

บทที่ 4

การออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุม สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

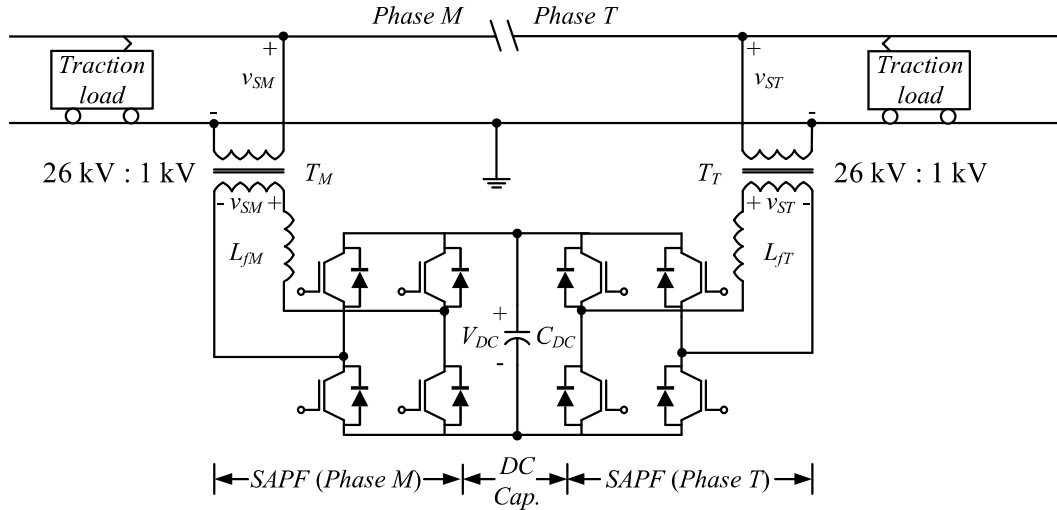
4.1 กล่าวนำ

การกำจัดการรบกวนในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานจำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรและระบบควบคุมที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถจัดการเสียดชงที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนการตรวจจับการรบกวนด้วยวิธี PQF ในบทนี้จึงนำเสนอโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน การออกแบบระบบควบคุม รวมไปถึงการทดสอบสมรรถนะการกำจัดการรบกวนของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบ โดยรายละเอียดโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.2 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.3 การออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.4 การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.5 การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.6 และผลการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบการกำจัดการรบกวนในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมที่พิจารณาจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.7

4.2 โครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ลักษณะโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่สามารถใช้ในการกำจัดการรบกวนในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมที่พิจารณาสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะโครงสร้าง คือ โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม (ฐานันดร, 2564) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวใช้ตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียวซึ่งง่ายต่อการควบคุมระดับแรงดัน และยังเป็นทางเลือกในการสร้างระบบกำจัดการรบกวนด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานอีกด้วย โดยโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) จำนวน 2 ชุดที่มีแหล่งสะสมพลังงานเป็นตัวเก็บประจุ (C_{DC}) ร่วมกันจำนวน 1 ตัว โดยแต่ละชุดจะมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ IGBT จำนวน 4 ตัวที่ต่อกันในรูปแบบวงจรบริดจ์ นอกจากนี้ยังมีตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน (L_{JM}, L_{JT}) จำนวน 2 ตัว และเนื่องจากที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมที่พิจารณามีพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่สูง (26 kV) จึงมีการต่อใช้

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (single-phase linear transformer) (T_M, T_T) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าเหลือ 1 kV ซึ่งเป็นการช่วยลดขนาดพิกัดของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน



รูปที่ 4.1 วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

4.3 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (L_{fM}, L_{fT}) จะใช้วิธีการของ D.M.E. Ingram and S.D. Round (Ingram and. Round, 1997) โดยวิธีดังกล่าวจะให้ผลการออกแบบเป็นค่าขอบเขตสูงสุดของขนาดตัวเหนี่ยวนำ ($L_{f(max)}$) จากนั้นจึงพิจารณาเลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าอยู่ภายใต้ค่าขอบเขตดังกล่าว การออกแบบด้วยวิธีการของ D.M.E. Ingram and S.D. Round จะอาศัยค่ากระแสไหลของระบบที่พิจารณาในการออกแบบ นอกจากนี้เนื่องจากระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณามีขนาดกระแสไหลทั้งสองเฟส (i_{LM}, i_{LT}) เท่ากัน ดังนั้นค่า $L_{f(max)}$ ที่ได้จากการออกแบบของทั้งสองเฟส (เฟส M และ T) จึงมีขนาดเท่ากัน โดยสามารถอธิบายรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของกระแสอ้างอิงเทียบกับเวลา ($\max(\frac{di_c^*}{dt})$) ซึ่งจะประมาณค่าโดยใช้ค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสไหล ($i_h(t)$) ที่ทำให้ $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ มีค่าสูงที่สุด โดยสามารถคำนวณค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ ได้จากสมการที่ (4.1) และ (4.2)

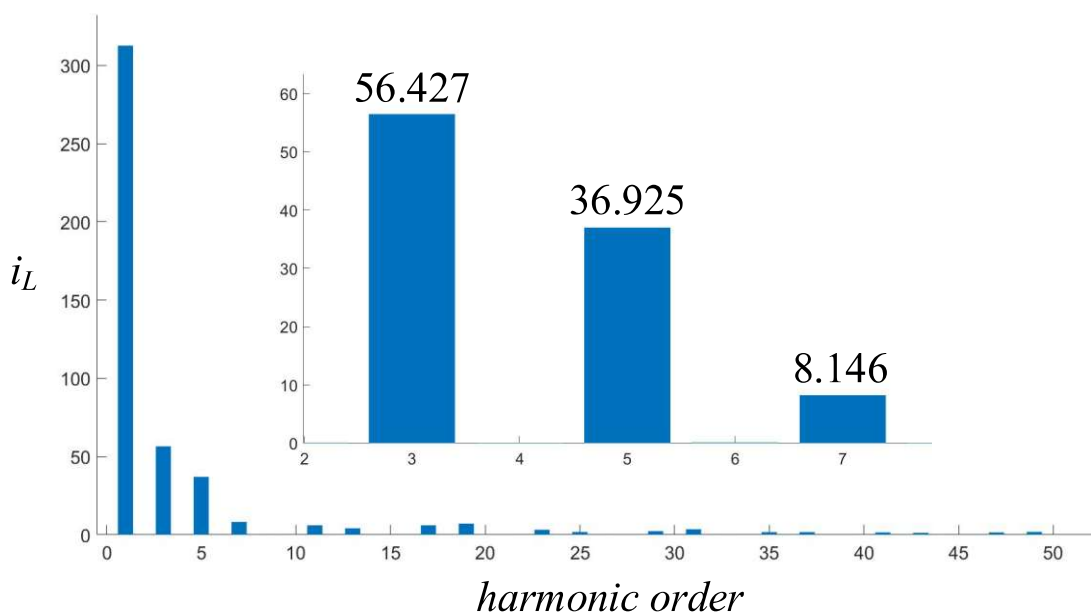
$$i_h(t) = A \sin(2\pi f t) \quad (4.1)$$

$$\max\left(\frac{di_C^*}{dt}\right) = A 2\pi f \quad (4.2)$$

โดยที่ A คือ ค่าแอมพลิจูดของกระแสฮาร์โมนิกในอันดับที่ทำให้ $\max\left(\frac{di_C^*}{dt}\right)$ มีค่าสูงสุด (A)

f คือ ความถี่ของอันดับฮาร์โมนิกที่ทำให้ $\max\left(\frac{di_C^*}{dt}\right)$ มีค่าสูงสุด (Hz)

การพิจารณาเลือกค่าองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่ทำให้ $\max\left(\frac{di_C^*}{dt}\right)$ มีค่าสูงสุดจะพิจารณาจากกราฟสเปกตรัมของกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าของประเทศไทย (Sy-Ruen and Bing-Nan, 2002) ที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของกระแสโหลดในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์โมนิก

จากรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณากระแสฮาร์มอนิกในอันดับที่ 3 ($f = 180$ Hz) กระแสฮาร์มอนิกในอันดับที่ 5 ($f = 300$ Hz) และกระแสฮาร์มอนิกในอันดับที่ 7 ($f = 420$ Hz) พบว่ากระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 อันดับมีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ 56.427 A 36.925 A และ 8.146 A ตามลำดับซึ่งสามารถนำมาแสดงการคำนวณหาค่า $\max(\frac{di_C^*}{dt})$ ของแต่ละอันดับฮาร์มอนิกได้ดังนี้

$$\text{อันดับที่ 3 : } \max(\frac{di_C^*}{dt}) = A2\pi f = 56.42 \times 2\pi \times 180 = 63,810 \text{ A/s}$$

$$\text{อันดับที่ 5 : } \max(\frac{di_C^*}{dt}) = A2\pi f = 36.93 \times 2\pi \times 300 = 69,611 \text{ A/s}$$

$$\text{อันดับที่ 7 : } \max(\frac{di_C^*}{dt}) = A2\pi f = 8.146 \times 2\pi \times 420 = 21,497 \text{ A/s}$$

จากการคำนวณในข้างต้นพบว่าที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะให้ค่า $\max(\frac{di_C^*}{dt})$ ที่สูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 69,611 A/s อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานมีการใช้หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟสเพื่อปรับลดระดับพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (26 kV : 1 kV) ดังปรากฏในรูปที่ 4.1 ซึ่งส่งผลต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทางด้านฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีขนาดกระแสสูงขึ้น 26 เท่าของกระแสอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกตามอัตราส่วนของหม้อแปลง ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลจากการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเชิงเส้นหนึ่งเฟสจะสามารถคำนวณค่า $\max(\frac{di_C^*}{dt})$ ใหม่ได้เท่ากับ 1,809,886 A/s โดยสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\max(\frac{di_C^*}{dt}) = 26 \times A2\pi f = 26 \times 36.93 \times 2\pi \times 300 = 1,809,886 \text{ A/s}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าขอบเขตสูงสุดของขนาดตัวเหนี่ยวนำ ($L_{f(\max)}$) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.3)

$$L_{f(\max)} = \frac{V_{DC} - V_S}{\max(\frac{di_C^*}{dt})} \quad (4.3)$$

โดยที่ V_{DC} คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

V_S คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส (V_{SM}, V_{ST})

จากสมการที่ 4.3 จะทำการกำหนดค่า V_{DC} ด้วยวิธีของ T. Thomas and et al. (Thomas T, Haddad K, Joos G, Jaafari A., 1998) คือ ค่า V_{DC} ต้องมีขนาดเท่ากับ หรือมากกว่าค่ายอดแรงดันของฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส ($V_S = 1,414$ V) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้ V_{DC} มีค่าเท่ากับ 1,700 V และสามารถคำนวณค่า $L_{f(\max)}$ ได้เท่ากับ 0.157 mH โดยสามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณได้ดังนี้

$$L_{f(\max)} = \frac{V_{DC} - V_S}{\max(\frac{di_C^*}{dt})} = \frac{1,700 - 1414}{1,809,886} = 0.157 \times 10^{-3} = 0.157 \text{ mH}$$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการเลือกขนาดตัวเหนี่ยวนำ โดยจะต้องเลือก L_f (L_{fM}, L_{fT}) ที่มีขนาดไม่เกิน $L_{f(\max)}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.157 mH ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ L_f มีค่าเท่ากับทั้งสองเฟสเท่ากับ 0.15 mH

4.4 การออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน

การออกแบบตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (C_{DC}) จะใช้วิธีการของ Thomas T. and et al. (Thomas T, Haddad K, Joos G, Jaafari A., 1998) โดยวิธีดังกล่าวจะให้ผลการออกแบบเป็นค่าขอบเขตต่ำสุดของขนาดตัวเก็บประจุ ($C_{DC(min)}$) จากนั้นจึงพิจารณาเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดมากกว่าขอบเขตดังกล่าวสำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยสามารถคำนวณค่า $C_{DC(min)}$ ได้จากสมการที่ (4.4)

$$C_{DC(min)} = \frac{\Delta \left[\int v_s \times i_c^* dt \right]}{\Delta V_{DC} \times V_{DC}^*} \quad (4.4)$$

โดยที่ $\Delta \left[\int v_s \times i_c^* dt \right]$ คือ ค่าการกระเพื่อมของผลรวมค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v_s) คูณกับกระแสอ้างอิง (i_c^*)

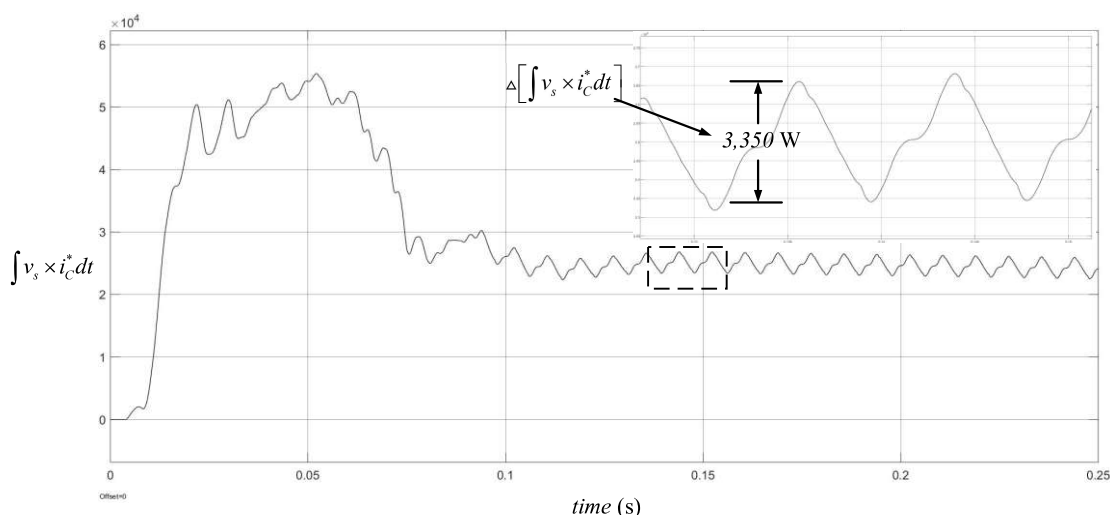
ΔV_{DC} คือ ค่าแรงดันกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง

V_{DC}^* คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง

จากระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถแสดงกราฟของผลรวมของค่าแรงดัน v_s คูณกับกระแส i_c^* ($\int v_s \times i_c^* dt$) ได้ดังรูปที่ 4.3 โดยจะเห็นว่าค่าการกระเพื่อมของผลรวมดังกล่าว ($\Delta \left[\int v_s \times i_c^* dt \right]$) มีค่าประมาณ 3,350 w และสำหรับค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง (ΔV_{DC}) จะกำหนดให้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยกำหนดให้มีค่าเป็น 2% ของค่า V_{DC} (1,700 V) ซึ่งคิดเป็นค่าแรงดันเท่ากับ 34 V จากการกำหนดค่าดังกล่าวจะสามารถคำนวณค่า $C_{DC(min)}$ ได้เท่ากับ 58 mF ซึ่งแสดงรายละเอียดการคำนวณได้ดังนี้

$$C_{DC(min)} = \frac{\Delta \left[\int v_s \times i_c^* dt \right]}{\Delta V_{DC} \times V_{DC}^*} = \frac{3,350}{34 \times 1,700} = 58 \text{ mF}$$

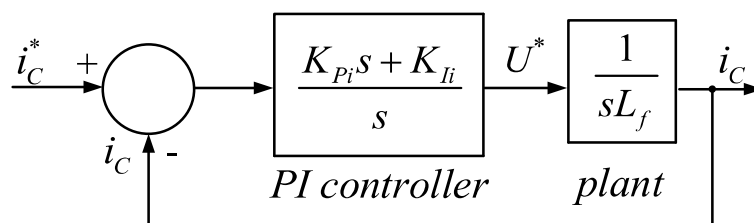
จากผลการคำนวณออกแบบในข้างต้นจะต้องเลือก C_{DC} ที่มีขนาดมากกว่า $C_{DC(min)}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 58 mF ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ C_{DC} มีค่าเท่ากับ 80 mF



รูปที่ 4.3 ผลรวมผลคูณของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสและกระแสอ้างอิง

4.5 การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชย

ในบทนี้จะพิจารณาใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรังกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา เพื่อศึกษาทำความเข้าใจการทำงานของระบบควบคุมกระแสชดเชย รวมไปถึงศึกษาการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยก่อน เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวมีความซับซ้อนที่น้อย และง่ายต่อการออกแบบ โดยโครงสร้างของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากรูปที่ 4.4 อินพุตที่ถูกป้อนให้กับตัวควบคุมพีไอ (PI controller) และพลานต์ (plant) ของระบบ คือ ผลต่างของค่ากระแสอ้างอิง (i_C^*) ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับสนิทด้วยวิธี PQF กับค่ากระแสชดเชย (i_C) จากวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และได้กำหนดให้เอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอเป็นค่าแรงดันอ้างอิง (U^*) โดยแรงดันดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM (J. Zala, M. Desai, K. Bhayani, et al., 2019) เพื่อทำการสวิตช์อุปกรณ์ IGBT ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานต่อไป

สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจะใช้วิธีการประมาณโดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (closed-loop transfer function) ของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.4 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.5) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานดังแสดงในสมการที่ (4.6) จากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์จะได้สมการคำนวณหาค่า K_{pi} และ K_{li} ดังแสดงในสมการที่ (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ

$$\frac{i_C}{i_C^*} = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{li}}{L_f} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pi}}{L_f} \right)s + \frac{K_{li}}{L_f}} \quad (4.5)$$

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta s\omega_n + \omega_n^2} \quad (4.6)$$

$$K_{pi} = 2\zeta\omega_{ni}L_f \quad (4.7)$$

$$K_{li} = \omega_{ni}^2 L_f \quad (4.8)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราการหน่วง (damping ratio) ของการควบคุมกระแสชดเชย โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.707 และ ω_{ni} คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของการควบคุมกระแสชดเชย เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกอันดับสูงสุดที่อันดับที่ 50 ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 3,000 Hz จึงกำหนดให้ ω_{ni} มีค่าเท่ากับ $2\pi \times 3,000$ rad/s สำหรับค่า L_f จะมีค่าเท่ากับ 0.15 mH (ผลการออกแบบในหัวข้อที่ 4.3) จากค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด

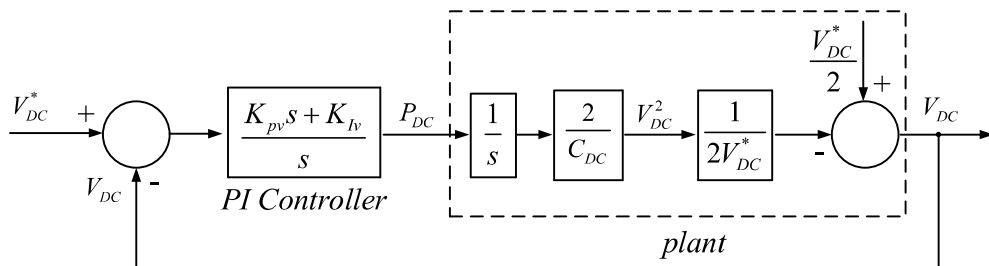
ที่กล่าวมาในข้างต้นสามารถคำนวณหาค่า K_{pi} ได้เท่ากับ 4 และค่า K_{fi} ได้เท่ากับ 53,300 แสดงรายละเอียดการคำนวณได้ดังนี้

$$K_{pi} = 2\zeta_i \omega_{ni} L_f = 2 \times 0.707 \times 2\pi \times 3000 \times 0.00015 = 4$$

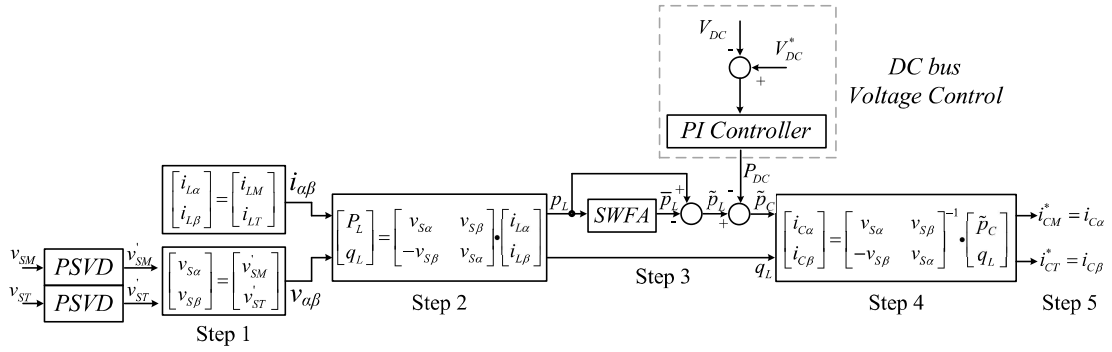
$$K_{fi} = \omega_{ni}^2 L_f = (2\pi \times 3,000)^2 \times 0.00015 = 53,300$$

4.6 การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมในการออกแบบได้ดังรูปที่ 4.5 จากรูปอินพุตที่ถูกป้อนให้กับตัวควบคุมพีไอ และพลานต์ของระบบ คือ ผลต่างของค่าแรงดันอ้างอิง (V_{DC}^*) กับค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{DC}) และได้กำหนดให้เอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอเป็นค่ากำลังไฟฟ้ากระแสตรง (P_{DC}) โดยกำลังไฟฟ้างี้จะถูกลำดับไปหาค่าของค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่โหลด ($\tilde{p}_L$) เพื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสำหรับการชดเชย ($\tilde{p}_C$) สำหรับนำไปใช้คำนวณในขั้นตอนที่ 4 ของการคำนวณตรวจสอบฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF กรณีพิจารณาผลจากระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ



รูปที่ 4.6 การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่เชื่อมต่อภายในการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF

สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงจะใช้วิธีการประมาณ เช่นเดียวกับการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชย โดยฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบวงปิดของบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอดังรูปที่ 4.5 สามารถแสดงดังสมการที่ (4.9) และเมื่อทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการดังกล่าวกับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานดังแสดงในสมการที่ (4.6) จะสามารถคำนวณค่า K_{P_v} และ K_{I_v} ได้ดังสมการที่ (4.10) และ (4.11) ตามลำดับ

$$\frac{V_{DC}}{V_{DC}^*} = \frac{1}{2} \frac{s^2 + \frac{2K_{P_v}s}{C_{DC}V_{DC}^*} + \frac{2K_{I_v}}{C_{DC}V_{DC}^*}}{s^2 + \frac{K_{P_v}s}{C_{DC}V_{DC}^*} + \frac{K_{I_v}}{C_{DC}V_{DC}^*}} \quad (4.9)$$

$$K_{P_v} = 2\zeta_v \omega_{nv} C_{DC} V_{DC}^* \quad (4.10)$$

$$K_{I_v} = \omega_{nv}^2 C_{DC} V_{DC}^* \quad (4.11)$$

โดยที่ ζ_v คือ อัตราการหน่วงของการควบคุมแรงดันซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.707 และ ω_{nv} คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{4}{T_s \zeta}$ เมื่อพิจารณาให้ค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวมี (e_{ss}) ค่าเท่ากับ $\pm 2\%$ โดย T_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.05 s สำหรับค่า V_{DC}^* และ C_{DC} จะมีค่าเท่ากับ 1,700 V และ 80 mF ตามลำดับ (ผลการออกแบบในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ) จากค่าพารามิเตอร์

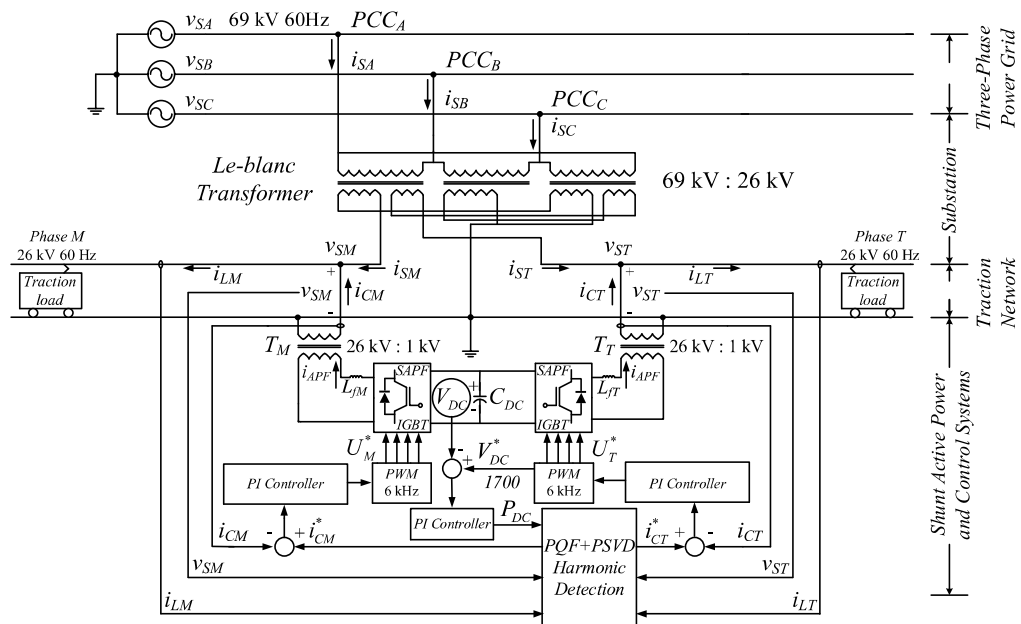
ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถคำนวณหาค่า K_{P_v} ได้เท่ากับ 21,760 และค่า K_{I_v} ได้เท่ากับ 1,741,325.88 แสดงรายละเอียดการคำนวณได้ดังนี้

$$K_{P_v} = 2\zeta_v \omega_{nv} C_{DC} V_{DC}^* = \frac{8\zeta_v C_{DC} V_{DC}^*}{T_s \zeta_v} = \frac{8 \times 80 \times 10^{-3} \times 1,700}{0.05} = 21,760$$

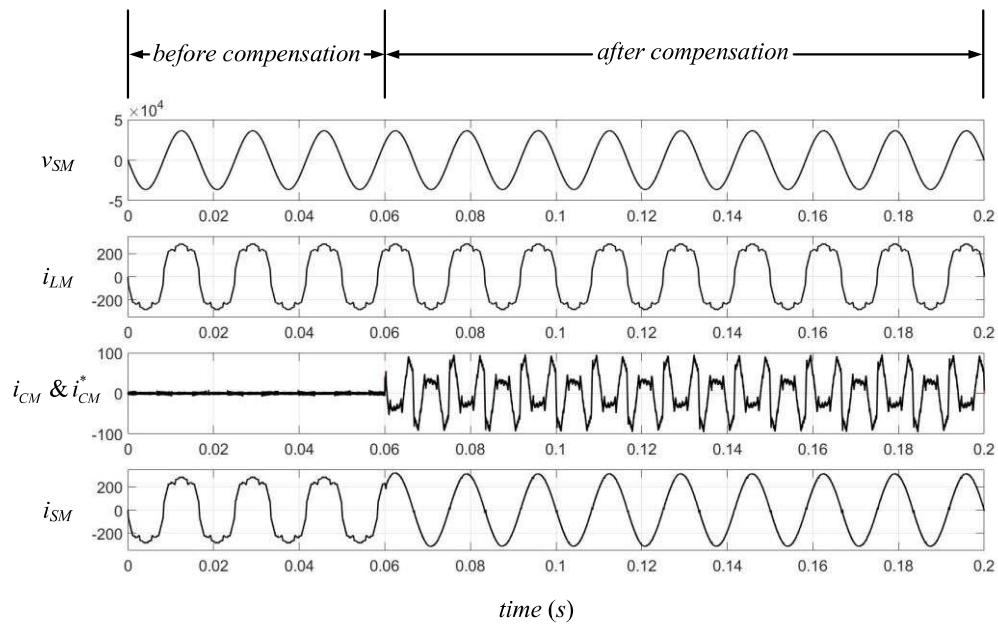
$$K_{I_v} = \omega_{nv}^2 C_{DC} V_{DC}^* = \left(\frac{4}{T_s \zeta_v} \right)^2 C_{DC} V_{DC}^* = \left(\frac{4}{0.05 \times 0.707} \right)^2 \times 80 \times 10^{-3} \times 1,700 = 1,741,325.88$$

4.7 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

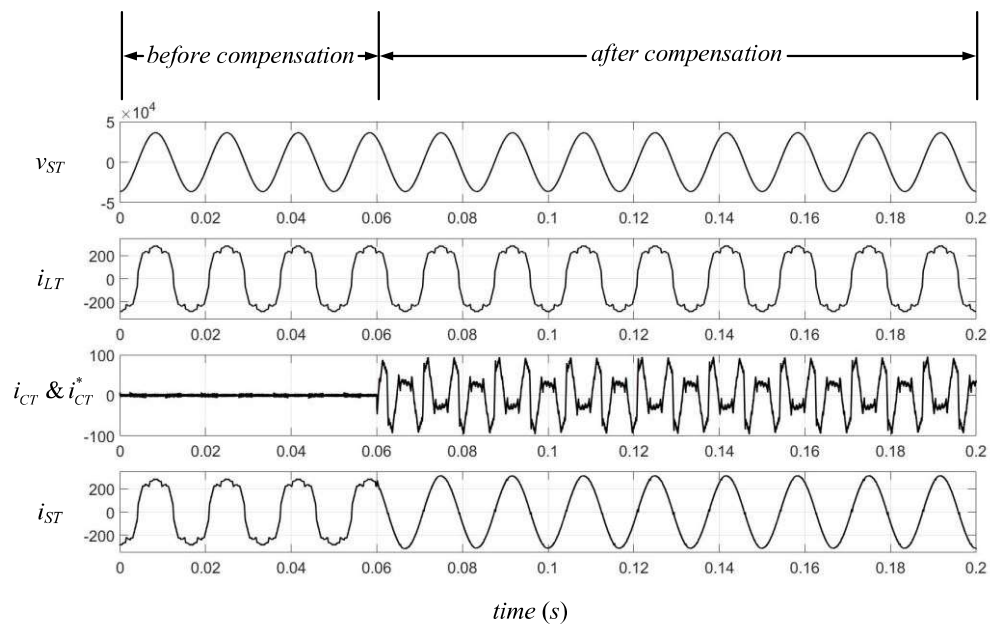
สำหรับระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอที่ได้นำเสนอการออกแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 โดยในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกจะใช้การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส M และ T ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับเฟสผลการเปรียบเทียบกระแสชดเชย (i_C) และกระแสอ้างอิง (i_C^*) ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ของเฟส M และ T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับเฟส และผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส A B และ C ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



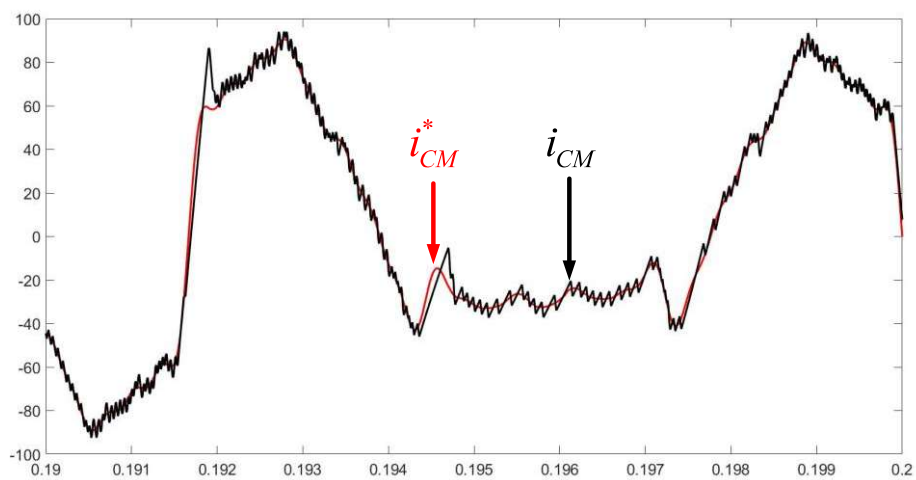
รูปที่ 4.7 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบแรงไฟฟ้า



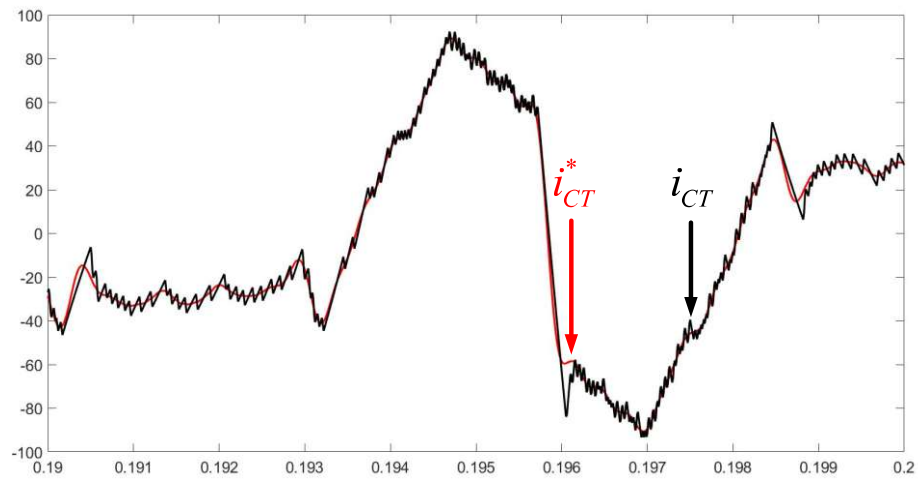
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M



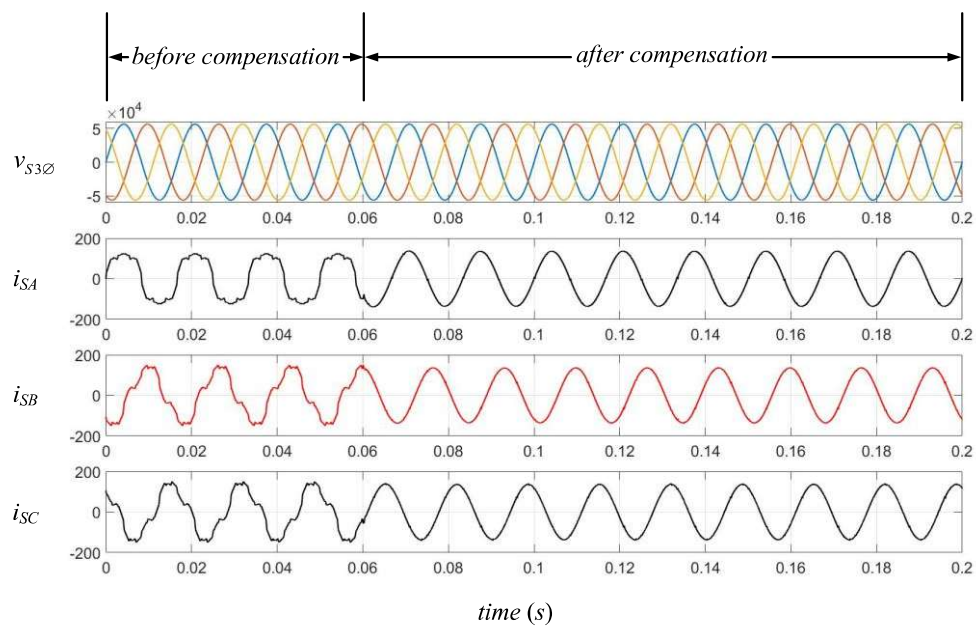
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส T



รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบ i_{CM} และ i_{CM}^*



รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบ i_{CT} และ i_{CT}^*



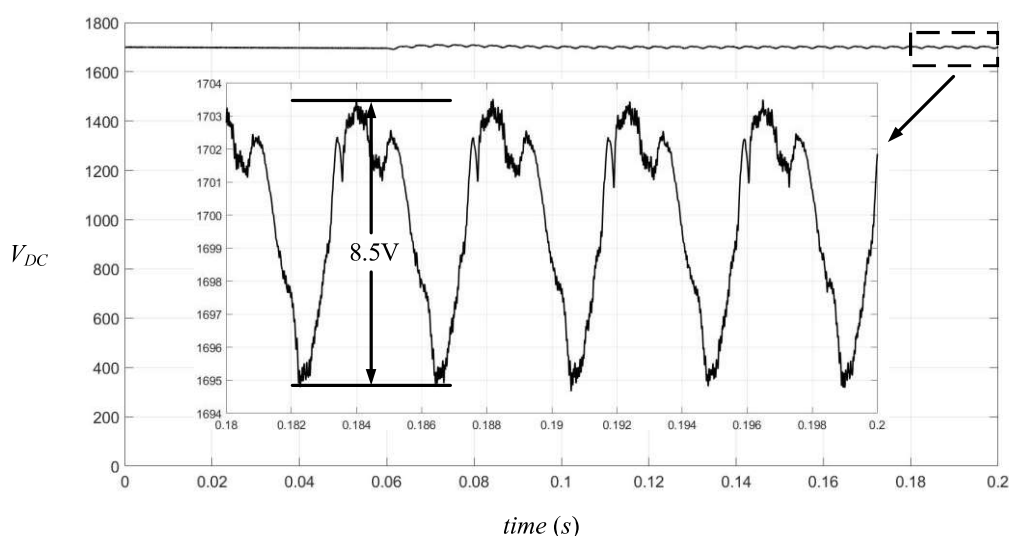
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส A B และ C)

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าของเฟส M และ T ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 0.06 วินาทีหรือช่วงก่อนการชดเชย (before compensation) กระแสที่แหล่งจ่ายทั้งสองเฟส (i_{SM}, i_{ST}) มีลักษณะสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกับกระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) ซึ่งวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายได้เท่ากับ 22.16% เท่ากันทั้งสองเฟส ต่อมาในช่วงเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป หรือช่วงภายหลังการชดเชย (after compensation) เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานร่วมกับตัวควบคุมพีโอได้ทำการชดเชยกระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) ที่มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_{CM}^*, i_{CT}^*) ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ดังแสดงรูปที่ 4.10 และ 4.11 ส่งผลให้กระแส i_{SM} และ i_{ST} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์ และสามารถวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของเฟส M และ T ได้เท่ากับ 1.83% และ 1.82% ตามลำดับเฟส นอกจากนี้ผลจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ดังรูปที่ 4.12 พบว่าในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 0.06 วินาทีหรือช่วงก่อนการชดเชย (before compensation) กระแสที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสซึ่งประกอบไปด้วย i_{SA} , i_{SB} และ i_{SC} มีลักษณะรูปสัญญาณที่ผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ โดยวัดค่า %THD เท่ากับ 22.14% เท่ากันทุกเฟส ต่อมาตั้งแต่ช่วงเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสจะส่งผลให้ i_{SA} , i_{SB} และ i_{SC} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นไซน์ โดยวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยได้เท่ากับ 1.83% 1.81% และ 1.84% ตามลำดับเฟส ซึ่งสามารถดูสรุปผลค่า %THD ทั้งหมดได้จากตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลสรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการทดสอบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบรางไฟฟ้า

สถานะการชดเชย	ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย						
	ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส			ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส			
	i_{SM}	i_{ST}	เฉลี่ย	i_{SA}	i_{SB}	i_{SC}	เฉลี่ย
ก่อนการชดเชย	22.16	22.16	22.16	22.14	22.14	22.14	22.14
หลังการชดเชย	1.83	1.82	1.83	1.83	1.81	1.84	1.83

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 จากรูปดังกล่าวพบว่าระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอมีประสิทธิภาพในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ดี สามารถคงค่าแรงดันบัสไฟตรงไว้ได้เท่ากับ 1,700 V ตามที่ได้ออกแบบไว้ และมีการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 8.5 V โดยค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงมีค่าไม่เกิน 2% ของค่า V_{DC} ($\Delta V_{DC} = 34$ V) ซึ่งเป็นค่าที่งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ยอมรับได้ (กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 4.4)



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดที่นำเสนอในข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอที่ได้นำเสนอการออกแบบมีค่าที่เหมาะสมกับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบแรงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยทั้งที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสและที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสมีค่าลดลงและอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

4.8 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานซึ่งประกอบด้วยค่า L_f , C_{DC} และ V_{DC} การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ (K_{Pi} , K_{Ii}) และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ (K_{Pv} , K_{Iv}) รวมไปถึงการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อทดสอบสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรอง

กำลังแอกทีฟแบบขนาน และระบบควบคุมที่ได้แนะนำการออกแบบ จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และระบบควบคุมที่ได้แนะนำการออกแบบสามารถทำงาน ร่วมกันในการฉีดกระแสชดเชยกำลังฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้กระแสที่ภายหลังการชดเชยมีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์ทั้งที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายมีค่าลดลงอยู่ภายใต้กรอบ มาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ แบบขนาน และระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีที่แนะนำมีค่าที่เหมาะสมกับระบบแรงไฟฟ้า ที่พิจารณา