

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด
เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์-บูสต์ โดยใช้วิธีลูปยกเลิก

Instability Mitigation of AC-DC Power System feeding Controlled Buck-Boost

By using Loop-Cancellation Technique

กฤษณะ ศิวเกลี้ยง¹ และ เทพพนม โสภานิม¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร theppanom@mutacth.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์-บูสต์ โดยอาศัยหลักการของวิธีลูปยกเลิกในการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรง ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อคำนวณหาค่าอัตราขยายที่มีผลต่อการชดเชยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เหมาะสมด้วยทฤษฎีการควบคุมแบบเชิงเส้น การจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม MATLAB สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องเสถียรภาพของระบบที่คาดเดาจากทฤษฎี จากผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกลับมามีเสถียรภาพได้

คำสำคัญ: บรรเทาการขาดเสถียรภาพ วงจรแปลงผันแบบบัคค์-บูสต์ ลูปยกเลิก วิธีดีคิว วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

Abstract

The paper presents the instability mitigation of three-phase full bridge diode rectifier feeding buck-boost converter using loop cancellation technique. This technique is used to overcome the instability operation.

The mathematical model of the proposed system derived from the DQ method and the generalized state-space averaging method (GSSA) is used with the eigenvalue theorem for stability studies. The intensive time-domain simulation of MATLAB is validate the stable point predicted from the theory. The stabilization results show that the unstable system due to a constant power load can become back to stable system by using the proposed technique.

Keywords: Instability Mitigation, Buck-Boost converter, Loop Cancellation Technique, DQ-method, GSSA-method, Constant Power Load

1. บทนำ

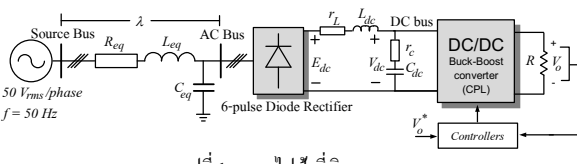
ปัจจุบันได้มีการนำวงจรแปลงผันมาใช้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย ทั้งแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงปรับค่าได้ กระแสตรงเป็นกระแสสลับ และกระแสสลับไปเป็นกระแสตรง ซึ่งโหลดที่ใช้วงจรแปลงผันในการขับเคลื่อนที่มีการป้อนกลับได้แก่ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า วงจรควบคุมความสว่าง และวงจรควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น วงจรแปลงผันที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power load: CPL) [1], [2] ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่โหลดดังกล่าวจะมีลักษณะผกผัน ดังนั้นเมื่อมีโหลดดังกล่าวต่อเข้ากับระบบมากขึ้น อาจจะทำให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขาดเสถียรภาพได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การขาดเสถียรภาพเนื่องจากอิมพีแดนซ์ติดลบ (Negative impedance instability) [3] ระบบที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบนี้ปรากฏทั้งในยานยนต์ เรือ อากาศยานและในบ้านที่มีการใช้พลังงานทดแทนจะมีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหลายรูปแบบ ดังนั้นเมื่อนำกำลังไฟฟ้ามาต่อรวมกันจึงนิยมต่อเชื่อมกันด้วยบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Main DC bus) เพื่อลดผลกระทบในเรื่องของความถี่ที่ต่างกัน การศึกษาผลของเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังจะพิจารณาจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูง รวดเร็ว เพื่อสามารถนำมาวิเคราะห์ผลการขาดเสถียรภาพของระบบได้ [4], [5] แต่ไม่ทำให้ระบบดังกล่าวมีความเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ดังนั้นการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจึงมีความจำเป็นเพื่อสามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังดำเนินงานต่อไปได้ในตลอดย่านการทำงาน ในบทความนี้จึงนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเลิก [6] สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์-บูสต์ ซึ่งสามารถชดเชยผลกระทบที่เกิดขึ้นจากโหลดดังกล่าวโดยตรง เพียงอาศัยการวัดค่าแรงดันตกคร่อมวงจรกรองแรงดันบัสดีซี (DC bus) และนำมาปรับคูณด้วยค่าอัตราขยาย (K_{FB}) เพื่อนำค่าดังกล่าวไปบวกกับค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของอุปกรณ์การสวิตซ์ที่ ต้องเพิ่มขึ้นมาในวงจร โดยผลของค่าอัตราขยายดังกล่าวจะอาศัยการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทความนี้จะประกอบไปด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 อธิบายผลของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์-บูสต์ที่มีผลต่อ

เสถียรภาพ ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลักษณ์ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงการยืนยันผลด้วยจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และส่วนที่ 4 สรุปข้อดีของวิธีที่ได้นำเสนอในบทนี้

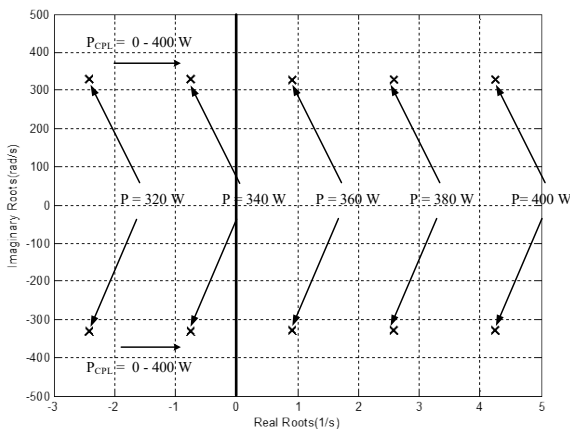
2. โหลดวงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์ที่มีผลต่อเสถียรภาพ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณคิซีที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมในบทความนี้จะใช้แบบพีโอ



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

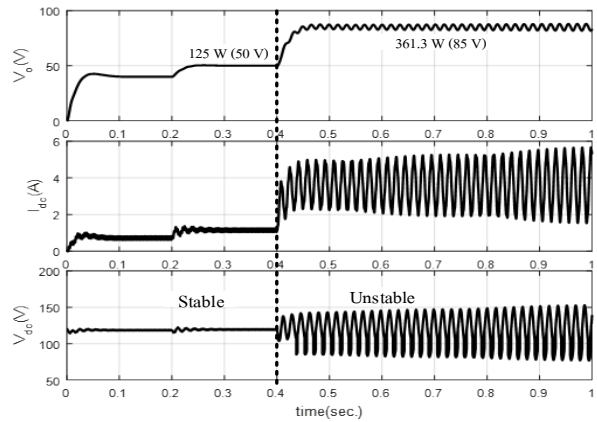
จากรูปที่ 1 วงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์จะลดทอนเสถียรภาพของระบบได้ เมื่อมีการปรับแรงเอาต์พุต V_o^* ที่ตกคร่อมโหลด R เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้โหลดมีค่าอิมพีแดนซ์ติดลบมากขึ้น[3] เมื่อระบบขาดเสถียรภาพจะทำให้แรงดันของวงจรกรองคิซี (V_{dc}) เกิดการแกว่งที่มีค่ามากขึ้นทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการคาดเดาจุดการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์ สามารถแสดงผลการวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีระบบควบคุมแบบเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 ค่าเจาะจงเมื่อมีการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัค

จากรูปที่ 2 เป็นการคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่พิจารณาในรูปที่ 1 โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์บนพื้นฐานของวิธีการใน[6] จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 360 W จะทำให้ระบบเกิดการขาด

เสถียรภาพ ซึ่งผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ แสดงดังรูปที่ 3 ดังนี้

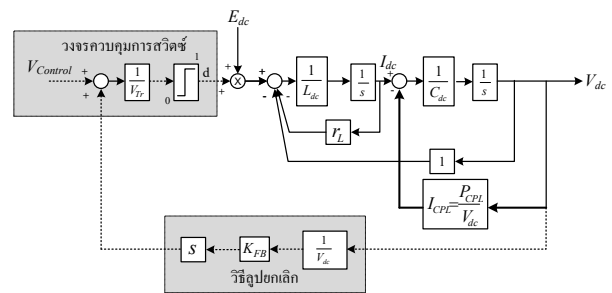


รูปที่ 3 ผลยืนยันการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 361.3 W จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากการแกว่งของรูปสัญญาณที่มีขนาดสูงขึ้นภายหลังจากเวลาที่ 0.4 วินาที ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปลักษณ์ พร้อมทั้งวิธีการควบคุม เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

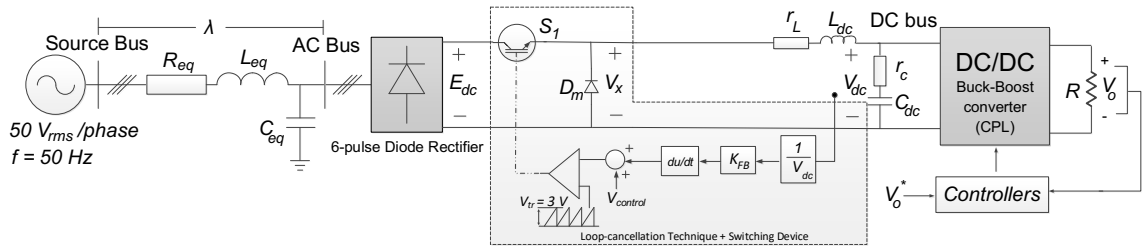
3. การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลักษณ์

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลักษณ์จะอาศัยการอธิบายผ่านแผนภาพบล็อกโคอะแกรมในวงจรกรองบัสคิซีของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์ แสดงดังรูปที่ 4 ดังนี้

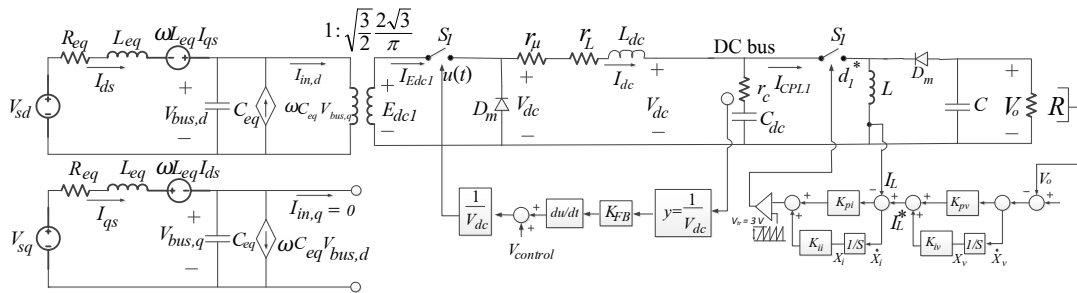


รูปที่ 4 แผนภาพการวิธีลูปลักษณ์

จากแผนภาพรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ในที่นี้คือ ($I_{CPL} = P_{CPL}/V_{dc}$) สามารถไปลดทอนเสถียรภาพของระบบ ซึ่งจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สามารถทำได้โดยการตรวจจับแรงดันเอาต์พุตที่บัสคิซีให้อยู่ในรูปแบบผกผัน จากนั้นนำมาปรับคูณกับค่าสัมประสิทธิ์ (K_{FB}) เพื่อทำ



รูปที่ 5 ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรด้วยวิธีลูปลอกเล็ก



รูปที่ 6 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิวรวมทั้งความถี่ของวงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์

หน้าที่ปรับอัตราขยายการชดเชยโพลกำลังไฟฟ้าลงด้วย และผ่านการหาอนุพันธ์ของขนาดสัญญาณที่ได้ ส่งผ่านไปยังวงจรควบคุมการสวิตช์ ซึ่งในที่นี้ จะต้องสร้างวงจรดังกล่าวเพิ่มเข้าไปในระบบ ซึ่งจะอยู่ระหว่างไดโอดเรียงกระแส และวงจรกรองบัสดีซี เพื่อให้สามารถทำให้ระบบมีการควบคุมแรงดันบัสดีซี และสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ [6] ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังได้รูปที่ 5

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าการออกแบบค่า K_{FB} จะอาศัยการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่แม่นยำสูง และสามารถนำไปคำนวณผ่านทฤษฎีบทค่าเฉพาะ เพื่อสามารถหาค่า K_{FB} ที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ จากระบบดังกล่าวจะพิจารณาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสด้วยวิธีดีคิว ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนดีคิว ดังรูปที่ 6 ดังนี้

จากรูปที่ 6 สามารถหาสมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ที่พิจารณาการควบคุมด้วยวิธีลูปลอกเล็ก จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 5 แสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

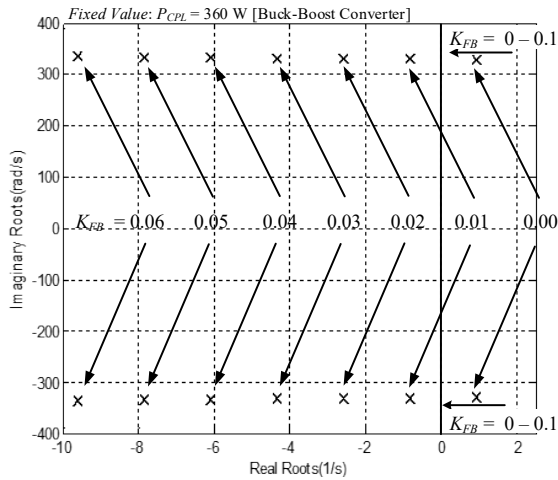
$$\begin{cases} \dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\ \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{tr}}{\pi C_{eq} V_{control}} I_{dc1} + \frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc} V_{control}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \\ \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{dc1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{control}}{\pi L_{dc} V_{tr}} V_{bus,d} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc1} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pl}}{L_{dc}} I_L^2 \\ = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}(r_{\mu} + r_L + r_c) K_{FB}}{\pi L_{dc}^2 V_{tr}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} - \frac{r_c K_{pl} K_{pl}}{L_{dc}} I_L V_o - \frac{r_c K_{iv} K_{pl}}{L_{dc}} I_L X_v \\ = \frac{r_c K_{iv}}{L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_c K_{pv} K_{pl}}{L_{dc}} I_L V_o^* \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc1} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d} + \frac{K_{pl}}{C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pv} K_{pl}}{C_{dc}} I_L V_o \\ = -\frac{K_{iv} K_{pl}}{C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{iv}}{C_{dc}} I_L X_i + \frac{K_{pv} K_{pl}}{C_{dc}} I_L V_o^* \\ \dot{I}_L = \frac{K_{pl}}{L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pv} K_{pl}}{L} V_{dc} V_o - \frac{K_{iv} K_{pl}}{L} V_{dc} X_v + \frac{K_{iv}}{L} V_{dc} X_i \\ = + \frac{K_{pv} K_{pl}}{L} V_{dc} V_o^* \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\ \dot{X}_v = -V_o + V_o^* \\ \dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^* \end{cases} \quad (2)$$

จากสมการที่ (1) และ (2) จะเห็นได้ว่าเป็นสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะต้องอาศัยแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น (linearized model) ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเฉพาะ (eigenvalue theorem) ดังนั้น แบบจำลองสามารถทำให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3) ซึ่งค่าต่าง ๆ ในเมทริกซ์ **A** **B** **C** และ **D** จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติการของระบบ

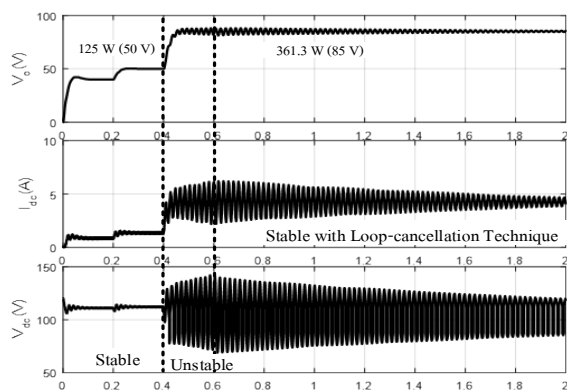
$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \tilde{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \tilde{u} \\ \tilde{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \tilde{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \tilde{u} \end{cases} \quad (3)$$

การหาค่า K_{FB} ที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ จะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงนำมาใช้ในการพิจารณา ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) $A(x_0, u_0)$ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์มีค่าคงที่เท่ากับ 360 W ที่ค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0 ระบบจะขาดเสถียรภาพ โดยดูได้จากโพลปรากฏอยู่ฝั่งขวาของระนาบเอส และเมื่อค่า K_{FB} มีค่าเป็น 0.01 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพสามารถกลับมาเสถียรได้อีกครั้ง การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์ แสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลยืนยันการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่า 361.3 W การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเลิกเมื่อ K_{FB} เท่ากับ 0.01 จะทำให้ระบบที่พิจารณากลับมามีเสถียรภาพได้แต่ถ้าระดับของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า K_{FB} จะต้องต้องมีค่ามากกว่า 0.01 เพื่อให้ระบบสามารถกลับมาเสถียรภาพได้อีกครั้ง ดังนั้นการคำนวณหาค่า K_{FB} ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ที่ช่วงทำงาน

อื่น ๆ สามารถคำนวณได้ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3) ดังที่ได้นำเสนอไว้แล้ว

4. สรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึง การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเลิก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วิธีการดังกล่าวสามารถชดเชยผลของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่นั่นคือ ผลของการกระทำของแรงดันบัลด์ซึ้นนั้นมีค่าลดลงตามเมื่อค่า K_{FB} มีค่าเพิ่มตามวิธีการที่ได้คำนวณจากทฤษฎี การพิจารณาโครงสร้างของวิธีลูปยกเลิกในบทความนี้ สร้างขึ้นเพียงรับค่าแรงดันไฟฟ้าฝั่งดีซีเพื่อนำมาบวกกับวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ ตามโครงสร้างที่นำเสนอ และการคาดเดาจากแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูง สามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นโดยไม่ประสบปัญหาในเรื่องของการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi, M. Ehsani and J. M. Miller, *Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicle*. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [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] 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.
- [4] 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. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 1, January 2012, pp. 329-347.
- [5] T.Sopapirm, K-N.Areerak, and K-L. Areerak, "Stability Analysis of AC-DC Distribution System with Six-Pulse Diode Rectifier and Multi-Converter Power Electronic Loads", *International Review of Electrical Engineering (I.R.EE)*, Vol. 6, n. 7 November-December 2011, pp. 2919-2928.
- [6] 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.