

## บทที่ 5

### การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กและการสร้างเสถียรภาพ เชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

#### 5.1 บทนำ

การวิเคราะห์และตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาในบทที่ 4 ที่ผ่านมา แสดงให้เห็นถึงปัญหาด้านเสถียรภาพและผลเสียที่ตามมาอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบ รวมทั้งทำให้ทราบถึงจุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามเพียงแค่การวิเคราะห์เสถียรภาพไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพก่อนค่าพิกัดกำลังไฟฟ้ากลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปได้ ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพในบทนี้จะเป็นการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว โดยเนื้อหาในส่วนแรกของบทที่ 5 จะเป็นการนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาโดยใช้เทคนิคลูปยกเล็ก เพื่อให้ระบบที่เคยขาดเสถียรภาพกลับมาทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพอีกครั้ง ซึ่งจะได้กล่าวถึงหลักการกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยเทคนิคลูปยกเล็ก การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ การวิเคราะห์เสถียรภาพในทางทฤษฎีด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง การวิเคราะห์ตัวประกอบมีส่วนร่วม และการวิเคราะห์ระนาบเฟส พร้อมทั้งการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ดังกล่าวทั้งหมด ซึ่งผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน ดังนั้นในส่วนสุดท้ายของบทนี้จึงได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นวิธีการที่ยืดหยุ่นและสามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้เป็นอย่างดี โดยจะอาศัยเพียงการเพิ่มสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณหาค่าอัตราขยายป้อนกลับที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเข้าไปในลูปยกเล็กเท่านั้น สำหรับองค์ความรู้ที่ได้จากบทที่ 5 จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อลดข้อเสียของการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งจะได้รับคำแนะนำในบทที่ 6 ต่อไป

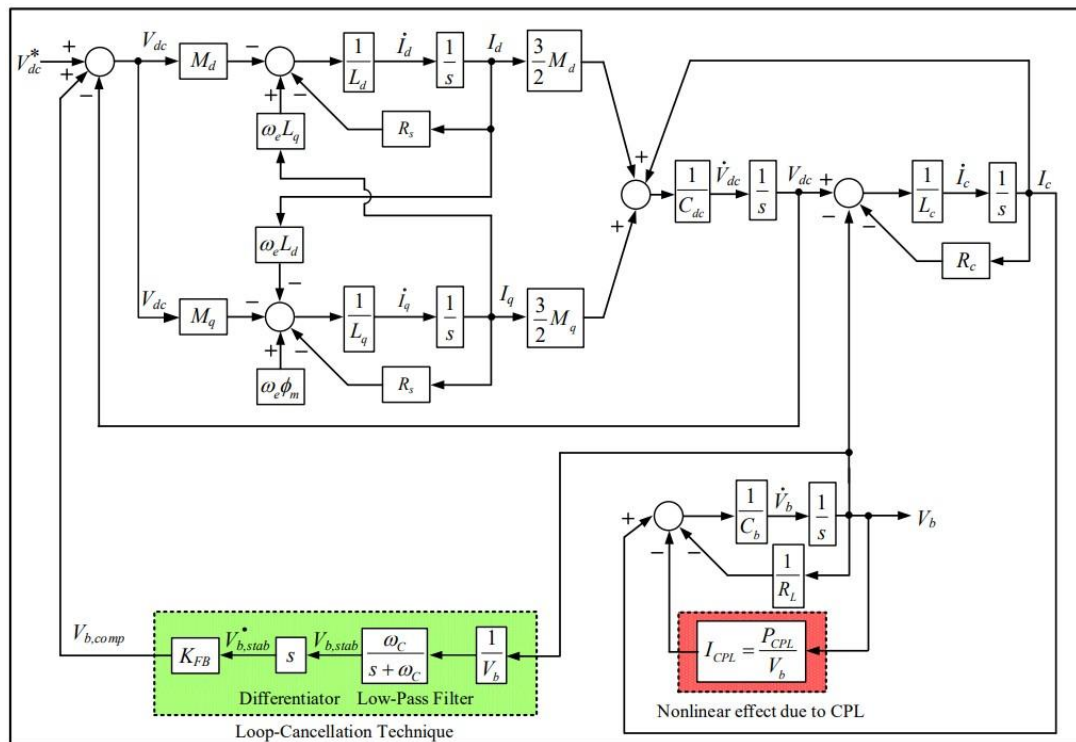
## 5.2 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษา โดยใช้เทคนิคลูปยกเล็ก

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ของบทที่ 3 จะอาศัยการชดเชยแบบแอคทีฟด้านแหล่งจ่ายด้วยเทคนิคลูปยกเล็ก ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรง จึงทำให้ระบบมีขีดความสามารถในการจ่ายระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่สูงมากขึ้น โดยหลักการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาด้วยเทคนิคลูปยกเล็กจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2.1

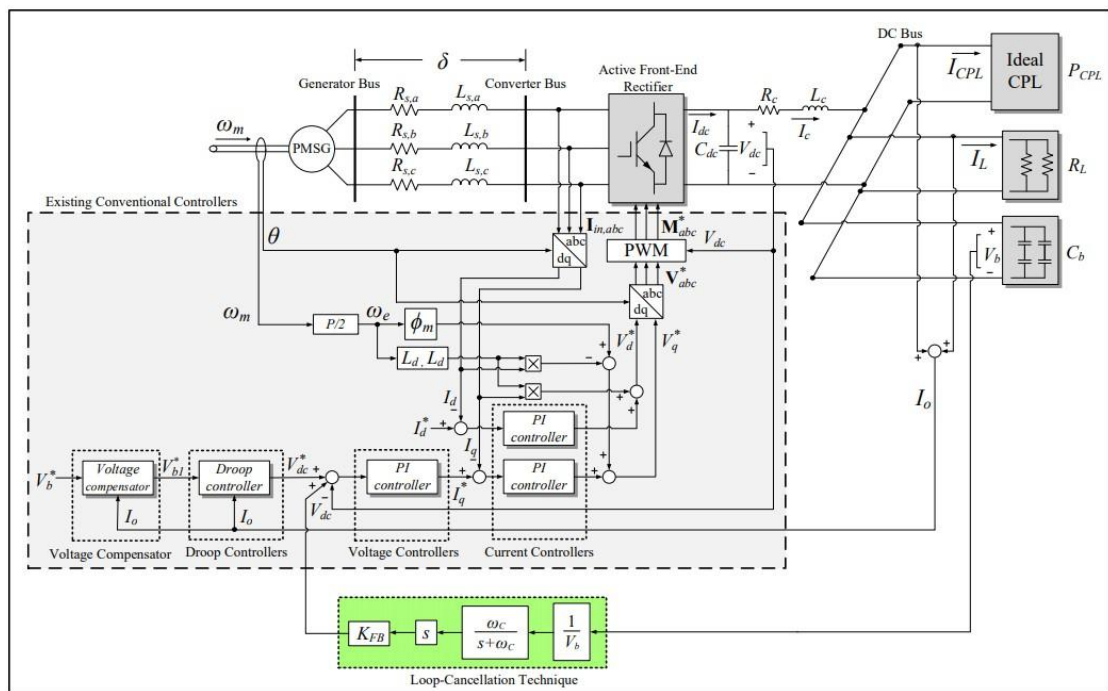
### 5.2.1 หลักการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กของระบบที่ศึกษา

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กเป็นวิธีการที่ตั้งอยู่บนแนวความคิดของการกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นในระบบด้วยการป้อนกลับแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Rahimi, A.M., Williamson, G.A., and Emadi, A., 2010) และเมื่อพิจารณาถึงประเภทของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยอ้างอิงตามองค์ความรู้ที่ได้จากการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตในบทที่ 2 จะพบว่า เทคนิคลูปยกเล็กยังเป็นการชดเชยแบบแอคทีฟอีกด้วย ดังนั้นการกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยเทคนิคดังกล่าวจึงอาศัยการแก้ไขโครงสร้างการควบคุมผ่านการสร้างสัญญาณชดเชยป้อนไปยังระบบควบคุมเพื่อชดเชยการหน่วงให้กับระบบ หรือกล่าวได้ว่าทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยรายละเอียดของหลักการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาจะอาศัยการอธิบายผ่านแผนภาพบล็อกไดอะแกรมที่แสดงได้ดังในรูปที่ 5.1 ดังนี้

จากแผนภาพในรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า พจน์ของ  $\frac{P_{CPL}}{V_b}$  ที่แสดงในกรอบพื้นที่สีแดง คือ ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นในระบบ หากดำเนินการยกเล็กพจน์ดังกล่าวได้จะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเปรียบเสมือนมีเพียงโหลดตัวต้านทาน ( $R_L$ ) และตัวเก็บประจุ ( $C_b$ ) เท่านั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือระบบจะไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพอีกต่อไป ซึ่งกระบวนการยกเล็กดังกล่าว (แสดงดังในกรอบพื้นที่สีเขียว) สามารถทำได้โดยการตรวจจับแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_b$ ) ให้อยู่ในรูปแบบผกผันผ่านตัวกรองผ่านต่ำ (Low-Pass Filter) โดยตัวกรองผ่านต่ำจะทำหน้าที่ในการลดทอนสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ จากนั้นนำแรงดันไฟฟ้าสำหรับการสร้างเสถียรภาพ ( $V_{b,stab}$ ) ที่ได้มาหาอนุพันธ์ของสัญญาณและปรับคูณกับค่าอัตราขยายป้อนกลับ ( $K_{FB}$ ) เพื่อสร้างสัญญาณชดเชย ( $V_{b,comp}$ ) ที่แสดงได้ดังสมการที่ (5-1) ป้อนไปยังลูปควบคุมแรงดันของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนดีคิวด้วยเครื่องหมายบวกซึ่งเป็น



รูปที่ 5.1 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของวงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอคทีฟที่มีเทคนิคลูปยกเลิก



รูปที่ 5.2 ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเลิก

เครื่องหมายตรงข้ามกับพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $\frac{P_{CPL}}{V_b}$  ที่มีเครื่องหมายเป็นลบเพื่อกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เมื่อนำการชดเชยด้วยเทคนิคลูบยกเล็กมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.2 จะพบว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูบยกเล็กจะอาศัยเพียงแค่การเพิ่มเซนเซอร์แรงดันไฟฟ้า (voltage sensor) สำหรับตรวจจับค่าแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง  $V_b$  เข้าไปในระบบเท่านั้น ดังนั้นจึงไม่ส่งผลทำให้กำลังงานสูญเสีย น้ำหนัก ขนาด และราคาของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามแนวคิดและหลักการของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีแบบแยกที่ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

$$V_{b,comp} = K_{FB} s \frac{\omega_C}{s + \omega_C} \cdot \left( \frac{1}{V_b} \right) \quad (5-1)$$

เมื่อ  $\omega_C$  คือ ค่าความถี่ตัดผ่าน (rad/s) ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.25 เท่าของความถี่เรโซแนนซ์ ( $\omega_r$ ) ที่สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-2)

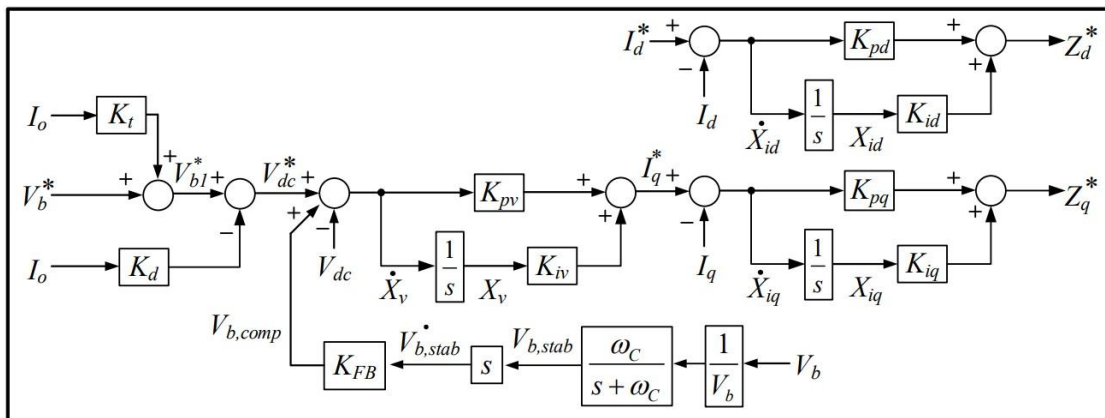
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_c C_b}} \quad (5-2)$$

จากสมการที่ (5-1) จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า  $K_{FB}$  มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้  $V_{b,comp}$  มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งหมายถึง กระบวนการกำจัดหรือชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยเทคนิคลูบยกเล็กยังไม่ทำงาน จึงทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเกิดการขาดเสถียรภาพ หากค่า  $K_{FB}$  มีค่ามากกว่า 0 จะทำให้  $V_{b,comp}$  มีอัตราการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นการออกแบบและการเลือกใช้ค่า  $K_{FB}$  จึงเป็นสิ่งที่พึงพิจารณาอย่างละเอียดและรอบคอบเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการชดเชยหรือกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยายดังกล่าวด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น การวิเคราะห์ตัวประกอบการมีส่วนร่วมซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบโมเดล และการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.3 เป็นลำดับถัดไป อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพไม่ว่าจะวิธีการใดจำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบที่มีการบรรเทาการขาด

เสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปลูกเล็ก โดยรายละเอียดของการพิสูจน์หาแบบจำลองดังกล่าวจะได้รับ การนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.2

### 5.2.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อมีการบรรเทาการขาด เสถียรภาพโดยใช้เทคนิคลูปลูกเล็ก

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาของระบบไฟฟ้ากำลัง บนเครื่องบินที่ศึกษา จะอาศัยการต่อยอดและพัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินในกรณีที่ไม่มีการควบคุมในหัวข้อที่ 3.3.1 ของบทที่ 3 เช่นเดียวกับการ พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในกรณีที่มีการควบคุมในหัวข้อที่ 3.3.4 ของ บทที่ 3 แต่จะแตกต่างกันตรงที่ได้มีการเพิ่มลูปลูกเล็กเข้าไปยังระบบควบคุมเดิมที่มีอยู่แล้วของ วงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอททีฟ โดยโครงสร้างภายในของระบบควบคุมแบบเวกเตอร์บน แกนดีคิวเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปลูกเล็ก สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 โครงสร้างภายในของระบบควบคุมเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปลูกเล็ก

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่า มีพจน์ที่อยู่ในโดเมนเอสปรากอยู่ภายในโครงสร้างของ ลูปลูกเล็ก นั่นคือ  $s \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \cdot \frac{1}{V_b}$  ซึ่งทำให้เกิดความซับซ้อนสำหรับการวิเคราะห์หาค่า  $K_{FB}$  เพื่อใช้ในการ บรรเทาการขาดเสถียรภาพผ่านแบบจำลองของระบบ ดังนั้นการกำจัดพจน์ดังกล่าวจึงมี ความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยการเพิ่มตัวแปรสถานะอีก 1 ตัวแปร นั่นคือ  $V_{b,stab}$  โดยตัวแปรสถานะนี้จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรสถานะต่าง ๆ ของระบบ แสดงดังสมการที่ (5-3)

$$V_{b,stab} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \cdot \frac{1}{V_b} \quad (5-3)$$

ดำเนินการจัดรูปสมการที่ (5-3) ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์โดยอาศัยการแปลงลาปลาซผกผัน ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการพิสูจน์ได้ดังนี้

$$\begin{cases} sV_{b,stab} + \omega_C V_{b,stab} = \frac{\omega_C}{V_b} \\ sV_{b,stab} = \frac{\omega_C}{V_b} - \omega_C V_{b,stab} \end{cases}$$

ดังนั้น สมการเชิงอนุพันธ์ของ  $V_{b,stab}$  สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-4) ดังนี้

$$\dot{V}_{b,stab} = \frac{\omega_C}{V_b} - \omega_C V_{b,stab} \quad (5-4)$$

ในลำดับถัดไปเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนดีคิวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กในรูปที่ 5.3 จะสังเกตเห็นว่า เทคนิคลูปยกเล็กจะส่งผลให้โครงสร้างของตัวควบคุมบนแกนคิวที่มีอยู่เดิมเปลี่ยนแปลงไปด้วยการป้อนสัญญาณชดเชย ( $V_{b,comp}$ ) ไปยังลู่วควบคุมแรงดันตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.1 ในขณะที่โครงสร้างของตัวควบคุมบนแกนดียังคงเหมือนเดิมดังแสดงได้ในสมการที่ (5-5) ดังนั้นจึงสามารถแสดงขั้นตอนในการพิสูจน์หาสมการของตัวควบคุมบนแกนคิวใหม่ได้ดังนี้

$$Z_d^* = -K_{pd} I_d + K_{id} X_{id} + K_{pd} I_d^* \quad (5-5)$$

$$\begin{cases} Z_q^* = -K_{pq} I_q - K_{pv} K_{pq} V_{dc} + K_{iv} K_{pq} X_v + K_{iq} X_{iq} \\ \quad + K_{pv} K_{pq} \left[ V_b^* + (K_t - K_d) I_o + K_{FB} \dot{V}_{b,stab} \right] \\ Z_q^* = -K_{pq} I_q - K_{pv} K_{pq} V_{dc} + K_{iv} K_{pq} X_v + K_{iq} X_{iq} \\ \quad + K_{pv} K_{pq} \left[ V_b^* + (K_t - K_d) \left( \frac{V_b}{R_L} + \frac{P_{CPL}}{V_b} \right) + K_{FB} \left( \frac{\omega_C}{V_b} - \omega_C V_{b,stab} \right) \right] \end{cases}$$

ซึ่งสมการของตัวควบคุมบนแกนคิวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-6)

$$\begin{aligned}
 Z_q^* = & -K_{pq}I_q - K_{pv}K_{pq}V_{dc} + K_{iv}K_{pq}X_v + K_{iq}X_{iq} + K_{pv}K_{pq}V_b^* \\
 & + \frac{K_{pv}K_{pq}(K_t - K_d)}{R_L}V_b + K_{pv}K_{pq}(K_t - K_d)\frac{P_{CPL}}{V_b} \\
 & - K_{pv}K_{pq}K_{FB}\omega_c V_{b,stab} + K_{pv}K_{pq}K_{FB}\frac{\omega_c}{V_b}
 \end{aligned} \quad (5-6)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอินพุตและเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอคทีฟบนแกนดีคิวในสมการที่ (3-2) ของบทที่ 3 และพจน์ชดเชยบนแกนดีคิวในสมการที่ (3-20) และแกนคิวในสมการที่ (3-28) ของขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 จะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอคทีฟบนแกนดีคิว ( $M_d^*$ ) และแกนคิว ( $M_q^*$ ) เมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูบยกเล็ก แสดงได้ดังสมการที่ (5-7) และ (5-8) ตามลำดับ

$$\begin{cases}
 M_d^* = \frac{V_d}{V_{dc}} \\
 M_d^* = \left( \frac{1}{V_{dc}} \right) (Z_d^* + \omega_e L_q I_q) \\
 M_d^* = \left( \frac{1}{V_{dc}} \right) (-K_{pd}I_d + K_{id}X_{id} + K_{pd}I_d^* + \omega_e L_q I_q)
 \end{cases} \quad (5-7)$$

$$\begin{cases}
 M_q^* = \frac{V_q}{V_{dc}} \\
 M_q^* = \left( \frac{1}{V_{dc}} \right) (Z_q^* - \omega_e L_d I_d + \omega_e \phi_m) \\
 M_q^* = \left( \frac{1}{V_{dc}} \right) (-K_{pq}I_q - K_{pv}K_{pq}V_{dc} + K_{iv}K_{pq}X_v + K_{iq}X_{iq} + K_{pv}K_{pq}V_b^* \\
 + \frac{K_{pv}K_{pq}(K_t - K_d)}{R_L}V_b + K_{pv}K_{pq}(K_t - K_d)\frac{P_{CPL}}{V_b} \\
 - K_{pv}K_{pq}K_{FB}\omega_c V_{b,stab} + K_{pv}K_{pq}K_{FB}\frac{\omega_c}{V_b} - \omega_e L_d I_d + \omega_e \phi_m)
 \end{cases} \quad (5-8)$$

$$\begin{cases}
\dot{I}_d = \frac{(K_{pd} - R_s)}{L_d} I_d - \frac{K_{id}}{L_d} X_{id} - \frac{K_{pd}}{L_d} I_d^* \\
\dot{I}_q = \frac{(K_{pd} - R_s)}{L_q} I_q + \frac{K_{pv} K_{pq}}{L_q} V_{dc} - \frac{K_{pv} K_{pq} (K_t - K_d)}{L_q R_L} V_b - \frac{K_{pv} K_{pq} P_{CPL} (K_t - K_d)}{L_q} \frac{1}{V_b} \\
\quad - \frac{K_{pv} K_{pq} K_{FB} \omega_c}{L_q} \frac{1}{V_b} - \frac{K_{iv} K_{pq}}{L_q} X_v - \frac{K_{iq}}{L_q} X_{iq} + \frac{K_{pv} K_{pq} K_{FB} \omega_c}{L_q} V_{b,stab} - \frac{K_{pv} K_{pq}}{L_q} V_b^* \\
\dot{V}_{dc} = \frac{3}{2C_{dc}} \frac{1}{V_{dc}} \left[ K_{pd} I_d^2 + K_{id} I_d X_{id} + K_{pd} I_d I_d^* - K_{pq} I_q^2 + \omega_e \phi_m I_q - K_{pv} K_{pq} I_q V_{dc} \right. \\
\quad + \frac{K_{pv} K_{pq} (K_t - K_d)}{R_L} I_q V_b + \frac{K_{pv} K_{pq} P_{CPL} (K_t - K_d)}{L_q} \frac{I_q}{V_b} \\
\quad + K_{pv} K_{pq} K_{FB} \omega_c \frac{I_q}{V_b} + K_{iv} K_{pq} I_q X_v + K_{iq} I_q X_{iq} - K_{pv} K_{pq} K_{FB} \omega_c I_q V_{b,stab} \\
\quad \left. + K_{pv} K_{pq} I_q V_b^* \right] - \frac{1}{C_{dc}} I_c \\
\dot{I}_c = \frac{1}{L_c} V_{dc} - \frac{R_c}{L_c} I_c - \frac{1}{L_c} V_b \\
\dot{V}_b = \frac{1}{C_b} I_c - \frac{1}{R_L C_b} V_b - \frac{P_{CPL}}{C_b} \frac{1}{V_b} \\
\dot{X}_v = -V_{dc} + \frac{(K_t - K_d)}{R_L} V_b + (K_t - K_d) P_{CPL} \frac{1}{V_b} + K_{FB} \omega_c \frac{1}{V_b} - K_{FB} \omega_c V_{b,stab} + V_b^* \\
\dot{X}_{id} = -I_d + I_d^* \\
\dot{X}_{iq} = -I_q - K_{pv} V_{dc} + \frac{K_{pv} (K_t - K_d)}{R_L} V_b + K_{pv} (K_t - K_d) P_{CPL} \frac{1}{V_b} + K_{pv} K_{FB} \omega_c \frac{1}{V_b} \\
\quad - K_{pv} K_{FB} \omega_c V_{b,stab} + K_{iv} X_v + K_{pv} V_b^* \\
\dot{V}_{b,stab} = \frac{\omega_c}{V_b} - \omega_c V_{b,stab}
\end{cases} \quad (5-9)$$

จากการกำจัดผลของพจน์ที่อยู่ในโดเมนเอสในสมการที่ (5-4) และการแทนค่า  $M_d$  และ  $M_q$  ในสมการที่ (3-14) ของแบบจำลองของระบบในกรณีที่ไม่มีการควบคุมในบทที่ 3 ด้วย  $M_d^*$  และ  $M_q^*$  ที่ได้จากสมการที่ (5-7) และ (5-8) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูบยกเล็ก แสดงได้ดังสมการที่ (5-9) โดยสมการที่ (5-9) จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟสในหัวข้อที่ 5.3 ต่อไป อย่างไรก็ตามงานวิจัยวิทยานิพนธ์ยังได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีการบรรเทาการขาด

เสถียรภาพอีกหนึ่งวิธีการ นั่นคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการเปลี่ยนแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-9) ให้เป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทดังกล่าว โดยรายละเอียดของการทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2.3

### 5.2.3 การทำให้เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากสมการที่ (5-9) จะสังเกตได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะปรากฏพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการเชิงอนุพันธ์ของ  $\dot{I}_q$ ,  $\dot{V}_{dc}$ ,  $\dot{V}_b$ ,  $\dot{X}_v$ ,  $\dot{X}_{iq}$  และ  $\dot{V}_{b,stab}$  ซึ่งการวิเคราะห์หาค่า  $K_{FB}$  ที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่งมาใช้ในการเปลี่ยนแบบจำลองดังกล่าวให้เป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น โดยสมการในรูปแบบทั่วไปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-10)

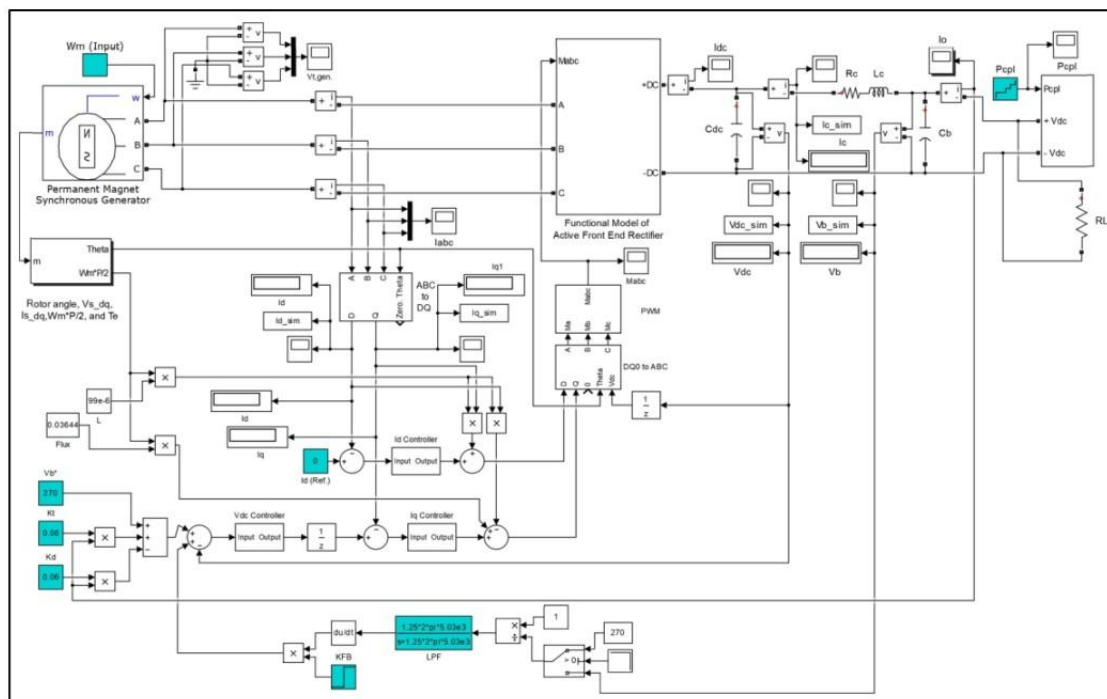
$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (5-10)$$

โดยที่  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  และ  $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  คือ เมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรสถานะ  $\mathbf{x}_0$  และค่าของตัวแปรอินพุต  $\mathbf{u}_0$  ณ จุดปฏิบัติงานที่พิจารณา โดยจุดปฏิบัติงานดังกล่าวคำนวณได้จาก  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$  สำหรับรายละเอียดของ  $\delta \mathbf{x}$ ,  $\delta \mathbf{u}$ ,  $\delta \mathbf{y}$ ,  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  และ  $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ในสมการที่ (5-10) สามารถดูได้จากภาคผนวก ค.

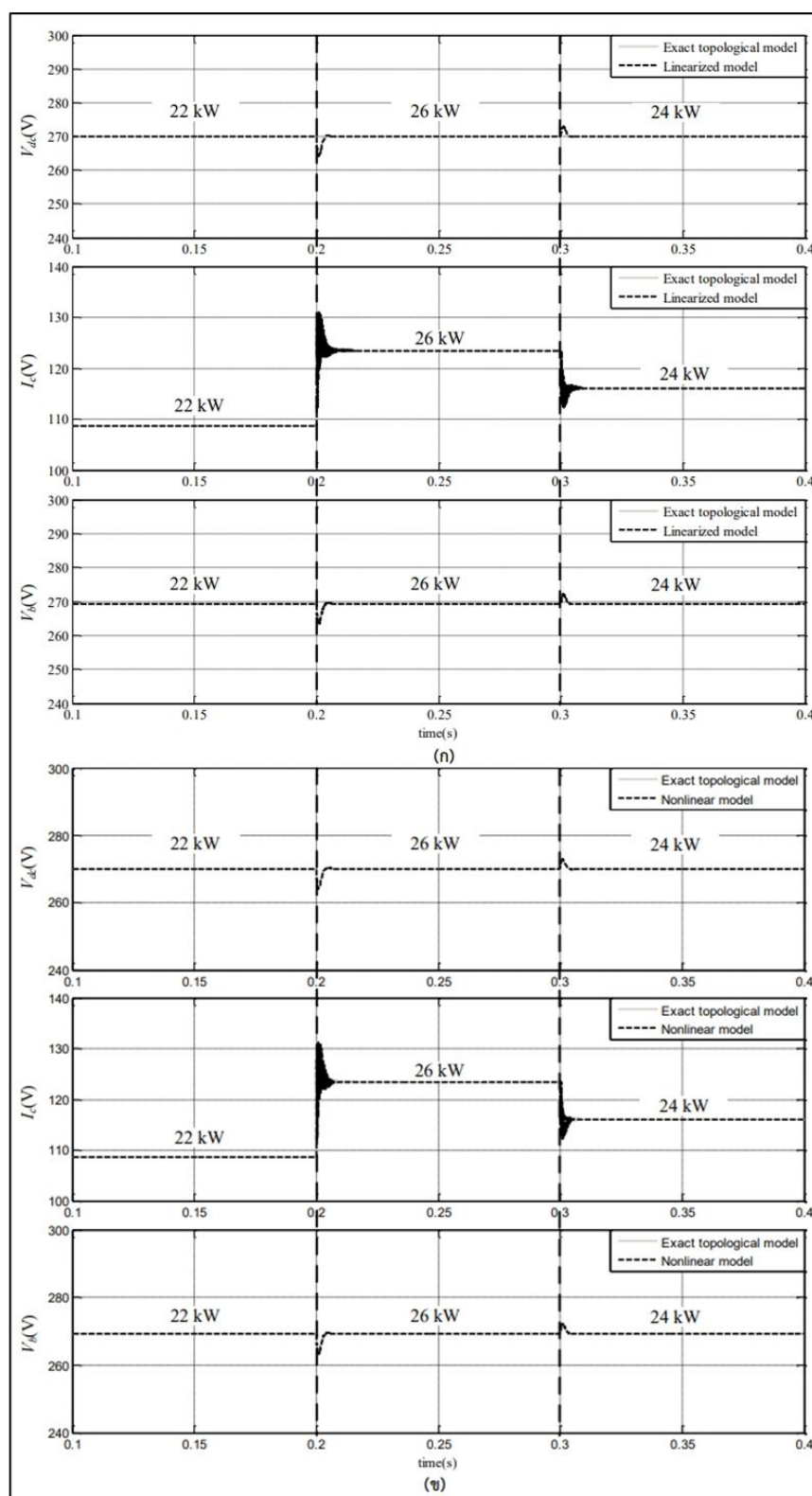
จากเมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  และ  $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  จะเห็นได้ว่า เมตริกซ์ดังกล่าวจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า  $I_{d,0}$ ,  $I_{q,0}$ ,  $V_{dc,0}$ ,  $V_{b,0}$ ,  $X_{v,0}$ ,  $X_{id,0}$ ,  $X_{iq,0}$  และ  $V_{b,stab,0}$  ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าในสถานะอยู่ตัว ณ จุดปฏิบัติงานที่พิจารณา ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากการกำหนดให้  $\dot{I}_d$ ,  $\dot{I}_q$ ,  $\dot{V}_{dc}$ ,  $\dot{V}_b$ ,  $\dot{X}_v$ ,  $\dot{X}_{id}$ ,  $\dot{X}_{iq}$  และ  $\dot{V}_{b,stab}$  ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในสมการที่ (5-9) มีค่าเป็นศูนย์

### 5.2.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคคุปยกเล็กจะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-9) และแบบจำลองที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-10) ซึ่งได้มาจากการหาผลเฉลยของสมการด้วยฟังก์ชัน ode45 และ lsim ของ MATLAB กับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.2 ด้วยชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB ที่แสดงในรูปที่ 5.4 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ โดยจะกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาเป็นดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 ซึ่งจะมีส่วนที่พิจารณาเพิ่มเติมคือ ค่าความถี่ตัดผ่าน ( $\omega_c$ ) ของตัวกรองผ่านต่ำซึ่งออกแบบให้มีค่าเท่ากับ 39505.53 rad/s โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 ชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคคุปยกเล็ก



รูปที่ 5.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านผลตอบสนอง  $V_{dc}$ ,  $I_c$  และ  $V_b$  เมื่อ  $K_{FB}=1$   
 (ก) แบบจำลองที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้น (ข) แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น

รูปที่ 5.5 (ก) และรูปที่ 5.5 (ข) แสดงผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นและแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ตามลำดับ ผ่านการเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการจำลองสถานการณ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_{dc}$ ) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า ( $I_c$ ) และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุหรือแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_b$ ) โดยได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงค่าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) จาก 22 kW ไปเป็น 26 kW และจาก 26 kW ไปเป็น 24 kW ที่เวลา 0.2 วินาที และ 0.3 วินาที ตามลำดับ ในขณะที่ค่า  $K_{FB}$  มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ตลอดช่วงการทำงาน

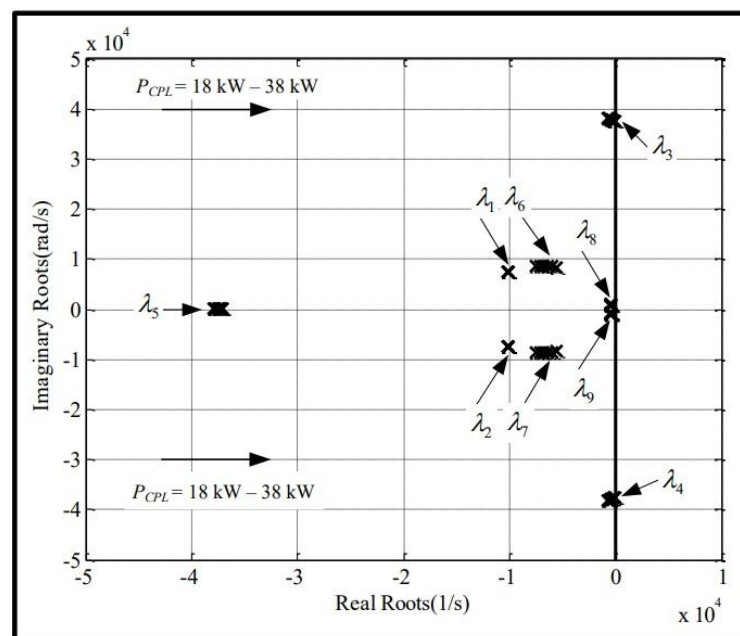
จากรูปที่ 5.5 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นและถูกทำให้เป็นเชิงเส้นมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB ทั้งเงื่อนไขการทำงานในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นจึงถือได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์หาค่า  $K_{FB}$  ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อไปได้เมื่อประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยรายละเอียดการวิเคราะห์ดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.3

### 5.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้เทคนิคคุยกเล็ก

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคคุยกเล็กจำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์หาและเลือกใช้อัตราขยาย  $K_{FB}$  ที่มีความเหมาะสมและเพียงพอต่อการชดเชยหรือกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพื่อทำให้ระบบที่เคยขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปได้ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะดำเนินการวิเคราะห์หาและออกแบบค่าอัตราขยายดังกล่าวโดยอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบเอสด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง การวิเคราะห์ตัวประกอบมีส่วนร่วม และการวิเคราะห์เสถียรภาพบนปริภูมิสถานะของตัวแปรสถานะด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟส ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคคุยกเล็กซึ่งได้รับการพิสูจน์จากวิธีคิดในหัวข้อที่ 5.2 โดยเนื้อหาและรายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.3.1 ถึงหัวข้อที่ 5.3.3 ดังนี้

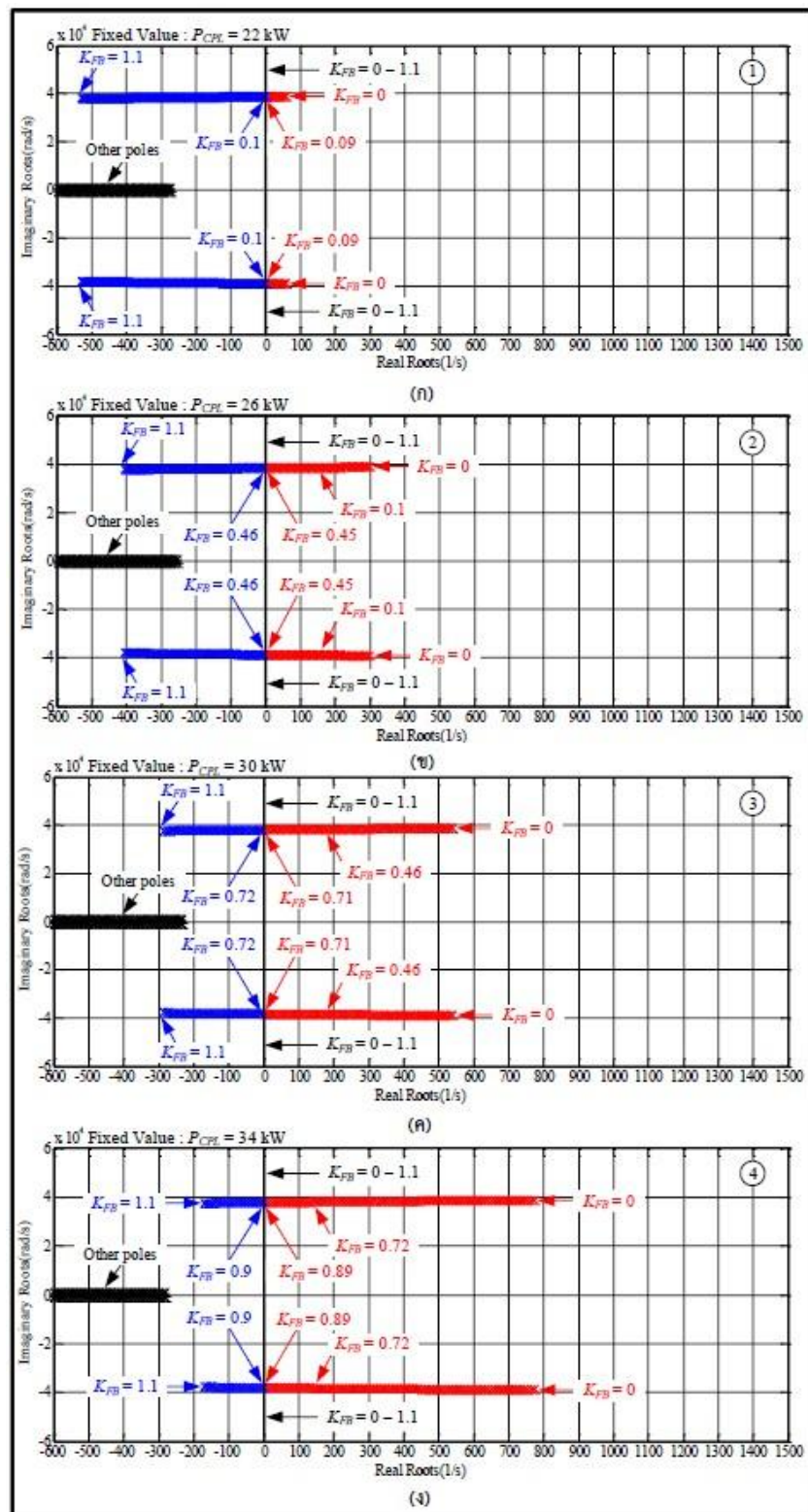
### 5.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วย ทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาในกรณีที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคคูปยกละในรูปที่ 5.2 ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง จะอาศัยการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่และตำแหน่งของค่าเจาะจงของระบบทั้ง 9 ค่า ( $\lambda_1 - \lambda_9$ ) ที่แสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ของสมการที่ (5-10) และการหาค่าในสภาวะอยู่ตัว ในขณะที่ระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 18 kW ไปจนถึง 38 kW (ค่าพิกัดของระบบ) เพื่อพิจารณาหาค่าเจาะจงเด่นที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบสำหรับนำมาใช้ในการออกแบบค่าอัตราขยาย  $K_{FB}$  ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพภายใต้พิกัดของระบบ



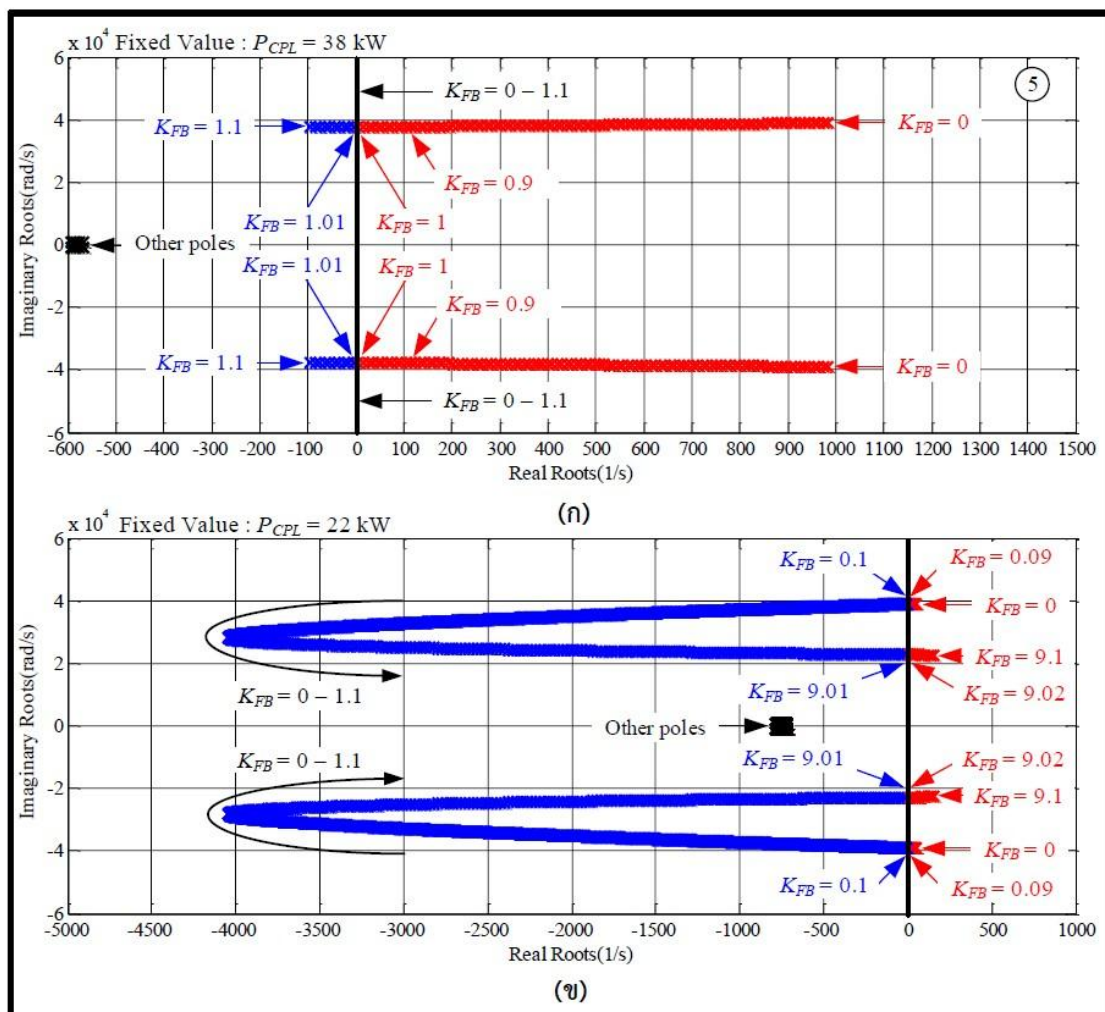
รูปที่ 5.6 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

จากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่า ค่าเจาะจงของระบบจะมีอยู่ด้วยกัน 9 ค่า ซึ่งก็คือ  $\lambda_1 - \lambda_9$  ตามจำนวนตัวแปรสถานะของระบบ สำหรับการออกแบบค่า  $K_{FB}$  ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้งจะอาศัยเพียงการพิจารณาเฉพาะค่าเจาะจงเด่น ( $\lambda_3$  และ  $\lambda_4$ ) เท่านั้น โดยเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นดังกล่าวเมื่อค่า  $K_{FB}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ไปจนถึง 1.1 โดยที่กำหนดให้  $P_{CPL}$  มีค่าเท่ากับ 22 kW 26 kW 30 kW 34 kW และ 38 kW สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 (ก) 5.7 (ข) 5.7 (ค) 5.7 (ง) และ 5.8 (ก) ตามลำดับ และเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นเมื่อ  $K_{FB}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ไปจนถึง 9.1 ในขณะที่  $P_{CPL}$  มีค่าคงที่เท่ากับ 22 kW สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 (ข)



รูปที่ 5.7 ค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

(ก)  $K_{FB} = 0.1$  (ข)  $K_{FB} = 0.46$  (ค)  $K_{FB} = 0.72$  (ง)  $K_{FB} = 0.9$



รูปที่ 5.8 ค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (ต่อ)

(ก)  $K_{FB} = 1.01$  (ข)  $K_{FB} = 9.02$

จากรูปที่ 5.7 (ก) ได้กำหนดให้ค่า  $K_{FB}$  มีค่าเท่ากับ 0 นั้นหมายถึง ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษายังไม่ได้รับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กจึงทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ณ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 22 kW ซึ่งตรงกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในหัวข้อที่ 4.2.2 ของบทที่ 4 แต่เมื่อค่า  $K_{FB}$  มีค่าเท่ากับ 0.1 หรือกล่าวได้ว่า ลูปยกเล็กเริ่มทำงาน จะทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบ ณ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 22 kW เคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมาอยู่ทางฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึง การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กสามารถทำให้ระบบที่เคยขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปได้เพียงการเพิ่มค่า  $K_{FB}$  จาก 0 มาเป็น 0.1 เท่านั้น อย่างไรก็ตาม หากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น

มากกว่า 22 kW ดังเช่นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 26 kW ในขณะที่  $K_{FB}$  ยังคงมีค่าเท่าเดิมคือ 0.1 ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาจะกลับมาขาดเสถียรภาพอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $K_{FB}$  ดังกล่าวไม่เพียงพอต่อการกำจัดหรือชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ณ จุดปฏิบัติงานดังกล่าว ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 5.7 (ข) ที่ค่าเจาะจงเด่นของระบบ ณ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 26 kW ยังคงอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอสเมื่อ  $K_{FB}$  มีค่าเท่ากับ 0.1 ดังนั้นเพื่อทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวามาอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอสอีกครั้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษามีเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 26 kW ค่า  $K_{FB}$  จะต้องมีการเพิ่มขึ้นเป็น 0.46 ดังแสดงในรูปที่ 5.7 (ข) ในลักษณะเดียวกันกับที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 30 kW 34 kW และ 38 kW ค่า  $K_{FB}$  จะต้องมีการเพิ่มเป็น 0.72 0.9 และ 1.01 ดังแสดงในรูปที่ 5.7 (ค) 5.7 (ง) และ 5.8 (ก) ตามลำดับ มิฉะนั้นระบบจะไม่สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.8 (ข) จะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของค่า  $K_{FB}$  จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 9.02 จะทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบ ณ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 22 kW จากเดิมที่อยู่ฝั่งซ้ายของระนาบเอสเมื่อ  $K_{FB}$  เท่ากับ 0.1 จะเปลี่ยนไปอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส นั่นหมายถึง ระบบที่มีเสถียรภาพหลังจากการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยค่า  $K_{FB}$  ที่น้อยและเพียงพอจะกลับมาขาดเสถียรภาพอีกครั้งหากค่า  $K_{FB}$  มากเกินไป สำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพข้างต้นจะอาศัยทั้งการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.4 ต่อไป

### 5.3.2 การวิเคราะห์ตัวประกอบมีส่วนร่วมของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

การวิเคราะห์ตัวประกอบมีส่วนร่วมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาและมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูบยกเล็กในรูปที่ 5.2 จะดำเนินการตามหลักการและขั้นตอนในการวิเคราะห์หาตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อค่าเจาะจงเด่นของระบบเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3 ของบทที่ 4 โดยจะพิจารณาทั้งหมด 7 กรณีดังแสดงได้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่ได้นำเสนอในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ของหัวข้อที่ 5.3.1 โดยเมตริกซ์ตัวประกอบมีส่วนร่วมของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูบยกเล็กสำหรับกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 7 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 ถึง 5.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ค่า  $P_{CPL}$  และ  $K_{FB}$  สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็ก

| กรณี | $P_{CPL}$                           | $K_{FB}$ |
|------|-------------------------------------|----------|
| 1    | 22 kW (จุดขาดเสถียรภาพ)             | 0        |
| 2    | 22 kW                               | 0.1      |
| 3    | 26 kW                               | 0.46     |
| 4    | 30 kW                               | 0.72     |
| 5    | 34 kW                               | 0.9      |
| 6    | 38 kW (พิกัดของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว) | 1.01     |
| 7    | 22 kW                               | 9.02     |

ตารางที่ 5.2 เมตริกซ์ตัวประกอบมีส่วนร่วมเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 0$  (กรณีที่ 1)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII          | Eig. IX            |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|--------------------|--------------------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0                  | 0                  |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$           | $\vdots$           |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.4895                     | 0.4895   | ...      | $7 \times 10^{-4}$ | $7 \times 10^{-4}$ |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3209                     | 0.3209   | ...      | 0.3128             | 0.3128             |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$           | $\vdots$           |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0020                     | 0.0020   | ...      | 0.0014             | 0.0014             |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V             |                    |

ตารางที่ 5.3 เมตริกซ์ตัวประกอบการมีส่วนร่วมเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 0.1$   
(กรณีที่ 2)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII            | Eig. IX              |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0                    | 0                    |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.4907                     | 0.4907   | ...      | $6.6 \times 10^{-4}$ | $6.6 \times 10^{-4}$ |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3209                     | 0.3209   | ...      | 0.3119               | 0.3119               |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0020                     | 0.0020   | ...      | 0.0014               | 0.0014               |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V               |                      |

ตารางที่ 5.4 เมตริกซ์ตัวประกอบการมีส่วนร่วมเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 0.46$   
(กรณีที่ 3)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII            | Eig. IX              |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0                    | 0                    |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.4960                     | 0.4960   | ...      | $8.0 \times 10^{-4}$ | $8.0 \times 10^{-4}$ |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3211                     | 0.3211   | ...      | 0.3252               | 0.3252               |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0112                     | 0.0112   | ...      | 0.0070               | 0.0070               |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V               |                      |

ตารางที่ 5.5 เมตริกซ์ตัวประกอบการมีส่วนร่วมเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 0.72$   
(กรณีี่ที่ 4)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII            | Eig. IX              |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0                    | 0                    |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.5016                     | 0.5016   | ...      | $9.8 \times 10^{-4}$ | $9.8 \times 10^{-4}$ |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3221                     | 0.3221   | ...      | 0.3406               | 0.3406               |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0205                     | 0.0205   | ...      | 0.0118               | 0.0118               |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V               |                      |

ตารางที่ 5.6 เมตริกซ์ตัวประกอบการมีส่วนร่วมเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 0.9$   
(กรณีี่ที่ 5)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII | Eig. IX  |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|-----------|----------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0         | 0        |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$  | $\vdots$ |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.5072                     | 0.5072   | ...      | 0.0012    | 0.0012   |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3240                     | 0.3240   | ...      | 0.3584    | 0.3584   |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$  | $\vdots$ |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0296                     | 0.0296   | ...      | 0.0160    | 0.0160   |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V    |          |

ตารางที่ 5.7 เมตริกซ์ตัวประกอบมีส่วนร่วมเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 1.01$  (กรณีที่ 6)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII | Eig. IX  |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|-----------|----------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0         | 0        |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$  | $\vdots$ |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.5125                     | 0.5125   | ...      | 0.0014    | 0.0014   |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3266                     | 0.3266   | ...      | 0.3792    | 0.3792   |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$  | $\vdots$ |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0378                     | 0.0378   | ...      | 0.0196    | 0.0196   |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V    |          |

ตารางที่ 5.8 เมตริกซ์ตัวประกอบมีส่วนร่วมเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 9.02$  (กรณีที่ 7)

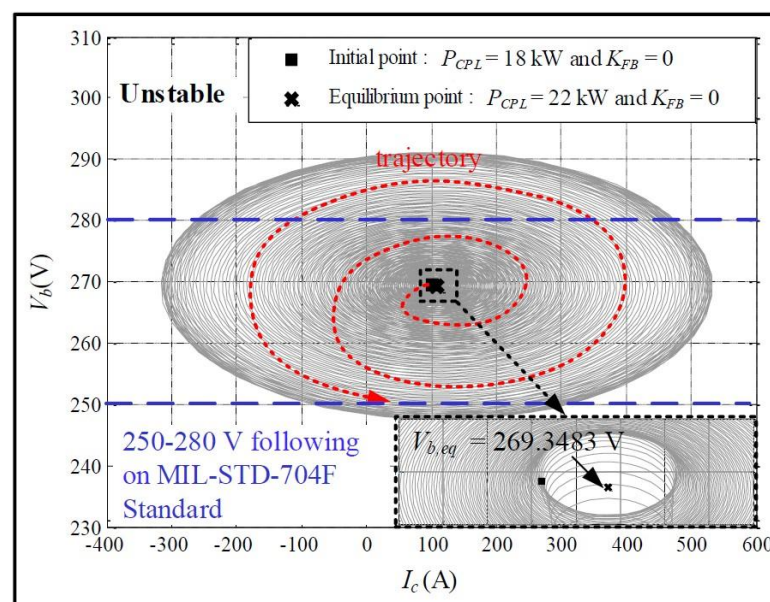
|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII            | Eig. IX              |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0                    | 0                    |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.6446                     | 0.6446   | ...      | $5.1 \times 10^{-4}$ | $5.1 \times 10^{-4}$ |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.6324                     | 0.6324   | ...      | 0.2497               | 0.2497               |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 1.0208                     | 1.0208   | ...      | 0.0987               | 0.0987               |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V               |                      |

จากตารางที่ 5.2 ถึง 5.8 จะเห็นได้ว่า ตัวแปรสถานะ  $I_c$  และ  $V_b$  จะมีอิทธิพลมากที่สุดเสมอ โดยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ตัวแปรสถานะ  $I_c$  และ  $V_b$  มีความเกี่ยวข้องกับค่าเจาะจงเด่น

ของระบบนั้นคือ  $\lambda_3$  และ  $\lambda_4$  ที่แสดงในรูปที่ 5.6 โดยตรง เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ตัวประกอบมีส่วนร่วมในหัวข้อที่ 4.2.3 ของบทที่ 4 ที่ผ่านมา โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวประกอบมีส่วนร่วมดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้ในการระบุตัวแปรสถานะสำหรับการสร้างระนาบเฟสของการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งจะได้รับคำแนะนำในหัวข้อที่ 5.3.3 เป็นลำดับถัดไป

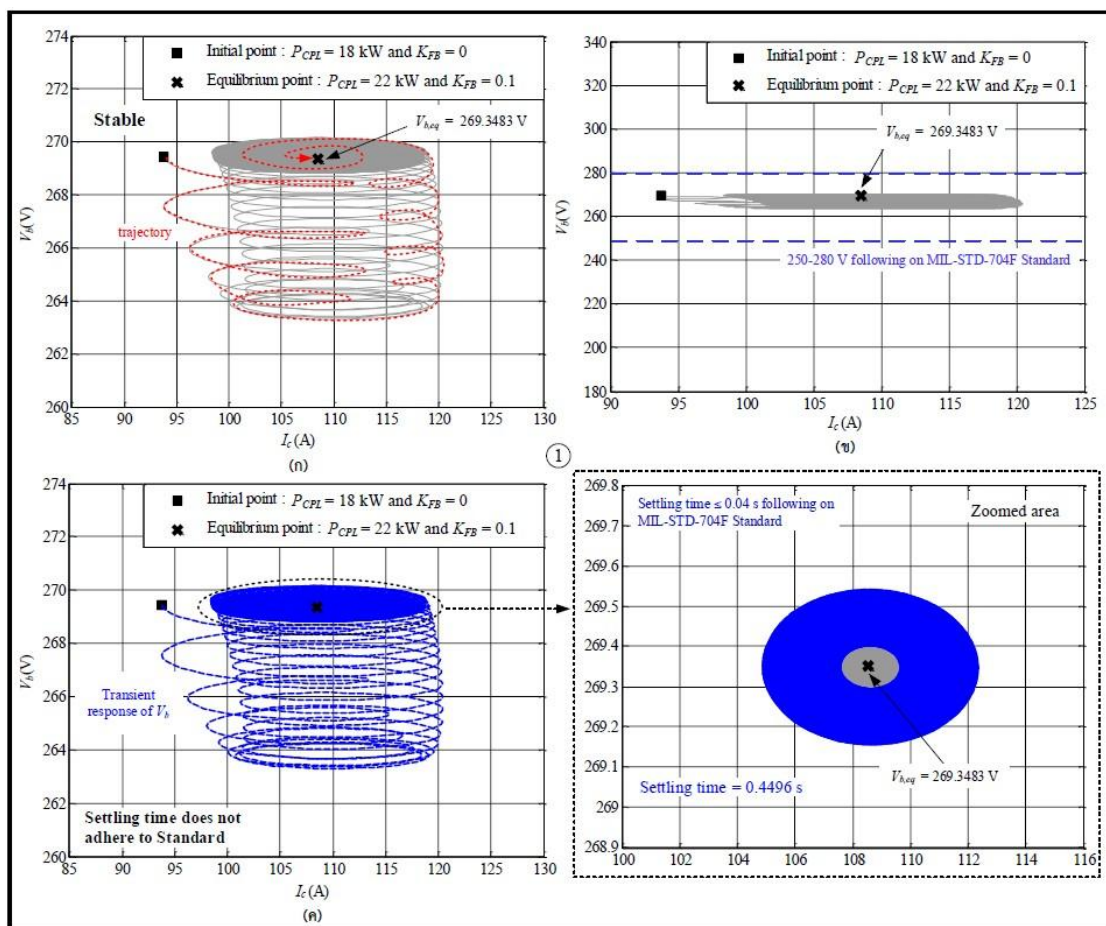
### 5.3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟส

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาในกรณีที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปลอกเล็กในรูปที่ 5.2 บนระนาบของตัวแปรสถานะ  $I_c$  และ  $V_b$  ด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟสเพื่อออกแบบค่าอัตราขยาย  $K_{FB}$  ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อไปได้ พร้อมทั้งตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_b$ ) ตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ในขณะเดียวกัน จะอาศัยหลักการและขั้นตอนเดียวกันกับการวิเคราะห์หาจุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในกรณีที่ไม่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในหัวข้อที่ 4.2.4 เกิดการขาดเสถียรภาพ นั่นคือ การวิเคราะห์การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบเฟส ในขณะที่ระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 22 kW ไปจนถึง 38 kW (ค่าพิกัดของระบบ) โดยการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์สำหรับกรณีที่ 1 ถึง 7 (ที่แสดงในตารางที่ 5.1) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.15 ตามลำดับ



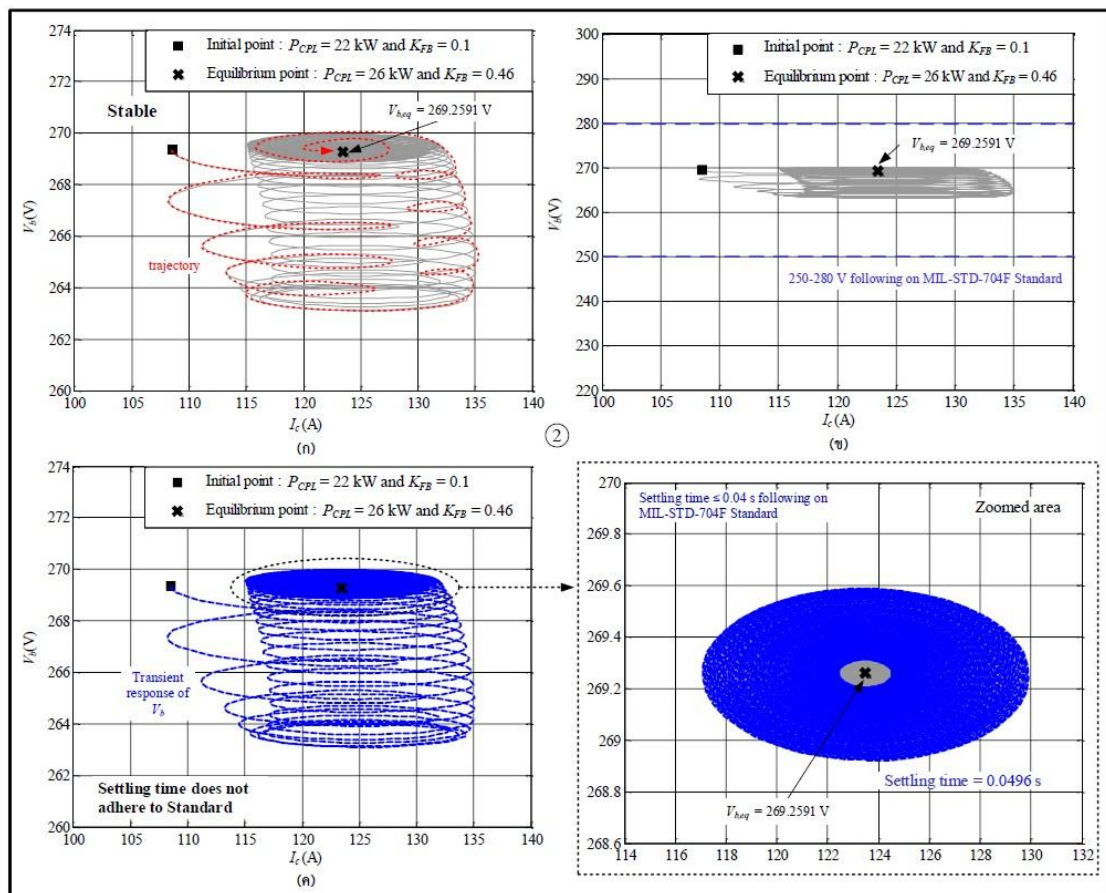
รูปที่ 5.9 การวิเคราะห์ระนาบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 22$  kW และ  $K_{FB} = 0$  (กรณีที่ 1)

จากรูปที่ 5.9 ได้กำหนดให้ค่า  $K_{FB}$  มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งหมายถึง ลูปยกเลิกยังไม่ทำงาน ณ จุดปฏิบัติงานนี้ ซึ่งสังเกตได้ว่า การโคจรของค่าตอบสนองการอนุพันธ์ของระบบเมื่อ  $P_{CPL}$  เท่ากับ 22 kW จะค่อย ๆ ออกจากจุดปฏิบัติงานของระบบมากยิ่งขึ้นอย่างไม่สิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป (ดูได้จากเส้นปะสีแดง) ดังนั้น ณ จุดปฏิบัติงานนี้ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในรูปที่ 5.7 (ก) นอกจากนี้ยังเห็นอีกว่า แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าเกิน 250 V ถึง 280 V ซึ่งไม่ตรงตามที่มาตรฐาน MIL-STD-704F ระบุไว้ (ดูได้จากเส้นปะสีน้ำเงิน) ดังนั้นเพื่อบรรเทาปัญหาการขาดเสถียรภาพที่ระดับ  $P_{CPL}$  เท่ากับ 22 kW จึงได้สั่งการให้ลูปยกเลิกเริ่มทำงานด้วยค่า  $K_{FB}$  มีค่าเท่ากับ 0.1 ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.10 ดังนี้



รูปที่ 5.10 การวิเคราะห์ระบบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 22$  kW และ  $K_{FB} = 0.1$  (กรณีที่ 2) (ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$  (ค) สำหรับพิจารณา  $T_s$

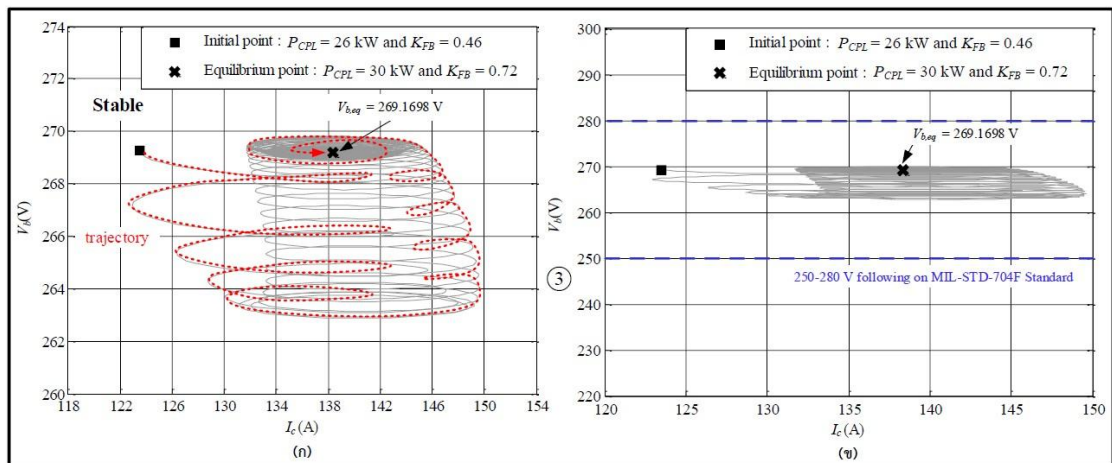
จากรูปที่ 5.10 จะเห็นได้ว่า เมื่อ  $K_{FB}$  มีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยและเพียงพอต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะทำให้การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบเมื่อ  $P_{CPL}$  เท่ากับ 22 kW ที่แสดงดังในรูปที่ 5.10 (ก) เคลื่อนที่รอบ ๆ จุดปฏิบัติงานและเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาจากที่เคยขาดเสถียรภาพจะกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้งหนึ่ง และเมื่อพิจารณาถึงแอมพลิจูดของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_b$ ) และช่วงเวลาเข้าที่ (settling time :  $T_s$ ) ของ  $V_b$  ที่แสดงในรูปที่ 5.10 (ข) และ 5.10 (ค) ตามลำดับ จะพบว่า แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง  $V_b$  จะมีค่าอยู่ในช่วง 250 V ถึง 280 V ตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ในส่วนของช่วงเวลาเข้าที่ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในสถานะชั่วครู่ดังแสดงในเส้นสีน้ำเงินจะมีค่าเท่ากับ 0.4496 วินาที ซึ่งเกินช่วงเวลาเข้าที่ตามที่มาตรฐานกำหนดไว้นั้นคือ 0.04 วินาที อย่างไรก็ตาม หากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 22 kW ยกตัวอย่างเช่นมีค่าเป็น 26 kW ค่าอัตราขยาย  $K_{FB}$  ของระบบก็ควรมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการกำจัดหรือชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในที่นี้  $K_{FB}$  จะมีค่าเป็น 0.46 ดังแสดงในรูปที่ 5.11



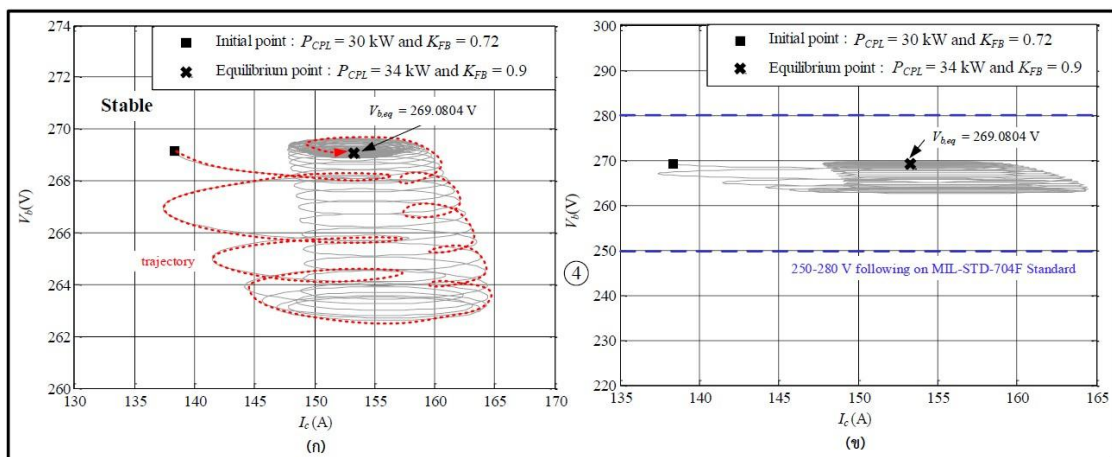
รูปที่ 5.11 การวิเคราะห์ระบบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 26$  kW และ  $K_{FB} = 0.46$  (กรณีที่ 3) (ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$  (ค) สำหรับพิจารณา  $T_s$

จากการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เมื่อ  $P_{CPL}$  เท่ากับ 26 kW ในรูปที่ 5.11 (ก) ที่มีการเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบเมื่อเวลาผ่านไป แสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราขยาย  $K_{FB}$  เท่ากับ 0.46 สามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษารักษาเสถียรภาพ ณ จุดปฏิบัติงานนี้ได้ นอกจากนี้ในรูปที่ 5.11 (ข) ยังแสดงให้เห็นอีกว่า แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_b$ ) อยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 250 V ถึง 280 V ในขณะที่รูปที่ 5.11 (ค) แสดงให้เห็นว่า ช่วงเวลาเข้าที่จะไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐานที่ระบุไว้ นั่นคือ มีค่าเกิน 0.04 วินาที

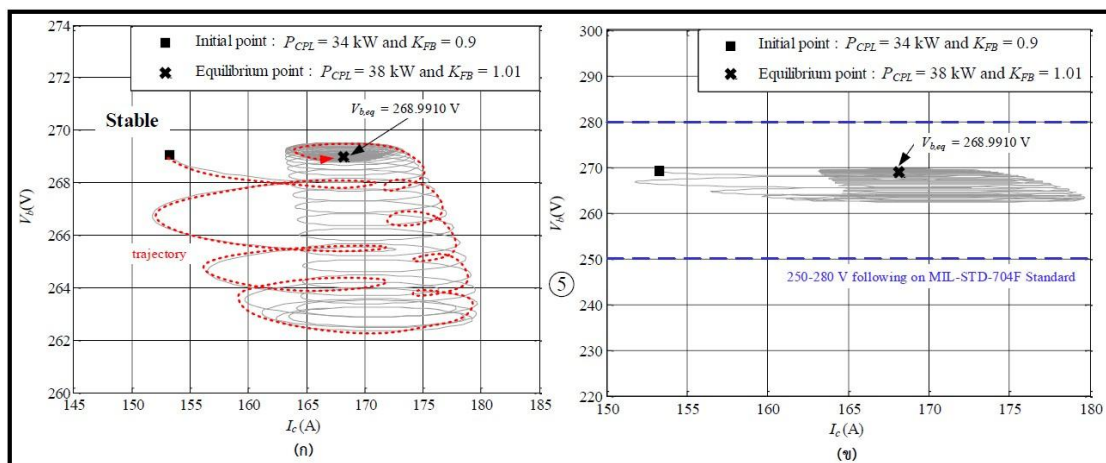
โดยการเพิ่มขึ้นของค่า  $K_{FB}$  สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นเป็นข้อสรุปเดียวกันกับที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 30 kW 34 kW และ 38 kW นั่นคือ ค่า  $K_{FB}$  จะต้องมีค่าเพิ่มเป็น 0.72 0.9 และ 1.01 ดังแสดงในรูปที่ 5.12 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 การวิเคราะห์ระนาบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 30$  kW และ  $K_{FB} = 0.72$  (กรณีที่ 4) (ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$  (ค) สำหรับพิจารณา  $T_s$

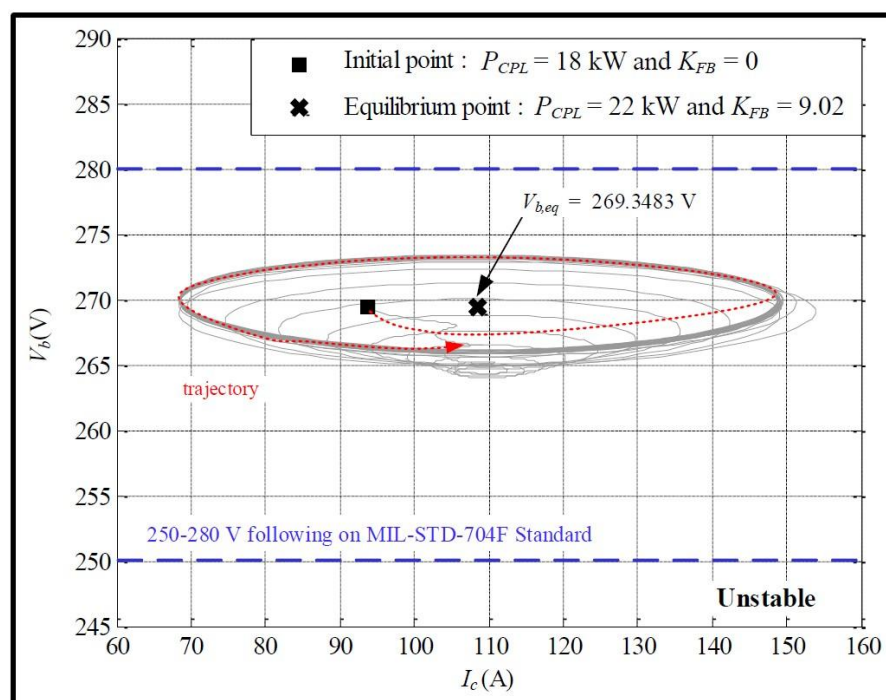


รูปที่ 5.13 การวิเคราะห์ระนาบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 34$  kW และ  $K_{FB} = 0.9$  (กรณีที่ 5) (ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$  (ค) สำหรับพิจารณา  $T_s$



รูปที่ 5.14 การวิเคราะห์ระนาบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 38$  kW และ  $K_{FB} = 1.01$  (กรณี ที่ 6) (ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$  (ค) สำหรับพิจารณา  $T_s$

ในลำดับถัดมาพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาในกรณีที่  $K_{FB}$  มีค่ามากเกินไป ณ ระดับ  $P_{CPL}$  เท่ากับ 22 kW ดังแสดงในรูปที่ 5.15

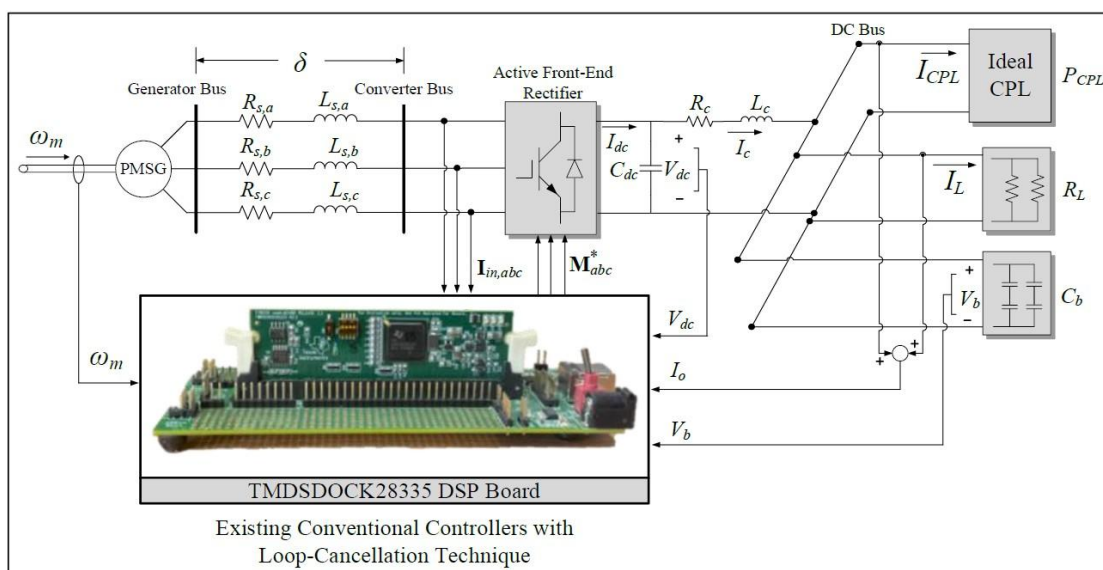


รูปที่ 5.15 การวิเคราะห์ระนาบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 22$  kW และ  $K_{FB} = 9.02$  (กรณี ที่ 7)

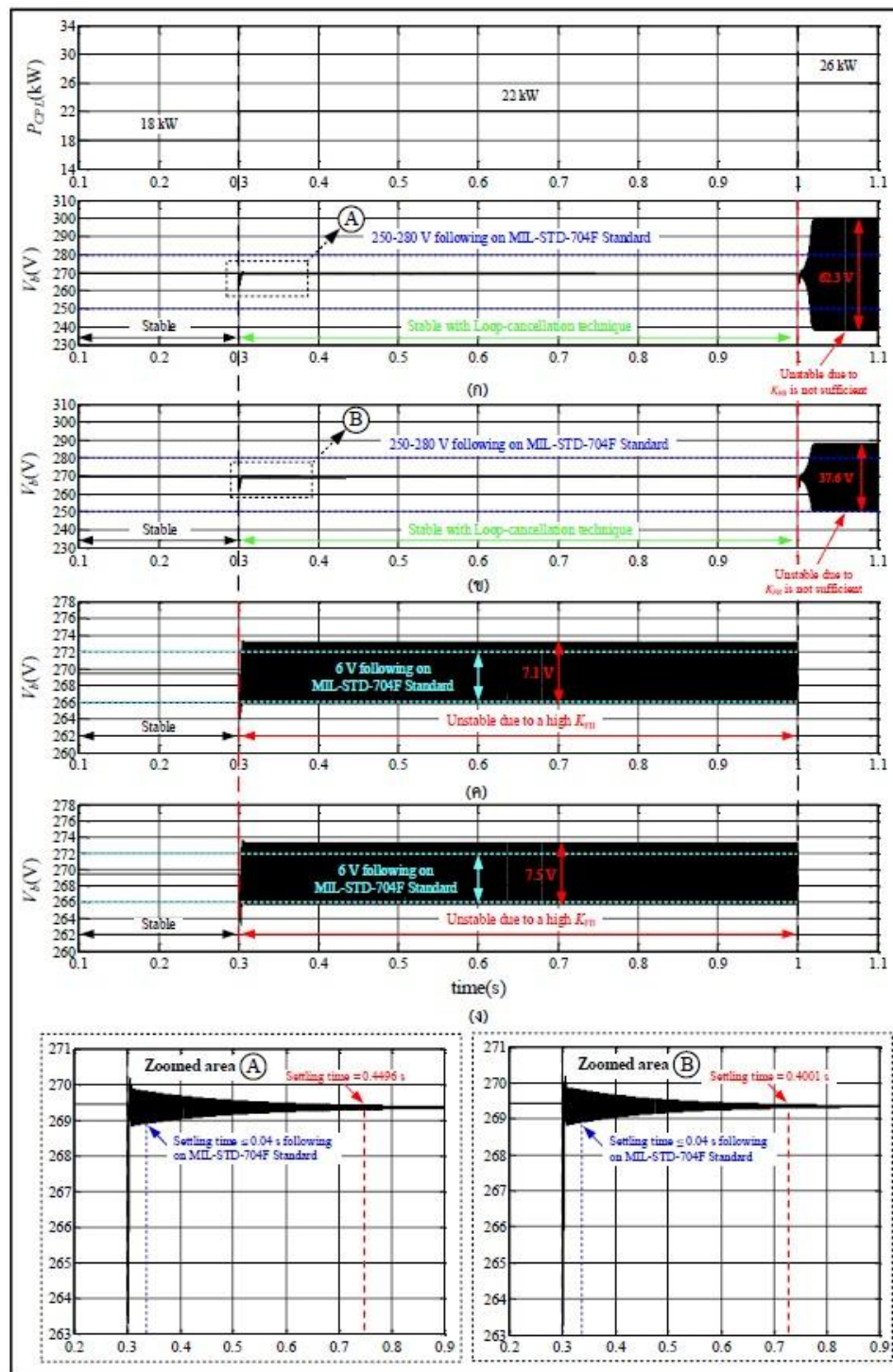
จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.15 จะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นของค่า  $K_{FB}$  ที่มากเกินไปซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.02 จะไม่เป็นผลดีต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา เนื่องจากจะทำให้การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบ  $I_c$  และ  $V_b$  เมื่อ  $P_{CPL}$  เท่ากับ 22 kW จากเดิมที่ลู่เข้าจุดปฏิบัติงานในกรณีที่  $K_{FB}$  เท่ากับ 0.1 (ดูได้จากรูปที่ 5.10 (ก)) จะเปลี่ยนไปออกห่างจากจุดปฏิบัติงานของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งหมายถึง ระบบที่มีเสถียรภาพหลังจากการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยค่า  $K_{FB}$  ที่น้อยและเพียงพอจะกลับมาขาดเสถียรภาพอีกครั้ง หากค่า  $K_{FB}$  มีค่ามากเกินไป สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพข้างต้นจะอาศัยทั้งการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.3.4

#### 5.3.4 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งหมดของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้เทคนิคบล็อกเล็กจะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB ที่แสดงดังในรูปที่ 5.4 กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ในส่วนของการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป จะมีหลักการและขั้นตอนในการจำลองสถานการณ์เช่นเดียวกับการจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบันทึกที่ศึกษากรณีที่ไม่มี การบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ของบทที่ 4 แต่จะเพิ่มเติมเพียงกระบวนการตรวจจับแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_b$ ) เข้าไปประมวลผลภายในบอร์ด DSP รุ่น TMS320F28335 Experimenter Kit ดังแสดงในรูปที่ 5.16 โดยผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์สำหรับยืนยันการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบันทึกที่ศึกษาในกรณีที่เลือกใช้ค่า  $K_{FB}$  ที่น้อยและเพียงพอต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ( $K_{FB} = 0.1$ ) รวมทั้งในกรณีที่ใช้ค่า  $K_{FB}$  มากเกินไป ( $K_{FB} = 9.02$ ) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.16 บล็อกไดอะแกรมการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป



รูปที่ 5.17 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (ก) การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เมื่อ  $K_{FB} = 0.1$  (ข) การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อ  $K_{FB} = 0.1$  (ค) การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เมื่อ  $K_{FB} = 9.02$  (ง) การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อ  $K_{FB} = 9.02$

จากรูปที่ 5.17 (ก) และ 5.17 (ข) แสดงให้เห็นว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 18 kW ไปเป็น 22 kW (จุดขาดเสถียรภาพของระบบ) ที่เวลา 0.3 วินาที โดยกำหนดให้  $K_{FB}$  มีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งเป็นค่าน้อยและเพียงพอจะทำให้ระบบที่เคยขาดเสถียรภาพกลับมาเสถียรภาพอีกครั้งตามผลการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอในรูปที่ 5.7 (ข) (ทฤษฎีบทค่าเจาะจง) และ 5.10 (การวิเคราะห์หระนาบเฟส) ซึ่งสังเกตได้จากผลการสั่นไหวของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง  $V_b$  ที่ค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 250 V ถึง 280 V ตามที่มาตรฐาน MIL-STD-704F ระบุไว้ อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลาเข้าที่ของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง  $V_b$  จะไม่อยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอในรูปที่ 5.10 (ค) (การวิเคราะห์หระนาบเฟส) นั่นคือ ช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองที่ได้จากชุดบล็อก SimPowerSytem™ และเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปมีค่าเท่ากับ 0.4496 วินาที และ 0.4001 วินาที ตามลำดับ ซึ่งเกินช่วงเวลาเข้าที่สูงสุดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้นั้นคือ 0.04 วินาที และเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้ถูกเพิ่มอีกครั้งให้มีค่าเท่ากับ 26 kW ที่เวลา 1 วินาที ในขณะที่  $K_{FB}$  ยังคงมีค่าเท่าเดิม จะส่งผลให้การกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง  $V_b$  ที่ได้จากชุดบล็อก SimPowerSytem™ และเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปมีค่าสูงถึง 62.3 V และ 37.6 V ตามลำดับ ซึ่งเกินกว่าที่มาตรฐาน MIL-STD-704F กำหนดไว้มาก (6 V) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือระบบจะกลับมาขาดเสถียรภาพอีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้เป็นเพราะค่า  $K_{FB}$  ไม่เพียงพอต่อการชดเชยหรือกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ณ ระดับกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 26 kW ดังนั้นหากต้องการให้ระบบรักษาเสถียรภาพ ณ จุดปฏิบัติงานนี้ได้ค่า  $K_{FB}$  จะต้องมีค่าเพิ่มเป็น 0.46 ตามผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 5.7 (ค) (ทฤษฎีบทค่าเจาะจง) และรูปที่ 5.11 (การวิเคราะห์หระนาบเฟส)

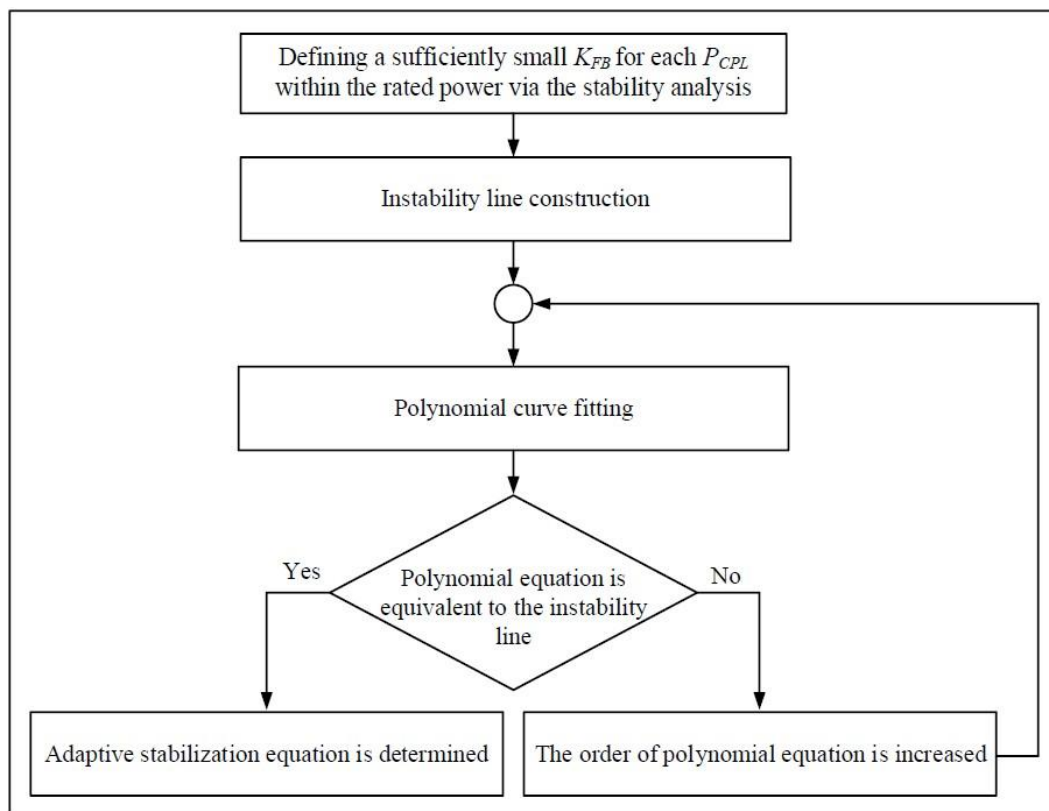
ในขณะที่รูปที่ 5.17 (ค) และ 5.17 (ง) ได้กำหนดให้  $K_{FB}$  มีค่าเท่ากับ 9.02 และ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 18 kW ไปเป็น 22 kW ที่เวลา 0.3 วินาที จะพบว่าระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้นำเสนอในรูปที่ 5.8 (ข) (ทฤษฎีบทค่าเจาะจง) และ 5.15 (การวิเคราะห์หระนาบเฟส) และเมื่อพิจารณาถึงค่าแรงดันกระเพื่อมของผลตอบสนอง  $V_b$  ที่ได้จากชุดบล็อก SimPowerSytem™ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.1 V และเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.5 V จะไม่อยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ที่กำหนดให้ค่าแรงดันกระเพื่อมสูงสุดมีค่าไม่เกิน 6 V

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์หระนาบเฟส รวมทั้งผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 5.17 ที่มีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจนสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มของค่า  $K_{FB}$  ที่มากเกินไปจะส่งผลเสียมากกว่าผลดีต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษา ดังนั้นการเพิ่มค่า  $K_{FB}$  ตามโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เพิ่มขึ้นควรพิจารณาเลือกใช้ค่า  $K_{FB}$  ที่น้อยและเพียงพอ (sufficiently small) ต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ณ

จุดปฏิบัติงานนั้น ๆ (Suyapan, A., Areerak, K., Bozhko, S., Yeoh, S.S., and Areerak, K., 2021) อย่างไรก็ตาม หากต้องการให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพตลอดช่วงการทำงานจนถึงพิกัดกำลังไฟฟ้าจำเป็นต้องดำเนินการวิเคราะห์หาค่า  $K_{FB}$  ใหม่ทุกครั้งเมื่อจุดปฏิบัติงานของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนและล่าช้าในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาในสถานการณ์ทำการบินจริง ซึ่งอาจนำไปสู่อุบัติเหตุทางการบินได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมซึ่งอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงในการระบุสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่สามารถปรับเปลี่ยนค่า  $K_{FB}$  ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้แบบทันทีทันใด ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.4 นอกจากนี้จากผลการศึกษายังแสดงให้เห็นอีกว่า การออกแบบค่า  $K_{FB}$  ที่อาศัยการเลือกใช้ค่าที่น้อยและเพียงพอจะทำให้ผลการตอบสนองของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง  $V_b$  ในบางจุดปฏิบัติงานมีช่วงเวลาเข้าที่ไม่สอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 6 ต่อไป

#### 5.4 การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเป็นการประยุกต์ใช้การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กร่วมกับสมการอย่างง่ายของค่าอัตราขยายป้อนกลับของเทคนิคลูปยกเล็ก ( $K_{FB}$ ) ที่แปรเปลี่ยนค่าได้ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว หรือเรียกสมการดังกล่าวว่า สมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว (adaptive stabilization equation) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยการหาสมการโพลีโนเมียลที่ได้มาจากการวิเคราะห์หาเสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-10) เพื่อออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวดังกล่าวซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนในการออกแบบได้ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

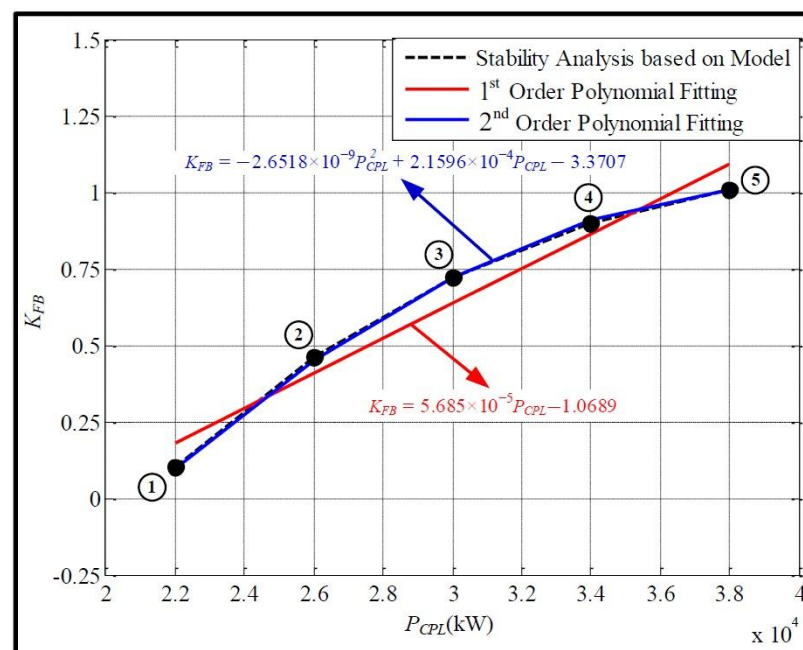
จากรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่า ขั้นตอนในการออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ

**ขั้นตอนที่ 1** วิเคราะห์หาค่า  $K_{FB}$  ที่น้อยและเพียงพอสำหรับการชดเชยหรือกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) ตั้งแต่จุดปฏิบัติงานที่ระบบเริ่มเกิดการขาดเสถียรภาพ ( $P_{unstable}$ ) จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL, rated}$ ) โดยอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบแอสต์วาทฤษฎีบทค่าเจาะจงร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในสมการที่ (5-10)

**ขั้นตอนที่ 2** ดำเนินการสร้างเส้นอเสถียรภาพโดยอาศัยผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในขั้นตอนที่ 1 ในแต่ละจุดปฏิบัติงานเพื่อนำไปใช้ในการหาสมการโพลิโนเมียลในขั้นตอนถัดไป

**ขั้นตอนที่ 3** หาสมการโพลิโนเมียลที่เหมาะสมโดยอาศัยการเพิ่มอันดับของสมการโพลิโนเมียลไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งกราฟของสมการโพลิโนเมียลเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับเส้นอเสถียรภาพที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 2 ก็จะได้สมการโพลิโนเมียลที่เหมาะสมหรือเรียกว่าสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว

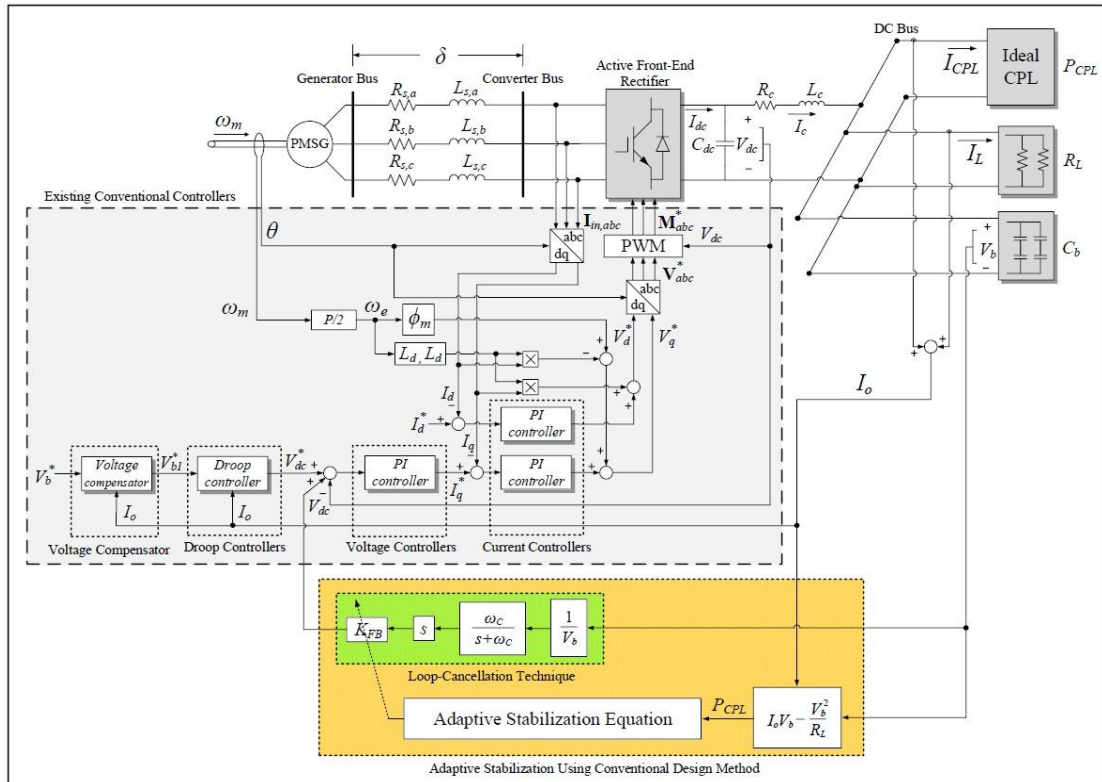
จากบล็อกไดอะแกรมการออกแบบในรูปที่ 5.18 และขั้นตอนที่ได้รับการอธิบายไว้ข้างต้น จะสามารถแสดงผลการหาสมการโพลิโนเมียลสำหรับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาได้ดังในรูปที่ 5.19 จากรูปที่ 5.19 เส้นประสีดำคือ เส้นอเสถียรภาพ ซึ่งได้มาจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าตั้งแต่ 22 kW (จุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ) ถึง 38 kW (ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว) โดยจุด ① ถึง ⑤ ที่ปรากฏบนเส้นอเสถียรภาพคือค่า  $K_{FB}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพในหัวข้อที่ 5.3.1 และ 5.3.3 ในขณะที่เส้นสีแดงและเส้นสีน้ำเงินในรูปที่ 5.19 คือ เส้นกราฟของสมการโพลิโนเมียลอันดับหนึ่ง (first-order) และอันดับสอง (second-order) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เส้นกราฟสีน้ำเงินซึ่งได้มาจากสมการโพลิโนเมียลอันดับสองเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับเส้นอเสถียรภาพมากกว่าเส้นกราฟสีแดงที่ได้มาจากสมการโพลิโนเมียลอันดับหนึ่ง ดังนั้น สมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาจึงเป็นสมการโพลิโนเมียลอันดับสองที่แสดงได้ดังสมการที่ (5-11) จากสมการที่ (5-11) จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว มีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าอัตราขยาย  $K_{FB}$  มีค่าแปรเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน เพื่อเป็นการแก้ปัญหาการกลับมาขาดเสถียรภาพของระบบอีกครั้ง อันเนื่องมาจากค่า  $K_{FB}$  มีค่าคงที่ตลอดช่วงการทำงาน ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ที่ผ่านมา สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.19 การหาสมการโพลิโนเมียลโดยอาศัยการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสม

$$K_{FB} = -2.6518 \times 10^{-9} P_{CPL}^2 + 2.1596 \times 10^{-4} P_{CPL} - 3.3707 \quad (5-11)$$

$$\text{เมื่อ} \quad P_{CPL} = I_o V_b - \frac{V_b^2}{R_L} \quad (5-12)$$



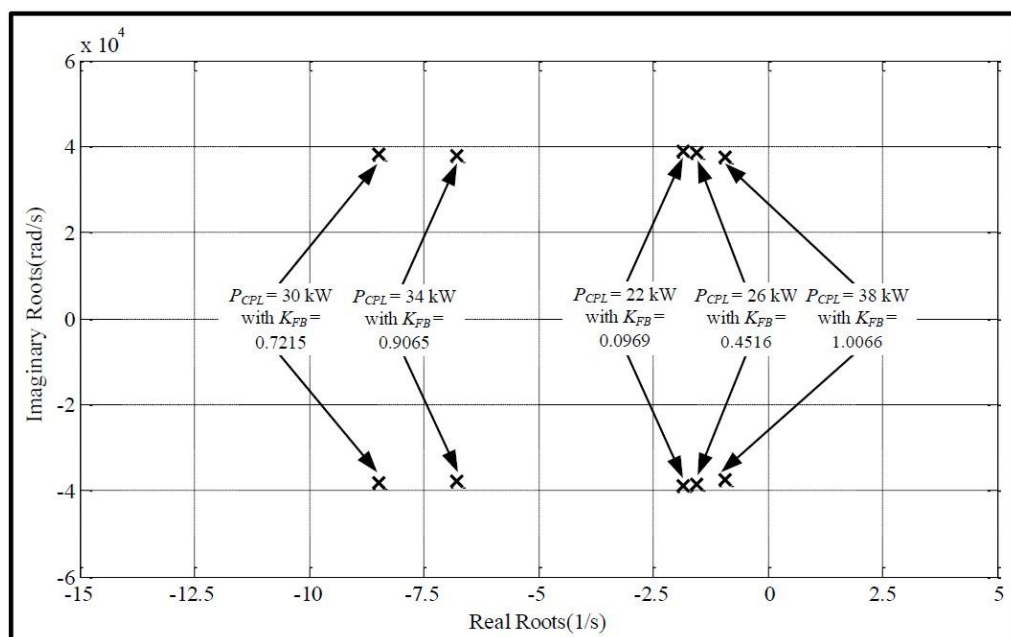
รูปที่ 5.20 ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

จากรูปที่ 5.20 จะเห็นได้ว่า การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมที่แสดงในพื้นที่สีส้ม จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ส่วนของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเลิก ซึ่งจะทำหน้าที่ในการกำจัดหรือยกเลิกผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวอย่างสมบูรณ์เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานภายใต้พิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ และส่วนที่ 2 ส่วนของสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว ซึ่งจะทำหน้าที่ในการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายป้อนกลับของเทคนิคลูปยกเลิก ( $K_{FB}$ ) ตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) โดยอาศัยการคำนวณผ่านสมการที่ (5-11) สำหรับค่า  $P_{CPL}$  ในสมการที่ (5-11) จะถูกคำนวณผ่านสมการที่ (5-12) โดยอาศัยกระแสไฟฟ้าของโหลดทั้งหมด ( $I_o$ ) ที่ได้จากตัวตรวจจับสนามแรงดันไฟฟ้า

กระแสตรง ( $V_b$ ) ที่ได้จากตัวตรวจจับแรงดัน และความต้านทานของโหลด ( $R_L$ ) ซึ่งเป็นค่าคงที่ ดังแสดงได้ในตารางที่ 3.1 ของบทที่ 3 และเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าค่า  $K_{FB}$  ที่คำนวณได้จากสมการสร้าง เสถียรภาพเชิงปรับตัวในสมการที่ (5-11) สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่ศึกษามีขีดความสามารถในการจ่าย ระดับกำลังไฟฟ้าได้จนถึงค่าพิกัด โดยไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า กำลังบนเครื่องبنที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งจะได้รับการนำเสนอใน หัวข้อที่ 5.4.1 ถึง 5.4.3

#### 5.4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบเอสด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสำหรับระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

การตรวจสอบผลการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายป้อนกลับ ( $K_{FB}$ ) ในสมการที่ (5-11) ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่ศึกษามีขีดความสามารถในการจ่ายระดับกำลังไฟฟ้าได้จนถึงค่าพิกัดโดยอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบเอสด้วยทฤษฎีบท ค่าเจาะจงร่วมกับแบบจำลองของระบบที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-10) จะพิจารณาจาก ตำแหน่งของค่าเจาะจงเด่นของระบบ ดังแสดงได้ในรูปที่ 5.21 โดยกำหนดให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าจาก 22 kW ไปจนถึง 38 kW และค่าอัตราขยายป้อนกลับ ( $K_{FB}$ ) มีการปรับเปลี่ยนค่าให้สอดคล้องกับระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดดังกล่าวตามสมการที่ (5-11)



รูปที่ 5.21 ค่าเจาะจงเด่นของระบบเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

จากรูปที่ 5.21 จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวให้ มีค่าเป็น 22 kW 26 kW 30 kW 34 kW และ 38 kW โดยที่ค่า  $K_{FB}$  เปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ (5-11) ซึ่งก็คือ 0.0969 0.4516 0.7215 0.9065 และ 1.0066 ตามลำดับ จะทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบมีส่วนจริงน้อยกว่าศูนย์ ระบบจึงมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า  $K_{FB}$  ที่คำนวณได้จากสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวซึ่งถูกออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมสามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ประสิทธิภาพที่ดี โดยไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพถึงแม้ว่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นก็ตาม

#### 5.4.2 การวิเคราะห์ตัวประกอบมีส่วนร่วมของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

การวิเคราะห์หาตัวแปรสถานะที่ส่งผลต่อค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาและมีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมในรูปที่ 5.20 เพื่อนำไปใช้สร้างระนาบเฟสสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่ได้รับการนำเสนอในหัวข้อข้อถัดไป จะพิจารณาด้วยกันทั้งหมด 5 กรณี ดังแสดงได้ในตารางที่ 5.9 ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่ได้นำเสนอในรูปที่ 5.21 โดยเมตริกซ์ตัวประกอบมีส่วนร่วมของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.10 ถึง 5.14

ตารางที่ 5.9 ค่า  $P_{CPL}$  และ  $K_{FB}$  สำหรับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

| กรณีที่ | $P_{CPL}$                           | $K_{FB}$ |
|---------|-------------------------------------|----------|
| 1       | 22 kW (จุดขาดเสถียรภาพ)             | 0.0969   |
| 2       | 26 kW                               | 0.4516   |
| 3       | 30 kW                               | 0.7215   |
| 4       | 34 kW                               | 0.9065   |
| 5       | 38 kW (พิกัดของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว) | 1.0066   |

ตารางที่ 5.10 เมตริกซ์ตัวประกอบที่มีส่วนร่วมเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 0.0969$  (กรณีที่ 1)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII            | Eig. IX              |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0                    | 0                    |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.4907                     | 0.4907   | ...      | $6.6 \times 10^{-4}$ | $6.6 \times 10^{-4}$ |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3209                     | 0.3209   | ...      | 0.3120               | 0.3120               |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0020                     | 0.0020   | ...      | 0.0014               | 0.0014               |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V               |                      |

ตารางที่ 5.11 เมตริกซ์ตัวประกอบที่มีส่วนร่วมเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 0.4516$  (กรณีที่ 2)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII            | Eig. IX              |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0                    | 0                    |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.4959                     | 0.4959   | ...      | $8.0 \times 10^{-4}$ | $8.0 \times 10^{-4}$ |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3211                     | 0.3211   | ...      | 0.3253               | 0.3253               |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0110                     | 0.0110   | ...      | 0.0068               | 0.0068               |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V               |                      |

ตารางที่ 5.12 เมตริกซ์ตัวประกอบที่มีส่วนร่วมเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 0.7215$  (กรณีที่ 3)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII            | Eig. IX              |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0                    | 0                    |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.5016                     | 0.5016   | ...      | $9.8 \times 10^{-4}$ | $9.8 \times 10^{-4}$ |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3221                     | 0.3221   | ...      | 0.3406               | 0.3406               |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$             | $\vdots$             |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0206                     | 0.0206   | ...      | 0.0118               | 0.0118               |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V               |                      |

ตารางที่ 5.13 เมตริกซ์ตัวประกอบที่มีส่วนร่วมเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 0.9065$  (กรณีที่ 4)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII | Eig. IX  |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|-----------|----------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0         | 0        |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$  | $\vdots$ |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.5074                     | 0.5074   | ...      | 0.0012    | 0.0012   |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3240                     | 0.3240   | ...      | 0.3583    | 0.3583   |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$  | $\vdots$ |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0299                     | 0.0299   | ...      | 0.0161    | 0.0161   |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V    |          |

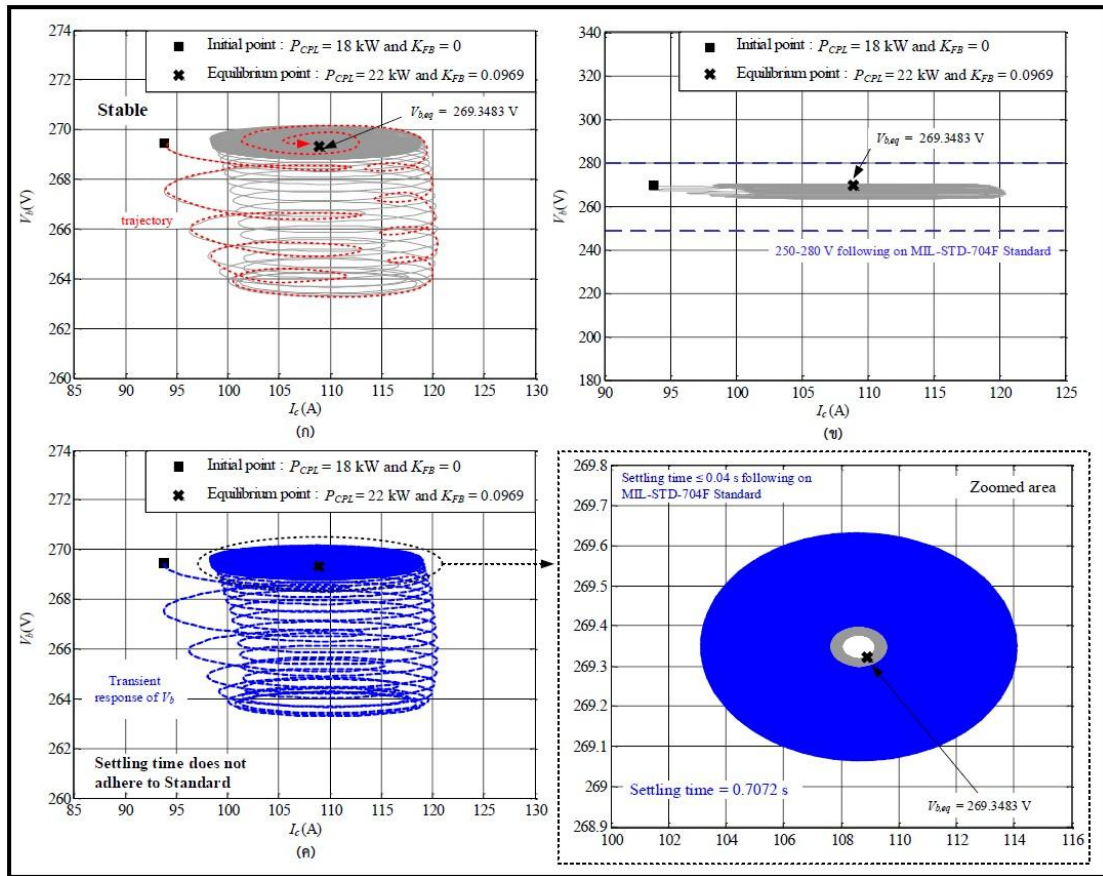
ตารางที่ 5.14 เมทริกซ์ตัวประกอบการมีส่วนร่วมเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพที่  $K_{FB} = 1.0066$  (กรณีที่ 5)

|            | Eig. I   | Eig. II  | Eig. III                   | Eig. IV  | ...      | Eig. VIII | Eig. IX  |
|------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|-----------|----------|
| $I_d$      | 0.8333   | 0.8333   | 0                          | 0        | ...      | 0         | 0        |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$  | $\vdots$ |
| $I_c$      | 0        | 0        | 0.5124                     | 0.5124   | ...      | 0.0014    | 0.0014   |
| $V_b$      | 0        | 0        | 0.3266                     | 0.3266   | ...      | 0.3793    | 0.3793   |
| $\vdots$   | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$                   | $\vdots$ | $\ddots$ | $\vdots$  | $\vdots$ |
| $V_{stab}$ | 0        | 0        | 0.0376                     | 0.0376   | ...      | 0.0196    | 0.0196   |
|            | Mode I   |          | Mode II<br>(Dominant mode) |          | ...      | Mode V    |          |

จากตารางที่ 5.10 ถึงตารางที่ 5.14 จะพบว่า ตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาในกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมมากที่สุดและมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าเจาะจงเด่น  $\lambda_3$  และ  $\lambda_4$  ที่แสดงในรูปที่ 5.6 คือ ตัวแปรสถานะ  $I_c$  และ  $V_b$  เนื่องจากมีสมาชิกในเมทริกซ์ตัวประกอบการมีส่วนร่วมที่มีค่ามากที่สุด

#### 5.4.3 การวิเคราะห์ระนาบเฟสของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

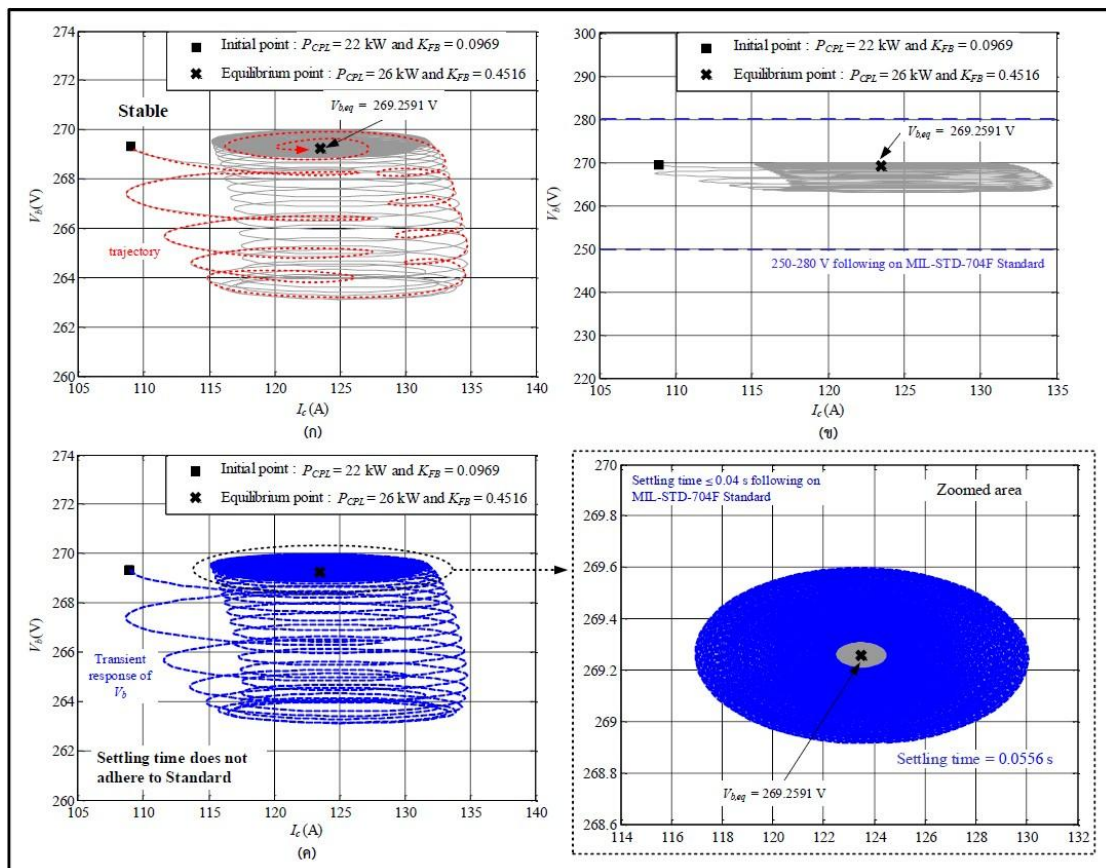
การตรวจสอบผลการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายป้อนกลับ ( $K_{FB}$ ) ในสมการที่ (5-11) ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่ศึกษามีขีดความสามารถในการจ่ายระดับกำลังไฟฟ้าได้จนถึงค่าพิกัดของระบบโดยอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟสร่วมกับแบบจำลองของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-9) จะอาศัยการพิจารณารูปแบบการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบเฟสควบคู่ไปกับการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_b$ ) ตามมาตรฐาน MIL-STD-704F เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าจาก 22 kW ไปจนถึง 38 kW และค่าอัตราขยายป้อนกลับ ( $K_{FB}$ ) มีการปรับเปลี่ยนค่าให้สอดคล้องกับระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดดังกล่าวตามสมการที่ (5-11) ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับค่า  $K_{FB}$  ที่ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 5.9 ทั้ง 5 กรณี โดยการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์สำหรับกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 5 สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 5.22 ถึงรูปที่ 5.26 ตามลำดับ



รูปที่ 5.22 การวิเคราะห์ระบบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 22 \text{ kW}$  และ  $K_{FB} = 0.0969$  (กรณีที่ 1)

(ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$

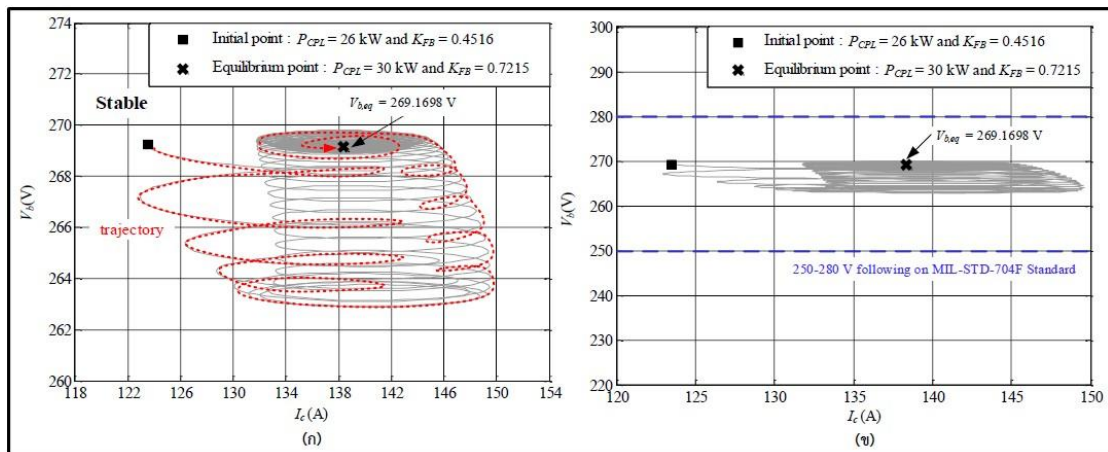
(ค) สำหรับพิจารณา  $T_s$



รูปที่ 5.23 การวิเคราะห์ระบบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 26 \text{ kW}$  และ  $K_{FB} = 0.4516$  (กรณีที่ 2)

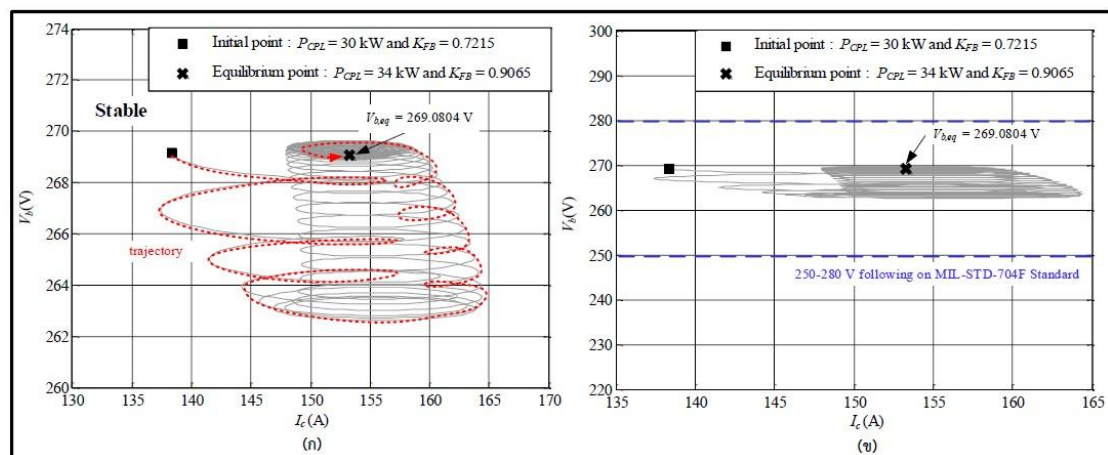
(ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$

(ค) สำหรับพิจารณา  $T_s$



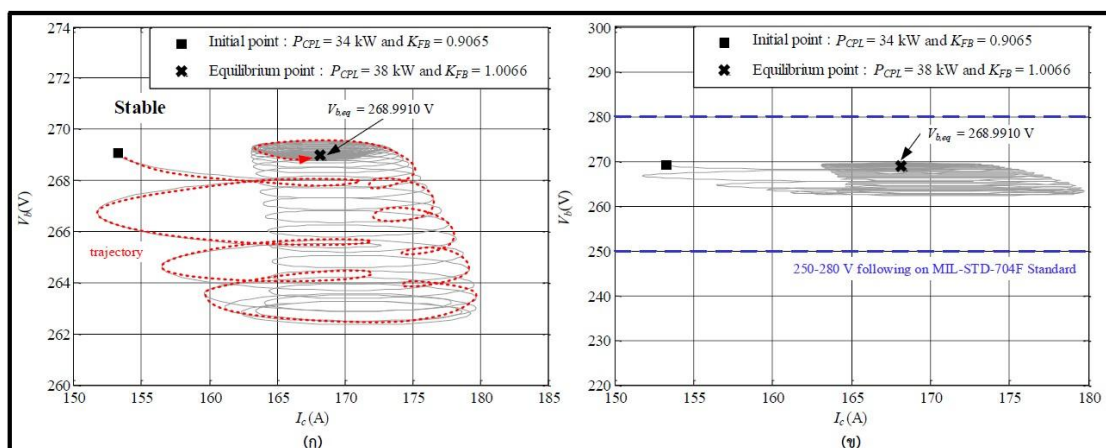
รูปที่ 5.24 การวิเคราะห์ระบบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 30$  kW และ  $K_{FB} = 0.7215$  (กรณีที่ 3)

(ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$



รูปที่ 5.25 การวิเคราะห์ระบบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 34$  kW และ  $K_{FB} = 0.9065$  (กรณีที่ 4)

(ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$



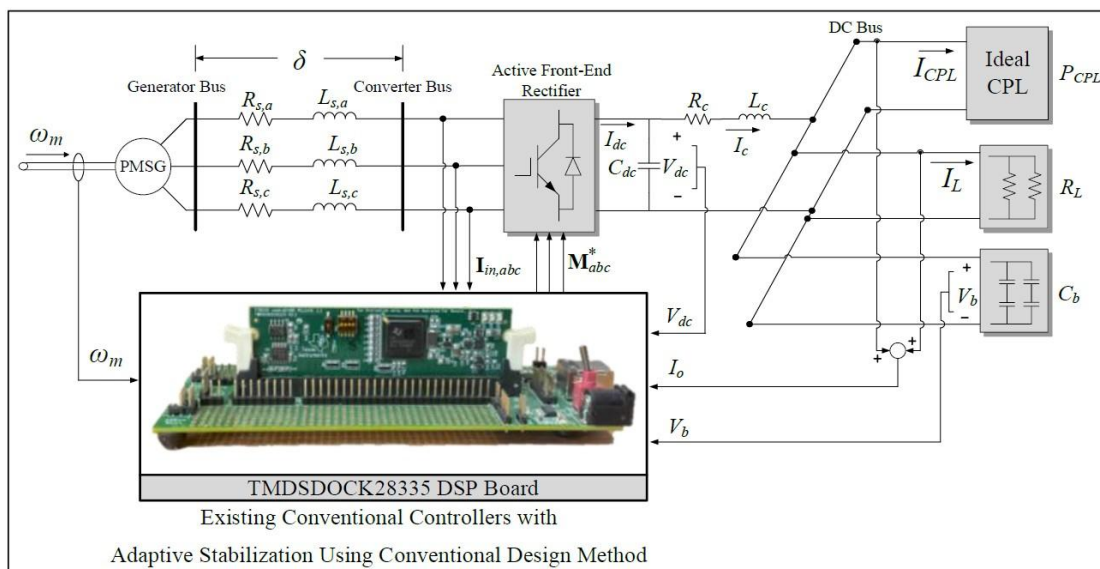
รูปที่ 5.26 การวิเคราะห์ระบบเฟสเมื่อ  $P_{CPL} = 38$  kW และ  $K_{FB} = 1.0066$  (กรณีที่ 5)

(ก) สำหรับพิจารณาเสถียรภาพของระบบ (ข) สำหรับพิจารณาแอมพลิจูดของ  $V_b$

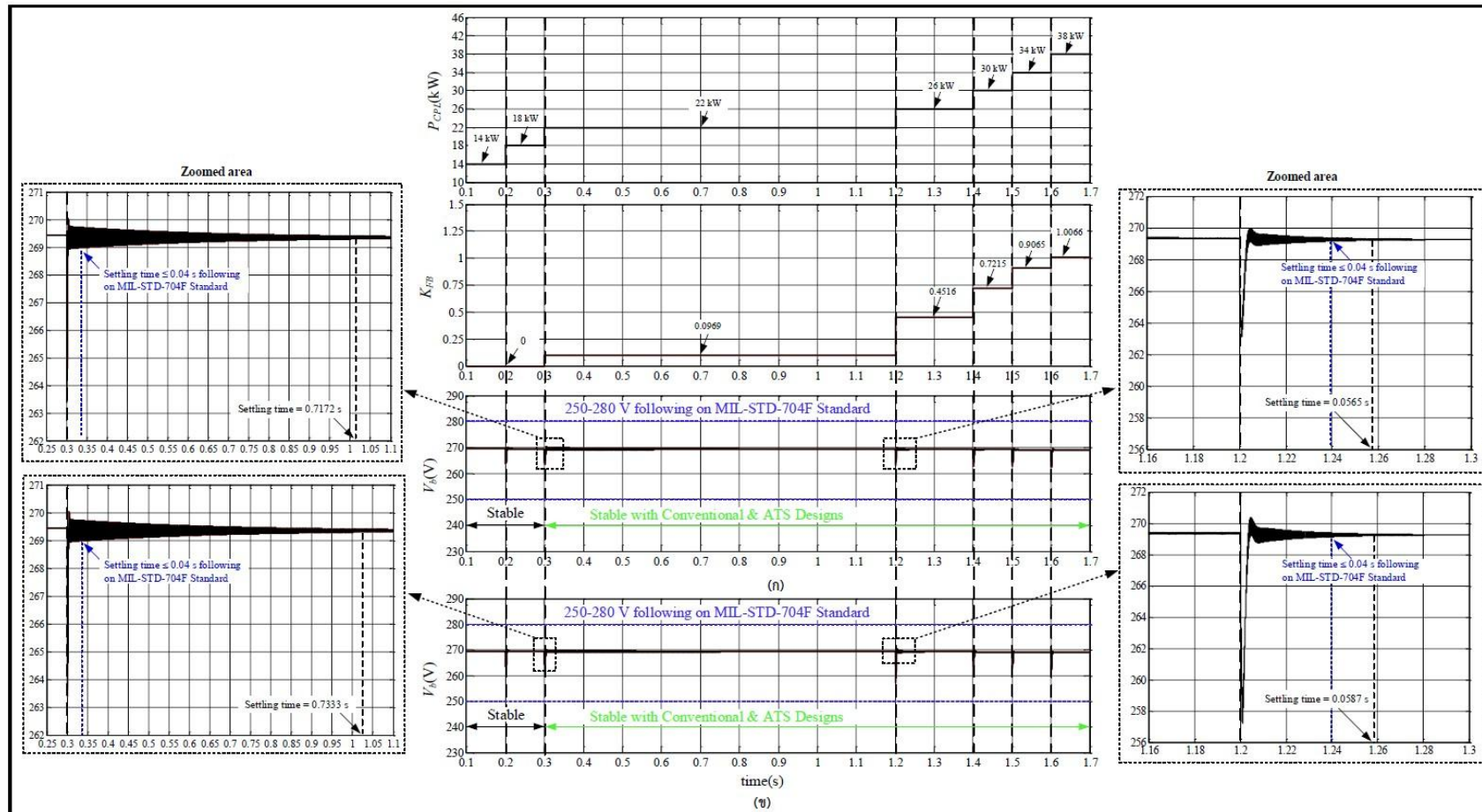
จากรูปที่ 5.22 ถึงรูปที่ 5.26 จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าของ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวให้มีค่าเป็น 22 kW 26 kW 30 kW 34 kW และ 38 kW โดยที่ค่า  $K_{FB}$  เปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ (5-11) ซึ่งก็คือ 0.0969 0.4516 0.7215 0.9065 และ 1.0066 ตามลำดับ การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานและแอมพลิจูดของ แรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าอยู่ในช่วง 250 V ถึง 280 V ตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ทุก ๆ จุดปฏิบัติงาน โดยเมื่อพิจารณาในส่วนของช่วงเวลาเข้าที่จะพบว่าในกรณีที่  $P_{CPL} = 22$  kW และ  $K_{FB} = 0.0969$  และในกรณีที่  $P_{CPL} = 26$  kW และ  $K_{FB} = 0.4516$  จะมีช่วงเวลาเข้าที่เกิน 0.04 วินาที ตามที่มาตรฐานระบุไว้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7072 วินาที และ 0.0556 วินาที ตามลำดับ (คำนวณได้จากการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในสถานะชั่วครู่ดังแสดงในเส้นสีน้ำเงินของรูปที่ 5.22 (ค) และ 5.23 (ค)) ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า  $K_{FB}$  ที่คำนวณได้จากสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวซึ่ง ถูกออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม สามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้ โดยไม่ประสบปัญหา การขาดเสถียรภาพถึงแม้ว่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นก็ตาม

โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในทางทฤษฎีตั้งแต่หัวข้อที่ 5.4.1 ถึง หัวข้อที่ 5.4.3 ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วย วิธีการแบบดั้งเดิมจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป





รูปที่ 5.28 บล็อกไดอะแกรมการจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม



รูปที่ 5.29 การจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

(ก) ชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB (ข) เทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

จากรูปที่ 5.29 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่  $K_{FB}$  มีการปรับเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นอย่างเหมาะสมตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดที่เพิ่มแบบทันทีทันใด ภายใต้หลักการของค่า  $K_{FB}$  ที่น้อยและเพียงพอต่อการกำจัดหรือยกเลิกผลของโหลดกำลังไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ จะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามกขึ้นที่มีระบบจำหน่ายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดียวสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้เงื่อนไขการเพิ่มขึ้นของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า โดยดูได้จากการสั่นไหวของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_b$ ) ที่ไม่มีผลของการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดัน อีกทั้งยังมีค่าไม่เกิน 250 V ถึง 280 V ตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปมีความสอดคล้องและคล้อยตามกันอย่างเห็นได้เจน

อีกประเด็นที่น่าสนใจ เมื่อพิจารณาสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในพื้นที่ขยายในกรณีที่  $P_{CPL} = 22$  kW (จุดขาดเสถียรภาพ) และ  $K_{FB} = 0.0969$  จะพบว่า ช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนอง  $V_b$  ที่ได้จากชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปมีค่าเท่ากับ 0.7172 วินาที และ 0.7333 วินาที ตามลำดับ และในกรณีที่  $P_{CPL} = 26$  kW และ  $K_{FB} = 0.4516$  ช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนอง  $V_b$  ที่ได้จากชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปจะมีค่าเท่ากับ 0.0565 วินาที และ 0.0587 วินาที ตามลำดับ ซึ่งไม่เป็นไปตามที่มาตรฐาน MIL-STD-704F ระบุไว้ นั่นคือ ช่วงเวลาเข้าที่จะต้องไม่เกิน 0.04 วินาที ในขณะที่ช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนอง  $V_b$  ที่จุดการทำงานอื่นจะเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมที่ไม่ได้นำมาตรฐาน MIL-STD-704F มาใช้ในกระบวนการออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวจะไม่สามารถรับประกันได้ว่าแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_b$ ) จะมีคุณลักษณะเฉพาะเป็นไปตามที่มาตรฐาน MIL-STD-704F ระบุไว้ทุกประการ ดังนั้นจึงทำให้ผู้วิจัยสนใจและมุ่งมั่นในการทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงดีมากยิ่งขึ้นและสอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะเวลาทำการบินด้วยการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว ซึ่งรายละเอียดการออกแบบดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 6 ต่อไป

## 5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน โดยในส่วนของ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะเริ่มต้นจาก

การอธิบายถึงหลักการเบื้องต้นในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กและพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ อีกทั้งยังได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบค่าอัตราขยายป้อนกลับ  $K_{FB}$  ที่เหมาะสมต่อการกำจัดผลของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบ โดยอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบเอสด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง การวิเคราะห์ตัวประกอบมีส่วนร่วม และการวิเคราะห์เสถียรภาพบนปริภูมิสถานะของตัวแปรสถานะ  $I_c$  และ  $V_b$  พร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์ โดยผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีและผลการจำลองสถานการณ์ที่สอดคล้องกันแสดงให้เห็นว่า การเลือกใช้ค่า  $K_{FB}$  ที่มากเกินไปกลับส่งผลเสียมากกว่าผลดีต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพนั้นคือ การใช้ค่า  $K_{FB}$  มากเกินไปอาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ในทางตรงกันข้าม การเลือกใช้ค่า  $K_{FB}$  ที่น้อยและเพียงพอต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ ณ จุดปฏิบัติงานนั้น ๆ ด้วยเหตุนี้การออกแบบและเลือกใช้ค่า  $K_{FB}$  สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในบทนี้จะอาศัยเกณฑ์การเลือกค่า  $K_{FB}$  ที่น้อยและเพียงพอ อย่างไรก็ตามการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานจำเป็นต้องอาศัยการออกแบบค่า  $K_{FB}$  ใหม่ทุกครั้งเมื่อจุดปฏิบัติงานของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเมื่อคำนึงถึงสถานการณ์ทำการบินจริงจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังทำให้การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเกิดความล่าช้าจนอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุทางการบินได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมเพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษามีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะทำการบิน โดยการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวดังกล่าวเป็นการประยุกต์ใช้การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กร่วมกับสมการอย่างง่ายของค่าอัตราขยายป้อนกลับ  $K_{FB}$  ที่แปรเปลี่ยนค่าได้ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว หรือเรียกสมการดังกล่าวว่า สมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยการหาสมการโพลีโนเมียลที่ได้มาจากการวิเคราะห์หาเสนอเสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิสูจน์มาจากวิธีดีคิว เพื่อหาสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวดังกล่าว จากผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี การจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่มีความสอดคล้องกันสามารถยืนยันได้ว่า วิธีการสร้างเสถียรภาพที่ได้แนะนำเสนอดังกล่าวนี้อาจทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะทำการบิน รวมทั้งทำให้แอมพลิจูดของผลตอบสนองแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าอยู่ในช่วง 250 V ถึง 280 V ตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704 อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงในบางจุดปฏิบัติงานยังมีค่ามากกว่า 0.04 วินาที ซึ่งไม่เป็นตามมาตรฐานที่ระบุไว้ ทั้งนี้เป็นเพราะการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการที่นำเสนอไม่ได้พิจารณาตามมาตรฐาน MIL-STD-704F ในขณะที่

ทำการออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว ดังนั้นในบทที่ 6 ซึ่งเป็นบทถัดไปจึงได้นำเสนอแนวทางในการออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่สามารถรับประกันได้ว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีมากยิ่งขึ้นและสอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะเวลาทำการบิน

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ของบทที่ 5 ในส่วนของการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคยุคลิขิตได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 บทความ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้รับการจดลิขสิทธิ์โปรแกรมจำนวน 1 โปรแกรม โดยได้แสดงบทความฉบับสมบูรณ์และหนังสือแสดงการแจ้งข้อมูลลิขสิทธิ์ไว้ในภาคผนวก ก. ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Phosung, R., Areerak, K., and Areerak, K. (2024). Improvement in the stability of DC electrical power distribution systems in more electric aircraft. *IEEE Access*, 12, 100908-100920. doi:10.1109/ACCESS.2024.3430948 (Q1, IF = 3.4)

ยื่นคำขอลิขสิทธิ์ โปรแกรมการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยายป้อนกลับของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

เลขที่คำขอ 421741 วันที่ 15 เดือน กันยายน พ.ศ. 2565