

บทที่ 3

การตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนดีคิ้วสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

3.1 บทนำ

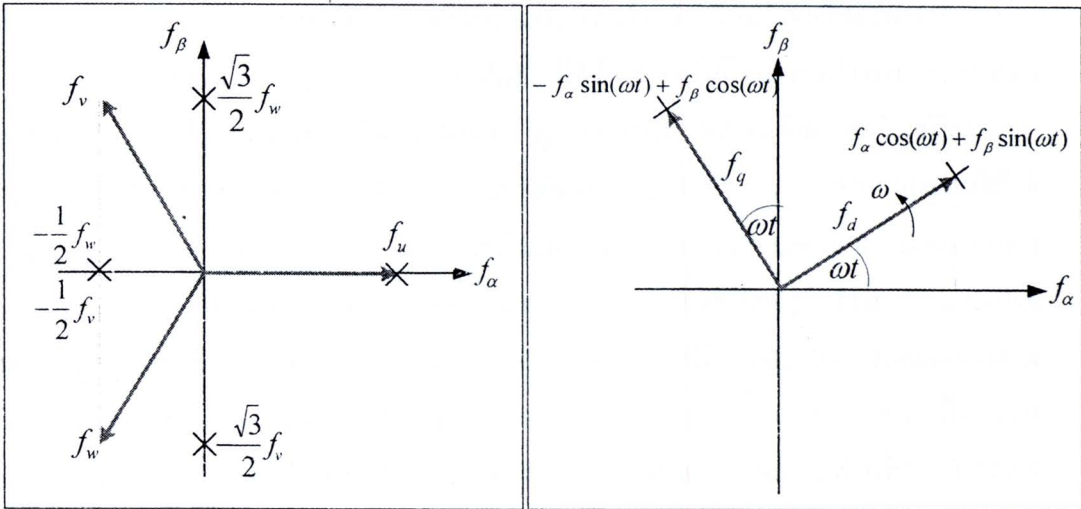
การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ในปัจจุบันวิธีการตรวจจับดังกล่าวมีอยู่หลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ดังนั้น ในบทนี้จึงได้นำเสนอวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่พิจารณาบนแกนดีคิ้ว ได้แก่ วิธีการอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronous Reference Frame) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า วิธี SRF (Takeda, Ikeda, Teramoto, and Aritsuka, 1988) และวิธีดีคิ้วเอฟ ต่อไปจะเรียกว่า วิธี DQF (Sujitjorn, Areerak, and Kulworawanichpong, 2007) เนื้อหาที่นำเสนอในบทนี้ประกอบด้วย ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีคิ้ว ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนดีคิ้ว การทดสอบและปรับปรุงสมรรถนะเพื่อเพิ่มขีดความสามารถการตรวจจับฮาร์มอนิกให้ดีขึ้นในแต่ละวิธี โดยมีการเปรียบเทียบเพื่อเลือกวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนดีคิ้วที่เหมาะสมสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

3.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนดีคิ้ว

การตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนดีคิ้วใช้หลักการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนสามเฟส คือ f_u , f_v และ f_w เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ คือ f_α และ f_β โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ ดังสมการที่ (3-1) ทั้งนี้สมการดังกล่าวได้ถูกปรับคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ เท่ากับ $\sqrt{\frac{2}{3}}$ เนื่องจากการแปลงปริมาณบนแกนสามเฟสไปอยู่บนแกน $\alpha\beta$ ได้คำนึงถึงกฎการอนุรักษ์กำลังงาน (power conserving convention) หลังจากนั้นจึงแปลงปริมาณบนแกน $\alpha\beta$ เป็นปริมาณบนแกนดีคิ้ว คือ f_d และ f_q ด้วยเมตริกซ์ดังสมการที่ (3-2) จากสมการดังกล่าวค่า ω คือ ความถี่เชิงมุม (เรเดียน/วินาที) ที่หมุนด้วยความเร็วตามการกำหนดของผู้วิจัย เพื่อให้สามารถระบุปริมาณฮาร์มอนิกที่ความถี่ใด ๆ ได้ตามที่ออกแบบ จากขั้นตอนการแปลงปริมาณไฟฟ้าที่ได้กล่าวในข้างต้น เรียกว่า การแปลงของปาร์ค (Park's Transformation) โดยมีแผนภาพแสดงการแปลงปริมาณต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 3.1

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_u \\ f_v \\ f_w \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

(ก) การแปลงแกนสามเฟสเป็นแกน $\alpha\beta$ (ข) การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกนดีคิว

รูปที่ 3.1 แผนภาพการแปลงแกนของปาร์ก

จากรูปที่ 3.1 (ก) งานวิจัยได้พิจารณาปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนสามเฟสสมดุล (f_u, f_v, f_w) ที่มีส่วนประกอบลำดับบวก (positive sequence) ทำมุมห่างกัน เท่ากับ $\frac{2\pi}{3}$ เรเดียน จึงไม่พิจารณาสวนประกอบลำดับศูนย์ (zero sequence) สำหรับแกน $\alpha\beta$ จะต้องทำมุมตั้งฉากโดยกำหนดให้แกน α วางตัวในแนวเดียวกันกับเฟส u ในส่วนรูปที่ 3.1 (ข) แกนดีคิวทำมุมตั้งฉากกัน หมุนด้วยความเร็วเท่ากับ ω (เรเดียน/วินาที) เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้นจะยกตัวอย่าง กระแสไฟฟ้าบนแกนสามเฟสสมดุลกรณีไม่พิจารณาปริมาณฮาร์มอนิก เมื่อต้องการแปลงให้อยู่บน แกนดีคิวสามารถทำได้โดย ขั้นตอนที่หนึ่ง คือ แปลงปริมาณบนแกนสามเฟสให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ ขั้นตอนที่สอง คือ แปลงปริมาณบนแกน $\alpha\beta$ ให้อยู่บนแกนดีคิว เมื่อพิจารณาการหมุนบนแกนดีคิว เท่ากับ ค่าความถี่เชิงมุมของกระแสไฟฟ้าบนแกนสามเฟส ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยที่ i_1 คือ ค่าแอมพลิจูดของกระแสที่ความถี่มูลฐานของระบบ

ตารางที่ 3.1 การแปลงกระแสไฟฟ้าบนแกนสามเฟส กรณีไม่พิจารณาปริมาณฮาร์โมนิก

แกนการแปลง	รูปแบบสมการ
บนแกนสามเฟส	$i_u = i_1 \cos(\omega t) , i_v = i_1 \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) , i_w = i_1 \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$
บนแกน $\alpha\beta$	$i_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} i_1 \cos(\omega t) , i_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} i_1 \sin(\omega t)$
บนแกนดีคิว	$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} i_1 , i_q = 0$

ตารางที่ 3.2 การแปลงกระแสไฟฟ้าบนแกนสามเฟส กรณีพิจารณาปริมาณฮาร์โมนิก
อันดับที่ 5 และอันดับที่ 7

แกนการแปลง	รูปแบบสมการ
บนแกนสามเฟส	$i_u = i_1 \cos(\omega t) + i_5 \cos(5\omega t) + i_7 \cos(7\omega t)$ $i_v = i_1 \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + i_5 \cos(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) + i_7 \cos(7\omega t - \frac{2\pi}{3})$ $i_w = i_1 \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + i_5 \cos(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) + i_7 \cos(7\omega t + \frac{2\pi}{3})$
บนแกน $\alpha\beta$	$i_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} (i_1 \cos(\omega t) + i_5 \cos(5\omega t) + i_7 \cos(7\omega t))$ $i_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} (i_1 \sin(\omega t) - i_5 \sin(5\omega t) + i_7 \sin(7\omega t))$
บนแกนดีคิว	$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} (i_1 + i_5 \cos(6\omega t) + i_7 \cos(6\omega t))$ $i_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} (-i_5 \sin(6\omega t) + i_7 \sin(6\omega t))$

ในงานวิจัย กระแสไฟฟ้าบนแกนสามเฟสที่นำมาพิจารณาได้รับผลกระทบจากโหลดเรียงกระแสสามเฟสก่อให้เกิดปริมาณฮาร์โมนิกขึ้น การแปลงปริมาณดังกล่าวให้อยู่บนแกนดีคิวนั้นสามารถทำได้ โดยทำการยกตัวอย่าง กรณีที่มีฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 และฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 รวมอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน ดังตารางที่ 3.2 โดยที่ i_5 และ i_7 คือ ค่าแอมพลิจูดของกระแสที่ความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าปริมาณฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 จะปรากฏในอันดับที่ 6 เมื่อพิจารณาอยู่บนแกนดีคิว จะแตกต่างกันในส่วน

เครื่องหมายของค่ากระแสบนแกนคิวิซึ่งขึ้นอยู่กับลำดับเฟสของฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับ สำหรับปริมาณฮาร์มอนิกอันดับใด ๆ เมื่อพิจารณาอยู่บนแกนคิวิสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณฮาร์มอนิกที่ปรากฏบนแกนคิวิ

อันดับฮาร์มอนิกบนแกนสามเฟส	ลำดับเฟส	อันดับฮาร์มอนิกบนแกนคิวิ (หมุนที่ความถี่มูลฐานของระบบ)
5	ลบ	6 (ลำดับเฟสลบ)
7	บวก	6 (ลำดับเฟสบวก)
11	ลบ	12 (ลำดับเฟสลบ)
13	บวก	12 (ลำดับเฟสบวก)
17	ลบ	18 (ลำดับเฟสลบ)
19	บวก	18 (ลำดับเฟสบวก)

กำลังไฟฟ้าบนแกนคิวิมีอยู่ด้วยกันสองส่วน เริ่มต้นจากส่วนแรก คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง (p) อธิบายได้ดังสมการที่ (3-3) และค่ากำลังไฟฟ้าสามเฟส ($p_{3\phi}$) คำนวณได้ตามสมการที่ (3-4) เมื่อแปลงให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกน $\alpha\beta$ ($p_{\alpha\beta}$) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-5) สุดท้ายแปลงให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟบนแกนคิวิ (p_{dq}) ปรากฏดังสมการที่ (3-6)

$$p = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i} \tag{3-3}$$

$$p_{3\phi} = \mathbf{v}_{uvw}^T \cdot \mathbf{i}_{uvw} = \begin{bmatrix} v_u & v_v & v_w \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = v_u i_u + v_v i_v + v_w i_w \tag{3-4}$$

$$p_{\alpha\beta} = \mathbf{v}_{\alpha\beta}^T \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \tag{3-5}$$

$$p_{dq} = \mathbf{v}_{dq}^T \cdot \mathbf{i}_{dq} = \begin{bmatrix} v_d & v_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = v_d i_d + v_q i_q \tag{3-6}$$

ส่วนที่สอง คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่ง (q) แสดงได้ดังสมการที่ (3-7) เริ่มต้นจากค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่งสามเฟส ($q_{3\phi}$) ตามสมการที่ (3-8) สามารถแปลงค่าดังกล่าวให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ ($q_{\alpha\beta}$) ดังสมการที่ (3-9) จนกระทั่งสามารถพิจารณาค่าแวกเตอร์กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขณะหนึ่งบนแกนดีคิว (q_{dq}) ดังสมการที่ (3-10)

$$q = \mathbf{v} \times \mathbf{i} \quad (3-7)$$

$$q_{3\phi} = \mathbf{v}_{uvw} \times \mathbf{i}_{uvw} = \begin{bmatrix} q_u \\ q_v \\ q_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_v & v_w \\ i_v & i_w \\ v_w & v_u \\ i_w & i_u \\ v_u & v_v \\ i_u & i_v \end{bmatrix} \quad (3-8)$$



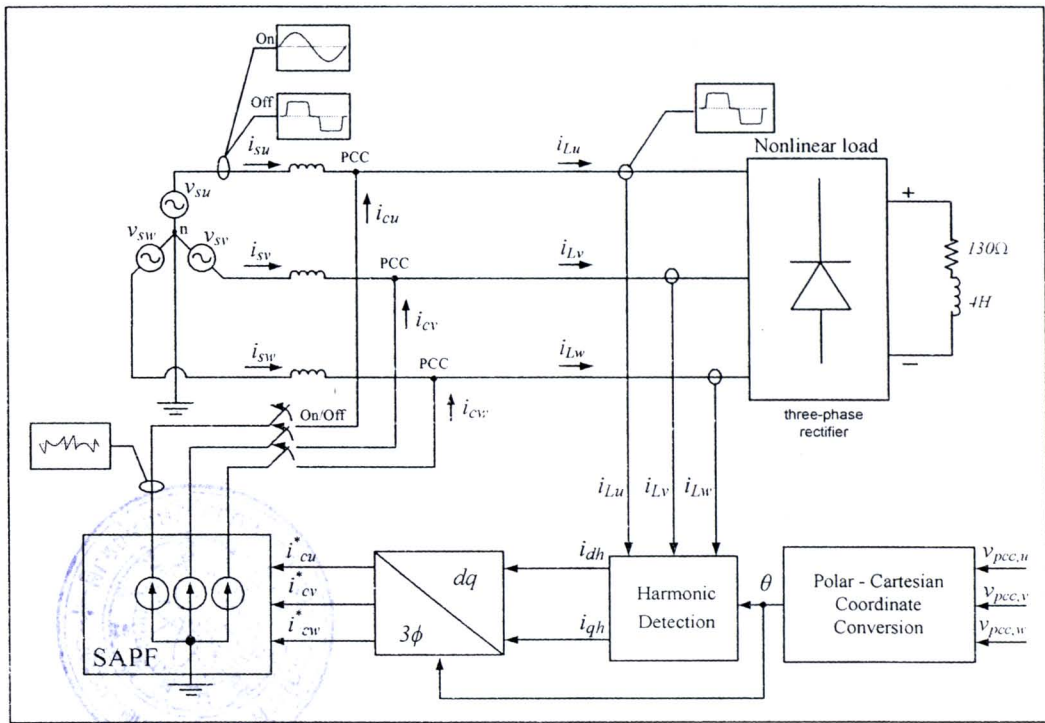
$$q_{\alpha\beta} = \mathbf{v}_{\alpha\beta} \times \mathbf{i}_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ i_\alpha & i_\beta \end{vmatrix} = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad (3-9)$$

$$q_{dq} = \mathbf{v}_{dq} \times \mathbf{i}_{dq} = \begin{vmatrix} v_d & v_q \\ i_d & i_q \end{vmatrix} = v_d i_q - v_q i_d \quad (3-10)$$

3.3 การจำลองสถานการณ์สำหรับการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก

การจำลองสถานการณ์ในบทนี้เพื่อต้องการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก จึงไม่พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตัวควบคุมการฉีดกระแสชดเชย การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ดังนั้น จึงเลือกใช้แบบจำลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสชดเชย ทําหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยได้อย่างสมบูรณ์โดยกระแสชดเชยดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิงสามเฟส ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนดีคิว

การกําจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 จากรูปดังกล่าวแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส เท่ากับ 380 V_{L-L} ค่าความเหนี่ยวนำทางด้านสายส่ง เท่ากับ 0.01 mH ต่อเข้ากับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นค่าความต้านทาน (R_L) เท่ากับ 130 Ω อนุกรมกับค่าความเหนี่ยวนำ (L_L) เท่ากับ 4 H



รูปที่ 3.2 ระบบสำหรับการทดสอบสมรรถนะการตรวจฮาร์มอนิก

โหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก บล็อกตรวจฮาร์มอนิกบนแกนดีคิวจึงเข้ามามีบทบาท เพื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ ด้วยการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว (i_{dh} และ i_{qh}) ก่อนแปลงให้อยู่บนแกนสามเฟส (i_{cu}^* , i_{cv}^* และ i_{cw}^*) สำหรับป้อนเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน จากนั้นบล็อกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสชดเชย จะทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชย (i_{cu} , i_{cv} และ i_{cw}) ให้แก่ระบบ ซึ่งสามารถพิจารณาการฉีดกระแสชดเชยกรณีเฟส u ได้ตามสมการที่ (3-11) ดังนี้

$$i_{su} = i_{Lu} - i_{cu} \quad (3-11)$$

จากสมการที่ (3-11) เมื่อพิจารณาการทำงานในกรณีเฟส u ที่ไม่มีการฉีดกระแสชดเชย (i_{cu}) ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (i_{su}) จะเท่ากับ ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{Lu}) ซึ่งจะมีการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ จึงทำให้รูปสัญญาณมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ แต่ถ้าทำการฉีดกระแสชดเชยดังสมการที่ (3-11) ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักจะเท่ากับ ค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดหักลบกับค่ากระแสชดเชยจึงทำให้ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีลักษณะรูปสัญญาณเป็นไซน์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบเพื่อหักลบกับปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น

ส่งผลให้รูปสัญญาณปรากฏองค์ประกอบฮาร์มอนิกลดน้อยลง ขณะเดียวกันองค์ประกอบที่ความถี่มูลฐานยังคงอยู่เช่นเดิม สำหรับผลการทดสอบจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมในแต่ละเฟส (Total Harmonic Current Distortion: %THD_{i,k}) ดังสมการที่ (3-12) โดยการเฉลี่ยเป็น %THD_{av} ตามสมการที่ (3-13) เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก เพื่อให้การตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนคิกวีมีสมรรถนะดีที่สุดสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน

$$\%THD_{i,k} = \sqrt{\frac{\sum_{h=2} i_h^2}{i_1^2}} \times 100\% \quad (3-12)$$

$$\%THD_{av} = \sqrt{\frac{\sum_{k=u,v,w} \%THD_{i,k}^2}{3}} \quad (3-13)$$

นอกเหนือไปจากการพิจารณาค่า %THD_{av} เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก ผู้วิจัยมีความต้องการที่จะกำจัดฮาร์มอนิก ควบคู่กับการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ ดังนั้น การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนคิกวี จึงมีการนำเสนอค่าตัวประกอบกำลัง (pf) ในกรณีก่อน และภายหลังการชดเชย โดยมีแนวทางการปรับปรุงในสองส่วน คือ ค่า pf_{disp} (displacement power factor) ดังสมการที่ (3-14) และค่า pf_{dist} (distortion power factor) ดังสมการที่ (3-15) เพราะฉะนั้น ตัวชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังจึงพิจารณาที่ค่าตัวประกอบกำลังรวม (pf_{total}) ดังสมการที่ (3-16)

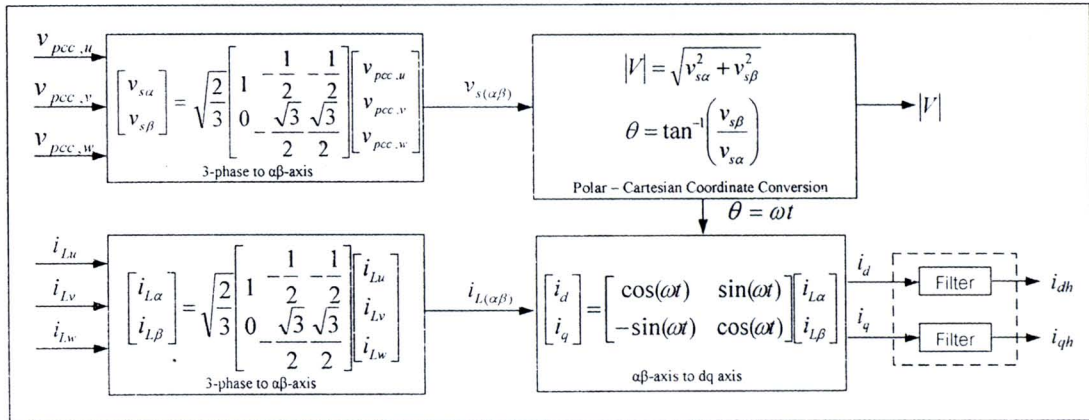
$$pf_{disp} = \frac{P}{S_1} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt}{V_{rms,1} \cdot I_{rms,1}} \quad (3-14)$$

$$pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_v^2} \cdot \sqrt{1 + THD_i^2}} = \frac{V_{rms,1} \cdot I_{rms,1}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (3-15)$$

$$pf_{total} = pf_{dist} \times pf_{disp} \quad (3-16)$$

3.4 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงอิงซิงโครนัส

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงอิงซิงโครนัส หรือวิธี SRF มีแผนภาพขั้นตอนการคำนวณแสดงได้ตามรูปที่ 3.3 โดยรายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้



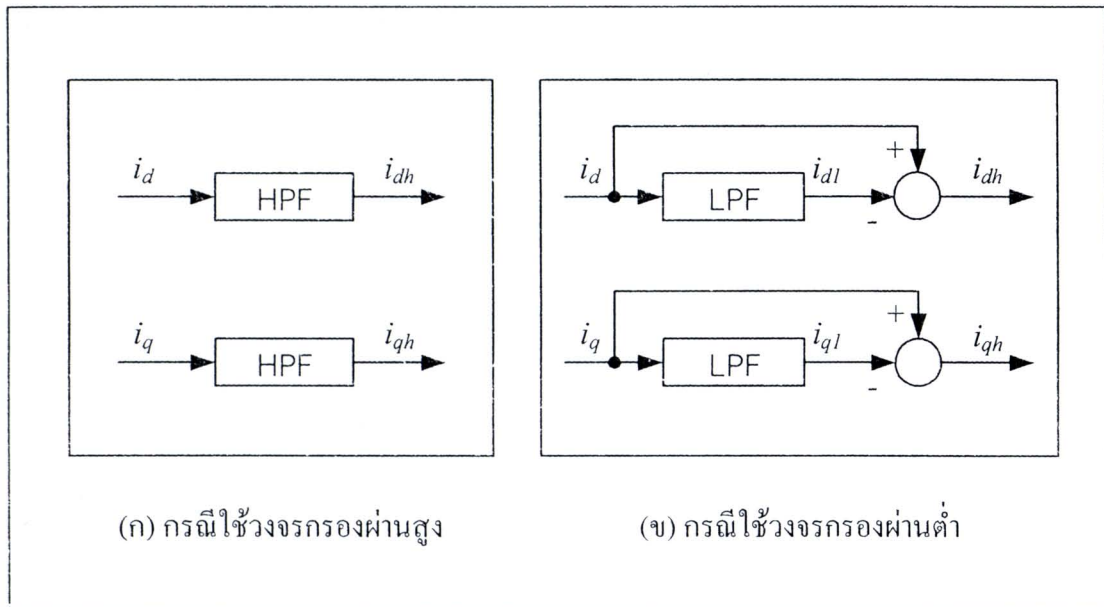
รูปที่ 3.3 แผนภาพบล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF

ขั้นตอนที่ 1 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส คือ i_{Lu} , i_{Lv} และ i_{Lw} เป็นกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}$ และ $i_{L\beta}$) รวมถึงค่าแรงดันที่จุด PCC คือ $v_{pcc,u}$, $v_{pcc,v}$ และ $v_{pcc,w}$ เป็นแรงดันไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($v_{s\alpha}$ และ $v_{s\beta}$) ดังบล็อก 3-phase to $\alpha\beta$

ขั้นตอนที่ 2 แปลงค่ากระแสบนแกน $\alpha\beta$ ไปอยู่บนแกนดีคิว (i_d และ i_q) ซึ่งปรากฏในบล็อก $\alpha\beta$ axis to dq axis สำหรับค่า ω ที่ปรากฏในสมการพิจารณาจากค่ามุม (θ) โดยคำนวณมาจากบล็อก Polar – Cartesian Coordinate Conversion มีค่าเท่ากับ ความถี่มูลฐานของระบบ ทำให้เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า i_d และ i_q หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม เท่ากับ 314.16 เรเดียน/วินาที เพื่อใช้พิจารณาแยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิก (i_{dh} และ i_{qh}) ออกจากปริมาณกระแสมูลฐาน (i_{d1} และ i_{q1})

ขั้นตอนที่ 3 แยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนดีคิว ออกจากปริมาณกระแสที่มีความถี่มูลฐาน ทำได้โดยใช้วงจรกรอง เช่น วงจรกรองผ่านสูง (HPF) หรือวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF) เป็นต้น โดยมีโครงสร้างการใช้งานดังรูปที่ 3.4 การใช้วงจรกรองดังกล่าว แสดงไว้ด้วยบล็อก Filter ในรูปที่ 3.3 สำหรับการปรับค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านสูง และวงจรกรองผ่านต่ำมีผลต่อสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ซึ่งจะนำเสนอแนวทางการปรับปรุงสมรรถนะใน

ลำดับถัดไป ในขั้นตอนนี้จะได้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิก (i_{dh} และ i_{qh}) เพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงบนแกนดักไว้ให้กับขั้นตอนการควบคุมกระแสชดเชยต่อไป



รูปที่ 3.4 โครงสร้างการใช้งานวงจรกรองผ่านสูงและวงจรกรองผ่านต่ำ

3.5 การปรับปรุงสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิก

ด้วยวิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์

การปรับค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านสูง และวงจรกรองผ่านต่ำมีผลต่อสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF จึงนำจุดนี้มาเป็นเกณฑ์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับดังกล่าว วงจรกรองที่นำมาทดสอบมี 2 ชนิด คือ วงจรกรองผ่านสูง และวงจรกรองผ่านต่ำ ซึ่งจะทดสอบที่อันดับ 1 ถึง อันดับ 3 ในช่วงความถี่ตัด 1 เฮิร์ตซ์ ถึง 100 เฮิร์ตซ์ จากการวิเคราะห์โครงสร้างวงจรแอนะล็อกของวงจรดังกล่าว ให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอน พิจารณาได้จากตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 ตามลำดับ สิ่งที่มีความสำคัญในการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก คือ ค่าความถี่ตัด (cutoff frequency: f_c) ณ จุดการทำงานของระบบ

จากตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของวงจรกรองผ่านสูง และวงจรกรองผ่านต่ำอันดับ 1 ถึงอันดับ 3 ในรูปแบบของวงจรแอนะล็อก รวมถึงแสดงรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนในแต่ละวงจรสำหรับนำไปใช้แทนในความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (3-17) เพื่อนำผลลัพธ์จากสมการที่

ได้แทนค่าในฟังก์ชันถ่ายโอน และนำผลเฉลยที่ได้จากการแทนค่าที่ความถี่ตัดใด ๆ แทนลงในบล็อกฟังก์ชันถ่ายโอน สำหรับทดสอบร่วมกับระบบจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งผลการทดสอบ ปรากฏดังรูปที่ 3.5 ในกรณีวงจรกรองผ่านสูง และรูปที่ 3.6 ในกรณีวงจรกรองผ่านต่ำ

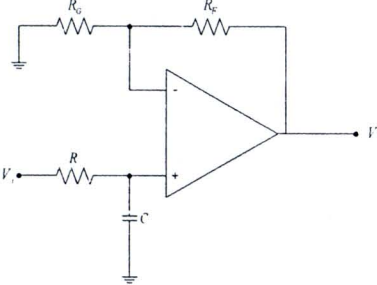
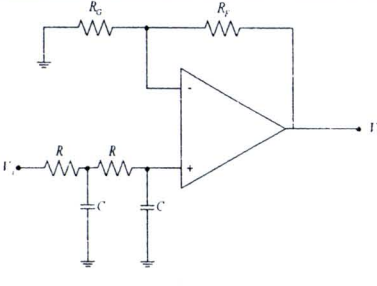
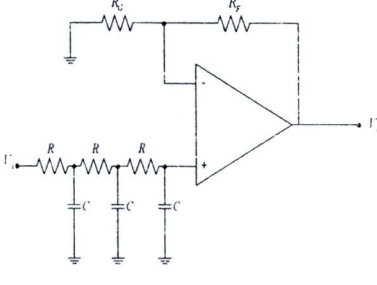
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

(3-17)

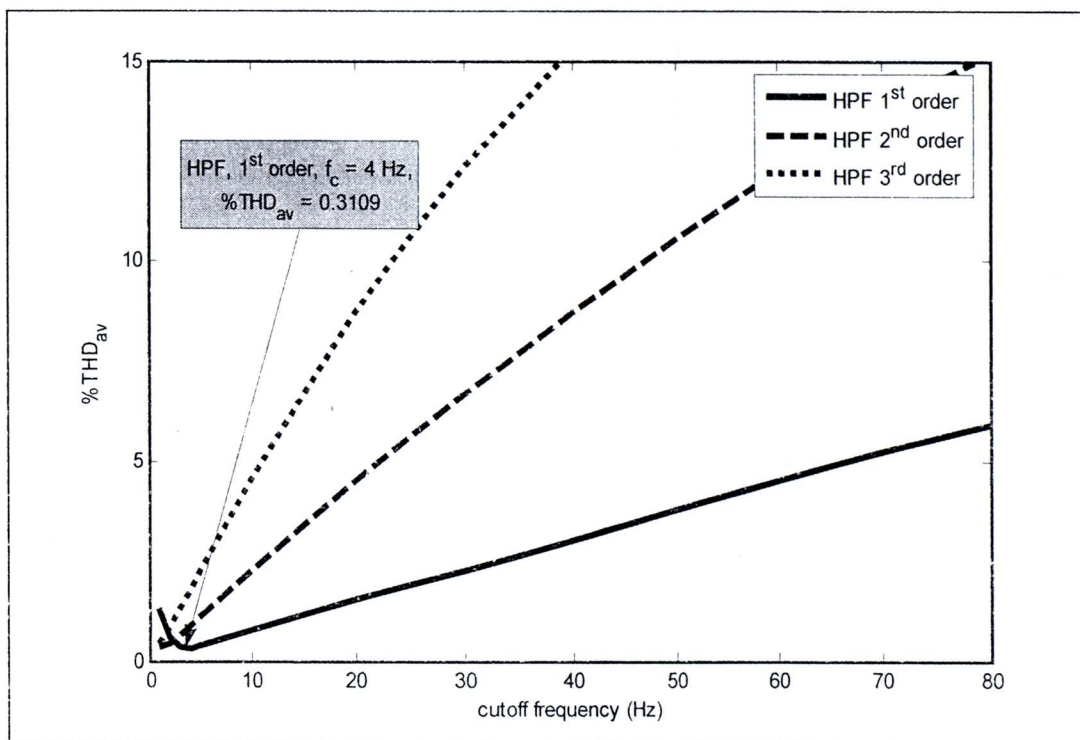
ตารางที่ 3.4 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอน และ โครงสร้างของวงจรกรองผ่านสูง

อันดับวงจร	โครงสร้างวงจร	ฟังก์ชันถ่ายโอน
อันดับหนึ่ง		$H(s) = \frac{s}{s + \frac{1}{RC}}$
อันดับสอง		$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{3}{RC}s + \frac{1}{(RC)^2}}$
อันดับสาม		$H(s) = \frac{s^3}{s^3 + \frac{6}{RC}s^2 + \frac{5}{(RC)^2}s + \frac{1}{(RC)^3}}$

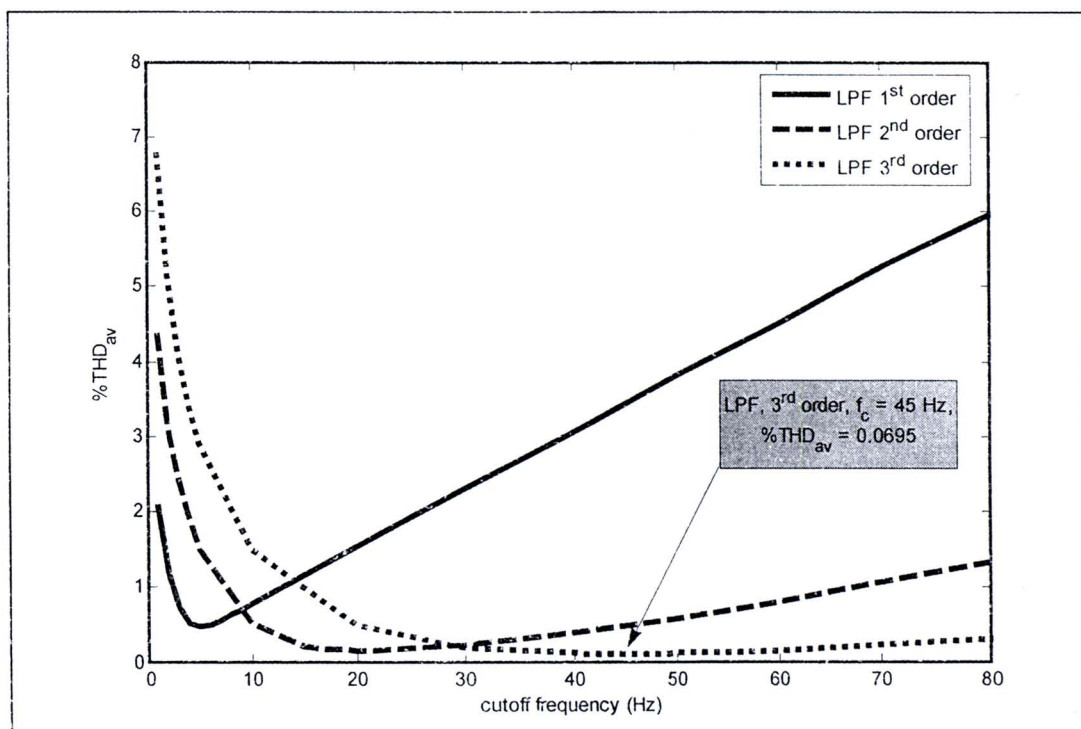
ตารางที่ 3.5 รูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอน และโครงสร้างของวงจรกรองผ่านต่ำ

อันดับวงจร	โครงสร้างวงจร	ฟังก์ชันถ่ายโอน
อันดับหนึ่ง		$L(s) = \frac{1}{RC} \frac{1}{s + \frac{1}{RC}}$
อันดับสอง		$L(s) = \frac{1}{(RC)^2} \frac{1}{s^2 + \frac{3}{RC}s + \frac{1}{(RC)^2}}$
อันดับสาม		$L(s) = \frac{1}{(RC)^3} \frac{1}{s^3 + \frac{5}{RC}s^2 + \frac{6}{(RC)^2}s + \frac{1}{(RC)^3}}$

จากรูปที่ 3.5 ค่า %THD_{av} หลังการชดเชยจากการจำลองสถานการณ์โดยใช้วงจรกรองผ่านสูงอันดับที่ 1 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 4 เฮิร์ตซ์ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่า %THD_{av} น้อยที่สุด เท่ากับ 0.3109 เปอร์เซ็นต์ และการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่ใช้วงจรกรองผ่านต่ำดังรูปที่ 3.6 มีค่า %THD_{av} หลังการชดเชยที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำอันดับที่ 3 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 45 เฮิร์ตซ์ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่า %THD_{av} น้อยที่สุดเท่ากับ 0.0695 เปอร์เซ็นต์



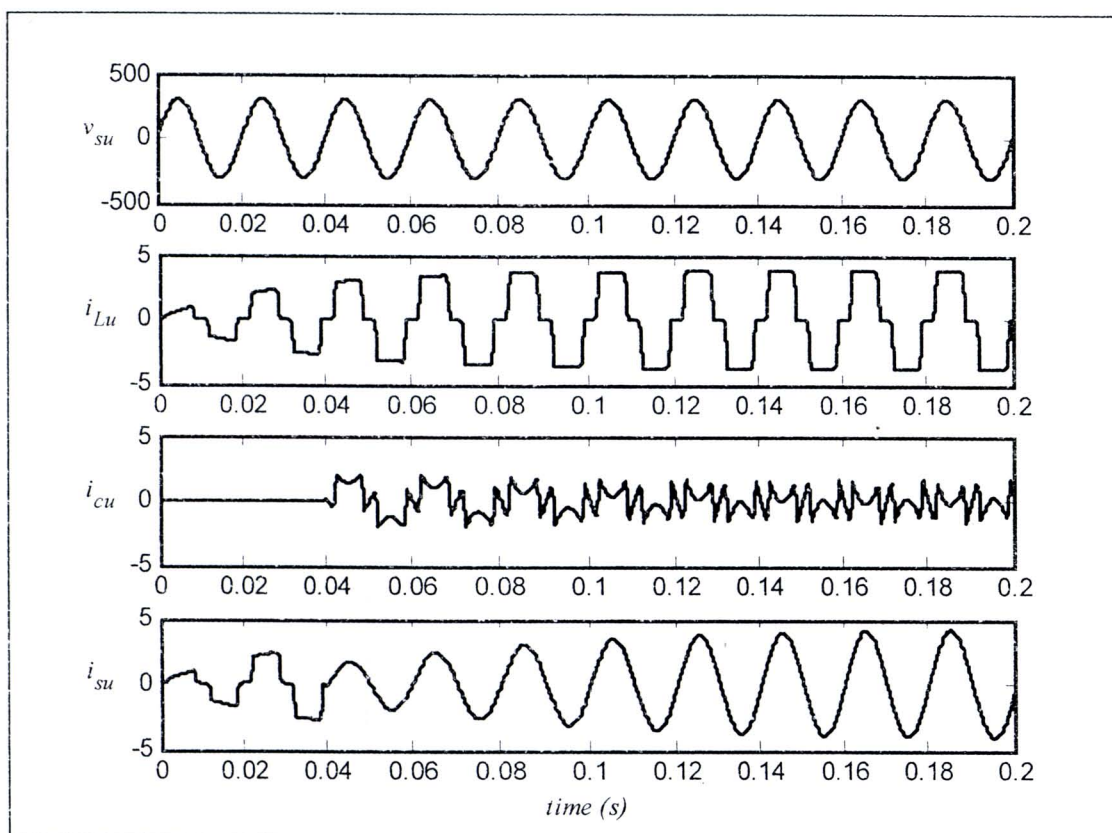
รูปที่ 3.5 ผลการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์โมนิกที่ใช้วงจรกรองผ่านสูง



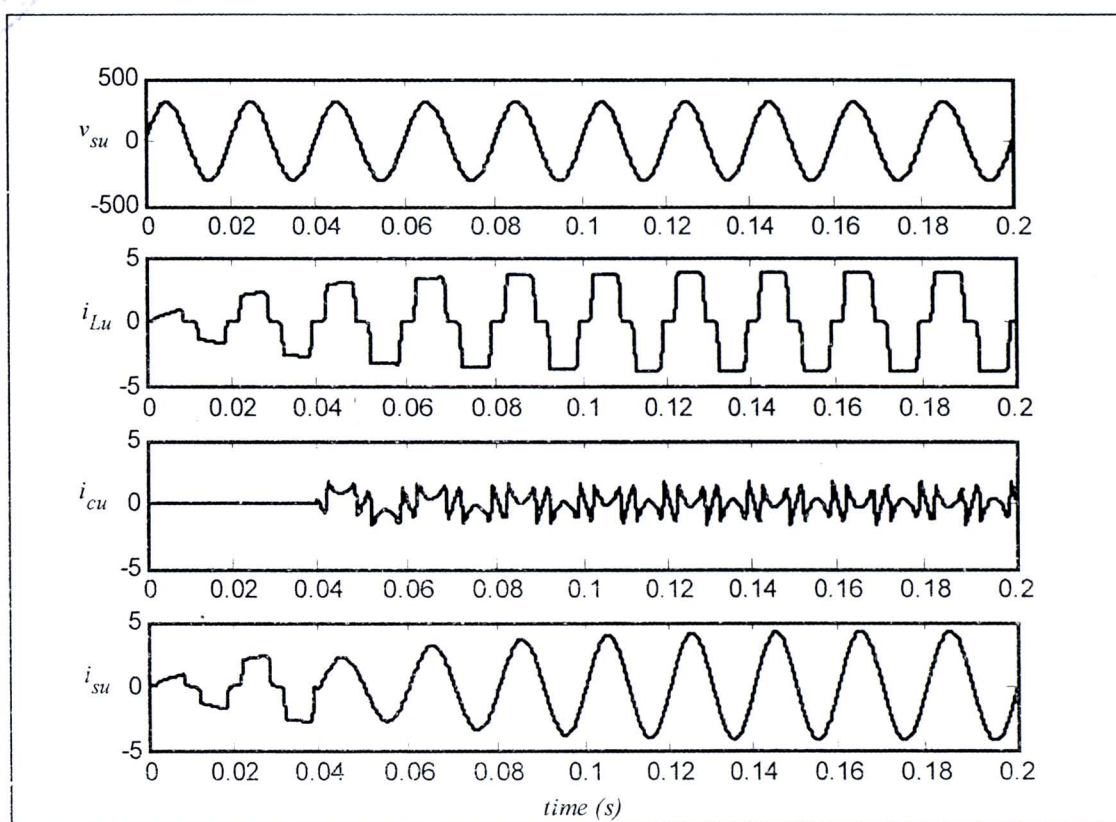
รูปที่ 3.6 ผลการทดสอบสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์โมนิกที่ใช้วงจรกรองผ่านต่ำ

ผลการทดสอบจากรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 พบว่า อันดับของวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อกมีผลต่อการแยกปริมาณฮาร์มอนิก ในเชิงทฤษฎีวงจรกรองความถี่แบบแอนะล็อกอันดับสูง (High – Order Filter) อาจมีส่วนเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบวงจรดังกล่าว เนื่องจากเล็งเห็นถึงความซับซ้อนสำหรับการสร้างจริงในทางปฏิบัติ ในขณะที่ค่า %THD_{sv} อาจมีแนวโน้มลดลงไม่มากกว่านี้นัก ทำให้การทดสอบวงจรดังกล่าวทดสอบเฉพาะที่อันดับ 1 ถึงอันดับ 3 เท่านั้น อีกทั้งผลการทดสอบที่น่าเสนอมีสมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกเป็นที่น่าสนใจ ซึ่งเห็นได้จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8

ผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้วงจรกรองผ่านสูง และวงจรกรองผ่านต่ำในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก ของเฟส u ดูได้จากรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 สังเกตได้ว่า การจำลองสถานการณ์พิจารณาในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 วินาที ถึง 0.20 วินาที เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส u กรณีใช้วงจรกรองผ่านสูง
แยกปริมาณฮาร์มอนิก ($f_c = 4 \text{ Hz}$)



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส u กรณีใช้วงจรกรองผ่านต่ำ
แยกปริมาณฮาร์มอนิก ($f_c = 45 \text{ Hz}$)

จากผลการจำลองสถานการณ์สังเกตได้ว่าในช่วงเวลา 0 วินาที ถึง 0.04 วินาที ยังไม่มีการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบ ทำให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายจะเหมือนกับรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่โหลด ต่อมาที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 0.04 วินาที ถึง 0.20 วินาที มีการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบ ทำให้รูปสัญญาณกระแสชดเชยเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ดังนั้น รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักจึงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น โดยจากรูปที่ 3.7 จะสังเกตได้ว่า รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{su}) หลังการชดเชยจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.16 วินาที เนื่องจากวงจรกรองผ่านสูงเกิดการประวิงเวลาขึ้นในขณะที่มีการแยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ตัด เท่ากับ 4 เฮิร์ตซ์ แต่หลังจากเวลา 0.16 วินาที รูปสัญญาณกระแส i_{su} จะเริ่มคงที่ที่ค่ากระแสสูงสุดประมาณ 4.24 A และจากรูปที่ 3.8 รูปสัญญาณกระแส i_{su} จะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.14 วินาที ซึ่งหลังจากเวลา 0.14 วินาที รูปสัญญาณกระแส i_{su} จะเริ่มคงที่ที่ค่ากระแสสูงสุดประมาณ 4.24 A สำหรับค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งสามเฟสของทั้งสองกรณี แสดงไว้ตามตารางที่ 3.6 ซึ่งสังเกตได้ว่าค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้าน

แหล่งจ่ายเฉลี่ยทั้งสามเฟส กรณีใช้วงจรกรองผ่านต่ำในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่ากรณีใช้วงจรกรองผ่านสูง และมีค่าเท่ากับ 0.0695 เปอร์เซนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า %THD_{av} ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายก่อนการชดเชย พบว่า ค่า %THD_{av} ภายหลังการชดเชยมีค่าน้อยกว่ามาก โดยในภาพรวมปริมาณฮาร์มอนิกลดลงถึง 99.7 เปอร์เซนต์ นอกจากนี้ผลของค่า %THD_{av} ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยที่ลดลงเข้าใกล้ 0 ส่งผลให้สามารถชดเชยค่า pf_{dist} ให้มีค่าเข้าใกล้ 1 เช่นกันดังสมการที่ (3-15) ส่วนกรณีค่า pf_{disp} นั้นไม่สามารถชดเชยได้ อันเนื่องจากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ไม่สามารถชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟได้ อย่างไรก็ตามค่า pf_{total} ภายหลังการชดเชยมีค่ามากขึ้น โดยก่อนการชดเชยมีค่า pf_{total} เท่ากับ 0.9520 และภายหลังการชดเชยมีค่า pf_{total} เท่ากับ 0.9800 รายละเอียดแสดงตามตารางที่ 3.7 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ที่ใช้วงจรกรองผ่านต่ำอันดับที่ 3 ที่ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 45 เฮิร์ตซ์ ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกให้สมรรถนะที่ดีต่อระบบที่ศึกษา

ตารางที่ 3.6 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก

กรณีตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF

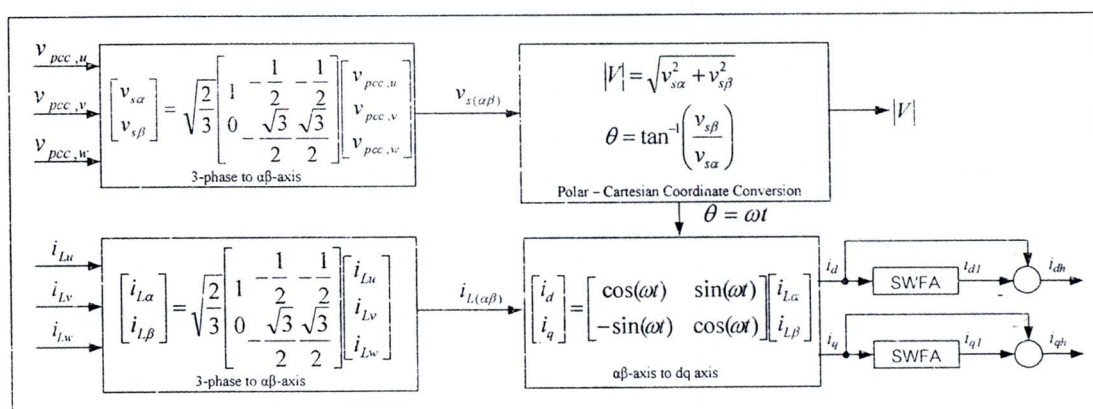
เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย		
	ค่า %THD ก่อนการชดเชย	ค่า %THD หลังการชดเชย	
		กรณีใช้วงจรกรองผ่านสูงในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก $f_c = 4 \text{ Hz}$	กรณีใช้วงจรกรองผ่านต่ำในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก $f_c = 45 \text{ Hz}$
u	24.42	0.3136	0.0691
v	24.42	0.3060	0.0698
w	24.42	0.3129	0.0696
เฉลี่ยทั้งสามเฟส	24.42	0.3109	0.0695

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบสมรรถนะการชดเชยค่าตัวประกอบกำลังด้วยวิธี SRF

ก่อนการชดเชย								
pf _{dist,u}	pf _{dist,v}	pf _{dist,w}	pf _{disp,u}	pf _{disp,v}	pf _{disp,w}	pf _{total,u}	pf _{total,v}	pf _{total,w}
0.9714	0.9714	0.9714	0.9800	0.9800	0.9800	0.9520	0.9520	0.9520
หลังการชดเชยด้วยวิธี SRF (LPF, อันดับ $3f_c = 45 \text{ Hz}$)								
1.0000	1.0000	1.0000	0.9800	0.9800	0.9800	0.9800	0.9800	0.9800

3.6 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟ

นอกจากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ตามที่ได้อธิบายในข้างต้นแล้ว ยังมีวิธี DQF ซึ่งเป็นวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนคิกวที่พัฒนาต่อจากวิธี SRF ที่พัฒนาโดย Sujitjorn, Areerak, and Kulworawanichpong, (2007) ซึ่งแสดงแผนภาพการคำนวณ ดังรูปที่ 3.9 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าวิธี DQF จะแตกต่างกับวิธี SRF ในส่วนการแยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนคิกว นอกจากปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐานโดยวิธี DQF จะใช้วิธี SWFA (Sliding Window Fourier Analysis) ในการแยกปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐานแทนการใช้วงจรกรอง ด้วยเหตุนี้จึงมีการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกของวิธี DQF เพื่อนำมาสู่การศึกษาเปรียบเทียบกับวิธี SRF การอธิบายรายละเอียดของวิธี DQF จะนำเสนอเฉพาะในส่วนของการคำนวณการคำนวณของวิธี SWFA ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 แผนภาพบล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

การแยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนคิกว นอกจากปริมาณกระแสที่ความถี่มูลฐานด้วยวิธี SWFA มาจากแนวคิดการพิจารณารูปสัญญาณกระแส i_d และ i_q เป็นสัญญาณรบกวน โดยในขั้นตอนการคำนวณในขั้นตอนที่ 1 และ 2 จะเหมือนกับวิธี SRF แต่ต่างกันในส่วนการนำ SWFA มาใช้แทน Filter สำหรับวิธี DQF จะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์สัญญาณกระแส i_d และ i_q ในรูปของอนุกรมฟูริเยร์ ดังสมการที่ (3-18) ซึ่งมีองค์ประกอบสองส่วน คือ เทอมของสัญญาณกระแสตรง และเทอมของสัญญาณกระแสสลับ เนื่องจากการแยกปริมาณทั้งสองส่วนนั้นกระทำอยู่บนแกนคิกว ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเดียวกันกับที่ความถี่มูลฐานของระบบ ดังนั้น จึงมองกระแสที่ความถี่มูลฐานเป็นสัญญาณกระแสตรง และกระแสที่ความถี่อื่น เป็นสัญญาณกระแสสลับ ซึ่งก็คือปริมาณกระแสฮาร์มอนิก ดังนั้นการรับค่าข้อมูลกระแส i_d

และ i_q มาหนึ่งคาบ (T) จำนวน N ข้อมูล เพื่อคำนวณหาค่ากระแสที่ความถี่มูลฐาน (i_{d1} และ i_{q1}) ดังสมการที่ (3-19) และสมการที่ (3-20) ตามลำดับ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ A_{0d} และ A_{0q} คำนวณได้จากสมการที่ (3-21) และสมการที่ (3-22) หลังจากที่ได้จุดข้อมูลด้วยจำนวน N ข้อมูลครบในหนึ่งคาบจะสามารถหาค่า i_{d1} และ i_{q1} มาได้หนึ่งจุดข้อมูลเพื่อไปหักลบออกจากค่ากระแส i_d และ i_q ให้ได้เป็นกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบบนแกนดีคิว (i_{dh} และ i_{qh}) นั่นคือ การคำนวณในรอบแรกหลังจากนั้นทำการดึงค่า N_0 ออกจากชุดข้อมูล N เป็น N_0-1 ในขณะเดียวกันก็จะรับข้อมูล N_0+N จากชุดข้อมูล i_d และ i_q ค่าใหม่มาอยู่ในชุดข้อมูล N เป็น N_0+N-1 เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_{0d} และ A_{0q} ค่าใหม่ ($A_{0d}^{(new)}$ และ $A_{0q}^{(new)}$) ดังสมการที่ (3-23)

$$i_{(dq)}(kT) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)] \quad (3-18)$$

$$i_{d1}(kT) = \frac{A_{0d}}{2} \quad (3-19)$$

$$i_{q1}(kT) = \frac{A_{0q}}{2} \quad (3-20)$$

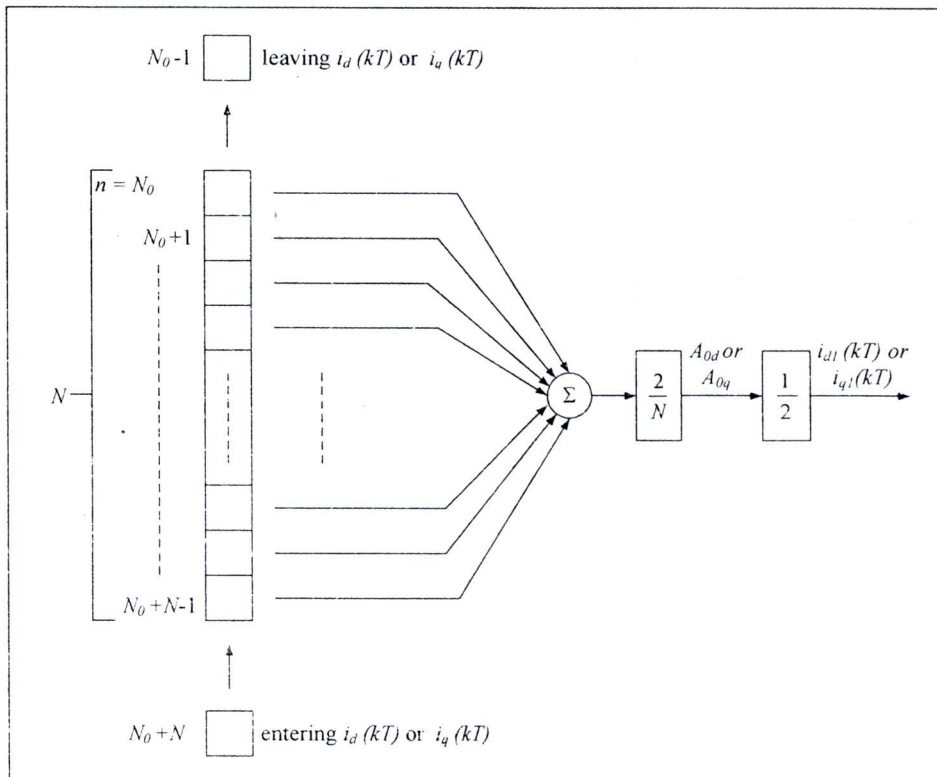
$$A_{0d} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_d(nT) \quad (3-21)$$

$$A_{0q} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_q(nT) \quad (3-22)$$

$$\begin{bmatrix} A_{0d}^{(new)} \\ A_{0q}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{0d}^{(old)} \\ A_{0q}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_d[(N_0-1)T] \\ i_q[(N_0-1)T] \end{bmatrix} + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_d[(N_0+N)T] \\ i_q[(N_0+N)T] \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

โดยที่ $A_{0d}^{(old)}$ และ $A_{0q}^{(old)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการคำนวณในรอบก่อนหน้านี้ ส่งผลให้การรับค่าข้อมูล i_d และ i_q ในแต่ละครั้งจะได้จุดข้อมูล i_{d1} และ i_{q1} สำหรับหักลบออกจากค่ากระแส i_d และ i_q และมีการส่งรับข้อมูลมาคำนวณในลักษณะนี้ตลอดย่านการทำงาน จนกระทั่งได้กระแส

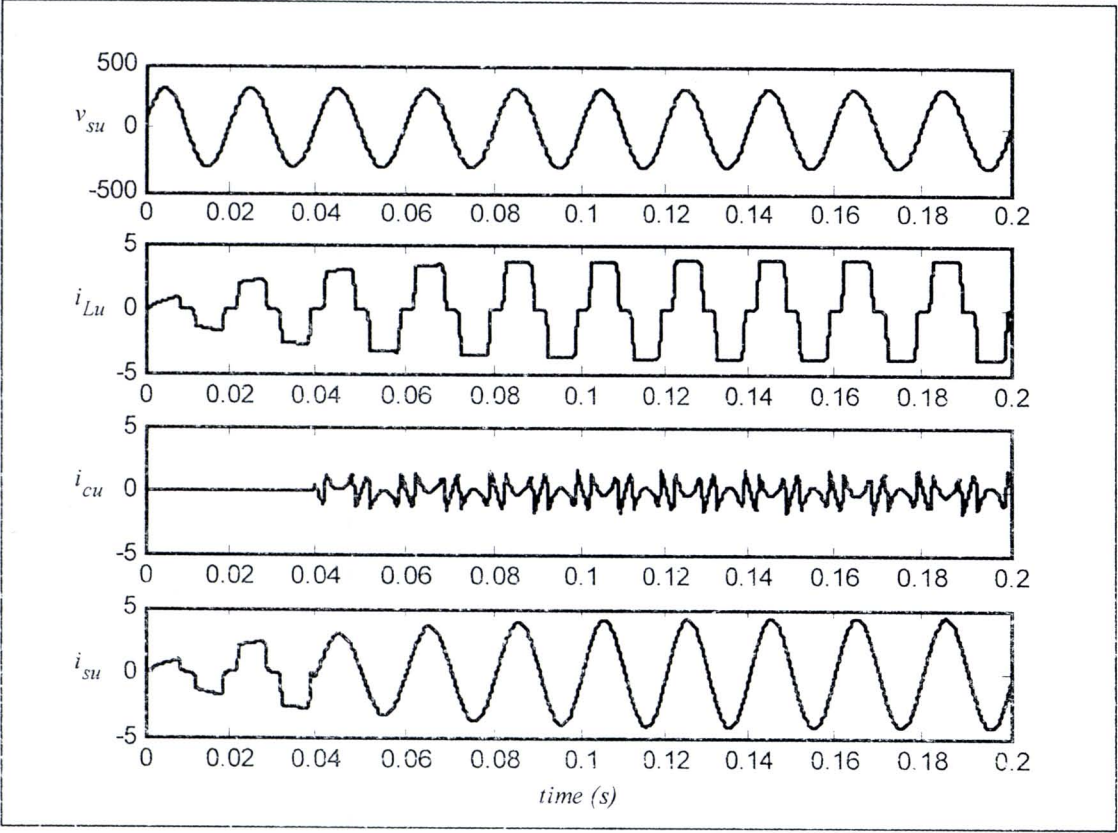
อ้างอิงบนแกนดิกิว (i_{dh} และ i_{qh}) สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน สำหรับรายละเอียดการคำนวณด้วยวิธี SWFA นี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภาพคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ และคำนวณกระแสที่ความถี่มูลฐานบนแกนดิกิว

กระแสอ้างอิงบนแกนดิกิว (i_{dh} และ i_{qh}) ที่คำนวณได้ด้วยวิธี SWFA จะถูกแปลงปริมาณดังกล่าวให้อยู่บนแกนสามเฟส คือ i_{cu}^* , i_{cv}^* และ i_{cw}^* สำหรับเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟชนิดแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ การทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF จะจำลองสถานการณ์ร่วมกับระบบทดสอบตามรูปที่ 3.2 โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 จากรูปดังกล่าวในช่วงเวลาเท่ากับ 0 วินาที ถึง 0.02 วินาที จะมีการเก็บค่าข้อมูลกระแสบนแกนดิกิวมาหนึ่งคาบ เพื่อคำนวณหากระแสที่ความถี่มูลฐานตามหลักการของ SWFA และเริ่มมีการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบในช่วงเวลาตั้งแต่ 0.04 วินาที ถึง 0.2 วินาที พบว่าภายหลังการชดเชยรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น โดยเข้าสู่ภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.10 วินาที และรูปสัญญาณกระแส i_{cu} จะเริ่มคงที่ที่ค่ากระแสสูงสุดประมาณ 4.24 A สำหรับค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเฉลี่ยทั้งสามเฟสภายหลังการชดเชย มีค่าเท่ากับ 0.0246 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 3.8 ซึ่งปริมาณ

ฮาร์มอนิกลดลงถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ จึงยืนยันได้ว่าวิธี DQF สามารถกำจัดฮาร์มอนิกของระบบ
ภายหลังการชดเชยได้ดีที่สุด



รูปที่ 3.11 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส u กรณีตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

ตารางที่ 3.8 ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก

กรณีตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

เฟส	ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่าย	
	ค่า %THD ก่อนการชดเชย	ค่า %THD หลังการชดเชย
		กรณีใช้ SWFA ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก
<i>u</i>	24.42	0.0246
<i>v</i>	24.42	0.0246
<i>w</i>	24.42	0.0246
เฉลี่ยทั้งสามเฟส	24.42	0.0246

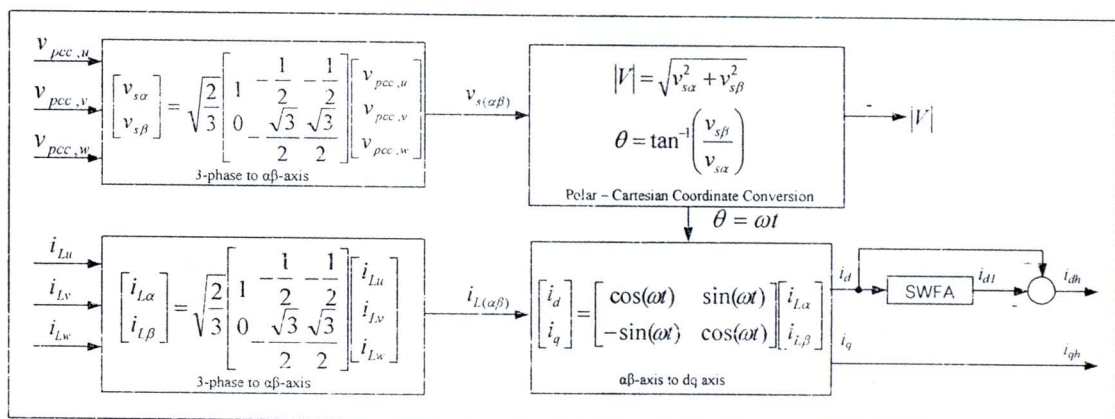
ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบสมรรถนะการชดเชยค่าตัวประกอบกำลังด้วยวิธี DQF

ก่อนการชดเชย								
pf _{dist,u}	pf _{dist,v}	pf _{dist,w}	pf _{disp,u}	pf _{disp,v}	pf _{disp,w}	pf _{total,u}	pf _{total,v}	pf _{total,w}
0.9714	0.9714	0.9714	0.9800	0.9800	0.9800	0.9520	0.9520	0.9520
หลังการชดเชยด้วยวิธี DQF (SWFA)								
1.0000	1.0000	1.0000	0.9800	0.9800	0.9800	0.9800	0.9800	0.9800

จากตารางที่ 3.9 แสดงผลการทดสอบสมรรถนะการชดเชยค่าตัวประกอบกำลังด้วยวิธี DQF พบว่า ผลจากการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีทำให้สามารถชดเชยค่า pf_{dist} ให้มีค่าเท่ากับ 1 แต่เนื่องจากวิธีการดังกล่าวยังไม่สามารถชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟได้ จึงทำให้ค่า pf_{disp} ยังไม่มีการชดเชย ส่งผลให้ค่า pf_{total} ภายหลังจากการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0.9800 เช่นเดียวกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ข้อจำกัดดังกล่าวจึงเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ซึ่งจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.7 การปรับปรุงสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดีคิวเอฟ

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF เมื่อพิจารณาที่ระบบสามเฟสสมดุล จะมีจุดเด่นในเรื่องความสามารถการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดี วิธีการดังกล่าวยังสามารถพัฒนาต่อยอดให้มีความสามารถในการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ หรือชดเชยค่าตัวประกอบกำลังได้ โดยมีขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกที่คล้ายคลึงกับวิธี DQF จะแตกต่างกัน คือ การปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF จะไม่มีการผ่านกระบวนการแยกปริมาณฮาร์มอนิกด้วย SWFA บนแกนคิว แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

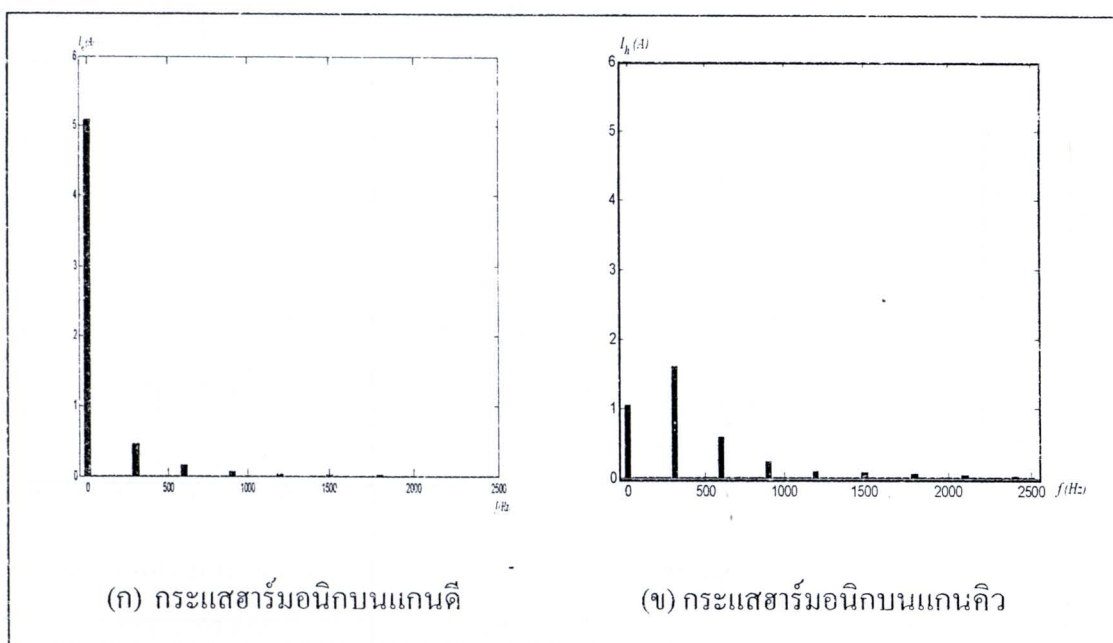


รูปที่ 3.12 แผนภาพบล็อกการปรับปรุงการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

เริ่มต้นวิเคราะห์เทอมสมการของกระแสบนแกนคิกว (i_d และ i_q) ดังสมการที่ (3-24) และสมการที่ (3-25) ตามลำดับ ซึ่งในตัวอย่างนี้พิจารณากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 รวมอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน สังเกตได้ว่าเมื่อแปลงเทอมสมการกระแสที่มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่บนแกนสามเฟสให้อยู่บนแกนคิกว ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเดียวกันกับความถี่มูลฐานของระบบ เทอมสมการกระแสบนแกนคิกวในทางทฤษฎีจะต้องไม่ปรากฏกระแสที่ความถี่ 0 เฮิร์ตซ์ และจะต้องปรากฏกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 ที่มีเครื่องหมายระบุลำดับเฟสของแต่ละอันดับไว้อย่างชัดเจน จึงได้มีการตรวจสอบด้วยการแสดงสเปกตรัมของกระแสบนแกนคิกวของระบบที่พิจารณา ดังรูปที่ 3.13 เพื่ออ้างอิงกับสมการดังกล่าว

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} (i_1 + i_5 \cos(6\omega t) + i_7 \cos(6\omega t)) \quad (3-24)$$

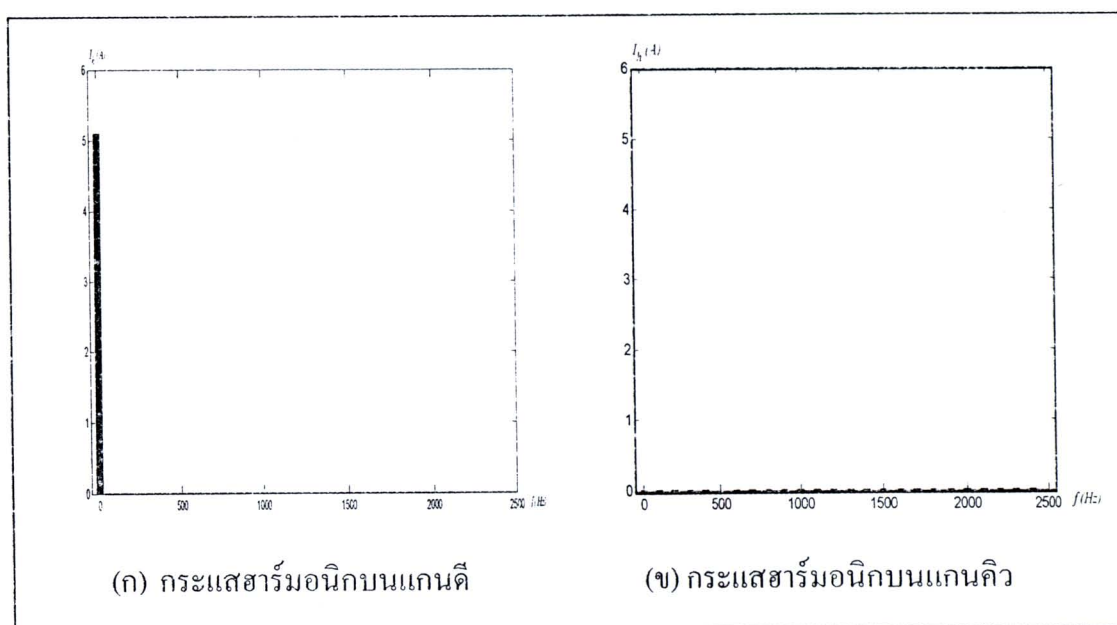
$$i_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{3}{2} (-i_5 \sin(6\omega t) + i_7 \sin(6\omega t)) \quad (3-25)$$



รูปที่ 3.13 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ บนแกนคิกวก่อนการชดเชย

จากรูปที่ 3.13 การตรวจวัดสเปกตรัมของกระแสบนแกนคิกวในระบบที่พิจารณา พบว่า มีกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 ที่ความถี่ 300 เฮิร์ตซ์ บนแกนคิกว รวมถึงอันดับอื่น ๆ ที่ความถี่ต่างกัน ซึ่งตรงตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.3 และสังเกตได้ว่ากระแสบนแกนคิกวมีค่า

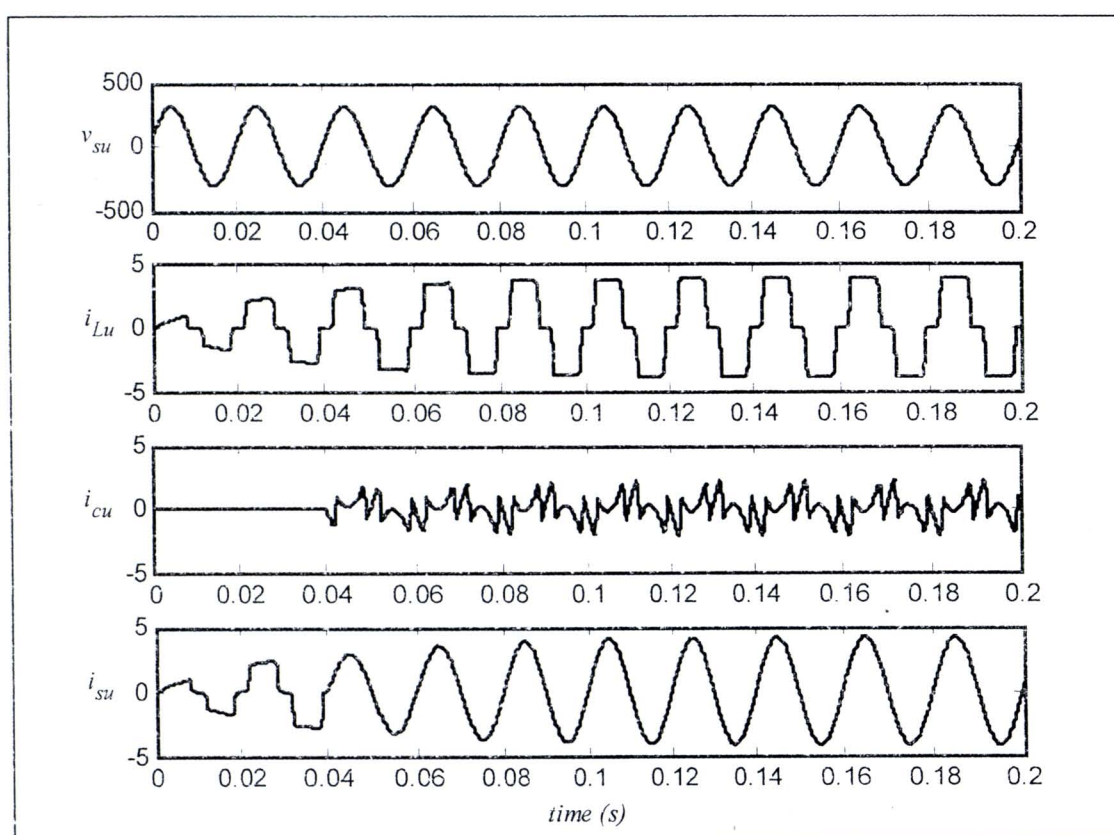
แอมพลิจูดค่าหนึ่งถึงความถี่ 0 เฮิร์ตซ์ ดังนั้น ปริมาณดังกล่าวจึงไม่ได้เกิดขึ้นจากผลกระทบของฮาร์มอนิกในระบบ แต่เกิดขึ้นจากลักษณะการทำงานของโพลไม่เป็นเชิงเส้น จึงปรากฏกำลังไฟรีแอกทีฟในระบบ ดังสมการที่ (3-10) ส่งผลให้ปรากฏค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานของระบบบนแกนคิวก และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำลง ซึ่งหากยังคงนำ SWFA มาใช้แยกปริมาณมูลฐานออกจากปริมาณฮาร์มอนิกอันดับอื่น ๆ บนแกนคิวก จะไม่สามารถดึงค่ากระแสที่ความถี่มูลฐานของระบบบนแกนคิวกไปพิจารณาเพื่อชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟได้ แนวทางหนึ่งที่ผู้วิจัยได้นำเสนอคือ การไม่พิจารณาใช้ SWFA บนแกนคิวก ซึ่งจะทำให้ปริมาณบนแกนคิวกทั้งหมด ประกอบด้วยปริมาณฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ และค่ากำลังไฟรีแอกทีฟ ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับปริมาณบนแกนดี เพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงบนแกนคิวกให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับชดเชยกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ และชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบ โดยที่ภายหลังการชดเชย ดังรูปที่ 3.14 สังเกตได้ว่า ไม่ปรากฏค่ากระแสบนแกนคิวกที่ความถี่ 0 เฮิร์ตซ์ รวมถึงฮาร์มอนิกที่อันดับอื่น ๆ ส่วนบนแกนดียังคงเหลือเฉพาะปริมาณที่ความถี่มูลฐานของระบบเท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นการตรวจจับฮาร์มอนิกยังคงสามารถทำงานได้ผลดีเช่นเดิม



รูปที่ 3.14 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ บนแกนคิวกภายหลังการชดเชย

ผลการจำลองสถานการณ์กรณีทดสอบการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ของเฟส u ในช่วงเวลาดังแต่ 0 วินาที ถึง 0.20 วินาที แสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งสังเกตได้ว่า ในช่วงเวลาดังแต่ 0 วินาที ถึง 0.04 วินาที ยังไม่มีการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบ ทำให้รูป

สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีลักษณะเหมือนกับรูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่โหลด ต่อมาที่ช่วงเวลาตั้งแต่ 0.04 ถึง 0.20 วินาที มีการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบ ทำให้รูปสัญญาณกระแสชดเชยเป็นไปตามรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง ที่ได้จากการปรับปรุงการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ดังนั้น รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักจึงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 0.10 วินาที โดยภายหลังจากเวลา 0.10 วินาทีรูปสัญญาณกระแส i_{su} จะเริ่มคงที่ที่ค่ากระแสสูงสุดประมาณ 4.24 A สำหรับค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ได้มีการเปรียบเทียบกับวิธี DQF แบบดั้งเดิมก่อนการปรับปรุงสมรรถนะ ตามตารางที่ 3.10



รูปที่ 3.15 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส u กรณีปรับปรุงการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

จากตารางที่ 3.10 สังเกตได้ว่าภายหลังจากการชดเชย ค่า %THD ของกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายเฉลี่ยทั้งสามเฟสของทั้งสองวิธี มีค่าเท่ากับ 0.0246 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนการชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง พบว่า ค่า pf_{dist} มีค่าเท่ากับ 1 อันเนื่องมาจากผลของค่า %THD_{av} ที่มีแนวโน้มลดน้อยลง ส่วนกรณีค่า pf_{disp} วิธี DQF ที่มีการปรับปรุงนั้นสามารถชดเชยได้ โดยก่อนการชดเชยค่า

3.8 สรุป

การตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนคิกวเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของการพัฒนางจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบ เนื่องจากการคำนวณกระแสอ้างอิง จึงส่งผลโดยตรงต่อระบบควบคุมกระแสชดเชย หากการคำนวณกระแสอ้างอิงในส่วนนี้ไม่มีสมรรถนะหรือคำนวณผิดพลาด ส่วนต่าง ๆ ของวงจรก็จะทำงานผิดพลาดด้วยเช่นกัน ข้อดีของการตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนคิกวกับระบบสามเฟสสมดุล คือ เช่น มีอัลกอริทึมที่สามารถตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดี นอกจากนี้โครงสร้างการตรวจจับฮาร์มอนิกรองรับกับโครงสร้างการควบคุมกระแสชดเชยบนแกนคิกว ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในเรื่องการลดขั้นตอนการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ในบทนี้ยังได้นำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนคิกว ในการหบทวนไว้เป็นองค์ความรู้สำหรับงานด้านการตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนคิกว สำหรับใช้พัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ดังกล่าวเพื่อหาแนวทาง และวิธีการที่จะเพิ่มขีดความสามารถในการตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนคิกวให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า การแยกปริมาณฮาร์มอนิก ด้วย SWFA เฉพาะบนแกนคิกว สามารถสร้างกระแสอ้างอิงให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ให้มีสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิก และมีสมรรถนะในการชดเชยค่าตัวประกอบกำลังดีที่สุด

สำหรับงานวิจัยในบทที่ 3 การตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนคิกวสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ได้รับการตีพิมพ์ และอยู่ในระหว่างยื่นจดลิขสิทธิ์ดังนี้

- P. Santiprapan and K-L. Areerak, "Performance Improvement of Harmonic Detection using Synchronous Reference Frame Method", 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2010), Beijing, China, 19-20 June 2010, pp. 52-55.

- กองพล อารีรักษ์ และ พลสิทธิ์ สานติประพันธ์, "บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงเชิงโรตัสสำหรับโปรแกรม SIMULINK", 2 พฤศจิกายน 2554, เลขที่คำขอ 266182

- พลสิทธิ์ สานติประพันธ์, กองพล อารีรักษ์ และกองพันธ์ อารีรักษ์, "การตรวจจับฮาร์มอนิกบนแกนคิกวสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน", การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ปีการศึกษา 2554, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 7 ตุลาคม 2554, หน้า 1207-1219.