

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริด ผสานแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด และตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

ปฐพีพัฒน์ เตชะลิ้มสกุล

สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

จักรพันธ์ นันทพันธุ์กุล*

สาขาวิศวกรรมเมคาทรอนิกส์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2549 4755 อีเมล: jakrapan_n@mutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2025.09.003

รับเมื่อ 14 มกราคม 2568 แก้ไขเมื่อ 30 เมษายน 2568 ตอบรับเมื่อ 20 มิถุนายน 2568 เผยแพร่ออนไลน์ 17 กันยายน 2568

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด (HESS) ที่ผสมผสานกันระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor; SC) และแบตเตอรี่ โดยอาศัยหลักการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบแขวนลอยผ่านการใช้ตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน (RSA) พร้อมกับการติดตั้งระบบเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่ (RBS) สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดกลางที่ใช้มอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) ในสถานการณ์เบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่ กลไกโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมระบบ RBS เพื่อปรับรูปคลื่นการสลับของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายไฟสามเฟสให้เหมาะสม จากนั้นถ่ายโอนพลังงานการเบรกดังกล่าวไปยังอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน นอกจากนี้ SC ที่ติดตั้ง RSA ยังสามารถดูดซับพลังงานการสั่นสะเทือนของยานพาหนะ และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อกลับเข้าสู่อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน การทดลองพบว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบไฮบริด ร่วมกับ RSA และ RBS เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งมีระยะทางการขับขี่ 134.19 กิโลเมตร (13 รอบ) และ 184.21 กิโลเมตร (18 รอบ) ตามลำดับ ในขณะที่ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีทั้งระบบ RBS และ RSA มีระยะทางการขับขี่สูงถึง 210.13 กิโลเมตร (21 รอบ) ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดที่ร่วมกับ RAS และ RBS สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการขับขี่ได้ถึง 56.59% เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้เพียง RSA นอกจากนี้ยังยึดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้า ตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริด ตัวเก็บประจุยิ่งยวด PMSM มอเตอร์

การอ้างอิงบทความ: ปฐพีพัฒน์ เตชะลิ้มสกุล และ จักรพันธ์ นันทพันธุ์กุล, “การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริด ผสานแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด และตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 36, ฉบับที่ 1, หน้า 1-13, เลขที่บทความ 261-077875, ม.ค.-มี.ค. 2569, doi: 10.14416/j.kmutnb.2025.09.003.



Performance Analysis of a Hybrid Energy Storage System Combining Batteries, Supercapacitors, and RSA for Electric Vehicles

Pataphiphat Techalimsakul

Program in Electronics and Automation Systems Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

Jakrapan Nantaphunkul*

Program in Mechatronics Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2549 4755, E-mail: jakrapan_n@mutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2025.09.003

Received 14 January 2025; Revised 30 April 2025; Accepted 20 June 2025; Published online: 17 September 2025

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article presents an approach to enhance the performance of a Hybrid Energy Storage System (HESS) that integrates supercapacitors (SC) and batteries. The system is based on vibration energy harvesting using a Regenerative Shock Absorber (RSA), in conjunction with a Regenerative Braking System (RBS), designed for medium-sized electric vehicles driven by a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM). During regenerative braking, an Artificial Neural Network (ANN) functions as the RBS controller, optimizing the switching waveform of the three-phase inverter power supply. The recovered braking energy is subsequently transferred to the energy storage devices. Additionally, the SCs coupled with the RSA are capable of absorbing vehicular vibration energy and converting it into electrical energy, which is also fed back into the storage system. Experimental results reveal that electric vehicles equipped solely with either RSA (HESS_RSA) or RBS (HESS_RBS) achieved driving ranges of 134.19 km (13 cycles) and 184.21 km (18 cycles), respectively. In contrast, the configuration integrating both RBS and RSA (HESS_RBS_RSA) attained a maximum driving range of 210.13 km (21 cycles). Furthermore, the HESS integrated with both RSA and RBS improved driving efficiency by up to 56.59% compared to the system using only RSA. This hybrid system also contributes to prolonging battery lifespan.

Keywords: Electric Vehicles, RSA, HESS, Supercapacitor, PMSM

Please cite this article as: P. Techalimsakul and J. Nantaphunkul, "Performance analysis of a hybrid energy storage system combining batteries, supercapacitors, and RSA for electric vehicles," *The Journal of KMUTNB*, vol. 36, no. 1, pp. 1-13, ID. 261-077875, Jan.-Mar. 2026 (in Thai), doi: 10.14416/j.kmutnb.2025.09.003.

1. บทนำ

ปัจจุบันการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากเครื่องยนตสันดาปภายในประมาณ 4.6 เมตริกตันต่อปี โดยแบ่งเป็นการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากน้ำมันเบนซินและดีเซลประมาณ 8,887 และ 10,180 กรัม คาร์บอนไดออกไซด์/แกลลอน [1] ตามลำดับ จึงส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขนส่งทางบกนับว่าเป็นแหล่งที่มาหลักของมลพิษทางอากาศในเขตเมือง เมื่อทั่วโลกต้องเผชิญกับคุณภาพอากาศที่เสื่อมลง ประเทศต่าง ๆ หลายแห่ง อาทิ เช่น สหรัฐอเมริกา ยุโรป จีน และญี่ปุ่น ได้มีการนำเสนอนโยบายด้านยานยนต์ไฟฟ้า (EV) เป็นวิธีแก้ไขปัญหามลพิษจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากเชื้อเพลิงฟอสซิล [2], [3] นอกจากนี้การแทนที่ยานยนตสันดาปภายในด้วยยานยนต์ไฟฟ้าเริ่มมีบทบาทในหลายประเทศทั่วโลก เนื่องจากไม่มีการปล่อยมลพิษจากท่อไอเสียจึงสามารถช่วยลดปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้คุณภาพอากาศในเขตเมืองดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากยานยนต์ไฟฟ้าใช้เทคโนโลยีใหม่เพื่อสร้างความสะดวกสบายและปลอดภัยในการขับขี่มากยิ่งขึ้น [2]–[6] โดยทั่วไปแล้วน้ำมันไฟฟ้าจะมีราคาถูกกว่าน้ำมันเบนซิน และยานยนต์ไฟฟ้ามีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวได้น้อยกว่า ทำให้ต้นทุนการบำรุงรักษาลดลง ในบางภูมิภาครัฐบาลและองค์กรต่าง ๆ เสนอแรงจูงใจ เช่น เครดิตคาร์บอนหรือการชดเชย เพื่อส่งเสริมการนำยานยนต์ไฟฟ้ามาใช้ อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังคงใช้แบตเตอรี่ไฟฟ้าเคมีสำหรับระบบกักเก็บพลังงานหลัก แบตเตอรี่ไฟฟ้าเคมียังคงมีข้อจำกัดมากมาย เช่น อายุการใช้งานที่สั้น ความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ต้นทุนสูง และระยะทางการขับขี่ที่จำกัด ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการเบรกแบบสร้างพลังงานใหม่ในภายหลัง [7], [8]

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ มีหลายงานวิจัยนำเสนอหลักการกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดในการรวมตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Super Capacitor) ซึ่งต่อไปนี้จะถูกเรียกว่า SC และเซลล์แบตเตอรี่เข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มอัตราเร่งของยานพาหนะและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยใช้กลยุทธ์ในการจัดการพลังงานต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และการกระจาย

พลังงานในระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด [9] พบว่างานวิจัยก่อนหน้าส่วนใหญ่เสนอระบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มี SC และแบตเตอรี่เข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยแนวทางดังกล่าวสามารถนำไปใช้กับการกำหนดค่าไฮบริด SC และแบตเตอรี่เพื่อนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติจริงได้อย่างแม่นยำ โดยใช้ขั้นตอนการควบคุมตามกฎหรือใช้ระเบียบวิธีฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic)

เมื่อไม่นานมานี้มีการนำเสนอวิธีปรับปรุงประสิทธิภาพของยานยนต์ไฟฟ้าด้วยระบบเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่ [10] โดยใช้ระบบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงบิดเชิงลบเพื่อแปลงพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเติมพลังงานให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานได้ การกระจายพลังงานจลน์ระหว่างการเบรกทำได้โดยการควบคุมกำลังของระบบอิเล็กทรอนิกส์บนรถอย่างพิถีพิถันเพื่อการจัดการพลังงานอย่างครอบคลุม ดังนั้นการเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่จึงพิสูจน์แล้วว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูง และเพิ่มศักยภาพโดยรวมของยานยนต์ไฟฟ้า มีงานวิจัยต่าง ๆ มากมายเสนอวิธีการควบคุมประสิทธิภาพการเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่ เช่น กลยุทธ์ตามกฎเกณฑ์ [11] กลยุทธ์การควบคุมพีไอดี (PID Controller) [10]–[13] และแนวทางการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network; ANN) [14] อีกวิธีหนึ่งที่แพร่หลาย คือ การใช้เซลล์พลังงานผ่านวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) จากการเสียดสีของยาง [15] ยกตัวอย่างเช่น Maurya [16] นำเสนอวิธีเก็บเกี่ยวพลังงานความเครียดจากยางรถยนต์ ซึ่งเกิดพลังงานเอาท์พุตที่คล้ายกัน 580 ไมโครวัตต์ ที่ 16 เฮิรตซ์ [16] เมื่อไม่นานมานี้ Qian [17] เสนอรถยนต์ที่ใช้เครื่องกำเนิดนาโนโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Nanogenerator) แบบแม่เหล็กสำหรับการตรวจสอบระบบแรงดันลมยาง [17] แนวทางแก้ไขข้างต้นได้รับความสนใจอย่างมาก โดยเฉพาะพลังงานแวนดอลอยที่เกิดขึ้นใหม่ นอกจากนี้ยังรายงานการใช้โซลาร์เซลล์สำหรับสร้างพลังงานใหม่ และมีประสิทธิภาพสูงโดยใช้บอลสกรูคู่หนึ่งที่มีลักษณะแตกต่างกัน และคลัตช์โอเวอร์รันสองตัวที่มีตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับการจัดเก็บ การใช้บอลสกรูสองตัวที่มีทิศทางหมุนและระยะพิชชของสกรูต่างกันทำให้การ

ดูดซับแรงสั่นสะเทือนที่เหนือกว่าและการขับเคลื่อนที่นุ่มนวลยิ่งขึ้นที่สำคัญการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังสามารถกักเก็บพลังงานที่รวบรวมไว้ได้อย่างปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ [18]

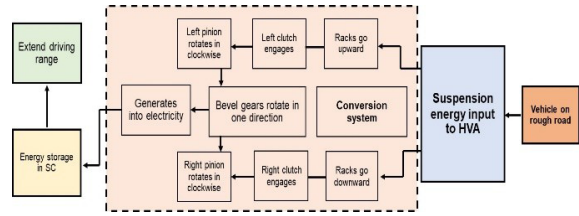
อย่างไรก็ตาม ในสถานการณ์ที่การเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่ทำงานอยู่ แรงดันไฟฟ้าของของวงจร DC จะเพิ่มขึ้น ทำให้โปรแกรมการสร้างพลังงานใหม่เปลี่ยนเส้นทางพลังงานจากการเบรกไปกักเก็บใน SC ด้วยการควบคุมผ่าน ANN อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดในการใช้อินเตอร์เฟซ (Interface) อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูง เนื่องจากต้องใช้ตัวแปลง DC/DC แบบสองทิศทางเพื่อเชื่อมต่อแบตเตอรี่กับ SC เข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้ต้นทุนสูงขึ้น [8]–[13] นอกจากนี้ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงยังทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็น และส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่ในภายหลัง

งานวิจัยนี้เสนอการใช้ระบบไฮบริดที่เชื่อมต่อระหว่างแบตเตอรี่ และ SC เข้าด้วยกัน และใช้ตัวแปลง DC/DC แบบทิศทางเดียว อีกทั้งยังติดตั้งระบบเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่ (Regenerative Braking; RBS) และตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน (Regenerative Shock Absorber; RSA) สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานแวนลอยจากการสั่นสะเทือนสำหรับรถไฟฟ้า ขนาคกลางที่ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ PMSM 30 กิโลวัตต์ โดยในสภาวะการเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่ แรงดันไฟฟ้าลิงก์ DC จะถูกกระตุ้น การติดตั้งโปรแกรม ANN ใน RBS ส่งผลให้เกิดรูปแบบการสลับที่ที่ดีที่สุดของอินเวอร์เตอร์สามเฟส ดังนั้นการถ่ายโอนพลังงานเบรกจะถูกกักเก็บไว้ใน SC เพื่อถ่ายโอนสนับสนุนการเพิ่มระยะทางขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า และยังสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้ [19]–[22]

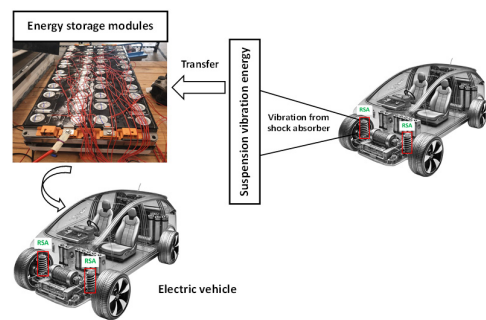
2. วิธีการทดลอง

2.1 สถานการณ์การเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่

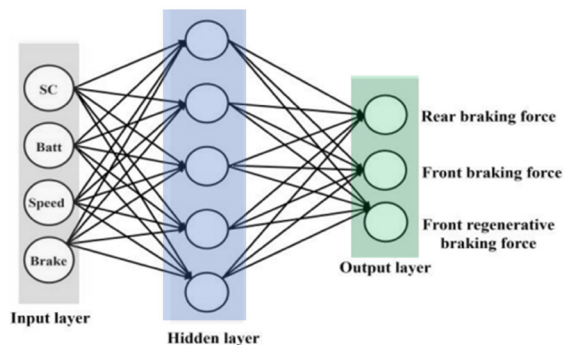
รูปที่ 1 แสดงภาพแผนผังของระบบกักเก็บพลังงานที่เปลี่ยนพลังงานจลน์ของรถที่กำลังจะหยุดกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้า แล้วนำไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่หรือ SC แทนที่จะสูญเสียเป็นความร้อนเหมือนเบรกปกติทั่วไป ซึ่งลักษณะพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถตรวจสอบ



รูปที่ 1 แผนผังของระบบกักเก็บพลังงานไฮบริด ผสานแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด และตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

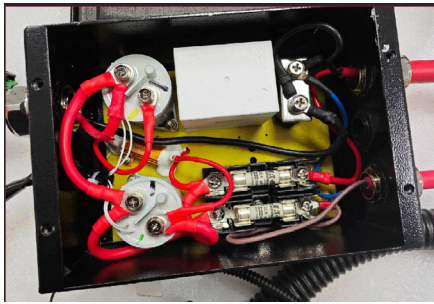


รูปที่ 2 ระบบกักเก็บพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนด้วย RSA

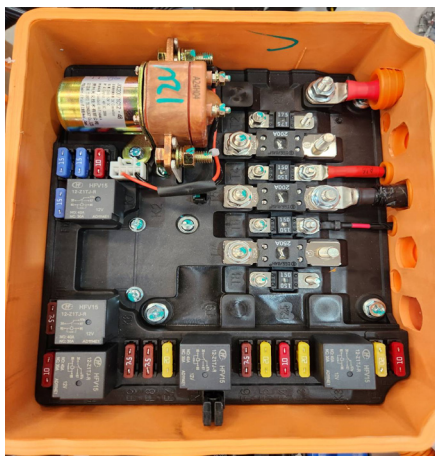


รูปที่ 3 แผนผังอัลกอริทึมของเครือข่ายประสาทเทียม

เพิ่มเติมได้ในตารางที่ 1 เมื่อเปิดใช้งาน SC แรงดันลิงก์ DC จะเพิ่มขึ้น ทำให้พาวเวอร์ไดโอดนำกระแสไปข้างหน้า อินเวอร์เตอร์สามเฟสจะปิดสวิตช์ด้านสูงของฮาล์ฟบริดจ์ และด้านล่างจะทำการปรับความกว้างพัลส์ (Pulse) เพื่อควบคุมพลังงาน จากนั้นพลังงานจะถูกถ่ายโอนและเก็บไว้ใน SC โดยมีตัวแปลง DC/DC ช่วยจัดการการถ่ายโอนพลังงานเบรกไปยัง SC (รูปที่ 2) การติดตั้ง ANN ดังรูปที่ 3 ร่วมกับ



รูปที่ 4 วงจรรีเลย์ (Relay)



รูปที่ 5 วงจรชาร์จล่วงหน้า (Pre Charge)

RBS กลไกนี้จะช่วยควบคุมและปรับแรงเบรกระหว่างล้อหน้าและล้อหลังประกอบด้วยความเร็วของรถ สถานะการชาร์จ (SOC) ของทั้ง SC และแบตเตอรี่ และจำนวนครั้งในการเบรกต่อการขับขี่ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและประสิทธิภาพการขับขี่ การออกแบบวงจรรีเลย์ (รูปที่ 4) จะจัดการการไหลของไฟฟ้าและควบคุมการสลับระหว่างโหมดเบรกและเร่งความเร็ว นอกจากนี้วงจรชาร์จล่วงหน้า (รูปที่ 5) ยังช่วยปกป้องส่วนประกอบและรับรองการทำงานที่ราบรื่นของระบบ

2.2 การออกแบบใช้อัลฟาสำหรับดูดซับพลังงานจากแรงสั่นสะเทือน

การบูรณาการระบบดูดซับแรงสั่นสะเทือน (ใช้อัลฟา) เข้ากับ SC และแบตเตอรี่ช่วยลดการสูญเสียพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนของตัวรถ โดยใช้คัลฟาได้รับการออกแบบ

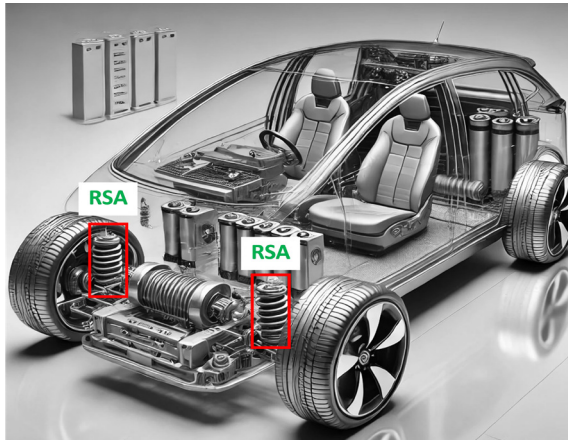
ให้ดูดซับแรงกระตุ้นและแรงสั่นสะเทือนจากพื้นผิวถนนที่ไม่เรียบ รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงานในยานยนต์ไฟฟ้า [10] ระบบไฮบริดอย่าง HESS ที่ใช้แหล่งพลังงานมากกว่า 1 ชนิด จะช่วยกระจายโหลดอย่างเหมาะสมเนื่องจากให้ SC รับแรงสั่น (พลังงานจ่ายเข้าเร็ว) แบตเตอรี่รับโหลดช้าแต่เก็บพลังงานได้นาน จึงช่วยลดภาระของแบตเตอรี่และควบคุมการไหลของพลังงานได้ดี รูปที่ 2 แสดงระบบติดตั้งตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน ซึ่งทำหน้าที่เก็บเกี่ยวและกักเก็บพลังงานที่เกิดจากแรงสั่นสะเทือนของตัวรถ โดยระบบประกอบด้วยสององค์ประกอบหลัก ได้แก่ ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานแบบแวนลอยและระบบกักเก็บพลังงาน

ตารางที่ 1 ลักษณะพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด

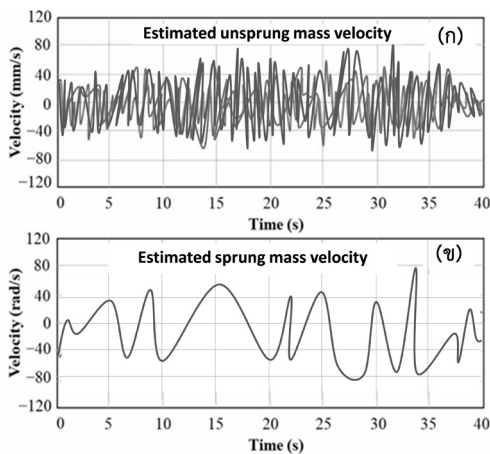
พารามิเตอร์	แบตเตอรี่	ตัวเก็บประจุยิ่งยวด
ชนิดของเซลล์	NMC	EDLC
แรงดันไฟฟ้าของเซลล์ (V)	~3.6-4.2	~2.1-3.3
อายุการใช้งาน (ปี)	5-10	>10
พลังงานจำเพาะ (Wh/kg)	~100-200	~5
วงจรรุ่นและขนาด	1P96S	-
จำนวนเซลล์ (pcs)	~96	~140
ความจุของระบบ	196 (Ah)	3000 F
พลังงานของระบบ (kWh)	60	-
แรงดันไฟฟ้าของระบบ (V)	355.2	380

2.2.1 ระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบแวนลอย

รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งของตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนซึ่งติดตั้งระหว่างโครงรถและตัวถังทั้งด้านในและด้านนอกกระบอกสูบ เมื่อขับขี่บนถนนขรุขระ การเร่งความเร็ว หรือการชะลอตัว แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะถูกจับผ่านการเคลื่อนไหวเชิงเส้นระหว่างสองกระบอกสูบ [23] รูปที่ 7 แสดงการจำลองความเร็วของช่วงล่างระหว่างมวล Sprung และ Unsprung โดยการดูดซับแรงสั่นสะเทือนมีประสิทธิภาพที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสามารถบันทึกความเร็วสูงสุดได้ถึง 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



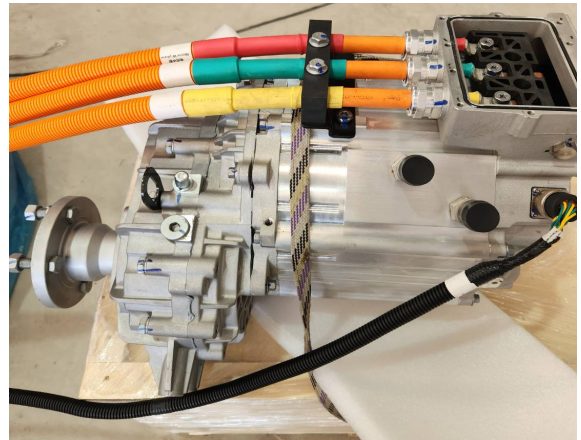
รูปที่ 6 การออกแบบตำแหน่งของตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนในยานยนต์ไฟฟ้า



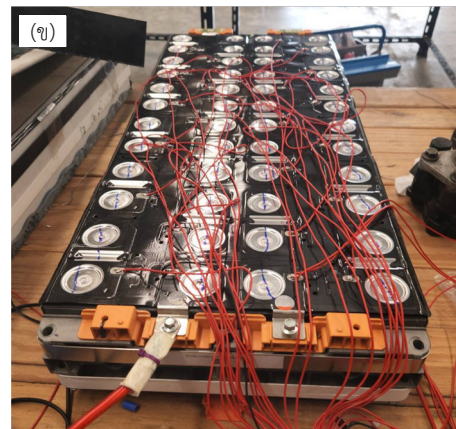
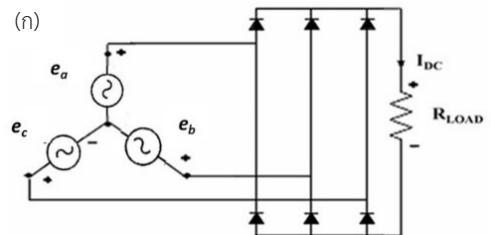
รูปที่ 7 การจำลองความเร็วมวลของช่วงล่างที่ 40 กม./ชม (ก) ประมาณการว่าไม่ได้สปริง และ (ข) ประมาณว่ามีการสปริงแล้ว [6]

2.2.2 ระบบกักเก็บพลังงาน

ความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนในระบบกันสะเทือนขึ้นอยู่กับความขรุขระของถนนและความเร็วของยานพาหนะ การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของความถี่และแอมพลิจูดนี้ส่งผลให้ความเร็วในการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความผันผวน ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เสถียร เพื่อแก้ปัญหานี้ มอเตอร์ PMSM (รูปที่ 8) สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสได้ อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 8 มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 9 วงจรเรียงการแปลงกระแสสลับสามเฟสให้เป็นกระแสตรงที่ (ก) แผนภาพ และ (ข) ระบบกักเก็บพลังงาน

สามเฟสไม่เหมาะสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่หรือจ่ายไฟให้โหลดไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงกระแสสลับสามเฟสเป็นกระแสพัลซิ่ง (Pulsating Current) โดยใช้ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง LM510N7 เพื่อใช้งานในระบบกักเก็บพลังงาน (รูปที่ 9)

2.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

สมการที่ (1) แรงหน่วงในระบบ RSA สมการนี้ใช้คำนวณแรงหน่วง (Damping Force) ที่เกิดขึ้นในระบบ RSA ซึ่งประกอบด้วยแรงกระตุ้นและแรงหน่วงจากองค์ประกอบต่าง ๆ มวลรวมของระบบ ค่าความหน่วงเชิงเส้น และความเร่ง

สมการที่ (2) ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการหมุน สมการนี้แสดงค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการหมุน ซึ่งคำนึงถึงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบส่งกำลัง: โดย คือ ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อวงแหวนเพื่องดจอก และแร็คพีนี้น ตามลำดับ

สมการที่ (3) การคำนวณพลังงานไฟฟ้าในระบบ RSA สมการนี้แสดงพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ RSA ซึ่งประกอบด้วยพลังงานที่ได้จากการเก็บเกี่ยวและส่วนที่สูญเสีย เช่น พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ และพลังงานที่สูญเสียไปในระบบ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เสนอการวิเคราะห์ระบบกำลังของยานพาหนะ ซึ่งจะตรวจสอบผลกระทบของพารามิเตอร์แบบจำลองของตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน เช่น แรงหน่วง (Damping Force) และแรงกระตุ้น (Impulse Force) โดยค่าความหน่วงที่เกิดขึ้นภายในตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน และแรงกระตุ้น สามารถแสดงสมการที่ (1) [24]

$$F_{damp} = F_e = m_{eq} \ddot{o} + L_c = m_{cylinder} + 2m_{rack} + \frac{\frac{I_g}{I^2} + I_{pg} + I_b + I_s + 2I_p}{r^2} \times \ddot{x} + \frac{1.5 \times k_e^2}{E_g E_{pg} E_b E_r p^2 r^2 (R_{ex} + R_{in})} \times \dot{x} \quad (1)$$

โดยที่ F_{damp} คือ แรงที่มีการหน่วง F_e คือ พลังงานที่ไปกระตุ้น $\ddot{o}$ คือ ความเร็วของการกระตุ้น และ E_g, E_{pg}, E_b และ E_r เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, เพื่องดจอก (Planetary Gear) เพื่องดจอก (Bevel Gear) และแร็คพีนี้น (Rack and Pinion) ตามลำดับ นอกจากนี้ $m_{cylinder}$ และ m_{rack} คือ มวลของกระบอกสูบด้านนอกและแร็คตามลำดับ ในทาง

กลับกัน I_{pg}, I_s, I_p, I_b และ I_g แสดงถึงความเฉื่อยของระบบเพื่องดจอก เพลา พีนี้น เพื่องดจอก และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นอกจากนี้ในสมการที่ (2) K_e หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์การหมุน ในขณะที่ R_{in} คือ ความต้านทานภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเฟส และ R_{ex} คือ ความต้านทานภายนอก ต่อมาตัวแปร r, p และ L_c แทน รัศมีเพื่อง อัตราทดเกียร์ และค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงเชิงเส้น ตามลำดับ

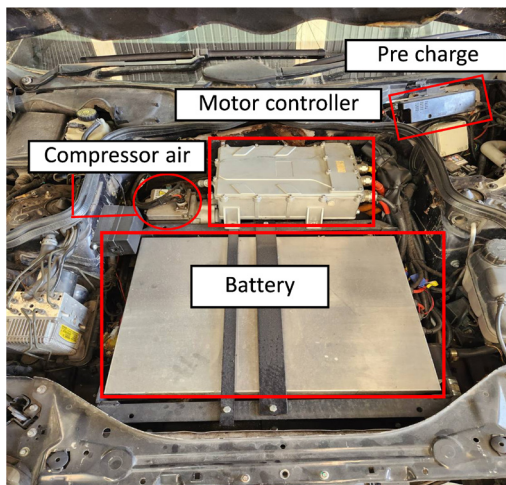
$$K_e = E_g E_{pg} E_b E_r \quad (2)$$

โดยที่ $P_{electical}$ คือ พลังงานไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยทั้งการเก็บเกี่ยวประจุแบบแฟร็กเมนต์ (Fragment Charge) ($P_{harvesting}$) และส่วนที่เสียไปกับค่าความต้านทานภายใน ($P_{in,lost}$) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่การคำนวณขึ้นส่วนที่สูญเสียไปจากค่าความต้านทานภายในดังแสดงในสมการที่ (3)

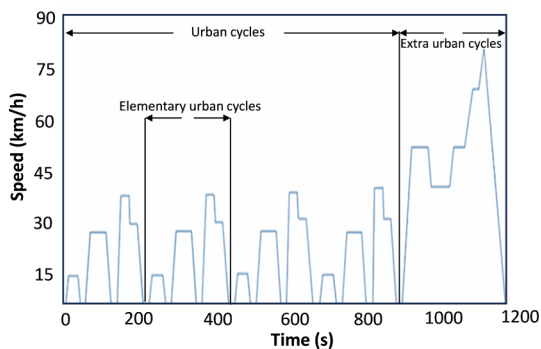
$$P_{electical} = P_{harvesting} = P_{in,lost} \quad (3)$$

3.1 การทดสอบ

งานวิจัยนี้ใช้ PMSM โดยมอเตอร์เหล่านี้จะสร้างแรงบิดที่สูงกว่าและมีประสิทธิภาพมากกว่ามอเตอร์ BLDC โดย PMSM ได้รับการออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัดและน้ำหนักเบา ยิ่งขึ้นที่ 30,000 วัตต์ ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของ ICE จะถูกถอดออกจากตัวรถ รวมถึงระบบไอเสีย ถึงเชื้อเพลิง และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อสร้างพื้นที่สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่ จากนั้นจะถูกแทนที่ด้วยระบบไฟฟ้าซึ่งรวมถึงส่วนประกอบหลักซึ่ง ได้แก่ แบตเตอรี่ NMC, PMSM, OBC และอินเวอร์เตอร์สามเฟส (สามารถดูการติดตั้งชุดอุปกรณ์เพิ่มเติมได้ในรูปที่ 10) ซึ่งน้ำหนักของยานพาหนะมักถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขที่ลดประสิทธิภาพโดยรวมของยานพาหนะ รูปที่ 11 เสนอแบบจำลองกราฟวัดความเร็วของวงจรการขับขี่ของยานยนต์ NEDC วงจรการขับขี่นี้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ช่วงสำคัญ คือ 1) Elementary Urban Cycles (วงจรรถในเมือง) จะมีการเร่งและเบรคบ่อยครั้ง ความเร็วต่ำ 2) Urban Cycles (วงจรในเมือง) ประกอบด้วย Elementary

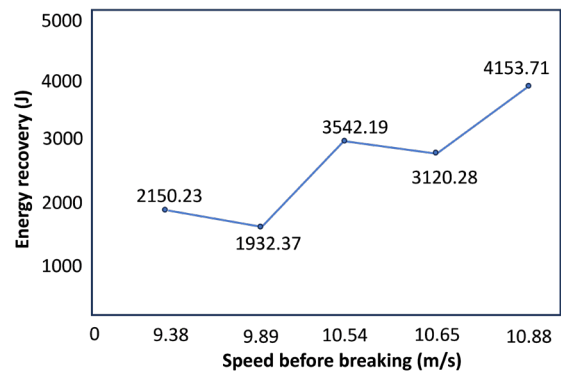


รูปที่ 10 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ในยานยนต์ไฟฟ้าขนาดกลาง



รูปที่ 11 แบบจำลองกราฟวัดความเร็วของวงจรการขับขี่ NEDC

Urban Cycles หลายรอบ (โดยทั่วไป 4 รอบ) และ 3) Extra-Urban Cycles (วงจรถนอกรถ) จำลองการขับขี่บนถนนหลวงหรือทางด่วน มีการเร่งเครื่องต่อเนื่องและวิ่งด้วยความเร็วสูงขึ้น ในรูปที่ 12 แสดงพลังงานของระบบการเก็บเกี่ยวการสั่นสะเทือนในความเร็วที่แตกต่างกันก่อนการเบรกในแต่ละช่วงของวงจร NEDC จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วก่อนการเบรกเพิ่มขึ้นที่ 10.88 (เมตร/วินาที) มีแนวโน้มในการนำพลังงานกลับมาใหม่ได้มากยิ่งขึ้นอันเนื่องมาจากพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าในขณะที่รถกำลังวิ่งบนถนนที่ไม่ราบเรียบรวมไปถึงความเร็วที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้เมื่อรถเบรกหรือลดความเร็ว มอเตอร์จะทำงานเป็น Generator ส่งกลับไปที่เก็บ SC พลังงานที่เก็บนี้สามารถนำกลับมาใช้ใน



รูปที่ 12 การเก็บเกี่ยวพลังงานก่อนการเบรกในความเร็วที่แตกต่างกัน

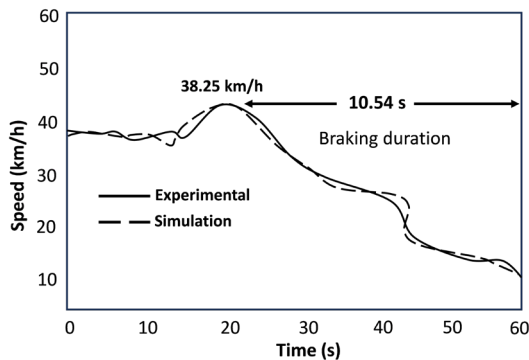
การเร่งความเร็วต่อไป โดยลดการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่หลักโดยตรง สามารถดูข้อมูลเพิ่มเติมได้ในตารางที่ 2

นอกจากการทดลองยังพบว่ารถใช้พลังงาน คือ 0.11 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลเมตร ระบบ RSA ที่วัดได้ คือ 0.11 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลเมตร ต่อหนึ่งรอบการขับขี่ (ซึ่งในการทดสอบ คือ ระยะทาง 10 กิโลเมตร) นั้นหมายความว่า RSA สามารถชดเชยพลังงานได้ประมาณ 10% ของพลังงานที่ใช้ในการขับขี่

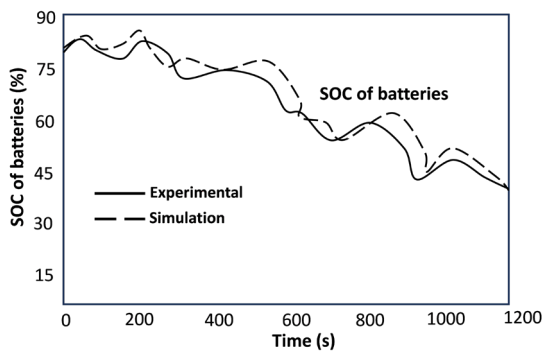
ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะเชิงทดลอง

รอบทดสอบ	ความเร็วก่อนการเบรก (m/s)	ความเร็วสุดท้ายหลังการเบรก (m/s)	พลังงานจลน์รวมก่อนการเบรก (J)	พลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่ (J)
1	9.38	9.33	27,432.39	2150.23
2	9.89	9.77	28,173.12	1932.37
3	10.54	10.47	28,639.28	3542.19
4	10.65	10.58	28,867.77	3120.28
5	10.88	10.75	29,085.24	4153.71

รูปที่ 13 แสดงการจำลองและการทดลองเกี่ยวกับความเร็วและเวลาที่ต้องการภายในระยะเบรกที่ 10.54 วินาที จะเห็นว่าการเบรกภายในช่วง 10.54 วินาที เริ่มจากนาที่

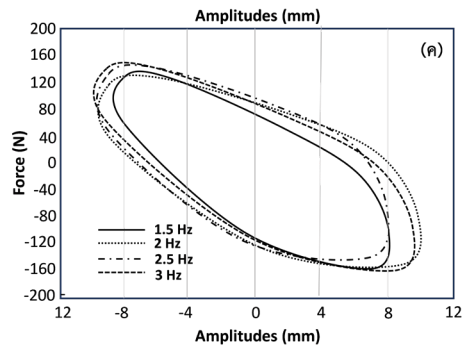
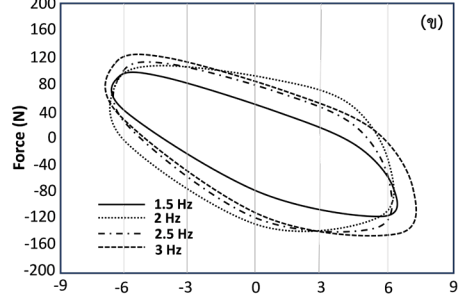
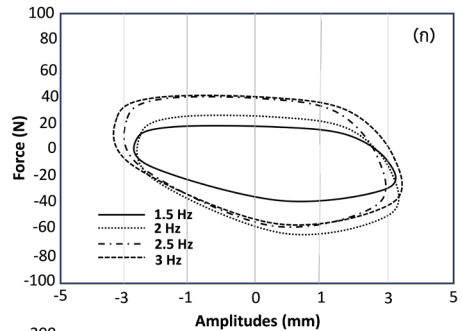


รูปที่ 13 การจำลองและการทดลองเกี่ยวกับความเร็วและเวลาที่ต้องการภายในระยะเบรก 10.54 วินาที



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดสอบสถานะประจุของแบตเตอรี่

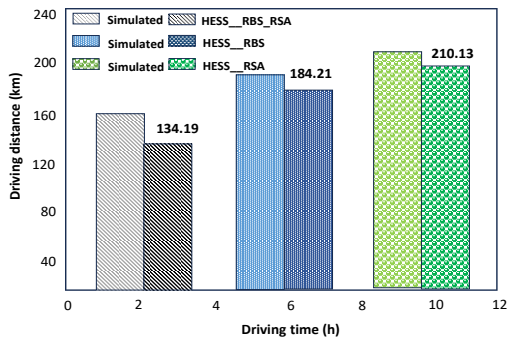
ความเร็วเริ่มต้นที่ 38.25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การประเมิณนี้ดำเนินการเพื่อประเมิณ SC ก่อนและหลังการเบรก ผลการจำลอง แสดงว่าระหว่างการเบรกก่อนหน้าและช่วงเวลาลงจากนั้น 10.54 วินาที แทนความเร็วเฉลี่ย 38.25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ก่อนเบรก SC มีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 5.72 โวลต์ ผลการเปรียบเทียบกราฟแสดงสถานะประจุของแบตเตอรี่ระหว่างการจำลองและการทดสอบจริงพบว่าทั้งสองกราฟมีความใกล้เคียงกันสูง โดยเส้นกราฟแทบจะซ้อนทับกันตลอดช่วงเวลา แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองพฤติกรรมของแบตเตอรี่ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพดังกล่าว เช่น แบบจำลองที่เลือกใช้ ค่าพารามิเตอร์แบตเตอรี่ วิธีคำนวณ SOC และ ค่าเริ่มต้นและเงื่อนไขแวดล้อม



รูปที่ 15 จำลองแรงการกระจัดสำหรับแอมพลิจูดของ (ก) 3 มม. (ข) 6 มม. และ (ค) 9 มม. ได้ความถี่ 1.5, 2, 2.5 และ 3 เฮิรตซ์

รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดสอบสถานะประจุของแบตเตอรี่ด้วยระบบกักเก็บพลังงานไฮบริด การเบรกโดยใช้ SC ตามลำดับ โดยเริ่มจากสถานะการชาร์จเริ่มต้นที่ 85.54% เมื่อระบบกักเก็บการเบรกสำหรับค่า SOC ของแบตเตอรี่ เริ่มต้นที่ 97.58%

ในรูปที่ 15 (ก)-(ค) เป็นการแสดงรูปแรงการกระจัดที่จำลองให้สอดคล้องกับระบบ RSA ที่มีแอมพลิจูด 3, 6 และ 9 มิลลิเมตร โดยพิจารณาความถี่ของ 1.5, 2, 2.5 และ 3 เฮิรตซ์ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า RSA ตรงตามเกณฑ์



รูปที่ 16 ระยะการขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขทั้งสามแบบ

สำหรับตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของการหน่วงและความยืดหยุ่น แรงการเคลื่อนที่ของช่วงการเคลื่อนที่แบบกำหนดตำแหน่งที่ไม่อยู่ในแนวราบและมีรูปร่างเป็นลักษณะคล้ายวงรีด้วยความเฉื่อยของมวลที่สัมพันธ์กับความลาดชันเชิงลบ ซึ่งเป็นการบรรลุผลสำเร็จของแรงในอุดมคติด้วยการใช้พารามิเตอร์ดังกล่าวที่เหมาะสมที่สุด

ในรูปที่ 16 มีการเปรียบเทียบระยะทางและระยะเวลาในการขับขี่ (รอบการขับขี่) ของยานยนต์ไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด ในการกำหนดค่าที่แตกต่างกัน สถานการณ์จำลองจะแบ่งออกเป็นสามระบบ คือ ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดที่ใช้เฉพาะตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน (HESS_RSA) ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดที่ใช้เฉพาะระบบเบรกแบบจ่ายพลังงานใหม่ (HESS_RBS) และ ระบบกักเก็บพลังงานไฮบริดที่ใช้ทั้งสองระบบ RBS และ RSA (HESS_RBS_RSA) ข้อสังเกตอันเป็นที่น่าพอใจถูกจำลองโดยการใช้วงจรขับขี่หนึ่งรอบครอบคลุมระยะทางประมาณ 10 กิโลเมตร และใช้เวลาประมาณ 15 นาที จึงเสร็จสมบูรณ์ จากการทดลองพบว่า HESS_RSA เพียงอย่างเดียวขับขี่ได้เพียง 134.19 กิโลเมตร (13 รอบ) ในขณะที่ HESS_RBS ขับขี่ได้เพิ่มขึ้นเป็น 184.21 กิโลเมตร (18 รอบ) และ HESS_RBS_RSA สามารถขับขี่ได้สูงถึง 210.13 กิโลเมตร (21 รอบ) สามารถดูข้อมูลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการขับขี่กับงานวิจัยอื่น ๆ และการวิเคราะห์ต้นทุนต่อประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นได้ในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระบบกักเก็บพลังงานกับงานวิจัยอื่น ๆ

กลไกระบบกักเก็บพลังงาน	ประสิทธิภาพ	อ้างอิง
SC/Battery ร่วมกับ RSA	45.00%	[25]
SC/Battery ร่วมกับ RSA	39.46%	[26]
SC/Battery ร่วมกับ RSA	39.30%	[27]
SC/Battery ร่วมกับ RSA	62.00%	[28]
SC/Battery ร่วมกับ RSA	56.59%	งานนี้

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ต้นทุนต่อประสิทธิภาพ

ปัจจัย	แบตเตอรี่	SC	HESS
ต้นทุนต่อ kWh	ต่ำกว่า	สูงกว่า	ปานกลาง (ขึ้นอยู่กับสัดส่วน)
ความสามารถจ่าย-รับเร็ว	ต่ำ	สูง	สูง (เมื่อรวมกัน)
อายุการใช้งาน	~2,000–5,000 cycles	>1,000,000 cycles	ดีกว่า แบตเตอรี่ลิเธียม
ประสิทธิภาพ reg. braking	จำกัด (เพราะรับพลังงานเร็วไม่ได้)	ดี	ดีที่สุด
น้ำหนัก/ขนาด	ปานกลาง	เล็ก	ปรับได้ตามดีไซน์

จากตารางที่ 3 และ 4 วิเคราะห์ได้ว่าหากระบบเดิมเก็บพลังงานเบรกกลับมาจะได้น้อยและสูญเสียพลังงานทั้งเปล่า แต่เมื่อเพิ่ม SC เข้าไป (HESS) สามารถเก็บกลับได้มากขึ้น เพิ่มระยะทาง ลดใช้พลังงาน ลดภาระต่อแบตเตอรี่ ทำให้ลดต้นทุนระยะยาว

4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้นำเสนอการพัฒนากระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด (Hybrid Energy Storage System; HESS) ที่ผสมผสานแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor; SC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้าขนาดกลาง ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor; PMSM) ระบบนี้มุ่งเน้นการ

เก็บเกี่ยวพลังงานจากสองแหล่งสำคัญ ได้แก่ การเบรกแบบ
จ่ายพลังงานใหม่ (Regenerative Braking System; RBS)
และแรงสั่นสะเทือนจากถนนผ่านตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน
(Regenerative Shock Absorber; RSA)

ในระบบ RBS มีการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial
Neural Network; ANN) เพื่อควบคุมรูปคลื่นการสลับของ
อินเวอร์เตอร์สามเฟสให้เหมาะสมที่สุดในการเก็บเกี่ยว
พลังงานจากการเบรกและถ่ายโอนไปยัง SC สำหรับ RSA
มีการออกแบบระบบใช้คัปเพอร์เพื่อดูดซับพลังงานจากแรง
สั่นสะเทือนและแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งเก็บไว้ใน SC

จากผลการทดลอง ระบบ HESS ที่ใช้เฉพาะ RSA
(HESS_RSA) ยานยนต์ไฟฟ้ามีระยะทางการขับขี่ 134.19
กิโลเมตร (13 รอบการขับขี่) ขณะที่ระบบ HESS ที่ใช้เฉพาะ
RBS (HESS_RBS) เพิ่มระยะทางการขับขี่ขึ้นเป็น 184.21
กิโลเมตร (18 รอบการขับขี่) และระบบ HESS ที่ผสมทั้ง
RBS และ RSA (HESS_RBS_RSA) สามารถเพิ่มระยะทางการ
ขับขี่สูงสุดถึง 210.13 กิโลเมตร (21 รอบการขับขี่) การผสม
RBS และ RSA เข้ากับระบบ HESS ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ
การขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าสูงถึง 56.59% เมื่อเปรียบเทียบกับ
การใช้ RSA เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ ระบบยังช่วยยืด
อายุการใช้งานแบตเตอรี่ ลดความสูญเสียพลังงาน และ
เพิ่มประสิทธิภาพการจัดการพลังงานโดยรวม ทำให้ระบบนี้
มีศักยภาพในการนำไปพัฒนาต่อยอดในเชิงพาณิชย์และ
การใช้งานจริงสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] U.S. Environmental Protection Agency, Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle, 2023.
- [2] S. Aminzadegan, M. Shahriari, F. Mehranfar, and B. Abramovi, "Factors affecting the emission of pollutants in different types of transportation: A literature review," *Energy Reports*, vol. 8, 2022.
- [3] L. B. Janos, C. S. Remzi, S. Detlef, and P. Ralf, "How to reduce the greenhouse gas emissions

and air pollution caused by light and heavy-duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks," *Environment International*, vol. 152, 2021.

- [4] L. B. Janos, C. S. Remzi, P. Ralf, and D. Stolten, "The impact of diesel vehicles on NOx and PM10 emissions from road transport in urban morphological zones: A case study in North Rhine-Westphalia, Germany," *Science of The Total Environment*, vol. 727, 2020.
- [5] T. Ercan, C. O. Nuri, N. Keya, O. Tatari, N. Eluru, and M. Kucukvar, "Autonomous electric vehicles can reduce carbon emissions and air pollution in cities," *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, vol. 112, 2022.
- [6] M. Shahzad, M. T. Shafiq, D. Douglas, and M. Kassem, "Digital twins in built environments: An investigation of the characteristics, applications, and challenges," *Buildings*, vol. 12, 2022.
- [7] K. Kiddee, "Hybrid energy harvesting system based on regenerative braking system and suspension energy harvesting for middle electric vehicle," *Journal of Engineering and Technology*, vol. 8, pp. 29–38, 2020.
- [8] R. Sharma, H. Kumar, K. Gaman, S. Sharma, R. Aneja, A. K. Sharma, R. Kumar, and P. Kumar, "Progress and challenges in electrochemical energy storage devices: Fabrication, electrode material, and economic aspects," *Chemical Engineering Journal*, vol. 468, pp. 143706, 2023.
- [9] A. Santucci, A. Somiotti, and C. Lekakou, "Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications," *Journal of Power Sources*, vol. 258, pp. 395–407, 2014.



- [10] J. Shen and A. Khaligh, "A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, pp. 223–231, 2015.
- [11] C. Qiu, G. Wang, M. Meng, and Y. Shen, "A novel control strategy of regenerative braking system for electric vehicles under safety critical driving situations," *Energy*, vol. 149, pp. 329–340, 2018.
- [12] A. Kuperman, I. Aharon, S. Malki, and A. Kara, "Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 806–815, 2013.
- [13] H. H. Myeong, G. S. Lee, E. Kim, H. W. Kim, S. Yoon, T. Talluri, and H. R. Cha, "Regenerative braking control strategy based on ai algorithm to improve driving comfort of autonomous vehicles," *Applied Sciences*, vol. 13, pp. 946, 2023.
- [14] Z. Wang, T. Zhang, Z. Zhang, Y. Yuan, and Y. Liu, "A high-efficiency regenerative shock absorber considering twin ball screws transmissions for application in range-extended electric vehicles," *Energy and Built Environment*, vol. 1, pp. 36–49, 2020.
- [15] S. Wang, L. Wen, X. Gong, J. Liang, X. Hou, and F. Hou, "Piezoelectric-based energy conversion and storage materials," *Batteries*, vol. 9, no. 7, 2023.
- [16] D. Maurya, P. Kumar, S. Khaleghian, R. Sriramdas, M. G. Kang, R. A. Kishore, V. Kumar, H.-C. Song, J.-M. Park, S. Taheri, and S. Priya, "Energy harvesting and strain sensing in smart tire for next generation autonomous vehicles," *Applied Energy*, vol. 232, pp. 312–322, 2018.
- [17] J. Qian, D.-S. Kim, and D.-W. Lee, "On-vehicle triboelectric nanogenerator enabled self-powered sensor for tire pressure monitoring," *Nano Energy*, vol. 49, pp. 126–136, 2018.
- [18] Z. Wang, T. Zhang, Z. Zhang, and Y. Liu, "A high-efficiency regenerative shock absorber considering twin ball screws transmissions for application in range-extended electric vehicles," *Energy and Built Environment*, vol. 1, 2019.
- [19] S. Xie, X. Hu, Z. Xin, and L. Li, "Time-efficient stochastic model predictive energy management for a plug-in hybrid electric bus with an adaptive reference state-of-charge advisory," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, pp. 5671–5682, 2018.
- [20] Y. Zhang, Z. Chen, G. Li, Y. Liu, and Y. Huang, "A novel model predictive control based co-optimization strategy for velocity planning and energy management of intelligent PHEVs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, pp. 12667–12681, 2022.
- [21] F. Naseri, C. Barbu, and T. Sarikurt, "Optimal sizing of hybrid high-energy/high-power battery energy storage systems to improve battery cycle life and charging power in electric vehicle applications," *Journal of Energy Storage*, vol. 55, pp. 105768, 2022.
- [22] F. Naseri, E. Farjah, and T. Ghanbari, "An efficient regenerative braking system based on battery/supercapacitor for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles with BLDC motor," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, pp. 3724–3738, 2016.

- [23] W. Levesque, A. Bégin-Drolet, and J. Lépine, "Effects of pavement characteristics on rolling resistance of heavy vehicles: A literature review," *Transportation Research Record*, vol. 6, pp. 296–309, 2023.
- [24] K. Kiddee and T. Sukcharoensup, "In efficiency analysis of suspension energy harvesting based on supercapacitor for electric vehicles," in *Proceedings of the 2020 8th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Chiang Mai, Thailand, 2020*, pp. 1–4.
- [25] M. Puliti, R. Galluzzi, F. Tessari, N. Amati, and A. Tonoli, "Energy efficient design of regenerative shock absorbers for automotive suspensions: A multi-objective optimization framework," *Applied Energy*, vol. 358, pp. 122542, 2024.
- [26] H. Li, P. Zheng, T. Zhang, Y. Zou, Y. Pan, Z. Zhang, and A. Azam, "A high-efficiency energy regenerative shock absorber for powering auxiliary devices of new energy driverless buses," *Applied Energy*, vol. 295, pp. 117020, 2021.
- [27] M. Abdelrahman, G. Liu, C. Fan, Z. Zhang, A. Ali, H. Li, A. Azam, H. Cao, and A. A. Mohamed, "Energy regenerative shock absorber based on a slotted link conversion mechanism for application in the electrical bus to power the low wattages devices," *Applied Energy*, vol. 347, pp. 121409, 2023.
- [28] W. Salman, X. Zhang, H. Li, X. Wu, N. Li, A. Azam, and Z. Zhang, "A novel energy regenerative shock absorber for in-wheel motors in electric vehicles," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 181, pp. 109488, 2022.