

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น

วงจรแปลงผันแบบบัคขนานกัน

Stability Analysis of AC-DC Power System Feeding

Paralleled Buck-Converter

จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม¹ เทพพนม โสภะเพิ่ม² กองพัน อารีรักษ์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Juthatip Klasongkram¹ Theppanom Sopapirm² Kongpan Areerak^{1*}

¹School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima, 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: August 29, 2020; Accepted: April 03, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมขนานกัน โดยปกติแล้ววงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในบทความนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอจะถูกใช้ร่วมกับเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบลูค ในการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบ มีการตรวจสอบความถูกต้องโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้จากทางทฤษฎี และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันแบบบัค โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพ

ABSTRACT

This paper proposes stability analysis of AC-DC power system feeding paralleled controlled buck-converter. Normally, a controlled buck-converter behaves as a constant power load, that can affect the stability of system. Therefore, stability analysis is very important. In this paper, the proposed mathematical model is used with the Middlebrook's criterion to predict the unstable point. The results are validated by the well-known Eigenvalue's theorem and the simulation. Good agreement between the theory and simulation is achieved.

Keyword: Buck-converter, constant power load, stability analysis.

1. บทนำ

ปัจจุบันโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี เอชเป็นดีซี ที่มีการควบคุมสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีประสิทธิภาพสูง การดูแลรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Load: CPL) [1] ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม เมื่อนำโหลดชนิดดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ [2]-[3] จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ 2 วิธี คือ อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง [4] และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบุรค [5] และมีการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

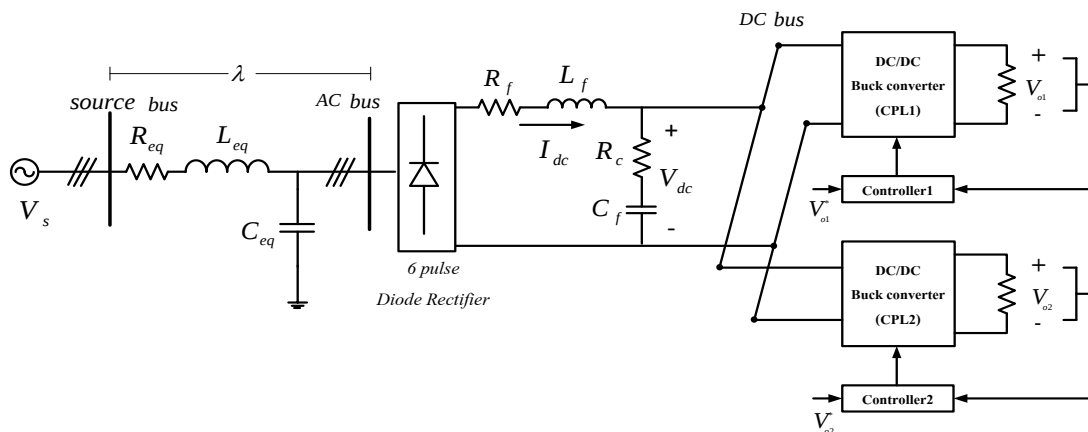
บทความนี้ประกอบด้วยระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในส่วนที่ 2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในส่วนที่ 3 และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในส่วนที่ 4 ซึ่งจะนำเสนออยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบุรค และในส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผลของบทความ

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

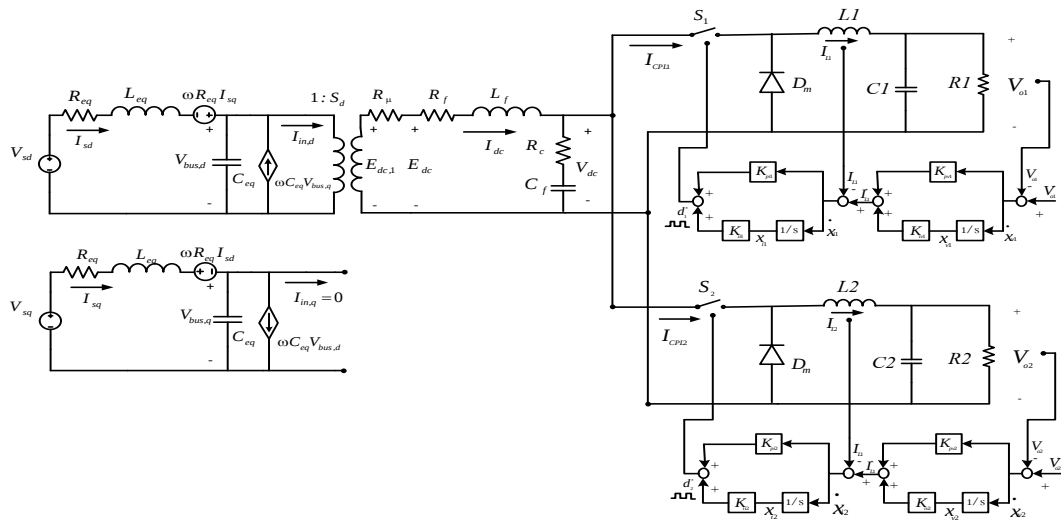
ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาคือระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลที่จ่ายกำลังผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ที่บัส AC ถูกต่ออยู่กับโหลดที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แปลงไฟกระแสสลับมาเป็นกระแสตรงที่บัสดีซี (DC bus) ผ่านวงจรกรองสัญญาณที่บัสดีซี ที่มีโหลดมาต่ออยู่ 2 โหลดด้วยกันคือ โหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมแรงดันทางฝั่งสัญญาณขาออกให้คงที่ 2 ตัว แสดงได้ดังรูปที่ 1

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

เนื่องจากระบบไฟฟ้าพิจารณามีการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันและวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีการทำงานตามฟังก์ชันกึ่งของเวลา ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงเป็นแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา (time varying model) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยแบบจำลองดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดความยุ่งยาก



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมขนาดกัน



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว

และซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยวิธีการแปลงดีคิว (DQ method) [4] ในส่วนของระบบไฟฟ้าสามเฟสร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method : GSSA) [6]-[7] ในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี ซึ่งจะได้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว ดังรูปที่ 2 วิธีการดังกล่าวจะทำให้ได้แบบจำลองไม่ขึ้นกับเวลา (time-invariant model)

จากรูปที่ 2 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์รวมทั้งสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่ทางฝั่งเอซี จะถูกเปลี่ยนให้อยู่บนแกนหมุนดีคิว โดยไดโอดเรียงกระแสสามเฟสได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สำหรับการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบับคัททั้งสองชุด โดยแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 2 สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดัน และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้แบบจำลองของระบบในรูปที่ 1 แสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \frac{V_m \cos(\omega)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} + \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \frac{V_m \sin(\omega)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dk} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} - \frac{(R_{\mu} + R_f + R_c) I_{dk}}{L_f} - \frac{V_{dc}}{L_f} - \frac{R_c K_{p1} I_{d1}^2}{L_f} - \frac{I_{d1} R_c K_{p1} K_{p1} V_{o1}}{L_f} \\ + \frac{R_c I_{d1} K_{p1} K_{p1} V_{o1}}{L_f} + \frac{R_c I_{d1} K_{p1} K_{p1} X_{v1}}{L_f} + \frac{R_c I_{d1} K_{p1} X_{v1}}{L_f} - \frac{R_c K_{p2} I_{d2}^2}{L_f} \\ - \frac{I_{d2} R_c K_{p2} K_{p2} V_{o2}}{L_f} + \frac{R_c I_{d2} K_{p2} K_{p2} V_{o2}}{L_f} + \frac{R_c I_{d2} K_{p2} K_{p2} X_{v2}}{L_f} + \frac{R_c I_{d2} K_{p2} X_{v2}}{L_f} \\ \dot{V}_{dk} = \frac{I_{dk}}{C_f} + \frac{K_{p1} I_{d1}^2}{C_f} + \frac{K_{p1} K_{p1} I_{d1} V_{o1}}{C_f} - \frac{K_{p1} K_{p1} I_{d1} V_{o1}}{C_f} - \frac{K_{p1} K_{p1} I_{d1} X_{v1}}{C_f} - \frac{K_{p1} I_{d1} X_{v1}}{C_f} \\ + \frac{K_{p2} I_{d2}^2}{C_f} + \frac{K_{p2} K_{p2} I_{d2} V_{o2}}{C_f} - \frac{K_{p2} K_{p2} I_{d2} V_{o2}}{C_f} - \frac{K_{p2} K_{p2} I_{d2} X_{v2}}{C_f} - \frac{K_{p2} I_{d2} X_{v2}}{C_f} \\ \dot{I}_{l1} = -\frac{V_{o1}}{L_1} - \frac{V_{dk} K_{p1} I_{d1}}{L_1} - \frac{K_{p1} K_{p1} V_{o1} V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{p1} K_{p1} V_{o1} V_{o1}}{L_1} \\ + \frac{K_{p1} K_{p1} V_{o1} X_{v1}}{L_1} - \frac{K_{p1} V_{o1} X_{v1}}{L_1} \\ \dot{V}_{o1} = \frac{I_{l1}}{C_1} - \frac{V_{o1}}{R_1 C_1} \\ \dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\ \dot{X}_{i1} = -I_{l1} - K_{p1} V_{o1} + K_{p1} V_{o1}^* + K_{p1} X_{v1} \\ \dot{I}_{l2} = -\frac{V_{o2}}{L_2} - \frac{V_{dk} K_{p2} I_{d2}}{L_2} - \frac{K_{p2} K_{p2} V_{o2} V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{p2} K_{p2} V_{o2} V_{o2}}{L_2} \\ + \frac{K_{p2} K_{p2} V_{o2} X_{v2}}{L_2} - \frac{K_{p2} V_{o2} X_{v2}}{L_2} \\ \dot{V}_{o2} = \frac{I_{l2}}{C_2} - \frac{V_{o2}}{R_2 C_2} \\ \dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\ \dot{X}_{i2} = -I_{l2} - K_{p2} V_{o2} + K_{p2} V_{o2}^* + K_{p2} X_{v2} \end{cases} \quad (2)$$

สมการที่ (1) และ (2) เป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพจำเป็นต้องทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทเลอร์อันดับหนึ่งจากสมการที่ (1) และ (2) เมื่อผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว เขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ (3) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (3) \quad \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) =$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} \delta I_{sd} & \delta I_{sq} & \delta V_{bus,d} & \delta V_{bus,q} & \delta I_{dc} & \delta V_{dc} & \delta I_{L1} \\ \delta V_{o1} & \delta X_{v1} & \delta X_{i1} & \delta I_{L2} & \delta V_{o2} & \delta X_{v2} & \delta X_{i2} \end{bmatrix}^T \\ \delta \mathbf{u} &= \begin{bmatrix} \delta V_s & \delta V_{o1}^* & \delta V_{o2}^* \end{bmatrix}^T \\ \delta \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} \delta V_{dc} & \delta V_{o1} & \delta V_{o2} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_c K_{pv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & \frac{R_c K_{pv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} \\ 0 & -\frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & -\frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} \\ 0 & -\frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{pv1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_{pv2} \end{bmatrix}_{14 \times 3}$$

รายละเอียดของเมทริกซ์ A B C และ D สามารถแสดงได้ดังนี้

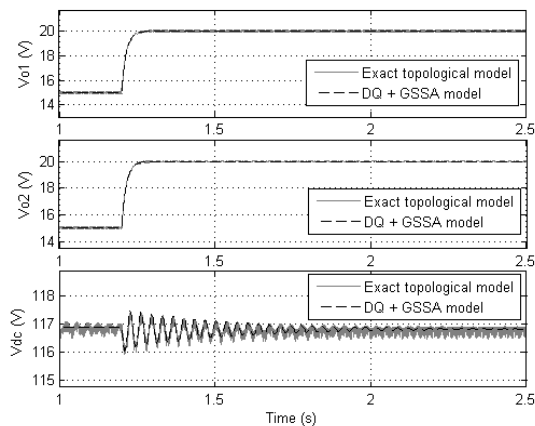
$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 14}$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & -\frac{(R_{\mu} + R_f + R_i)}{L_f} & -\frac{1}{L_f} & a(5,7) & -\frac{R_c K_{pi1} K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & -\frac{R_c K_{pi1} K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & -\frac{R_c K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & a(5,11) & -\frac{R_c K_{pi2} K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} & -\frac{R_c K_{pi2} K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} & -\frac{R_c K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pi1} K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & -\frac{K_{pi1} K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & \frac{K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & a(6,11) & \frac{K_{pi2} K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} & -\frac{K_{pi2} K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} & \frac{K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & -\frac{K_{pi1} K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & \frac{K_{pi1} K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & -\frac{K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_1 R_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv1} & K_{pi1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(11,6) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} & -\frac{K_{pi2} K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} & \frac{K_{pi2} K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} & -\frac{K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2 R_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv2} & K_{pi2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

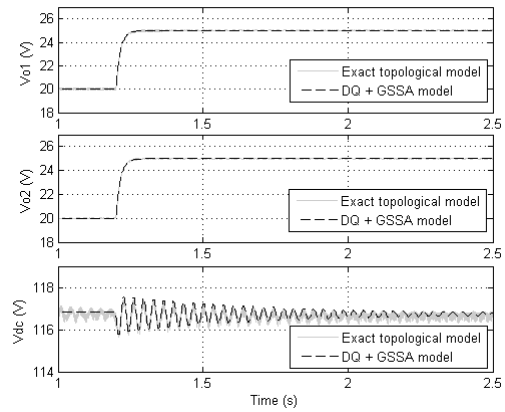
$$D(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$\begin{aligned} a(5,7) &= -\frac{2R_{p1}K_{p1}I_{L1,o}}{L_f} - \frac{R_cK_{p1}K_{p1}V_{o1,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{o1}K_{p1}X_{v1,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{o1}X_{i1,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{p1}K_{p1}V_{o1,o}^*}{L_f} \\ a(5,11) &= -\frac{2R_{p2}K_{p2}I_{L2,o}}{L_f} - \frac{R_cK_{p2}K_{p2}V_{o2,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{o2}K_{p2}X_{v2,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{o2}X_{i2,o}}{L_f} + \frac{R_cK_{p2}K_{p2}V_{o2,o}^*}{L_f} \\ a(6,7) &= \frac{2K_{p1}I_{L1,o}}{C_f} + \frac{K_{p1}K_{p1}V_{o1,o}}{C_f} - \frac{K_{p1}K_{p1}X_{v1,o}}{C_f} - \frac{K_{p1}X_{i1,o}}{C_f} - \frac{K_{p1}K_{p1}V_{o1,o}^*}{C_f} \\ a(6,11) &= \frac{2K_{p2}I_{L2,o}}{C_f} + \frac{K_{p2}K_{p2}V_{o2,o}}{C_f} - \frac{K_{p2}K_{p2}X_{v2,o}}{C_f} - \frac{K_{p2}X_{i2,o}}{C_f} - \frac{K_{p2}K_{p2}V_{o2,o}^*}{C_f} \\ a(7,6) &= -\frac{K_{p1}I_{L1,o}}{L_1} - \frac{K_{p1}K_{p1}V_{o1,o}}{L_1} + \frac{K_{p1}K_{p1}X_{v1,o}}{L_1} + \frac{K_{p1}X_{i1,o}}{L_1} + \frac{K_{p1}K_{p1}V_{o1,o}^*}{L_1} \\ a(11,6) &= -\frac{K_{p2}I_{L2,o}}{L_2} - \frac{K_{p2}K_{p2}V_{o2,o}}{L_2} + \frac{K_{p2}K_{p2}X_{v2,o}}{L_2} + \frac{K_{p2}X_{i2,o}}{L_2} + \frac{K_{p2}K_{p2}V_{o2,o}^*}{L_2} \end{aligned}$$

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กแบบชั่วคราวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB จะได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 ผลการตอบสนอง V_{o1} , V_{o2} และ V_{dc} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_{o1} และ V_{o2} จาก 15 V ไปเป็น 20 V



รูปที่ 4 ผลการตอบสนอง V_{o1} , V_{o2} และ V_{dc} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_{o1} และ V_{o2} จาก 20 V ไปเป็น 25 V

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1

พารามิเตอร์	ค่า
V_s	50 $V_{rms/phase}$
ω	$2\pi \times 50$ rad/s
R_{eq}	0.1 Ω
L_{eq}	24 μH
C_{eq}	2 nF
R_f	0.1 Ω
L_f	30 μH
R_c	0.01 Ω
C_f	1000 μF
$L_1 = L_2$ ($\Delta L \leq 0.2A$)	15 mH
$C_1 = C_2$ ($\Delta V_o \leq 2.8mV$)	1000 μF
$R_1 = R_2$	15 Ω

รูปที่ 3 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) แรงดันเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผันแบบบักค์ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}) และแรงดันเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผันแบบบักค์ชุดที่สอง (V_{o2}) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 1 (V_{o1}^*) และแรงดันเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผัน

แบบบักซ์ชุดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลา 1.2 วินาที และรูปที่ 4 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) แรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}) และแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง (V_{o2}) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 1 (V_{o1}^*) และแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1.2 วินาที จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณ พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ดังนั้นการพิสูจน์แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบักซ์ขนานกัน ด้วยวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพ

4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบพื้นฐานที่ใช้สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยมีเงื่อนไขคือถ้าค่าเจาะจงของระบบทุกค่าอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอสจะถือว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพ [9]-[11] ในการวิเคราะห์จะใช้เมตริกซ์ A ที่ได้จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3) การหาค่าเจาะจงสามารถได้จากสมการที่ (4) โดยใช้การคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านคำสั่ง “eig(A)”

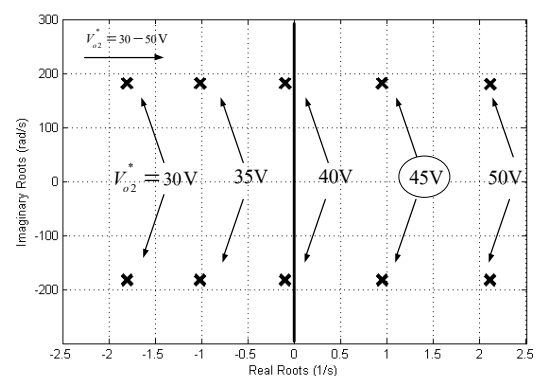
$$\det[A - \lambda I] = 0 \quad (4)$$

จากนั้นจะทำการตรวจสอบค่าเจาะจงของระบบ ถ้าค่าเจาะจงเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (5) จะถือว่าระบบมีเสถียรภาพ [9]

$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (5)$$

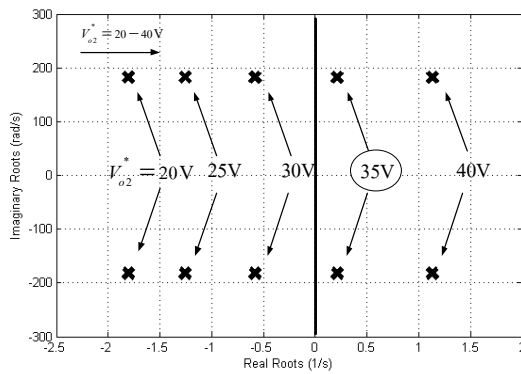
เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ และ n คือ จำนวนตัวแปรสถานะของระบบ

การพิจารณาเสถียรภาพ จะพิจารณาค่าเจาะจงจากแบบจำลองในสมการที่ (3) โดยปรับเปลี่ยนค่าจุดการทำงาน ซึ่งในที่นี้คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ จะได้ค่าเจาะจงเด่น (dominant eigenvalues) เมื่อทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง (V_{o2}^*) จาก 30 V จนถึง 50 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) เท่ากับ 20 V แสดงได้ดังรูปที่ 5 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง (V_{o2}^*) จาก 20 V จนถึง 40 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) เท่ากับ 30 V แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ

เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 30 V



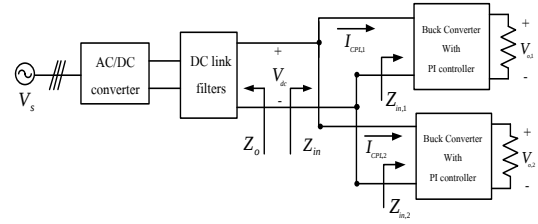
รูปที่ 6 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ

เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 20 V

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผันแบบบักค์ชุดที่สองเท่ากับ 45 V ส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่ามากกว่าศูนย์หรือมีตำแหน่งอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผันแบบบักค์ชุดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 45 V เป็นต้นไป และจากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผันแบบบักค์ชุดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 35 V เป็นต้นไป

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก

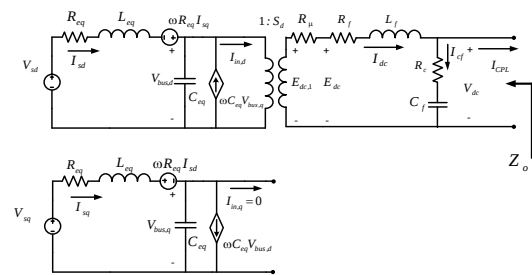
หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพตามเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกจะอาศัยเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) ของวงจรด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ของวงจรด้านฝั่งโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีการควบคุมขนานกัน ดังรูปที่ 7 โดยมีเงื่อนไขคือ ถ้าขนาดของ Z_o มีค่ามากกว่าขนาดของ Z_{in} ที่ความถี่ใดๆ ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพ



รูปที่ 7 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด
วงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีการควบคุมขนานกัน

จากระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 7 ประกอบด้วยวงจรทางด้านแหล่งจ่ายที่มีวงจรกรองกำลังไฟฟ้า และวงจรทางฝั่งโหลดคือวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีตัวควบคุมขนานกัน ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์สามารถแยกพิจารณา วงจรออกเป็นทีละฝั่งดังต่อไปนี้

- พิจารณาทางฝั่งแหล่งจ่าย



รูปที่ 8 วงจรที่พิจารณาทางฝั่งแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 8 เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรด้วยกฎแรงดันและกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการตัวแปรสถานะดังสมการที่ (6) และ (7) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} + \omega I_{sd} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} + \omega V_{bus,d} \end{cases} \quad (6)$$

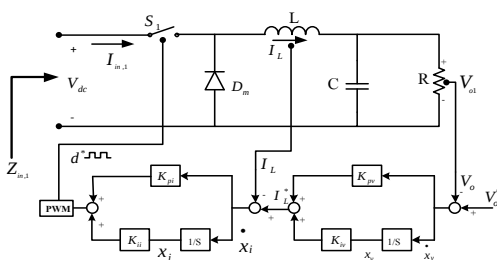
$$\begin{cases} \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} - \frac{(R_\mu + R_f + R_c) I_{dc}}{L_f} \\ \quad + \frac{R_c}{L_f} I_{CPL} - \frac{1}{L_f} V_{dc} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_f} I_{dc} - \frac{1}{C_f} I_{CPL} \end{cases} \quad (7)$$

เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 8 สามารถหาได้จากสมการที่ (8) ดังนี้

$$Z_o = \frac{V_{dc}}{I_{CPL}} \quad (8)$$

- พิจารณาทางฝั่งโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มี การควบคุมขนานกัน

การหาอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ของวงจรทางฝั่งโหลด ที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ขนานกัน ทำได้โดยการ ขนานกันระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผัน แบบบักก์ตัวที่หนึ่ง ($Z_{in,1}$) และอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร แปลงผันแบบบักก์ตัวที่สอง ($Z_{in,2}$) นั่นคือ $Z_{in,1} // Z_{in,2}$ ก็จะได้อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ของระบบที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบักก์ขนานกัน [8] ดังสมการที่ (9) พิจารณาที่โหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ตัวที่หนึ่งได้ดังรูป ที่ 9 ดังนี้



รูปที่ 9 วงจรที่พิจารณาทางด้านโหลดวงจรแปลงผัน แบบบักก์ที่มีตัวควบคุมตัวที่หนึ่ง

$$Z_{in} = Z_{in,1} // Z_{in,2} \quad (9)$$

จากรูปที่ 9 เมื่อการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยกฎแรงดัน และกฎกระแสของเคอร์ซอพฟ์ จะได้สมการตัวแปรสถานะ ดังสมการที่ (10) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -\frac{R_L}{L} I_L - \frac{1}{L} V_o + \frac{d^*}{L} V_{dc} \\ \dot{V}_o = -\frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\ \dot{x}_v = -V_o + V_o^* \\ \dot{x}_i = -I_L + K_{pv} V_o^* - K_{pv} V_o + K_{iv} x_v \end{cases} \quad (10)$$

เมื่อ

$$d^* = -K_{pv} I_L - K_{pi} K_{pv} V_o + K_{pi} K_{pv} V_o^* + K_{pi} K_{iv} x_v + K_{ii} x_i$$

พิจารณากระแสที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันแบบบักก์ตัว ที่หนึ่งจะได้ดังสมการที่ (11) ดังนี้

$$\begin{aligned} I_{in,1} &= u(t) I_L \\ I_{in,1} &= -K_{pv} I_L^2 - K_{pi} K_{pv} V_o I_L + K_{pi} K_{pv} V_o^* I_L \\ &\quad + K_{pi} K_{iv} x_v I_L + K_{ii} x_i I_L \end{aligned} \quad (11)$$

เมื่อ $u(t) = d^*$

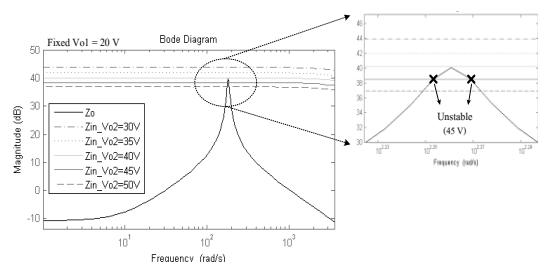
อินพุตอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 9 สามารถหาได้ จากสมการที่ (12) ดังนี้

$$Z_{in,1} = \frac{V_{dc}}{I_{in,1}} \quad (12)$$

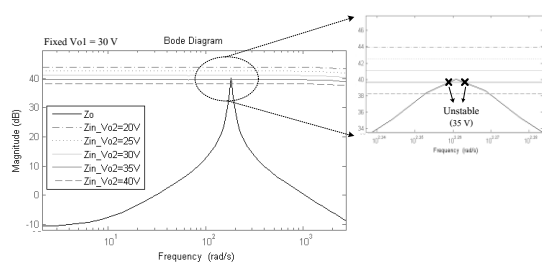
สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) และอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) ด้วยการโปรแกรมบน คอมพิวเตอร์ และนำไปเขียนแผนภาพโบเดเพื่อแสดง ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองในย่านความถี่ต่างๆ

การวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำการปรับค่าแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 30 V จนถึง 50 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 (V_{o1}^*)

เท่ากับ 20 V มีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 10 และปรับค่าแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 20 V จนถึง 40 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่ 1 (V_{o1}^*) เท่ากับ 30 V มีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 แผนภาพโบดของ Z_o และ Z_{in} เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 20 V

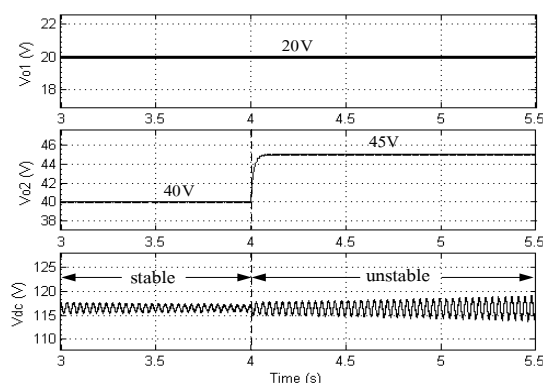


รูปที่ 11 แผนภาพโบดของ Z_o และ Z_{in} เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 30 V

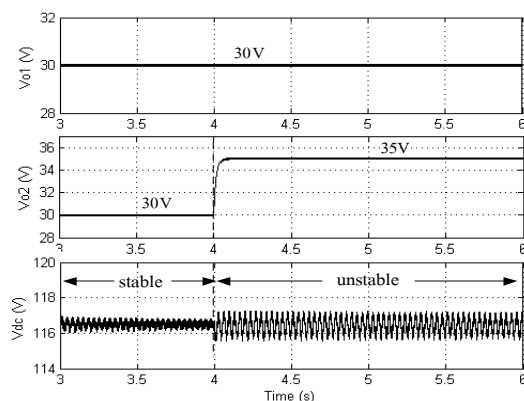
จากรูปที่ 10 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่สอง (V_{o2}^*) จาก 30 V จนถึง 50 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) เท่ากับ 20 V พบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 45 V เป็นต้นไป และจากรูปที่ 11 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่สอง (V_{o2}^*) จาก 20 V จนถึง 40 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) เท่ากับ 30 V พบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนด

วงจรแปลงผันแบบบักซูดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 35 V เป็นต้นไป

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในรูปที่ 5 และ 10 กับรูปที่ 6 และ 11 จะดำเนินการโดยการจำลองของระบบในรูปที่ 1 บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 12 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 30 V



รูปที่ 13 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 20 V

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 12 เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) เท่ากับ 20 V และเปลี่ยนแปลงค่า

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง (V_{o2}^*) จาก 40 V ไป 45 V ที่ค่าแรงดัน 45 V จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซีเกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้นหรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ และจากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 13 เมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) เท่ากับ 30 V และเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง (V_{o2}^*) จาก 30 V ไป 35 V ที่ค่าแรงดัน 35 V จะเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้ถูกต้อง

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโพลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักซ์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบลูค โดยเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้ง 2 วิธี พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่ตรงกัน และสอดคล้องกับการยืนยันผลโดยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

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] 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.
- [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] 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 (ISIE08)*. Cambridge, UK, 2008 pp. 19-24.
- [5] R. D. Middlebrook, "Input filter consideration in design and application of switching regulators," *IEEE Industry Applicat. Soc. Annu. Meeting*, 1976, pp. 366-382.
- [6] A. Emadi, "Modeling of power electronic loads in AC distribution systems using the generalized state-space averaging method." *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 51, no. 5, pp. 992-1000, Oct 2004.
- [7] A. Emadi, "Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging

- method.” *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 51, no. 3, pp. 661-668, Jun 2004.
- [8] X. Feng, J. Liu, and F. C. Lee, “Impedance specification for stable DC distributed power system,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 157-162, Mar. 2002.
- [9] 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 System*, Jeju, 2018, pp. 745-748.
- [10] กองพัน อารีรักษ์, “ระบบควบคุม,” พิมพ์ครั้งที่ 1. นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2560.
- [11] เทพพนม โสภะเพิ่ม, “การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2554.