

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้า Instability Mitigation of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter by Using Feedforward Loop

รัฐพล โพธิ์สังข์¹ เทพพนม โสภะเพิ่ม² กองพัน อารีรักษ์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Ratapon Phosung¹ Theppanom Sopapirm² Kongpan Areerak^{1*}

¹ School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue, Muang, Nakhon Rachasima, Thailand, 30000

²Department of electrical power engineering, Mahanakhon university of technology

140 Cheumsampan Rd, Nongchok, Bangkok, Thailand, 10530

*Corresponding author Email: kongpan@sut.ac.th

(Received: September 19, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

ในบทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้าสำหรับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงานจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม อันเป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์จากวิธีคิดผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง การตรวจสอบผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะพึงพาการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB จากผลการตรวจสอบ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้มีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในทางทฤษฎี อีกทั้งยังสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกลับมามีเสถียรภาพตลอดการทำงาน

คำสำคัญ: โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ วงรอบป้อนไปหน้า ทฤษฎีบทค่าเจาะจง

ABSTRACT

This paper presents the instability mitigation of AC-DC power system feeding a controlled buck converter by using a feedforward loop. Power converters with their controls normally behave as constant power loads (CPLs). These CPLs have negative resistance which may cause system instability. Therefore, it is essential to study the instability mitigation technique for improving the system stability. The dynamic model derived from the DQ method and the generalized state-space averaging

method (GSSA) is used with the eigenvalue theorem for the stability analysis. The proposed instability mitigation is verified by the intensive time-domain in MATLAB. The results show that the proposed instability mitigation in article is consistent with the stability analysis in theorem. In addition, the unstable system due to a constant power load can become back to the stable operation using the proposed technique.

Keyword: Constant power loads, instability mitigation, feedforward loop, eigenvalue theorem.

รายการสัญลักษณ์	
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	แรงดันเฟสที่บัสแหล่งจ่ายแรงดัน
R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}	ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า
ω	ค่าความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
ϕ	มุมเฟสของแกนหมุนดีคิว
ϕ_1	มุมเฟสของบัสแรงดันเอซี
λ	มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันเฟสที่บัสแหล่งจ่ายและแรงดันเฟสที่บัสเอซี
I_{in}	กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรเรียงกระแส
r_L, L_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_c, C_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
E_{dc1}	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสโดยไม่พิจารณาผลของมุมเหลื่อม
E_{dc}	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส
V_{dc}, I_{dc}	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบัสดีซี
V_{sd}, V_{sq}	แรงดันไฟฟ้าที่บัสแหล่งจ่ายบนแกนดีคิว
I_{sd}, I_{sq}	กระแสไฟฟ้าที่บัสแหล่งจ่ายบนแกนดีคิว
$V_{bus,d}, V_{bus,q}$	แรงดันไฟฟ้าที่บัสเอซีบนแกนดีคิว
$I_{in,d}, I_{in,q}$	กระแสไฟฟ้าที่บัสเอซีบนแกนดีคิว
L, C, R	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบัก
I_L, V_o	กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปรผันแบบบัก
V_o^*	แรงดันเอาต์พุตที่กำหนด
X_v, X_i	อัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงวงรอบกระแสและแรงดันของวงจรแปรผันแบบบัก
K_{pv}, K_{pi}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี

K_{iv}, K_{ii}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอ
A_r	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม
d_x	สัญญาณการควบคุม
d^*	ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์
K_f	ค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน
ω_o	ความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองผ่านแถบ
ω_1, ω_2	ความถี่ตัดของตัวกรองผ่านแถบ
V_{ref}	แรงดันเอาต์พุตที่กำหนดใหม่

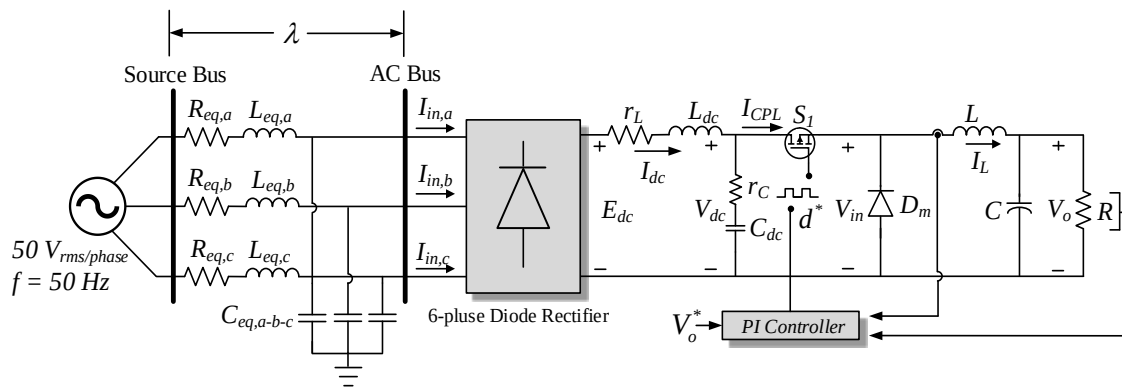
1. บทนำ

ณ ปัจจุบันได้มีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้งานในระบบต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก อาทิเช่น การใช้งานในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน รถไฟฟ้า เรือดำน้ำ หรือระบบควบคุมในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น การใช้งานในระบบดังกล่าวมักจะทำให้วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ทั้งแปลงจากเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย มีการดูแลบำรุงรักษาที่ต่ำ และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ซึ่งวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมมักจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power load: CPL) ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative resistance) [1]-[3] ต่อระบบโดยรวม ที่นอกจากจะทำให้ระบบมีความไม่เสถียรแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพ โดยอาศัยแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ เพื่อคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงการทำงานของระบบ ณ จุดดังกล่าว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันส่วนใหญ่จะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) อันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ในวงจร ซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องหาวิธีในการพิสูจน์แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเปลี่ยนไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายคือ วิธีดีคิว (DQ method) [4] วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value method) [5] และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA) [6] เป็นต้น แต่เนื่องจากแบบจำลองที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้นไม่ยืดหยุ่นและอาจจะต้องพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นในบทความนี้จะทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากวิธีการดังกล่าวทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) เพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ [7], [8] แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เสถียรภาพทำได้เพียงคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าจ่ายโหลดในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นภายใต้พิกัดของแหล่งจ่ายได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ อันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ วิธีแบบพาสซีฟและวิธีแบบแอกทีฟ โดยวิธีแบบพาสซีฟจะอาศัยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุหรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง [9] เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและทำให้ระบบจ่ายโหลดได้สูงขึ้น รวมถึงการเพิ่มความต้านทานในระบบ [10] ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งาน

จริง แต่มีข้อเสียคือ ทำให้ขนาด น้ำหนัก และราคาของระบบมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ สำหรับวิธีแบบแอกทีฟแบ่งได้เป็น 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การบรรเทาด้านแหล่งจ่าย [11]-[15] วิธีนี้ทำได้โดยการสร้างสัญญาณชดเชยฉีดไปยังระบบควบคุมด้านแหล่งจ่ายเพื่อสร้างผลการหน่วงให้กับระบบ แต่ถึงอย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวนี้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสที่ไม่มีการควบคุมเฟสจำเป็นต้องเพิ่มวงจรช่วยเข้ามาในระบบ [16], [17] ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบและทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ในส่วนของแนวทางที่ 2 คือ การบรรเทาด้านโหลด [18]-[23] จะอาศัยหลักในการเพิ่มผลการหน่วงเช่นเดียวกับการบรรเทาด้านแหล่งจ่าย แต่จะนำสัญญาณชดเชยที่สร้างขึ้นฉีดไปยังระบบควบคุมด้านโหลดแทน ซึ่งวิธีการนี้จะไม่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบจึงทำให้มีความน่าเชื่อถือสูงกว่าการบรรเทาด้านแหล่งจ่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวในบทความนี้จึงเลือกการบรรเทาด้านโหลดโดยใช้วงจรฟีดฟอร์เวิร์ด (feedforward loop) [21], [22] ซึ่งเป็นวิธีการที่ยังไม่พบเจอในงานวิจัยในอดีตที่นำมาใช้กับระบบที่พิจารณาในบทความ จากการวิเคราะห์เสถียรภาพ ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สำหรับระบบที่พิจารณาในบทความนี้ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้ สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้อีกด้วย

บทความนี้ประกอบไปด้วย 5 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบที่พิจารณา ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา หลักการในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงจรฟีดฟอร์เวิร์ด พร้อมทั้งการยืนยันประสิทธิภาพของวิธีดังกล่าว ผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้รับการนำเสนอ ในส่วนที่ 4 ในส่วนที่ 5 เป็นการสรุปข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังผิวดิน (R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}) วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และ วงจรกรองสัญญาณดีซี (r_c, C_{dc}, r_L, L_{dc}) ที่เชื่อมต่อกับ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งก็คือวงจรแปลงผันแบบบักที่มี การควบคุม โดยโหลดดังกล่าวสามารถทำให้ระบบเกิดการ ขาดเสถียรภาพ ซึ่งส่งผลให้แรงดันบัสดีซี (V_{dc}) เกิดการ กระเพื่อมของแรงดันเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งไม่สามารถ ควบคุมแรงดันเอาต์พุต (V_o) ได้ ดังนั้นในหัวข้อที่ 3 จึง นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ วิธีตีความสมมูลกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งจะ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเวลา และมีความ เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทความ นี้จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการพิสูจน์หาแบบจำลองคือ พิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ พิจารณาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในส่วนแรกจะใช้ วิธีตีความใน [4] วิเคราะห์วงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายของระบบ ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่าน สายส่งกำลังไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบบริดจ์ โดยกำหนดให้มุมเฟสการหมุนของสัญญาณ การสวิตช์ ($\phi_i = \phi$) เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง

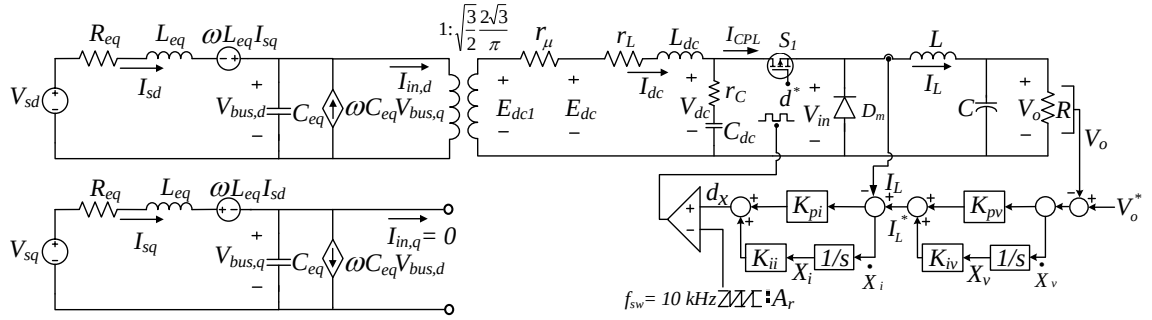
ดังนั้น จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนดีคิวของระบบ ไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 พบว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับรวมทั้ง สายส่งกำลังไฟฟ้าผิวดินจะถูกเปลี่ยนให้อยู่บนแกนดีคิว โดยวงจรเรียงกระแสสามเฟสได้ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปหม้อ แปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่ง่ายต่อการ วิเคราะห์วงจร รวมไปถึงสามารถกำจัดสัญญาณการสวิตช์ ของไดโอดซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเวลา

ลำดับต่อไปจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปใน [6] พิจารณาวงจรทางฝั่งโหลดของระบบไฟฟ้า เพื่อกำจัด สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัว ควบคุมแบบพีไอ โดยโครงสร้างของตัวควบคุมแบ่ง ออกเป็น 2 ส่วนคือ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (K_{pv}, K_{iv}) และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (K_{pi}, K_{ii}) ซึ่งมีอินพุตคือ แรงดันอ้างอิง (V_o^*) และมีเอาต์พุต คือ สัญญาณควบคุม (d^*) โดยสัญญาณควบคุม d^* จะ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม เพื่อสร้างเป็น ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (d^*) ดังสมการที่ (1)

$$d^* = \frac{1}{A_r} (-K_{pi} I_L - K_{pv} K_{pi} V_o + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pv} K_{pi} V_o^*) \quad (1)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของ ระบบในรูปที่ 2 ที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และสมการที่ (1) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนแกนดีคิว

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{sd} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} &= -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} \\
 &\quad - \frac{r_c K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L^2 - \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_c K_{iv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L X_v \\
 &\quad + \frac{r_c K_{ii}}{A_r L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o \\
 &\quad - \frac{K_{iv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{ii}}{A_r C_{dc}} I_L X_i - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{I}_L &= -\frac{K_{pi}}{A_r L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o - \frac{1}{L} V_o + \frac{K_{iv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} X_v \\
 &\quad + \frac{K_{ii}}{A_r L} V_{dc} X_i + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o^* \\
 \dot{V}_o &= \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\
 \dot{X}_v &= -V_o + V_o^* \\
 \dot{X}_i &= -I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^*
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{cases} \dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u} \end{cases} \tag{3}$$

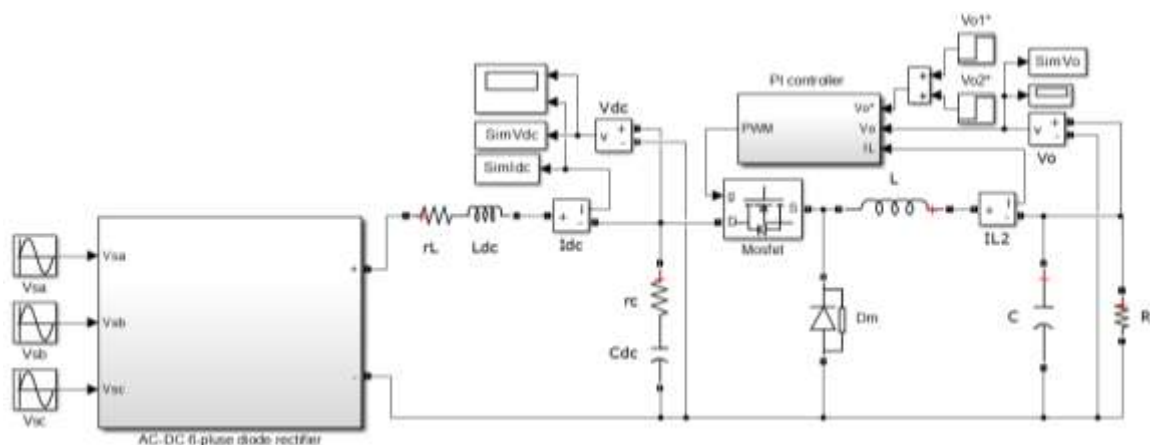
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3) กับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 3 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า
R_{eq}	0.1 Ω
C_{eq}	2 nF
r_L	0.01 Ω
L_{dc}	30 mH
r_c	0.4 Ω
C_{dc}	1000 μ F
L ($\Delta I_L \leq 0.2$ A)	15 mH
C ($\Delta V_o \leq 2.8$ mV)	1000 μ F
R	20 Ω
K_{pv}	0.0757
K_{iv}	3.9478
K_{pi}	2.2564
K_{ii}	2025.3
A_r	10

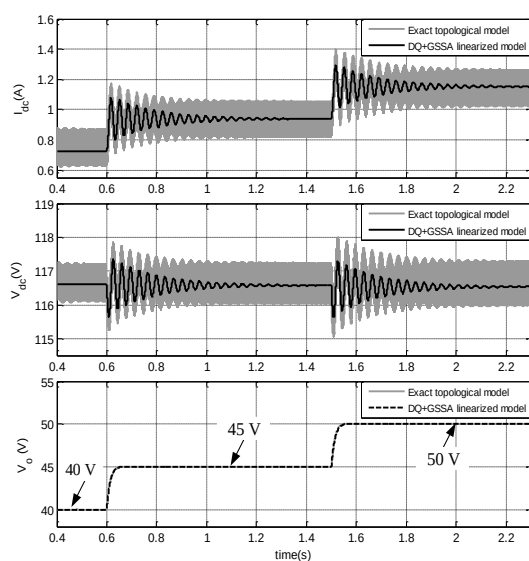
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากสมการที่ (2) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3) ซึ่งค่าต่าง ๆ ในเมตริกซ์ **A** **B** **C** และ **D** จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ



รูปที่ 3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

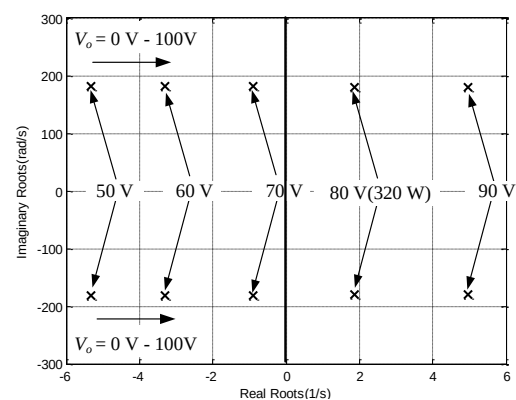
จากรูปที่ 4 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด จาก 40 V ไปเป็น 45 V ที่เวลา 0.6 วินาที และจาก 45 V ไปเป็น 50 V ที่เวลา 1.5 วินาที ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} และ V_o ที่ได้จากแบบจำลองมีรูปร่างลักษณะที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง หรือกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ในทางทฤษฎีนั้นสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งยังเหมาะสำหรับนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 3.2



รูปที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณา

3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา

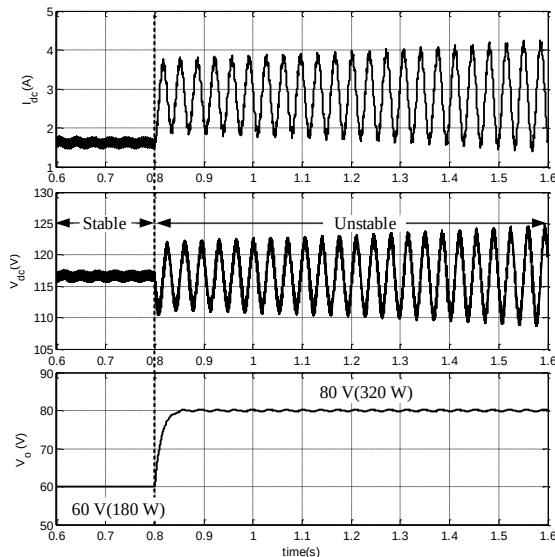
การวิเคราะห์หาจุดปฏิบัติงานที่ส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะอาศัยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3) ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมทริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) $A(x_o, u_o)$ แสดงได้ดังในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้โหลดคงจรรแปลงผันแบบบัคค์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก 0 V (0 W) ไปจนถึง 100 V (500 W)



รูปที่ 5 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลด จาก 0 - 100 V

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันเอาต์พุตของโหลดมีค่าเพิ่มจาก 70 V (245 W) ไปเป็น 80 V (320 W) จะทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งขวา ซึ่งหมายถึงระบบไฟฟ้าที่

พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 5 ด้วยการจำลองสถานการณ์

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 60 V (180 W) ไปเป็น 80 V (320 W) ที่เวลา 0.8 วินาที จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งพิจารณาจากการกระเพื่อมของแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น และทำให้สมรรถนะการควบคุมของระบบลดลง ดังนั้น ในบทความนี้จึงได้นำวงรอบป้อนไปนำมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบที่พิจารณาในบทความนี้ ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 4

4. การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า

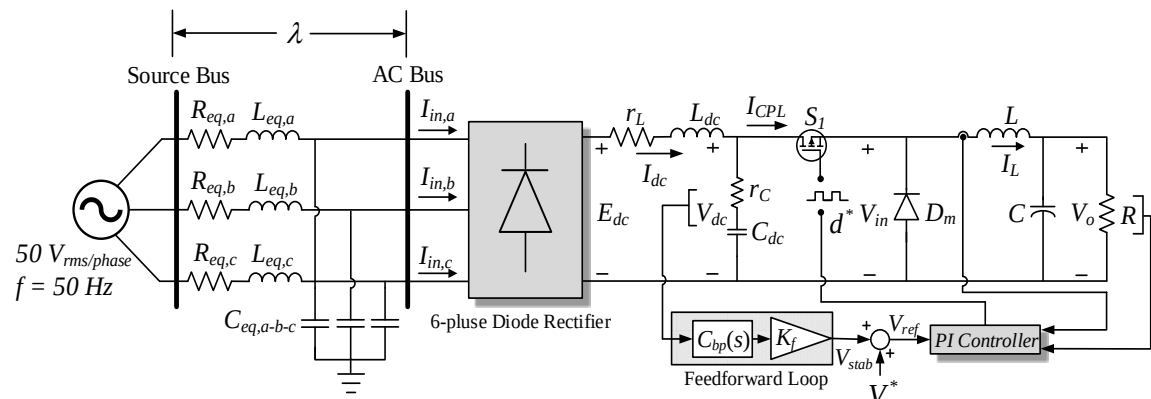
ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้าสำหรับประยุกต์ใช้กับวงจรกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแบบบักที่มีกรควบคุม แสดงดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการลดผลกระทบทางด้านเสถียรภาพที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในที่นี้ก็คือ วงจรแปลงผันแบบบักที่มี

การควบคุม ทำได้โดยการตรวจจับแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ผ่านตัวกรองผ่านแถบ ($C_{bp}(s)$) โดยตัวกรองผ่านแถบนี้จะกรองสัญญาณความถี่รอบ ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองสัญญาณดีซี จากนั้นนำมาปรับคูณกับค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_f) เพื่อทำหน้าที่ปรับอัตราขยายในการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นการสร้างแรงดันสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (V_{stab}) และนำไปป้อนรวมกับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) สำหรับใช้สร้างแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดใหม่ (V_{ref}) ของวงจรแปลงผันแบบบัก แสดงดังสมการที่ (4)

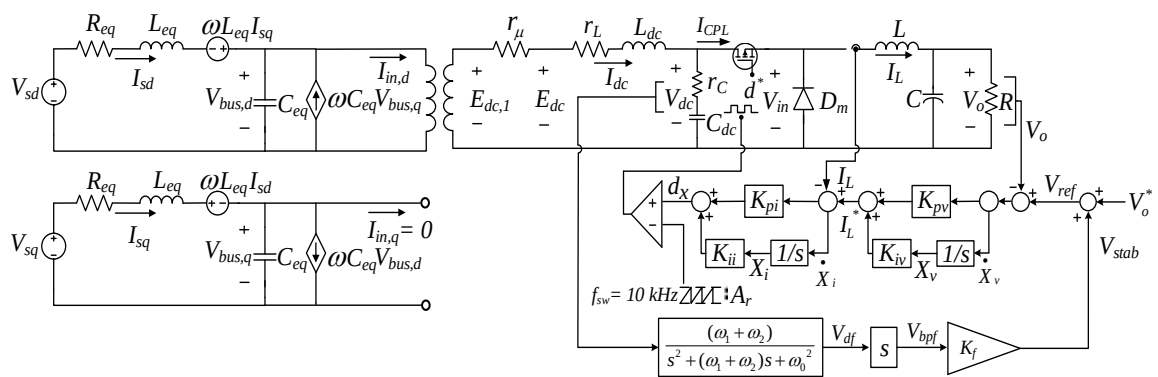
$$V_{ref} = V_o^* + V_{stab} \quad (4)$$

เมื่อ $V_{stab} = K_f C_{bp}(s) V_{dc}$

ซึ่งผลที่ได้ จะทำให้แรงดันเอาต์พุต (V_o) ปรับตามรูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดใหม่ ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านบัสดีซี (I_{dc}) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ (r_L) เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้แรงดันบัสดีซีลดลงเปรียบเสมือนกับการมีอิมพีแดนซ์เสมือน ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณดีซี [21], [22] จึงทำให้สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาในบทความนี้ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่า K_f ที่ส่งผลต่อการชดเชยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยตรงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งต้องอาศัยการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เพื่อคาดเดาผลการคำนวณหาค่า K_f ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้อีกด้วย จากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7 จะพิจารณาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า



รูปที่ 8 วงจรสมมูลบนแกนดีคิวที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า

จากรูปที่ 8 สามารถหาสมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว โดยพิจารณาวงรอบป้อนไปหน้า แสดงดังสมการที่ (5) และ (6)

$$\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda)$$

$$\dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda)$$

$$\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc}$$

$$\dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d}$$

$$\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L^2 - \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_c K_{iv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L X_v - \frac{r_c K_{ii}}{A_r L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o^* + \frac{r_c K_{pv} K_{pi} K_f}{A_r L_{dc}} I_L V_{bpf}$$

(5)

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o - \frac{K_{iv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{ii}}{A_r C_{dc}} I_L X_i - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o^* - \frac{K_{pv} K_{pi} K_f}{A_r C_{dc}} I_L V_{bpf}$$

$$\dot{I}_L = -\frac{K_{pi}}{A_r L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o - \frac{1}{L} V_o + \frac{K_{iv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} X_v + \frac{K_{ii}}{A_r L} V_{dc} X_i + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o^* + \frac{K_{pv} K_{pi} K_f}{A_r L} V_{dc} V_{bpf}$$

$$\dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o$$

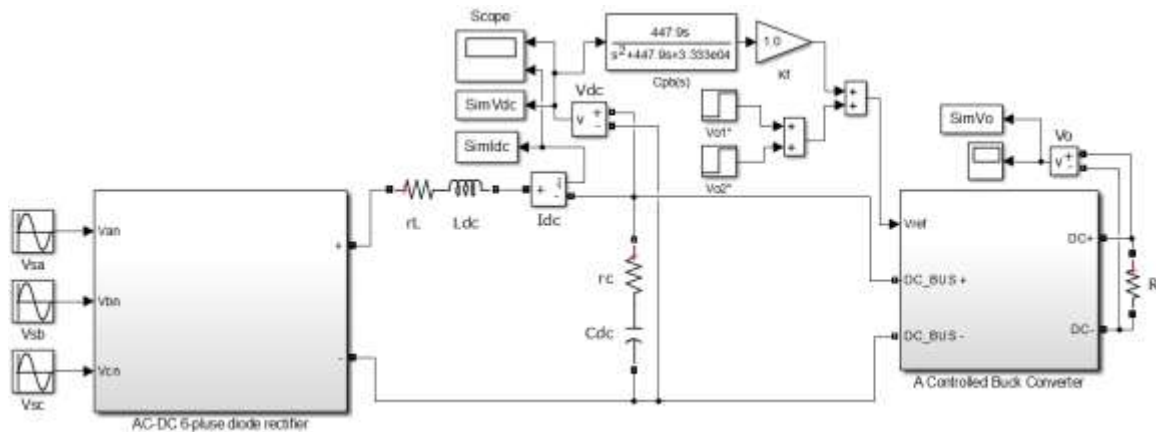
$$\dot{X}_v = -V_o + V_o^* + K_f V_{bpf}$$

$$\dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^* + K_{pv} K_f V_{bpf}$$

$$\dot{V}_{df} = V_{bpf}$$

$$\dot{V}_{bpf} = (\omega_1 + \omega_2) V_{dc} - \omega_o^2 V_{df} - (\omega_1 + \omega_2) V_{bpf}$$

(6)



รูปที่ 9 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

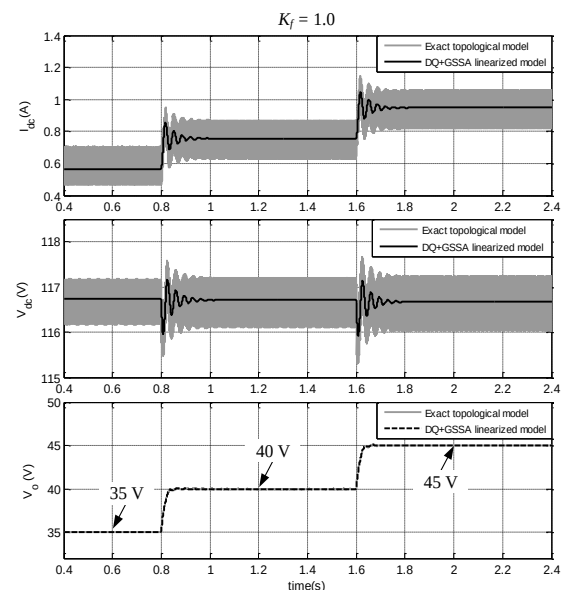
จากสมการที่ (5) และ (6) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการหาค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วนที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง และผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่มีรูปแบบดังสมการที่ (7) โดยค่าต่าง ๆ ในเมทริกซ์ **A** **B** **C** และ **D** จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ

$$\begin{cases} \dot{\delta x} = A(x_o, u_o)\delta x + B(x_o, u_o)\delta u \\ \delta y = C(x_o, u_o)\delta x + D(x_o, u_o)\delta u \end{cases} \quad (7)$$

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (7) กับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 9 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7 แสดงดังตารางที่ 1 พร้อมด้วยค่าพารามิเตอร์ของวงจรบ่อนไปหน้าดังนี้ $K_f = 1.0$, $\omega_o = 182.57$ rad/s, $\omega_f = 94.25$ rad/s, $\omega_2 = 353.68$ rad/s

จากรูปที่ 10 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดจาก 35 V ไปเป็น 40 V ที่เวลา 0.8 วินาที และจาก 40 V ไปเป็น 45 V ที่เวลา 1.6 วินาที

ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $K_f = 1.0$ จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} และ V_o ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า การพิสูจน์หาแบบทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาโครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบบ่อนไปหน้ามีความถูกต้องแม่นยำ เหมาะสมสำหรับนำไปวิเคราะห์หาค่า K_f ที่ส่งผลให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 4.2

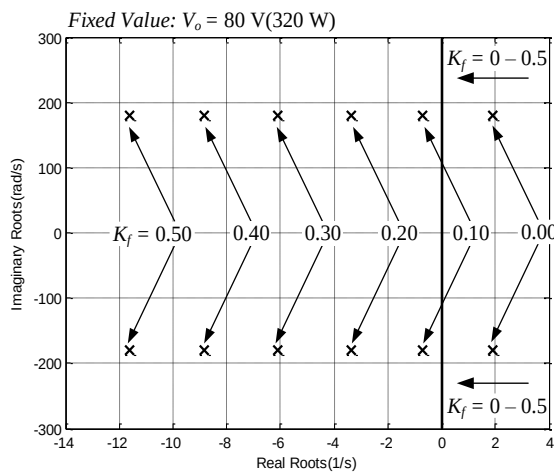


รูปที่ 10 ผลการตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} และ V_o ของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง V_o^* โดยที่ $K_f = 1.0$

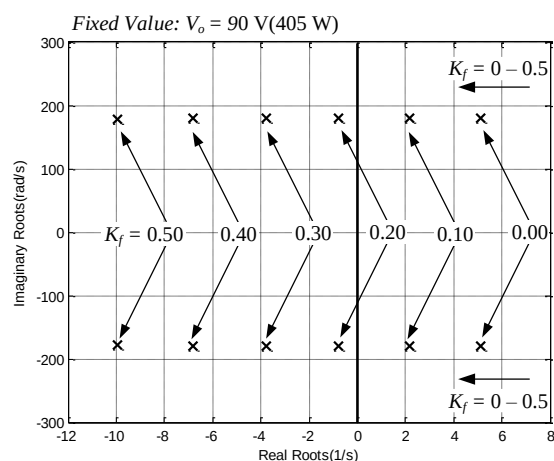
ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

4.2 การหาค่า K_f ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

การวิเคราะห์ผลของค่า K_f ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ จะพิจารณาแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (7) ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงนำมาใช้พิจารณา ซึ่งค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน $A(x_0, u_0)$ แสดงได้ดังรูปที่ 11 และ รูปที่ 12 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f จาก 0 ถึง 0.5 โดยมีการปรับตั้งค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดมีค่าเท่ากับ 80 V (320 W) และ 90 V (405 W) ตามลำดับ

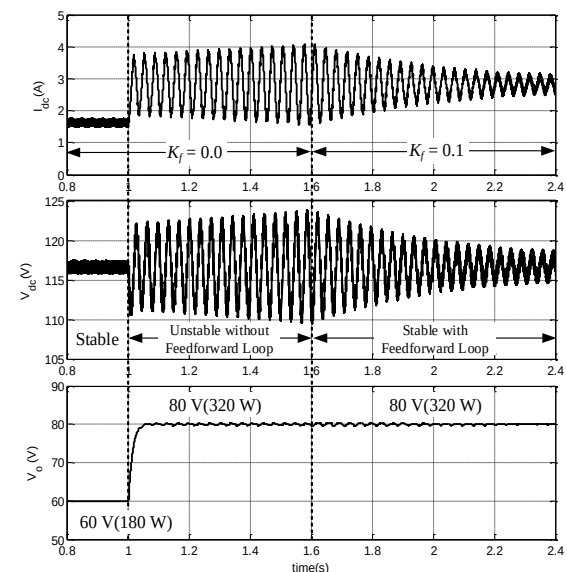


รูปที่ 11 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนด $V_o = 80$ V (320 W)

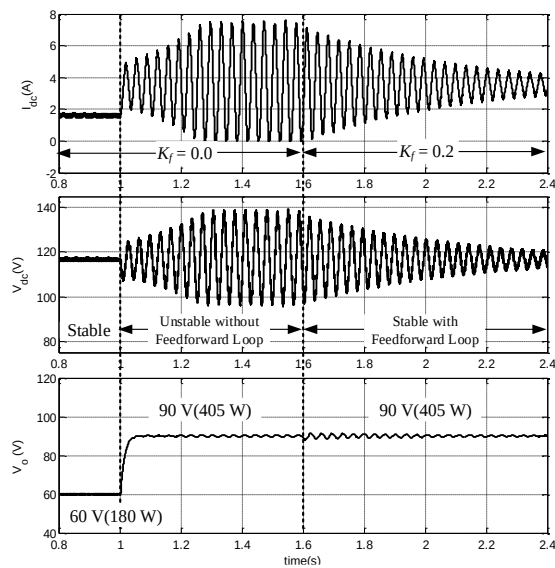


รูปที่ 12 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนด $V_o = 90$ V (405 W)

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดให้โหนดวงจรแปลงผันแบบบักมีระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 80 V (320 W) ที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ ยังไม่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ระบบจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ แต่เมื่อค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ค่าเจาะจงเด่นของระบบจะเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึง ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง เพียงแค่เพิ่มค่า K_f จาก 0 ไปเป็น 0.1 แต่ถ้าโหนดวงจรแปลงผันแบบบักมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าไปเป็น 90 V (405 W) ดังแสดงในรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า ระบบจะกลับมาเสถียรภาพขาดเสถียรภาพอีกครั้งที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ดังนั้นค่า K_f ควรมีค่าเพิ่มตามระดับแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในที่นี้คือ 0.2 จึงทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งซ้ายอีกครั้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระบบสามารถทำงานในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบ จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 13 ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว เมื่อ $V_o = 80$ V (320 W)



รูปที่ 14 ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของโหลด

กำลังไฟฟ้าคงตัว เมื่อ $V_o = 90\text{V}$ (405 W)

จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบักมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 60 V (180 W) เป็น 80 V (320 W) ที่เวลา 1.0 วินาที โดยกำหนดให้ K_f มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่มีการกระเพื่อมของแรงดันมากขึ้น และภายหลังจากเวลาที่ 1.6 วินาที ได้กำหนดให้วงจรรอบป้อนไปหน้าเริ่มทำงาน โดยที่กำหนดให้ค่า K_f ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า แรงดันบัสดีซี (V_{dc}) จะค่อยๆ มีผลการกระเพื่อมของแรงดันที่ลดลง ซึ่งหมายถึง ระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7 เริ่มกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง แต่ถ้าค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักเพิ่มขึ้นเป็น 90 V (405 W) ดังแสดงในรูปที่ 14 จะต้องทำการเพิ่มค่า K_f ให้มีค่าเท่ากับ 0.2 ตามการคำนวณค่าเจาะจงที่แสดงในรูปที่ 12 จะสังเกตได้ว่าผลของแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่มีการกระเพื่อมเพิ่มขึ้นจะถูกทำให้มีค่าค่อยๆ ลดลง ส่งผลทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง จากผลการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์หาค่า K_f ที่เหมาะสมกับระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบแอกทีฟโดยใช้วงจรรอบป้อนไปหน้า เพื่อกำจัดผลของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมซึ่งสามารถลดทอนเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีได้โดยตรง ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ จากการวิเคราะห์ผลของค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_p) โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่มีความสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงจรรอบป้อนไปหน้าที่อาศัยการวัดค่าแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ผ่านตัวกรองผ่านแถบ ($C_{bp}(s)$) จากนั้นนำผลของสัญญาณที่ได้มาคูณกับค่า K_f และนำมาบวกกับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) ตามที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังนอกจากจะไม่ขาดเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพก่อนการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแล้ว ยังสามารถทำงานต่อได้ในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้อีกด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta and G.A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans.*

- Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, Jul. 2006.
- [2] A. M. Rahimi and A. Emadi, "An analytical investigation of DC/DC power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 6, pp. 2689-2702, Jul. 2009.
- [3] U. Ghisla, I. Kondratiev and R. Dougal, "Protection of medium voltage DC power systems against ground faults and negative incremental impedances," in *IEEE SoutheastCon 2010*, Concord, NC, 2010, pp. 259-263.
- [4] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load using DQ-transformation method," in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, UK, 2008, pp. 19-24.
- [5] A. Baghrmian and A.J. Forsyth, "Averaged-value models of twelve-pulse rectifiers for aerospace applications," in *Second International on Power Electronics, Machines and Drives*, Edinburgh, UK, 2004, pp. 220-225.
- [6] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 44, no. 8, pp. 767-770, Aug. 1997.
- [7] T. Sopapirm, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "Stability analysis of AC distribution system with six-pulse diode rectifier and multi-converter power electronic loads," *Int. Rev. Elect. Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 2919-2928, Nov./Dec. 2011.
- [8] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, L. De lillo and D. W. P. Thomas, "Stability study for a hybrid AC-DC more-electric aircraft power system," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 48 no. 1, pp. 329-347, Jan. 2012.
- [9] M. Cespedes, L. Xing and J. Sun, "Constant-power loads system stabilization by passive damping," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 7, pp. 1832-1836, Jul. 2011.
- [10] X. Liu and S. Ma, "Large signal stabilization method of constant power loads by adding R parallel damping filters," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Montreal, QC, 2015, pp. 1314-1319.
- [11] A.M. Rahimi and A. Emadi, "Active damping in DC/DC power electronic converters: a novel method to overcome the problems of constant power loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1428-1439, Feb. 2009.
- [12] A.M. Rahimi, G.A. Williamson and A. Emadi, "Loop-cancellation technique: a novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effect of constant-power loads," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 650-661, Feb. 2010.
- [13] Y. Li, K.R. Vannorsdel, A.J. Zirger, M. Norris and D. Maksimovic, "Current mod control for boost converters with constant power loads," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 59, no. 1, pp. 198-206, Jan. 2012.

- [14] Y. Zhao, W. Qiao and D. Ha, "A sliding-mode duty-ratio controller for DC/DC buck converters with constant power loads," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1448–1458, Mar./Apr. 2014.
- [15] M. Wu and D. D. Lu, "A novel stabilization method of LC input filter with constant power loads without load performance compromise in dc microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4552-4562, Jul. 2015.
- [16] T. Sopapirm, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "The active damping stabilization of AC-DC power systems feeding constant power loads," *Int. Rev. Elect. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 287-295., Jul./Aug. 2017.
- [17] K-N. Areerak, T. Sopapirm, S.V. Bozhko, C. I. Hill, A. Suyapan and K-L. Areerak, "Adaptive stabilization of uncontrolled rectifier based AC-DC power systems feeding constant power loads," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 10, pp. 8927-8935, Oct. 2018.
- [18] X. Liu, A. Forsyth, and A. Cross, "Negative input-resistance compensator for a constant power load," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 3188–3196, Dec. 2007.
- [19] P. Magne, D. Marx, B. Nahid-Mobarakeh and S. Pierfederici, "Large-signal stabilization of a dc-link supplying a constant power load using a virtual capacitor: impact on the domain of attraction," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 3, pp. 878-887, May/June 2012.
- [20] Y.R. Mohamed, A.A.A. Radwan and T. Lee, "Decoupled reference voltage-based active dc-link stabilization for pmsm drives with tight-speed regulation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp.4523- 4536, Dec. 2012.
- [21] M. Wu and D. D. C. Lu, "Investigation on active method for stabilization of LC input filter and DC/DC buck converter under voltage mode control," in *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Sydney, NSW, 2015, pp. 721–726.
- [22] M. Wu an, D. D. C. Lu and C.K. Tse, "Direct and optimal linear active methods for stabilization of LC input filters and DC/DC converters under voltage mode control," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 402-412, Sep. 2015.
- [23] T. Sopapirm, "Instability mitigation of a three-phase diode rectifier feeding a controlled buck converter by using the active damping method," in *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems*, Jeju, 2018, pp. 745–748.