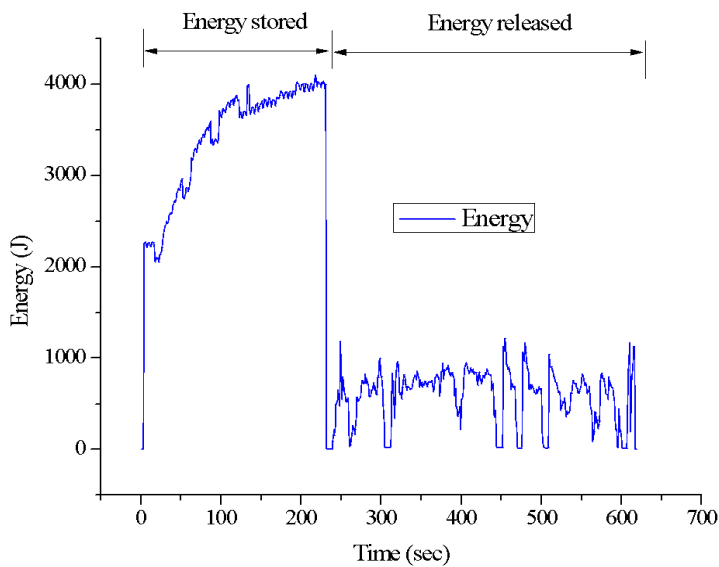
รูปที่ 9 ชาร์จที่แรงดัน 50.52V กระแส 20.33A



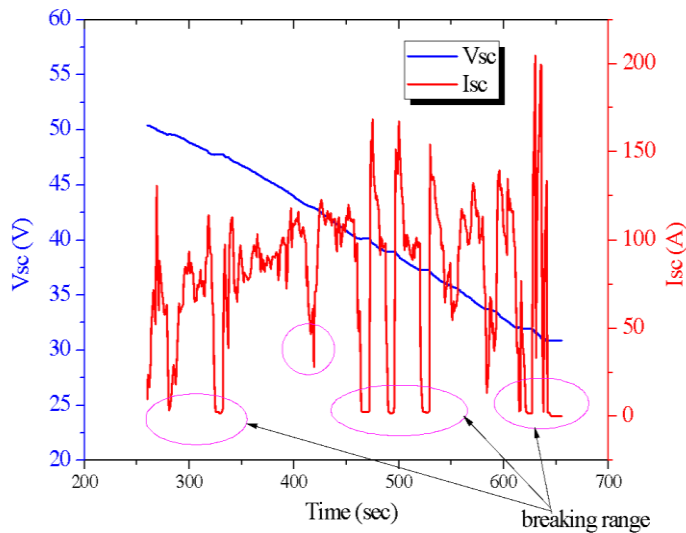
รูปที่ 10 พลังงานช่วงชาร์จที่แรง 50.52V กระแส 20.33A



รูปที่ 11 ชาร์จที่แรงดัน 50.49V กระแส 79.15A



รูปที่ 12 พลังงานช่วงชาร์จ 50.49V กระแส 79.15A



รูปที่ 13 กระแส แรงดันช่วงเบรก และชะลอเบรก

3.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า

ทดสอบเก็บประจุที่กระแสค่าต่างๆ จากนั้นได้ทดลองวิ่งตามเส้นทางจริงทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด 97.06% ที่กระแสชาร์จ 20.33A และเมื่อเพิ่มกระแสชาร์จสูงขึ้นที่ 79.15A จะทำให้ประสิทธิภาพลดลงเป็น 17.26% ดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการชาร์จที่กระแสต่ำจะทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่เมื่อชาร์จที่กระแสสูง จะทำให้ประสิทธิภาพลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 14

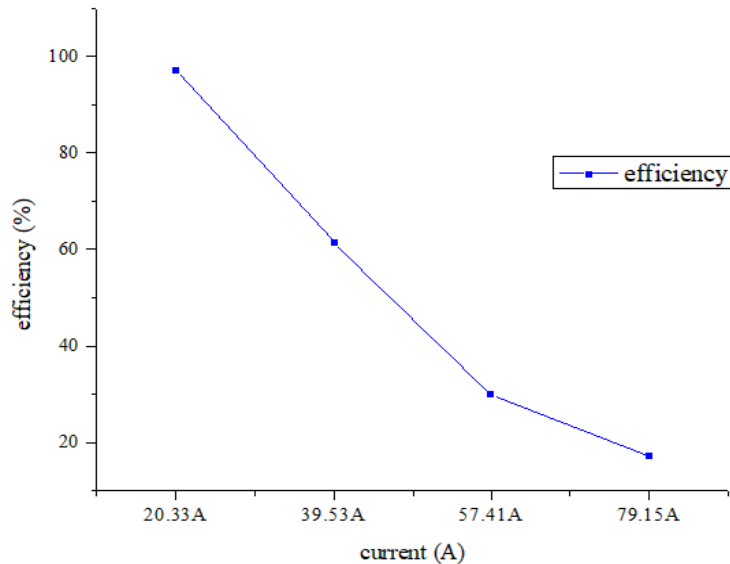
3.4 การวิเคราะห์จุดคุ้มค่าและคุ้มทุน

จุดคุ้มค่าและคุ้มทุนจากการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแทนแบตเตอรี่ ของการวิจัยในครั้งนี้ ใช้เงินลงทุนเป็นจำนวนเงิน 89000 บาท อายุการใช้งาน 10 ปี คิดเป็นเงินลงทุน 8900 บาทต่อปี และต้นทุนแปรผัน 1000 บาท เมื่อนำไปเทียบกับการใช้แบตเตอรี่ขนาด 12V, 150A ราคา 7800 บาทต่อลูก รวมทั้งหมด 6 ลูก

ตารางที่ 1 พลังงานที่ใช้ชาร์จและขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า

I _{ch} (A)	Time (s)		P _s (W)	P _r (W)	η (%)
	Charge	Discharge			
20.33	447	315	822.47	798.29	97.06
39.53	310	388	1459.30	896.92	61.46
57.41	238	313	2484.53	743.39	29.92
79.15	222	381	3428.44	591.78	17.26

เป็นเงิน 46800 บาท มีอายุการใช้งาน 2 ปี คิดเป็นเงินลงทุน 23400 บาทต่อปี และต้นทุนแปรผัน 1000 บาท พบว่าจุดคุ้มทุนการใช้แบตเตอรี่ 7900 บาท ส่วนจุดคุ้มทุนตัวเก็บประจุยิ่งยวด 22400 บาท และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจุดคุ้มทุนการใช้แบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด จะทำให้จุดคุ้มทุนคือ 4 เดือน 7 วัน หรือ 127 วัน



รูปที่ 14 ประสิทธิภาพตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาระบบที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นแหล่งจ่ายพลังงานสามารถขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้ประสิทธิภาพสูงสุด 97.06% โดยวิ่งไป กลับระหว่างอาคาร และวิ่งได้ตามระยะทางที่กำหนดไว้ โดยระยะทางที่วิ่งได้ 1100 เมตร ความเร็วเฉลี่ย 12.57 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทุกครั้งที่ยานพาหนะวิ่งกลับถึงตัวอาคารจะต้องนำรถเข้าชาร์จประจุใหม่ทุกครั้ง ซึ่งผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ ส่วนจุดคุ้มค่าและคุ้มทุนจากการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าคือ 127 วัน ซึ่งความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาใช้งานแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าในระยะทางที่เหมาะสมกับขนาดความจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถทำได้เป็นที่น่าพอใจ

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช) และเสร็จสมบูรณ์เนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุวลักษณ์ เวชวิทยาลัง อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ดร.พรสิริกอง นวล รองอธิการบดี ที่ให้การสนับสนุนรวมทั้งคำปรึกษาแนะนำ และเสนอข้อคิดเห็นที่ดีเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านทั้งสองเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ คณาจารย์ และนักศึกษา สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ที่ให้ความร่วมมือในการจัดทำงานวิจัย ตลอดจนการทดลองหาข้อมูล และเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Tahtawi and A. Rohmam, Simple supercapacitor charging scheme in electric car simulatot by using direct current machine, The International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Proceeding, 2015, 562-567.
- [2] J. Cao and A. Emadi, A new battery ultracapacitor hybrid energy storage system for electric hybrid and plug-In hybrid electric vehicles, IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1), 122-132.
- [3] D. Hwang, J. Park and J. Jung, A study on the life time comparison for electric double layer capacitors using accelerated degradation test, International Conference on Quality Reliability Risk Maintenance and Safety Engineering, Proceeding, 2011, 302-307.
- [4] G. Joos, M. Freige, and M. Dubois, Design and simulation of a fast charging station for PHEV/EV batteries, International Conference Electrical Power & Energy, Electrical Power and Energy Conference, Proceeding, 2010, 1-5.
- [5] J. Schroeder, B. Wittig and F. Fuchs, High efficient battery backup system for lift trucks using interleaved-converter and increased EDLC voltage range, Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010, 2334-2338.
- [6] J. Boadu, M. Abouzied and E. Sinencio, An efficient and fast Li-ion battery charging system using energy harvesting or conventional sources, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 66(9), 7383-7394.
- [7] K. Hata, N. Watanabe and K. Sung, A series or parallel changeover system using battery with EDLC for EV, European Conference on Power Electronics and Applications, 2013, 1-10.
- [8] J. Li, Y. Chen and Y. Liu, Research on a stand-alone photovoltaic system with a supercapacitor as the energy storage device, International Conference on Future Energy Environment and Materials, Energy Procedia, 2012, 1693-1700.
- [9] www.maxwell.com/products/ultracapacitors/48v-module-with-durablue (Accessed on 10 February 2017)
- [10] M. Freige, G. Joos and M. Dubois, Energy management & scheduling in a fast charging station for PHEV batteries, International Conference Power and Energy Society General Meeting, Proceeding, 2011, 1-5.
- [11] A. Mirzaei, A. Jusoh, Z. Salam, E. Adib and H. Farzanehfard, Analysis and design of a high efficiency bidirectional DC-DC converter for battery and ultracapacitor applications, International Conference on Power and Energy, Proceeding, 2010, 803-806.



- [12] M. Y. Ayad, M. Becherif, A. Aboubou and M. Wack, Electrical vehicle hybridized by supercapacitors, International Energy Conference, 2010, 79-84.
- [13] R. Chakole, M.V. Palandurkar and M.M. Renge, Energy management of supercapacitor with DC-DC converter, International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, Proceeding, 2016, 1-6.
- [14] R. Bodnar, W. R. White, A 250W/30A fast charger for ultracapacitors with direct mains connection, European Conference on Circuit Theory and Design, Proceeding, 2011, 813-816.
- [15] X. Jiang, J. Zhang and W. Jian, The analysis of ultracapacitor charging efficiency international conference on computational and information sciences, Proceeding, 2013, 1198-1201.
- [16] www.alke.com/break-even-point-electric-cars. (Accessed on 13 January 2019)