



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า

Design of a Shunt Active Power Filter for Harmonic Elimination in Electric Railway Systems

ฐานันตร์ ตรงใจ¹ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์^{1*} กองพล อารีรักษ์¹

¹ กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Thanan Trongjai¹ Tosaporn Narongrit^{1*} Kongpol Areerak¹

¹ Power Electronics, Energy, Machines, and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: tosaporn@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4402

วันที่รับบทความ 14 พฤษภาคม 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 1 11 กรกฎาคม 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 2 1 สิงหาคม 2562; วันที่ตอบรับบทความ 16 ตุลาคม 2562

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมกระแสและแรงดันบัสไฟตรง การออกแบบจะปรับใช้วิธีการดั้งเดิมซึ่งอาศัยการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน การตรวจสอบผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะใช้วิธีการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experimenter Kit ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ได้ยืนยันแล้วว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า %THDi ภายหลังการชดเชยของกระแสที่แหล่งจ่ายระบบรางไฟฟ้าอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std 519-2014

คำสำคัญ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า การตรวจจับฮาร์มอนิก ตัวควบคุมพีไอ

Abstract

This paper presents the design of a shunt active power filter for harmonic elimination in electric railway systems. The conventional approach depended on an easy calculation is applied to design the parameters of active power filter and PI controller for the compensating current and DC bus voltage controls. The hardware in the loop (HIL) simulation

technique used Simulink/MATLAB program and TMS320C2000TM Experimenter Kit board is applied to simulate the harmonic elimination in considered electric railway system. The simulation result confirms that the active power filter and PI controller designed by the proposed approach can provide good performance for harmonic elimination. In addition, the %THDi after compensation of the source currents in electric railway system are satisfied under the IEEE Std 519-2014.

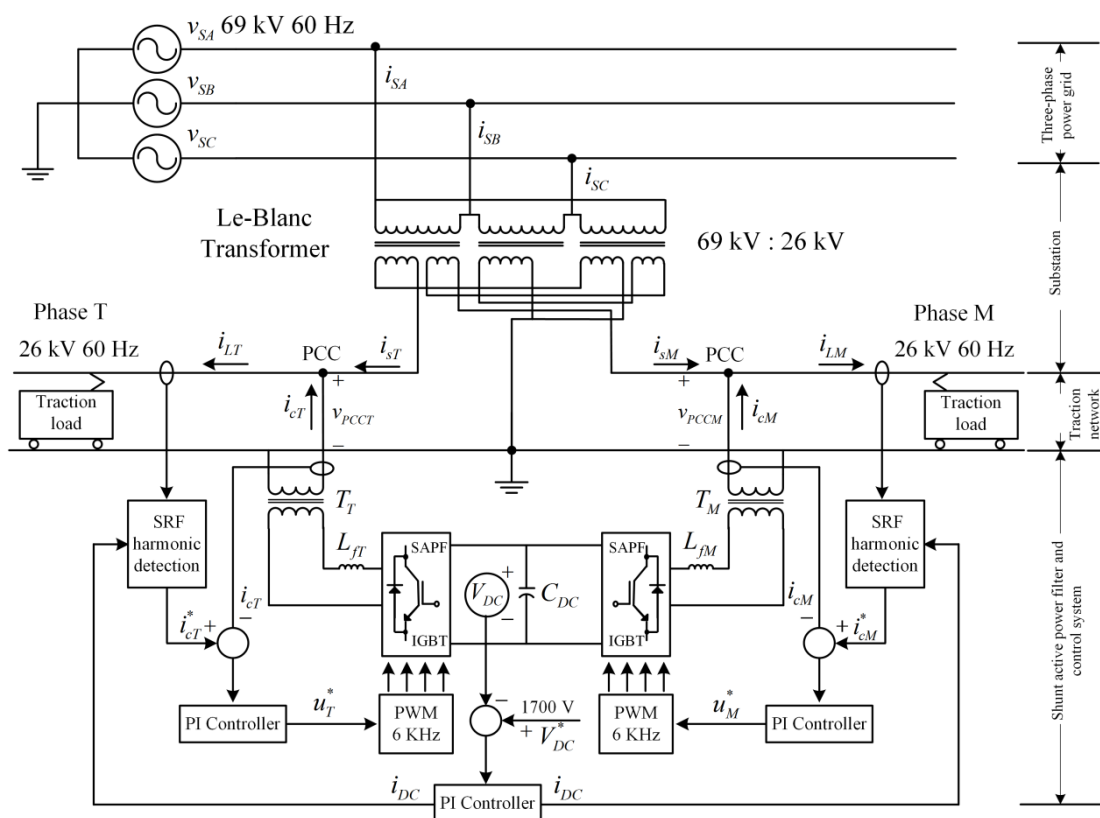
Keywords

active power filter; active power filter design; harmonic elimination in electric railway systems; harmonic detection; PI controller

1. บทนำ

การขนส่งระยะทางไกลด้วยรถไฟฟ้ายานพาหนะความเร็วสูงในปัจจุบันนิยมใช้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (co-phase power supply systems) [1] ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสัมผัสเหนือศีรษะ (overhead contact) ที่มีพิกัดแรงดันประมาณ 25 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz (ขึ้นอยู่กับระบบไฟฟ้าของแต่ละประเทศ) ทั้งนี้เนื่องจากระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบดังกล่าวสามารถช่วยบรรเทาการเกิดปัญหาไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่กริดของระบบส่งจ่ายหลักได้ [2] โหลดของระบบรางไฟฟ้า ได้แก่ โหลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟฟ้ายานพาหนะความเร็วสูง โหลดเครื่องปรับอากาศ และโหลดอุปกรณ์แสงสว่าง เป็นต้น โดยโหลดังกล่าวล้วนแต่มีพฤติกรรมการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า และส่งผลเสียหลายประการ เช่น เกิดกำลังงานสูญเสียในสายส่ง เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ระบบสื่อสารและระบบอาณัติสัญญาณทำงานผิดพลาด เป็นต้น [2,3] ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบให้หมดหรือลดลง วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (passive power filter) [4] การใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟ (active power filter) [5] และการใช้วงจรกำลังไฮบริดจ์ (hybrid filter) [3] อย่างไรก็ตาม บทความนี้จะนำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟ

แบบขนาน (shunt active power filter: SAPF) [6] เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ดี และมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ อีกทั้งยังไม่ต้องประสบปัญหาเรโซแนนซ์เมื่อเทียบกับวงจรกรองแบบพาสซีฟ ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกคือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางไฟฟ้าที่ประกอบด้วย กริดส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส (three-phase power grid) สถานีส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางแบบเฟสร่วม (substation) ที่ใช้หม้อแปลงชนิดเลอบลองก์ (Le-blanc transformer) และระบบรางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับโหลดรถไฟฟ้ายานพาหนะ (traction network) ส่วนที่สองคือ วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน) และระบบควบคุม (shunt active power filter and control system) โดยระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอคทีฟจะประกอบด้วยการตรวจจับฮาร์มอนิก (harmonic detection) ใช้สำหรับคำนวณหากระแสอ้างอิงในการชดเชย (กระแสฮาร์มอนิก) ซึ่งในบทความนี้จะเลือกใช้วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronous reference frame: SRF) [7,8] และการควบคุมกระแสชดเชย (i_c) และแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ใช้สำหรับควบคุมวงจรกรองกำลังแอคทีฟให้สามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะของกระแสอ้างอิงได้ โดยบทความนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) [9] เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน สามารถออกแบบได้ง่าย และมีสมรรถนะ



รูปที่ 1 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

การควบคุมที่ดีเพียงพอ จากระบบดังกล่าวเพื่อให้งจรรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยการจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี จำเป็นจะต้องออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (ค่า V_{dc} ค่า L_f และค่า C_{dc}) และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (k_p และ k_i) ของระบบควบคุมให้มีค่าที่เหมาะสม ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยใช้วิธีการดั้งเดิมที่ถูกนำเสนอใช้กับระบบกำลังไฟฟ้าทั่วไป [9–12] มาปรับใช้กับระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งสามารถดูรายละเอียดวิธีการออกแบบทั้งหมดได้จากหัวข้อที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ประกอบด้วย หัวข้อที่ 2
จะอธิบายขั้นตอนการคำนวณตรวจจบบัณฑิตด้วยวิธี SRF
หัวข้อที่ 3 จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร

กรองกำลังแอกทิฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า หัวข้อที่ 4 จะอธิบายการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยและควบคุมแรงดันบัสไฟตรง หัวข้อที่ 5 จะอธิบายการจำลองสถานการณ์การกําลังฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experimenter Kit หัวข้อที่ 6 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลการกําลังฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา และในหัวข้อสุดท้ายคือการสรุปผลของบทความ

2. การตรวจจับฮาร์ดมอนิกด้วยวิธี SRF

การตรวจจีโนมอนิคด้วยวิธี SRF [8] มีขั้นตอนในการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิง (i_c) ในการชดเชยให้กับวงจรรองกำลังแยกทีฟแบบขนานทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณแปลงค่ากระแสโวลต์ (i_L) ของระบบไปเป็นค่ากระแสโวลต์บนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) ด้วยสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่ากระแสโวลต์บนแกนหมุน DQ (i_{Ld}, i_{Lq}) โดยใช้สมการที่ (2) ซึ่ง θ คือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (point of common coupling: PCC) ของระบบที่พิจารณา

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) ค่า i_{Ld} จะประกอบด้วยปริมาณมูลฐาน ($\bar{i}_{Ld}$) และปริมาณฮาร์มอนิก ($\tilde{i}_{Ld}$) แสดงดังสมการที่ (3)

$$i_{Ld} = \bar{i}_{Ld} + \tilde{i}_{Ld} \quad (3)$$

ขั้นที่ 3 ใช้วงจรกรอง (filter) แยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิก $\tilde{i}_{Ld}$ ออกจากปริมาณมูลฐาน (ซึ่งบทความนี้เลือกใช้วงจรกรองผ่านสูง (high pass filter) อันดับ 2 ความถี่ตัดเท่ากับ 50 Hz)

ขั้นที่ 4 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{c\alpha}^*, i_{c\beta}^*$) โดยใช้สมการที่ (4)

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ld} - i_{DC} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่ i_{DC} คือ ปริมาณกระแสตรงที่ได้จากเอาต์พุตของตัวควบคุมในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc})

ขั้นที่ 5 คำนวณหากระแสอ้างอิงบนแกนเฟส (i_c^*) โดยกำหนดให้เท่ากับค่ากระแส $i_{c\alpha}$ แสดงดังสมการที่ (5)

$$i_c^* = i_{c\alpha}^* \quad (5)$$

จากขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ได้อธิบายในข้างต้น จะใช้สำหรับกรณีเฟสใดเฟสหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่ประกอบด้วยเฟส T และ M จึงต้องใช้บล็อกการตรวจจับฮาร์

มอนิกด้วยวิธี SRF จำนวน 2 บล็อกเพื่อคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิง i_{cT}^* และ i_{cM}^* ดังที่ปรากฏในระบบรูปที่ 1

3. การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

3.1 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_T, L_M) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะใช้วิธีการของ D. M. E. Ingram และ S. D. Round [10,12] ซึ่งการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวจะได้ผลเป็นค่าขอบเขตขนาดตัวเหนี่ยวนำสูงสุด (L_{fmax}) จากนั้นจะทำการเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ภายในขอบเขต L_{fmax} เนื่องจากโวลต์ทั้งสองเฟสของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้มีขนาดเท่ากัน ดังนั้น ค่า L_T และ L_M ที่ได้จากการออกแบบจึงกำหนดให้มีขนาดเท่ากันเท่ากับ L_f โดยรายละเอียดการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้

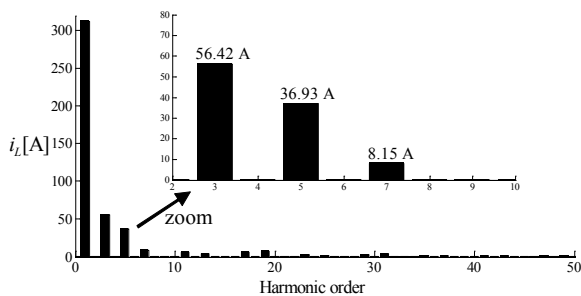
ขั้นที่ 1 คำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงในการชดเชยสูงสุด ($\max(\frac{di_c^*}{dt})$) โดยจะพิจารณาจากองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิก ($i_h(t)$) ที่ทำให้เกิดค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) และ (7) ดังนี้

$$i_{h(max)}(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

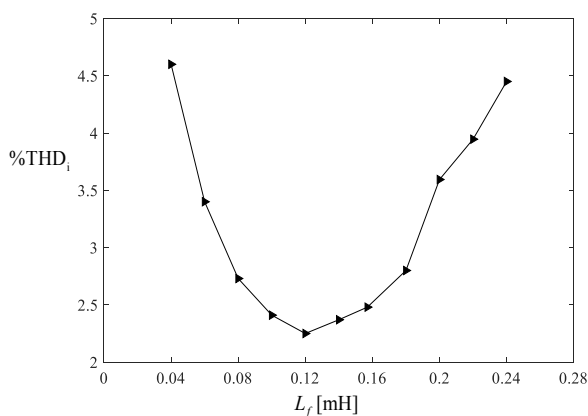
$$\max(\frac{di_c^*}{dt}) = A2\pi f \quad (7)$$

โดยที่ A คือ แอมพลิจูด และ f คือ ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ทำให้เกิดค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$

การคำนวณค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ จะพิจารณาจากสเปกตรัมของกระแสโวลต์ในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาที่ปรากฏฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ซึ่งในบทความนี้จะพิจารณาข้อมูลกระแสโวลต์ในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน [13] ซึ่งมีสเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 2 จากรูปดังกล่าว พบว่า กระแสฮาร์



รูปที่ 2 สเปกตรัมของกระแสไหลในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาการจัดฮาร์มอนิก



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า L_f และค่า %THD_i

มอดิกอันดับที่ 3 ($f = 180$ Hz) มีขนาดแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 56.42 A ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ($f = 300$ Hz) มีขนาดแอมพลิจูดสูงรองเป็นอันดับสองเท่ากับ 36.93 A จากขนาดกระแสฮาร์มอนิกทั้งสองอันดับดังกล่าว สามารถคำนวณค่า $\max(\frac{di_c}{dt})$ ได้เท่ากับ 63810 A/s และ 69611 A/s ตามลำดับ ดังนั้น การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองในขั้นตอนนี้จะเลือกใช้ค่า $\max(\frac{di_c}{dt})$ ที่คำนวณได้จากผลของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เนื่องจากมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 69611 A/s อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 1 ระบบกักจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานมีการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (T_T และ T_M) อัตราส่วน 26 kV: 1 kV เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC

ให้มีค่าต่ำลง จึงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่อยู่ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดกระแสสูงขึ้นตามอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า (26 เท่าของค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ชดเชยกำลังฮาร์มอนิก) ดังนั้น จะสามารถคำนวณค่า $\max(\frac{di_c}{dt})$ ใหม่ที่คิดผลของหม้อแปลงได้เท่ากับ 1809886 A/s แสดงได้ดังนี้

$$\max(\frac{di_c}{dt}) = (26)(69611) = 1809886 \text{ A/s}$$

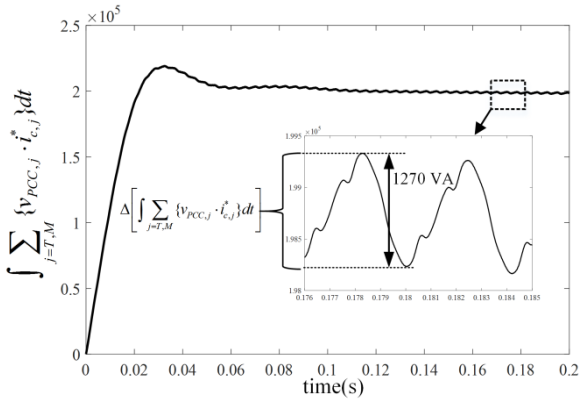
ขั้นที่ 2 คำนวณค่า $L_{f \max}$ จากสมการที่ (8)

$$L_{f(\max)} = \frac{V_{dc} - V_{PCC}}{\max(\frac{di_c}{dt})} \quad (8)$$

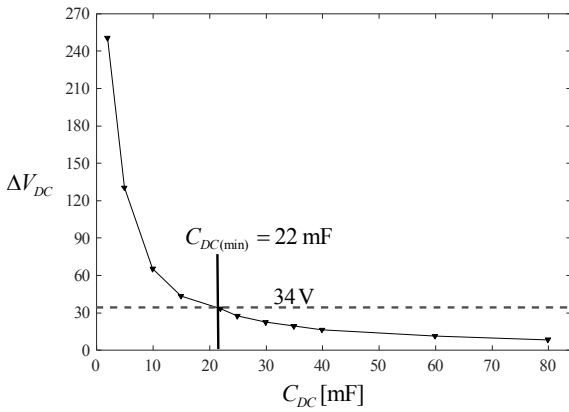
โดยที่ V_{PCC} คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับ 1414 V (พิจารณาที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า) และ V_{DC} คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งควรออกแบบให้มีค่ามากกว่า V_{PCC} [14] สำหรับบทความนี้ได้ออกแบบให้ V_{DC} มีค่าเท่ากับ 1700 V ดังนั้น จะสามารถคำนวณค่า $L_{f \max}$ ได้เท่ากับ 0.157 mH ดังนี้

$$L_{f(\max)} = \frac{1700 - 1414}{1809886} = 0.157 \text{ mH}$$

ขั้นที่ 3 กำหนดเลือกใช้ค่า L_f ที่อยู่ภายใต้ขอบเขต $L_{f \max}$ ซึ่งในบทความนี้จะใช้วิธีการทดสอบปรับเปลี่ยนค่า L_f ที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบผลสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และเลือกค่า L_f ที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา โดยผลการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปจะสังเกตได้ว่า ค่า L_f ที่ขนาดต่าง ๆ ส่งผลต่อสมรรถนะการกักจัดฮาร์มอนิกที่แตกต่างกัน (ค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าแตกต่างกัน) โดยค่า L_f ที่ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยกักจัดฮาร์มอนิกในระบบที่พิจารณาได้ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.12 mH (ให้ผลค่า %THD_i น้อยที่สุด) ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่า L_f (L_{JT}, L_{JM}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเท่ากับ 0.12 mH



รูปที่ 4 ค่าปริพันธ์ของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมกับกระแสฮาร์มอนิกของระบบที่พิจารณา



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า \$C_{DC}\$ และค่า \$\Delta V_{DC}\$

3.2 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (\$C_{DC}\$) จะใช้วิธีการของ T. Thomas และคณะ [11,12] โดยผลการคำนวณที่ได้จะเป็นค่าขอบเขตต่ำสุดของขนาดตัวเก็บประจุ (\$C_{DC(min)}\$) สำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การออกแบบค่า \$C_{DC}\$ ด้วยวิธีการดังกล่าวมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณหาค่า \$C_{DC(min)}\$ จากสมการที่ (9)

$$C_{DC(min)} = \frac{\Delta \left[\int \sum_{j=T,M} \{v_{PCC,j} \cdot i_{c,j}^*\} dt \right]}{\Delta V_{DC} \times V_{DC}^*} \quad (9)$$

โดย \$V_{DC}^*\$ คือ ค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการออกแบบ ส่วนค่า \$\Delta V_{DC}\$ คือ ขนาดแรงดันกระเพื่อมของแรงดัน \$V_{DC}\$ และค่า \$\Delta \left[\int \sum_{j=T,M} \{v_{PCC,j} \cdot i_{c,j}^*\} dt \right]\$ คือ ขนาดการกระเพื่อมของเทอมปริพันธ์ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (\$v_{PCC,j}\$) กับกระแสฮาร์มอนิกหรือกระแสอ้างอิง (\$i_{c,j}^*\$) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกทั้งสองเฟส (\$j=T,M\$) ซึ่งสำหรับระบบที่พิจารณานี้ สามารถแสดงการหาค่า \$\Delta \left[\int \sum_{j=T,M} \{v_{PCC,j} \cdot i_{c,j}^*\} dt \right]\$ ได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1270 VA

จากสมการที่ (9) ถ้ากำหนดให้ \$\Delta V_{DC}\$ เท่ากับ 34 V (2% ของค่า \$V_{DC}^*\$) [11] จะสามารถคำนวณค่า \$C_{DC(min)}\$ ได้เท่ากับ 22 mF ดังนี้

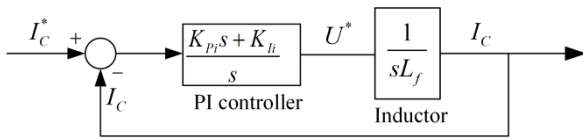
$$C_{DC(min)} = \frac{1270}{34 \times 1700} = 22 \text{ mF}$$

ขั้นที่ 2 กำหนดเลือกใช้ค่า \$C_{DC}\$ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่อยู่ในขอบเขตของ \$C_{DC(min)}\$ ซึ่งในบทความนี้จะใช้วิธีการทดสอบปรับเปลี่ยนค่า \$C_{DC}\$ ที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบผลกระทบที่มีต่อค่า \$\Delta V_{DC}\$ และเลือกใช้ค่า \$C_{DC}\$ ที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา โดยผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อค่า \$C_{DC}\$ มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของ \$\Delta V_{DC}\$ มีค่าลดลง โดยที่ค่า \$C_{DC}\$ เท่ากับค่า 22 mF (\$C_{DC(min)}\$) พบว่า \$\Delta V_{DC}\$ มีค่าประมาณ 34 V ตามเงื่อนไขการออกแบบ อย่างไรก็ตาม ในบทความนี้จะเลือกใช้ \$C_{DC}\$ ที่มีค่ามากกว่า \$C_{DC(min)}\$ ที่ค่าเท่ากับ 30 mF ทั้งนี้เพื่อให้สมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีความคงทนและมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบที่พิจารณาได้มากยิ่งขึ้น

4. การออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

4.1 การออกแบบตัวควบคุมกระแสชดเชย

ระบบควบคุมกระแสชดเชย (\$i_c\$) ด้วยตัวควบคุมพีไอได้งปรากฏในรูปที่ 1 สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับใช้



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแสตรง

ออกแบบตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 6 จากรูปดังกล่าว ค่าผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิง (I_C^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกและค่ากระแสตรง (I_C) จะถูกป้อนเป็นอินพุตให้ตัวควบคุมพีไอ และกำหนดให้เอาต์พุตของตัวควบคุม คือ ค่าแรงดันอ้างอิง U^* สำหรับนำไปผ่านพลานต์ (plant) ตัวเหนี่ยวนำ L_f ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อจำลองการผิดกระแสตรง I_C ดังปรากฏในรูป จากบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมดังกล่าว สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด (closed-loop transfer function) ได้ดังสมการที่ (10)

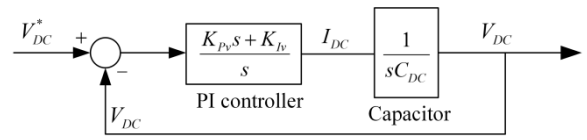
สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{Pi} และ K_{Ii} ของตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมกระแสตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะใช้วิธีการประมาณ [9] โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์พจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนระบบควบคุมดังสมการที่ (10) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานดังสมการที่ (11) ซึ่งผลการเปรียบเทียบดังกล่าวจะได้สมการสำหรับใช้ออกแบบค่า K_{Pi} และ K_{Ii} ของตัวควบคุมพีไอ ซึ่งแสดงผลได้ดังสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ

$$\frac{I_C}{I_C^*} = \frac{\left(\frac{K_{Pi}s + K_{Ii}}{L_f} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_{Pi}}{L_f} \right)s + \frac{K_{Ii}}{L_f}} \quad (10)$$

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta s \omega_n + \omega_n^2} \quad (11)$$

$$K_{Pi} = 2\zeta_i \omega_n L_f \quad (12)$$

$$K_{Ii} = \omega_n^2 L_f \quad (13)$$



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

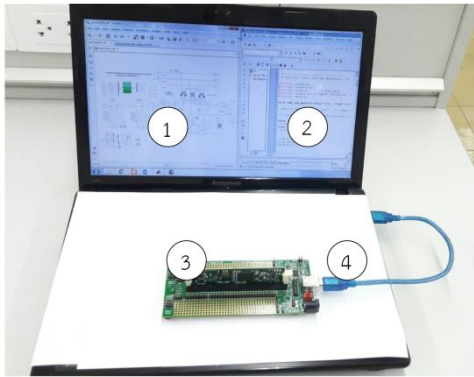
โดยที่ ζ_i คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) และ ω_{ni} คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของการควบคุมกระแสตรง

จากสมการที่ (12) และ (13) กำหนดให้ค่า ω_n เท่ากับ $2\pi \times 3000$ rad/s และค่า ζ_v เท่ากับ 0.707 จะสามารถคำนวณค่า K_{Pi} ได้เท่ากับ 5.33 และ K_{Ii} ได้เท่ากับ 71061

หมายเหตุ: ค่า ω_{ni} จะพิจารณาจากค่าความถี่ของฮาร์มอนิกสูงสุดที่ต้องการกำจัด ซึ่งในบทความนี้พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกสูงสุดที่อันดับ 50 ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 3000 Hz ดังนั้นค่า ω_{ni} จึงกำหนดเท่ากับ $2\pi \times 3000$ rad/s และนอกจากนี้ การออกแบบให้ค่า ζ_v เท่ากับ 0.707 เนื่องจากการให้การควบคุมกระแสตรงมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วและไม่เกิดการพุ่งเกิน (overshoot) ที่สูงจนเกินไป

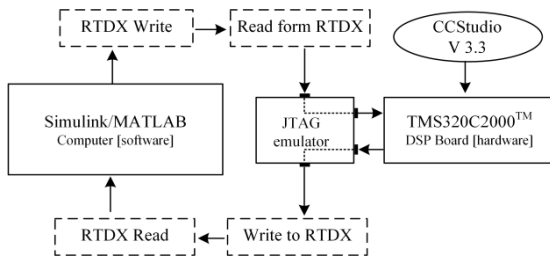
4.2 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ ดังปรากฏในรูปที่ 1 สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 7 โดยอินพุตของระบบ คือ ผลต่างระหว่างค่าแรงดันอ้างอิง V_{DC}^* และค่าแรงดัน V_{DC} ซึ่งจะถูกนำไปผ่านตัวควบคุมพีไอเพื่อกำหนดให้เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_{DC} (I_{DC}) และจากนั้นจะนำค่า I_{DC} ที่ได้ไป ผ่านพลานต์ตัวเก็บประจุ C_{DC} ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อจำลองเป็นค่าแรงดัน V_{DC} ต่อไป จากบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงดังรูปที่ 7 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดได้ดังสมการที่ (14)



1. Simulink program 2. CCStudio v3.3
3. TMS320C2000TM Experimenter Kit 4. JTAG emulator

รูปที่ 8 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experimenter Kit



รูปที่ 9 ไดอะแกรมการทำงานของระบบจำลองแบบฮาร์ดแวร์ในลูป

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{pv} และ K_{iv} ของตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะใช้วิธีการประมาณเช่นกัน [9] โดยผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์พจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (14) กับฟังก์ชันถ่ายโอนมาตรฐานในสมการที่ (11) จะได้สมการสำหรับใช้คำนวณออกแบบค่า K_{pv} และ K_{iv} แสดงดังสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ โดยที่ค่า ζ_v คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูประดัน และค่า ω_{nv} คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งควรออกแบบให้มีค่าน้อยกว่า ω_{ni} ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมของลูประดันจำเป็นต้องมีความไวสูงกว่าลูประกระแส

จากสมการที่ (15) และ (16) กำหนดให้ค่า ω_{nv} เท่ากับ 10 π และค่า ζ_v เท่ากับ 0.707 จะสามารถคำนวณออกแบบค่า K_{pv} ได้เท่ากับ 0.666 และค่า K_{iv} ได้เท่ากับ 7.40

$$\frac{V_{DC}}{V_{DC}^*} = \frac{\left(s + \frac{K_{pv}}{K_{iv}}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}}{C_{DC}}\right)s + \frac{K_{iv}}{C_{DC}}} \quad (14)$$

$$K_p = 2\zeta_v \omega_{nv} C_{DC} \quad (15)$$

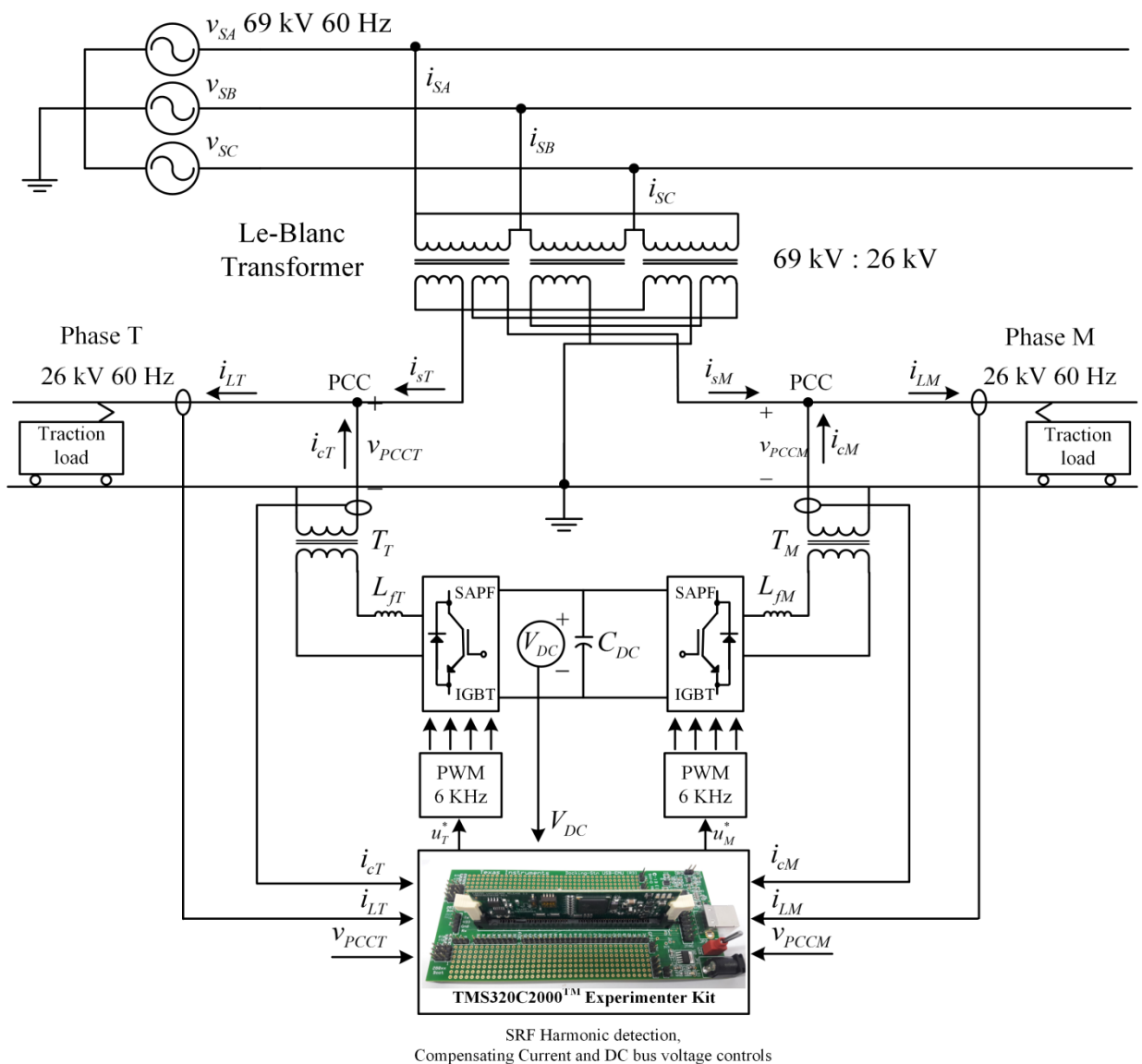
$$K_i = \omega_{nv}^2 C_{DC} \quad (16)$$

จากผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟและค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3 และ 4 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

5. การจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์ดมอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

การทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์ดมอนิกในระบบแรงไฟฟ้าของบทความนี้จะใช้วิธีการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware in the loop: HIL) [15] โดยเครื่องมือที่ใช้จะประกอบด้วยซอฟต์แวร์ (software) โปรแกรม Simulink/MATLAB และอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (hardware) บอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experiment Kit ที่อาศัยการควบคุมผ่านโปรแกรม CCStudio V3.3 โดยการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink และบอร์ด DSP ดังกล่าวจะเชื่อมต่อผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยสาย (USB JTAG emulator) ดังแสดงในรูปที่ 8

ขั้นตอนการทำงานของระบบจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 9 โดยจะเริ่มต้นจากการใช้บล็อก RTDX Write บนโปรแกรม Simulink สำหรับทำหน้าที่ส่งข้อมูลอินพุตของระบบที่ใช้ในการคำนวณไปยังบอร์ด DSP ผ่านทางพอร์ต USB JTAG emulator ในขณะที่บอร์ด DSP จะรับข้อมูลดังกล่าวด้วยการใช้คำสั่ง Read From RTDX ซึ่งจะต้องเขียนคำสั่งที่โปรแกรม CCStudio V3.3 (โปรแกรมควบคุมการทำงานของบอร์ด DSP) จากนั้นเมื่อบอร์ด DSP ดำเนินการคำนวณหรือประมวลผลแล้ว ข้อมูลเอาต์พุตจากบอร์ด DSP จะถูกส่งกลับไปยังโปรแกรม Simulink ด้วยคำสั่ง Write to RTDX ก่อนที่บล็อก RTDX



รูปที่ 10 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

Read บนโปรแกรม Simulink จะทำหน้าที่รับข้อมูลเอาต์พุตที่ได้ไปใช้งานต่อ การอธิบายหลักการส่งและรับข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงการคำนวณจำลองสถานการณ์ในหนึ่งรอบช่วงเวลาการซิกตัวอย่าง (sampling time) เท่านั้น สำหรับในรอบถัด ๆ ไป จะดำเนินการซ้ำเดิมเพียงแต่ค่าอินพุตที่ใช้ในการคำนวณจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของระบบการจำลองสถานการณ์

จากระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกดังรูปที่ 1 สามารถสร้างเป็นระบบการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ใน

รูปแสดงได้ดังรูปที่ 10 จากรูปดังกล่าว ส่วนของระบบแรงไฟฟ้าและวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะถูกสร้างขึ้นที่โปรแกรม Simulink ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Simscape/Power System) ในขณะที่ส่วนของการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF และระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกโปรแกรมสร้างที่บอร์ด DSP สำหรับข้อมูลอินพุตที่ส่งให้กับบอร์ด DSP ประกอบด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (v_{PCCT}, v_{PCCM}) ค่าแรงดันบัสไฟตรง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมสำหรับระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา

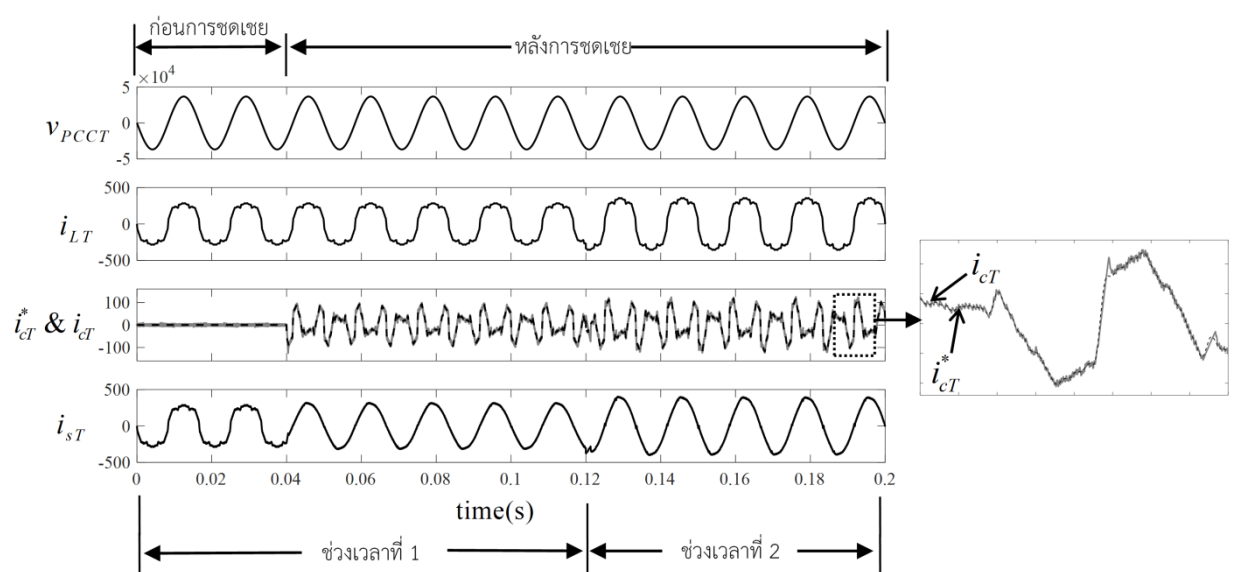
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ	$L_{fT}, L_{fM} = 0.12 \text{ mH}$ $V_{DC} = 1700 \text{ V},$ $C_{DC} = 30 \text{ mF}$
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสชดเชย	$K_{Pi} = 5.33,$ $K_{Ii} = 71061$
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรง	$K_{Pv} = 0.666,$ $K_{Iv} = 7.40$

(V_{DC}) ค่ากระแสโหลด (i_{LT}, i_{LM}) และค่ากระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (i_{CT}, i_{CM}) ส่วนข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากบอร์ด DSP คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (u_T^*, u_M^*) สำหรับนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม (triangular carrier) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ตามเทคนิคการสวิตช์แบบ pulse width modulation (PWM) โดยสัญญาณพัลส์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ควบคุมสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้สามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่สร้างอยู่บนโปรแกรม Simulink ต่อไป

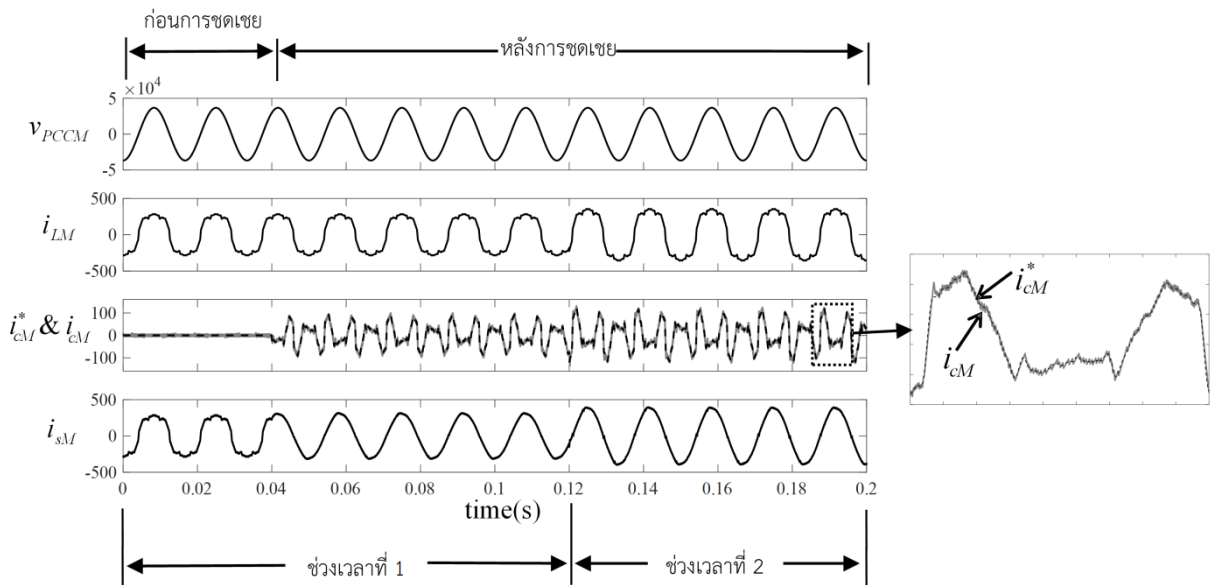
6. ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปดังรูปที่ 10 ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมพีไอที่ได้จากออกแบบไว้ในตารางที่ 1 สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 11 ถึง 13 โดยการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวได้พิจารณาแทนโหลดรางไฟฟ้า (traction load) ด้วยแหล่งจ่ายกระแสโหลดทางอุดมคติที่ประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่กำหนดตามข้อมูลอ้างอิงจากการตรวจวัดปริมาณฮาร์มอนิกเฉลี่ยของระบบรางไฟฟ้าในประเทศไต้หวัน [13]

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าของเฟส T และ M ในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ ในช่วงเวลาที่ 1 ก่อนมีการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีสังเกตได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสองเฟส (i_{sT}, i_{sM}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับกระแสโหลด (i_{LT}, i_{LM}) ทุกประการ โดยสามารถวัดค่า %THD_i ที่คำนวณตามสมการที่ (17) ทั้งสองเฟสได้เท่ากัน



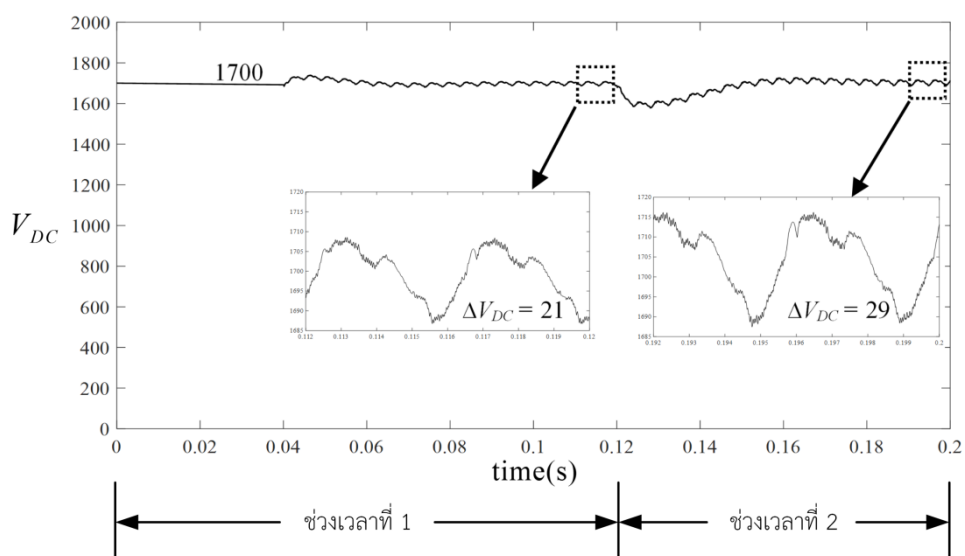
รูปที่ 11 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกของเฟส T ในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกของเฟส M ในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา

เท่ากับร้อยละ 22.16 อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่เวลา 0.04 ถึง 0.12 วินาที เมื่อวงจรรอกำลังแยกที่ฉีดกระแสชดเชย (i_{CT}, i_{CM}) ที่มีลักษณะรูปสัญญาณคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_{CT}^*, i_{CM}^*) เข้าสู่ระบบแรงไฟฟ้า จะสังเกตได้ว่าค่ากระแส i_{ST} และ i_{SM} กลับมามีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยวัดค่า %THD ได้เท่ากับ

ร้อยละ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 ต่อมาในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.12 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อโหลดแรงไฟฟ้าของทั้งสองเฟสมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสโหลดเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า วงจรรอกำลังแยกที่พร้อมกับระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบยังคงมีความยืดหยุ่นสามารถฉีดกระแสชดเชย



รูปที่ 13 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

(i_{cT}, i_{cM}) กำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปได้ดี เช่นกัน โดยวัดค่า %THD_i ของกระแส i_{sT} และ i_{sM} ได้เท่ากับ ร้อยละ 2.31 และ 2.32 ตามลำดับ ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (17)$$

โดยที่ I_1 คือ ขนาดกระแสที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz

I_n คือ ขนาดกระแสที่ความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่

2 ถึง 50

นอกจากนี้ผลของการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบมีประสิทธิภาพที่ดีสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าเท่ากับ 1700 V ได้ตลอดทุกช่วงเวลาถึงแม้โหลดแรงไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง โดยขนาดของแรงดันกระแสเฟือง (ΔV_{dc}) ในช่วงเวลาที่ 1 มีค่าเท่ากับ 21 V และ ในช่วงเวลาที่ 2 มีค่าเท่ากับ 29 V ซึ่งค่า ΔV_{dc} ดังกล่าวยังคงอยู่ภายใต้ขอบเขตของแรงดันกระแสเฟืองที่ได้ออกแบบไว้ (34 V)

จากผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้าดังกล่าวทั้งหมดในช่วงต้น หมายความว่า ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบตามวิธีการที่ได้นำเสนอมีความเหมาะสมกับระบบ ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบแรงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี และค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std 519-2014

7. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมสำหรับใช้กำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้า โดยการออกแบบดังกล่าวได้ปรับใช้วิธีการ

ดั้งเดิมเพื่อให้เหมาะสมกับระบบแรงไฟฟ้า ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปพบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟพร้อมกับระบบควบคุมที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอสามารถชดเชยกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าอยู่ภายในกรอบมาตรฐานของ IEEE Std 519-2014

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงให้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shu Z, Xie S, Li Q. Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation and Harmonic Filtering in Traction Power System. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011; 26(2): 334–343.
- [2] Luo A, Wu C, Shen J, Shuai Z, Ma F. Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011; 26(10): 2844–2856.
- [3] Tan P-C, Loh PC, Holmes DG. A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2004; 19(4): 1043–1052.
- [4] Hu H, He Z, Gao S. Passive Filter Design for China High-Speed Railway with Considering Harmonic Resonance and Characteristic Harmonics. *IEEE*

- Transactions on Power Delivery*. 2015; 30(1): 505–514.
- [5] Jou H-L, Wu J-C, Chu H-Y. New single-phase active power filter. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. 1994; 141(3): 129–134.
- [6] Cirrincione M, Pucci M, Vitale G, Miraoui A. Current harmonic compensation by a single-phase shunt active power filter controlled by adaptive neural filtering. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009; 56(8): 3128–3143.
- [7] Gonzalez M, Cardenas V, Pazos F. DQ Transformation Development for Single - Phase Systems to Compensate Harmonic Distortion and Reactive Power. In: 9th *IEEE Int. Power Electron. Congress*. 2004.
- [8] Padungsin M, Narongrit T, Areerak KL. The Comparison Study of Harmonic Detection Algorithms for Single-Phase Power Systems. In: 5th *International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*. Kitakyushu. 2018. p. 1–6.
- [9] Rahmani S, Mendalek N, Al-Haddad K. Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010; 57: 3364–3375.
- [10] Ingram DME, Round SD. A novel digital hysteresis current controller for an active power filter. In: *Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. 1997; 2: p. 744–749.
- [11] Thomas T, Haddad K, Joos G, Jaafari A. Design and performance of active power filters. In *IEEE Industry Applications Magazine*. 1998; 4(5): p. 38–46.
- [12] ฐานันดร ตรังใจ, ทศพร ณรงฤทธิ์, กองพล อารีรักษ์. การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้า. ใน: *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 41 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 2561. หน้า 197–200.
- [13] Huang S-R, Chen B-N. Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2002; 17(2): 495–499.
- [14] Routimo M, Salo M, Tuusa H. Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters. *IEEE Transactions on Power Electronics, Power Electronics*. 2007; 22: 636–643.
- [15] Narongrit T, Areerak K-L, Areerak K-N. A New Design Approach of Fuzzy Controller for Shunt Active Power Filter. *Electric Power Components and Systems*. 2015; 43: 685–694.