

บทที่ 3

การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟสโดยวิธีซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูป

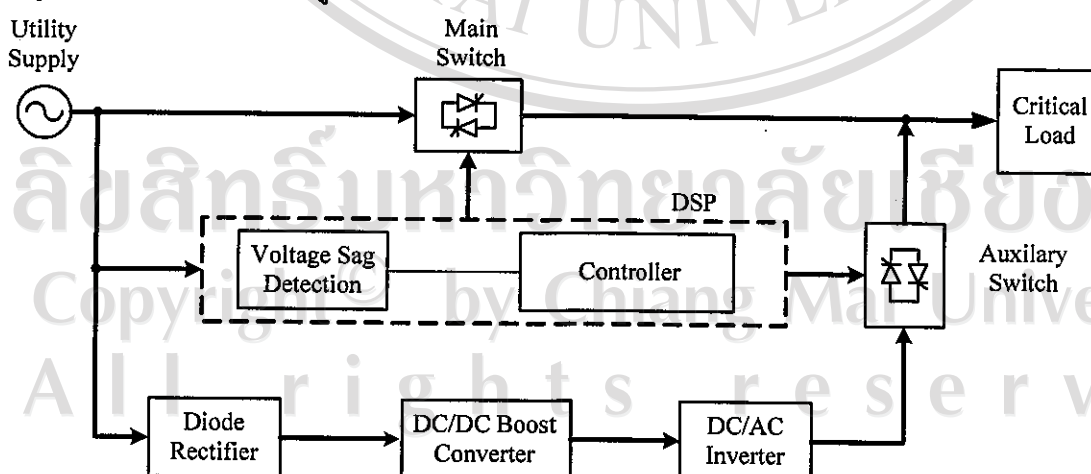
3.1 บทนำ

ค่ามมเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการทำงานของตัวแปลงกำลัง (Power converters) ที่เชื่อมต่อ (Interface) อยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเช่น วงจรเรียงกระแส วงจรกรอง แอ็กทีฟ ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ แหล่งจ่ายกำลังชนิดไม่ขาดช่วง (Uninterruptible power supplies : UPS) ระบบโฟโตโวลตาอิกต่อกับกริดระบบไฟฟ้า (Grid-connected photovoltaic system) และระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานลม เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านี้ทำงานหรือหยุดทำงาน โดยที่แรงดันของแหล่งจ่ายแบบไม่สมดุล แรงดันตกชั่วขณะและการเปลี่ยนแปลงของความถี่ในแหล่งจ่ายไฟฟ้าคือสถานะทั่วไปที่ตัวแปลงกำลังเหล่านี้ต้องพบอยู่เสมอ ซึ่งข้อมูลค่ามมเฟสภายใต้สถานะเหล่านี้สามารถหาได้โดยใช้วิธีซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูปซึ่งไม่เพียงที่จะสามารถล็อกมมเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้าอย่างรวดเร็วและยังให้ค่าระลอก (Ripple) ของเอาต์พุตที่ต่ำอีกด้วย

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์และการออกแบบของซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูปเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟสภายใต้เงื่อนไขในสถานะการเกิดแบบสมดุลและไม่สมดุลทั้งในกรณีที่ระบบเชิงเส้นและระบบที่มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ของแหล่งจ่าย

3.2 แนวคิดในการออกแบบและสร้างวงจรการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะ

วงจรตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะมีหลักการทำงานภายใต้แนวคิดของต้นแบบอุปกรณ์แก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะดังรูปที่ 3.1



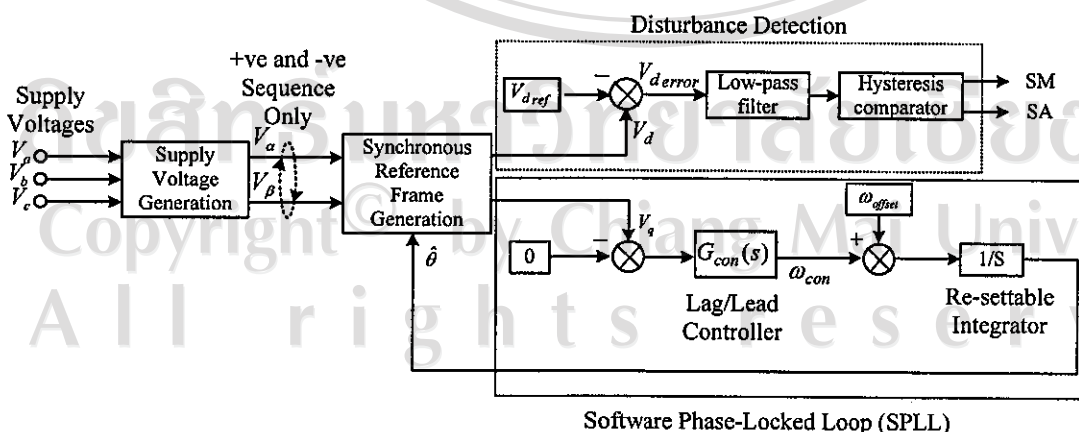
รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของต้นแบบอุปกรณ์แก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะ

จากรูปที่ 3.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าทดแทนไปสู่โหลดในกรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ และภายใต้การทำงานปกติโหลดจะเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยผ่านสวิตช์หลัก (Main Switch: SM) เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะ สวิตช์หลักจะเปิดวงจร และสวิตช์ช่วย (Auxiliary Switch: SA) จะเริ่มปิดวงจรเพื่อเชื่อมต่อโหลดเข้ากับอินเวอร์เตอร์ และเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติโหลดจะเชื่อมต่อเข้ากับสวิตช์หลักเช่นเดิม ซึ่งอินเวอร์เตอร์จะทำงานตลอดเวลา และแรงดันเอาต์พุตจะซิงโครไนซ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ดังนั้นในส่วนของวงจรตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage sag detection) จะถูกใช้งานเพื่อที่จะเปลี่ยนถ่ายโหลดระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยสั่งการสวิตช์ระหว่างสวิตช์หลักกับสวิตช์ช่วย และต้องมีคุณสมบัติคือสามารถตรวจจับขนาด ช่วงเวลาในการเกิดและการเลื่อนเฟสของแรงดันตกชั่วขณะในสภาวะการเกิดแบบสมดุลและไม่สมดุล ทั้งในกรณีที่ระบบเป็นระบบเชิงเส้นและระบบที่มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ของแหล่งจ่าย ซึ่งการตรวจจับได้เร็วเท่าใดก็จะสามารถช่วยแก้ปัญหาได้เร็วเท่านั้น อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปใช้ในการพัฒนาออกแบบและสร้างต้นแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วขณะในรูปแบบอื่นต่อไป

3.3 โครงสร้างของวงจร

โครงสร้างของวงจรการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะที่น่าเสนอนี้แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยที่การทำงานของวงจรจะเริ่มต้นจากการแปลงแรงดันของแหล่งจ่ายชนิดสามเฟส (V_a, V_b, V_c) ให้เป็นในรูปของแรงดันกระแสตรงบนแกน $d-q$ ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส (V_d, V_q) จากนั้นซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูป ซึ่งมีหน้าที่สร้างสัญญาณที่มีความถี่และเฟสตรงกับแรงดันของแหล่งจ่าย จะล็อกให้มุมเอาต์พุต ($\hat{\theta}$) ของซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูปให้มีค่าตรงกับมุมแรงดันของแหล่งจ่าย (θ) ซึ่งหลักการนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแหล่งจ่ายได้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของวงจรการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟส

จากรูปที่ 3.2 สัญลักษณ์และตัวแปรที่ใช้มีความหมายดังต่อไปนี้

V_a, V_b, V_c	คือแรงดันของแหล่งจ่าย
V_α, V_β	คือองค์ประกอบของแรงดันบนแกนหยุดนิ่ง
V_d, V_q	คือองค์ประกอบของแรงดันบนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโรตัส

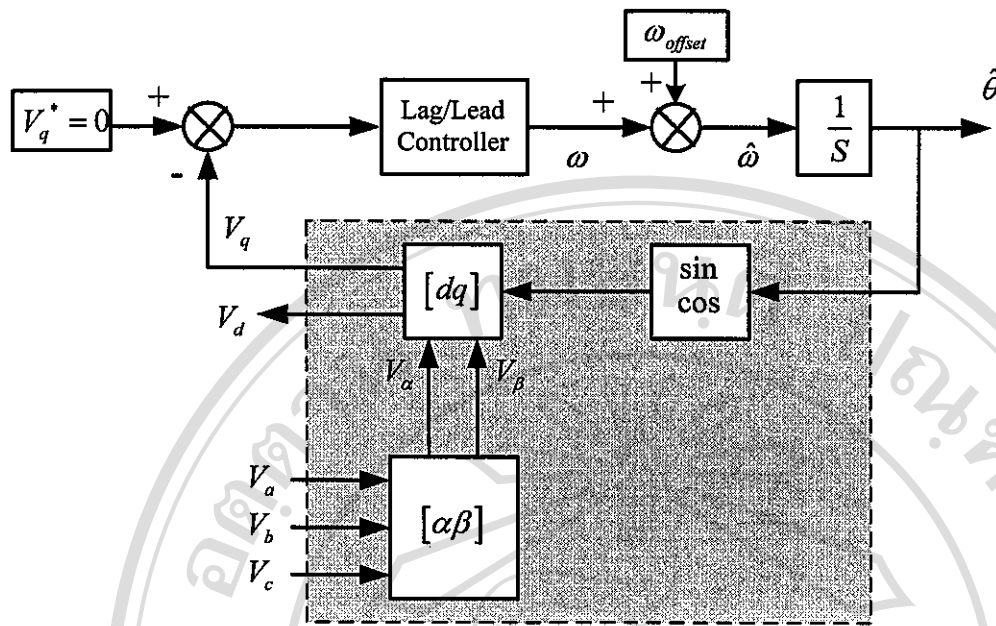
ในกรณีที่แรงดันสามเฟสแบบสมดุล V_d จะมีค่าเป็นแรงดันกระแสตรงคงที่ค่าหนึ่ง แต่ถ้าเกิดแรงดันตกชั่วขณะ V_d จะเป็นค่าหนึ่งแปรตามลักษณะการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ นั่นคือ V_d จะเป็นตัวชี้วัดการเกิดแรงดันตกชั่วขณะว่าเริ่มต้นและสิ้นสุดเมื่อใดโดย V_d ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (V_{dref}) เพื่อหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (V_{derror}) จากนั้นนำค่าความผิดพลาดที่ได้สู่กระบวนการตรวจจับการรบกวน (Disturbance detection) ก่อนการตัดสินใจจะให้สวิตช์หลักและสวิตช์ช่วย เปิดหรือปิดวงจรซึ่งกระบวนการตรวจจับการรบกวนเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมการทำงานของวงจรการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะ โดยกระบวนการนี้มีหน้าที่หลัก 2 ประการที่จะต้องทำให้โหลดที่มีความสำคัญ (Critical Load) ทำงานให้ได้อย่างเหมาะสม นั่นคือ

- 1) เนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะมีทั้งสภาวะการเกิดแบบสมดุลและไม่สมดุล ดังนั้นกระบวนการนี้จะต้องสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะได้อย่างทันทีทันใด เพราะถ้าตรวจจับได้เร็วเพียงใดย่อมทำให้อุปกรณ์แก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะทำงานได้รวดเร็วมากขึ้นเท่านั้น
- 2) กระบวนการจะต้องสามารถแยกแยะให้ได้ว่า แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในขณะนั้นเกินกว่าขอบเขตหรือยัง เพื่อการเปลี่ยนโหมดการทำงานที่ถูกต้องแม่นยำหรือถ้าหากยังไม่เกินขอบเขต เช่นเกิดแรงดันตกชั่วขณะ 2 % หรือ 3 % ก็ยังไม่ต้องเปลี่ยนโหมดการทำงาน

3.4 หลักการของวิธีซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูบ

หลักการของวิธีซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูบแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยเริ่มต้นจากแปลงแรงดันของแหล่งจ่ายชนิดสามเฟส (V_a, V_b, V_c) ให้อยู่ในรูปแรงดันกระแสตรงบนแกน $d-q$ (V_d, V_q) ซึ่งเป็นแกนอ้างอิงที่เชิงโรตัสกับความถี่ของแหล่งจ่าย ค่ามุมเฟส ($\hat{\theta}$) ที่ถูกใช้ในการแปลงนี้ได้มาจากการอินทิเกรตค่าคำสั่งของความถี่ ($\hat{\omega}$) ถ้าค่าคำสั่งของความถี่เหมือนกับความถี่ของแหล่งจ่าย แรงดัน V_d และ V_q จะมีค่าเป็นแรงดันกระแสตรงโดยขึ้นอยู่กับค่ามุมเฟส ($\hat{\theta}$)

ตัวควบคุมแบบเฟสตามและเฟสนำ (Lag/lead controller) ถูกใช้ในการหาค่าของ $\hat{\theta}$ (หรือ $\hat{\omega}$) ที่ซึ่งจะป้อนให้แรงดันป้อนกลับ V_q ไปสู่ค่าคำสั่ง V_q^* หรืออาจจะกล่าวได้ว่าผลของการปรับค่าบนแกนหมุนในแกนอ้างอิงมีความเกี่ยวเนื่องซึ่งกันและกัน ความถี่ในการหมุนของแกนอ้างอิงนี้จะเป็นตัวบอกความถี่ของแหล่งจ่าย



รูปที่ 3.3 แผนภาพของวิธีซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลุ๊ป

3.4.1 แบบจำลองของซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลุ๊ป

จากแผนภาพของวิธีซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลุ๊ปดังรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าแรงดันของแหล่งจ่ายชนิดสามเฟส (V_a, V_b, V_c) ถูกแปลงให้อยู่ในรูปแรงดันกระแสตรงบนแกน $d-q$ ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส (V_d, V_q) ซึ่งในวิธีซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลุ๊ปจะเป็นการควบคุมแบบปิด (Closed-loop) ผ่านค่า V_q เท่านั้น เมื่อกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันชนิดสามเฟสเป็นแบบสมมูล แบบจำลองของซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลุ๊ปสามารถหาได้จากการแปลงดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\theta) \\ V_m \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

โดยที่ θ คือฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นกับเวลา ($\theta = \omega t$) สำหรับสมการในการแปลงแรงดันอินพุตจากสัญญาณในรูปสามเฟส ไปอยู่ในแกนหยุดนิ่ง (Stationary frame) ดังสมการที่ (3.2)

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.2) การแปลงแรงดันชนิดสามเฟสให้อยู่ในรูปแรงดันกระแสสลับ 2 เฟสบนแกนหมุนหนึ่ง สามารถอธิบายได้คือแรงดันเป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งมีทั้งขนาด (Magnitude) และมุม (Phase) ดังนั้นจึงสามารถแปลงแรงดันชนิดสามเฟสให้อยู่ในรูป $[\alpha, \beta]$ ได้โดยแยกแรงดันไปอยู่ในรูปของจำนวนจริง (Real) กับจำนวนจินตภาพ (Imaginary) โดยกำหนดแรงดันชนิดสามเฟสเป็นดังสมการที่ (3.3)

$$\begin{aligned} V_a &= V \angle 0^\circ = V (\cos(0) + j \sin(0)) = V(1 + j0) \\ V_b &= V \angle -120^\circ = V \left(\cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) + j \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \right) = V\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ V_c &= V \angle 120^\circ = V \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right) = V\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) นำค่าจำนวนจริงมารวมเข้าด้วยกันก็จะได้ค่าในแถวแรกของสมการที่ (3.2) และเมื่อนำค่าจำนวนจินตภาพรวมเข้าด้วยกันก็จะได้ค่าในแถวที่สองของสมการที่ (3.2) โดยที่ค่า $2/3$ ที่นำมาคูณเพื่อทำให้เป็นแบบบรรทัดฐานหรือแบบนอร์มาไลซ์ (Normalize) ค่า V_α ให้เป็น 1 เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกต และจากสมการที่ (3.2) จัดรูปสมการใหม่จากการคำนวณจะได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\begin{aligned} V_\alpha &= \frac{2}{3} \left[V \angle 0^\circ - \frac{1}{2} V \angle -120^\circ - \frac{1}{2} V \angle 120^\circ \right] = \frac{2}{3} \left[\frac{3}{2} V \angle 0^\circ \right] \\ &= V \angle 0^\circ = V_a \\ V_\beta &= \frac{2}{3} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} V \angle -120^\circ + \frac{\sqrt{3}}{2} V \angle 120^\circ \right] = \frac{2}{3} \left[\frac{3}{2} V \angle 90^\circ \right] = V \angle 90^\circ \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (V_c - V_b) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ \frac{1}{\sqrt{3}} (V_c - V_b) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

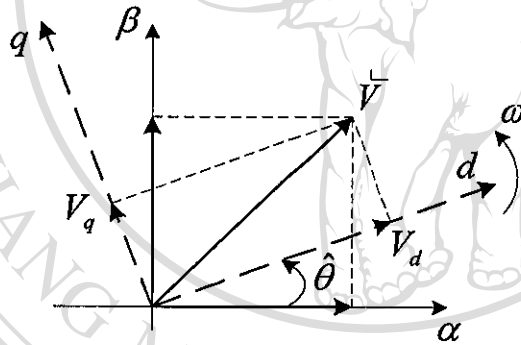
จากนั้นแปลงสัญญาณที่ได้ไปอยู่ในแกนหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous frame) โดยใช้มุมเอาต์พุตของซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูป ($\hat{\theta}$) คือ

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & -\sin(\hat{\theta}) \\ \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

โดยที่ ตัวห้อย α, β คือ องค์ประกอบของแรงดันบนแกนหยุดนิ่ง

ตัวห้อย d, q คือ องค์ประกอบของแรงดันบนแกนหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส

การแปลงแรงดันกระแสสลับที่แกนหยุดนิ่ง ให้เป็นแรงดันกระแสตรงที่อยู่ในแกนหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส เปรียบเสมือนการที่สังเกตการเคลื่อนที่ของวัตถุ ในขณะที่มีความเร็วเท่ากับวัตถุซึ่งจะทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของวัตถุได้ง่ายในกรณีที่วัตถุเคลื่อนที่ไปจากเดิมโดยความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงของแกนหยุดนิ่งกับแกนหมุน

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (3.1) และ (3.4) ลงในสมการที่ (3.5) จะได้

$$\begin{aligned} V_d &= \cos \hat{\theta} \cdot V_\alpha - \sin \hat{\theta} \cdot (V_c - V_b) / \sqrt{3} \\ &= V_m \cos \hat{\theta} \cdot \cos \theta - V_m \sin \hat{\theta} \cdot (\cos(\theta + 2\pi/3) - \cos(\theta - 2\pi/3)) / \sqrt{3} \\ &= V_m \cos \hat{\theta} \cdot \cos \theta - V_m \sin \hat{\theta} \cdot (-2 \cdot \sin \theta \cdot \sin(\pi/3)) / \sqrt{3} \\ &= V_m \cos \hat{\theta} \cdot \cos \theta + V_m \sin \hat{\theta} \cdot \sin \theta = V_m \cdot \cos(\hat{\theta} - \theta) \\ &= V_m \cdot \cos(\Delta\theta) \\ V_q &= \sin \hat{\theta} \cdot V_\alpha + \cos \hat{\theta} \cdot (V_c - V_b) / \sqrt{3} \\ &= V_m \sin \hat{\theta} \cdot \cos \theta - V_m \cos \hat{\theta} \cdot \sin \theta = V_m \cdot \sin(\hat{\theta} - \theta) \\ &= V_m \cdot \sin(\Delta\theta) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) \\ \sin(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) ถ้าค่าความผิดพลาด ($\Delta\theta$) มีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่ามุมแรงดันของแหล่งจ่าย (θ) และมุมเอาต์พุตของซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูป ($\hat{\theta}$) นั้นมีค่าตรงกัน ผลที่เกิดขึ้นคือ V_d จะเท่ากับ V_m และ V_q จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเราจึงสามารถล็อกให้มุมเอาต์พุตของซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูปมีค่าตรงกับมุมแรงดันของแหล่งจ่ายโดยการควบคุมขนาดให้ V_d เท่ากับ V_m หรือ V_q เท่ากับศูนย์อย่างใดอย่างหนึ่งแต่การควบคุมขนาดให้ V_q เท่ากับศูนย์มีความเหมาะสมมากกว่าเพราะจะไม่ได้รับผลกระทบจาก V_m ที่อาจจะแปรค่าไปได้ ซึ่งสมการที่ (3.6) จะได้ $V_q = V_m (\sin(\Delta\theta))$ ในกรณีที่ค่า $\Delta\theta$ มีค่าน้อย เทอม $\sin(\Delta\theta)$ ก็จะใกล้เคียงความเป็นเชิงเส้นคือ $\sin(\Delta\theta) \approx \Delta\theta$ ส่วนตัวพลาเน็ต (Plant) จะเป็นตัวอินทิเกรต (Integrator) และเทอมป้อนไปหน้า (Feedforward) ω_{Offset} มีไว้เพื่อให้ระบบทำงานได้ดีขึ้น นั่นคืออัตราขยายของตัวควบคุมแบบเฟสตามและเฟสนำไม่จำเป็นต้องใหญ่มาก ω_{Offset} ที่ใช้คือ 100π ซึ่งเป็นค่าที่จุดทำงาน ส่วนตัวควบคุมแบบเฟสตามและเฟสนำทำหน้าที่เพียงปรับความถี่ให้คอยติดตามความถี่ของแหล่งจ่ายซึ่งจะแปรค่าไปมารอบจุดทำงานเท่านั้น

3.5 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูปเนื่องจากความเพี้ยนของแหล่งจ่าย

3.5.1 แหล่งจ่ายแรงดันชนิดสามเฟสแบบไม่สมดุล

แหล่งจ่ายแรงดันเมื่อพิจารณาถึงความไม่สมดุลของแรงดันในแต่ละเฟสสามารถแสดงได้สมการที่ (3.7)

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\theta) \\ V_m (1 + \beta) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m (1 + \gamma) \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

โดยที่ β และ γ เป็นค่าคงที่แปลงแรงดันสามเฟสไปอยู่บนแกนพิกัดหนึ่ง โดยใช้สมการที่ (3.2)

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \cos(\theta) \\ V_m (1 + \beta) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m (1 + \gamma) \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) - \frac{1}{2} \left((1+\beta) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + (1+\gamma) \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \right) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \left((1+\beta) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + (1+\gamma) \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) - \frac{1}{2} \left((1+\beta) \left(\cos(\theta) \cos(\frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta) \sin(\frac{2\pi}{3}) \right) + (1+\gamma) \left(\cos(\theta) \cos(\frac{2\pi}{3}) - \sin(\theta) \sin(\frac{2\pi}{3}) \right) \right) \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \left(-(1+\beta) \left(\cos(\theta) \cos(\frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta) \sin(\frac{2\pi}{3}) \right) + (1+\gamma) \left(\cos(\theta) \cos(\frac{2\pi}{3}) - \sin(\theta) \sin(\frac{2\pi}{3}) \right) \right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) - \frac{1}{2} \left(2 \cos(\theta) \cos(\frac{2\pi}{3}) + (\beta + \gamma) \cos(\theta) \cos(\frac{2\pi}{3}) + (\beta - \gamma) \sin(\theta) \sin(\frac{2\pi}{3}) \right) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \left(2 \sin(\theta) \sin(\frac{2\pi}{3}) + (\beta - \gamma) \cos(\theta) \cos(\frac{2\pi}{3}) + (\beta + \gamma) \sin(\theta) \sin(\frac{2\pi}{3}) \right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot V_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) - \frac{1}{2} \left(-\cos(\theta) - \frac{1}{2} (\beta + \gamma) \cos(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} (\beta - \gamma) \sin(\theta) \right) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\sqrt{3} \sin(\theta) - \frac{1}{2} (\beta - \gamma) \cos(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} (\beta + \gamma) \sin(\theta) \right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot V_m \begin{bmatrix} \frac{3}{2} \cos(\theta) + \frac{1}{4} (\beta + \gamma) \cos(\theta) - \frac{\sqrt{3}}{4} (\beta - \gamma) \sin(\theta) \\ -\frac{3}{2} \sin(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{4} (\beta - \gamma) \cos(\theta) - \frac{3}{4} (\beta + \gamma) \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

$$V_\alpha = V_m \cos(\theta) + V_m \left[\frac{1}{6}(\beta + \gamma) \cos(\theta) - \frac{1}{2\sqrt{3}}(\beta - \gamma) \sin(\theta) \right] \quad (3.8)$$

$$V_\beta = -V_m \sin(\theta) + V_m \left[\frac{1}{2\sqrt{3}}(\beta - \gamma) \cos(\theta) - \frac{1}{2}(\beta + \gamma) \sin(\theta) \right] \quad (3.9)$$

จะเห็นได้ว่าเทอมที่ 2 ทางด้านขวามือของสมการที่ (3.8) และ (3.9) เกิดจากแรงดันของแหล่งจ่ายในแต่ละเฟสไม่สมดุล จากนั้นแปลงสัญญาณจากแกนพิกัดหนึ่งไปอยู่ในแกนหมุนด้วยความเร็วเชิงโรตอรัส โดยการแทนค่าจากสมการที่ (3.8) และ (3.9) ลงในสมการที่ (3.5) จะได้

$$\begin{aligned} V_q &= V_m \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) + \frac{1}{6}(\beta + \gamma) \cos(\theta) - \frac{1}{2\sqrt{3}}(\beta - \gamma) \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) + \frac{1}{2\sqrt{3}}(\beta - \gamma) \cos(\theta) - \frac{1}{2}(\beta + \gamma) \sin(\theta) \end{bmatrix} \\ V_q &= V_m \left[\sin(\hat{\theta}) \cos(\theta) + \frac{1}{6}(\beta + \gamma) \sin(\hat{\theta}) \cos(\theta) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2\sqrt{3}}(\beta - \gamma) \sin(\hat{\theta}) \sin(\theta) - \cos(\hat{\theta}) \sin(\theta) + \frac{1}{2\sqrt{3}}(\beta - \gamma) \cos(\hat{\theta}) \cos(\theta) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2}(\beta + \gamma) \cos(\hat{\theta}) \sin(\theta) \right] \\ V_q &= V_m \left[\sin(\hat{\theta} - \theta) + \frac{1}{2\sqrt{3}}(\beta - \gamma) (\cos(\hat{\theta}) \cos(\theta) - \sin(\hat{\theta}) \sin(\theta)) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2}(\beta + \gamma) \cos(\hat{\theta}) \sin(\theta) + \frac{1}{6}(\beta + \gamma) \sin(\hat{\theta}) \cos(\theta) \right] \quad (3.10) \end{aligned}$$

ถ้าให้ $\Delta\theta = \hat{\theta} - \theta$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้น $\hat{\theta} \approx \theta$ หรือ $\hat{\theta} + \theta \approx 2\theta$ สมการที่ (3.10) สามารถเขียนให้เป็นรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$\begin{aligned} V_q &\cong V_m \left[\sin(\hat{\theta} - \theta) + \frac{1}{2\sqrt{3}}(\beta - \gamma) \cos(2\theta) - \frac{1}{6}(\beta + \gamma) \sin(2\theta) \right] \\ V_q &\cong V_m \sin(\hat{\theta} - \theta) - V_m E_{pu} \cos(2\theta + \phi_{pu}) \quad (3.11) \end{aligned}$$

โดยที่ $E_{pu} = \sqrt{\left(\frac{\beta - \gamma}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\beta + \gamma}{6}\right)^2}$ และ $\phi_{pu} = -\tan^{-1}\left(\frac{(\beta + \gamma)}{\sqrt{3}(\beta - \gamma)}\right)$

เมื่อ V_d ถูกควบคุมขนาดให้เท่ากับศูนย์โดยตัวควบคุมแบบเฟสตามและเฟสนำ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันชนิดสามเฟสแบบไม่สมดุลคือ

$$\Delta\theta \cong E_{pu} \cos(2\theta + \phi_{pu}) \quad (3.12)$$

ดังนั้นจะทำให้ทราบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันชนิดสามเฟสแบบไม่สมดุลมีองค์ประกอบความถี่ 2ω เมื่อ ω คือความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ($\omega = d\theta/dt$) ซึ่งถ้าออกแบบตัวควบคุมสามารถออกแบบให้มีความกว้างแคบ (Bandwidth) ที่สูงเพื่อให้มีความสามารถในการลือกุมได้เป็นอย่างดี แต่ถ้าเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟสแบบไม่สมดุลสามารถทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันโดยการสร้างส่วนประกอบลำดับลบของแรงดันขึ้น ดังนั้นถ้าออกแบบตัวควบคุมให้มีความกว้างแคบที่สูง เอาต์พุตของซอฟต์แวร์เฟสล็อกก็จะมีระลอก ดังนั้นสามารถแก้ไขได้โดยเลือกความกว้างแคบให้ต่ำลงโดยให้มีระลอกเนื่องจากแรงดันไม่สมดุลปรากฏที่เอาต์พุตของซอฟต์แวร์เฟสล็อกอุปบ้าง

3.5.2 แหล่งจ่ายแรงดันชนิดสามเฟสที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิก

แหล่งจ่ายแรงดันเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบฮาร์มอนิก แสดงได้ดังสมการที่ (3.13)

$$\begin{aligned} V_a &= V_1 \cos(\theta) + V_5 \cos(5\theta) + V_7 \cos(7\theta) + \dots \\ V_b &= V_1 \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + V_5 \cos(5(\theta - \frac{2\pi}{3})) + V_7 \cos(7(\theta - \frac{2\pi}{3})) + \dots \\ V_c &= V_1 \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) + V_5 \cos(5(\theta + \frac{2\pi}{3})) + V_7 \cos(7(\theta + \frac{2\pi}{3})) + \dots \end{aligned} \quad (3.13)$$

โดยที่ $V_1, V_5, V_7, \dots$ คือขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิก

แปลงแรงดันสามเฟสไปอยู่บนแกนหยุดนิ่ง โดยใช้สมการที่ (3.2) จะได้

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \cos(\theta) + V_5 \cos(5\theta) + V_7 \cos(7\theta) + \dots \\ V_1 \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + V_5 \cos(5(\theta - \frac{2\pi}{3})) + V_7 \cos(7(\theta - \frac{2\pi}{3})) + \dots \\ V_1 \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) + V_5 \cos(5(\theta + \frac{2\pi}{3})) + V_7 \cos(7(\theta + \frac{2\pi}{3})) + \dots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{3}{2}V_1 \cos(\theta) + \frac{3}{2}V_5 \cos(5\theta) + \frac{3}{2}V_7 \cos(7\theta) + \dots \\ -\frac{3}{2}V_1 \sin(\theta) + \frac{3}{2}V_5 \sin(5\theta) - \frac{3}{2}V_7 \sin(7\theta) + \dots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \cos(\theta) + V_5 \cos(5\theta) + V_7 \cos(7\theta) + \dots \\ -V_1 \sin(\theta) + V_5 \sin(5\theta) - V_7 \sin(7\theta) + \dots \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

จากนั้นแปลงสัญญาณจากแกนหยุดนิ่งไปอยู่ในแกนหมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส โดยการแทนค่าจากสมการที่ (3.14) ลงในสมการที่ (3.5) จะได้

$$V_q = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \cos(\theta) + V_5 \cos(5\theta) + V_7 \cos(7\theta) + \dots \\ -V_1 \sin(\theta) + V_5 \sin(5\theta) - V_7 \sin(7\theta) + \dots \end{bmatrix}$$

$$V_q = V_1 (\sin(\hat{\theta}) \cos(\theta) - \cos(\hat{\theta}) \sin(\theta)) + V_5 (\sin(\hat{\theta}) \cos(5\theta) + \cos(\hat{\theta}) \sin(5\theta)) + V_7 (\sin(\hat{\theta}) \cos(7\theta) - \cos(\hat{\theta}) \sin(7\theta)) + \dots \quad (3.15)$$

ถ้าให้ $\Delta\theta = \hat{\theta} - \theta$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้น $\hat{\theta} \approx \theta$ หรือ $\hat{\theta} + \theta \approx 2\theta$ สมการที่ (3.15) สามารถเขียนให้เป็นรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$V_q = V_1 \sin(\hat{\theta} - \theta) + (V_5 - V_7) \sin(6\theta) + (V_{11} - V_{13}) \sin(12\theta) + \dots \quad (3.16)$$

ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกคือ

$$\Delta\theta = E_{h6} \sin(6\theta) + E_{h12} \sin(12\theta) + \dots \quad (3.17)$$

$$\text{โดยที่ } E_{h6} = \frac{V_5 - V_7}{V_1}, E_{h12} = \frac{V_{11} - V_{13}}{V_1}$$

จากสมการที่ (3.17) ทำให้ทราบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิก มีองค์ประกอบความถี่ของ $6\omega, 12\omega, \dots$ ซึ่งเป็นการคูณ 6 เข้ากับความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดัน ดังนั้นสำหรับปัญหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกในแรงดันสามารถแก้ไขได้โดยเลือกความกว้างแถบให้ต่ำลงเพื่อจำกัดให้มุมเอาต์พุตของซอฟต์แวร์เฟสล็อกถูปรอบเรียบขึ้น

3.6 การออกแบบตัวควบคุมแบบเฟสตามและเฟสนำ

ตัวควบคุมแบบเฟสตามและเฟสนำในรูปที่ 3.3 เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากการเชื่อมต่อฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งในรูปของ $G_{con}(s) = K \cdot \frac{(1+T_1s)}{(1+T_2s)}$ ตัวควบคุมแบบเฟสตามและเฟสนำจะถูกเลือกนำมาใช้งานเพราะว่าสามารถแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะในการกรองที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ [12] ดังนั้นจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิด ($G_{open}(s)$) และแบบปิด ($G_{close}(s)$) ของซอฟต์แวร์เฟสล็อกดังสมการต่อไปนี้

$$G_{open}(s) = \frac{K}{s} \cdot \frac{(1+T_1s)}{(1+T_2s)} \quad (3.18)$$

จาก $G_{close}(s) = \frac{G_{open}}{1+G_{open}} ; 1+G_{open} = 1 + \frac{K(1+T_1s)}{s(1+T_2s)} = \frac{s(1+T_2s) + K(1+T_1s)}{s(1+T_2s)}$

$$G_{close}(s) = \frac{K(1+T_1s)}{s + T_2s^2 + K + KT_1s}$$

$$= \frac{K(1+T_1s)}{T_2s^2 + (1+KT_1)s + K}$$

$$= \frac{\frac{K}{T_2}(1+T_1s)}{s^2 + \left(\frac{1+KT_1}{T_2}\right)s + \frac{K}{T_2}}$$

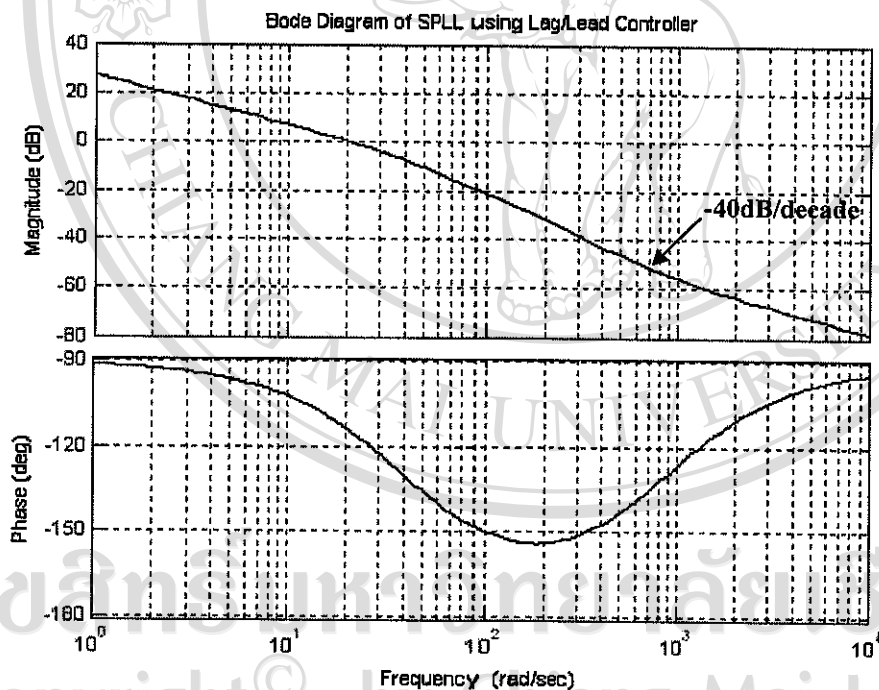
$$\therefore G_{close}(s) = \frac{\left(2\xi\omega_n - \frac{1}{T_2}\right)s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.19)$$

เมื่อ $\xi = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{KT_1+1}{\sqrt{KT_2}}\right)$ และ $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T_2}}$

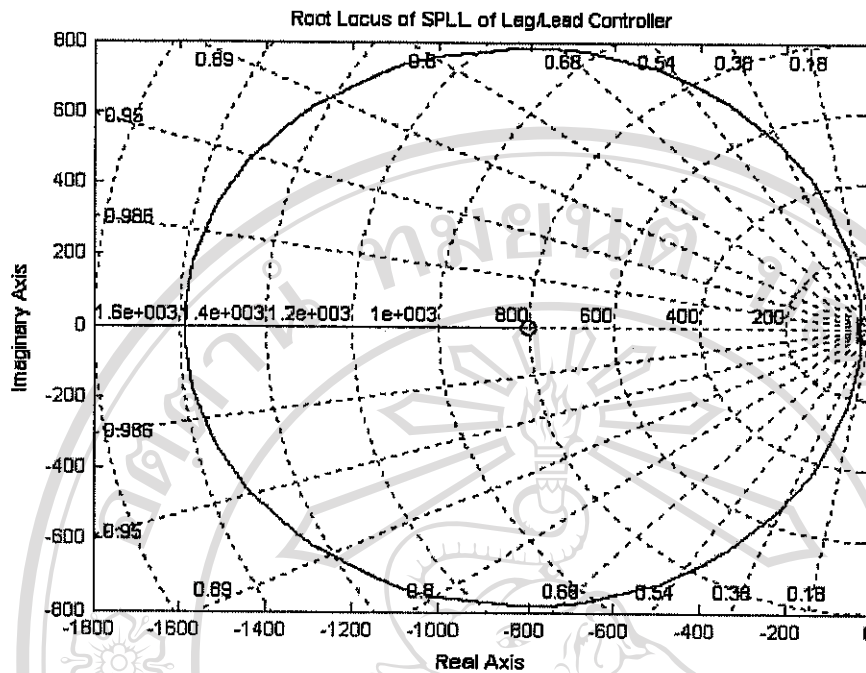
โดยที่ ω_n คือ ความเร็วเชิงมุมในการแกว่งตามธรรมชาติ (undamped natural frequency)

ξ คือ อัตราการหน่วงของระบบ (damping ratio)

จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนมี double integration รวมอยู่ด้วย ซึ่งมีวิธีมาตรฐานในการออกแบบ อัตราขยายของตัวควบคุมคือวิธี symmetrical optimum (SO) [18] โดยที่จุดประสงค์อย่างหนึ่งของ ตัวควบคุมก็เพื่อที่จะกรองฮาร์มอนิกที่มีความถี่ 100 และ 300 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันของ แหล่งจ่ายในแต่ละเฟสไม่สมดุล และแรงดันของแหล่งจ่ายที่มีองค์ประกอบฮาร์มอนิกตามลำดับ โดยที่ได้แสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.5 และต้องรับประกันความทนทานต่อความล่าช้าของเวลา จากการสุ่ม (Sampling Delay Time) ได้ เพื่อให้บรรลุนจุดประสงค์ ค่า T_1 และ T_2 จะต้องถูกปรับแต่ง เพื่อให้ค่าลดทอนมีค่า -50 dB ด้วยความชันเท่ากับ -40 dB/decade ซึ่งค่าอื่น ๆ ที่ใช้เป็นดังนี้ $\xi = 0.707$; $\omega_n = 31.415$ rad/s; $K = 22.85$; $T_1 = 0.001242$ และ $T_2 = 0.02315$ รูปที่ 3.5 แสดง แผนภาพโบดีของระบบแบบเปิดและแผนภาพทางเดินของรากของระบบแบบปิด ซึ่งจากแผนภาพ โบดีจะเห็นว่าค่าอัตราขยายเท่ากับ -50 dB และค่ามุมเฟสเท่ากับ -139° เมื่อความถี่ (ω) มีค่า เท่ากับ 628.3 rad/s และระบบมีส่วนเผื่อเฟส (Phase margin) เท่ากับ 41° ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมแบบเฟสดำเนินการและมีคุณลักษณะทางด้านการกรองที่ดี



ก) แผนภาพโบดี



ข) ทางเดินของราก

รูปที่ 3.5 แผนภาพโพลีและทางเดินของรากของระบบควบคุมซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูป

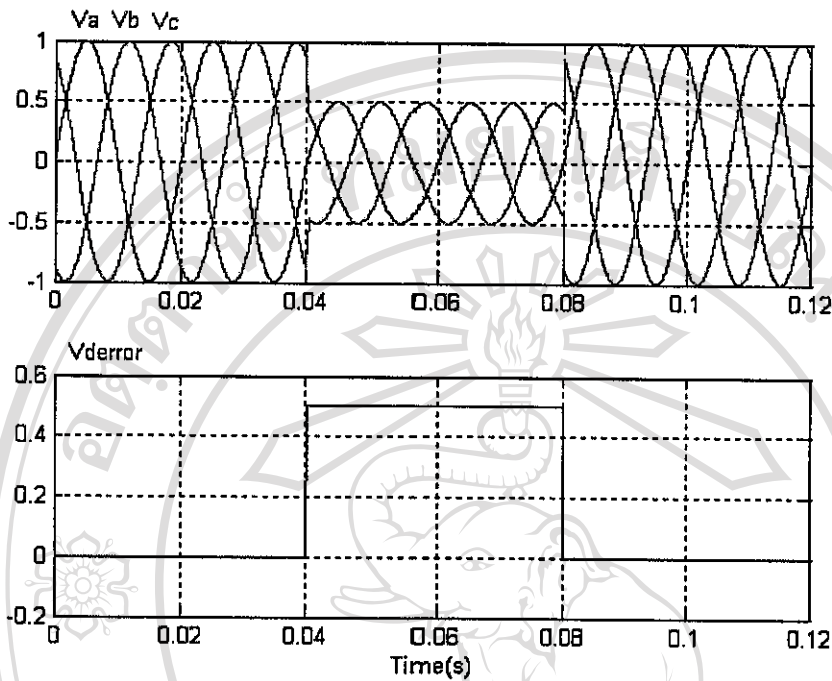
3.7 กระบวนการตรวจจัดการรบกวน

จากรูปที่ 3.4 แรงดันชนิดสามเฟสจะแสดงอยู่ในรูปแรงดันกระแสตรงบนแกนหมุน $d-q$ ดังนั้นถ้าเกิดความเพี้ยนที่แหล่งจ่ายแรงดัน จะส่งผลกระทบต่อให้เกิดความผิดเพี้ยนในค่า $d-q$ ด้วย ซึ่งค่านี้นำไปสู่การผลิตสัญญาณที่เรียกว่าค่าความผิดพลาด ($V_{d\text{ error}}$) ที่ซึ่งจะแสดงการเบี่ยงเบนของแหล่งจ่ายแรงดันอินพุตไปจากค่าอ้างอิง โดยการตั้งค่าให้แรงดันชนิดสามเฟสแบบสมดุลเป็นค่าอ้างอิง ($V_{d\text{ ref}}$) ดังนั้นแรงดันกระแสตรงที่ได้จากสมการที่ (3.5) ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงก็จะได้เป็นค่าความผิดพลาดซึ่งเป็นขนาดของเวกเตอร์ดังสมการที่ (3.20)

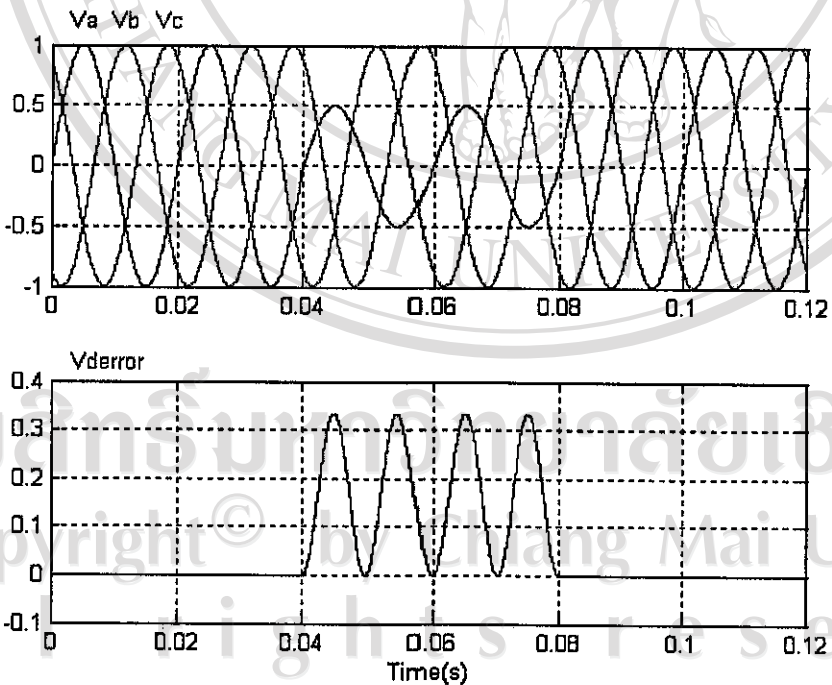
$$V_{d\text{ error}} = V_{d\text{ ref}} - V_d \quad (3.20)$$

ในกรณีแรงดันชนิดสามเฟสแบบสมดุล ค่า $d-q$ จะเท่ากับค่าอ้างอิงจึงส่งผลให้ $V_{d\text{ error}}$ เท่ากับ 0 แต่ถ้าเกิดแรงดันตกชั่วขณะ $V_{d\text{ error}}$ จะเป็นค่าหนึ่งแปรตามลักษณะการเกิดแรงดันตกชั่วขณะนั้นคือ $V_{d\text{ error}}$ จะเป็นตัวชี้วัดการเกิดแรงดันตกชั่วขณะว่าเริ่มต้นและสิ้นสุดเมื่อใด ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของแหล่งจ่ายชนิดสามเฟสและ $V_{d\text{ error}}$ ในกรณี

ที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟสแบบสมดุลและไม่สมดุล โดยกำหนดให้แรงดันเฟสของแหล่งจ่ายมีขนาดเท่ากับ 1 เปอรูยูนิต (1 p.u.)



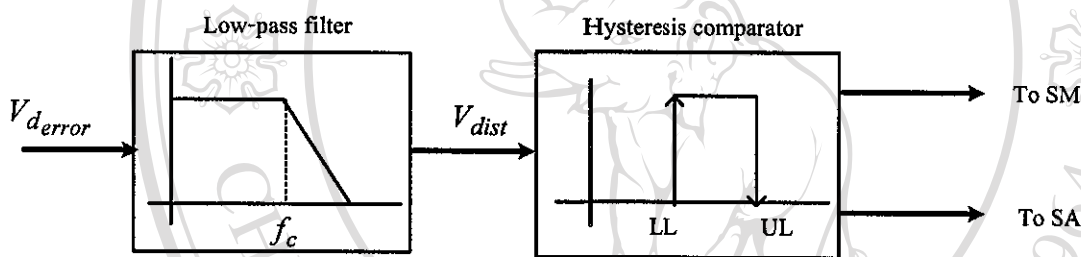
ก) แรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟสแบบสมดุลขนาด 50 % (50% three-phase balanced sag)



ข) แรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟสแบบไม่สมดุลขนาด 50 % (50% three-phase unbalanced sag)

รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของแหล่งจ่ายชนิดสามเฟสและ V_{error}

ด้วยเหตุที่ $V_{d\ error}$ เป็นสัญญาณที่จะบ่งบอกเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้น สัญญาณจึงถูกกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter: LPF) จากนั้นเข้าสู่ตัวเปรียบเทียบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis comparator) เพื่อสร้างสัญญาณเปิด/ปิด ตามระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ดังรูปที่ 3.7 โดยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านจะทำให้สัญญาณ $V_{d\ error}$ มีความราบเรียบมากขึ้นเพื่อเป็นการป้องกันสัญญาณรบกวนจากค่าระลอก (Ripple) ส่วนเกินที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะและเป็นส่วนสำคัญอย่างมากสำหรับการเกิดแรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟสแบบไม่สมดุลเพราะถ้าค่าระลอกแกว่งไปมาระหว่างขอบเขตที่ตั้งไว้ก็จะทำให้ตัวเปรียบเทียบฮิสเทอรีซิสทำงานไม่ตรงตามช่วงเวลาของการเกิดได้ ส่วนขอบเขตล่าง (Lower Limit; LL) และขอบเขตบน (Upper Limit; UL) ของตัวเปรียบเทียบฮิสเทอรีซิสจะเป็นตัวกำหนดค่าความไวของอุปกรณ์ว่าจะให้เปลี่ยนโหมดการทำงานเมื่อใด เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์หลัก (SM) และสวิตช์ช่วย (SA)



รูปที่ 3.7 แผนภาพบล็อกของกระบวนการตรวจจับการรบกวน