

บทที่ 3

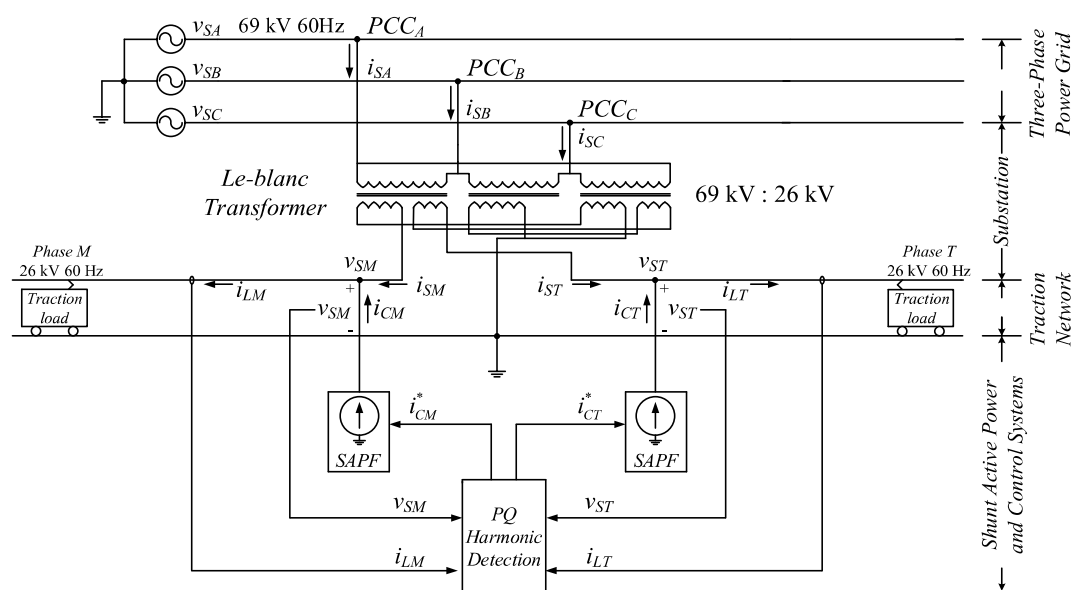
การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

3.1 กล่าวนำ

วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power theory : PQ) ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1984 โดย Akagi (Akagi H. and et al., 1984) วิธีดังกล่าวมีขั้นตอนการคำนวณที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน มีสมรรถนะในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดี นอกจากนี้ยังมีรูปแบบการชดเชยที่หลากหลาย เช่น การชดเชยฮาร์มอนิก การชดเชยค่ากำลังแอกทีฟ (active power : P) รวมไปถึงการชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟ (reactive power : Q) เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (power factor : pf) ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำมาใช้คำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยในบทนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้วิธี PQ แบบดั้งเดิมให้สามารถคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกของระบบรางไฟฟ้าได้พร้อมกันทั้งสองเฟส (เฟส M และ T) ในหนึ่งบล็อกการคำนวณรวมไปถึงการนำวิธีวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis : SWFA) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ นอกจากนี้ยังนำเสนอการใช้วิธีการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (Positive Sequence Voltage Detector : PSVD) ร่วมกับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อลดความผิดพลาดในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปน โดยรายละเอียดของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาจำลองสถานการณ์ทดสอบการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกจะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.2 การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมจะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.3 การประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนร่วมกับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ จะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.4 การตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานจะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.5 และการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมจะนำเสนอในหัวข้อที่ 3.6

3.2 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาจำลองสถานการณ์การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก

ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาทดสอบการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกจะเลือกใช้ระบบรางไฟฟ้า กระแสสลับแบบเฟสรวมที่มีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยระบบสายส่งเหนือศีรษะ (overhead catenary) โดยระบบดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาจำลองสถานการณ์ทดสอบการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิก

จากรูปที่ 3.1 ระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้า บล็อกการคำนวณตรวจสอบฮาร์มอนิก และวงจรรอกำลังแยกที่ฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter : SAPF) โดยสามารถแสดงรายละเอียดของแต่ละส่วนได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางไฟฟ้า ประกอบด้วย กริดส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส (three-phase power grid) ที่พิกัดแรงดัน 69 kV ความถี่ 60 Hz สถานีส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (substation) ให้กับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมที่ใช้หม้อแปลงชนิดเลอบลองค์ (le-blanc transformer) เพื่อแปลงจากระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสเป็นระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (เฟส M และ T) ที่พิกัดแรงดัน 26 kV ความถี่ 60 Hz โดยทั้งสองเฟสจะเชื่อมต่อกับโหลดรถไฟ (traction load) โดยโหลดรถไฟดังกล่าวจะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ (ideal current source) ที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน (Sy-Ruen and Bing-Nan, 2002) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ส่วนที่ 2 บล็อกการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก เป็นส่วนที่ใช้ในการคำนวณตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการประยุกต์วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง หรือวิธี PQ สำหรับคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

ส่วนที่ 3 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ในการทดสอบการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก จะแทนที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ สำหรับฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อพิจารณาเฉพาะผลของการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก โดยไม่พิจารณาถึงผลจากโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานรวมถึงผลของระบบควบคุม ส่งผลให้กระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) ของทั้งสองเฟสจะมีลักษณะสัญญาณเช่นเดียวกับกระแสอ้างอิง (i_{CM}^*, i_{CT}^*) ที่ได้จากบล็อกการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกทุกประการ

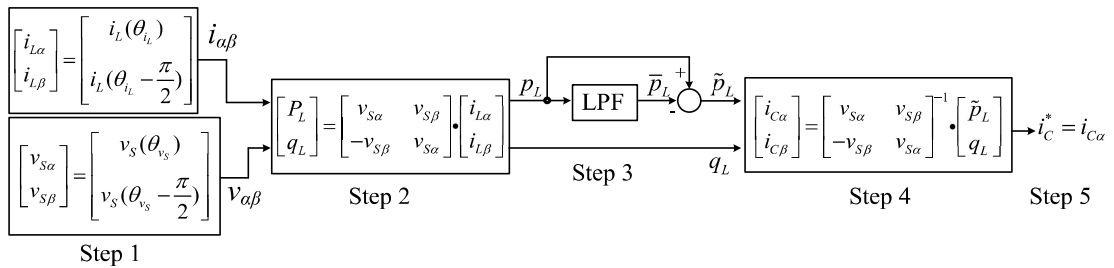
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน

อันดับฮาร์โมนิก (h)	กระแสไหล (A)	ร้อยละ (%)
1	221.000	100.000
3	39.900	18.100
5	26.110	11.820
7	5.760	2.610
11	4.224	1.910
13	2.880	1.303
17	4.224	1.911
19	4.992	2.260
23	2.230	1.010
25	1.250	0.566
29	1.630	0.740
31	2.496	1.130
35	1.152	0.521
37	1.152	0.521
41	1.050	0.475
43	0.860	0.390
47	1.050	0.475
49	1.250	0.566

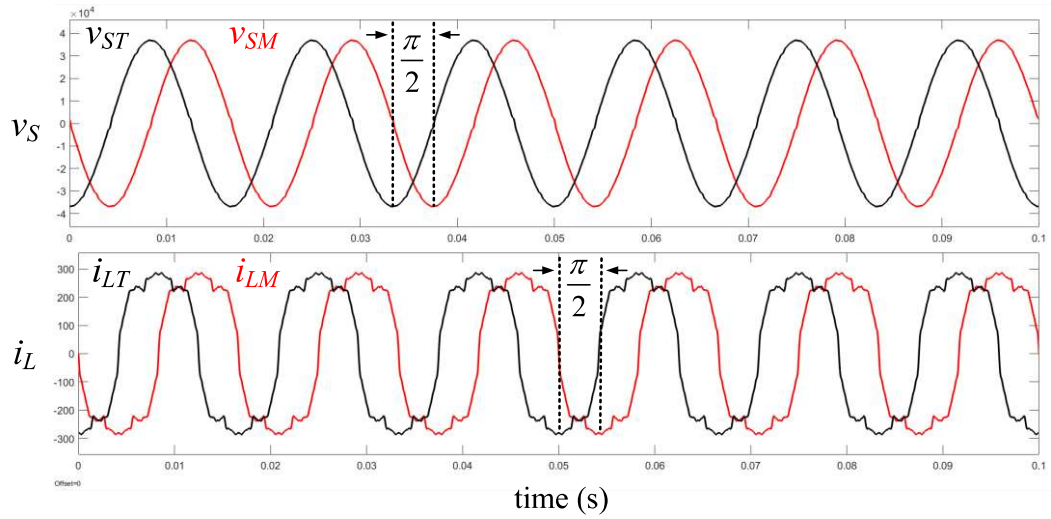
3.3 การคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

การคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง หรือวิธี PQ แบบดั้งเดิมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส (Akagi H. and et al., 1984) สามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกได้ดังรูปที่ 3.2 เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส การนำมาใช้งานในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมจึงจำเป็นต้องใช้บล็อกการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกทั้งหมดจำนวน 2 บล็อกเพื่อคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกแยกในแต่ละเฟสของระบบรางไฟฟ้า (เฟส M และ T) จากแผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQ แบบดั้งเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.2 พบว่า ในขั้นตอนแรกของการคำนวณ (step 1) มีการกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (v_s) และกระแสไหล (i_L) ของระบบที่พิจารณาเป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($v_{s\alpha}, v_{s\beta}$) และกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) โดยที่ $v_{s\alpha}$ และ $i_{L\alpha}$ จะมีขนาดและมุมเฟสเท่ากับ v_s และ i_L ตามลำดับ ในขณะที่ $v_{s\beta}$ และ $i_{L\beta}$ จะมีขนาดเท่ากับ v_s

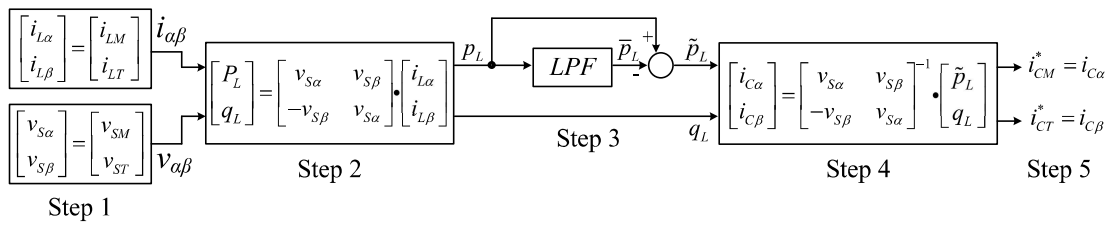
และ i_L แต่จะมีมุมเฟสเลื่อนไปเท่ากับ $\frac{\pi}{2}$ ตามลำดับ จากขั้นตอนดังกล่าวเมื่อพิจารณาพร้อมกับลักษณะของกระแสโหลด (i_L) และแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (v_s) ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และกระแสโหลดของเฟส M และ T มีขนาดเท่ากันแต่จะมีมุมเฟสต่างกันอยู่ $\frac{\pi}{2}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งมีความสอดคล้องกับการกำหนดค่ากระแสโหลด และแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ในขั้นตอนแรกของการคำนวณตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ แบบดั้งเดิม ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงประยุกต์ใช้วิธี PQ แบบดั้งเดิมให้สามารถคำนวณตรวจจับสนามอนิกได้พร้อมกันทั้งสองเฟสด้วยการใช้บล็อกการคำนวณตรวจจับสนามอนิกเพียงบล็อกเดียว โดยจะกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของเฟส M มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าบนแกน α แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของเฟส T มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าบนแกน β และกระแสโหลดของเฟส M มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าบนแกน α กระแสโหลดของเฟส T มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าบนแกน β แทนในขั้นตอนแรกของการคำนวณ สำหรับขั้นตอนที่เหลือ (step 2 - 5) จะดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนของวิธี PQ แบบดั้งเดิมดัง วิธี PQ สำหรับระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมสามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนการคำนวณตรวจจับสนามอนิกได้ดังรูปที่ 3.4 โดยสามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แผนภาพการคำนวณตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ แบบดั้งเดิม



รูปที่ 3.3 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย และกระแสโหลดของเฟส M และ T



รูปที่ 3.4 แผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

จากรูปที่ 3.4 สามารถอธิบายขั้นตอนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการกำหนดแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (v_{SM}, v_{ST}) และกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้า (i_{LM}, i_{LT}) เป็นปริมาณแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($v_{S\alpha}, v_{S\beta}$) และกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} v_{S\alpha} \\ v_{S\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{SM} \\ v_{ST} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{LM} \\ i_{LT} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

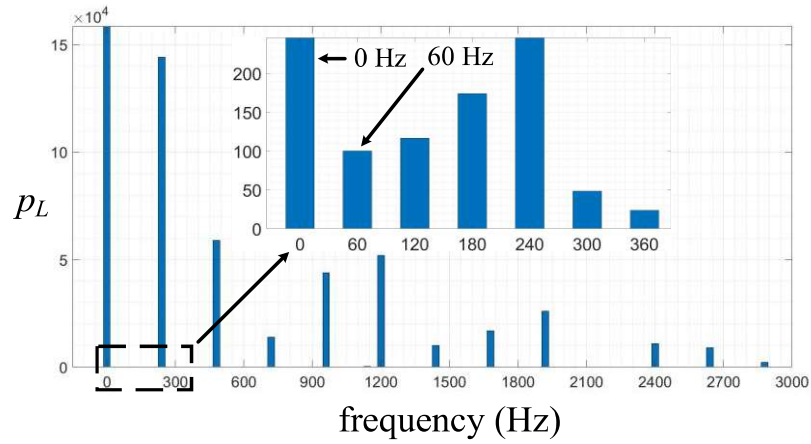
ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่งที่โหลด (p_L) และกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งที่โหลด (q_L) โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ดังสมการที่ (3.3)

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ขั้นตอนที่ 3 แยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ($\tilde{p}_L$) ออกจากกำลังแอกทีฟ (p_L) โดยใช้วงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter : LPF) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อพิจารณากราฟสเปกตรัมของกำลังแอกทีฟ (p_L) ดังรูปที่ 3.6 พบว่า กำลังแอกทีฟมูลฐาน ($\bar{p}_L$) (อันดับ 0) มีค่าความถี่เท่ากับ 0 Hz และปรากฏกำลังแอกทีฟฮาร์มอนิก ($\tilde{p}_L$) อันดับแรกมีความถี่เท่ากับ 60 Hz จึงกำหนดใช้วงจร LPF อันดับที่ 2 ที่มีค่าความถี่ตัดเท่ากับ 30 Hz ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางระหว่างค่ามูลฐานและฮาร์มอนิกอันดับแรก



รูปที่ 3.5 การใช้วงจร LPF ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 3.6 สเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์โมนิก

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณกระแสไฟฟ้าสำหรับการชดเชยบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{c\alpha}, i_{c\beta}$) ดังสมการที่ (3.4)

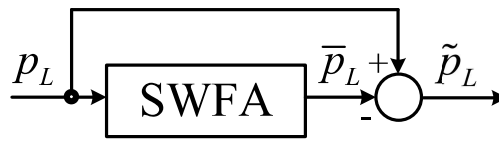
$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p}_L \\ q_L \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้กระแสชดเชยของเฟส M (i_{CM}^*) มีค่าเท่ากับกระแสชดเชยบนแกน α ($i_{c\alpha}$) และกระแสชดเชยของเฟส T (i_{CT}^*) มีค่าเท่ากับกระแสชดเชยบนแกน β ($i_{c\beta}$) ดังสมการที่ (3.5) โดยกระแสดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นกระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมต่อไป

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{CM}^* \\ i_{CT}^* \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.4 การประยุกต์ใช้วิธีวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

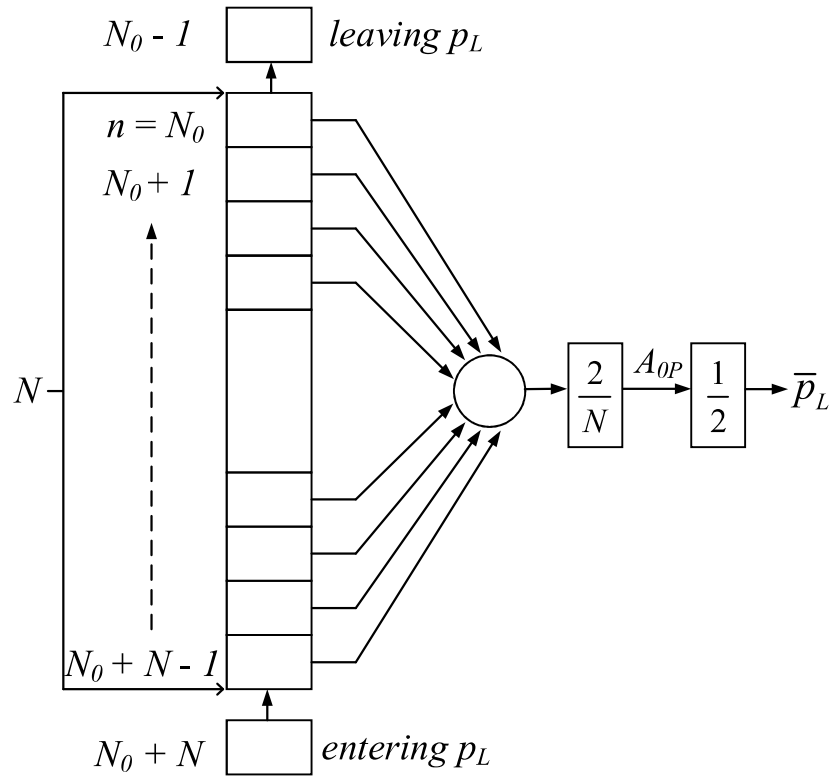
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis : SWFA) ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ($\bar{p}_L$) แทนการใช้วงจร LPF ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ (ขั้นตอนที่ 3) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยวิธี PQ ร่วมกับวิธี SWFA ดังกล่าวจะเรียกว่าวิธีพีคิวเอฟ (PQF)



รูปที่ 3.7 การใช้วิธี SWFA ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ

ค่ากำลังแอกทีฟจะประกอบไปด้วยเทอมกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC component) และเทอมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (AC component) ดังแสดงในสมการที่ (3.6) การใช้วิธี SWFA ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟจะเริ่มจากการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นปริมาณมูลฐานของกำลังแอกทีฟ ($\bar{p}_L$) จากนั้นจะนำ $\bar{p}_L$ ที่ได้จากการคำนวณมาหักลบกับค่ากำลังแอกทีฟ (p_L) เพื่อคำนวณค่า $\tilde{p}_L$ โดยขั้นตอนในการคำนวณค่า $\bar{p}_L$ สามารถแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.8

$$P_L(kT_s) = \underbrace{\frac{A_{0p}}{2}}_{DC\ component} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_{hp} \cos(h\omega kT_s) + B_{hp} \sin(h\omega kT_s)]}_{AC\ components} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.8 การคำนวณค่า A_{0p} และค่า $\bar{p}_L$

จากรูปที่ 3.8 การคำนวณค่า $\bar{p}_L$ จะเริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลของกำลังแอกทิฟ (p_L) มาจำนวนหนึ่งคาบของความถี่มูลฐาน โดยกำหนดให้มีจำนวน N ข้อมูล เพื่อใช้สำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_{0p} ดังสมการที่ (3.7) จากนั้นจึงนำค่า A_{0p} ไปใช้คำนวณค่า $\bar{p}_L$ ตามสมการที่ (3.8)

$$A_{0p} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_L(nT_s) \quad (3.7)$$

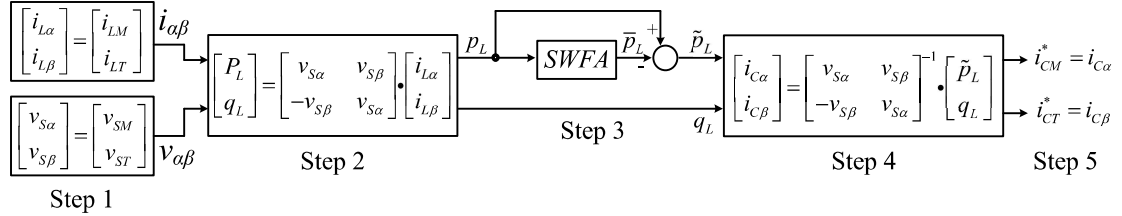
$$\bar{p}_L = \frac{A_{0p}}{2} \quad (3.8)$$

หลังจากเก็บค่าครบ N ข้อมูล หรือครบ 1 คาบจะนำ $\bar{p}_L$ ที่ได้มาหักลบออกกับค่า p_L เพื่อคำนวณค่า $\tilde{p}_L$ ดังสมการที่ (3.9)

$$\tilde{p}_L = p_L - \bar{p}_L \quad (3.9)$$

ในการคำนวณรอบถัดไปจะทำการดึงค่า p_L ที่ตำแหน่ง N_0 ออกจากชุดข้อมูล N โดยกำหนดให้เป็น $N_0 - 1$ ในขณะเดียวกันก็จะรับข้อมูลค่าใหม่จาก p_L ที่ตำแหน่ง $N_0 + N$ มาเก็บไว้ในชุดข้อมูล N โดยกำหนดเป็น $N_0 + N - 1$ และคำนวณค่า A_{0p} $\bar{p}_L$ และ $\tilde{p}_L$ ค่าใหม่ดังสมการที่ (3.7) (3.8) และ (3.9) ตามลำดับ

สำหรับค่า $\tilde{p}_L$ ที่คำนวณได้จะถูกใช้ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกในขั้นตอนที่ 4 และ 5 ของวิธี PQ สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมต่อไป โดยแผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9

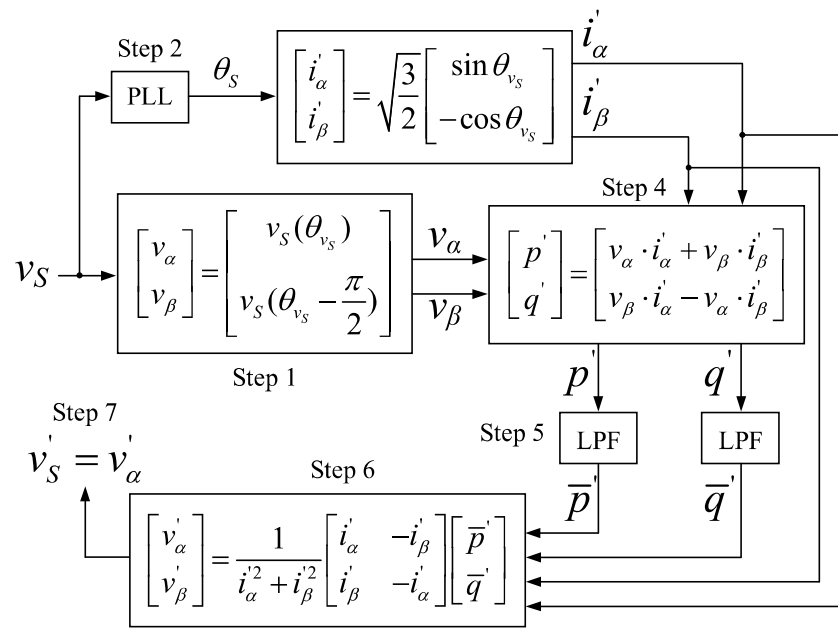


รูปที่ 3.9 แผนภาพการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

3.5 การตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน

การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF จะสามารถคำนวณค่ากระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องก็ต่อเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้ากำลังมีลักษณะเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ แต่ในกรณีที่เกิดฮาร์มอนิกกะปนที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายซึ่งเกิดการใช้งานโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear load) เช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เป็นต้น (George J. Wakileh, Power System Harmonics: Fundamentals, Analysis, and Filter Design, 2001) จะทำให้การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกเกิดความผิดพลาดได้ ซึ่งส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอการใช้วิธีการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (Positive Sequence Voltage Detector : PSVD) ซึ่งถูกนำเสนอโดย M. Aredes และคณะ

ในปี 1997 (M. Aredes and et al., 1997) เพื่อนำมาใช้ร่วมกับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF เพื่อให้สามารถคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องแม่นยำในกรณีที่มีฮาร์มอนิกปะปนที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส หรือที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของระบบรางไฟฟ้า โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้บล็อกการคำนวณ PSVD จำนวนทั้งหมด 2 บล็อกเพื่อคำนวณแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานแยกในแต่ละเฟสของระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (เฟส M และ T) สำหรับแผนภาพขั้นตอนการคำนวณของวิธี PSVD สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 โดยสามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 3.10 แผนภาพการคำนวณตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานด้วยวิธี PSVD

ขั้นตอนที่ 1 ทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (v_s) เป็นแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ (v_α, v_β) ดังสมการที่ (3.10)

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s(\theta_{v_s}) \\ v_s\left(\theta_{v_s} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

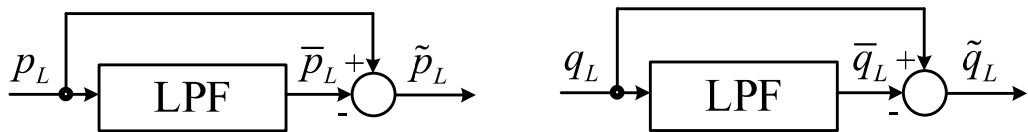
ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (θ_{v_s}) ด้วยวงจรเฟสล็อก (Phase Lock Loop : PLL) โดยในที่นี้จะใช้บล็อก PLL ที่มีอยู่ในโปรแกรม Simulink/MATLAB เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากระแสบนแกน $\alpha\beta$ (i'_α, i'_β) ดังสมการที่ (3.11)

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \sin \theta_{v_s} \\ -\cos \theta_{v_s} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสนับสนุน (auxiliary instantaneous power) (p', q') ดังสมการที่ (3.12)

$$\begin{bmatrix} p' \\ q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha \cdot i'_\alpha & v_\beta \cdot i'_\beta \\ v_\beta \cdot i'_\alpha & v_\alpha \cdot i'_\beta \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ขั้นตอนที่ 4 แยกองค์ประกอบของ p' และ q' โดยแยกองค์ประกอบมูลฐาน ($\bar{p}', \bar{q}'$) ออกจากองค์ประกอบฮาร์มอนิก ($\tilde{p}', \tilde{q}'$) โดยใช้วงจร LPF ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การใช้วงจร LPF ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าสนับสนุน (p', q')

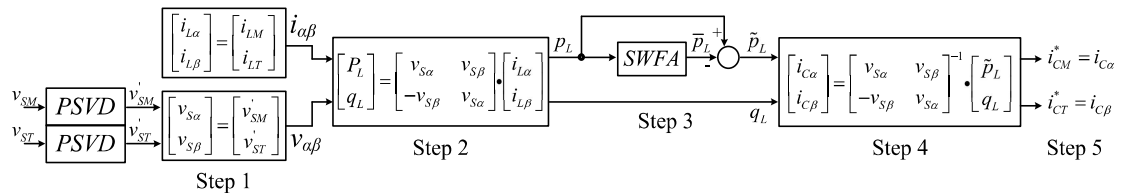
ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ (v'_α, v'_β) ดังสมการที่ (3.13)

$$\begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha'^2 + i_\beta'^2} \begin{bmatrix} i'_\alpha & -i'_\beta \\ i'_\beta & -i'_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}' \\ \bar{q}' \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

ขั้นตอนที่ 6 กำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสลำดับเฟสบวก (v'_s) มีค่าเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงบนแกน α (v'_α) ดังสมการที่ (3.14) โดยแรงดันไฟฟ้างกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกต่อไป

$$[v'_s] = [v'_\alpha] \quad (3.14)$$

สำหรับการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ร่วมกับวิธี PSVD (วิธี PQF ร่วมกับ PSVD) สามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 3.12 จากแผนภาพดังกล่าวจะเห็นว่าบล็อกการคำนวณ PSVD ทั้ง 2 บล็อกจะคำนวณตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานของเฟส M และ T ก่อนนำค่าแรงดันดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ต่อไป



รูปที่ 3.12 การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ร่วมกับวิธี PSVD

3.6 การทดสอบเปรียบเทียบการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยวิธี PQ และวิธี PQF โดยการทดสอบจะใช้ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 3.1 และจะใช้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยเป็นตัวชี้วัดประสิทธิผล ซึ่งค่า %THD สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.15) สำหรับการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ และกรณีที่ 2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปน โดยสามารถแสดงรายละเอียดการทดสอบในแต่ละกรณีได้ดังนี้

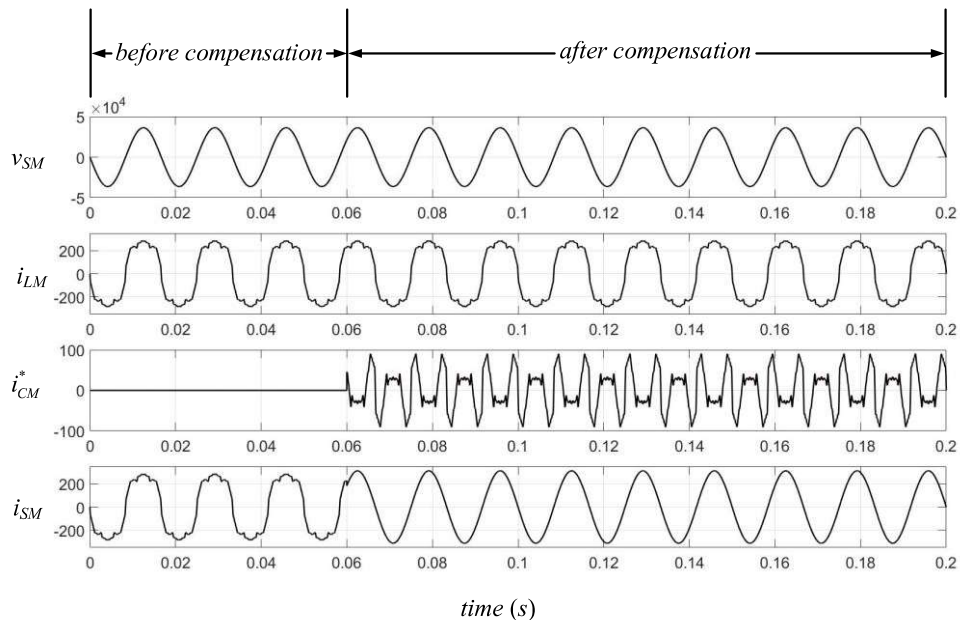
$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3.15)$$

โดยที่ I_1 คือ ค่ากระแสที่ความถี่มูลฐาน 60 Hz

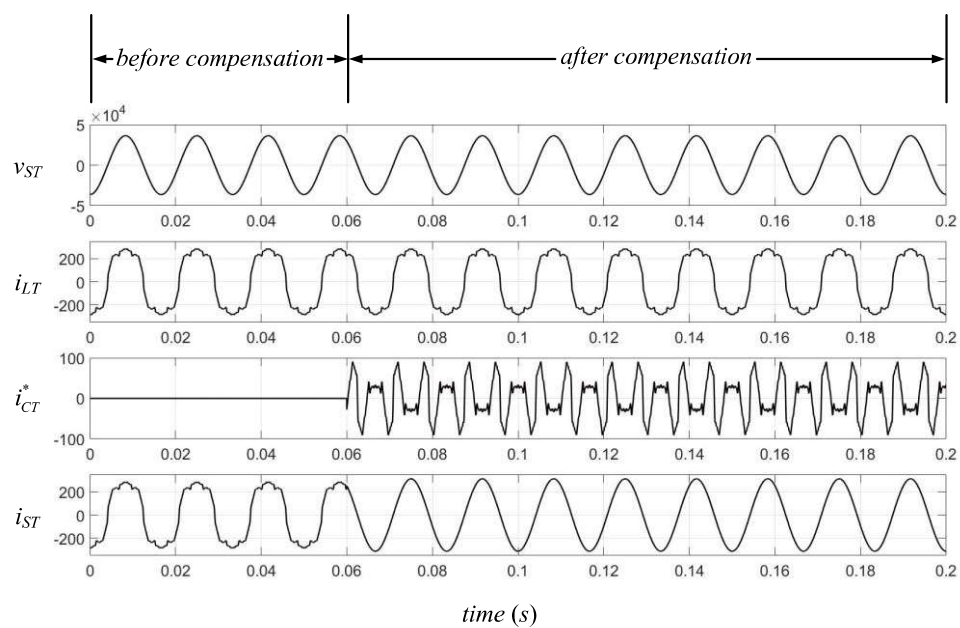
I_h คือ ค่ากระแสที่ความถี่ฮาร์โมนิกอันดับ 2 ถึง 50

3.6.1 การทดสอบกรณีที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์

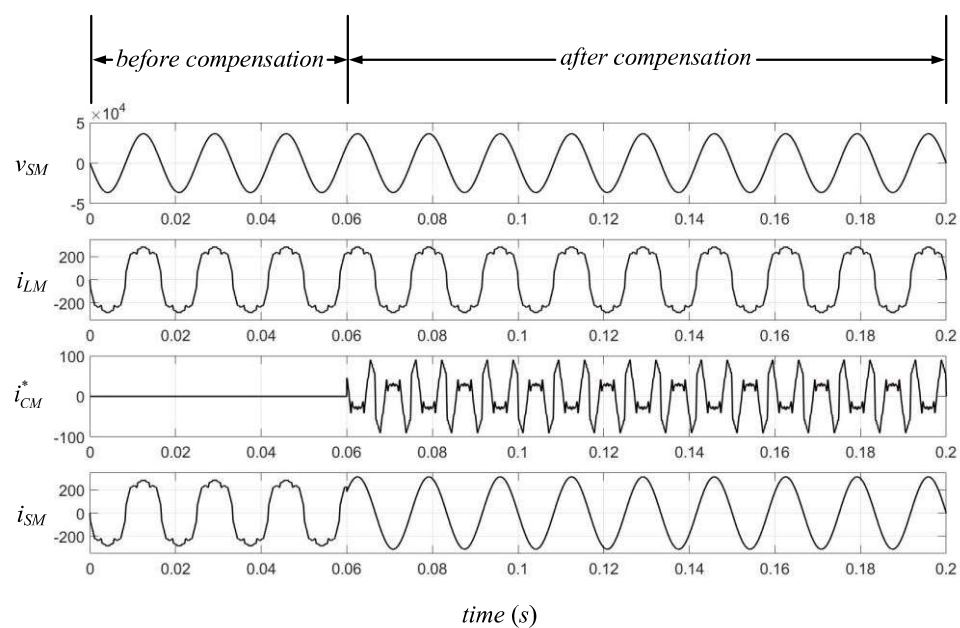
การทดสอบสมรรถนะการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบวางไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์จะทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช่วิธี PQ ที่ใช้วงจร LPF และวิธี PQF ที่ประยุกต์ใช้วิธี SWFA ในการกรององค์ประกอบฮาร์โมนิกของกำลังแอกทีฟ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการคำนวณตรวจจับฮาร์โมนิกของวิธี PQ และวิธี PQF โดยผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้วิธี PQ ของเฟส M และ T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับเฟส และสำหรับผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้วิธี PQF ของเฟส M และ T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับเฟส



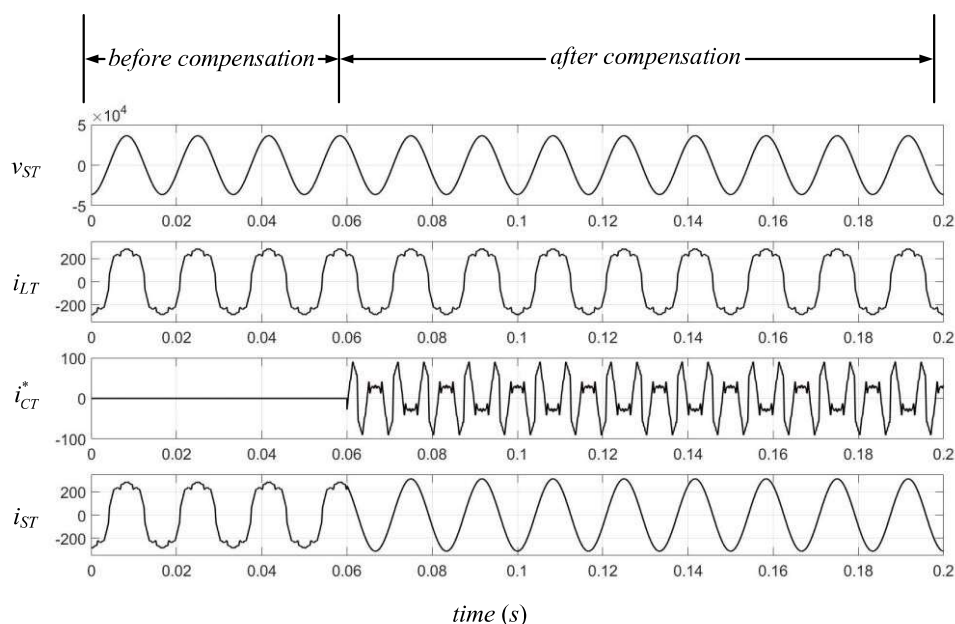
รูปที่ 3.13 ผลการตรวจจับฮาร์โมนิกของเฟส M ด้วยวิธี PQ กรณีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปไซน์



รูปที่ 3.14 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส T ด้วยวิธี PQ กรณีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปไซน์



รูปที่ 3.15 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส M ด้วยวิธี PQF กรณีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปไซน์



รูปที่ 3.16 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส T ด้วยวิธี PQF กรณีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นรูปไซน์

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่เฟส M และ T ดังรูปที่ 3.13 ถึง 3.16 พบว่า ผลการทดสอบทั้งวิธี PQ ที่ใช้วงจร LPF และวิธี PQF ที่ใช้วิธี SWFA มีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 0.06 วินาทีกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งสองเฟส (i_{SM}, i_{ST}) มีลักษณะสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เช่นเดียวกับกระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) ซึ่งสามารถวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายได้เท่ากับ 22.16% เท่ากันทั้งสองเฟส ต่อมาตั้งแต่ช่วงเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป แหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติจะทำการฉีดกระแสที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับกระแสอ้างอิง (i_C^*) ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF ส่งผลให้กระแส i_{SM} และ i_{ST} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้น และมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายลดลง โดยวิธี PQ ให้ค่า %THD ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M และ T เท่ากับ 0.0703% เท่ากันทั้งสองเฟส และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสของเฟส A B และ C เท่ากับ 0.0703% เท่ากันทั้งสามเฟส และวิธี PQF ให้ค่า %THD ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M และ T เท่ากับ 0.0015% เท่ากันทั้งสองเฟส และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสของเฟส A B และ C เท่ากับ 0.0015% 0.0011% และ 0.001 % ตามลำดับเฟส ซึ่งสามารถดูสรุปผลค่า %THD ดังกล่าวได้จากตารางที่ 3.2

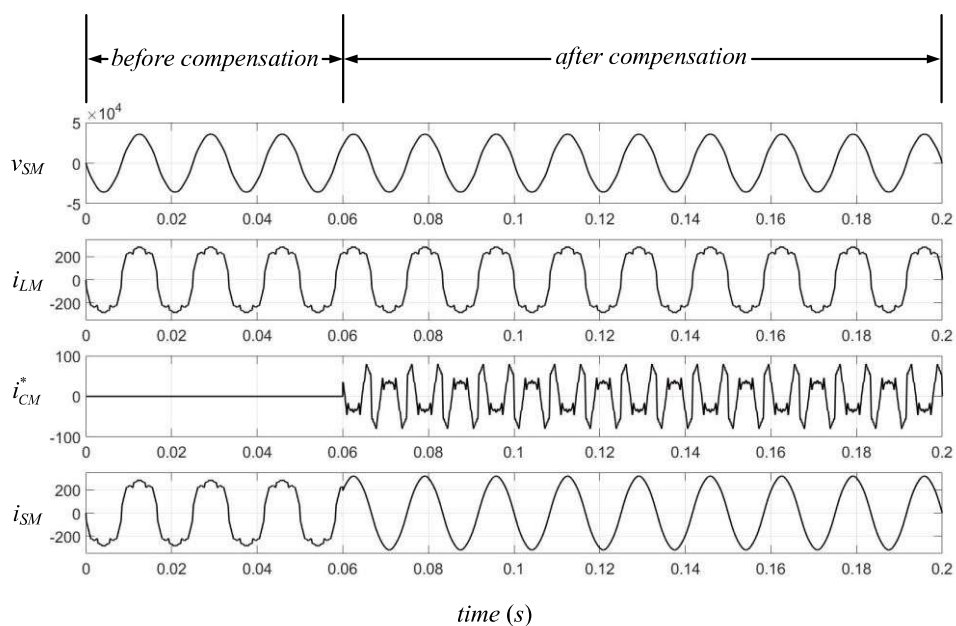
ตารางที่ 3.2 สรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการทดสอบกรณีที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์

วิธีการคำนวณ ตรวจจับฮาร์มอนิก	%THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย						
	ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส			ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส			
	i_{SM}	i_{ST}	เฉลี่ย	i_{SA}	i_{SB}	i_{SC}	เฉลี่ย
วิธี PQ	0.0703	0.0703	0.0703	0.0703	0.0703	0.0703	0.0703
วิธี PQF	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0011	0.0011	0.0013

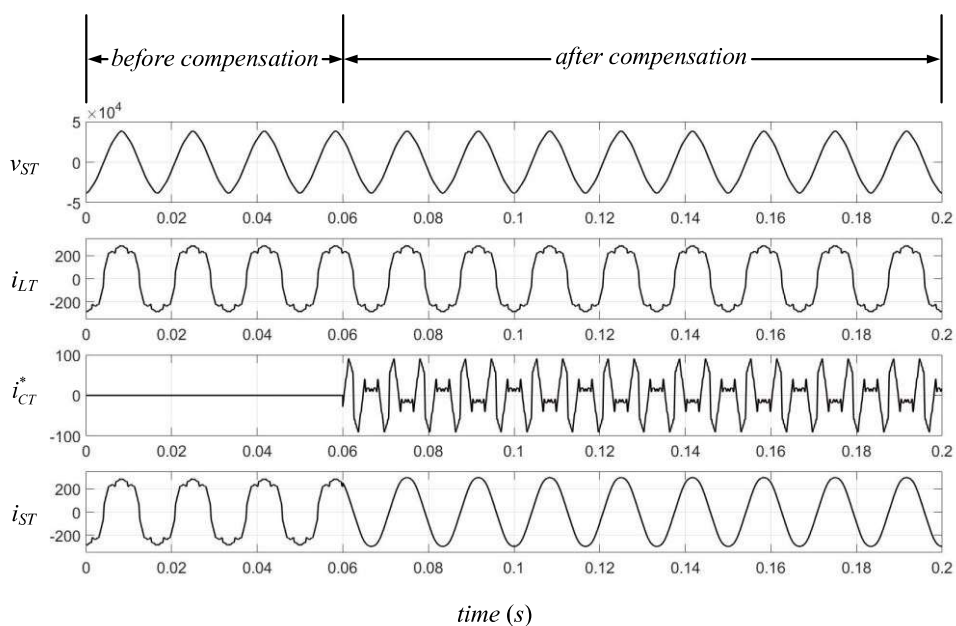
จากผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยดังตารางที่ 3.2 พบว่าวิธี PQF ที่ใช้วิธี SWFA ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟจะให้ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสเท่ากับ 0.0015% และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสเท่ากับ 0.0013% ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากรณีวิธี PQ ที่ใช้วงจร LPF ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟซึ่งมีค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสเท่ากันเท่ากับ 0.0703% จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธี PQF มีสมรรถนะในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ ซึ่งเป็นผลมาจากวิธี SWFA ที่มีสมรรถนะในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟที่ดีกว่าการใช้วงจร LPF จากผลดังกล่าวในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธี PQF ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับการทดสอบในกรณีที่ 2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปนต่อไป

3.6.2 การทดสอบกรณีที่ 2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปน

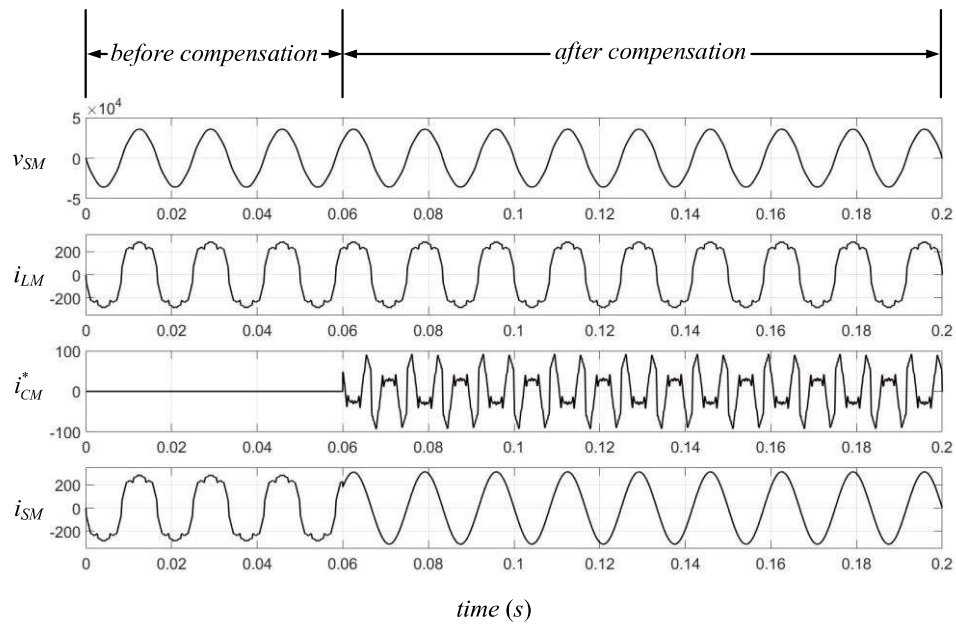
การทดสอบการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปนจะทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธี PQF และวิธี PQF ร่วมกับการตรวจจับแรงดันเฟสบวกมูลฐานด้วยวิธี PSVD (วิธี PQF ร่วมกับ PSVD) โดยในการทดสอบจะกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสมีฮาร์มอนิกปะปนส่งผลให้แรงดันดังกล่าวมีลักษณะไม่เป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ที่ค่า %THD เท่ากับ 3.26% (Tan P-C. and et al.,2003) เท่ากันทั้ง 2 เฟส (เฟส M และ T) โดยผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส M และ T สำหรับกรณีที่ใช้การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF เพียงอย่างเดียวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 ตามลำดับเฟส และสำหรับผลการจำลองสถานการณ์กรณีที่ใช้การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF และ PSVD สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 และ 3.20 ตามลำดับเฟส



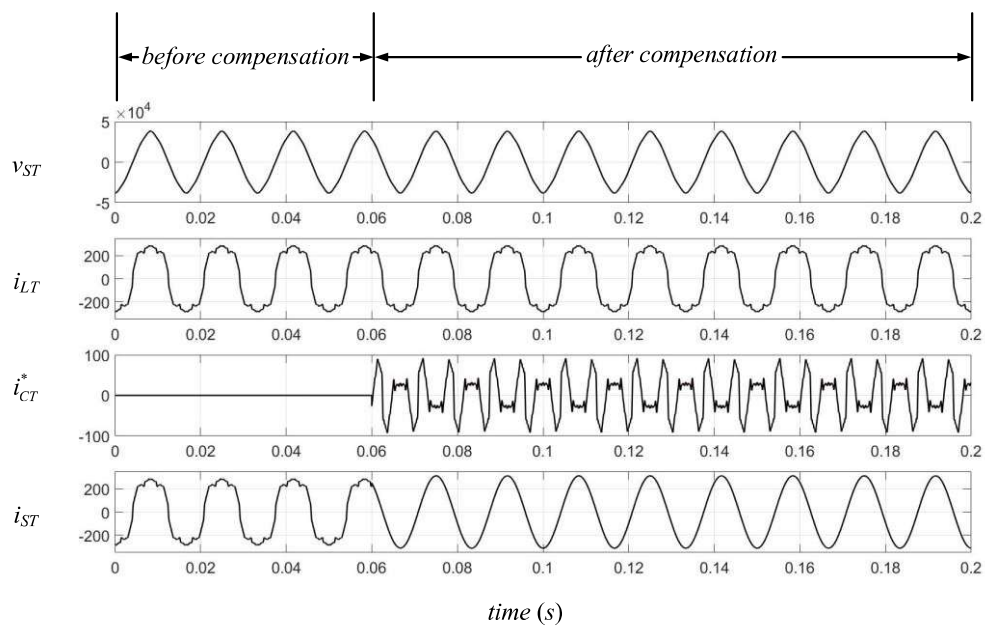
รูปที่ 3.17 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส M ด้วยวิธี PQF กรณีแหล่งจ่ายแรงดันมีฮาร์มอนิกปะปน



รูปที่ 3.18 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส T ด้วยวิธี PQF กรณีแหล่งจ่ายแรงดันมีฮาร์มอนิกปะปน



รูปที่ 3.19 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส M ด้วยวิธี PQF ร่วมกับ PSVD กรณีแหล่งจ่ายแรงดันมีฮาร์มอนิกปะปน



รูปที่ 3.20 ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของเฟส T ด้วยวิธี PQF ร่วมกับ PSVD กรณีแหล่งจ่ายแรงดันมีฮาร์มอนิกปะปน

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่เฟส M และ T ดังรูปที่ 3.17 ถึง 3.20 พบว่า ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 0.06 วินาทีกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งสองเฟส (i_{SM}, i_{ST}) มีลักษณะสัญญาณผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เช่นเดียวกับกับกระแสโหลด (i_{LM}, i_{LT}) ซึ่งสามารถวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายได้เท่ากับ 22.16% เท่ากันทั้งสองเฟส ต่อมาในช่วงเวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติจะทำการฉีดกระแสที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับกระแสอ้างอิง (i_{CM}^*, i_{CT}^*) ที่ได้จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF และวิธี PQF ร่วมกับ PSVD ส่งผลให้กระแส i_{SM} และ i_{ST} มีลักษณะรูปสัญญาณกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้น และมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายลดลง โดยวิธี PQF ให้ค่า %THD ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M และ T เท่ากับ 1.95% และ 2.12% ตามลำดับเฟส และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสของเฟส A B และ C เท่ากับ 1.95% 1.95% และ 2.07% ตามลำดับเฟส และวิธี PQF ร่วมกับ PSVD ให้ค่า %THD ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสของเฟส M และ T เท่ากับ 0.0031% และ 0.0041% ตามลำดับเฟส และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสของเฟส A B และ C เท่ากับ 0.0028% 0.0075% และ 0.0058% ตามลำดับเฟส ซึ่งสามารถสรุปผลค่า %THD ดังกล่าวได้จากตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยของการทดสอบกรณีที่ 2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปน

วิธีการคำนวณ ตรวจจับฮาร์มอนิก	%THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชย						
	ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส			ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส			
	i_{SM}	i_{ST}	เฉลี่ย	i_{SA}	i_{SB}	i_{SC}	เฉลี่ย
วิธี PQF	1.95	2.12	2.04	1.95	2.07	2.07	2.03
วิธี PQF ร่วมกับ PSVD	0.0031	0.0041	0.0036	0.0028	0.0075	0.0058	0.0054

จากผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยดังตารางที่ 3.3 การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF เพียงอย่างเดียวจะให้ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสมีค่าเท่ากับ 2.04% และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสมีค่าเท่ากับ 2.03% ซึ่งมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายของการทดสอบกรณีที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ดังตารางที่ 3.2 ในกรณีที่ใช้วิธี PQF ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันมีฮาร์มอนิกปะปนจะส่งผลเสียถึงการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก ในขณะที่กรณีที่ใช้การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ร่วมกับ PSVD จะให้ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส และที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสน้อยกว่า โดยมีค่าเท่ากับ 0.0036% และ 0.0054% ตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้วิธี PSVD ร่วมในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก สามารถแก้ปัญหาการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกที่ผิดพลาดเนื่องจากผลกระทบของฮาร์มอนิกที่ปะปนในแรงดันที่แหล่งจ่ายได้

3.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม และนำเสนอการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ซึ่งประยุกต์ใช้วิธี SWFA ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟแทนการใช้วงจร LPF นอกจากนี้ได้นำเสนอการใช้วิธี PSVD ร่วมในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อแก้ปัญหาการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกผิดพลาดในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปน โดยการทดสอบการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา พบว่า ในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF สามารถคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธี PQF จะให้ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสและที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสมีค่าที่น้อยกว่าวิธี PQ เนื่องจากวิธี SWFA มีสมรรถนะในการกรององค์ประกอบฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟที่ดีกว่าการใช้วงจร LPF ส่วนในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปนการใช้วิธี PQF ร่วมกับ PSVD ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกจะให้ค่า %THD เฉลี่ยของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟสและที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสมีค่าที่น้อยกว่าการใช้วิธี PQF เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการนำวิธี PSVD มาร่วมในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกจะช่วยลดการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกผิดพลาดเนื่องจากมีฮาร์มอนิกปะปนที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้การคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ร่วมกับ PSVD ในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกในวิทยานิพนธ์บทต่อ ๆ ไป