

การออกแบบและพัฒนาชุดส่งกำลังยานพาหนะไฟฟ้าสมัยใหม่ด้วยระบบ ฮาร์ดแวร์ในการจำลองวนรอบ

Designing and Developing State-of-the-art electric vehicle powertrains with Hardware-in-the-loop System

สกฤษฎ์ หนูสว่าง¹ คณาพจน์ ยอดมณี² ปฐิพัทธ์ ทวนทอง³ และ ทรงกลด ศรีปรางค์^{4*}

^{1,2,4*} สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรุงเทพมหานคร

³Renewable Energy Research Centre (RERC), Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North

³E-mail: phatiphath.t@fte.kmutnb.ac.th, ^{4*}songklod.sri@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาชุดส่งกำลังยานพาหนะไฟฟ้าสมัยใหม่ด้วยระบบฮาร์ดแวร์ในการจำลองวนรอบ (Hardware-in-the-loop: HIL) ระบบ HIL ที่นำเสนอใช้โปรแกรม Matlab/Simulink เป็นโปรแกรมหลักในการดำเนินการเพื่อการเขียนโค้ดโปรแกรมที่ทำหน้าที่ควบคุมชุดส่งกำลังและการเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ทำหน้าที่เป็นฮาร์ดแวร์ที่ต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าของยานพาหนะไฟฟ้า ตัวประมวลผลที่ใช้คือ dSPACE DS1202 MicroLabbox Control Desk ทำหน้าที่เป็นระบบสมองกลฝังตัวที่ส่งสัญญาณควบคุมชุดส่งกำลัง การออกแบบและพัฒนาชุดส่งกำลังยานพาหนะไฟฟ้าสมัยใหม่ด้วยระบบ HIL ทำให้วิศวกรผู้พัฒนาชุดส่งกำลังสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าได้อย่างสะดวกและสามารถออกแบบระบบควบคุมทั้งที่เป็นเชิงเส้นเช่น ระบบควบคุมแบบพีไอ และระบบควบคุมไม่เชิงเส้น ผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองแสดงในงานวิจัยนี้เพื่อยืนยันการดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ยานพาหนะไฟฟ้าสมัยใหม่ ชุดส่งกำลังยานยนต์ไฟฟ้า ระบบฮาร์ดแวร์ในการจำลองวนรอบ ระบบควบคุมแบบพีไอ มอเตอร์ไฟฟ้า

* Corresponding author, e-mail: songklod.sri@rmutr.ac.th

Abstract

This paper presents the design and development of modern electric vehicle powertrains with the hardware-in-the-loop (HIL). The proposed HIL system uses Matlab/Simulink as the main program in operation for coding the program, which controls the powertrain and connects to the 3-phase inverter. The 3-phase inverter acts as the hardware connected to the electric motor of an electric vehicle. The dSPACE DS1202 MicroLabbox Control Desk is a processing unit that serves as an embedded system. It transmits a control signal to the powertrain control. The design and development of modern electric vehicle powertrains with the HIL system allow powertrain engineers to easily determine the parameters of electric motors and design linear control systems such as PI control systems and non-linear control systems. The functional simulations and experimental results are presented in this study to confirm the effective operation.

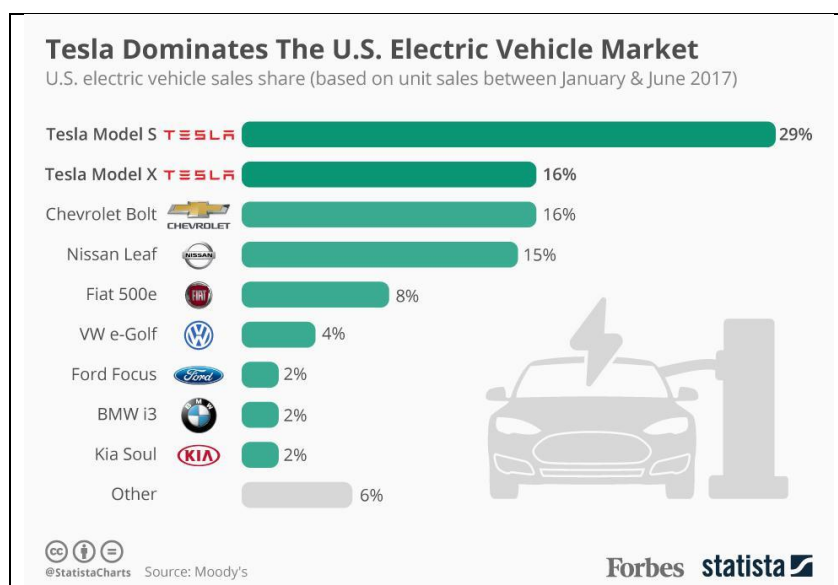
Keywords: Electric vehicle (EV), Powertrain, Hardware-in-the-loop (HIL), PI Controller, Electric moto

1. ที่มาและความสำคัญ

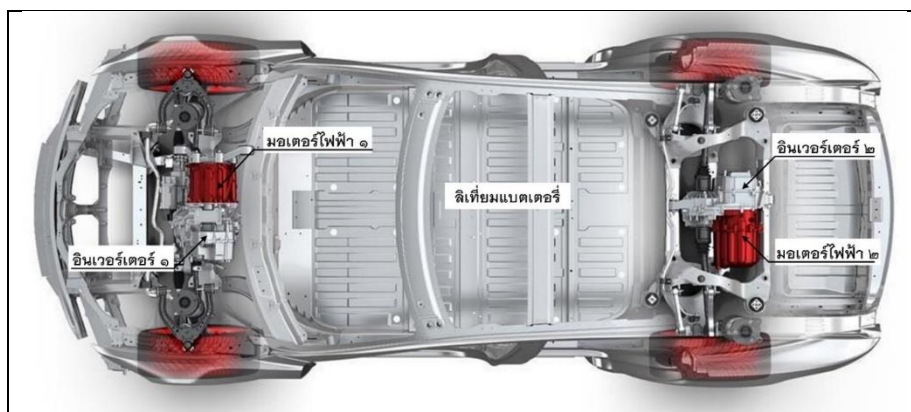
เนื่องจากปฏิเสธไม่ได้ว่าโลกกำลังเผชิญกับ ภาวะโลกร้อน (Global Warming) อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นเรื่อย ๆ สาเหตุมาจากก๊าซเรือนกระจกจำพวก คาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดจากกิจกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในปริมาณสูง ส่วนหนึ่งมาจากรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine: ICE) และปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM 2.5) ที่คุกคามประเทศไทยในปัจจุบัน มีการคาดการณ์ว่าสถานการณ์เหล่านี้จะรุนแรงมากขึ้นในปีหน้าและอีก 10 ปีข้างหน้า หากไม่มีการลดการใช้รถยนต์และการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ [1]

ทางออกหนึ่งที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเหล่านี้คือ การพัฒนายานพาหนะไฟฟ้า (Electric Vehicles EVs) ซึ่งปัจจุบันด้วยการนำของบริษัทยักษ์ใหญ่ (Tesla Inc.) โดยดูจากรูปกราฟที่แสดงให้เห็นว่ารถไฟฟ้าโมเดล S (Tesla Model S) มียอดจำหน่ายมากกว่ารถยนต์ใช้เครื่องยนต์ดังภาพที่ 1 นี้แสดงถึงโลกกำลังเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่นั้นคือ ทุกค่ายที่ผลิตรถยนต์สันดาปภายในจะต้องมีการพัฒนารถไฟฟ้าเพื่อเตรียมจำหน่าย เพราะหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงบริษัทเหล่านั้นจะถูกดิสรัปต์ (Disruption) และสูญเสียโอกาสให้กับบริษัทที่มีเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งโครงสร้างยานยนต์ไฟฟ้าจะมีจำนวนชิ้นน้อยกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในอย่างมาก หากดูจากรถไฟฟ้าของบริษัทเทสลาดังแสดงในภาพที่ 2 จากรูปส่วนขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ 1) มอเตอร์ไฟฟ้า 2 ชุด หน้าและหลัง, 2) ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ (Lithium Ion Battery), และ 3) อินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานจากแบตเตอรี่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจ่ายให้มอเตอร์ ภาพที่ 3 แสดงระบบการแปลงพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสมัยใหม่ จากรูปจะเห็นได้ว่าทุกส่วนสามารถผลิตขึ้น

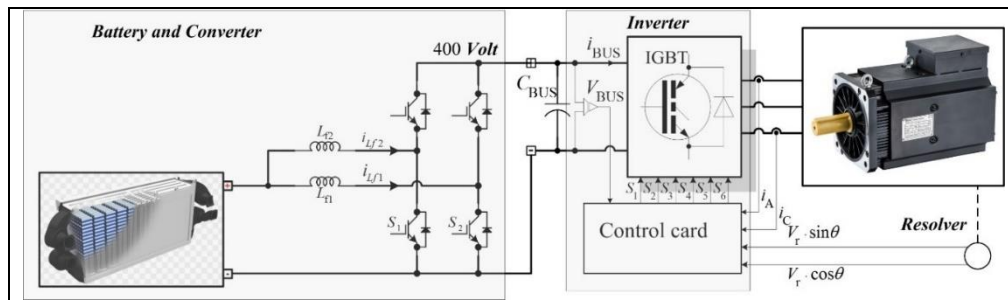
ภายในประเทศไทย เพียงแต่ต้องมีการพัฒนาบุคลากรตลอดจนระบบพื้นฐานเพื่อการรองรับการผลิต ส่วนประกอบต่างๆ การวิจัยและพัฒนาส่วนต่างๆ ประกอบด้วย คอนเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์, มอเตอร์ไฟฟ้า และแบตเตอรี่ ตลอดจนหน่วยประมวลผลเพื่อควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด การพัฒนาเทคโนโลยี ในยานพาหนะไฟฟ้าจำเป็นต้องมีองค์ความรู้ประกอบด้วย การออกแบบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM), การสร้างระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัส (Permanent Magnet Synchronous Motor Drive) ในฐานข้อมูลงานวิจัยเช่น IEEE, MDPI เป็นต้น มีข้อมูลเหล่านี้ เพียงแต่จะต้องมีผู้นำมาใช้ ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีเหล่านี้ให้ได้ในประเทศไทย จำเป็นต้องมีการสร้างนักวิจัยใหม่ ที่มีความรู้และต้องการทำงานด้านนี้ การบ่มเพาะจึงเป็นเรื่องสำคัญ ตลอดจนความร่วมมือระหว่างต่างประเทศ เพื่อแลกเปลี่ยนองค์ความรู้และเทคโนโลยีกันจึงเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญ



รูปที่ 1 ส่วนแบ่งการตลาดของรถไฟฟ้าของบริษัทเทสลา (Tesla Inc.) เมื่อเทียบกับบริษัทอื่นช่วงมกราคม ถึง มิถุนายน 2017 [2]

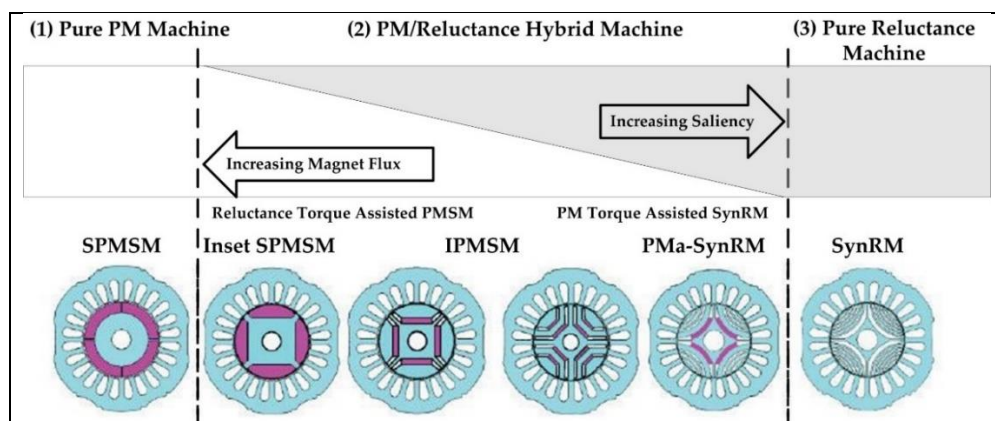


รูปที่ 2 โครงสร้างรถไฟฟ้าของบริษัทเทสลา (Tesla Inc.)

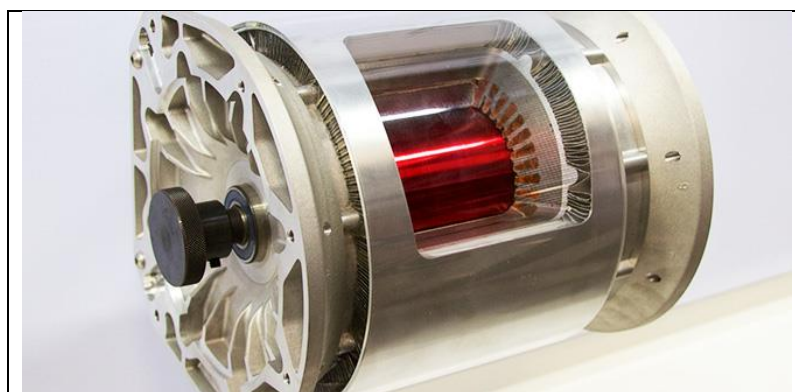


รูปที่ 3 ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าของบริษัทเทสลา (Tesla Inc.)

เทคโนโลยีมอเตอร์ไฟฟ้าสมัยใหม่สำหรับยานพาหนะไฟฟ้าถูกพัฒนาอย่างมากในปัจจุบันตามคุณลักษณะที่ดีตามภาพที่ 4 ในภาพจะเห็นว่ามอเตอร์สมัยใหม่ถูกพัฒนาใช้ในยานพาหนะไฟฟ้าในแบบซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และการลดการใช้แม่เหล็กถาวรที่เป็นสินแร่หายากเช่น Neodymium magnet (NdFeB) เนื่องจากความกังวลเกี่ยวกับการขาดแคลนและการผูกขาดของสินแร่เหล่านี้ จึงส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าสมัยใหม่ต้องมีการพัฒนาใหม่ ก่อนหน้านี้นี้บริษัทเทสลาได้ใช้มอเตอร์ชนิด อินดักชันมอเตอร์ในการขับเคลื่อน รถไฟฟ้ารุ่นโมเดล s ดังภาพที่ 5 แต่ทว่า การใช้มอเตอร์ชนิดนี้มีปัญหาเรื่องค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF.) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานต่ำกว่ามอเตอร์ชนิดซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

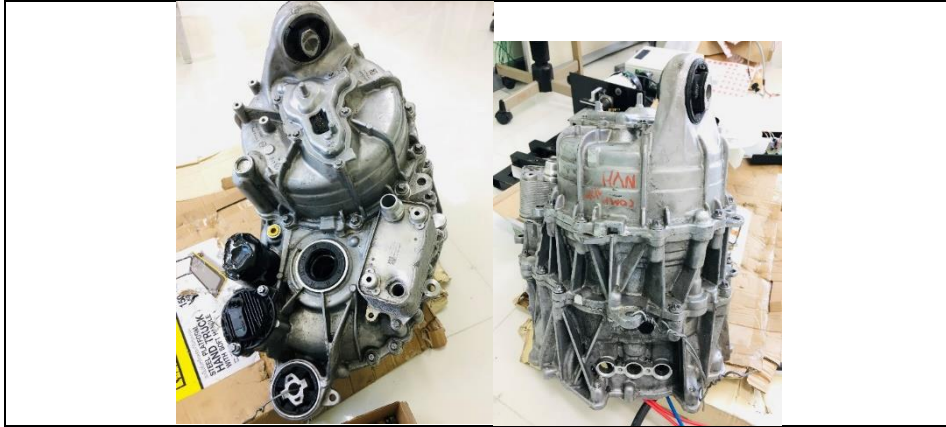


รูปที่ 4 ระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าของบริษัทเทสลา (Tesla Inc.)



รูปที่ 5 โครงสร้างมอเตอร์ชนิด อินดักชันมอเตอร์ ของรถไฟฟ้ารุ่นโมเดล 3 ของบริษัท Tesla

ส่งผลให้รุ่นถัดมาคือโมเดล 3 บริษัทได้เปลี่ยนเป็นมอเตอร์ชนิด Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor (PMA-SynRM) ดังภาพที่ 6 และ 7 ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า จนถึงปี 2564 นี้รถไฟฟ้าจากบริษัทเทสลา ยังถือว่าเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ด้วยเทคโนโลยีของมอเตอร์ที่ล้ำสมัย ที่ทำให้รถไฟฟ้าสามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและวิ่งได้ไกลขึ้น



รูปที่ 6 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าชนิด PMA-SynRM ของรถไฟฟ้ารุ่นโมเดล 3 ของบริษัท Tesla



รูปที่ 7 ชุดเครื่องยนต์ไฟฟ้าของรถไฟฟ้ารุ่นโมเดล 3 จากบริษัทเทสลา

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้นำเสนอเรื่อง การออกแบบและพัฒนาชุดส่งกำลังยานพาหนะไฟฟ้าสมัยใหม่ด้วยระบบฮาร์ดแวร์ในการจำลองวนรอบ เพื่อเตรียมความพร้อมในยุคของการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีจากเครื่องยนต์สันดาปภายในไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง เพื่อเป็นเครื่องมือสนับสนุนการพัฒนา งานวิจัยและเทคโนโลยีใหม่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อสร้างองค์ความรู้การพัฒนา ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าสมัยใหม่ในงานยานพาหนะไฟฟ้า โดยการนำเสนอเทคโนโลยีระบบช่วยการออกแบบชุดส่งกำลัง ซึ่งเป็นหัวใจของยานพาหนะไฟฟ้าสมัยใหม่

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาระบบขับเคลื่อนและสร้างระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้ายุคใหม่ในยุคของการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีจากเครื่องยนต์สันดาปภายในไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง

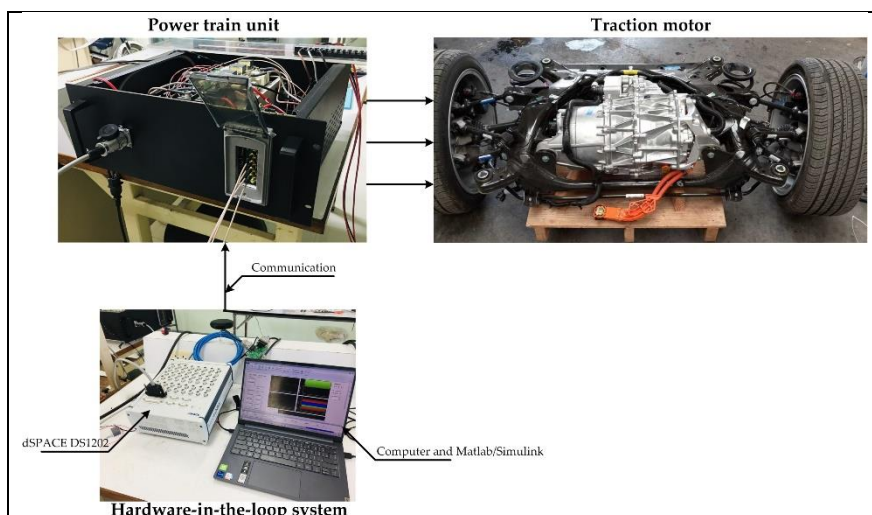
2.2 เพื่อสร้างองค์ความรู้การออกแบบและสร้างระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าสมัยใหม่สำหรับอุตสาหกรรมยานพาหนะไฟฟ้าในประเทศไทย

2.3 เพื่อพัฒนางานวิจัยด้านเทคโนโลยียานพาหนะไฟฟ้าที่ทัดเทียมกับต่างประเทศลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ระบบฮาร์ดแวร์ในการจำลองวงลูป (Hardware-in-the-loop: HIL)

ระบบนี้ช่วยอำนวยความสะดวกในการออกแบบชุดส่งกำลังของยานพาหนะไฟฟ้าหรือระบบอื่นก็สามารถใช้ได้เช่นเดียวกัน [3] การใช้ HIL ช่วยเพิ่มคุณภาพของการทดสอบโดยการเพิ่มขอบเขตของการทดสอบ ตามหลักการแล้วระบบฝังตัวที่อยู่ในชุดส่งกำลังของยานพาหนะไฟฟ้าจะถูกทดสอบกับโรงงานจริง แต่โดยส่วนใหญ่แล้วโรงงานจริงนั้นจะมีข้อจำกัดในแง่ของขอบเขตของการทดสอบ ตัวอย่างเช่น การทดสอบหน่วยควบคุมของชุดส่งกำลังที่ติดตั้งแล้วกับตัวยานพาหนะไฟฟ้าสามารถสร้างสถานะที่เป็นอันตรายดังต่อไปนี้สำหรับวิศวกรทดสอบเช่น การทดสอบที่นอกเหนือช่วงของพารามิเตอร์ ECU บางอย่าง (เช่น พารามิเตอร์ของมอเตอร์เป็นต้น เป็นต้น), การทดสอบและตรวจสอบระบบเมื่อเกิดความล้มเหลว ในสถานการณ์การทดสอบที่กล่าวถึงข้างต้น HIL ให้การควบคุมที่มีประสิทธิภาพและสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัย ซึ่งวิศวกรด้านการทดสอบหรือแอป-พลิเคชันสามารถมุ่งเน้นที่การทำงานของตัวควบคุมได้ ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ระบบ HIL ที่นำเสนอ

3.2 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรในกรอบอ้างอิง dq-axis

มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (PMSM) มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสำหรับการใช้งานที่ปรับความเร็วได้ อันเนื่องมาจากความน่าเชื่อถือประสิทธิภาพสูงและความหนาแน่นของพลังงาน เนื่องจากความก้าวหน้าในวัสดุแม่เหล็กถาวร, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล และเทคนิคการควบคุมสมัยใหม่ มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรจึงแพร่หลายมากขึ้นในอุตสาหกรรม เช่น รถยนต์, หุ่นยนต์, การบินและอวกาศ เมื่อทำการแปลงระบบ 3 แกนเป็นระบบ 2 แกน โดยการใช้ทฤษฎีของ Park Transformation และ Concordia transformation สมการแรงดันของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรสามารถเขียนอยู่ในกรอบอ้างอิง dq ได้ดัง (1)

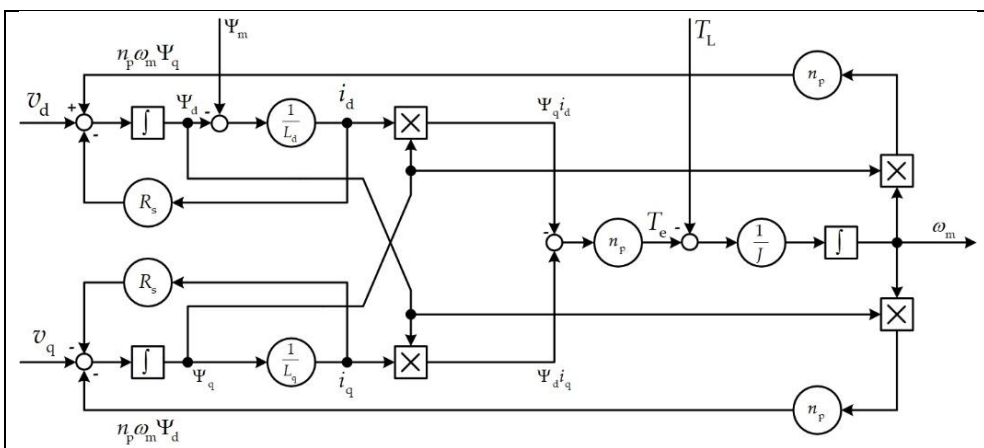
$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + \frac{d\Psi_m}{dt} - \omega_e \Psi_q \\ v_q &= R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \Psi_d \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}\Psi_{\text{q}} &= L_{\text{q}} i_{\text{q}} \\ \Psi_{\text{d}} &= L_{\text{d}} i_{\text{d}} + \Psi_{\text{m}}\end{aligned}\quad (2)$$

โดยที่ v_d คือ แรงดันในกรอบอ้างอิง d-axis, v_q คือ แรงดันในกรอบอ้างอิง q-axis, R_s คือ ค่าความต้านทานในขดลวดมอเตอร์และในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของอินเวอร์เตอร์, L_d และ L_q คือค่าความเหนี่ยวนำในกรอบอ้างอิง dq-axis, Ψ_d และ Ψ_q คือฟลักซ์เชื่อมโยงในกรอบอ้างอิง dq-axis, Ψ_m คือค่าฟลักซ์ของแม่เหล็กถาวร, i_d และ i_q คือกระแสในกรอบอ้างอิง dq-axis, และ $\omega_e = \omega_m \cdot n_p$ คือความเชิงมุมทางไฟฟ้า และ ω_m กับ n_p คือความเชิงมุมทางกลและจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก ตามลำดับ

สามารถนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 9 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

และสมการทางกลและสมการแรงบิดของมอเตอร์ PMSM คือ

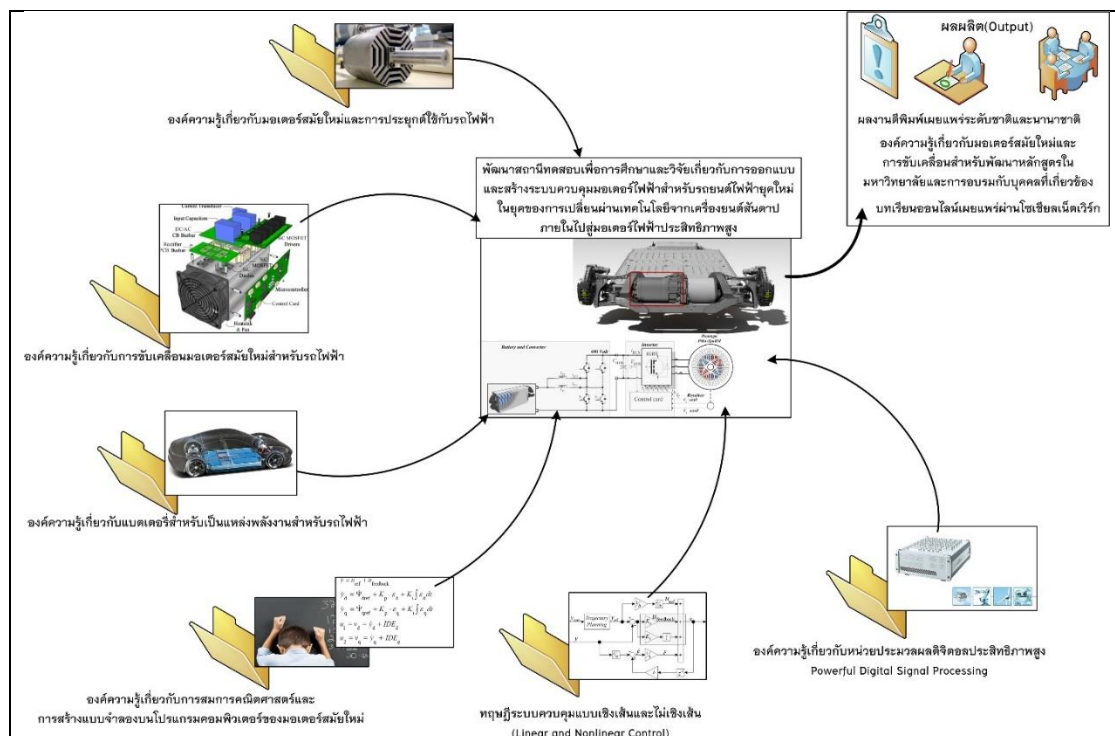
$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} [T_e - T_L - B_f \omega_m]$$

$$T_e = n_p \{ \Psi_m i_q - (L_d - L_q) i_d i_q \}$$
(3)

สมการและแบบจำลองที่ได้จะใช้เป็นส่วนประกอบในการออกแบบระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องด้วยการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าจะต้องเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, ความเร็ว และแรงบิดตาม (1), (2) และ (3) เมื่อทำการจ่ายแรงดัน 3 เฟส คือ แรงดันเฟส a, b และ c เข้ายังขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้า ความเร็วที่วัดได้จะถูกแปลงเป็นมุมทางไฟฟ้าใช้มุมที่ได้แปลงระบบ 3 เฟสเป็น 2 เฟสหรือ 2 แกน คือ d และ q จะได้แรงดัน v_d และ v_q ตาม (1) แรงดันทำให้เกิดกระแส i_d และ i_q และกำเนิดแรงบิดให้มอเตอร์ไฟฟ้าตาม (3) ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนทำงานตามที่ต้องการ

กระบวนการที่กล่าวมากระทำการเปลี่ยนแปลงค่าด้วยระบบ HIL โดยคอมพิวเตอร์และ dSPACE DS1202 ทำหน้าที่ส่งค่าและรับค่าแสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์ ค่าที่เปลี่ยนแปลงทำหามติวิศวกรรมสามารถเห็นได้ และสามารถกำหนดค่าสูงสุดและต่ำสุดที่เหมาะสมกับมอเตอร์ที่ต้องการขับเคลื่อนได้ นี่เป็นข้อดีของระบบ HIL ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ [4] [5] [6]

4. วิธีดำเนินการวิจัย

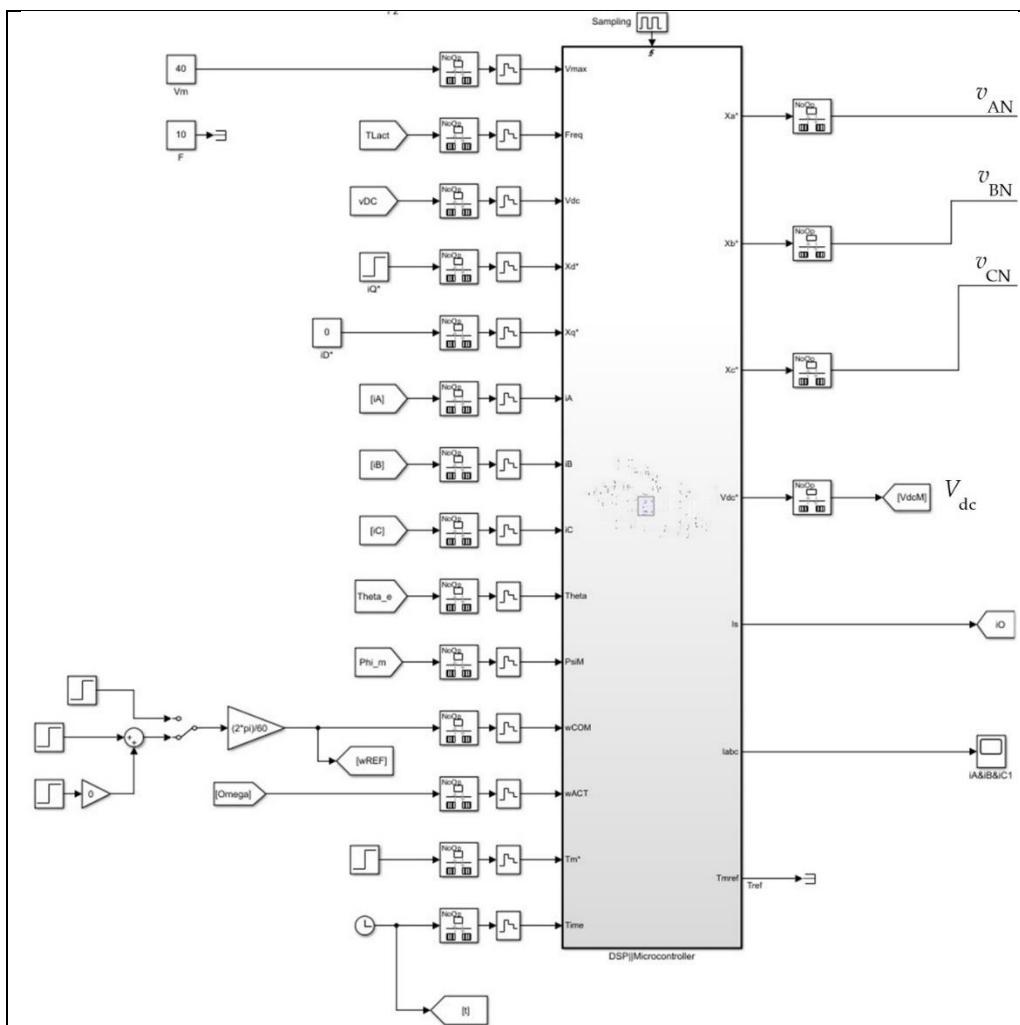


รูปที่ 10 บล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบการศึกษาวิจัย

กรอบการวิจัยของงานวิจัยชิ้นนี้ดังแสดงในภาพที่ 10 เป็นการพัฒนาชุดส่งกำลังยานพาหนะไฟฟ้าสมัยใหม่ด้วยระบบฮาร์ดแวร์ในการจำลองวนรอบการทำงาน โดยตัวชี้วัดเชิงปริมาณคือ ได้การพัฒนาชุดส่งกำลังยานพาหนะไฟฟ้าสมัยใหม่ด้วยระบบฮาร์ดแวร์ในการจำลองวนรอบการทำงาน, อากาศยานไฟฟ้า, หุ่นยนต์ ฯลฯ สามารถใช้วิจัยพัฒนาเทคนิควิธีการควบคุมแบบใหม่ที่เพิ่มประสิทธิภาพทั้งระบบให้การควบคุมมอเตอร์ มีการสร้างงานวิจัยที่ใช้ได้จริงและตีพิมพ์ในฐานข้อมูลระดับชาติและนานาชาติที่เป็นการวิจัยขั้นแนวหน้า ที่มีประสิทธิภาพ สามารถผลิตผลงานวิจัยที่นำไปต่อยอดสู่การใช้ประโยชน์ ทางเศรษฐกิจและสังคมได้

5. ผลและวิจารณ์

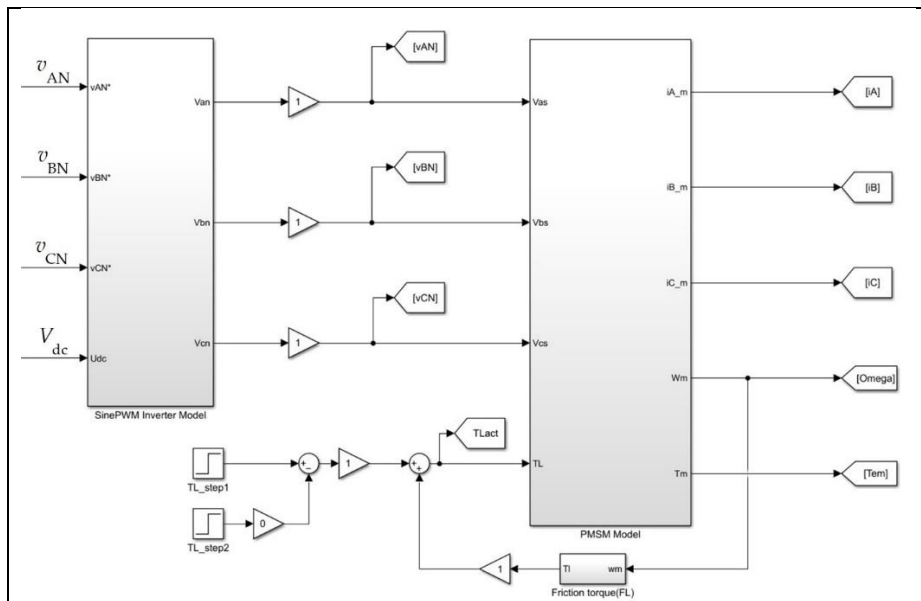
เมื่อระบบ HIL ถูกต่อส่วนต่างๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้วขั้นตอนการดำเนินการสำหรับวิศวกรคือ การจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ต้องการออกแบบชุดส่งกำลังเพื่อดูพฤติกรรมและค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าตัวนั้น ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1



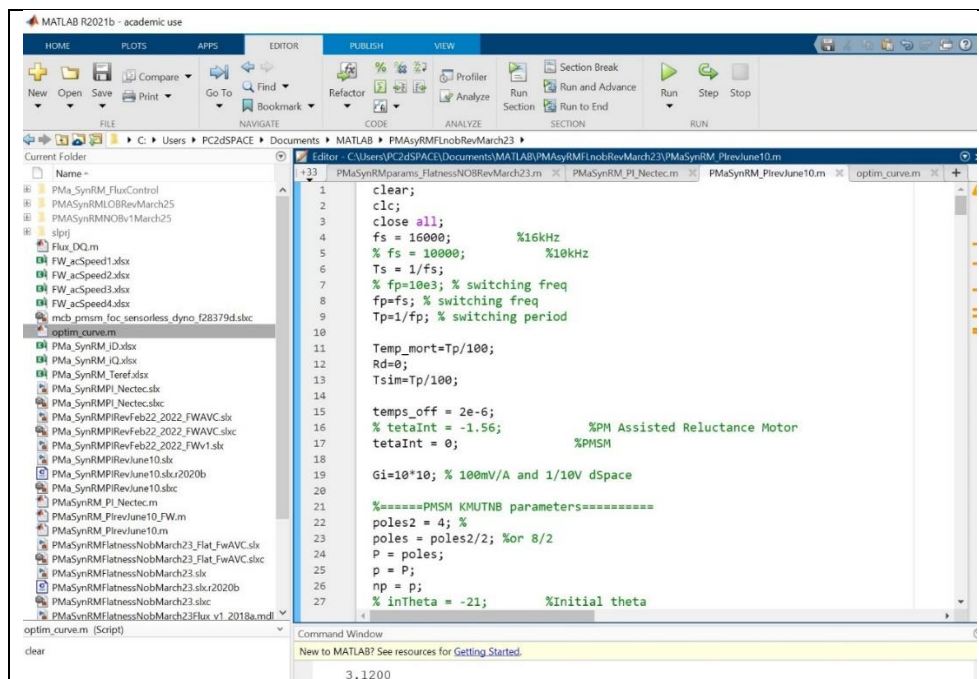
รูปที่ 11 แบบจำลองหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital signal processing: DSP)

ในโปรแกรม MATLAB Simulink

รูปที่ 11 เป็นแบบจำลองระบบ DSP ที่ทำหน้าที่ในการวัดสัญญาณเพื่อประมวลผลสั่งงานแบบจำลอง PMSM ดังรูปที่ 12 สัญญาณที่ DSP นำมาประมวลผลเป็นสัญญาณที่ส่งมาด้วย Sampling rate (อัตราการสุ่มสัญญาณ) เท่ากับ 16 kHz เท่ากับความถี่สัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน (Pulse width modulation: PWM) ที่สวิตช์สร้างสัญญาณ 3 เฟส แลค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 1 จะกำหนดใน M-file ของโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 13



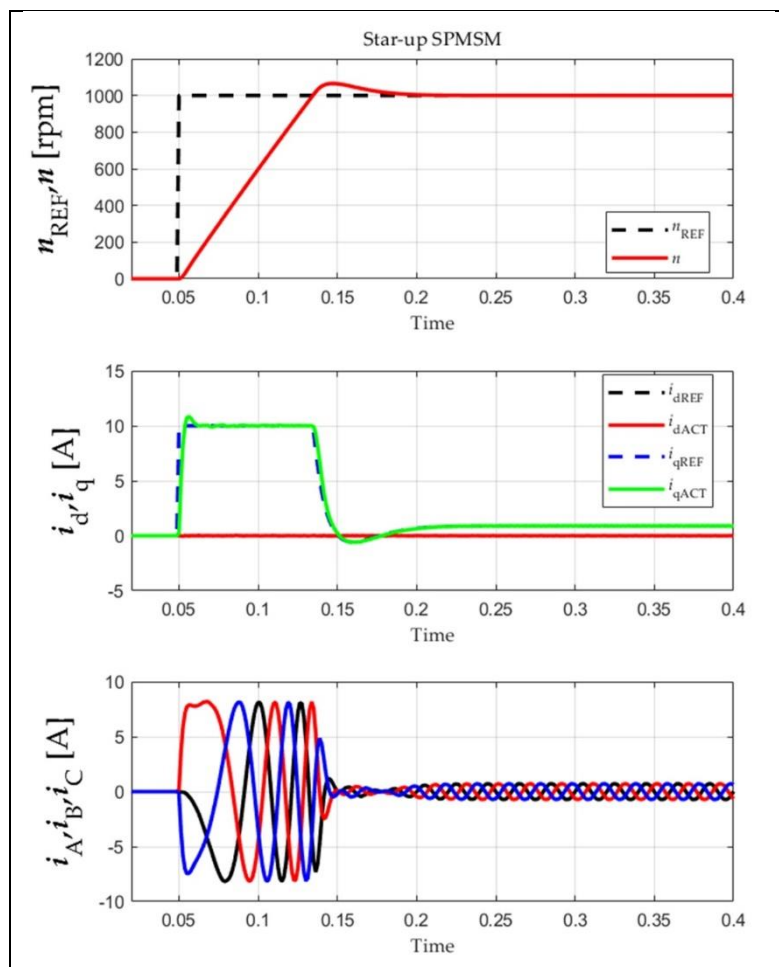
รูปที่ 12 แบบจำลองของ PMSM ในโปรแกรม MATLAB Simulink



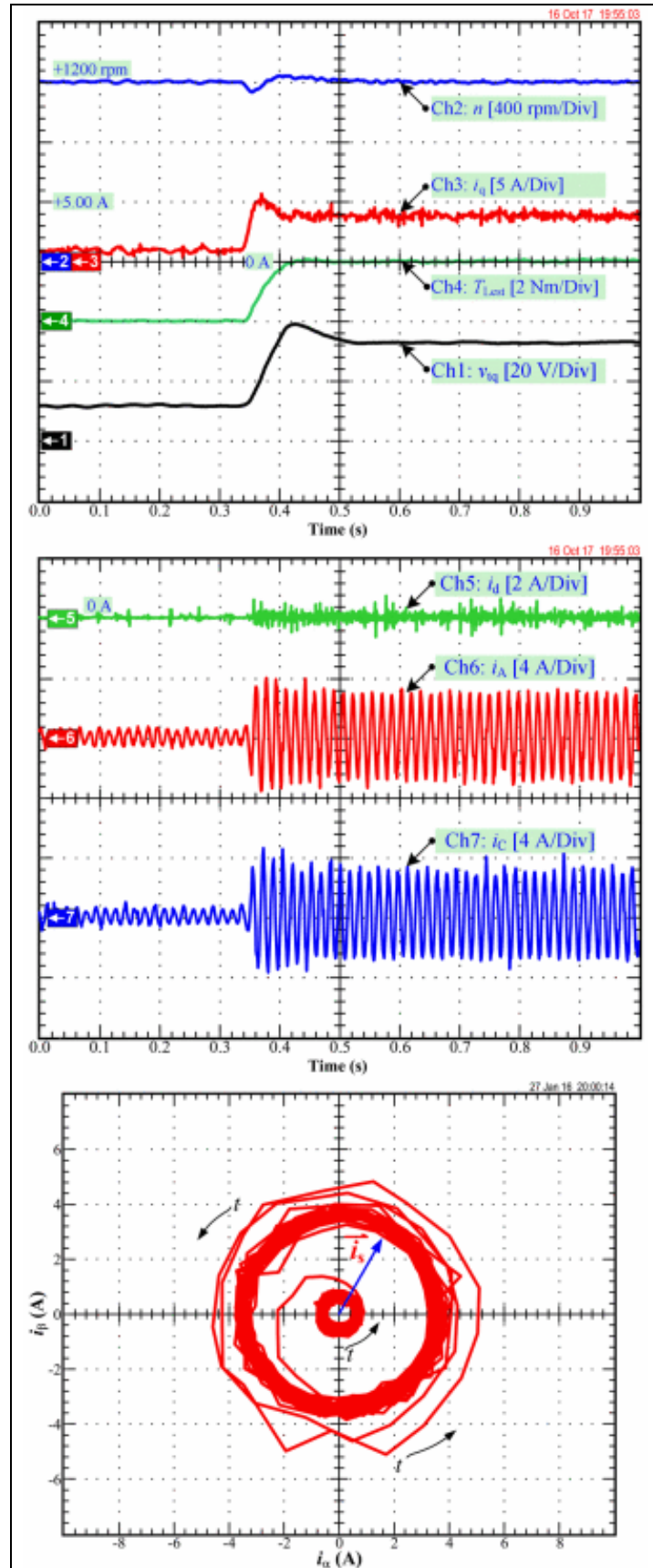
รูปที่ 13 ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 1 นำมาเขียนในโปรแกรม Matlab

ตารางที่ 1 ค่าพารามอเตอร์มอเตอร์ซึ่งโครนัสที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ความหมาย	ค่าปริมาณ
P_{rated}	Rated Power	1kW
n_{rated}	Rated Speed	1350 rpm
n_p	Number of pole pairs	2
R_s	Resistance (Motor + Inverter)	3.2 Ohm
L_d	Normal d -axis inductance	288 mH
L_q	Normal q -axis inductance	38 mH
L_{dq}	Mutual inductance	4 mH
Ψ_m	Permanent-magnet flux	0.138 [Wb]
J	Equivalent inertia	0.0017 kg.m ²



รูปที่ 14 Simulation results of the FOC with the PI controller applied to SPMSM



รูปที่ 15 Experimental results of the FOC with the PI controller controlling SPMSM

รูปที่ 15 แสดงผลการจำลองการทำงานของมอเตอร์ PMSM ซึ่งใช้ในการศึกษาระบบส่งกำลังของยานพาหนะไฟฟ้าโดยค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 1 เงื่อนไขการทำงานกำหนดให้มอเตอร์เริ่มทำงานที่เวลา 0.05 วินาทีที่เปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 0 – 1000 rpm จากรูปแสดงให้เห็นว่ามอเตอร์ทำงานตามเงื่อนไขและระบบควบคุมที่ออกแบบโดย HIL สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม กระแสของมอเตอร์ไม่เกิน 10 แอมแปร์ซึ่งเป็นกระแสสุดที่กำหนดไว้ รูปที่ 12 แสดงผลการทดลองการทำงานการตอบสนองต่อการรบกวนจากภายนอกในรูปของแรงบิดโหลดที่กระทำต่อเพลาของมอเตอร์ จากรูปแสดงการตอบสนองของตัวควบคุมที่ออกแบบต่อแรงบิดภายนอกที่มากระทำที่เวลา 0.35 วินาที ความเร็วของมอเตอร์ตกลงช่วงเวลาสั้นๆ และกลับมาเท่ากับความเร็วที่กำหนดคือ 1,000 rpm ผลการทดลองยืนยันว่าตัวควบคุมที่ออกแบบนั้นเหมาะสมและค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของมอเตอร์ที่ทดสอบด้วยระบบ HIL นั้น ถูกต้อง สัญญาณทั้งหมดที่แสดงในรูปที่ 15 และ 16 ได้มาจากการเก็บในระบบ HIL วิศวกรสามารถนำมาวิเคราะห์และตรวจสอบสุขภาพของมอเตอร์ได้ว่ามอเตอร์ยังมีการตอบสนองที่ดีต่อความต้องการของผู้ใช้และการรบกวนจากภายนอก

6. สรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาชุดส่งกำลังยานพาหนะไฟฟ้าสมัยใหม่ด้วยระบบฮาร์ดแวร์ในการจำลองวงจร การออกแบบชุดส่งกำลังที่ได้สามารถใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวรที่เป็นมอเตอร์ที่ใช้ในรถไฟฟ้าได้ โดยดูจากผลการทดลองในรูปที่ 16 เปรียบเทียบกับรูปที่ 15 จะเห็นว่าผลการทดลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการจำลองการทำงานนั้นแสดงว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองด้วยระบบ HIL มีความถูกต้อง สามารถสรุปได้ว่าระบบ HIL สามารถช่วยอำนวยความสะดวกแก่วิศวกรได้เป็นอย่างดี การดำเนินการง่ายและสามารถดูการเปลี่ยนแปลงแบบทันเวลา (Real time) ลดความสูญเสียจากข้อผิดพลาดจากการทำงานเกินพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้าได้

7. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) เลขที่สัญญา A-25/2564

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles", Proceedings of the IEEE, vol. 90, no. 2, pp. 247-275, 2002.
- [2] M. Zeraoulia, M. Benbouzid and D. Diallo, "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, no. 6, pp. 1756-1764, 2006.

- [3] N. Hashemnia and B. Asaei, "Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles", 2008 18th International Conference on Electrical Machines, 2008.
- [4] C. MORRIS, "Elon Musk: Cooling, not power-to-weight ratio, is the challenge with AC induction motors," November 4, 2014. [Online]. Available: <https://chargedevs.com/newswire/elon-musk-cooling-not-power-to-weight-ratio-is-the-challenge-with-ac-induction-motors/>.
- [5] M. KANE, "First Up Close Look At Tesla Model 3 Drive Unit, Battery, Cooling & More," July 26, 2018. [Online]. Available: <https://insideevs.com/news/339774/first-up-close-look-at-tesla-model-3-drive-unit-battery-cooling-more/>.
- [6] M. KANE, "Tesla Model 3's IPM-SynRM Electric Motor Explained," December 22, 2020. [Online]. Available: <https://insideevs.com/news/461811/video-tesla-model-3-electric-motor-explained/>.