

บทที่ 5

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

5.1 บทนำ

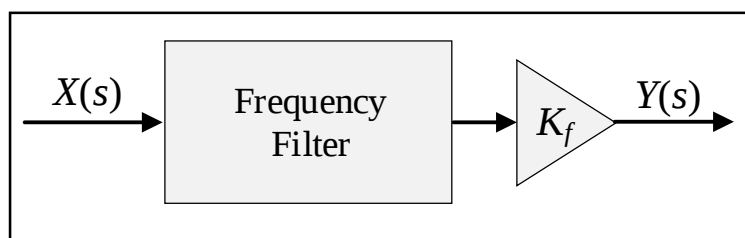
การวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 4 ที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยจุดการขาดเสถียรภาพจะเกิดขึ้นก่อนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพทำได้เพียงแค่คาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมาทำงานต่อได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด ดังนั้นในบทที่ 5 นี้จึงเป็นการนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งเนื้อหาในตอนต้นของบทจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า จากนั้นจะเป็นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ เพื่อใช้ในการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับสร้างเสถียรภาพ ณ จุดการขาดเสถียรภาพ และจากจุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด โดยการออกแบบดังกล่าวจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเนื้อหาในส่วนสุดท้ายเป็นการยืนยันผลของการสร้างเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับนำไปประยุกต์ใช้สร้างชุดทดสอบจริงของระบบ เพื่อยืนยันว่าการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ดังที่จะนำเสนอในบทถัดไป

5.2 การสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อได้จนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้วิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เนื่องจากเป็นวิธีการที่อาศัยการแก้ไขหรือดัดแปลงระบบควบคุมโดยไม่มีการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟ (passive component) เข้าไปในระบบ ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดน้ำหนักและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ โดยทฤษฎีพื้นฐานของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าได้ดังนี้สามารถอธิบายรายละเอียดพอสังเขปได้ดังหัวข้อที่ 5.2.1

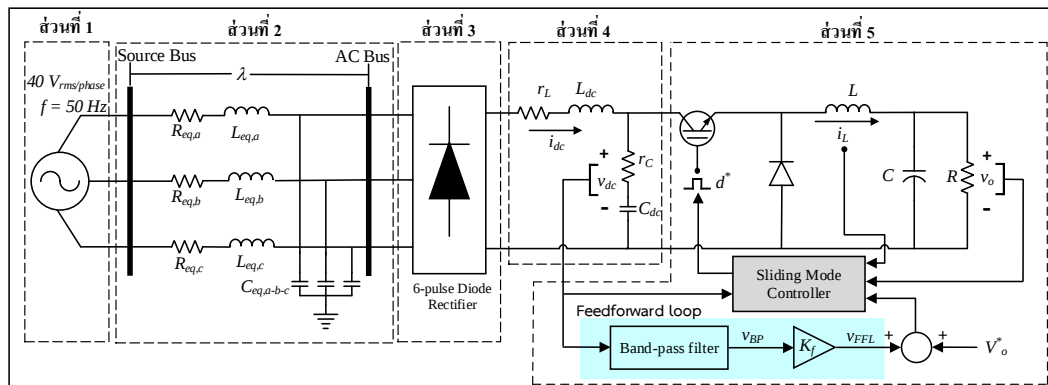
5.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้า

ตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าเป็นวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพให้กับระบบด้วยการสร้างสัญญาณชดเชยเพิ่มเข้าไปยังตัวควบคุมเดิมที่มีอยู่แล้วของวงจรแปลงผันกำลัง โดยการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายได้ว่าตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าจะตรวจจับสัญญาณไฟฟ้า $X(s)$ เช่น กระแสไฟฟ้าและ/หรือแรงดันไฟฟ้าที่มีการสั่นไหว จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มากรองด้วยตัวกรองความถี่ เช่น ตัวกรองความถี่สูง (high-pass filter) ตัวกรองความถี่ต่ำ (low-pass filter) ตัวกรองความถี่แถบผ่าน (band-pass filter) หรือตัวกรองความถี่แถบหยุด (band-stop filter) แล้วคูณด้วยอัตราขยายของตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้า (K_f) เพื่อให้ได้สัญญาณชดเชย $Y(s)$ และเพิ่มเข้าไปยังตัวควบคุมเดิมที่มีอยู่แล้วของวงจรแปลงผันกำลัง โดยสัญญาณ $Y(s)$ ที่ได้จะมีเฟสตรงข้ามกับสัญญาณ $X(s)$ และเมื่อคูณด้วยค่าอัตราขยาย K_f ที่เหมาะสมแล้วจะสามารถลบล้างผลการสั่นไหวและไม่คงที่ของสัญญาณ $X(s)$ จนกระทั่งระบบสามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ (M. Wu and D. D. -C. Lu, 2014; M. Wu, D. D. -C. Lu and C. K. Tse, 2015; M. Wu and D. D. -C. Lu, 2015; รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563)

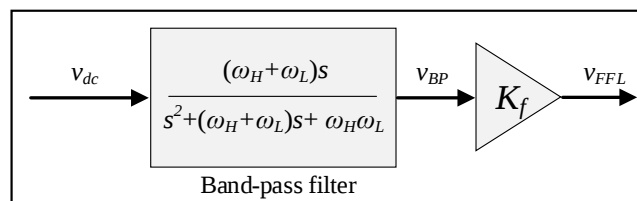


รูปที่ 5.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้า

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งวิธีการที่นำเสนอแสดงได้ดังพื้นที่สีฟ้า โดยเมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรองหรือแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรแปลงผันแบบบัค (v_{dc}) จะเกิดการสั่นไหวด้วยความถี่ที่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่านมาทำการกรองแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวรอบ ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการกรองจะมีความถี่และมีเฟสตรงข้ามกับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ จากนั้นนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาคูณกับค่าอัตราขยาย K_f เพื่อสร้างเป็นแรงดันไฟฟ้าชดเชย (v_{FFL}) ที่มีขนาดเหมาะสมและเพียงพอสำหรับการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบ แล้วฉีดไปยังตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเดิมที่มีอยู่แล้วของวงจรแปลงผันแบบบัค โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าที่ใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่านสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ



รูปที่ 5.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยลูบบ้อนไปหน้าที่ใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่าน

จากรูปที่ 5.3 สามารถเขียนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (5-1) ดังนี้

$$\frac{v_{FFL}(s)}{v_{dc}(s)} = \frac{K_f (\omega_H + \omega_L) s}{s^2 + (\omega_H + \omega_L) s + (\omega_H \omega_L)} \quad (5-1)$$

โดยที่	v_{FFL}	คือ แรงดันไฟฟ้าชดเชย
	v_{dc}	คือ แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรอง
	K_f	คือ ค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูบบ้อนไปหน้า (Feedforward Loop gain)
	ω_H	คือ ค่าความถี่ตัดสูง (High cutoff frequency)
	ω_L	คือ ค่าความถี่ตัดต่ำ (Low cutoff frequency)

สำหรับค่าความถี่ ω_H และค่าความถี่ ω_L สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-2) และสมการที่ (5-3) ตามลำดับ เมื่อความถี่ ω_0 คือ ค่าความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองแถบผ่าน

$$\omega_H = 2\omega_0 \quad (5-2)$$

$$\omega_L = \frac{\omega_0}{2} \quad (5-3)$$

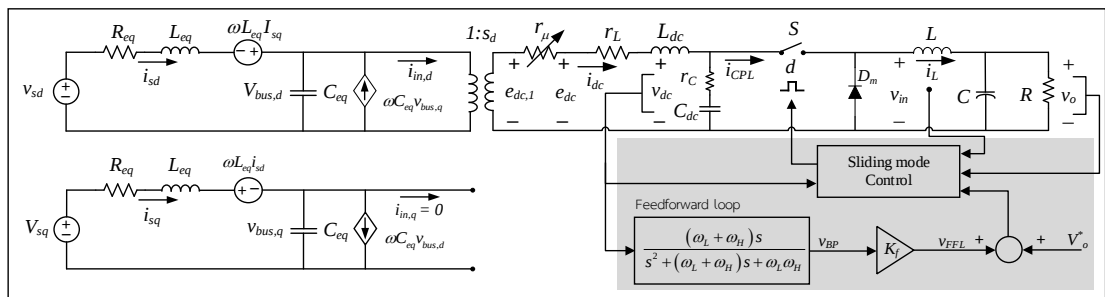
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่านเพื่อกรองแรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรองรอบ ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นค่าความถี่ ω_0 จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ (ω_r) ของระบบ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (5-4)

$$\omega_0 = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_{dc} C_{dc}}} \quad (5-4)$$

นอกจากการออกแบบความถี่ตัวกรองแถบผ่านแล้ว การออกแบบค่าอัตราขยาย K_f มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการกำจัดผลกระทบที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ผ่านการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 5.2.2 ดังนี้

5.2.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพดังแสดงในรูปที่ 5.2 จะอาศัยองค์ความรู้ที่ได้จากบทที่ 3 ซึ่งจะสามารถเขียนวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบที่อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ดังนี้



รูปที่ 5.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนหมุนดีคิวของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ

จากรูปที่ 5.4 จะพบว่ามีส่วนที่แตกต่างไปจากบทที่ 3 คือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่มีการพิจารณาพร้อมกับตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า ดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาซึ่งจะเป็นส่วนที่ต้องดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองเพิ่มเติมจากบทที่ 3 โดยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าจะตรวจจับแรงดันไฟฟ้า v_{dc} จากนั้นนำไปกรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านที่ได้รับการออกแบบให้มีความถี่ศูนย์กลางเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.2.1 ซึ่งจะได้แรงดันไฟฟ้าที่ผ่านการกรอง $v_{BP}(s)$ ที่อยู่ในโดเมนเอส (s-domain) หรือโดเมนความถี่ (frequency domain) แสดงได้ดังสมการที่ (5-5) และเมื่อนำแรงดันไฟฟ้า $v_{BP}(s)$ คูณกับค่าอัตราขยาย K_f จะได้แรงดันไฟฟ้าชดเชย ($V_{FFL}(s)$) บนโดเมนความถี่ ดังแสดงในสมการที่ (5-6)

$$v_{BP}(s) = \left(\frac{(\omega_L + \omega_H)s}{s^2 + (\omega_L + \omega_H)s + \omega_L\omega_H} \right) v_{dc}(s) \quad (5-5)$$

$$v_{FFL}(s) = K_f v_{BP}(s) \quad (5-6)$$

จากสมการที่ (5-5) และสมการที่ (5-6) พบว่า สมการดังกล่าวอยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งไม่สามารถนำไปสร้างเป็นแบบจำลองของระบบได้โดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงให้อยู่ในโดเมนเวลา (time-domain) ซึ่งทำได้โดยเริ่มจากการจัดรูปสมการที่ (5-5) ใหม่ดังสมการที่ (5-7)

$$V_{BP}(s) = s v_{df}(s) \quad (5-7)$$

โดย $v_{df}(s)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-8)

$$v_{df}(s) = \frac{(\omega_L + \omega_H)}{s^2 + (\omega_L + \omega_H)s + \omega_L\omega_H} v_{dc}(s) \quad (5-8)$$

จากนั้นจัดรูปสมการที่ (5-8) ใหม่จะได้ดังสมการที่ (5-9)

$$s^2 v_{df}(s) = (\omega_L + \omega_H) v_{dc}(s) - s v_{df}(s) (\omega_L + \omega_H) - \omega_L \omega_H v_{df}(s) \quad (5-9)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (5-9) ร่วมกับสมการที่ (5-7) จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้า $V_{BP}(s)$ ที่อยู่บนโดเมนความถี่แสดงได้ดังสมการที่ (5-10)

$$sV_{BP}(s) = (\omega_L + \omega_H)v_{dc}(s) - (\omega_L + \omega_H)v_{BP}(s) - \omega_L\omega_H v_{df}(s) \quad (5-10)$$

ดำเนินการแปลงสมการ (5-6) สมการที่ (5-7) และสมการที่ (5-10) ให้อยู่ในโดเมนเวลาโดยอาศัยการแปลงลาปลาซแบบผกผัน (inverse laplace transformation) ดังนั้นจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ในส่วนของตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้า ดังแสดงในสมการที่ (5-11) สมการที่ (5-12) และสมการที่ (5-13)

$$\dot{v}_{FFL} = K_f v_{BP} \quad (5-11)$$

$$\dot{v}_{df} = v_{BP} \quad (5-12)$$

$$\dot{v}_{BP} = (\omega_L + \omega_H)v_{dc} - (\omega_L + \omega_H)v_{BP} - \omega_L\omega_H v_{df} \quad (5-13)$$

จากสมการสร้างสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (u_{eq}) ดังสมการที่ (3-77) ในบทที่ 3 เมื่อมีการพิจารณาตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าสำหรับการสร้างเสถียรภาพเพิ่มเติม V_o^* ในสมการที่ (3-77) จะถูกแทนด้วย $V_o^* + K_f v_{BP}$ ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการสร้างสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่มีพิจารณาร่วมกับตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าแสดงได้ดังสมการที่ (5-14) ดังนี้

$$u_{eq} = \frac{V_o}{V_{dc}} \alpha - \frac{I_L}{V_{dc}} \beta + \frac{(V_o^* + K_f v_{BP})}{V_{dc}} \gamma \quad (5-14)$$

$$\text{โดยที่} \quad \alpha = \frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC}$$

$$\beta = \frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC}$$

$$\gamma = \frac{mRLC(K+1)}{aRC}$$

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า สามารถดำเนินการได้โดยแทนค่า d ในสมการที่ (3-53) ในบทที่ 3 ด้วย u_{eq} ดังสมการที่ (5-14) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอแสดงในสมการที่ (5-15)

$$\left\{ \begin{aligned}
 i_{sd} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{sd} + \omega i_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\lambda) \\
 i_{sq} &= -\omega i_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\lambda) \\
 \dot{v}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} i_{sd} + \omega v_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} i_{dc} \\
 \dot{v}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} i_{sq} - \omega v_{bus,d} \\
 i_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} v_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} i_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} v_{dc} \\
 &\quad + \frac{r_C v_o i_L}{v_{dc}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCL_{dc}} \right) - \frac{r_C i_L^2}{v_{dc}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCL_{dc}} \right) \\
 &\quad + \frac{r_C i_L (V_o^* + K_f V_{bpf})}{v_{dc}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCL_{dc}} \right) \\
 \dot{v}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} - \frac{v_o i_L}{v_{dc}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCC_{dc}} \right) \\
 &\quad + \frac{i_L^2}{v_{dc}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCC_{dc}} \right) - \frac{i_L (V_o^* + K_f V_{bpf})}{v_{dc}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCC_{dc}} \right) \\
 i_L &= v_o \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCL} \right) - i_L \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCL} \right) \\
 &\quad + (V_o^* + K_f V_{bpf}) \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCC_{dc}} \right) - \frac{1}{L} v_o \\
 \dot{v}_o &= \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_o \\
 \dot{v}_{BP} &= (\omega_L + \omega_H) v_{dc} - (\omega_L + \omega_H) v_{BP} - \omega_L \omega_H v_{df} \\
 \dot{v}_{df} &= v_{BP}
 \end{aligned} \right. \quad (5-15)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพดังสมการที่ (5-15) แม้ว่าจะเป็นแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ยังคงเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากปรากฏการณ์การคูณกันระหว่างตัวแปรสถานะภายในแบบจำลอง ซึ่งทำให้

แบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้วิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งมาพิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในรูปของการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบ ๆ จุดปฏิบัติงาน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กได้ดังสมการที่ (5-16) เมื่อ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของระบบ ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_0$ และค่าตัวแปรอินพุต $\mathbf{u}_0$

$$\begin{cases} \dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (5-16)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ: $\delta \mathbf{x} = [\delta i_d \ \delta i_q \ \delta v_{bus,d} \ \delta v_{bus,q} \ \delta i_{dc} \ \delta v_{dc} \ \delta i_L \ \delta v_o \ \delta v_o]$
 $\delta v_{BP} \ \delta v_{df}]^T$

ตัวแปรอินพุต: $\delta \mathbf{u} = [\delta v_m \ \delta V_o^*]^T$

ตัวแปรเอาต์พุต: $\delta \mathbf{y} = [\delta i_{dc} \ \delta v_{dc} \ \delta i_L \ \delta v_o]^T$

เมื่อเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีการสร้างเสถียรภาพสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-17) ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \frac{-3\sqrt{2}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3\sqrt{2}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} & a(5,6) & a(5,7) & a(5,8) & 0 & a(5,10) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & a(6,6) & a(6,7) & a(6,8) & 0 & a(6,10) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,7) & a(7,8) & 0 & \frac{K_f}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_L + \omega_H & 0 & 0 & \omega_L \omega_H & -\omega_L - \omega_H \end{bmatrix}_{10 \times 10} \quad (5-17)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos(\lambda_0)}{L_{eq}} & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\lambda_0)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_C i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & \frac{-i_{L,0}}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & \frac{1}{L} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{10 \times 2}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 10}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 2}$$

3.10

$$a(5,6) = -\frac{1}{L_{dc}} - \frac{r_C v_{o,0} i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) + \frac{r_C i_{L,0}^2}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) - \frac{r_C (V_o^* + K_f v_{BP,0}) i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,7) = \frac{r_C v_{o,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) - \frac{2r_C i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) - \frac{r_C (V_o^* + K_f v_{BP,0})}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,8) = \frac{r_C i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,10) = \frac{K_f r_C i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,6) = \frac{V_{o,0} i_{L,0}}{C_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) - \frac{i_{L,0}^2}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) + \frac{(V_o^* + K_f v_{BP,0}) i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,7) = -\frac{v_{o,0}}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) + \frac{2i_{L,0}}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) + \frac{(V_o^* + K_f v_{BP,0})}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,8) = -\frac{i_{L,0}}{C_{dc}v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,10) = -\frac{K_f i_{L,0}}{C_{dc}v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(7,7) = -\frac{1}{L} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right)$$

$$a(7,8) = -\frac{1}{L} + \frac{1}{L} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

จากสมการที่ (5-17) จะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบของเมทริกซ์ **A(x₀,u₀)** และ **B(x₀,u₀)** จะปรากฏตัวแปร $v_{dc,0}$, λ_0 , $i_{L,0}$, $v_{o,0}$, $v_{df,0}$ และ $v_{BP,0}$ ซึ่งเป็นค่าในสภาวะอยู่ตัวที่จุดปฏิบัติการต่าง ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่าในสภาวะอยู่ตัวของตัวแปรดังกล่าวซึ่งทำได้โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าพื้นฐานมาวิเคราะห์วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.4 ดังนั้นค่าในสภาวะอยู่ตัวดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-18)

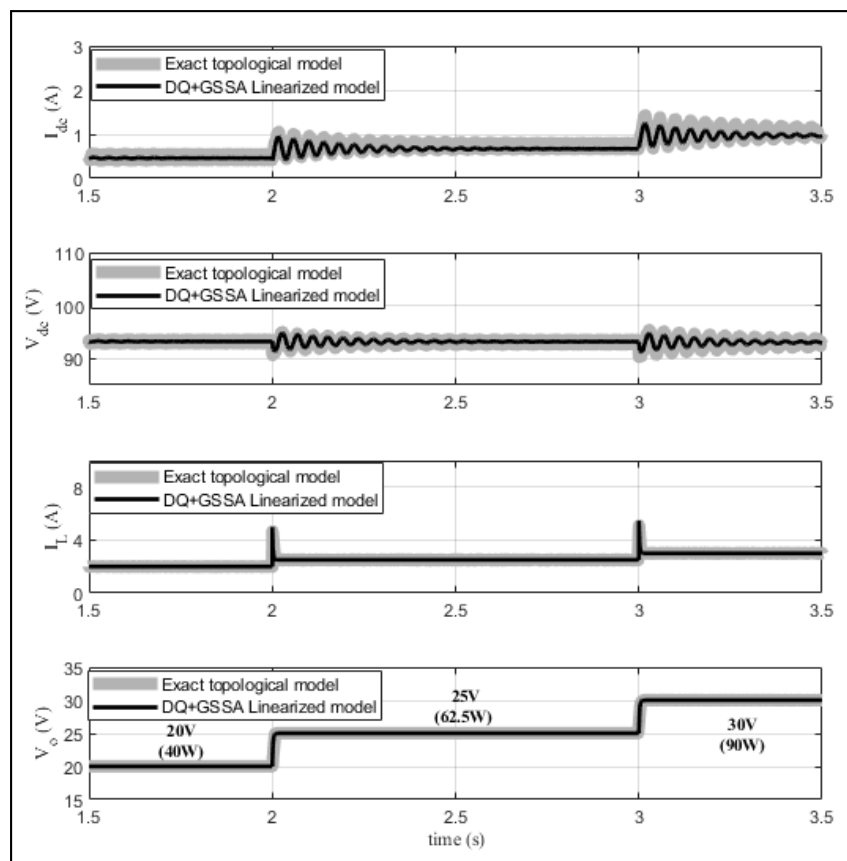
$$\begin{cases} v_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}v_{bus,0}) \\ i_{L,0} = \frac{v_{o,0}}{R} \\ v_{o,0} = V_o^* \\ v_{df} = 0 \\ v_{BP} = 0 \end{cases} \quad (5-18)$$

$$\text{โดยที่} \quad i_{dc,0} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{v_s e^{j0} - v_{bus,0} e^{-j\lambda_0}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi}}$$

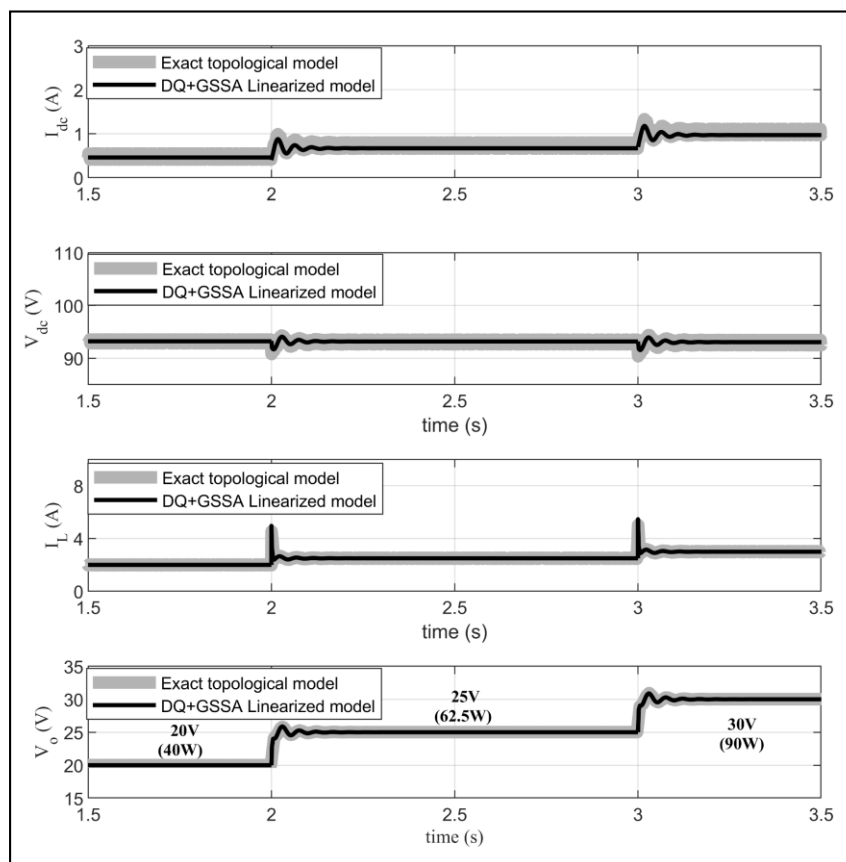
$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

จากสมการที่ (5-18) จะปรากฏตัวแปร $v_{bus,0}$ และ λ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถคำนวณหาได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าและบัสไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน เช่นเดียวกับรายละเอียดที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.4.3 ในบทที่ 3 และเพื่อเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพนั้นมีความถูกต้อง งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าวผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบเป็นดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 และรายละเอียดของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดังภาคผนวก ค.



รูปที่ 5.5 ผลตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ K_f เท่ากับศูนย์



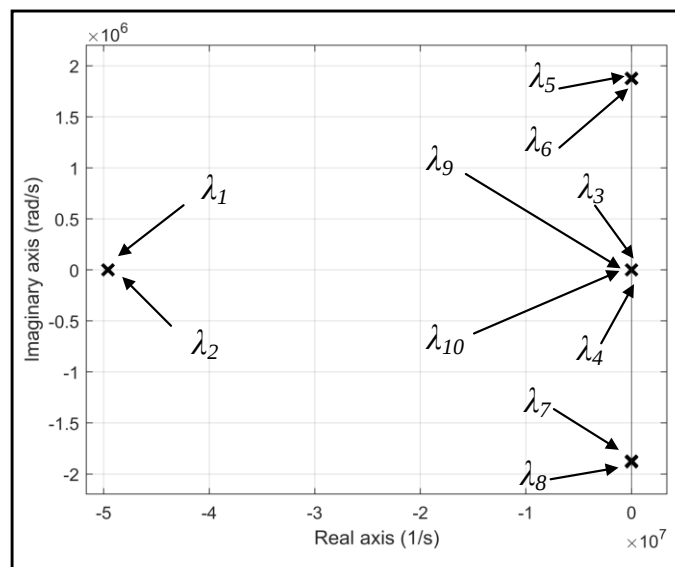
รูปที่ 5.6 ผลตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ K_f เท่ากับ 0.8

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงไม่มีการสร้างเสถียรภาพและ K_f เท่ากับ 0.8 เป็นกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ โดยจากผลการตรวจสอบพบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 V ($P_{CPL} = 40$ W) เป็น 25 V ($P_{CPL} = 62.5$ W) และ 30 V ($P_{CPL} = 90$ W) ในช่วงเวลา 1.5 วินาที ถึง 3.5 วินาที ผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องและตรงกันทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้ามีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยาย K_f เพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.3

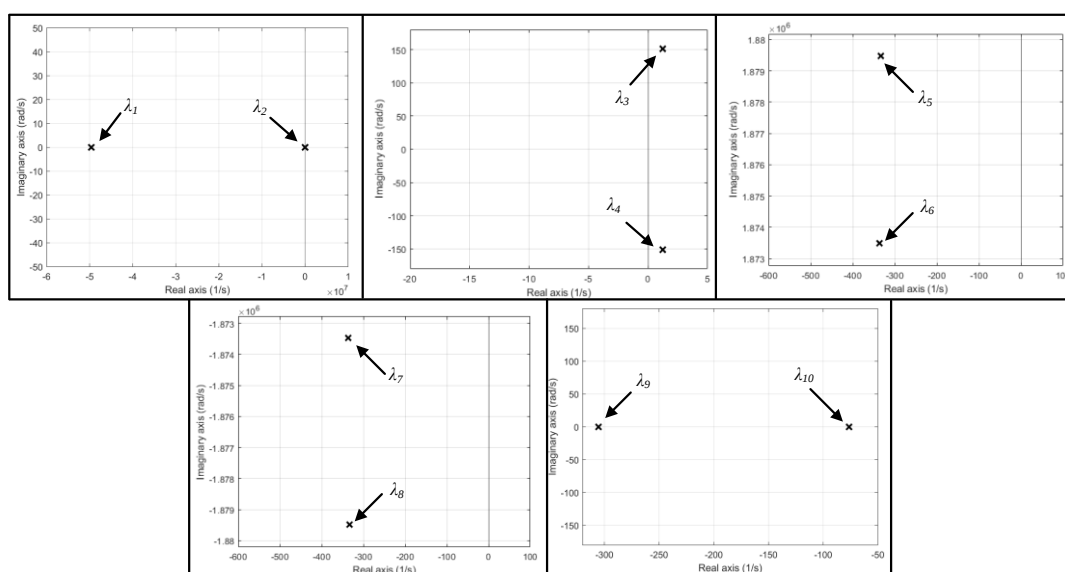
5.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลของการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 4 ที่ผ่านมาพบว่าระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o)

มีค่าเท่ากับ 42 V ($P_{CPL} = 176.4$ W) ซึ่งเกิดขึ้นก่อนค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ ($P_{CPL} = 360$ W) ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องสร้างเสถียรภาพเพื่อให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปได้ โดยการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f เพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับระบบจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 และตำแหน่งแบบละเอียดของค่าเจาะจงแต่ละคู่แสดงได้ดังรูปที่ 5.8

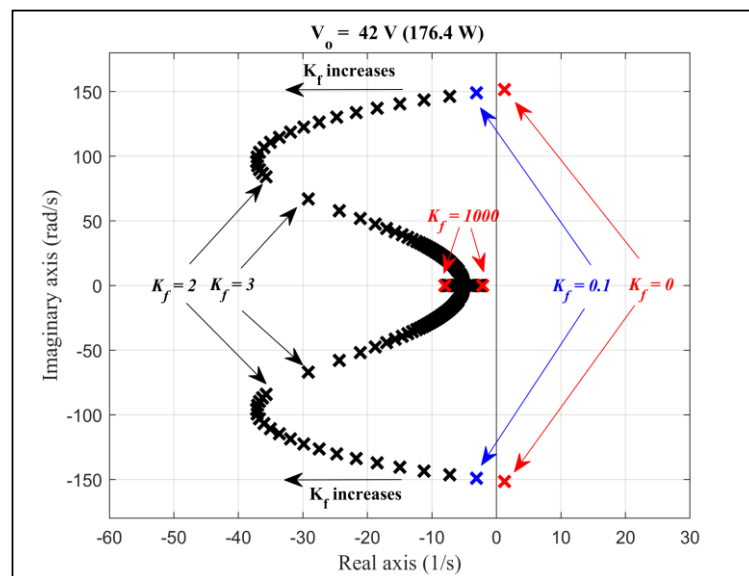


รูปที่ 5.7 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ



รูปที่ 5.8 ตำแหน่งของค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ

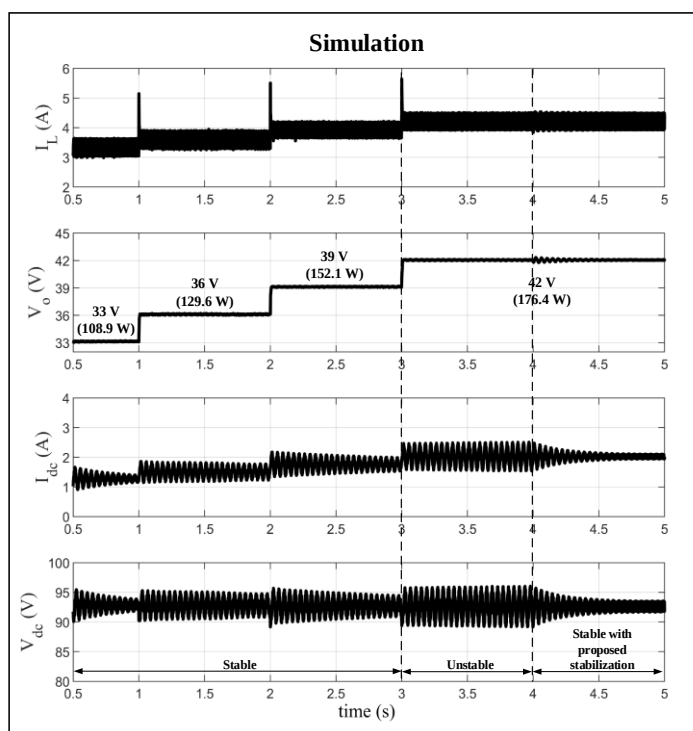
จากรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 จะพบว่า ระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพจะมีค่าเจาะจงทั้งหมด 10 ค่า คือ λ_1 ถึง λ_{10} โดยการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f จะพิจารณาไปที่ค่าเจาะจงเด่นของระบบนั้นคือ λ_3 และ λ_4 เนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวมีส่วนจริงเมื่อเทียบกับส่วนจริงของค่าเจาะจงอื่น ๆ เท่ากับ 10 เท่า สำหรับการเลือกใช้ค่าอัตราขยาย K_f จะพิจารณาค่าที่น้อยและเพียงพอต่อการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพของระบบ โดยเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นของระบบที่จุดการขาดเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย K_f ตั้งแต่ 0 ถึง 1000 สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 5.7 ดังนี้



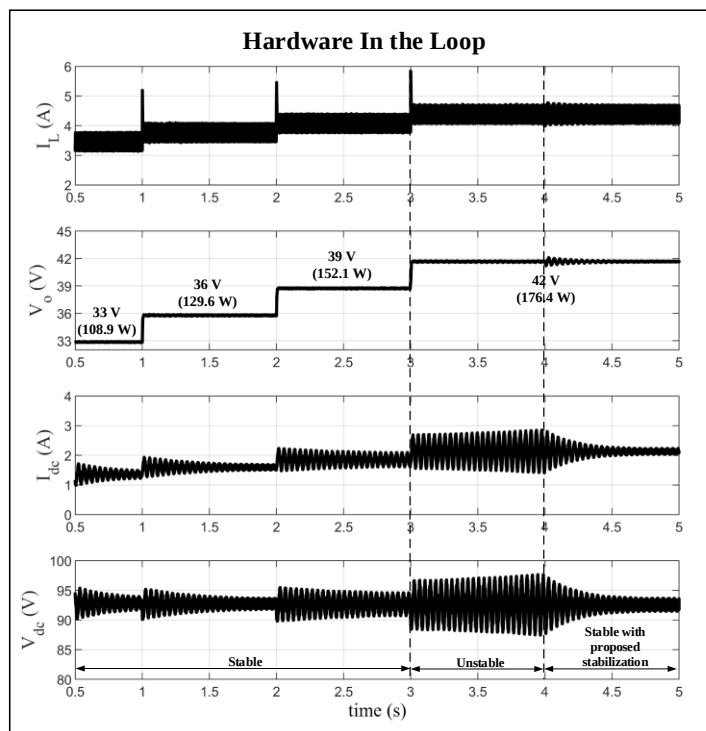
รูปที่ 5.9 เส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่จุดการขาดเสถียรภาพเมื่อ K_f มีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 5.9 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อกำหนดให้อัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นจะมากกว่าศูนย์หรืออยู่ทางด้านขวามือของระนาบเอส หมายความว่าระบบจะทำงานไม่มีการสร้างเสถียรภาพ จึงส่งผลให้ระบบยังคงขาดเสถียรภาพ แต่เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นจะน้อยกว่าศูนย์หรืออยู่ทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส ซึ่งหมายความว่า ระบบที่ขาดเสถียรภาพจะกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง ในขณะที่การเพิ่มค่า K_f ไปเรื่อย ๆ จะทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายมือเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งที่ค่า K_f เท่ากับ 2 ค่าเจาะจงเด่นจะเริ่มมีการเคลื่อนที่วกกลับจากทางด้านซ้ายมือไปทางด้านขวามือของระนาบเอส และเมื่อค่า K_f เท่ากับ 1000 ค่าเจาะจงเด่นจะมีเฉพาะส่วนจริงโดยไม่ปรากฏค่าในส่วนจินตภาพ แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยและเพียงพอสำหรับการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพของระบบ โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพที่ได้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและโปรแกรมสำหรับ

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพสามารถดูได้จากภาคผนวก ค. และภาคผนวก ง. ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงระบบไม่มีการสร้างเสถียรภาพตั้งแต่ช่วงเวลา 0.5 วินาทีถึง 4 วินาที เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคมีการเปลี่ยนแปลงจาก 39 V ($P_{CPL} = 152.1$ W) เป็น 42 V ($P_{CPL} = 176.4$ W) เป็นจุดการขาดเสถียรภาพของระบบในช่วงเวลาที่ 3 วินาที ถึง 4 วินาที แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรอง (v_{dc}) และกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรอง (i_{dc}) จะเกิดการสั่นไกวเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในรูปที่ 5.8 และในบทที่ 4 ที่ผ่านมามีระบบจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ และเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 ซึ่งหมายถึงระบบมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ ที่ช่วงเวลา 4 วินาที ถึง 5 วินาที จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรองและกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรอง จะมีการสั่นไกวที่ลดลงและสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ กล่าวคือค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 เป็นค่าที่น้อยและเพียงพอต่อการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า วิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมา มีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้ดังรูปที่ 5.7 โดยในลำดับถัดไปจะเป็นการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยาย K_f ที่ทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบหรือที่แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคเท่ากับ 60 V ($P_{CPL, rated} = 360$ W) ดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.4 ดังนี้



รูปที่ 5.10 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ

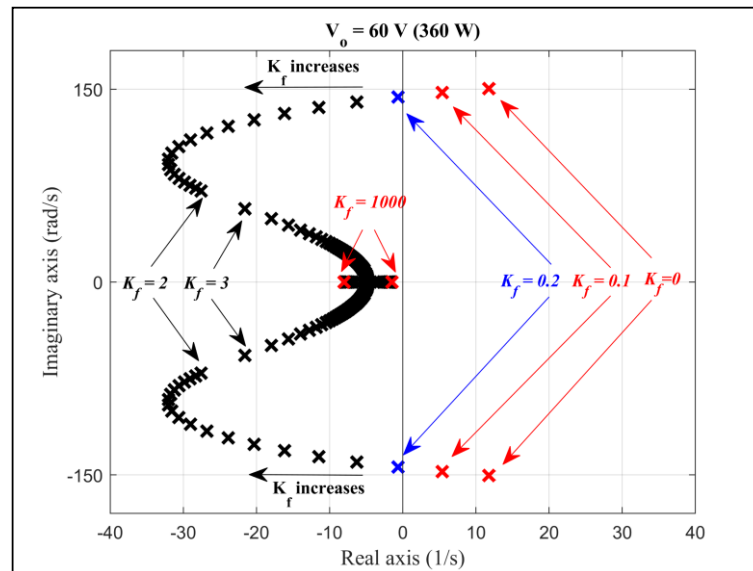


รูปที่ 5.11 การจำลองสถานการณ์บนฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ

5.2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า

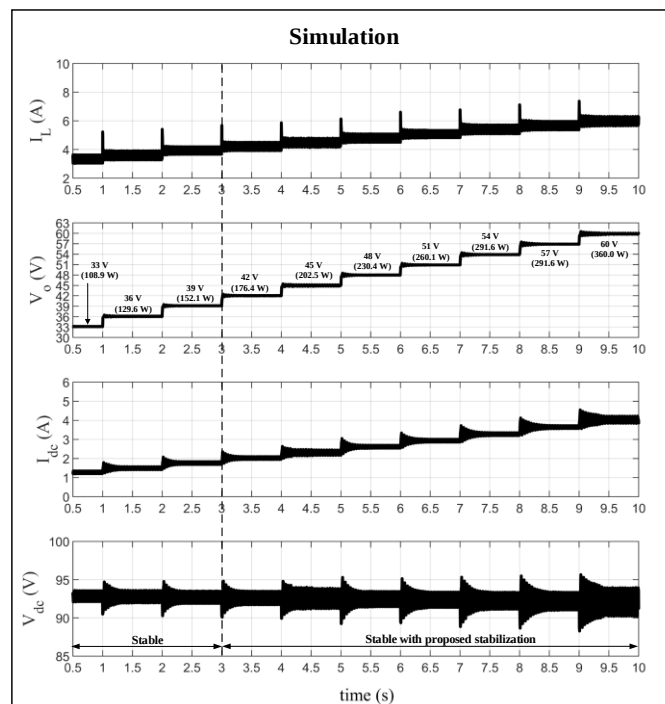
การวิเคราะห์และเลือกค่าอัตราขยาย K_f ที่น้อยและเพียงพอที่จะทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตั้งแต่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบจะดำเนินการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.2.3 กล่าวคือ จะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย K_f ตั้งแต่ 0 ถึง 1000 แสดงได้ดังในรูปที่ 5.12 โดยจากรูปสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายความว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาทำงานโดยไม่มีการสร้างเสถียรภาพส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเอส ดังนั้นระบบจะยังคงขาดเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นจะยังคงอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเอส หมายความว่า ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 นี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด แต่เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับ 0.2 ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นจะเคลื่อนที่จากทางด้านขวามือมาอยู่ทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส ซึ่งหมายความว่าระบบจะสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด ดังนั้นค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 จึงเป็นค่าที่น้อยและเพียงพอที่จะทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ สำหรับการยืนยันผล

การวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพที่อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับ

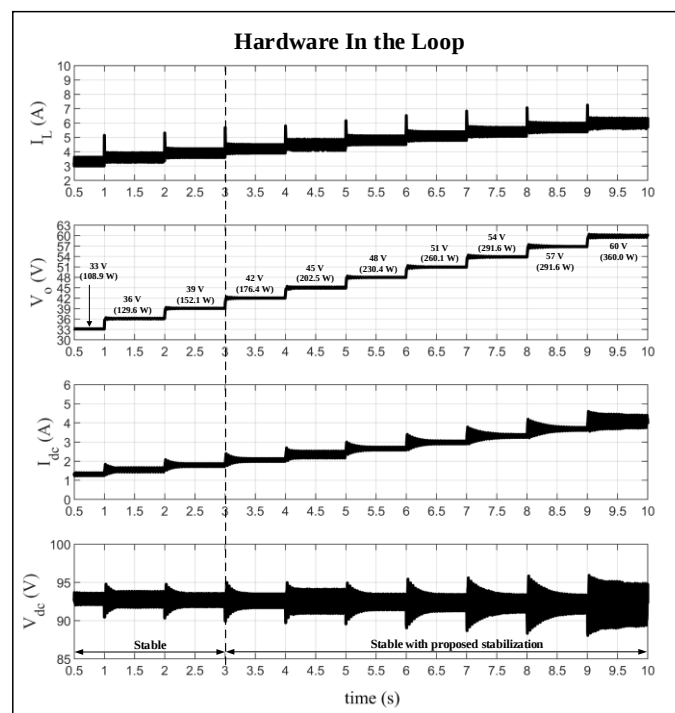


รูปที่ 5.12 เส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่จุดกำลังไฟฟ้าค่าพิกัดเมื่อ K_f มีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 จะพบว่า เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 ตั้งแต่ช่วงเวลา 0.5 วินาที ถึง 10 วินาที โดยที่แรงดันไฟฟ้าขาออกเริ่มต้นของวงจรแปลงผันแบบบัค (V_o) เท่ากับ 33 V ($P_{CPL} = 108.9$ W) ที่เวลา 0.5 วินาที และทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออกครั้งละ 3 V ทุก ๆ 1 วินาที จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ 60 V ($P_{CPL, rated} = 360$ W) ที่เวลา 9 วินาที แรงดันไฟฟ้าที่วงจรรอง (V_{dc}) และกระแสไฟฟ้าที่วงจรรอง (i_{dc}) เมื่อเกิดการกระเพื่อมจะสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้ในรูปที่ 5.12 จึงสรุปได้ว่าค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 เป็นค่าที่น้อยและเพียงพอสำหรับการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ โดยสามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยชุดเซตอุปบ่อนไปหน้าดังที่ได้นำเสนอ สามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งนอกจากจะทำให้ระบบไม่เกิดการขาดเสถียรภาพแล้วยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบได้อีกด้วย



รูปที่ 5.13 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสถานการณ์บนฮาร์ดแวร์ในรูป เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพตั้งแต่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า

5.3 สรุป

บทที่ 5 นี้เป็นการนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยได้เริ่มต้นจากการนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า พร้อมทั้งการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ เพื่อใช้ในการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ที่อาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยเลือกใช้ค่าอัตราขยาย K_f ที่น้อยและเพียงพอต่อการเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพของระบบและที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบ พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องและยืนยันผลของการสร้างเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีโดยแสดงให้เห็นว่าการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการที่นำเสนอสามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งนอกจากจะทำให้ระบบไม่เกิดการขาดเสถียรภาพแล้ว ยังสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบได้อีกด้วย ซึ่งในบทถัดไปจะเป็นการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับยืนยันผลทั้งหมดเพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและแสดงให้เห็นว่า องค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ