

บทที่ 5

การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิง

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงโดยวิธีการป้อนกลับเฟสแบบบวกเพื่อให้ระบบขาดเสถียรภาพและเกิดการเลื่อนความถี่จนสามารถตรวจจับความผิดปกติได้ โดยเราจะเริ่มอธิบายจาก ความหมายและการเกิดปรากฏการณ์ไอส์แลนดิง จุดสมดุลกำลังงานภายในขอบเขตที่ยอมรับได้ของแรงดันและความถี่ การวิเคราะห์ระบบที่มีการป้อนกลับแบบบวก ผลการจำลองระบบ และการทดสอบระบบ ตามลำดับ

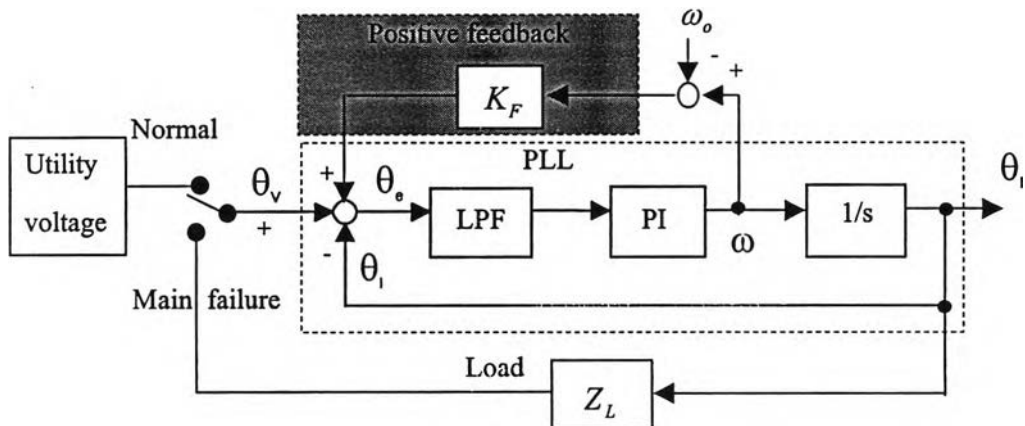
5.1 ความหมายและการเกิดปรากฏการณ์ไอส์แลนดิง

ปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงเป็นสถานะที่การไฟฟ้าได้ตัดการจ่ายกำลังงานให้กับเครือข่าย แต่ยังคงมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานที่ไม่ได้ถูกควบคุมโดยตรงจากการไฟฟ้า จ่ายไฟให้แก่โหลดและระบบเครือข่ายการไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจจะก่อให้เกิดปัญหาแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อและเป็นอันตรายกับเจ้าหน้าที่ที่เข้าไปบำรุงรักษาระบบ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า และให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหยุดการจ่ายกำลังงานเมื่อตรวจพบปรากฏการณ์ไอส์แลนดิง

ในระบบอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะมีวงรอปล็อกเฟส (PLL) ที่ผลิตความถี่เข้าจังหวะกับการไฟฟ้างดแสดงไว้ในกรอบเส้นประของรูปที่ 5.1 ทั้งนี้เพื่อที่จะสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์อ้างอิงสำหรับการควบคุมเฟสของกระแสที่จ่ายไปยังระบบการไฟฟ้าให้ตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง การทำงานของวงรอปล็อกเฟสสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ค่าผิดพลาดระหว่างเฟสของแรงดันการไฟฟ้า (θ_v) กับเฟสของกระแสอินเวอร์เตอร์ (θ_i) จากตัวเปรียบเทียบเฟสซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะถูกกรองด้วยวงจรรองผ่านต่ำ (LPF) เพื่อแยกเอาเฉพาะค่าเฉลี่ยไฟตรงส่งผ่านไปยังตัวควบคุม PI ตัวควบคุม PI จะปรับเปลี่ยนค่าความถี่ (ω) จนกระทั่งเฟสของกระแสเท่ากับเฟสของแรงดัน ในสถานะปกติมุมเฟสของแรงดันจะไม่ขึ้นกับกระแสและอิมพีแดนซ์ของโหลด

ในกรณีที่การไฟฟ้าหยุดส่งจ่ายกำลังงาน อินเวอร์เตอร์จะยังคงจ่ายกระแสให้แก่โหลดทั้งหมดที่เชื่อมต่อกับระบบ ขนาดของแรงดันคร่อมโหลดและมุมต่างเฟสของแรงดันกับกระแสจะขึ้นกับ อิมพีแดนซ์ของโหลด ในสถานะนี้ตัวควบคุม PI จะปรับเปลี่ยนความถี่ของระบบ จนกระทั่งมุมต่างเฟสของแรงดันกับกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์เท่ากับศูนย์ จุดสมดุลจะเกิดขึ้น ณ (1) ความถี่ที่ทำให้มุมเฟสของอิมพีแดนซ์ของโหลด ($\angle Z_L$) เท่ากับศูนย์ และ (2) ค่าแรงดันคร่อมโหลด

ที่ทำให้ กำลังงานที่ไหลลดเท่ากับกำลังงานที่จ่ายออกจากระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ หากความถี่และแรงดันของระบบที่จุดสมดุลไม่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความถี่และแรงดันของการไฟฟ้าในสภาวะปกติมากและอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ระบบตรวจจับความผิดปกติของแรงดันและความถี่ของระบบก็จะไม่สามารถตรวจพบปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงนี้ได้ ปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงก็จะยังคงดำเนินต่อไป เราจะได้พิจารณาถึงจุดสมดุลของระบบที่อยู่ในขอบเขตการยอมรับได้ของความแรงดันและความถี่ในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 5.1 แผนภาพบล็อกของวงรอปล็อกเฟส

5.2 จุดสมดุลของระบบภายในขอบเขตการยอมรับได้ของค่าความถี่และแรงดัน

ในที่นี้เราจะสมมติว่าโหลดเป็นองค์ประกอบ RLC แบบขนาน และจะแยกพิจารณาเป็น 2 ประเด็นคือ จุดสมดุลของกำลังงานภายในขอบเขตการยอมรับได้ของแรงดัน และจุดสมดุลของกำลังงานภายในขอบเขตการยอมรับได้ของความถี่ของระบบการไฟฟ้า

5.2.1 ขอบเขตการตรวจวัดแรงดัน

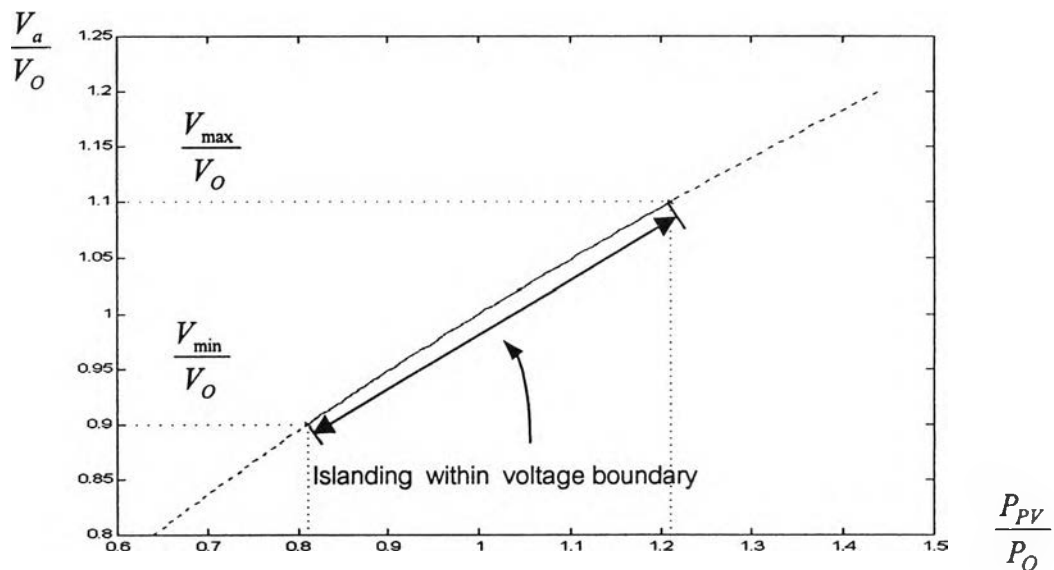
ในสภาวะปกติ กำลังงานที่การไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลด P_o จะมีค่าเป็นไปตามสมการ $P_o = V_o^2 / R$ โดยที่ V_o คือแรงดันพิกัดของระบบการไฟฟ้า เมื่อเกิดปรากฏการณ์ไอส์แลนดิง สมดุลกำลังงานจะเกิดขึ้นเมื่อกำลังจริงของระบบพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{pv}) เท่ากับกำลังจริงของโหลด ดังสมการที่ 5.1

$$P_{pv} = \frac{V_a^2}{R} \quad (5.1)$$

ในที่นี้เราได้ละเลยกำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์

เราสามารถเปรียบเทียบกับกำลังที่การไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลดในสถานะปกติ P_O กับกำลังงาน P_{PV} ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ดังได้ตั้งสมการที่ 5.2 และแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 5.2 หากเรากำหนดขอบเขตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ยอมรับได้ของแรงดันเป็น (V_{min}, V_{max}) เราก็จะทราบขอบเขตกำลังของโหลดเทียบกับกำลังจากเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ทำให้เราไม่สามารถตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ได้จากการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน

$$\frac{V_a}{V_o} = \sqrt{\frac{P_{PV}}{P_o}} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกำลังที่จุดสมดุลกำลังงาน

5.2.2 ขอบเขตการตรวจวัดความถี่

ในทำนองเดียวกันจุดสมดุลกำลังงานจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อกำลังจินตภาพ (reactive power; P_Q) ของโหลดเท่ากับศูนย์หรือมุมเฟสของโหลดเท่ากับศูนย์ดังแสดงในสมการที่ 5.3 และ 5.4

$$-\angle Z_L = \tan^{-1}\left(\frac{\omega C - 1/\omega L}{G}\right) = \tan^{-1}\left[Q\left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}\right)\right] = 0 \quad (5.3)$$

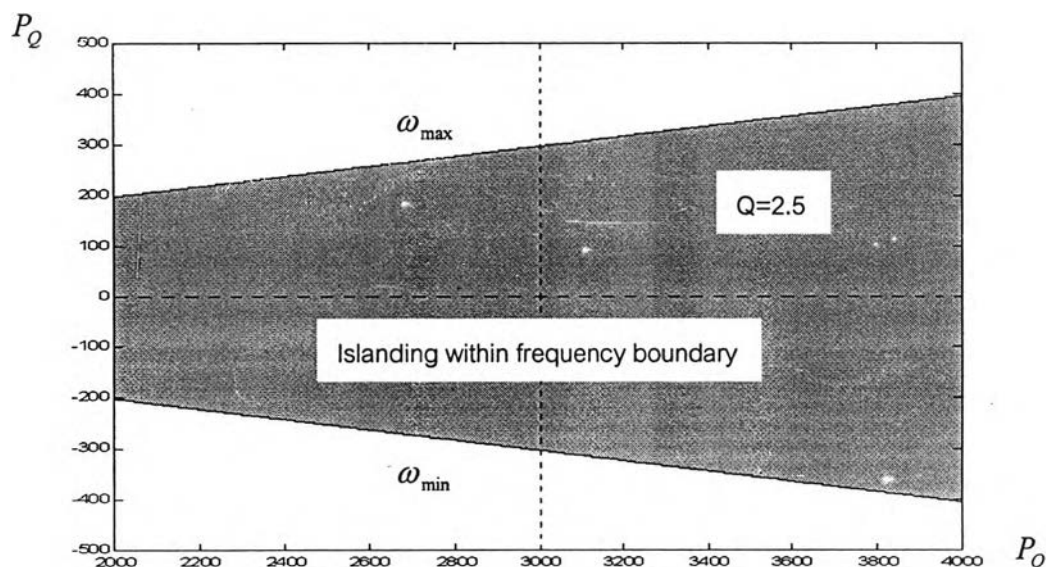
$$\omega = \omega_r \quad (5.4)$$

$$\text{โดยที่ } Q = R\sqrt{\frac{C}{L}}, \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ และ } G = 1/R \quad (5.5)$$

ในสภาวะปกติที่โหลดรับแรงดันการไฟฟ้าที่ความถี่ ω_o กำลังงานจริง P_o และกำลังจินตภาพ P_Q ของโหลดจะสัมพันธ์กันตามสมการ 5.6

$$\frac{P_Q}{P_o} = -\left[Q \left(\frac{\omega_o}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_o} \right) \right] \quad (5.6)$$

หากกำหนดขอบเขตการยอมรับได้ของการเปลี่ยนแปลงความถี่เป็น $(\omega_{\min}, \omega_{\max})$ และแทนค่าลงใน ω_r ของสมการที่ 5.6 เราก็จะทราบขอบเขตกำลังของโหลดในสภาวะไอส์แลนด์นิ่งที่ทำให้เราไม่สามารถตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์นิ่งได้จากการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความถี่ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์กำลังจริงและกำลังจินตภาพของโหลดที่จุดสมดุลกำลังงานของระบบที่ไม่มีการป้อนกลับเฟสแบบบวก

5.3 การป้อนกลับเฟสแบบบวก

จากหัวข้อ 5.2 แสดงให้เห็นว่า หากจุดสมมูลของกำลังงานอยู่ในขอบเขตการยอมรับได้ของความแรงดันและความถี่ เราจะไม่สามารถตรวจพบปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ได้ ในการวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยการป้อนกลับเฟสแบบบวกที่ทำให้วงรอบล็อกเฟสขาดเสถียรภาพและเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ออกนอกขอบเขตที่ยอมรับได้ ดังแสดงในกรอบเรเงาในรูปที่ 5.1 เฟส θ_F ที่ถูกบวกเพิ่มให้กับตัวเปรียบเทียบเฟสจะแปรค่าตามผลต่างความถี่ ω กับความถี่พิกัด ω_0 ดังสมการในที่ 5.7

$$\theta_F = K_F(\omega - \omega_0) \quad (5.7)$$

ตัวควบคุม PI จะควบคุมสัญญาณคลาดเคลื่อนจากตัวเปรียบเทียบเฟสดังในสมการที่ 5.8 ให้เท่ากับศูนย์ ซึ่งเราจะได้ความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ 5.9

$$\theta_e = (\theta_V - \theta_I) + K_F(\omega - \omega_0) \quad (5.8)$$

$$-(\theta_V - \theta_I) = K_F(\omega - \omega_0) \quad (5.9)$$

จากสมการที่ 5.9 หากการไฟฟ้าผลิตความถี่ไม่ตรงกับความถี่พิกัด ω_0 การป้อนกลับเฟสแบบบวกจะทำให้เกิดผลต่างเฟสของแรงดันกับกระแส แต่เนื่องจากค่า K_F ที่เราใช้จะมีค่าไม่สูงมากนักตัวประกอบกำลังจึงยังคงมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

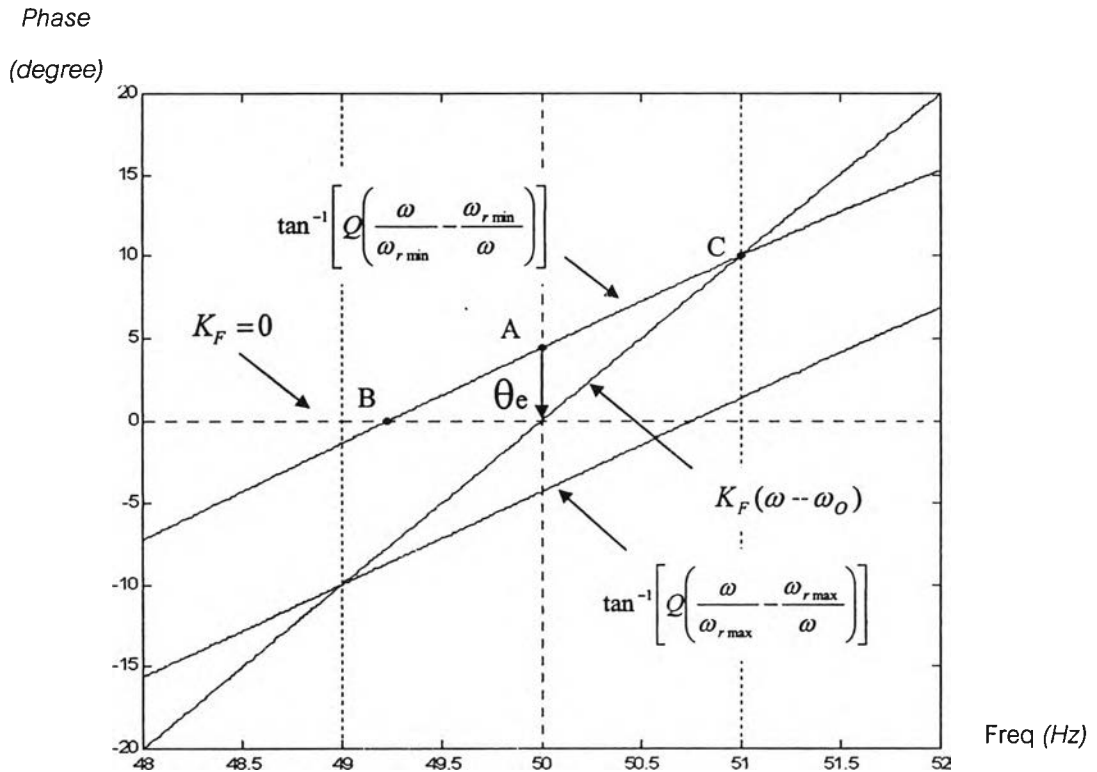
เมื่อแทนผลต่างเฟสของแรงดันกับกระแสของสมการที่ 5.9 ด้วยมุมเฟสของโหลด $\angle Z_L$ ในสมการที่ 5.3 จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 5.10 และแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 5.4

$$\tan^{-1} \left[Q \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right) \right] = K_F(\omega - \omega_0) \quad (5.10)$$

โดยที่ช่วงสภาวะที่โหลดมีปัญหาคือ $\omega_{r\min} < \omega < \omega_{r\max}$

เราจะอธิบายการทำงานของการทำงานของการป้อนกลับเฟสแบบบวก โดยยกตัวอย่างโหลดที่มีจุดทำงานอยู่ที่ A มีค่า $Q = 2.5$ และ $\omega_r = \omega_{r\min}$ ที่ความถี่ 50 Hz เมื่อการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงาน เฟส

$\theta_e = \theta_v - \theta_i$ จะมีค่าเป็นค่าลบตามลักษณะสมบัติของโหลด ตัวควบคุม PI จะปรับความถี่ลดลง ในกรณีที่ไม่มี การป้อนกลับแบบบวก ($K_F=0$) ระบบจะเคลื่อนที่เข้าสู่จุดสมดุลกำลังงาน ณ จุด B แต่ในกรณีที่มีการป้อนกลับเฟสแบบบวก ($K_F=1/36$ s) จุดสมดุลจะอยู่ที่จุด C ซึ่งอยู่ที่สตรงข้ามกันกับการเคลื่อนที่ของความถี่ ดังนั้นความถี่ของระบบจะลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกินขอบเขตการยอมรับและระบบก็จะตรวจพบปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ในที่สุด



รูปที่ 5.4 จุดสมดุลกำลังงานของระบบที่มีการป้อนกลับแบบบวก เมื่อ $Q=2.5$

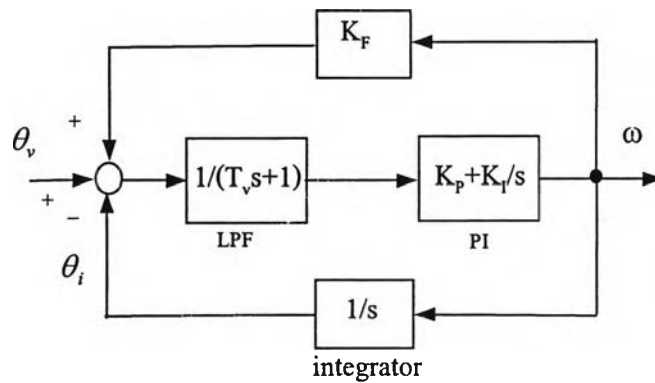
ในกรณี $\omega_r = \omega_{r \max}$ ก็สามารถอธิบายได้ทำนองเดียวกัน ที่ความถี่ 50 Hz เมื่อการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงาน เฟส θ_e จะมีค่าเป็นค่าบวก ตัวควบคุม PI จะปรับความถี่เพิ่มขึ้น ทำให้เฟส θ_e มีค่ามากขึ้น และส่งผลให้ความถี่ของระบบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกินขอบเขตการยอมรับ

5.4 เสถียรภาพของระบบที่มีการป้อนกลับเฟสแบบบวก

การป้อนกลับเฟสแบบบวกจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเชิงความถี่เมื่อการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงานแต่ต้องมีเสถียรภาพในการทำงานปกติ ดังนั้นเราจึงแยกการวิเคราะห์เป็น 2 กรณีดังนี้

5.4.1 กรณีการไฟฟ้าจ่ายกำลังงานเป็นปกติ

ในวงรอบการควบคุม เฟสของกระแสจะเกิดจากการอินทิเกรตความถี่ที่ได้จากวงรอบล็อกเฟส ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ค ส่วนเฟสของแรงดันจะขึ้นกับการไฟฟ้าและแทบจะไม่ขึ้นกับโหลดเลย ในกรณีนี้วงรอบล็อกเฟสในรูปที่ 5.1 สามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 5.5 โดยที่ T_V คือค่าคงตัวทางเวลาของวงจรรองผ่านต่ำ และ $K_p, K_I > 0$ จากแผนภาพบล็อกที่แสดงในรูปที่ 5.5 เราสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของระบบเพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ดังสมการที่ 5.12



รูปที่ 5.5 แผนภาพบล็อกวงรอบล็อกเฟสที่มีการป้อนกลับแบบบวก
ขณะการไฟฟ้าจ่ายกำลังงานเป็นปกติ

$$\frac{\omega}{\theta_v} = \frac{K_p s^2 + K_I s}{T_V s^3 + (1 - K_p K_F) s^2 + (K_p - K_I K_F) s + K_I} \quad (5.11)$$

จากการตรวจสอบเสถียรภาพโดยใช้เกณฑ์ของ Routh-Hurwitz พบว่าระบบจะมีเสถียรภาพ
ถ้า

$$\text{ก) } K_F < \frac{1}{K_p} \quad (5.12)$$

$$\text{ข) } K_F < \frac{(K_p^2 + K_I) - \sqrt{(K_p^2 + K_I)^2 - 4K_p K_I (K_p - T_V K_I)}}{2K_p K_I} \quad (5.13)$$

หรือ

$$K_F > \frac{(K_p^2 + K_I) + \sqrt{(K_p^2 + K_I)^2 - 4K_p K_I (K_p - T_V K_I)}}{2K_p K_I} \quad (5.14)$$

ดังนั้นเราจะต้องเลือกค่า K_F ที่สอดคล้องกับสมการ 5.12 ถึง 5.14 เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพในขณะที่การไฟฟ้าจ่ายกำลังงานเป็นปกติ แต่จะต้องทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเมื่อเกิดปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงขึ้น ดังที่จะได้กล่าวต่อไป

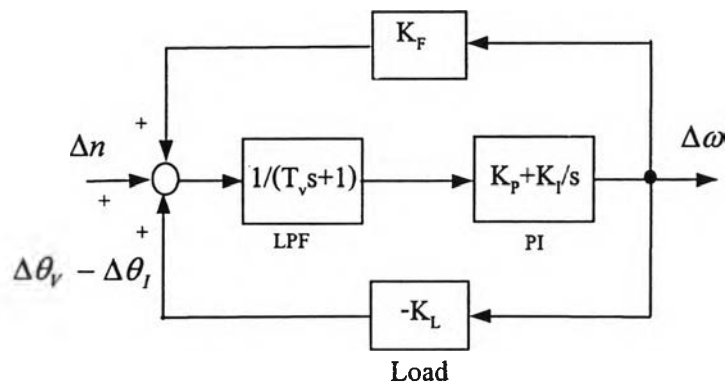
5.4.2 กรณีการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงาน

เมื่อการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงาน ระบบพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงจ่ายกำลังงานให้แก่โหลด ผลต่างเฟสของแรงดันกับกระแสจะขึ้นกับอิมพีแดนซ์ของโหลดที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ จากสมการที่ 5.3 เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างเฟส $\theta_V - \theta_I$ กับความถี่ ω ได้เป็น

$$\Delta\theta_V - \Delta\theta_I = \frac{dZ_L}{d\omega} \Delta\omega = -K_L \Delta\omega \quad (5.15)$$

$$\text{โดยที่ } K_L = \frac{\frac{Q}{\omega_r} \left(1 + \frac{\omega_r^2}{\omega^2}\right)}{1 + \left[Q \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}\right)\right]^2} \quad (5.16)$$

เราสามารถแสดงเป็นแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กๆ จุดสมดุลกำลังงานของระบบ เมื่อเกิดปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงได้ดังรูปที่ 5.6 โดยที่ Δn คือสัญญาณรบกวนของระบบ



รูปที่ 5.6 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของวงรอบล็อกเฟส
ที่มีการป้อนกลับแบบบวกขณะการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงาน

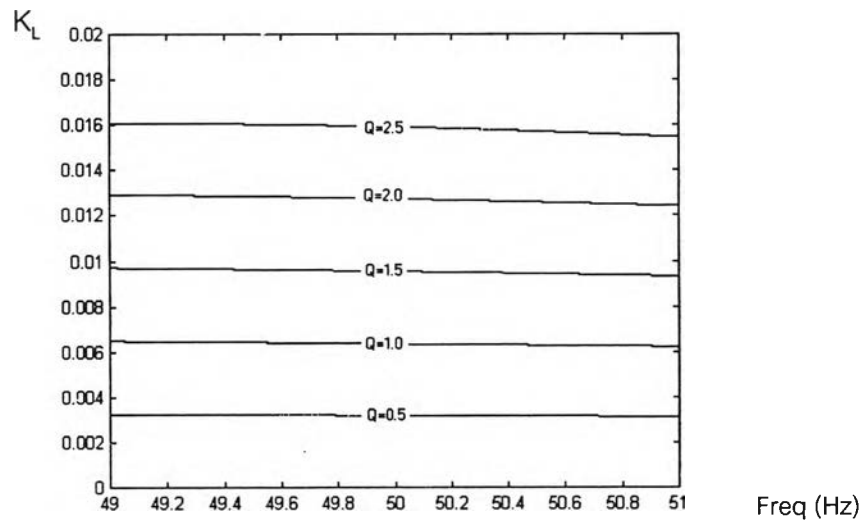
จากรูปที่ 5.6 เราสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบปิดของระบบเพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ดังสมการที่ 5.17

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta n} = \frac{K_I s + K_I}{T_V s^2 + (1 + K_P(K_L - K_F))s + K_I(K_L - K_F)} \quad (5.17)$$

เราจะพบว่าเงื่อนไขที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเป็นดังสมการที่ 5.18

$$K_F > K_L \quad (5.18)$$

จากสมการที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าเสถียรภาพของระบบจะขึ้นกับค่า K_L โดยที่ค่า K_L ของโหลดจะเป็นไปตามสมการที่ 5.16 ซึ่งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงกับความถี่มากนัก แต่จะมีค่าขึ้นกับค่า Q ของโหลดเป็นสำคัญ ดังแสดงความสัมพันธ์ของค่า K_L เทียบกับความถี่และค่า Q ของโหลดในรูปที่ 5.7 ซึ่งเป็นกรณีที่โหลดมีความถี่เรโซแนนซ์ $\omega_r = 100\pi$



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของ K_L กับโหลดที่มีความถี่เรโซแนนซ์ $\omega_r = 100\pi$

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น การเลือกค่าพารามิเตอร์ K_F จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบขณะการไฟฟ้าจ่ายกำลังงานเป็นปกติในสมการที่ 5.12 ถึง 5.14 และเงื่อนไขของการขาดเสถียรภาพของระบบขณะการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงานในสมการที่ 5.18 นอกจากนี้ความเร็วในการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงก็มีความสำคัญในการเลือกค่า K_F ดังที่มีการระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE std. 928 ว่าระบบจะต้องมีการป้องกันปรากฏการณ์ไอส์แลนดิง โดยการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงและหยุดการจ่ายกำลังงานภายในเวลา 2 วินาที นับตั้งแต่ปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงได้เกิดขึ้น

สำหรับการป้องกันปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงโดยวงรอบลือกเฟสที่มีการป้อนกลับแบบบวก อัตราการเลื่อนความถี่ของระบบจะขึ้นกับ ค่าพารามิเตอร์ของวงรอบลือกเฟส ค่าอัตราการป้อนกลับแบบบวก K_F และอัตราการเปลี่ยนเฟสของโหนด K_L ในที่นี้เราจะพิจารณาเฉพาะผลของ K_F และ K_L ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบเท่านั้น โดยที่ค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ T_v ของวงรอบลือกเฟสได้จากการออกแบบในภาคผนวก ค จากสมการที่ 5.17 จะเห็นได้ว่าขั้วของระบบจะขึ้นกับผลต่างของค่า K_F กับ K_L ถ้ากำหนดให้ค่า K_L คงที่ ขั้วของระบบจะเลื่อนไปด้านขวมมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าอัตราการป้อนกลับแบบบวก K_F ซึ่งจะให้อัตราการเลื่อนออกของความถี่สูงขึ้น ส่งผลให้ระบบตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงจากการตรวจสอบการเกินขอบเขตของความถี่ได้ในเวลาที่เร็วขึ้น ในทางกลับกันค่า K_L ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ขั้วของระบบเลื่อนเข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้น ทำให้ใช้เวลานานขึ้นในการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิง

นอกจากนี้ความเร็วของการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิง ยังขึ้นกับขนาดของสัญญาณรบกวน Δn ของระบบด้วย ความถี่ที่ผลิตจากวงรอบลือกเฟส จะมีระลอกคลื่นที่เกิดจากสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมของตัวเปรียบเทียบเฟส และระลอกคลื่นนี้จะประพศิตัวเป็นสัญญาณรบกวนของระบบ เราจะอาศัยการจำลองระบบโดยโปรแกรม MATLAB เพื่อพิจารณาถึงผลของสัญญาณรบกวนนี้ เพื่อที่จะได้เลือกค่า K_F ให้เพียงพอต่อการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงภายในเวลากำหนด และเนื่องจากความเร็วของการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงจะขึ้นกับผลต่างของค่า K_F และ K_L ดังนั้นที่ค่า K_L ของโหนดค่าหนึ่ง เมื่อเราได้ค่า K_F ที่พอเพียงต่อความเร็วในการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงแล้ว เราก็จะสามารถหาเป็นผลต่างระหว่าง K_F และ K_L สำหรับระบบใดๆ ที่เพียงพอต่อความเร็วในการตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงได้ ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

5.5 ผลการจำลองระบบ

เพื่อความสะดวกต่อการทดสอบระบบเปรียบเทียบกันในภายหลัง เราจะจำลองระบบที่มีโหนดเป็น RLC แบบขนาน มีค่า $Q = 1$, $\omega_r = 100\pi$ rad/s และมีค่า $K_L = 0.00637$ ($L=389$ mH, $C=26$ μ F, $R=120$ Ω) สำหรับค่าพารามิเตอร์ของวงรอบลือกเฟส เราจะใช้ค่าที่ได้ออกแบบไว้ในภาคผนวก ค โดยมีค่า $K_p=10.7$, $K_i=67$ และ $T_v=1/50$

ผลการจำลองระบบรูปที่ 5.8 ถึง 5.12 แสดงถึงความถี่ที่ได้จากวงรอบลือกเฟส ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า ในช่วงเวลา 0-1 วินาทีแรกการไฟฟ้าจะจ่ายกำลังงานเป็นปกติและวงรอบลือกเฟสจะพยายามผลิตความถี่เพื่อเข้าจังหวะกับแรงดันการไฟฟ้า จากนั้นเมื่อถึงวินาทีที่ 3 เราจะทำการตัดการจ่ายกำลังงานจากการไฟฟ้าเพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงความถี่

เราได้ทดสอบการใช้ค่าการป้อนกลับ K_F ต่างๆกันเป็นกรณีดังนี้

กรณีที่ 1 : ไม่มีการป้อนกลับเฟสแบบบวก ($K_F = 0$)

ผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าหลังการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงาน ความถี่จาก วงรอบล็อกเฟสจะไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าเดิม ยังมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 50Hz เราจะไม่สามารถตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงพบได้

กรณีที่ 2 : การป้อนกลับเฟสแบบบวกที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.021$

ผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นว่าการป้อนกลับเฟสแบบบวกจะทำให้ความถี่ของระบบไม่เสถียรและเกิดการเลื่อนความถี่หลังจากการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงาน

กรณีที่ 3 : การป้อนกลับเฟสแบบบวกที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.028$

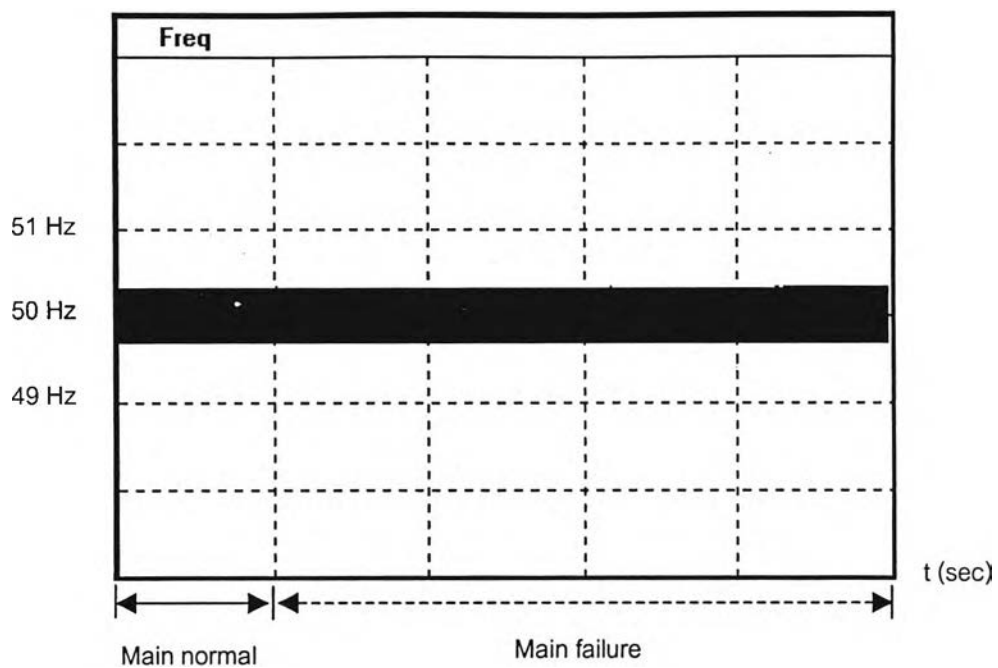
ผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าอัตราขยาย K_F จะทำให้ อัตราการเลื่อนความถี่สูงขึ้น แต่ยังไม่สามารถตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงได้ภายในเวลา 2 วินาที จากการเกินขอบเขตการยอมรับได้ของความถี่ (49-51 Hz)

กรณีที่ 4 : การป้อนกลับเฟสแบบบวกที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.042$

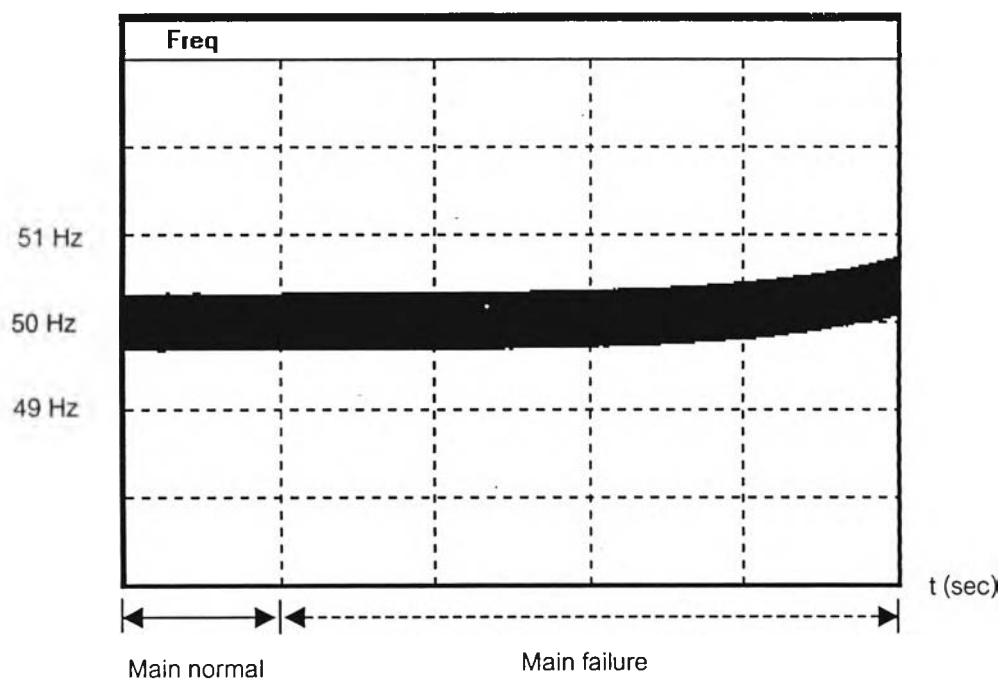
ผลการจำลองระบบในรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่า K_F จะทำให้อัตราการเลื่อนความถี่สูงขึ้น และสามารถตรวจจับความถี่ที่เกินขอบเขตการยอมรับได้ภายในเวลา 2 วินาที

กรณีที่ 5 : การป้อนกลับเฟสแบบบวกที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.072$

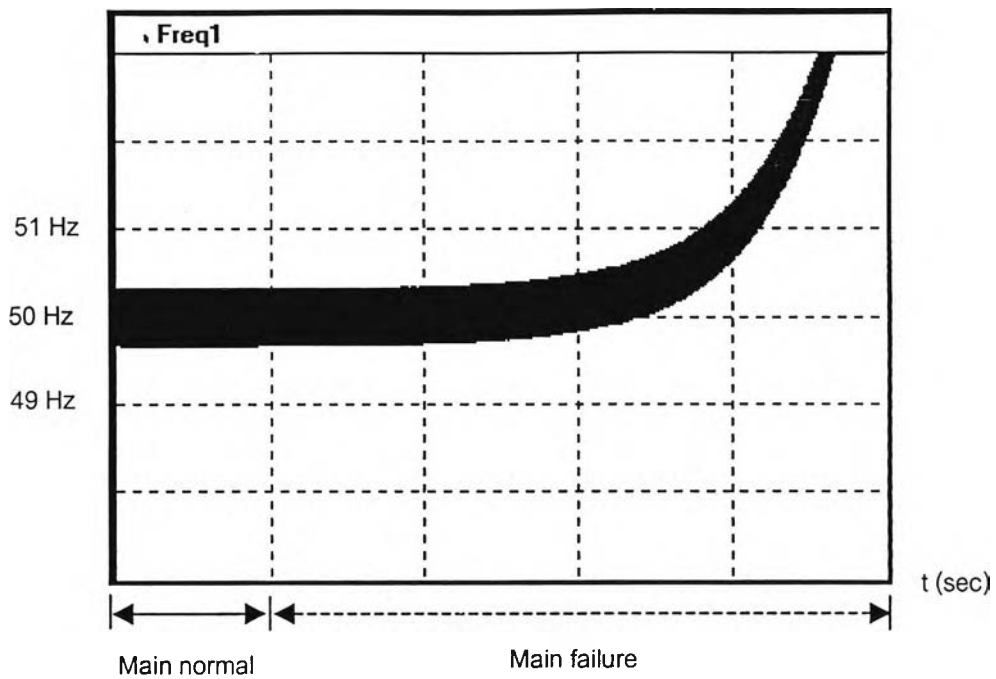
ในกรณีนี้ K_F มีค่าสูงเกินเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบในขณะที่การไฟฟ้าจ่ายกำลังงาน เป็นปกติที่แสดงไว้ในอสมการที่ 5.13 ผลการจำลองรูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นว่าวงรอบล็อกเฟส จะให้ความถี่ที่แกว่งและเพิ่มขนาดขึ้นเรื่อยๆ ระบบจะขาดเสถียรภาพในการควบคุมความถี่และไม่สามารถเข้าจังหวะกับแรงดันการไฟฟ้า ดังนั้นถึงแม้ว่าการเพิ่มค่า K_F จะทำให้เราสามารถตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงได้เร็วขึ้น แต่จะต้องมีค่าไม่สูงเกินไปจนระบบขาดเสถียรภาพ



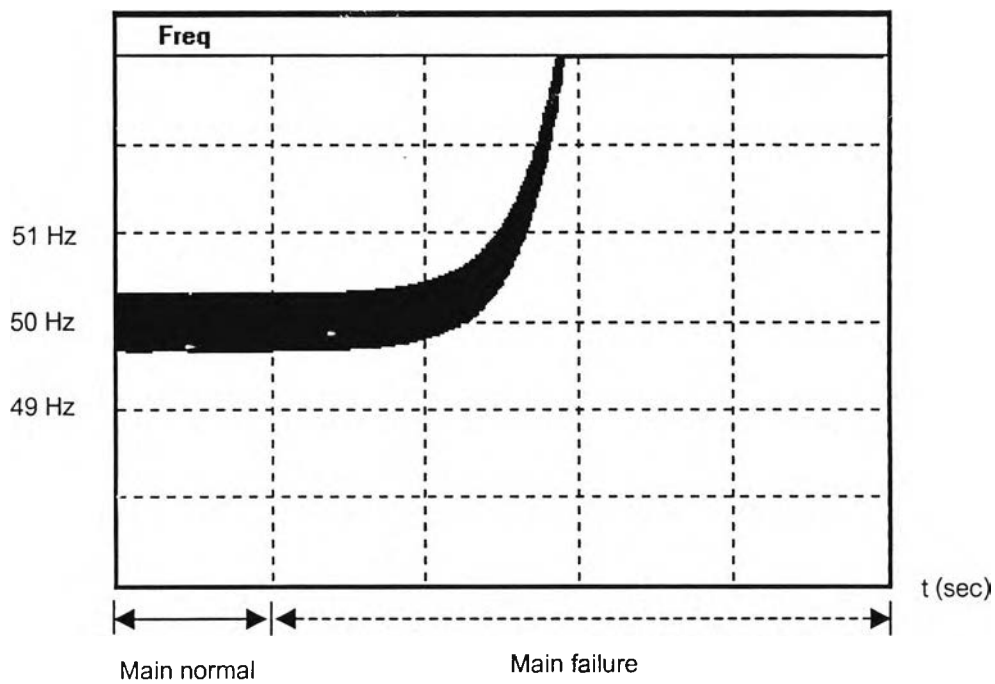
รูปที่ 5.8 ความถี่จากวงรอบลือกเฟส ที่ไม่มีการป้อนกลับเฟสแบบบวก ($K_F = 0$)



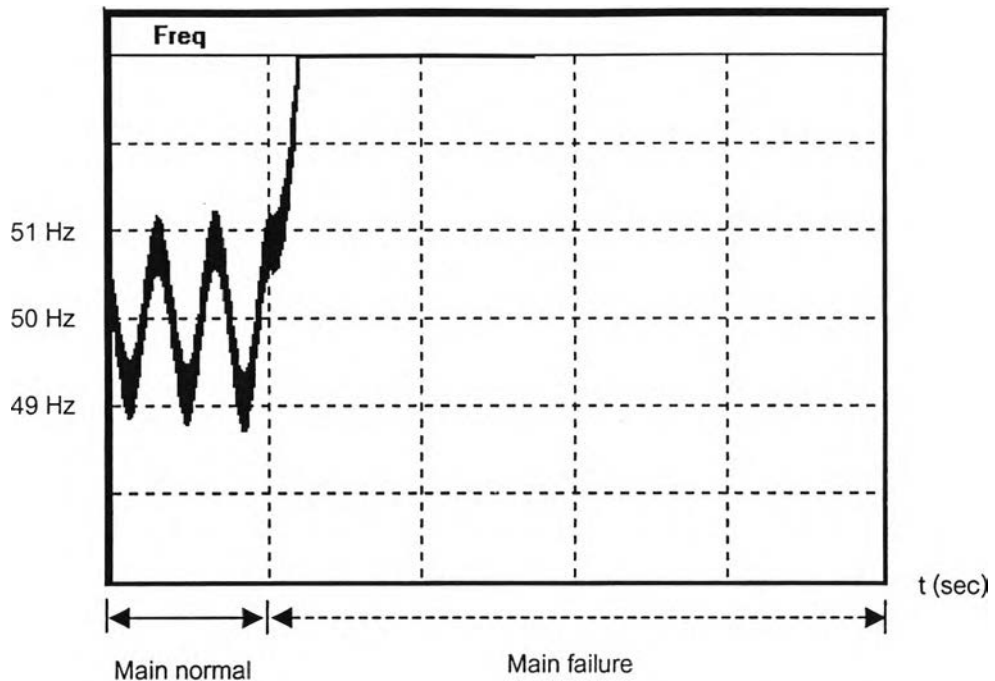
รูปที่ 5.9 ความถี่จากวงรอบลือกเฟส ที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.021$



รูปที่ 5.10 ความถี่จากวงจรบล็อกเฟส ที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.028$



รูปที่ 5.11 ความถี่จากวงจรบล็อกเฟส ที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.042$



รูปที่ 5.12 ความถี่จากวงจรรบกวนเฟส ที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.072$

5.6 ผลการทดสอบระบบ

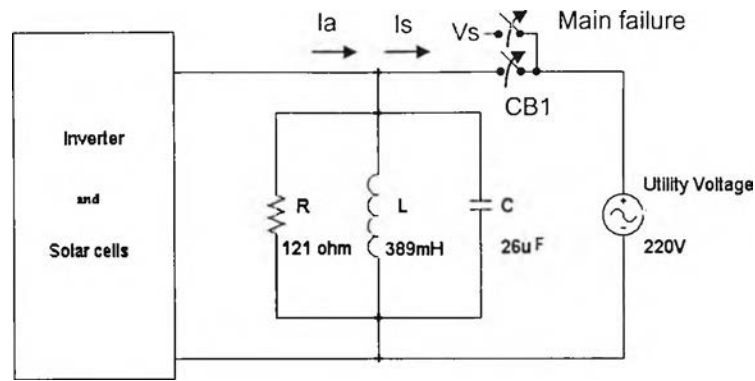
ระบบที่ใช้ทดสอบปรากฏการณ์ไอส์แลนด์จะประกอบด้วย

ก) โหลดที่เป็น RLC แบบขนาน โดยเลือกค่า $L=389\text{mH}$ และ $C=26\mu\text{F}$ เพื่อให้ความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 50 Hz ในกรณีที่ $Q=1$ จะได้ค่า $R=121\Omega$ (ใช้หลอดไฟแบบไส้ขนาด 100 W จำนวน 4 ดวง)

ข) ระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ เราจะต้องปรับระดับพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์(ปรับระดับแสง)ให้กำลังงานที่จ่ายออกมาใกล้เคียงกับกำลังงานของโหลด เพื่อให้เกิดสมดุลกำลังงานซึ่งสามารถสังเกตได้จากกระแสที่จ่ายให้แก่การไฟฟ้า (I_s) จะมีขนาดเล็กที่สุด

ค) สวิตช์ตัดการจ่ายกำลังงานจากการไฟฟ้า เพื่อจำลองปรากฏการณ์ไอส์แลนด์

เราจะทำการทดสอบและวัดสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยเราจะจำลองการหยุดจ่ายกำลังงานของการไฟฟ้าโดยการตัดวงจรด้วยสวิตช์ CB1 สัญญาณ V_s ก็จะลดลงเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงถึงเวลาเริ่มต้นของการเกิดปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ เมื่อเกิดปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ วงรบกวนเฟสที่มีการป้อนกลับเฟสแบบบวกจะเลื่อนความถี่จนเกินขอบเขตการยอมรับได้ ซึ่งในที่นี้เราตั้งค่าขอบเขตการยอมรับได้ของความถี่ไว้ที่ 49 ถึง 50 Hz หากระบบตรวจพบปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ก็จะสั่งให้อินเวอร์เตอร์หยุดทำงาน ดังจะสังเกตได้จากกระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์ (I_a) ลดลงเป็นศูนย์



รูปที่ 5.13 แผนภาพบล็อกชุดทดสอบปรากฏการณ์ไอส์แลนด์

เราได้ทำการทดสอบโดยเปลี่ยนค่าการป้อนกลับ K_F ต่างๆ กันเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองระบบ ได้เป็นกรณีดังนี้

กรณีที่ 1: ไม่มีการป้อนกลับเฟสแบบบวก ($K_F = 0$)

ผลการทดสอบระบบในรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นว่าหลังการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงาน ความถี่จากวงจรบล็อกเฟสจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณรบกวนของระบบ แต่จะไม่เกิดการเลื่อนออกของความถี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความถี่ยังอยู่ในขอบเขตการยอมรับได้และระบบไม่สามารถตรวจพบปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ได้

กรณีที่ 2: การป้อนกลับเฟสแบบบวกที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.021$

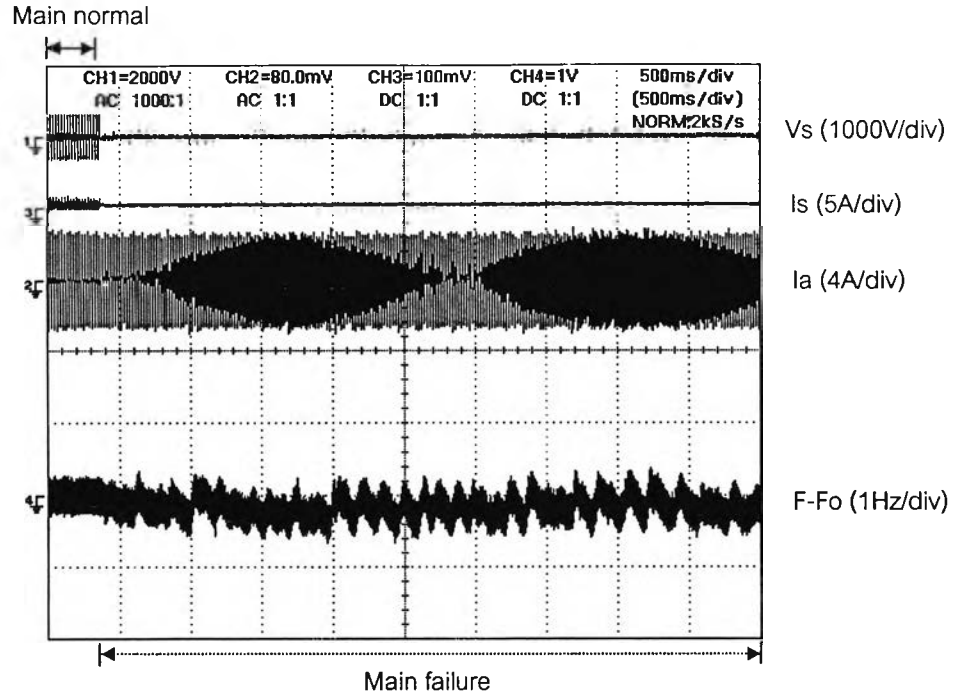
ผลการทดสอบระบบในรูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นว่าการป้อนกลับเฟสแบบบวกจะทำให้ความถี่ของระบบไม่เสถียรและเกิดการเลื่อนความถี่หลังจากการไฟฟ้าหยุดจ่ายกำลังงาน ระบบสามารถตรวจจับพบปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ได้ในเวลา 4.6 วินาที ซึ่งยังไม่เร็วเพียงพอ

กรณีที่ 3: การป้อนกลับเฟสแบบบวกที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.028$

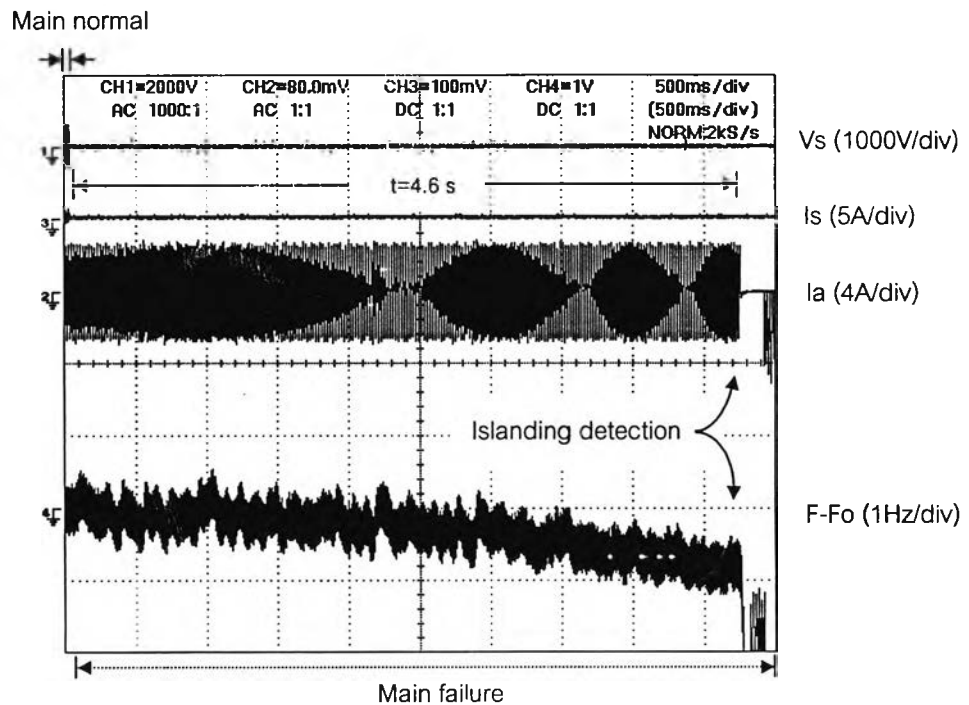
ผลการทดสอบระบบในรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าอัตราขยาย K_F จะทำให้อัตราการเลื่อนความถี่สูงขึ้น แต่ก็ยังไม่สามารถตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ได้ในเวลา 2 วินาที

กรณีที่ 4: การป้อนกลับเฟสแบบบวกที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.042$

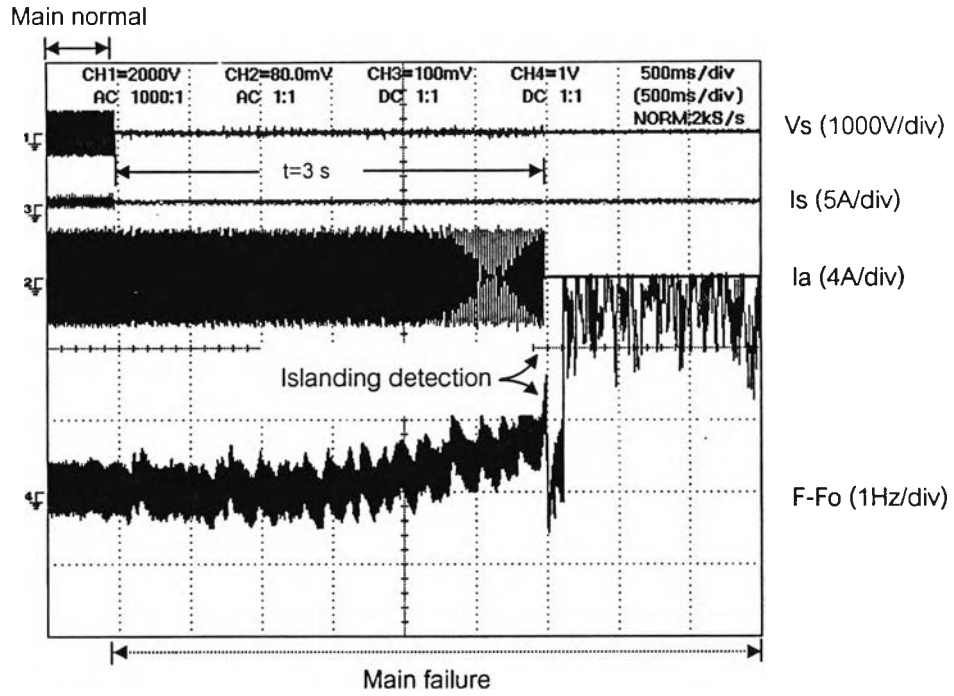
ผลการทดสอบระบบในรูปที่ 5.17 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่า K_F จะทำให้อัตราการเลื่อนความถี่สูงขึ้น และสามารถตรวจจับความถี่ที่เกินขอบเขตได้ภายในเวลา 2 วินาที ตามมาตรฐาน IEEE std. 928



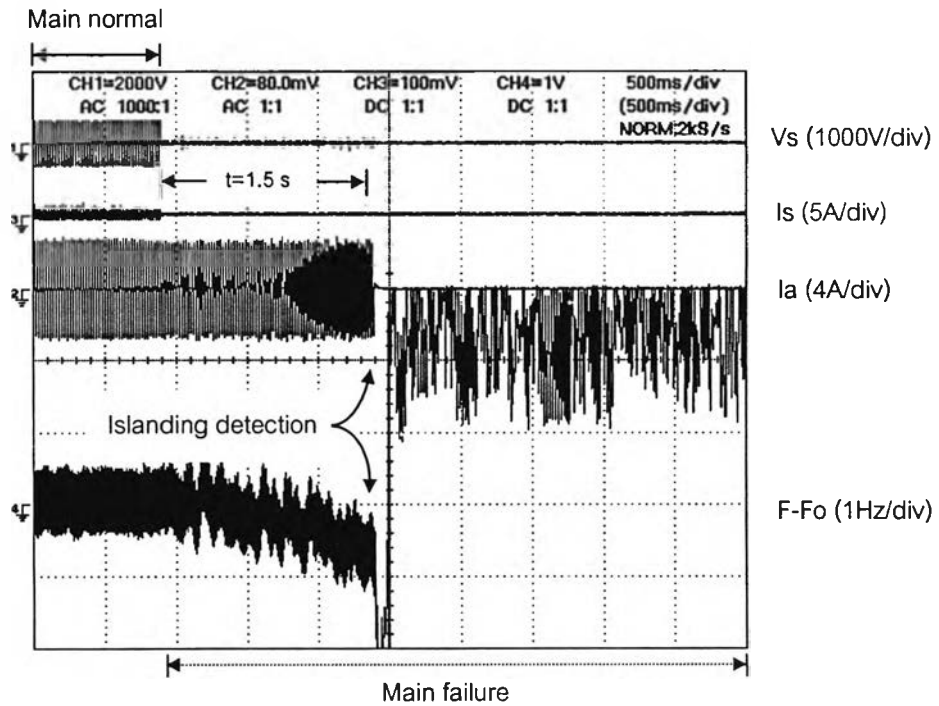
รูปที่ 5.14 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ของระบบที่ไม่มีการป้องกันเฟสแบบบวก



รูปที่ 5.15 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนด์ของระบบที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.021$



รูปที่ 5.16 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงของระบบที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.028$



รูปที่ 5.17 การตรวจจับปรากฏการณ์ไอส์แลนดิงของระบบที่มีค่าอัตราขยาย $K_F = 0.042$