

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัสสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ ในสถานะแหล่งจ่ายไม่อุดมคติ

Harmonic Detection Using the Synchronous Reference Frame in Non-Ideal Source Condition

เศรษฐ์ สุจันท์¹ และ พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ phonsit.s@psu.ac.th 6810120004@psu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) สำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ วัตถุประสงค์ของงานนี้คือ คำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่ถูกต้องในสถานะแหล่งจ่ายไม่อุดมคติ กระบวนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ถูกใช้งานร่วมกับวงจรถ่วงเฟส ล็อคลูป (PLL) ค่าความถี่ตัดของวงจรกรองและค่าความถี่แบนด์วิธของวงจร PLL ได้ถูกทดสอบและเลือกใช้ค่าที่ให้สมรรถนะการตรวจจับที่ดี ผลการทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ยืนยันได้ว่า การทดสอบหาความถี่ตัดของวงจรกรองและค่าความถี่แบนด์วิธของวงจร PLL ที่เหมาะสม สามารถให้ผลการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่ดี ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมและค่าตัวประกอบกำลังอยู่ในมาตรฐาน IEEE std.519 และ IEEE std.141 ถึงแม้ว่าแหล่งจ่ายอยู่ในสถานะแรงดันผิดเพี้ยนและความถี่เปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ: วงจรรอกำลังแอกทีฟ การตรวจจับฮาร์มอนิก วงจรถ่วงเฟสล็อคลูป

Abstract

This article presents the design of a harmonic detector using synchronous reference frame (SRF) for an active power filter. The objective of this work is to calculate a correct reference current under non-ideal source condition. The process of harmonic detection based on the SRF method is operated with a phase-locked loop (PLL). The cutoff frequency of filter and the bandwidth of the PLL circuit are tested and selected to provide a good performance of the harmonic detection. Simulation results using MATLAB/Simulink confirm that choosing the proper filter cutoff and PLL bandwidth frequencies can provide effective harmonic current compensation. The total harmonic distortion and the power factor are satisfied within the IEEE std.519 and IEEE std.141, respectively. Even when the power supply has voltage distortion and frequency variations.

Keywords: Active power filter, Harmonic detection, Phase locked loop

1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้งานเทคโนโลยีสมัยใหม่มีเพิ่มขึ้น ซึ่งต้องอาศัยการใช้พลังงานโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) โหลดดังกล่าวส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า เช่น กระแสฮาร์มอนิก ค่าตัวประกอบกำลัง เป็นต้น ปัจจัยดังกล่าวทำให้มีวิธีการปรับปรุงคุณภาพ

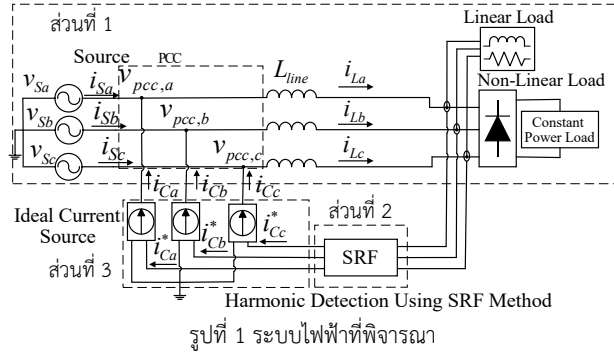
กำลังไฟฟ้าในอดีต คือ การใช้วงจรรอกำลังพาสซีฟ [1] ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถลดทอนกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้ แต่มีประเด็น คือ สมรรถนะการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอาจก่อให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์จากการออกแบบวงจรนี้ วิธีการในปัจจุบันจึงนิยมใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟ [2] ที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้หลายวิธี กระแสฮาร์มอนิกได้หลายอันดับและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง วงจรรอกำลังแอกทีฟจำเป็นต้องพึ่งพาการตรวจจับฮาร์มอนิก [2] ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) , วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟของหนึ่ง (IRPT) , การแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) เป็นต้น บทความนี้เลือกใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF [3] เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้โดยการพิจารณาองค์ประกอบของค่ากระแสตรงและค่ากระแสสลับบนแกนดีคิว ซึ่งส่งผลให้สามารถใช้ตัวกรองแยกปริมาณฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันระบบไฟฟ้ามีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ [4] เช่น โซลาร์เซลล์ กังหันลม โรงไฟฟ้าชีวมวล เชื่อมต่ออยู่ตามจุดต่าง ๆ ในระบบจำหน่าย ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Disturbance) [5] เช่น แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage) แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) ความถี่ผันผวน (Frequency fluctuation) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้วงจรรอกำลังแอกทีฟด้วยวิธี SRF จึงต้องได้รับการออกแบบให้ทำงานได้ดีในสถานะที่แรงดันผิดเพี้ยนและความถี่ของระบบไม่คงที่ การทำงานของวงจร PLL ในวิธี SRF จึงควรได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสม ดังนั้นบทความนี้จะได้นำเสนอการออกแบบและเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีโอในวงจร PLL ด้วยวิธี Symmetrical Optimum [6]

บทความนี้นำเสนอระบบไฟฟ้าที่ใช้พิจารณาในหัวข้อที่ 2 หัวข้อที่ 3 จะนำเสนอวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF หัวข้อที่ 4 เป็นการนำเสนอขั้นตอนการออกแบบวงจร PLL ด้วยวิธี Symmetrical Optimum หัวข้อที่ 5 จะเป็นการจำลองสถานการณ์การดำเนินงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าพร้อมทั้งอภิปรายผล และการสรุปผลของบทความนี้จะนำเสนอในหัวข้อที่ 6

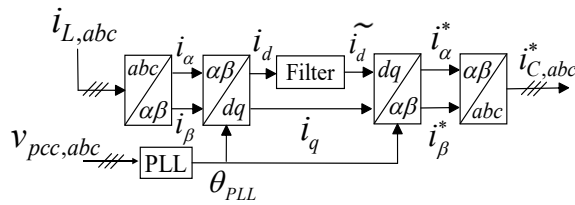
2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่อุดมคติ โหลดเชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ และโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสต่อเข้ากับโหลดกำลังไฟฟ้าคงที่ (constant power load) ส่วนที่ 2 คือ ตัวตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF และส่วนที่ 3 คือแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ซึ่งทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่จุดเชื่อมต่อร่วม (point of common coupling : PCC) เพื่อวัดสมรรถนะการทำงานของวงจรตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF



3. การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ในรูปที่ 2 เป็นวิธีการคำนวณหาค่ากระแสขดเคย์ ($i_{C,abc}^*$) โดยการจับกระแสโหลดทั้งสามเฟส ($i_{L,abc}$) ผ่านการแปลงพาร์ก (Park Transformation) เปลี่ยนจากเฟส abc ให้อยู่บนแกนดิกวิที่หมุนตามความถี่ของระบบมี 4 ขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2 Synchronous Reference Frame (SRF)

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณแปลงกระแสโหลดสามเฟส ($i_{L,abc}$) ไปเป็นกระแสโหลดบนแกน $\alpha\beta$ (i_α, i_β) ดังสมการที่ 1

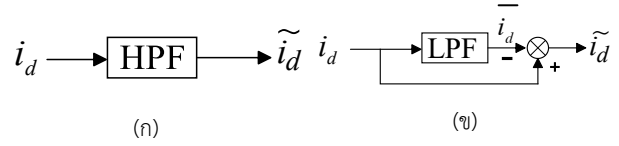
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณแปลงกระแสโหลดบนแกน $\alpha\beta$ (i_α, i_β) ไปเป็นกระแสโหลดบนแกนดิกวิ (i_d, i_q) ดังสมการที่ 2

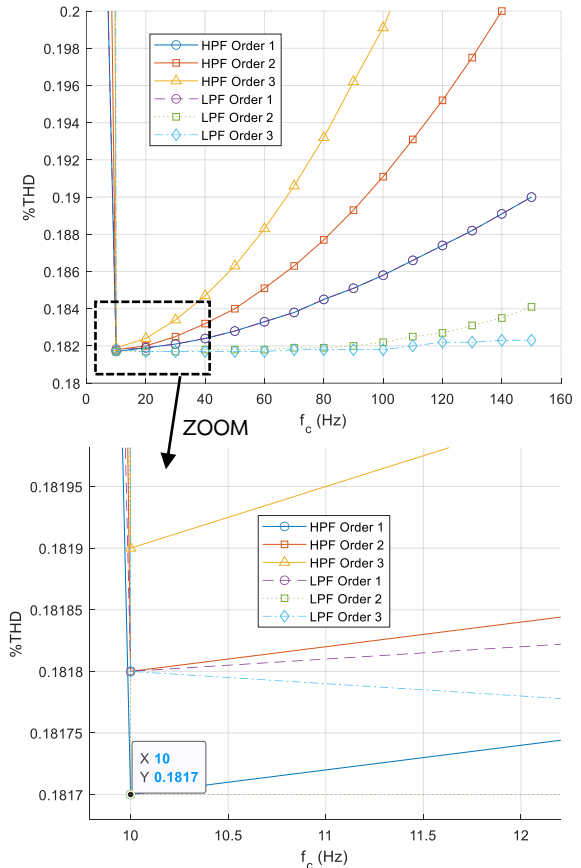
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{PLL}) & \sin(\theta_{PLL}) \\ -\sin(\theta_{PLL}) & \cos(\theta_{PLL}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) ค่า θ_{PLL} คือมุมเฟสล่อคลูที่ได้จากวงจร PLL ในหัวข้อที่ 4

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้ค่ากระแสโหลดบนแกนดิกวิ (i_d, i_q) จากขั้นตอนที่ 2 จะนำค่ากระแส i_d ผ่านวงจรกรองความถี่สูง (High Pass Filter : HPF) ดังรูปที่ 3 (ก) หรือวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter : LPF) ดังรูปที่ 3 (ข) เพื่อแยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิก (i_d) ออกจากปริมาณกระแสมูลฐาน ($\tilde{i}_d$) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกค่าความถี่ตัด (f_c) และอันดับของวงจรกรอง



รูปที่ 3 วงจรกรองความถี่สูงและความถี่ต่ำ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตัดกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

จากรูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงและความถี่ต่ำด้วยค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม โดยการปรับอันดับของวงจรกรองความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 3 และค่าความถี่ตัดเท่ากับ 1 Hz ถึง 150 Hz พบว่า การเลือกอันดับของวงจรกรองความถี่สูงเท่ากับ 1 และค่าความถี่ตัดเท่ากับ 10 Hz ให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำที่สุดเท่ากับ 0.1817%

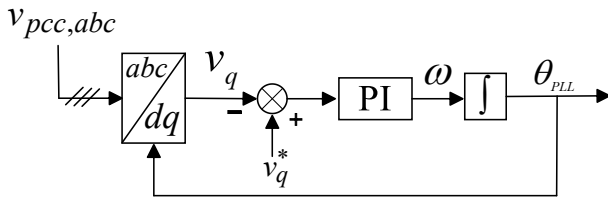
ขั้นตอนที่ 4 คำนวณแปลงกระแสโหลดบนแกนดิกวิ (i_d, i_q) กลับไปเป็นกระแสอ้างอิงสามเฟส ($i_{C,abc}^*$) จากสมการที่ (3) และ (4) ผ่านไปยังแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ (Ideal Current Source) เพื่อให้ได้กระแสขดเคย์สามเฟส ($i_{C,abc}$) จ่ายกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่จุด PCC

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{PLL}) & -\sin(\theta_{PLL}) \\ \sin(\theta_{PLL}) & \cos(\theta_{PLL}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. การออกแบบ PLL ด้วยวิธี Symmetrical Optimum

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่ามีการป้อนมุมเฟสแรงดัน (θ_{PLL}) เพื่อใช้คำนวณมุมเฟสอ้างอิงในขั้นตอนการแปลงกระแสโวลต์บนแกนตีควิ โครงสร้างของวงจร PLL แสดงได้ดังรูปที่ 5 มีขั้นตอนการคำนวณมุมเฟสอ้างอิงของระบบ สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 5 วงจร PLL

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณแปลงแรงดันของระบบสามเฟสจากจุด ($v_{pcc,abc}$) ไปเป็นแรงดันบนแกนตีควิ (v_d, v_q) ดังสมการที่ (1) และ (2) โดยเปลี่ยนจากกระแสเป็นแรงดัน จากสมการที่ 5 จะเห็นว่าถ้า θ_{pcc} มีค่าเท่ากับ θ_{PLL} จะทำให้แรงดันอ้างอิงบนแกนตีควิ (v_q^*) มีค่าเท่ากับ 0 และจากสมการที่ 6 ถ้า v_q มีค่าเท่ากับ 0 ด้วย หมายความว่าในรูปนี้ไม่เกิดค่าผิดพลาด (error) ทำให้มุมเฟสแรงดัน θ_{PLL} ตรงกับมุมของระบบไฟฟ้า θ_{pcc}

$$v_q^* = v_m \sin(\theta_{pcc} - \theta_{PLL}) \quad (5)$$

$$error = v_q^* - v_q \quad (6)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าความเร็วเชิงมุม (ω) ในรอบการควบคุม ปัจจุบันเพื่อลดค่าผิดพลาดจากสมการที่ 6 ด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) จากนั้นค่า ω ผ่านการอินทิเกรตเพื่อให้ได้ค่า θ_{PLL} ซึ่งจะนำไปปรับการคำนวณ v_q การออกแบบตัวควบคุมพีไอของบทความนี้ใช้วิธี Symmetrical Optimum สามารถออกแบบได้ดังสมการที่ (7) ถึง (11)

$$G_c = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (7)$$

$$K_p = \left(\frac{1}{\alpha} \right) \left(\frac{1}{|V| \times T_s} \right) \quad (8)$$

$$K_I = \left(\frac{K_p}{T_{PLL}} \right) \quad (9)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{2\pi \times f_{BW} \times T_s} \right) \quad (10)$$

$$T_{PLL} = \alpha^2 \times T_s \quad (11)$$

จากสมการที่ (7) ถึง (11) สามารถทำการคำนวณเพื่อออกแบบค่า K_p และ K_I ได้โดยกำหนดให้เวลาการซึกตัวอย่างของระบบ (T_s) มีค่าเท่ากับ 20 μs ขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบ $|V|$ เท่ากับ 381.04 V และค่าความถี่แบนด์วิธ (f_{BW}) เป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบและเปรียบเทียบการทำงานของวงจร PLL โดยกำหนดให้ใช้ 3 ค่า คือ 50 Hz, 100 Hz และ 150 Hz ค่า K_p และ K_I ที่คำนวณได้เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 K_p และ K_I จากการออกแบบความถี่แบนด์วิธ (f_{BW})

f_{BW} (Hz)	K_p	K_I
50	0.8244	1.626
100	1.65	12.99
150	2.474	44.18

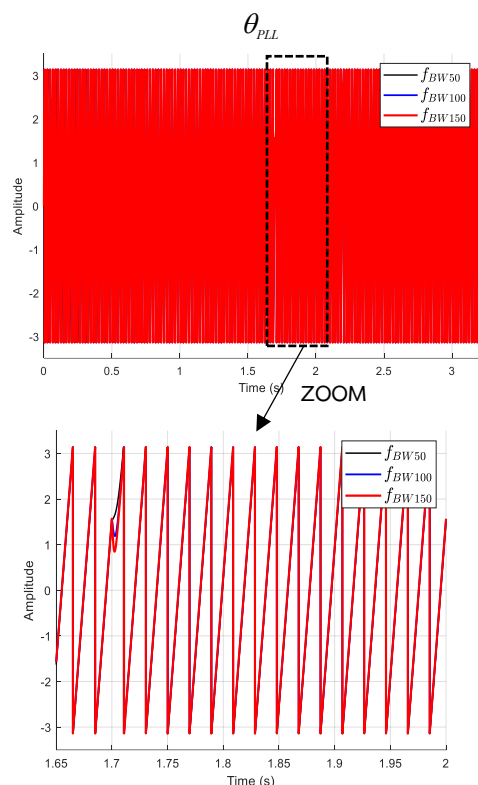
5. การจำลองสถานการณ์และอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์จะใช้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาตามหัวข้อที่ 2 ผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบการออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ภายในวงจร PLL ด้วยวิธี Symmetrical Optimum ดังตารางที่ 2 โดยแบ่งสถานการณ์เป็น 7 ช่วงเวลาดังตารางที่ 2

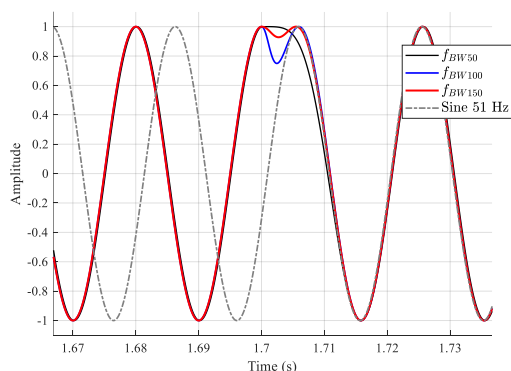
ตารางที่ 2 ช่วงเวลาการจำลองสถานการณ์

ช่วงเวลา (s)	สถานการณ์
0 - 0.2	- ช่วงเริ่มต้นวงจรรอกำลังแอกทีฟยังไม่ทำงาน - แรงดันแหล่งจ่ายของระบบ 220 Vrms
0.2 - 0.7	- วงจรรอกำลังแอกทีฟเริ่มการทำงาน - ความถี่ของระบบ 50 Hz
0.7 - 1.2	- ความถี่ของระบบเปลี่ยนเป็น 49 Hz
1.2 - 1.7	- ความถี่ของระบบเปลี่ยนเป็น 50 Hz
1.7 - 2.2	- ความถี่ของระบบเปลี่ยนเป็น 51 Hz
2.2 - 2.7	- ความถี่ของระบบเปลี่ยนเป็น 50 Hz
2.7 - 3.2	- ความถี่ของระบบ 50 Hz - แรงดันแหล่งจ่ายของระบบมีการรบกวนจากแรงดันฮาร์มอนิกแอมพลิจูด 20 อันดับที่ 5 และ 7

จากการจำลองสถานการณ์การออกแบบค่า K_p และ K_I ส่งผลต่อการทำงานของวงจร PLL ดังรูปที่ 6 โดยยกตัวอย่างการทำงานของวงจร PLL ช่วงวินาทีที่ 1.65 ถึง 2 พบว่าวินาทีที่ 1.7 ช่วงที่ความถี่เปลี่ยนจาก 50 Hz เป็น 51 Hz รูปสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับความถี่ให้ทัน ซึ่งจะวัดจากการตามสัญญาณของวงจร PLL ในรูปที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบว่าค่า f_{BW} ที่เท่ากับ 100 Hz และ 150 Hz สามารถตามสัญญาณไซน์อ้างอิงได้เร็วใกล้เคียงกันและช้าที่สุดคือค่า f_{BW} เท่ากับ 50 Hz



รูปที่ 6 สัญญาณของวงจร PLL ของความถี่แบนด์วิดธ์ 50 , 100 ,150 Hz



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบเฟสของฟังก์ชันไซน์ที่ค่าความถี่แบนด์วิดธ์ต่าง ๆ กับสัญญาณอ้างอิงที่ 51 Hz ในช่วงเวลาความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลง

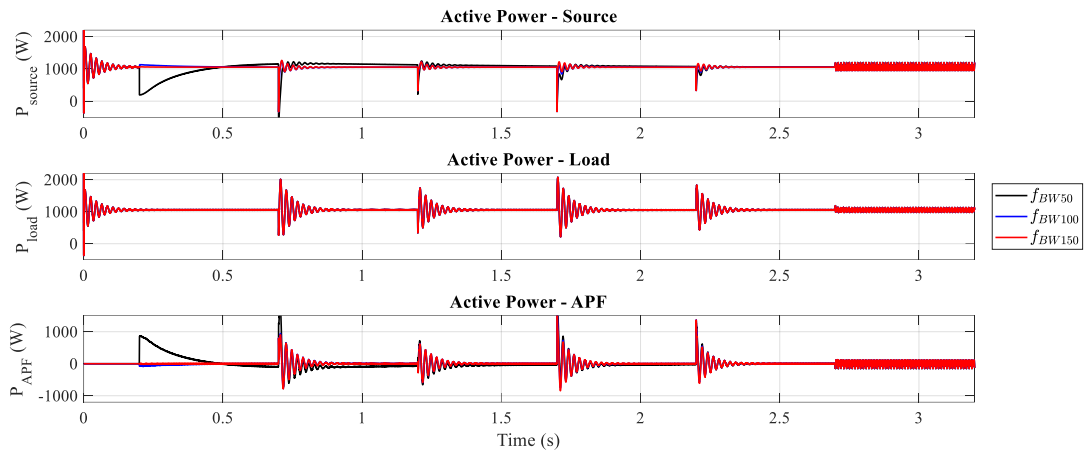
ตารางที่ 3 สมรรถนะการทำงานของ APF ช่วงความถี่เปลี่ยนแปลง

	ช่วงความถี่เปลี่ยนแปลง											
	50 Hz			49 Hz			50 Hz			51 Hz		
f_{BW}	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
%THD ก่อนการชดเชย	24.91	24.91	24.91	24.71	24.91	24.91	24.91	24.91	24.91	25.1	24.91	24.91
%THD หลังการชดเชย	0.57	0.18	0.18	0.3	0.178	0.178	0.2	0.18	0.1815	0.2	0.185	0.185
PF ก่อนการชดเชย	0.81	0.81	0.81	0.806	0.81	0.801	0.81	0.81	0.81	0.813	0.81	0.813
PF หลังการชดเชย	0.99	0.99	1	0.99	1	1	0.99	1	1	0.99	1	1

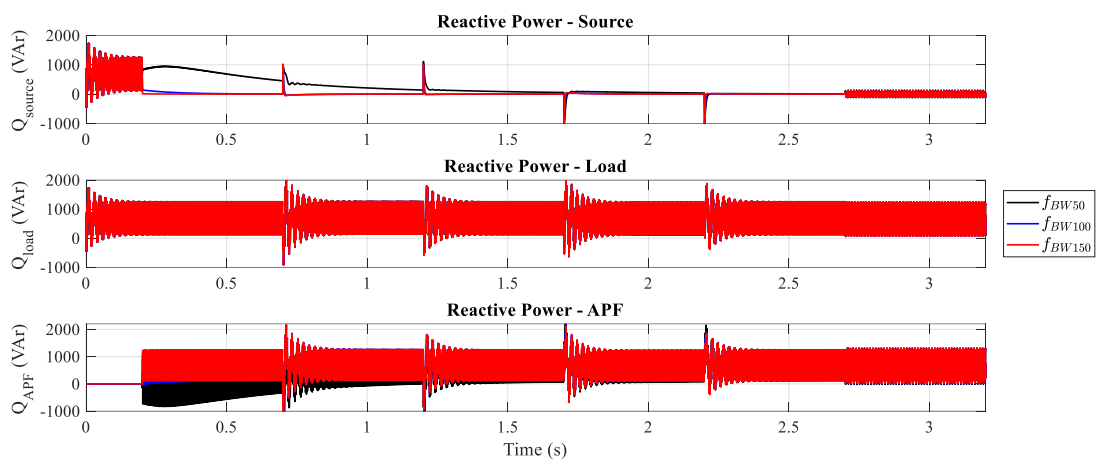
การออกแบบค่า f_{BW} ที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อคุณภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าดังรูปที่ 8 และ 9 จะเห็นว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (วินาทีที่ 0.2) ที่ f_{BW} เท่ากับ 50 Hz มีการลู่เข้าของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟอย่างช้า ๆ ในส่วนของแหล่งจ่ายและวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ทำงานสัมพันธ์กัน แต่ที่ค่า f_{BW} เท่ากับ 150 Hz มีการตามสัญญาณได้รวดเร็ว ส่งผลให้การลู่เข้าของกำลังไฟฟ้าเร็วกว่าค่า f_{BW} ที่เท่ากับ 100 Hz เพียงเล็กน้อยในขณะที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟเริ่มทำงานหรือความถี่ในระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง

ผลของการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบ โดยใช้ค่า f_{BW} เท่ากับ 150 Hz ดังรูปที่ 11 (ก) เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟทำงาน ยกตัวอย่างเฟส a กระแสโหลด ($i_{L,a}$) มีลักษณะผิดเพี้ยนแสดงถึงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยวัดค่า %THD ก่อนการชดเชยได้ 24.91% รูปคลื่นแรงดันที่จุด PCC (V_{pcc}) และกระแสไฟฟ้าด้านแหล่งจ่าย ($i_{S,a}$) มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์หลังจากการชดเชยวัดค่า %THD ได้ 0.185% ในช่วงความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า %THD เท่ากับ 2.955% ในช่วงที่ระบบเกิดแรงดันฮาร์มอนิกดังรูปที่ 11 (ข)

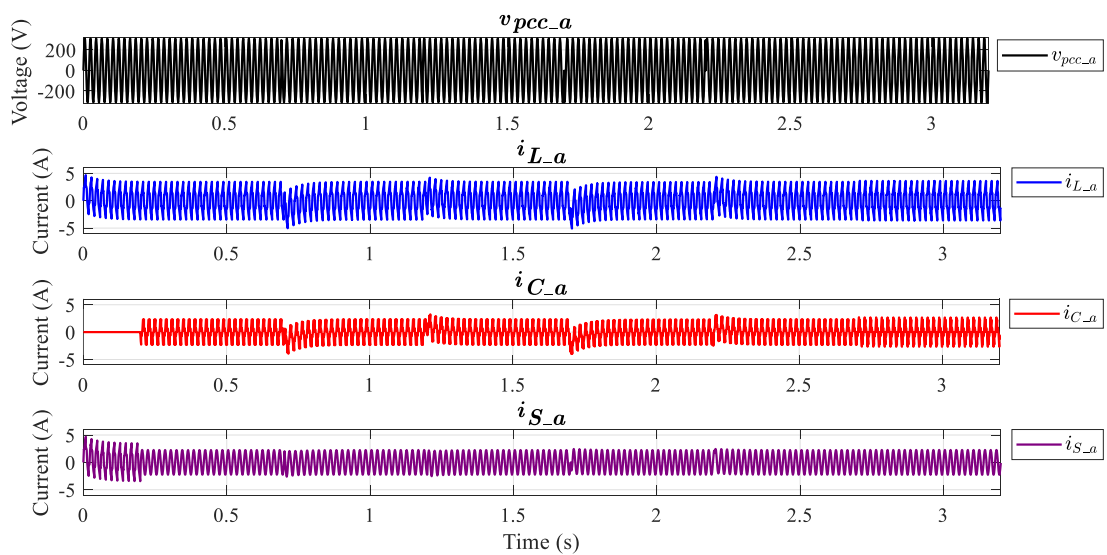
ประสิทธิภาพการทำงานของการออกแบบวงจร PLL ที่ออกแบบด้วยวิธี Symmetrical Optimum ในบทความนี้ให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) และค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ภายหลังการชดเชยด้วยได้ ดังตารางที่ 3 และ 4 ซึ่งพบว่า ในช่วงที่เกิดความถี่เปลี่ยนแปลงในระบบ ค่า f_{BW} เท่ากับ 100 Hz และ 150 Hz ให้ค่า %THD ใกล้เคียงกันแต่ต่ำกว่า f_{BW} เท่ากับ 50 Hz แต่ในช่วงที่ความถี่คงที่แต่เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นทางด้านแหล่งจ่ายที่ค่า f_{BW} เท่ากับ 50 Hz ให้ค่า %THD ที่ต่ำที่สุด โดยค่า %THD ที่กล่าวมาทั้งหมดรวมถึงค่า PF ยังอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE std.519 และ IEEE std.141 ดังนั้นเมื่อพิจารณาร่วมกับการไหลของกำลังไฟฟ้า จะเห็นว่าค่าการออกแบบ f_{BW} เท่ากับ 150 Hz ให้ผลลัพธ์ที่ดีต่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามากที่สุด



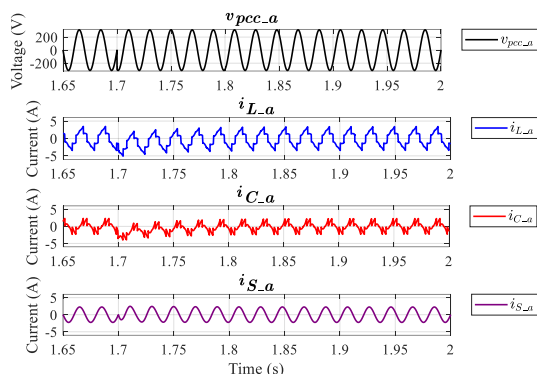
รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าจริงของแหล่งจ่าย โหลด และวงจรกรองกำลังแอกทีฟ



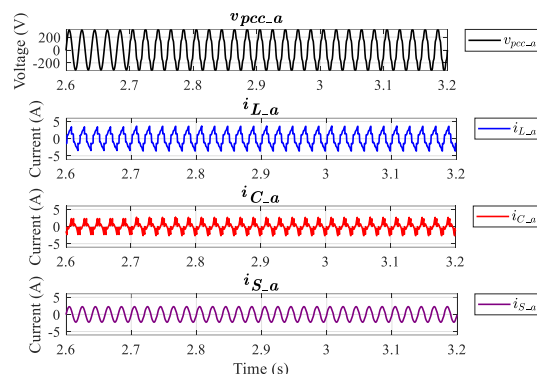
รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของแหล่งจ่าย โหลด และวงจรกรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 10 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ค่า f_{BW} ของวงจร PLL เท่ากับ 150 Hz



(ก) วินาทีที่ 1.65 - 2



(ข) วินาทีที่ 2.6 - 3.2

รูปที่ 11 ภาพขยายของรูปที่ 10

ตารางที่ 4 สมรรถนะการทำงานของ APF ช่วงความถี่ที่คงที่และเกิดแรงดันฮาร์มอนิก

	ช่วงความถี่ที่ 50 Hz					
	50 Hz			50 Hz + $V_{th,5,7}$		
f_{BW}	50	100	150	50	100	150
%THD ก่อนการชดเชย	24.91	24.91	24.91	26.97	24.91	24.91
%THD หลังการชดเชย	0.18	0.185	0.18	1.13	2.13	2.955
PF ก่อนการชดเชย	0.81	0.81	0.81	0.795	0.81	0.795
PF หลังการชดเชย	1	1	1	0.995	0.96	0.96

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจร PLL ด้วยวิธี Symmetrical Optimum เพื่อใช้กับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ผลการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกแบบและทำการเปรียบเทียบ พบว่า การเลือกค่าความถี่ตัดและอันดับของวงจรกรองที่เหมาะสมมีผลต่อค่า %THD ซึ่งเป็นผลมาจากประสิทธิภาพในการแยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิกออกจากปริมาณกระแสมูลฐาน เช่นเดียวกับการกำหนดค่าความถี่แบนด์วิธ ที่ทำให้การทำงานของวงจร PLL มีประสิทธิภาพในการตรวจจับความถี่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้รวดเร็ว ส่งผลทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้ามีผลตอบสนองค่า %THD และ PF อยู่ในมาตรฐาน IEEE std.519 และ IEEE std.141 ทั้งหมด ดังนั้นควรออกแบบและเลือกใช้ค่าที่เหมาะสมตามสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

สำหรับงานในอนาคต จะมุ่งเน้นที่การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชย ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จากนั้น จึงจะดำเนินการจำลองสถานการณ์และทดสอบบนอุปกรณ์จริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Golestan and J. M. Guerrero, "A Review of Harmonic Detection Techniques for Power Quality Improvement Using Passive Filters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 3, pp. 2433–2443, Mar. 2018.
- [2] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2017.
- [3] C. Pisano, G. Giardina, G. Scelba, and F. Genduso, "Design and Implementation of a Fast Synchronous Reference Frame PLL for Single-Phase Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 12, pp. 12048–12058, Dec. 2019.
- [4] P. Ramesh and P. A. Ghosh, "A Review on Control Strategies of Distributed Generation Interface to Microgrid," *International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, 2013, pp. 457–462.
- [5] N. Vazquez, C. Hernandez, and C. Aguilar, "A Study of Voltage Distortion Effects on Load Compensation Using Active Power Filters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 303–310, Jan. 2011.
- [6] K. Somsai, T. Kulworawanichpong, and N. Voraphonpipit, "Design of Decoupling Current Control with Symmetrical Optimum Method for D-STATCOM," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2012.



นายเศรษฐ์ สุขจันทร์ เกิดที่อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ประเทศไทย เมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ปัจจุบันศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ มีความสนใจด้าน การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า การตรวจจับฮาร์มอนิก และการออกแบบวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน