SWU Engineering Journal (2019) 14(3), 73-83 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

Stabilization using Reference-Voltage-Based Active Compensator Method For AC-DC Power System Feeding Power Electronic Load

กษมา รุ่งรัตน์ธวัชชัย[1] เทพพนม โสภาเพิ่ม[2] กองพัน อารีรักษ์[1]*
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[2]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
Kasama Rungrattawatchai[1] Theppanom Sopapirm[2] Kongpan Areerak[1]*
[1]School of electrical engineering, Suranaree university of technology
111 University Avenue Muang, Nakhon Rachasima, Thailand, 30000
[2]Department of electrical power engineering, Mahanakhon university of technology
*Corresponding author E-mail: kongpan@sut.ac.th
(Received: September 19, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ วงจรแปลงผันที่มีการควบคุมดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า การขาดเสถียรภาพอาจจะส่งผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหาย และอาจลดสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี (Refference-Voltage-Based Active Compensator : RVC) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการสร้างสัญญาณชดเชยไปยังส่วนการควบคุมของโหลดเพื่อทำให้ระบบไฟฟ้ากลับมามีเสถียรภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับระบบไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมแรงดันบัสดีซีได้ จากการศึกษาผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี เพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง และยืนยันผลผ่านทางการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน

คำสำคัญ: การสร้างเสถียรภาพ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม

ABSTRACT

This paper presents the stabilization for 3 phase AC-DC converter feeding controlled buck converter. Power converters with their controllers normally behave as constant power loads that can affect system stability. Therefore, the Reference-Voltage-Based active compensator (RVC) method will be presented to mitigate the instability due to the constant power load. The results will show that the proposed system can become back from unstable to stable operation when the RVC is applied. The

simulation via the exact topological model of MATLAB is used to validate the theoretical results in which the good agreement between the theory and the simulation is achieved.

Keyword: Stabilization, Constant power loads (CPL), Controlled converters.

รายการสัญลักษณ์

V_{sd} , V_{sq}	แรงดันไฟฟ้าบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าบนแกนดีคิว
I_{sd} , I_{sq}	กระแสไฟฟ้าบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าบนแกนดีคิว
$V_{bus,d}$, $V_{bus,q}$	แรงดันไฟฟ้าบัสอินพุตไดโอดบนแกนดีคิว
R_{eq} , L_{eq} , C_{eq}	ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า
r_L , L_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_C , C_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
V_{dc} , I_{Cdc}	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
L_{dc}	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
C_{dc}	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
I_{dc}	กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง
I_{CPL},P_{CPL}	กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์
$I_{L,b}$, V_O	กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอ้าต์พุตของวงจรแปรผันกำลังแบบบัคก์
L_b , C_b	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบัคก์
R	ความต้านทานของโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์
K_{pv} , K_{iv}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอลูปแรงดันไฟฟ้า
K_{pi} , K_{ii}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอลูปกระแสไฟฟ้า
X_i , X_v	อัตราการเปลี่ยนแปลงลูปกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า
d	ค่าดัชนีการสวิตช์ของวงจรแปรผันกำลังแบบบัคก์

1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้านิยมใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant power loads : CPLs) [1-2] ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบโดยรวม และโดยทั่วไปโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมจะต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบของโหลดชนิดนี้จะไปลดค่าความต้านทานของวงจรกรอง (damping) ซึ่งปกติค่าความต้านทานของวงจรกรองชนิดนี้จะมีค่าบวก การลดลงของค่าความต้านทานของวงจรกรองจะทำ ให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณขึ้นถ้าระบบมีค่าอิมพีแดนซ์ติดลบมากพอ นั่นคือปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากพอ จะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณมีค่าสูงมาก หรือทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมขาดเสถียรภาพได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพจะส่งผลต่อความสามารถการทำงานของระบบควบคุม [3] ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ซึ่งในบทความนี้ใช้วิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบแอคทีฟ [4-5] ด้วยวิธีอาร์วีซี(Reference-Voltage-Based Active Compensator : RVC) ซึ่งมีหลักการโดยอาศัยการ

ฉีดแรงดันชดเชยเข้าไปในระบบควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ที่ได้มาจากการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และนำมาถูกปรับคูณด้วยค่าอัตราขยาย ซึ่งผลที่ได้จะเป็นการจำลองแรงดันตกเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง จากนั้นแรงดันตกที่ได้จะถูกกรองผ่านวงจรกรองความถี่แบบผ่านต่ำ (Low-pass filter : LPF) เพื่อทำให้ความถี่ที่ผ่านเข้ามาอยู่ในย่านความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น หรืออีกนัยนึงก็คือความถี่ของระบบที่ขาดเสถียรภาพ และเมื่อมีการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณา สัญญาณของผลการจำลองแรงดันตกนี้จะไปลบออกจากแรงดันอ้างอิงในระบบควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ที่มีการควบคุมแบบพีไอ(PI Controller) เพื่อสร้างสัญญาณไปปรับปรุงวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle : d) เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม (Pulse-width-modulation : PWM) ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ใหม่ (d*) ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพตามหลักของวิธีอาร์วีซี [6] การออกแบบตัวบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่เหมาะสมทำได้โดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพ [7-9] ของระบบซึ่งแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในบทความนี้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากผลของการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งจะทำให้มีความยุ่งยากสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งมีหลากหลายวิธี สำหรับวิธีการพิสูจน์ที่เหมาะสมกับระบบนี้คือ วิธีดีคิว (DQ) [7] และ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (generalized state space averaging : GSSA) [10]

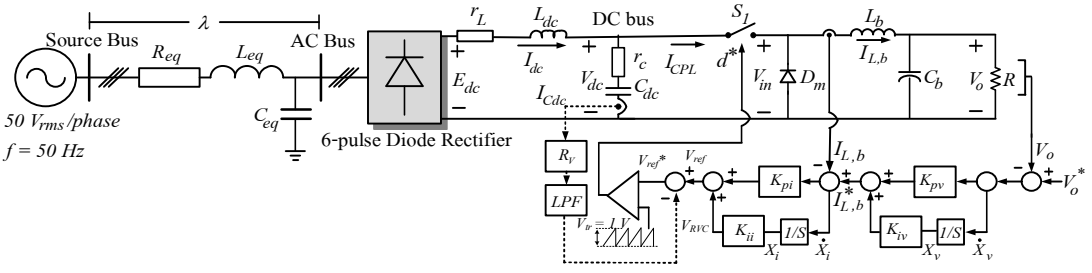
บทความนี้ประกอบด้วย ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนที่ 4 จะนำเสนอการพิจารณาในส่วนที่ 2 สำหรับส่วนที่ 3 เป็นการพิสูจน์หาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่เป็นเชิงเส้น ในส่วนที่ 5 จะนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และส่วนสุดท้ายคือการสรุปผลของบทความ

2. ระบบไฟฟ้าที่ใช้พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น วงจรกรองที่มีตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ที่มีการควบคุมแบบพีไอเรียงต่อกัน แสดงในรูปที่ 1 โดยวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์สามารถพบได้ในบทความที่ [11] และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ทำได้โดยใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่วงจรกรอง (I_{Cdc}) เพื่อนำค่าดังกล่าวไปลบกับชุดควบคุมพีไอซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น [6] การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบ

3. การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทความนี้ทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการดีคิวในการแปลงพารามิเตอร์ในสายส่งให้อยู่บนแกนดีคิวและทำการกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้อยู่บนแกนดีคิว เมื่อพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้ไดโอดพบว่าผลกระทบที่เกิดจาก L_{eq} ในรูปที่ 1 ส่งผลทำให้เกิดมุม



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการบรรเทาเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

เหลื่อมและทำให้เกิดแรงดันตกของแรงดันเอาท์พุทของวงจรเรียงกระแส ซึ่งแรงดันตกดังกล่าวถูกแทนด้วย r_μ [12] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \tag{1}$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสโดยใช้วิธีดีคิวสามารถเปลี่ยนสมการฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดให้เป็นฟังก์ชันที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาได้ดังสมการที่ (2)

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi_1 - \phi) \\ \sin(\phi_1 - \phi) \end{bmatrix} \tag{2}$$

โดยที่ ϕ_1 คือ มุมเฟสของแกนหมุนดีคิว

ϕ คือ มุมเฟสของบัสแรงดันเอซี

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อผ่านสายส่งเข้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแปลงให้อยู่บนแกนดีคิวและนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลบนแกนดีคิว สำหรับการแปลงดีคิวทางด้านแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 2 โดยกำหนดมุมเฟสของแกนหมุนดีคิวให้มีค่าเท่ากับมุมเฟสของแรงดันบัสเอซี เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง และเมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์สายส่ง (R_{eq} , L_{eq} , C_{eq}) จะทำให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Source Bus) กับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Bus) เท่ากับ (λ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหลักการการไหลของกำลังไฟฟ้า[7]

จากนั้นใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปทางด้านโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ที่มีการควบคุมและมีการสร้างเสถียรภาพ เพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ทางด้านโหลด โดยแสดงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ในสมการที่ (3)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \tag{3}$$

โดย T และ d คือ คาบการสวิตช์และค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ตามลำดับ

พิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและโหมดกระแสต่อเนื่อง [7] ได้ดังสมการที่ (4)

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \tag{4}$$

การวิเคราะห์วงจรโดยที่ยังไม่พิจารณาตัวควบคุมพีไอหรือระบบแบบวงเปิด จะกำหนดให้ค่า d เป็นตัวแปรหนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อพิจารณาตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการสร้างเสถียรภาพจากรูปที่ 2 จะได้สมการวัฏจักรหน้าที่สำหรับระบบแบบวงรอบปิดที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีแล้วคือค่า d^* ดังสมการที่ (5)

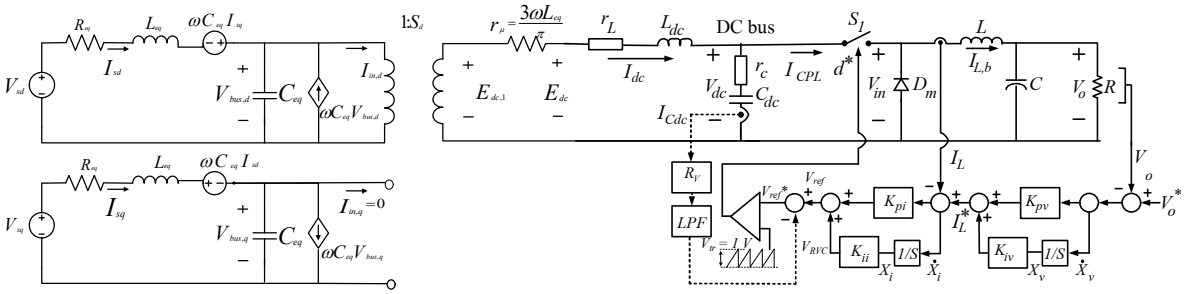
$$d^* = V_{ref} - V_{RVC} \tag{5}$$

โดยที่ V_{ref} คือสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมพีไอซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบดังบทความที่ [11] และ V_{RVC} คือสัญญาณชดเชยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณผ่านต่ำ [13] สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังสมการที่ (6) และ(7) ตามลำดับ

$$V_{ref} = K_{pi}K_{pv}V_o^* - K_{pi}K_{pv}V_o + K_{pi}K_{iv}X_v - K_{pi}I_{L,b} + X_iK_{ii} \tag{6}$$

$$V_{RVC} = -C_{dc}R_v a V_{dc,filter} + C_{dc}R_v a V_{dc} \tag{7}$$

เมื่อ $a = 1/\omega_c$ และ ω_c คือความถี่ตัดผ่านของวงจรกรองผ่านต่ำ



รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว

เมื่อนำค่า d^* ไปแทนค่าในตัวแปร d จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังสมการที่ (8)

$$
\begin{cases}
\dot{I}_{sd} = -\dfrac{R_{eq}I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \dfrac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \left(\dfrac{1}{L_{eq}}\right)\left(\sqrt{\dfrac{3}{2}}\right)V_m\cos(\lambda) \\
\dot{I}_{sq} = -\dfrac{R_{eq}I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \dfrac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \left(\dfrac{1}{L_{eq}}\right)\left(\sqrt{\dfrac{3}{2}}\right)V_m\sin(\lambda) \\
\dot{V}_{bus,d} = \dfrac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \left(\sqrt{\dfrac{3}{2}}\right)\left(\dfrac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)\left(\dfrac{I_{dc}}{C_{eq}}\right) \\
\dot{V}_{bus,q} = \dfrac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\
\dot{I}_{dc} = \left(\dfrac{1}{L_{dc}}\right)\left(\sqrt{\dfrac{3}{2}}\right)\left(\dfrac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)V_{bus,d} - \dfrac{I_{dc}\left(r_\mu + r_L + r_c\right)}{L_{dc}} - \dfrac{V_{dc}}{L_{dc}} \\
\quad - \dfrac{K_{pi}r_cI_{L,b}^2}{L_{dc}} - \dfrac{K_{pv}K_{pi}r_cI_{L,b}V_o}{L_{dc}} + \dfrac{K_{iv}K_{pi}r_cI_{L,b}X_v}{L_{dc}} + \dfrac{K_{ii}r_cI_{L,b}X_i}{L_{dc}} \\
\quad + \dfrac{K_{pv}K_{pi}r_cI_{L,b}V_o^*}{L_{dc}} + \dfrac{R_vaV_{dc,filter}r_cI_{L,b}C_{dc}}{L_{dc}} - \dfrac{R_vaV_{dc}r_cI_{L,b}C_{dc}}{L_{dc}} \\
\dot{V}_{dc} = \dfrac{1}{C_{dc}}I_{dc} + \dfrac{K_{pi}I_{L,b}^2}{C_{dc}} + \dfrac{K_{pv}K_{pi}I_{L,b}V_o}{C_{dc}} - \dfrac{K_{iv}K_{pi}I_{L,b}X_v}{C_{dc}} \\
\quad - \dfrac{K_{ii}I_{L,b}X_i}{C_{dc}} - \dfrac{K_{pv}K_{pi}I_{L,b}V_o^*}{C_{dc}} - R_vaV_{dc,filter}I_{L,b} + R_vaV_{dc}I_{L,b} \\
\dot{I}_{L,b} = -\dfrac{K_{pi}V_{dc}I_{L,b}}{L_b} - \dfrac{K_{pv}K_{pi}V_{dc}V_o}{L_b} + \dfrac{K_{iv}K_{pi}V_{dc}X_v}{L_b} + \dfrac{K_{ii}V_{dc}X_i}{L_b} \\
\quad + \dfrac{K_{pv}K_{pi}V_{dc}V_o^*}{L_b} - \dfrac{V_o}{L_b} + \dfrac{R_vaV_{dc,filter}V_{dc}C_{dc}}{L_b} - \dfrac{R_vaV_{dc}^2C_{dc}}{L_b} \\
\dot{V}_o = \dfrac{I_{L,b}}{C_b} - \dfrac{V_o}{RC_b} \\
\dot{X}_v = V_o^* - V_o \\
\dot{X}_i = -I_{L,b} - K_{pv}V_o + K_{iv}X_v + K_{pv}V_o^* \\
\dot{V}_{dc,filter} = -aV_{dc,filter} + aV_{dc}
\end{cases}
\tag{8}
$$

จากสมการที่ (8) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องมาจากมีตัวแปรที่เป็นตัวแปรสถานะที่คูณกันอยู่ สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้ด้วยเทคนิคอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ (9)

$$
\begin{cases}
\delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\left(\mathbf{x_0},\mathbf{u_0}\right)\delta\mathbf{x} + \mathbf{B}\left(\mathbf{x_0},\mathbf{u_0}\right)\delta\mathbf{u} \\
\delta\mathbf{y} = \mathbf{C}\left(\mathbf{x_0},\mathbf{u_0}\right)\delta\mathbf{x} + \mathbf{D}\left(\mathbf{x_0},\mathbf{u_0}\right)\delta\mathbf{u}
\end{cases}
\tag{9}
$$

โดยที่ตัวแปรสถานะ, ตัวแปรอินพุต, ตัวแปรเอาต์พุต และพารามิเตอร์ต่างๆในเมตริกซ์ A, B, C และ D ขึ้นอยู่กับจุดการทำงานของระบบ โดยเรียกสมการนี้ว่าแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) มีรายละเอียดดังสมการที่ (10)

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาและเป็นเชิงเส้นที่ได้ในสมการที่ (9) ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งสามารถคำนวณได้จากเมตริกจาโคเบียน $\mathbf{A}\left(\mathbf{x_0},\mathbf{u_0}\right)\delta\mathbf{x}$ [7-9] ดังสมการที่ (11)

$$
\det\left[\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}\right] = 0 \tag{11}
$$

โดยระบบจะมีความเสถียรภาพดังเงื่อนไขในสมการที่ (12)

$$
real\lambda_i < 0 \tag{12}
$$

เมื่อ i = 1,2,3,...,n (โดยที่ n คือจำนวนตัวแปรสถานะของระบบ)

$$\delta x=\left[\delta I_{sd},\delta I_{sq},\delta V_{bus,d},\delta V_{bus,q},\delta I_{dc},\delta V_{dc},\delta I_{L,b},\delta V_o,X_v,X_i,V_{dc,filter}\right]^T$$

$$\delta u=\left[\delta V_m,\delta V_o^*\right]$$

$$\delta y=\left[\delta I_{dc},\delta V_{dc},\delta I_{L,b},\delta V_o\right]^T$$

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}
-\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
-\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
\frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & \frac{\left(r_\mu+r_L+r_c\right)}{L_{dc}} & \frac{1}{L_{dc}} & -\frac{R_v a r_c I_{L,b0} C_{dc}}{L_{dc}} & a(5,7) & \frac{-r_c K_{pv} K_{pi} I_{l,b0}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv} K_{pi} I_{l,b0}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii} I_{l,b0}}{L_{dc}} & \frac{R_v a r_c I_{L,b0} C_{dc}}{L_{dc}}\\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & R_v a I_{L,b0} & a(6,7) & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{l,b0}}{c_{dc}} & \frac{K_{iv} K_{pi} I_{l,b0}}{c_{dc}} & \frac{K_{ii} I_{l,b0}}{c_{dc}} & -R_v a I_{L,b0}\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi} V_{dc;0}}{L_b} & -\frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc;0}+1}{L_b} & \frac{K_{iv} K_{pi} V_{dc;0}}{L_b} & \frac{K_{ii} V_{dc;0}}{L_b} & \frac{R_v a V_{dc;0} C_{dc}}{L_b}\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_b} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & -a
\end{bmatrix}_{11\times11}$$

$$a(5,7)=\frac{-2r_c K_{pi} I_{lb0}}{L_{dc}}-\frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_{a0}}{L_{dc}}+\frac{r_c K_{iv} K_{pi} X_{v,0}}{L_{dc}}+\frac{r_c K_{ii} X_{i,0}}{L_{dc}}+\frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_{a0}^*}{L_{dc}},a(6,7)=\frac{-2K_{pi} I_{lb0}}{C_{dc}}-\frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}}{C_{dc}}+\frac{K_{iv} K_{pi} X_{v,0}}{C_{dc}}+\frac{K_{ii} X_{i,0}}{C_{dc}}+\frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}^*}{C_{dc}}$$

$$a(7,6)=\frac{-K_{pi} I_{lb0}}{L_b}-\frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}}{L_b}+\frac{K_{iv} K_{pi} X_{v,0}}{L_b}+\frac{K_{ii} X_{i,0}}{L_b}+\frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}^*}{L_b}-\frac{R_v a V_{dc,0} C_{dc}}{L_b}$$

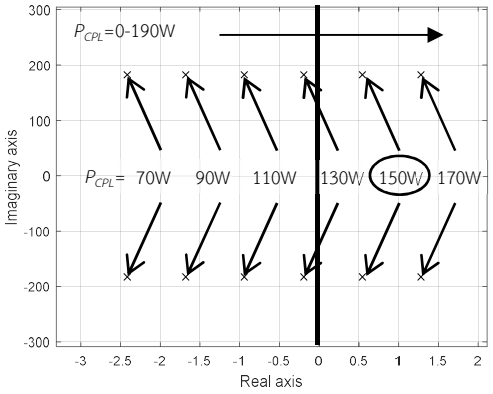
$$\mathbf{B}=\begin{bmatrix}
\frac{1}{L_{eq}}\sqrt{\frac{3}{2}}\cos(\lambda) & 0\\
\frac{1}{L_{eq}}\sqrt{\frac{3}{2}}\sin(\lambda) & 0\\
0 & 0\\
0 & 0\\
0 & \frac{r_c K_{pv} K_{pi} I_{l,b0}}{L_{dc}}\\
0 & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{l,b0}}{C_{dc}}\\
0 & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc;0}}{L_b}\\
0 & 0\\
0 & 1\\
0 & K_{pv}\\
0 & 0
\end{bmatrix}_{11\times2},\mathbf{C}=\begin{bmatrix}
0&0&0&0&1&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0
\end{bmatrix}_{4\times11},\mathbf{D}=\begin{bmatrix}
0&0\\0&0\\0&0\\0&0
\end{bmatrix}_{4\times2} \quad (10)$$

4.1 กรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะพิจารณาโดยกำหนดให้ค่าอัตราขยาย R_v มีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีให้แก่ระบบ ค่าเจาะจงที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ประกอบด้วยโดยค่าเจาะจงสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาเฉพาะโพลเด่นที่มีเส้นทางการเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณที่มีค่าใกล้เคียง 0 เนื่องจากเป็นค่าเฉพาะเจาะจงที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 โดยพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ P_{CPL} จาก 0-190W โดยมีค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบในรูปที่ 1

Parameter	Value
V_s	50 $V_{rms/phase}$
ω	2πx50 rad/sec.
R_{eq}	0.1 Ω
L_{eq}	0.24 mH
C_{eq}	2 nF
r_L	0.1 Ω
r_c	0.1 Ω
L_{dc}	30 mH
C_{dc}	1000 μF
L	15 mH
C	1000 μF
R	10 Ω
K_{pv}	0.01
K_{iv}	10
K_{pi}	0.7210
K_{ii}	2060.1
a	300

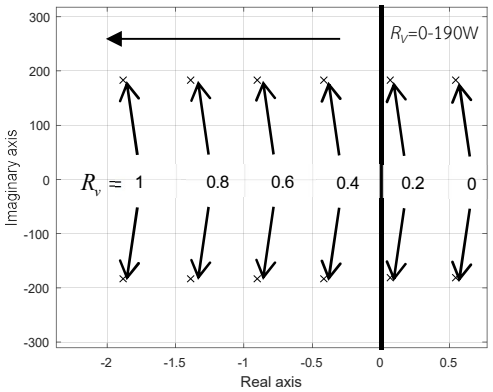


รูปที่ 3 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพ

จากรูปที่ 3 สังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์มีค่าเท่ากับ 150 W ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่ทำให้โพลของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งขวา ซึ่งหมายความว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

4.2 กรณีมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีดังรูปที่ 1 จะพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของ R_v จาก 0 ถึง 1 โดยกำหนดให้โหลดกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ (P_{CPL}) ที่ 150W แสดงได้ดังรูปที่ 4

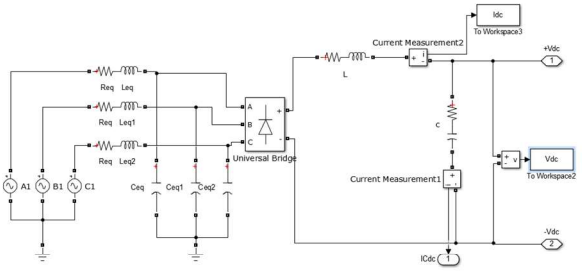


รูปที่ 4 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีมีการสร้างเสถียรภาพ

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 150W ที่ค่า R_v มีค่าเท่ากับ 0 (ยังไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี) ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อค่า R_v มีค่าเป็น 0.4 (วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีเริ่มทำงาน) ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้โพลของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึงระบบที่เกิดการขาดเสถียรสามารถกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง

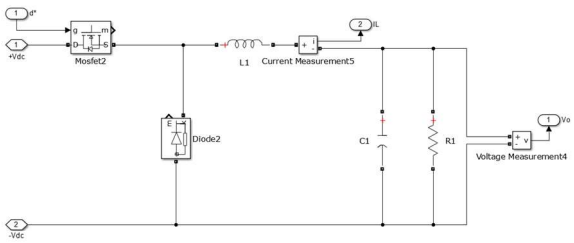
5. การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/ SIMULINK ประกอบด้วยส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุล, พารามิเตอร์สายส่ง,วงจรเรียงกระแสสามเฟส และวงจรกรองแสดงดังรูปที่ 5 โหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์แสดงดังรูปที่ 6 ส่วนของตัวควบคุมพีไอเรียงต่อกันสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์แสดงดังรูปที่ 7 และส่วนของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีแสดงในรูปที่ 8 โดยจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพและมีการสร้างเสถียรภาพโดยใช้พารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 1



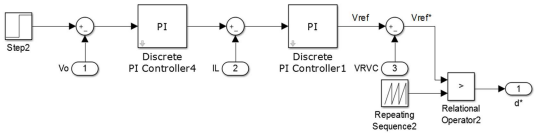
รูปที่ 5 แหล่งจ่ายสามเฟสสมดุล,สายส่งกำลังไฟฟ้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรกรอง

โดยวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ในรูปที่ 6 จะถูกต่อขนานกับวงจรกรอง หรือบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และทำการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (I_{Cdc}) แล้วทำการส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังชุดสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีในรูปที่ 8



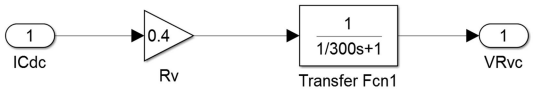
รูปที่ 6 วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ที่มีการควบคุม

วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ที่ต่อขนานเข้ากับวงจรกรองหรือบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะได้รับสัญญาณวัฏจักรหน้าที่ได้จากเทคนิคพีดับเบิ้ลยูเอ็มจากตัวควบคุมพีไอเรียงต่อกันรวมถึงสัญญาณการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และมีการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L) แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตัวควบคุมพีไอเรียงต่อกันที่มีการสร้างเสถียรภาพสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์

ตัวควบคุมพีไอเรียงต่อกันประกอบไปด้วยลูปควบคุมแรงดันและลูปควบคุมกระแส และสัญญาณที่ได้จากลูปควบคุมพีไอ (V_{ref}) จะถูกลบออกด้วยสัญญาณชดเชยสำหรับการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี (V_{RVC}) และสัญญาณที่ได้จากการลบกันแล้ว จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมตามหลักพีดับเบิ้ลยูเอ็มทำให้ได้ค่าวัฏจักรหน้าที่สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์

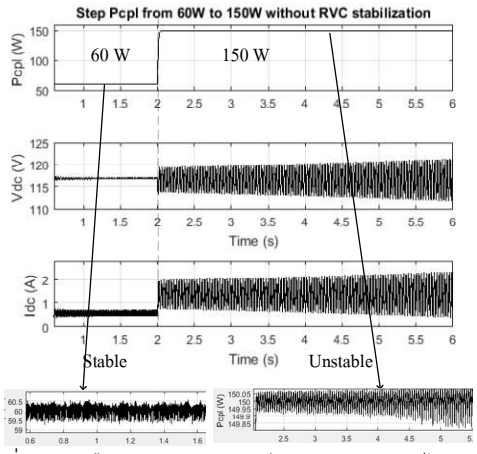


รูปที่ 8 ส่วนการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

ในส่วนของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะทำการรับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในวงจรกรอง (I_{Cdc}) และนำมาถูกปรับคูณด้วยค่าอัตราขยาย R_v ซึ่งผลที่ได้จะเป็นการจำลองแรงดันตกเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง จากนั้นแรงดันตกที่ได้จะถูกกรองผ่านวงจรกรองความถี่แบบผ่าน เพื่อทำให้ความถี่ที่ผ่านเข้ามาอยู่ในย่านความถี่เรโซแนนซ์ทำการกรองเฉพาะความถี่และนำสัญญาณชดเชย (V_{RVC}) ไปลบออกจากตัวควบคุมพีไอเพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับระบบ

5.1 กรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 3 พบว่าระบบที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์มีค่าเท่ากับ 150W สามารถทำการยืนยันความถูกต้องโดยทำการปรับเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ จาก 60W (ระบบมีเสถียรภาพ)ไปเป็น 150W ที่เวลา 2 วินาทีซึ่งผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 9

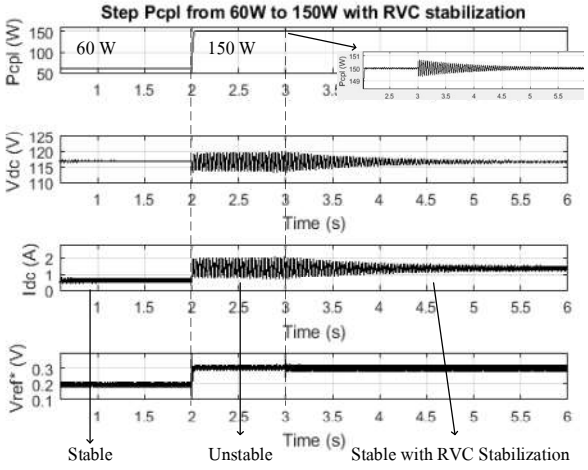


รูปที่ 9 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพ

จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าที่เวลา 2 วินาทีแรงดันไฟฟ้าบัสดีซีของระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัคก์มีขนาด 150W ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 3 ที่โพลของระบบไปอยู่ทางฝั่งขวาของระนามเอสเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัคก์มีขนาด 150W

5.2 กรณีมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 4 พบว่าระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพจะทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้เมื่ออัตราขยาย R_v มีค่าอย่างน้อย 0.4 สามารถทำการยืนยันความถูกต้องโดยทำการปรับเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคก์ จาก 60W (ระบบยังมีเสถียรภาพ)ไปเป็น 150W ที่เวลา 2 วินาทีซึ่งเกิดการขาดเสถียรภาพและได้กำหนดให้วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีทำงานที่วินาทีที่ 3 โดยกำหนดให้ค่าอัตราขยาย R_v มีค่าเท่ากับ 0.4 แสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีมีการสร้างเสถียรภาพ

จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าที่เวลา 2 วินาทีแรงดันไฟฟ้าบัสดีซีของระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัคก์มีขนาด 150W ซึ่งดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าสูงและภายหลังจากที่เวลา 3 วินาทีกำหนดให้วงจรสร้าง

เสถียรภาพอาร์วีซีทำงาน ที่ R_v = 0.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบจะกลับมามีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานโดยดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าลดลง และคงที่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบที่พิจารณาในบทความนี้เกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและวิธีดีคิวในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังและอาศัยทฤษฎีบทค่าเฉพาะเจาะจงมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์พบว่าระบบส่งจ่ายที่เกิดการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถกลับมามีเสถียรภาพได้หลังจากที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีที่ได้รับนำเสนอในบทความนี้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัย ทุนการศึกษาจากกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกลไฟฟ้าและควบคุม (PEMC) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

8. เอกสารอ้างอิง

[1] V. Grigore, J. Hatonen, J. Kyyra, and T. Suntio, “ Dynamics of a buck converter with a constant power load,” *in Proc. IEEE 29th Power Electron.Spec*. Conf., Fukuoka, Japan, May 1998, pp. 72–78

[2] 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.

[3] C. Rivetta, G.A. Williamson, and A. Emadi, “ Constant power loads and negative impedance instability in sea and undersea vehicles: statement of the problem and comprehensive Large-Signal solution,” Proc. *IEEE Electric Ship Tech Symposium.*, July 2005, pp. 313-320.

[4] 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.

[5] K-N. Areerak, T. Sopapirm, S.V. Bozhko, C. 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.

[6] 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.

[7] 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," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, pp. 19-24, June/Jul. 2008.

[8] K-N. Areerak, T. WU, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D. W. P. Thomas, "Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic," *IEEE Trans. Aerospace and electronic systems*, vol. 47, no. 7, pp. 2574-2589, Oct. 2011.

[9] 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," *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, vol. 6, no. 7(Part A), pp. 2919-2928, Nov./Dec. 2011.

[10] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, " Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach" , *IEEE Trans. on Circuit and Systems*, Vol. 44., pp.767-770, August 1997.

[11] K. M. Tsang, and W. L. Chan, " cascade controller for DC/DC buck converter," *IEE Electric Power Application*, vol. 152, no. 4, pp. 827-831, July 2005.

[12] N. Mohan, T. Undeland and W. Robbins, " Line- Frequency diode rectifiers: Line-Frequency uncontrolled ac to dc" in *Power electronics.* 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995, pp.79-117.

[13] A. M. Rahimi, G. A. Williamson, and A. Emadi, " Loop- cancellation technique: A novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effectof constant- power loads," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2,pp. 650–661, Feb. 2010.