

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์ดีคิว (DQF) สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

กมลพล อารีรักษ์¹ ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์² และ สรวุฒิ สุจิตจร³

Abstract

Areerak, K., Kulworawanichpong, T. and Sujitjorn, S.
**Harmonic Identification by DQ Axis with Fourier Method
for Active Power Filters**
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2006, 28(6) : 1317-1334

This paper proposes a new method of harmonic identification named DQ axis with Fourier (DQF) method. It lies on the basis of the DQ axis method enhanced by the sliding window Fourier analysis (SWFA). The SWFA component and the zero-sequence current considered inside the DQF method account for its excellent results on harmonic elimination, and phase balancing. Lack of phase balancing capability has been a major drawback of the DQ axis, and the SWFA methods used in conjunction with an active power filter. Our computing results based on measured current waveforms of three-phase four-wire systems confirm this.

Key words : harmonic identification, harmonic elimination, active power filter,
phase balancing, three-phase system

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang District,
Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand.

¹M.Eng.(Electrical Engineering), ²Ph.D.(Electrical Engineering), ³Ph.D.(Electrical Engineering), ศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรม
ไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Corresponding e-mail: kongpol_ee@hotmail.com

รับต้นฉบับ 23 ธันวาคม 2548 รับลงพิมพ์ 8 พฤษภาคม 2549

บทคัดย่อ

กองพล อารีรักษ์ รัชต์ชัย กุศลรวานิชพงษ์ และ สรวาณี สุจิตจร

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูริเยร์ดีคว (DQF) สำหรับวงจรรอกกำลังแยกที่ฟ

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2549 28(6) : 1317-1334

บทความนี้นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธีการใหม่ที่เรียกว่า วิธี DQF (DQ axis with Fourier method) ซึ่งเป็นการผสมผสานวิธี DQ axis (วิธี DQ) และวิธี Sliding Window Fourier Analysis (วิธี SWFA) วิธีการใหม่นี้ นำเสนอนี้เหมาะกับการใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแยกที่ฟ เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย ในบทความมีการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก โดยมีการเปรียบเทียบผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ วิธี SWFA และวิธี DQF นอกจากนี้มีการทดสอบถึงความสมดุลหลังการกำจัดฮาร์มอนิกในกรณีที่ระบบมีความไม่สมดุลเกิดขึ้น ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าวิธี DQF ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด และสามารถรักษาสภาพความสมดุลของระบบสามเฟสหลังกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุดด้วยเช่นกัน

ปัจจุบัน อุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการนำโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น คอนเวอร์เตอร์ เต้าหลอมไฟฟ้า ตัวชดเชย VAR แบบสถิตย์ และแหล่งจ่ายไฟสวิตซิง โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นส่งผลเสียหลายประการ เช่น เกิดกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องจักรกลไฟฟ้า (George, 2001) เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร อีกทั้งเครื่องมือวัดต่างๆ ทางไฟฟ้ามีความคลาดเคลื่อน (Indrajit *et al.*, 1989) รวมถึงอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาด (Ho *et al.*, 2001) ด้วยเหตุนี้การแก้ปัญหาเรื่องฮาร์มอนิก จึงเป็นเรื่องสำคัญสำหรับงานวิจัยในปัจจุบัน งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่แก้ปัญหาฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรรอกกำลังพาสซีฟ ซึ่งการใช้วงจรรอกดังกล่าวอาจประสบปัญหาเรโซแนนซ์ในระบบได้ง่าย อีกทั้งการออกแบบวงจรรอกกำลังพาสซีฟมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนกับพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ ด้วยเหตุนี้การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกในช่วงต่อมาได้เริ่มใช้วงจรรอกกำลังแยกที่ฟ ที่อาศัยอุปกรณ์สวิตซิงชนิดกระแสเพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟดีกว่าวงจรรอกกำลังพาสซีฟ อีกทั้งวงจรรอกกำลังแยกที่ฟมีความอ่อนตัวที่สามารถปรับแต่งให้ทำงานกับระบบใดๆ ได้ง่าย โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ ตลอดจนไม่ทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ในระบบ (Ying *et al.*,

1999) โครงสร้างของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟมีลักษณะดัง Figure 1 ซึ่งวงจรรอกถูกต่อขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยส่วนประกอบหนึ่งของโครงสร้างดังกล่าวทำหน้าที่ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก เพื่อให้ทราบปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกขึ้นอยู่กับวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน และจากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก พบว่าการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ เช่น การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี instantaneous power theory (Furuhashi *et al.*, 1990 และ Chen *et al.*, 1994) วิธี DQ axis (Takeda *et al.*, 1988) วิธี synchronous detection (Lin *et al.*, 1992 และ Chen *et al.*, 1994) วิธี SWFA (sliding window Fourier analysis) (EI-Habrouk *et al.*, 2001) และวิธี a-b-c reference frame (Chang *et al.*, 2002) กลุ่มที่สองเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก ดังเช่น วิธี interpolating windowed FFT (Zhang *et al.*, 2001) วิธี neural network (EI-Amin *et al.*, 1998) และวิธี Kalman filter ที่ผสมผสานกับวิธี Fourier linear combiner (Dash *et al.*, 2000) การระบุเอกลักษณ์ตามแนวทางในกลุ่มแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ ส่วนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกตามแนวทางในกลุ่มที่

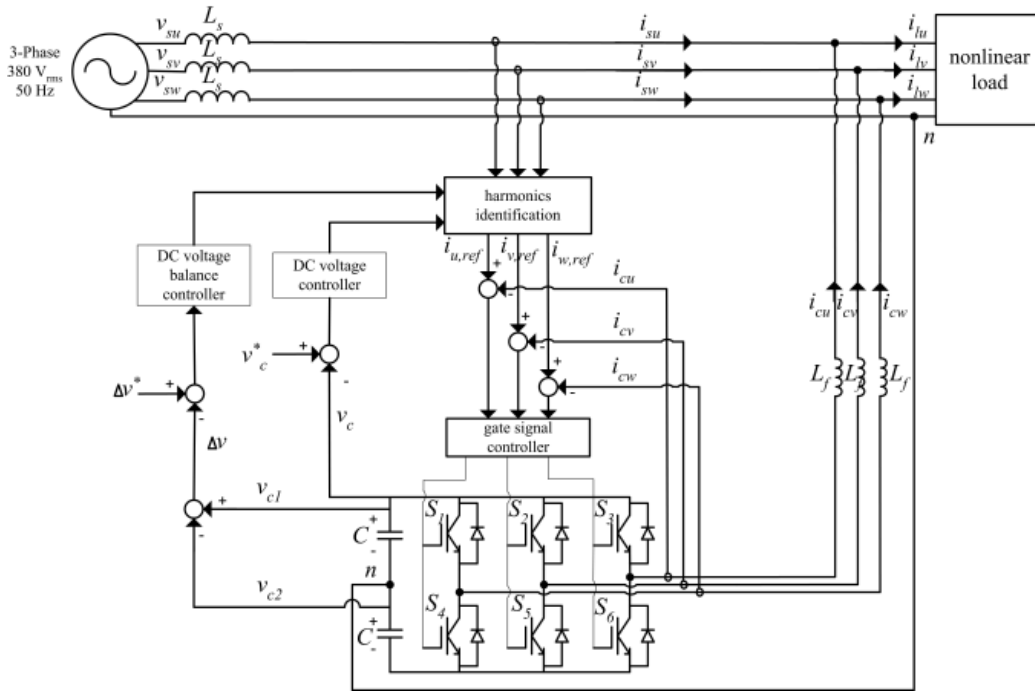


Figure 1. A three-phase four-wire system with a parallel active power filter

สองมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกบางอันดับ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ วิธีการใหม่ที่น่าเสนอเป็นวิธีระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแยกที่พ ในระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย ที่เรียกว่า วิธี DQF (DQ axis with Fourier method) วิธีการดังกล่าวผสมผสานข้อดีระหว่างวิธี DQ และวิธี SWFA งานวิจัยนี้เสนอการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานระหว่างวิธี DQF วิธี DQ และวิธี SWFA เพื่อผลในการกำจัดฮาร์มอนิก การศึกษาเปรียบเทียบพิจารณาค่า %THD และ %Unbalance หลังการกำจัดฮาร์มอนิก ระบบไฟฟ้าที่พิจารณากำหนดให้มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นที่มีโหลดเป็นความต้านทาน ดังที่แสดงในส่วนหนึ่งของ Figure 2 และวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบเต็มคลื่นสามชุด โดยมีโหลดเป็นความต้านทานต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังส่วนหนึ่งที่แสดงไว้ใน Figure 3 ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ส่งผลดีเยี่ยมต่อการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบและในกรณีที่เกิดความไม่สมดุลในระบบ การระบุเอกลักษณ์

ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ส่งผลให้ระบบกลับมาอยู่ในสภาพสมดุลภายหลังการกำจัดฮาร์มอนิก นอกจากนี้ในบทความยังนำเสนอเทคนิควิธีการคำนวณที่เร็วขึ้น สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี DQF

1. การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการเดิม

การอธิบายวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่เป็นวิธีการเดิม คือ วิธี DQ และวิธี SWFA ซึ่งในแต่ละวิธีได้นำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก รวมถึงการอภิปรายผล โดยโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มี 2 รูปแบบ ได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นที่มีโหลดเป็นความต้านทาน และวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบเต็มคลื่นสามชุด มีโหลดเป็นความต้านทานต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งการดำเนินงานในขั้นนี้ได้พิจารณาว่าวงจรกรองกำลังแยกที่พเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ฉีดกระแสชดเชยไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกในระบบได้อย่างสมบูรณ์แบบ นั่นคือ ปริมาณกระแสที่ฉีด (i_{cu} , i_{cv} และ i_{cw}) จะมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ($i_{u,ref}$, $i_{v,ref}$ และ $i_{w,ref}$)

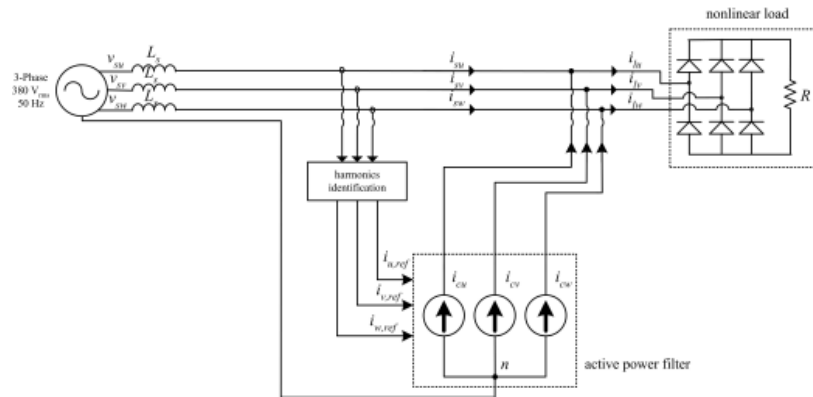


Figure 2. Load is a three-phase rectifier

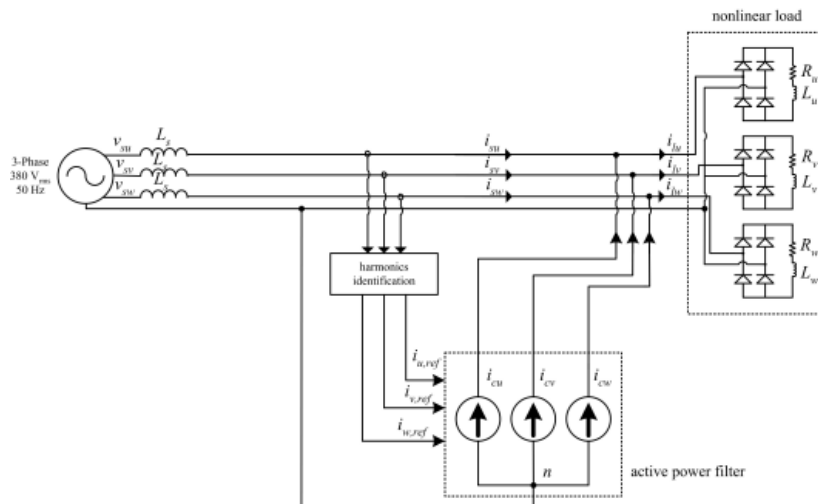


Figure 3. Load is a set of three single-phase rectifiers

1.1 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ (Takeda et al., 1988)

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ ที่แสดงไว้ใน Figure 4 ในขั้นตอนการแปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส คือ i_u , i_v และ i_w เป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ (space vector) บนแกน α , β และ 0 (i_α , i_β และ i_0) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (1) หลังจากนั้นจะถ่ายโอนค่ากระแสบนแกน α และแกน β ไปอยู่บนแกนหมุน d-q (i_d และ i_q) ด้วยเมตริกซ์ดังสมการที่ (2) ค่า ω ที่ปรากฏในสมการ มีค่าเท่ากับความเร็วเชิงมุมของระบบ สำหรับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเพื่อต้องการทราบฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ ด้วยเหตุนี้เวกเตอร์กระแสไฟฟ้า

i_d และ i_q จะหมุนด้วยอัตราเร็วเท่ากับความเร็วเชิงมุมแกนต่างๆ ที่กล่าวถึงได้รับการแสดงไว้ใน Figure 5 เมื่อพิจารณาบนแกนหมุน d-q กระแสที่ความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสสลับ ด้วยเหตุนี้การแยกองค์ประกอบระหว่างกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนหมุน d-q (i_{dh} และ i_{qh}) และกระแสที่ความถี่มูลฐานทำได้โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง (high-pass filter) ซึ่งแสดงไว้ด้วยบล็อก HPF ในแผนภาพ Figure 4 หลังจากนั้นแปลงค่ากระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d-q กลับไปเป็นกระแสฮาร์มอนิกบนแกน α และ β ($i_{\alpha h}$ และ $i_{\beta h}$) ดังสมการที่ (3) ส่วนกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกน 0 (i_0) จะนำไปใช้ในการ

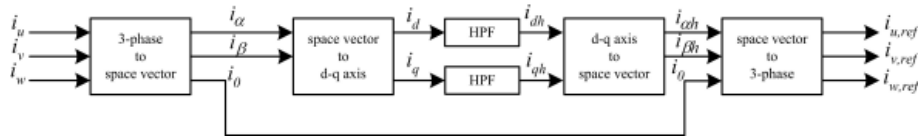


Figure 4. Block diagram of the DQ method

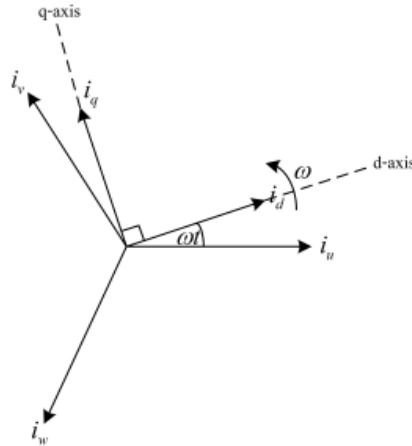


Figure 5. currents on the d-q axis

คำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรรอกกำลัง แยกทีเฟส ($i_{u.ref}$, $i_{v.ref}$ และ $i_{w.ref}$) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4)

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

$$\begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{u.ref} \\ i_{v.ref} \\ i_{w.ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในบทความนี้ พิจารณาระบบไฟฟ้ามีโหลดแตกต่างกันสองรูปแบบดังที่แสดงไว้ใน Figure 2 และ 3 ซึ่งข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าว ได้จากการตรวจวัดโหลดจริง ซึ่งระบบตามแผนภาพใน Figure 2 นั้น แหล่งกำเนิดมี $L_s = 6 \text{ mH}$ และโหลดเป็น $R = 3.37 \text{ k}\Omega$ ในกรณีระบบตาม Figure 3 L_s ของแหล่งกำเนิดมีค่า 6 mH เช่นเดิม และมีโหลดไม่สมดุลเป็น $R_u = 85 \text{ }\Omega$, $L_u = 19.8 \text{ H}$, $R_v = 260 \text{ }\Omega$, $L_v = 2.64 \text{ H}$, $R_w = 1.09 \text{ k}\Omega$ และ $L_w = 19.8 \text{ H}$ Figure 6 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก เมื่อใช้วิธี DQ ระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกในกรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟส จากรูปดังกล่าวกระแสทั้งสามเฟสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนกำจัดฮาร์มอนิก (i_{lu} , i_{lv} และ i_{lw}) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ ในขณะที่หลังกำจัดฮาร์มอนิก ($i_{su,comp}$, $i_{sv,comp}$ และ $i_{sw,comp}$) มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ ทั้งนี้เนื่องจากวงจรรอกกำลังแยกทีเฟสมีการฉีดกระแสชดเชย (i_{cu} , i_{cv} และ i_{cw}) เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกให้กับระบบ ปริมาณฮาร์มอนิกก่อนและหลังกำจัดฮาร์มอนิกดูได้จากค่า %THD ที่คำนวณได้จากสมการ

Table 1. Results when the nonlinear load is a three-phase rectifier

identification method	%THD phase u	%THD phase v	%THD phase w	%THD average	i_{su} (rms)	i_{sv} (rms)	i_{sw} (rms)	Unbalance (%)
before compensated	27.87	29.27	29.05	28.73	0.13	0.13	0.13	0
after compensated								
DQ method	0.80	1.34	1.24	1.13	0.15	0.15	0.15	0
SWFA method	0	0	0	0	0.13	0.13	0.13	0
DQF method	0	0	0	0	0.13	0.13	0.13	0

Table 2. Results when the nonlinear load is a set of three single-phase rectifiers

identification method	%THD phase u	%THD phase v	%THD phase w	%THD average	i_{su} (rms)	i_{sv} (rms)	i_{sw} (rms)	Unbalance (%)
before compensated	45.78	35.90	43.20	41.63	0.39	0.13	0.66	67.80
after compensated								
DQ method	1.09	1.84	1.50	1.48	0.42	0.43	0.43	1.56
SWFA method	0	0	0	0	0.35	0.12	0.61	69.44
DQF method	0	0	0	0	0.36	0.36	0.36	0

ที่ (5) ซึ่งค่า %THD ในแต่ละเฟสแสดงไว้ใน Table 1 จากตารางดังกล่าวค่า %THD ก่อนกำจัดฮาร์มอนิกในแต่ละเฟสมีค่าไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้นปริมาณฮาร์มอนิกโดยรวมของกระแสสามเฟสจึงพิจารณาจาก %THD เฉลี่ยที่มีการคำนวณดังสมการที่ (6) ค่า %THD เฉลี่ยหลังกำจัดฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากับ 1.13% ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับค่า %THD เฉลี่ยก่อนกำจัดฮาร์มอนิก (28.73%) ค่า %Unbalance ของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักสามเฟส ในสภาวะก่อนและหลังกำจัดฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงระบบดังกล่าวอยู่ในสภาวะสมดุล ทั้งนี้เนื่องจากค่ากระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักสามเฟส (i_{su} , i_{sv} และ i_{sw}) มีค่าเท่ากัน ค่า %Unbalance ที่นำเสนอไว้ในตารางคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$\%THD = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \times 100\% \quad (5)$$

$$\%THD \text{ average} = \frac{1}{3} \sum_{i=u,v,w} \%THD_i \quad (6)$$

$$\%Unbalance = \frac{\text{maximum current deviation from average rms current}}{\text{average rms current}} \times 100 \quad (7)$$

ส่วนผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในกรณีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสสามชุด ได้แสดงไว้ใน Figure 7 จะเห็นว่ากระแสทั้งสามเฟสก่อนกำจัดฮาร์มอนิกมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ อีกทั้งมีความไม่สมดุลเกิดขึ้น โดยดูได้จากค่า %unbalance ที่แสดงไว้ใน Table 2 มีค่าเท่ากับ 67.80% ทั้งนี้เนื่องจากโหลดของวงจรเรียงกระแสในแต่ละเฟสมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งทำให้กระแสในแต่ละเฟส (i_{su} , i_{sv} และ i_{sw}) มีค่าไม่เท่ากัน แต่ภายหลังกำจัดฮาร์มอนิก รูปสัญญาณกระแสทั้งสามเฟสมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งค่า %THD ก่อนและหลังกำจัดฮาร์มอนิกดูได้จาก Table 2 ส่วนค่า %unbalance ภายหลังกำจัดฮาร์มอนิก มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ %unbalance ก่อนกำจัดฮาร์มอนิก ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะไม่สมดุลที่เกิดขึ้น ส่งผลให้มีกระแสในซีควเอนซ์ศูนย์ (zero sequence) ซึ่งทำให้เกิดกระแสในสายนิวทรัล การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี DQ มีการพิจารณากระแส zero sequence (i_0) สำหรับนำไปคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟ เพื่อไปชดเชยให้กับระบบ โดยวงจรรองมีการฉีดกระแสชดเชยที่สายนิวทรัล (i_{NAPF}) ซึ่งทำให้กระแสในสายนิวทรัลหลัง

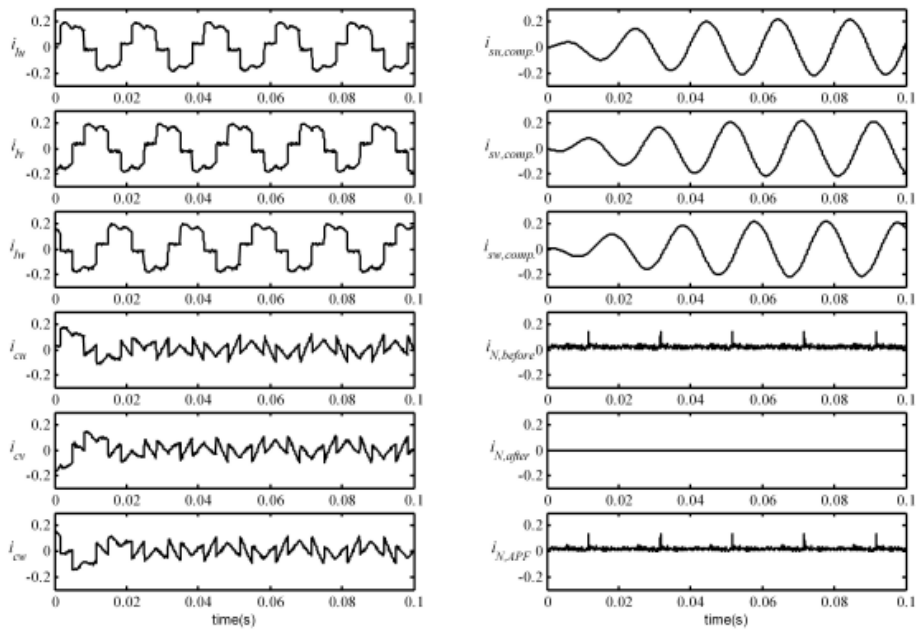


Figure 6. Simulation results : Load is a three-phase rectifier (DQ)

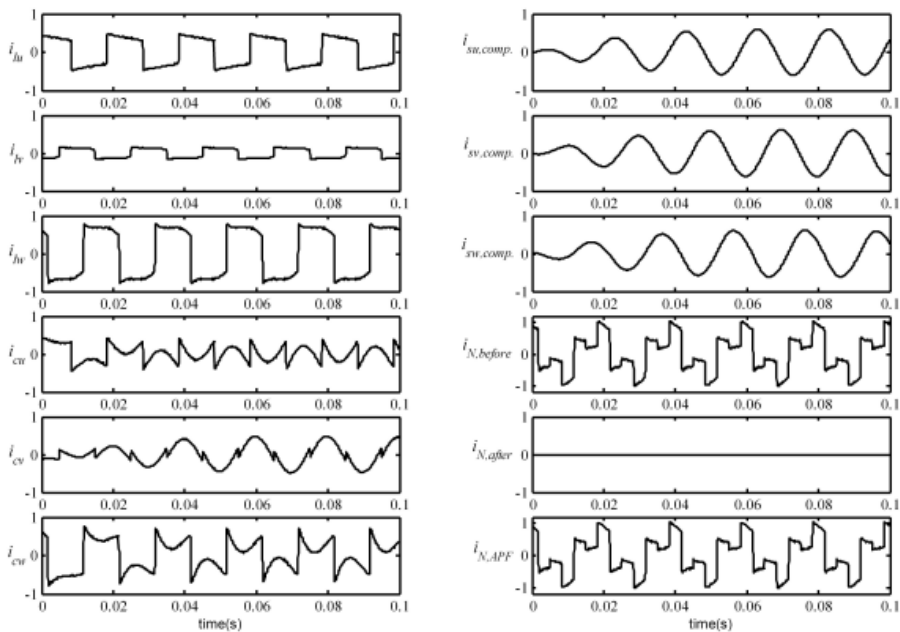


Figure 7. Simulation results : Load is a set of three single-phase rectifiers (DQ)

กำจัดฮาร์มอนิก ($i_{N,after}$) มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับกระแสในสายนิวตรอลก่อนกำจัดฮาร์มอนิก ($i_{N,before}$) จึงส่งผลให้ระบบหลังการกำจัดฮาร์มอนิกมีความไม่สมดุลลดลง โดยดู

ได้จาก %unbalance ลดลงเหลือ 1.56% มีช่วงสภาวะชั่วครู่ประมาณ 0.03 วินาที ก่อนที่การทำงานทั้งหมดจะคงตัว ดังการแสดงผลด้วยกราฟใน Figure 6 และ 7

1.2 การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA (EI-Habrouk et al., 2001)

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA อาศัยการคำนวณจากสมการของอนุกรมฟูรีเยร์ ซึ่งการคำนวณจะดำเนินการเฉพาะค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐาน (i_1) ดังสมการที่ (8) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 คำนวณได้จากสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ จากสมการดังกล่าว T คือ ค่าเวลาในการชักตัวอย่าง (วินาที), ω คือ ความถี่มูลฐาน (เรเดียน/วินาที), N คือ จำนวนจุดข้อมูลในการคำนวณต่อหนึ่งคาบ และ N_0 คือ ตำแหน่งของจุดข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ หลังจากคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐาน นำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณไปหักลบออกจากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (i) ดังสมการที่ (11) จะได้กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ (i_h) โดยในขั้นแรกจะรับข้อมูลกระแส i จำนวนหนึ่งคาบ ซึ่งมีทั้งหมด N ข้อมูล หลังจากนั้นทำการคำนวณค่า A_1 และ B_1 จากสมการที่ (9) และ (10) เพื่อคำนวณค่ากระแส i_1 จากสมการที่ (8) ค่าสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 ที่ได้จากการคำนวณในช่วงแรกนี้จะถูกเก็บเป็นข้อมูลในรูปแบบของแถวลำดับ (array) ดัง Figure 8 ซึ่งในรูปดังกล่าว $F(n\omega T) = \cos(n\omega T)$ ในกรณีคำนวณค่า A_1 และ $F(n\omega T) = \sin(n\omega T)$

ในกรณีคำนวณค่า B_1 กระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นเป็นการคำนวณเพื่อกำหนดค่าเริ่มต้น (initial) ให้กับอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA และในรอบการคำนวณถัดไป เริ่มต้นจากการรับข้อมูลกระแสค่าใหม่ $i(N_0 + N)$ จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก และลบข้อมูลกระแสค่าเก่า $i(N_0 - 1)$ เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_1 ค่าใหม่ ($A_1^{(new)}$) และค่าสัมประสิทธิ์ B_1 ค่าใหม่ ($B_1^{(new)}$) ดังสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ โดยที่ $A_1^{(old)}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ A_1 ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้ และ $B_1^{(old)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ B_1 ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้เช่นเดียวกัน จากกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้น มีการคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในทุกรอบของการรับข้อมูลกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ T วินาที

$$i_t(kT) = A_1 \cos(\omega kT) + B_1 \sin(\omega kT) \tag{8}$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \cos(n\omega T) \tag{9}$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \sin(n\omega T) \tag{10}$$

$$i_h = i - i_1 \tag{11}$$

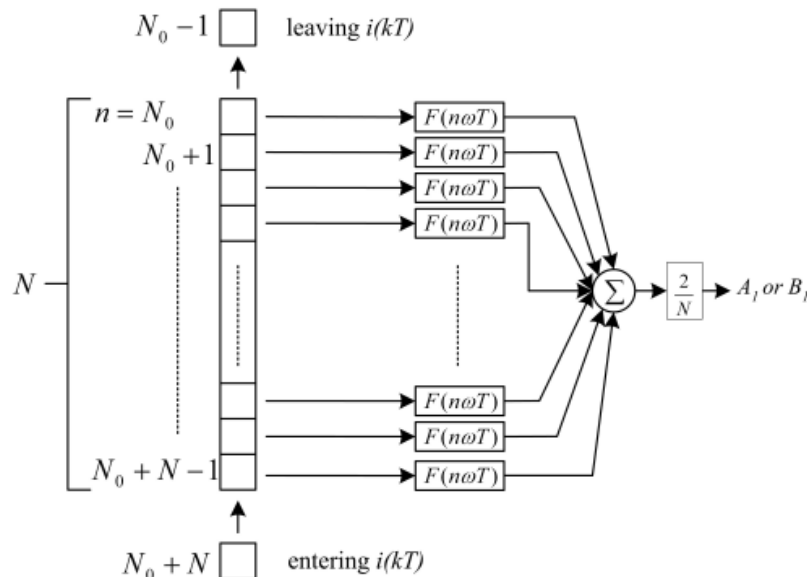


Figure 8. Computation of the Fourier coefficients

$$A_1^{(new)} = A_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{ i [(N_0 + N)T] \cos[(N_0 + N)\omega T] - i [(N_0 - 1)T] \cos[(N_0 - 1)\omega T] \} \quad (12)$$

$$B_1^{(new)} = B_1^{(old)} + \frac{2}{N} \{ i [(N_0 + N)T] \sin[(N_0 + N)\omega T] - i [(N_0 - 1)T] \sin[(N_0 - 1)\omega T] \} \quad (13)$$

จากการอธิบายข้างต้นเป็นการคำนวณสำหรับหนึ่งเฟส แต่ถ้านำวิธีการดังกล่าวไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_1 และ B_1 กับระบบไฟฟ้าสามเฟส ทำได้โดยใช้สมการที่ (14) และ (15) ตามลำดับ ส่วนการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานทั้งสามเฟสคำนวณได้จากสมการที่ (16) การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสแสดงเป็นแผนภาพบล็อกได้ดัง Figure 9

$$\begin{bmatrix} A_{1u}^{(new)} \\ A_{1v}^{(new)} \\ A_{1w}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1u}^{(old)} \\ A_{1v}^{(old)} \\ A_{1w}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u [(N_0 - 1)T] \\ i_v [(N_0 - 1)T] \\ i_w [(N_0 - 1)T] \end{bmatrix} \cos[(N_0 - 1)\omega T] + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u [(N_0 + N)T] \\ i_v [(N_0 + N)T] \\ i_w [(N_0 + N)T] \end{bmatrix} \cos[(N_0 + N)\omega T] \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} B_{1u}^{(new)} \\ B_{1v}^{(new)} \\ B_{1w}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{1u}^{(old)} \\ B_{1v}^{(old)} \\ B_{1w}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u [(N_0 - 1)T] \\ i_v [(N_0 - 1)T] \\ i_w [(N_0 - 1)T] \end{bmatrix} \sin[(N_0 - 1)\omega T] + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_u [(N_0 + N)T] \\ i_v [(N_0 + N)T] \\ i_w [(N_0 + N)T] \end{bmatrix} \sin[(N_0 + N)\omega T] \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1u}(kT) \\ i_{1v}(kT) \\ i_{1w}(kT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1u} & B_{1u} \\ A_{1v} & B_{1v} \\ A_{1w} & B_{1w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega kT) \\ \sin(\omega kT) \end{bmatrix} \quad (16)$$

ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA แสดงไว้ดัง Figure 10 และ 11 โดยผลการจำลองสถานการณ์ใน Figure 10 เป็นของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นโหนดไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ใน Figure 11 เป็นของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสสามชุดเป็นโหนดไม่เป็นเชิงเส้น จาก Figure 10 สังเกตได้ว่ารูปสัญญาณกระแสสามเฟสหลังกำจัดฮาร์มอนิกมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ โดยค่า %THD ของรูปสัญญาณดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 0% ทั้งสามเฟสซึ่งดูได้จาก Table 1 ส่วนค่า %unbalance

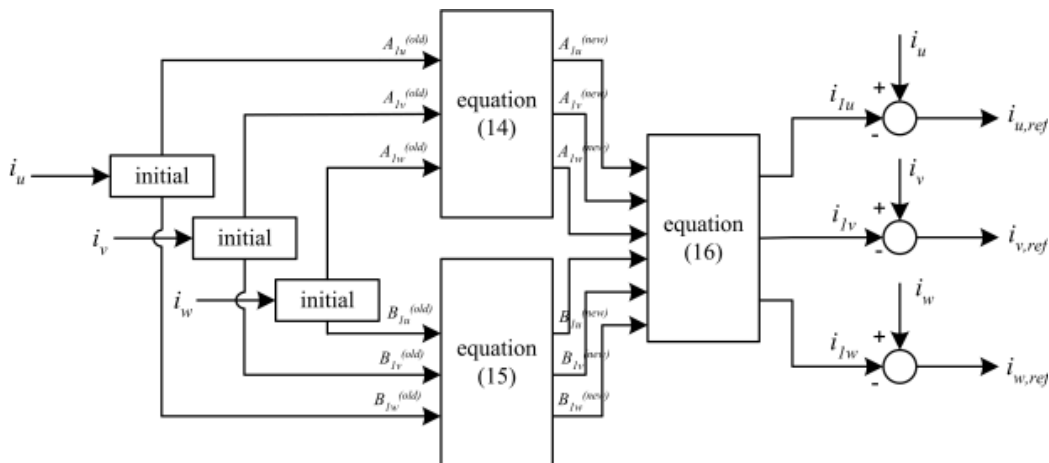


Figure 9. Block diagram of the SWFA method

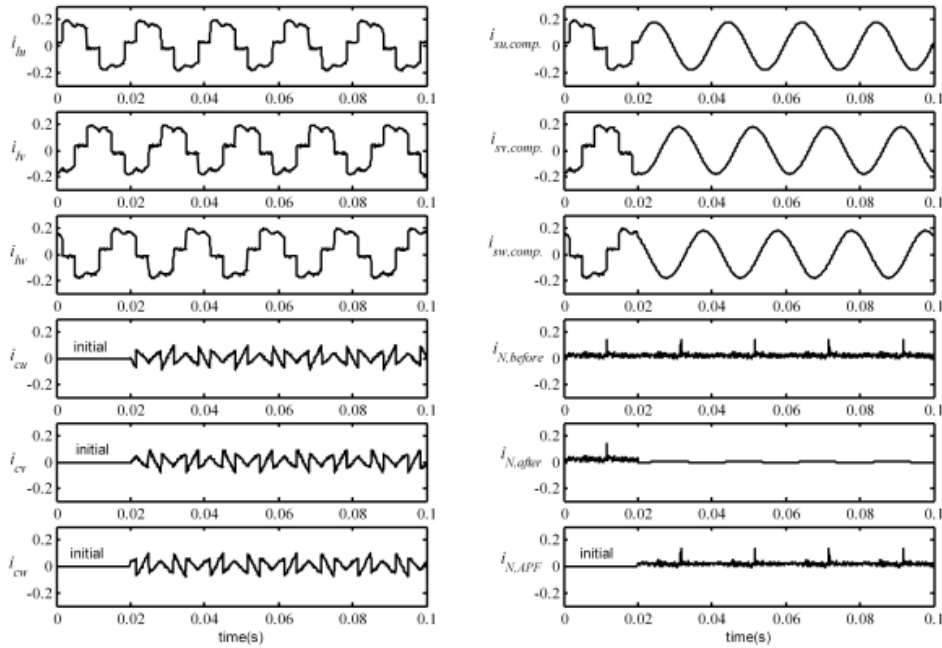


Figure 10. Simulation results : Load is a three-phase rectifier (SWFA)

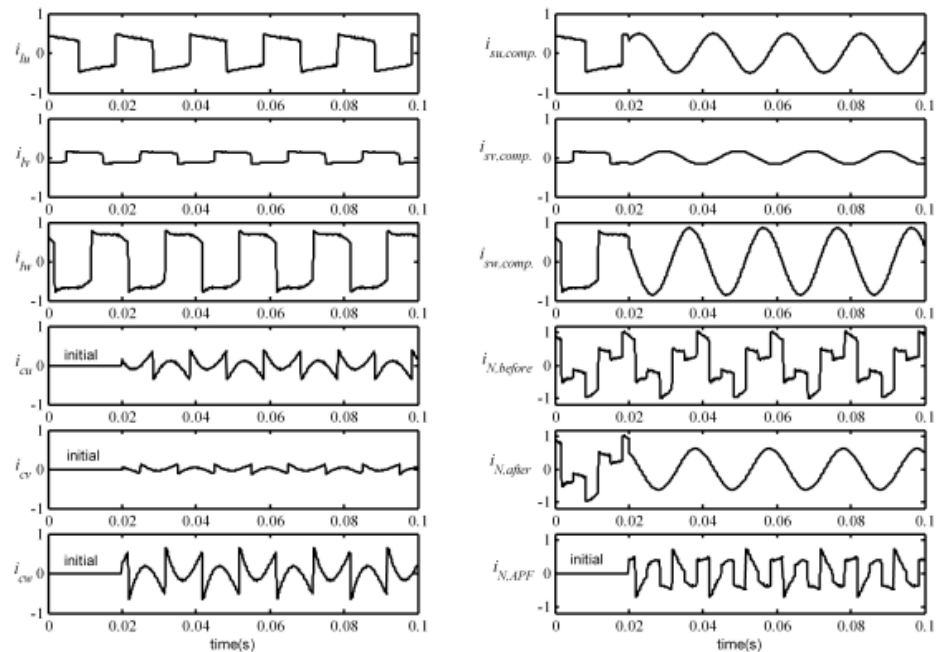


Figure 11. Simulation results : Load is a set of three single-phase rectifiers (SWFA)

ก่อนและหลังกำจัดฮาร์โมนิกมีค่าเท่ากับศูนย์เช่นเดียวกับกรณีที่ใช้วิธี DQ ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ใน Figure 11 สังเกตได้ว่าภายหลังกำจัดฮาร์โมนิกรูปสัญญาณกระแส

ในสภาวะอยู่ตัวทั้งสามเฟสมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ที่มีแอมพลิจูดไม่เท่ากัน โดยค่า %THD หลังกำจัดฮาร์โมนิกมีค่าเท่ากับ 0% ทั้งสามเฟส ซึ่งดูได้จาก Table 2

แต่ %unbalance ภายหลังกำจัดฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากับ 69.44% ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ไม่สามารถรักษาสภาพสมดุลภายหลังกำจัดฮาร์มอนิกได้ ทั้งนี้เนื่องจากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีนี้ไม่มีการคำนวณกระแส zero sequence เหมือนกับวิธี DQ วงจรกรองกำลังแยกที่พิจิงไม่ฉีดกระแสชดเชยในสายนิวตรอลเพื่อรักษาสภาพสมดุล แต่มีการฉีดกระแสชดเชยเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกเท่านั้น ดังแสดงใน Figure 11 เพราะฉะนั้นหลังกำจัดฮาร์มอนิกยังคงมีกระแสในสายนิวตรอล ซึ่งเป็นรูปสัญญาณไซน์บริสุทธ์ จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลหลังกำจัดฮาร์มอนิก และเมื่อพิจารณาเวลาในการลู่เข้าสู่สภาวะคงตัว พบว่าการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที โดยดูได้จาก Figure 10 และ 11 ทั้งนี้เนื่องจากวิธี SWFA ต้องใช้เวลาในการคำนวณตามสภาวะเริ่มต้นให้กับการระบุเอกลักษณ์

2. การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในหัวข้อที่ 1 จะพบว่าการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA กำจัดฮาร์มอนิกได้ดีกว่าวิธี DQ แต่วิธี DQ สามารถรักษาสภาพสมดุลหลังกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีกว่าวิธี SWFA ด้วยเหตุดังกล่าว บทความนี้จะนำเสนอการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ axis with Fourier หรือวิธี DQF ซึ่งเป็นการผสมผสานข้อดีของวิธี DQ และวิธี SWFA เข้าด้วยกัน รายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธีการใหม่นี้ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1 ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ รวมถึงการอภิปรายผล เมื่อใช้วิธี DQF สำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.2

2.1 ขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF

ขั้นตอนการดำเนินงานระบุเอกลักษณ์ฮาร์-

มอนิกด้วยวิธี DQF แสดงไว้ใน Figure 12 ซึ่งในขั้นต้นแปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส เป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ดังสมการที่ (1) ต่อจากนั้นแปลงค่ากระแสบนแกน α และ β ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ด้วยเมตริกซ์ดังสมการที่ (2) ค่ากระแสไฟฟ้างดงกล่าวหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความถี่มูลฐาน เมื่อพิจารณาบนแกนหมุน d-q กระแสที่มีความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสสลับ การแยกองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรงซึ่งเป็นกระแสที่มีความถี่มูลฐานออกจากองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับจะแตกต่างกับวิธี DQ ที่ใช้วงจรกรองผ่านสูง โดยการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF จะแยกองค์ประกอบดังกล่าวโดยใช้หลักการของวิธี SWFA ซึ่งค่ากระแสความถี่มูลฐานที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำกว่าการใช้วงจรกรองผ่านสูง การใช้วิธี SWFA ในที่นี้เริ่มต้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ออยเลอร์-ฟูรีเยร์ (Euler-Fourier formulas) ดังสมการที่ (17) ซึ่งมืองค์ประกอบสองเทอม คือ เทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง และเทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ เมื่อกระแสที่มีความถี่มูลฐานเปรียบเสมือนสัญญาณกระแสตรง การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF จึงคำนวณเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ A_0 เท่านั้น ซึ่งการคำนวณค่า A_0 คำนวณได้จากการแทนค่า $h = 0$ ในสมการที่ (18) เพราะฉะนั้นจาก Figure 12 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานบนแกน d (i_{d1}) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานบนแกน q (i_{q1}) คำนวณได้จากสมการที่ (19) และ (20) ตามลำดับ ค่า A_{0d} และ A_{0q} จากสมการดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (21) และ (22) ซึ่งการคำนวณเริ่มด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นของ A_{0d} และ A_{0q} โดยรับข้อมูลกระแส i_d และ i_q มาหนึ่งคาบ ซึ่งมีทั้งหมด N ข้อมูล มาคำนวณตามสมการที่ (21) และ (22) หลังจากนั้นเก็บค่าดังกล่าวในรูปแบบของแถวลำดับดัง Figure 13 ส่วนในรอบการทำงานถัดไปเริ่มต้นจากการรับข้อมูล

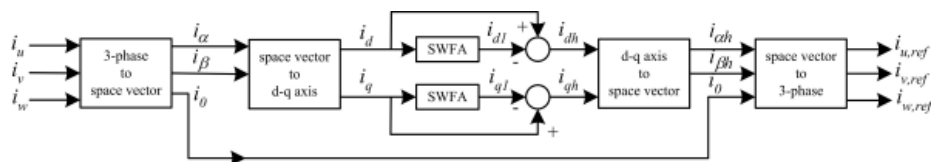


Figure 12. Block diagram of the DQF method

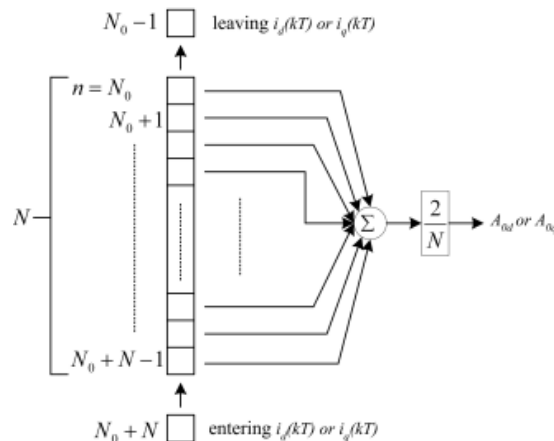


Figure 13. Computation of the Fourier coefficients on the d-q axis

กระแส i_d และ i_q ค่าใหม่ ($i_d(N_0 + N)$ และ $i_q(N_0 + N)$) และลบข้อมูลกระแส i_d และ i_q ค่าเก่า ($i_d(N_0 - 1)$ และ $i_q(N_0 - 1)$) เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_{0d} ค่าใหม่ ($A_{0d}^{(new)}$) และค่าสัมประสิทธิ์ A_{0q} ค่าใหม่ ($A_{0q}^{(new)}$) ดังสมการที่ (23) โดยที่ $A_{0d}^{(old)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ A_{0d} ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านั้น และ $A_{0q}^{(old)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ A_{0q} ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านั้นเช่นกัน ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_{0d}^{(new)}$ และ $A_{0q}^{(new)}$ ในทุกรอบของการรับข้อมูลกระแส i_d และ i_q ค่าใหม่ ทำให้ได้ค่ากระแส i_{d1} และ i_{q1} ในทุกรอบของการคำนวณ โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ T วินาที หลังจากที่ได้คำนวณค่ากระแส i_{d1} และ i_{q1} นำค่ากระแสดังกล่าวไปหักลบออกจากค่ากระแส i_d และ i_q จะได้กระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบบนแกนหมุน d-q (i_{dh} และ i_{qh}) หลังจากนั้นแปลงค่ากระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d-q กลับไปเป็นกระแสฮาร์มอนิกบนแกน α และ β ดังสมการที่ (3) ส่วนกระแส i_0 จะนำไปใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรรอกกำลังแยกทีฟ โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (4)

$$i(kT) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega kT) + B_h \sin(h\omega kT)] \tag{17}$$

$$A_h = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i(nT) \cos(n\omega kT) \tag{18}$$

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

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

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

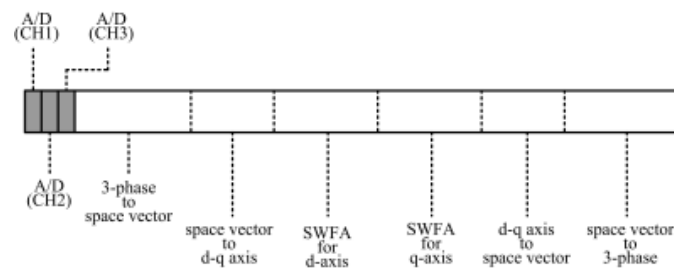
$$A_{0q} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_q(nT) \tag{22}$$

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

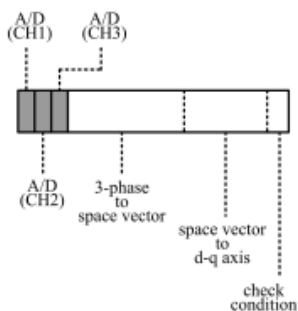
จากการอธิบายวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ข้างต้น ถ้าพิจารณาสมการที่ (23) สังเกตได้ว่าเมื่อข้อมูลกระแสบนแกน d และแกน q ค่าเก่าและค่าใหม่มีค่าเท่ากัน จะได้ว่า $A_{0d}^{(new)}$ เท่ากับ $A_{0d}^{(old)}$ และ $A_{0q}^{(new)}$ เท่ากับ $A_{0q}^{(old)}$ เพราะฉะนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว ดังนั้นค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรรอกกำลังแยกที่เพิ่งใช้ค่าเดิมได้เลย จากการอธิบายข้างต้น เมื่อพิจารณาเวลาในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกกำลังแยกที่พุดได้จาก Figure 14 ซึ่งรูปดังกล่าวเป็นการแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณในหนึ่งรอบการรับข้อมูล โดยใน Figure 14(a) แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณในกรณีที่ไม่มี การตรวจสอบเงื่อนไขการเท่ากันของกระแสบนแกน d และแกน q ซึ่งต้องคำนวณซ้ำๆ รอบการรับข้อมูล ส่วน Figure 14(b) แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณในกรณีที่มีการตรวจสอบเงื่อนไขการเท่ากันของกระแสบนแกน d และแกน q จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าเมื่อเงื่อนไขการเท่ากันเป็นจริง ก็ไม่มีความจำเป็นต้องคำนวณตามขั้นตอนที่เหลือ เหตุการณ์ลักษณะเช่นนี้

พบได้ส่วนมากในวงรอบการรับข้อมูลแต่ละครั้ง เมื่อดำเนินการเช่นนี้จะช่วยลดเวลาในการคำนวณลงได้ประมาณ 60% ทั้งนี้อาจพิจารณาได้จากขั้นตอนการคำนวณที่มี 13 ขั้นตอนดังนี้

- ขั้นที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับการระบุเอกลักษณ์
- ขั้นที่ 2 แปลงกระแสไฟฟ้าสามเฟสเป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์บนแกน α และ β ตามสมการที่ (1)
- ขั้นที่ 3 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์บนแกน α และ β ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ตามสมการที่ (2)
- ขั้นที่ 4 ตรวจสอบเงื่อนไขบนแกน d และแกน q โดยมีเงื่อนไขดังนี้
 ถ้าค่ากระแส i_d ค่าใหม่ เท่ากับ ค่ากระแส i_d ค่าเก่า และถ้าค่ากระแส i_q ค่าใหม่ เท่ากับ ค่ากระแส i_q ค่าเก่า เป็นจริง ให้ข้ามขั้นตอนการคำนวณขั้นที่ 5 ถึง 12 ไปดำเนินการขั้นที่ 13



(a) Without the checking conditions



(b) With the checking conditions

Figure 14. Timing diagram of computation for the DQF method

- ขั้นที่ 5 คำนวณค่า $A_{0d}^{(new)}$ ตามสมการที่ (23)
 ขั้นที่ 6 คำนวณค่า i_{dl} ตามสมการที่ (19)
 ขั้นที่ 7 คำนวณค่า i_{dh}
 ขั้นที่ 8 คำนวณค่า $A_{0d}^{(new)}$ ตามสมการที่ (23)
 ขั้นที่ 9 คำนวณค่า i_{qh} ตามสมการที่ (20)
 ขั้นที่ 10 คำนวณค่า i_{qh}
 ขั้นที่ 11 แปลงค่า i_{dh} และ i_{qh} เป็น i_{ch} และ $i_{\beta h}$ ตามสมการที่ (3)
 ขั้นที่ 12 คำนวณค่า $i_{u,ref}$, $i_{v,ref}$ และ $i_{w,ref}$ ตามสมการที่ (4)
 ขั้นที่ 13 ได้กระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลัง แยกทีฟ

จากขั้นตอนดังกล่าวสังเกตได้ว่า หน่วยประมวลผลไม่ต้องดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนที่ 5 ถึง 12 หากเงื่อนไขที่ตรวจสอบเป็นจริง เวลาการคำนวณที่สามารถลดลงได้ 60% โดยประมาณ หน่วยประมวลผลสามารถนำช่วงเวลาดังกล่าวไปใช้ประโยชน์เพื่อกิจกรรมอื่นใดได้

2.2 ผลการจำลองสถานการณ์ และอภิปรายผล

ผลการจำลองสถานการณ์ที่ใช้วิธี DQF สำหรับระบุเอกลักษณ์ แสดงไว้ดัง Figure 15 และ 16 โดยผลการจำลองสถานการณ์ Figure 15 เป็นของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสสามเฟสเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF กำจัดฮาร์มอนิกได้สมบูรณ์แบบ โดยดูได้จากรูปสัญญาณกระแสสามเฟสหลังกำจัดฮาร์มอนิกมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ที่มีค่า %THD ในแต่ละเฟสเท่ากับ 0% ดัง Table 1 ส่วนค่า %unbalance ก่อนและหลังกำจัดฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงระบบดังกล่าวอยู่ในสภาวะสมดุลทั้งก่อนและหลังกำจัดฮาร์มอนิก ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ใน Figure 16 เป็นของระบบที่มีวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสสามชุดเป็นโหลดไม่เชิงเส้น ซึ่งจากรูปดังกล่าวกระแสทั้งสามเฟสก่อนกำจัดฮาร์มอนิกมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ อีกทั้งมีความไม่สมดุลเกิดขึ้น แต่ภายหลังกำจัดฮาร์มอนิกรูปสัญญาณกระแสทั้งสามเฟสมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์บริสุทธิ์ โดยดูได้จากค่า %THD ในแต่ละเฟสเท่ากับ 0% ดัง Table 2 ส่วนค่า %unbalance หลังกำจัดฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากับ

0% โดยก่อนกำจัดฮาร์มอนิกค่า %unbalance มีค่าเท่ากับ 67.80% ทั้งนี้เนื่องจากวิธี DQF มีการคำนวณค่ากระแส zero sequence ซึ่งมีผลทำให้วงจรกรองกำลังแยกที่ฟีดกระแสชดเชยที่สายนิวตรอล ($i_{N,APF}$) ทำให้กระแสในสายนิวตรอลหลังกำจัดฮาร์มอนิก ($i_{N,after}$) มีค่าลดลงเป็นศูนย์ จึงส่งผลให้ระบบหลังการกำจัดฮาร์มอนิกอยู่ในสภาวะสมดุล และเมื่อพิจารณาเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว พบว่าการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF ใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที โดยดูได้จาก Figure 15 และ 16 ทั้งนี้เนื่องจากวิธี DQF ต้องใช้เวลาในการกำหนดสภาวะเริ่มต้นให้กับการระบุเอกลักษณ์ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF กับวิธี SWFA ที่แสดงไว้ดัง Figure 12 และ 9 สังเกตได้ว่าวิธี DQF มีการคำนวณโดยใช้เทคนิค sliding window Fourier เพียง 2 ครั้งคือ บนแกน d และแกน q ดังสมการที่ (23) ในขณะที่วิธี SWFA มีการคำนวณถึง 6 ครั้ง ดังสมการที่ (14) และ (15) ซึ่งทำให้เวลาในการคำนวณด้วยวิธี SWFA ใช้เวลามากกว่าวิธี DQF และถ้าใช้เทคนิคการโปรแกรมที่ใส่เงื่อนไขการเท่ากันของกระแสบนแกน d และแกน q ที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.1 สำหรับวิธี DQF สามารถลดเวลาการคำนวณได้อีกเช่นกัน และเมื่อพิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิกในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะชั่วคราว การจำลองสถานการณ์ได้ใช้ระบบที่มีวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสสามชุดเป็นโหลดไม่เชิงเส้น ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวที่ใช้วิธี DQF สำหรับระบุเอกลักษณ์แสดงไว้ใน Figure 17 โดยจากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่าการกำจัดฮาร์มอนิกเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่นำเสนอในบทความนี้ ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก 3 วิธี คือ วิธี DQ วิธี SWFA และวิธี DQF ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า วิธี DQF กับวิธี SWFA ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีกว่าวิธี DQ โดยกำจัดฮาร์มอนิกได้สมบูรณ์แบบ โดยดูได้จากค่า %THD ภายหลังกำจัดฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากับ 0% และภายหลังกำจัดฮาร์มอนิกวิธี DQF รักษาสภาพสมดุลได้ดีที่สุดในกรณีที่มีความไม่สมดุลเกิดขึ้นในระบบ โดยดูได้จากค่า %unbalance มีค่าเท่ากับ 0% ภายหลังกำจัดฮาร์มอนิก ในขณะที่วิธี DQ

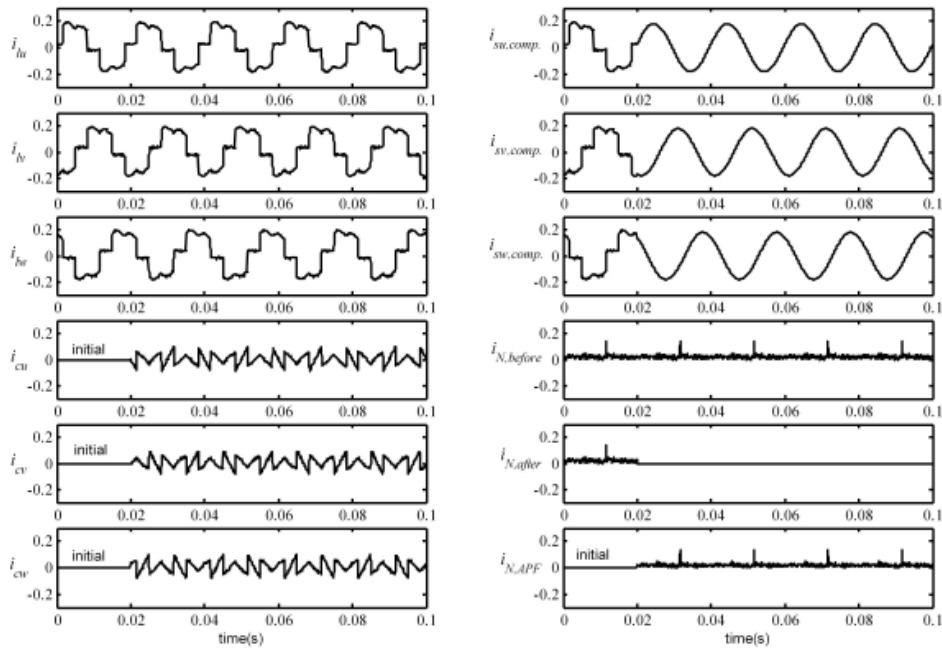


Figure 15. Simulation results : Load is a three-phase rectifier (DQF)

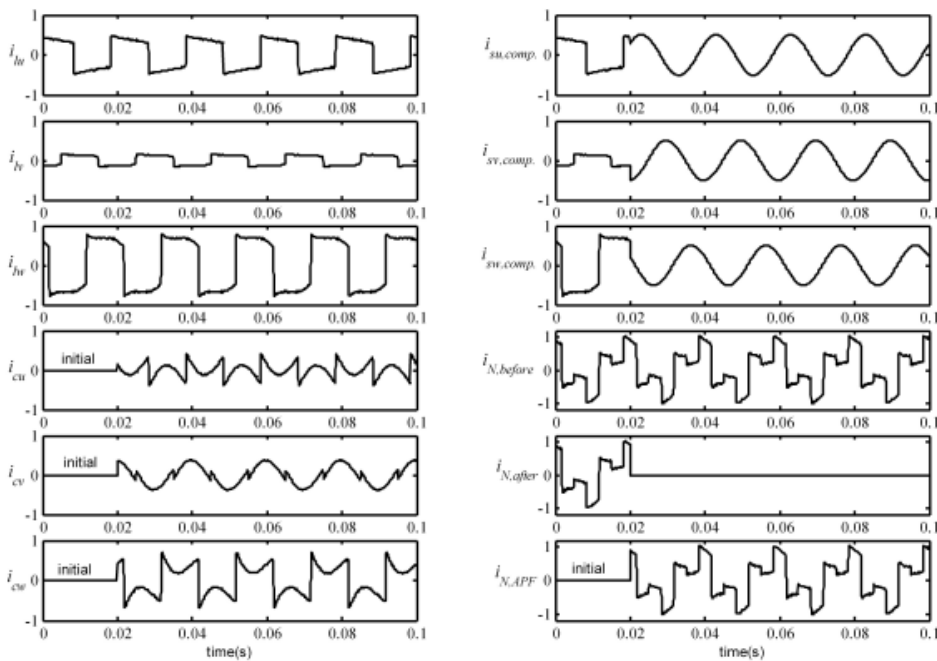


Figure 16. Simulation results : Load is a set of three single-phase rectifiers (DQF)

รักษาภาพสมมูลได้เช่นกัน แต่ไม่ดีเท่ากับวิธี DQF ส่วนวิธี SWFA ไม่สามารถรักษาภาพสมมูลได้เลยภายหลังกำจัดฮาร์มอนิก จากผลดังกล่าวข้างต้น บทความนี้ได้

กำหนดเกณฑ์ในการชี้วัดสมรรถนะของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก โดยมีค่า %THD และค่า %unbalance ภายหลังกำจัดฮาร์มอนิกเป็นตัวบ่งชี้ เกณฑ์ดังกล่าวได้รับการแสดง

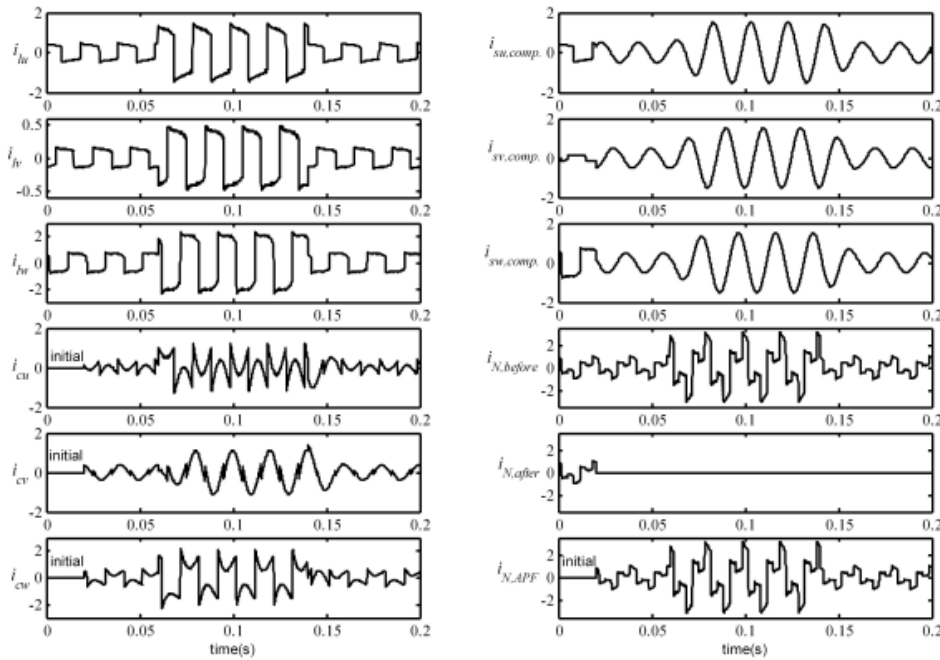


Figure 17. Simulation results : Sudden load changing (DQF)

Table 3. Performance criterion for harmonic identification

critérion	% THD	% Unbalance
very good	THD = 0%	Unbalance = 0%
good	0% < THD < 5%	0% < Unbalance < 5%
poor	THD ≥ 5%	Unbalance ≥ 5%

Table 4. Harmonic identification performance for each method

condition	DQ	SWFA	DQF
	effectiveness of harmonic compensation		
balance load	good	very good	very good
unbalance load	good	very good	very good
condition	balancing performance after harmonic compensation		
	DQ	SWFA	DQF
balance load	good	very good	very good
unbalance load	good	poor	very good

ไว้ใน Table 3 ส่วน Table 4 แสดงคุณภาพสมรรถนะของการใช้วิธีระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี ซึ่งอาจสรุปได้ว่าวิธี DQF ให้ผลการกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด และสามารถรักษาสมดุลของระบบสามเฟสภายหลังกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุดด้วย

สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแบบใหม่ ที่เรียกว่า วิธี DQF เพื่อใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่กำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ

ผลการคำนวณในรายละเอียดเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบสามเฟสสายด้วยตัวกรองกำลังแอกทีฟ ที่มีการใช้วิธีระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQ SWFA และ DQF บ่งบอกว่า วิธี DQF และวิธี SWFA กำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี DQ คือ สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์แบบ แต่เมื่อพิจารณาความสมดุลหลังกำจัดฮาร์มอนิก พบว่า วิธี SWFA ไม่สามารถรักษาสภาพสมดุลในระบบไว้ได้ ในขณะที่วิธี DQ และวิธี DQF สามารถรักษาสภาพสมดุลไว้ได้ โดยวิธี DQF รักษาสภาพสมดุลหลังกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด โดยดูจากค่า %unbalance มีค่าเท่ากับ 0% นอกจากนี้ในบทความได้นำเสนอวิธีการคำนวณสำหรับระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี DQF ที่รวดเร็วขึ้น โดยมีการเพิ่มเงื่อนไขเพื่อตรวจสอบข้อมูลค่ากระแสบนแกน d และแกน q ในทุกรอบของการคำนวณ ซึ่งพบว่าเมื่อเงื่อนไขเป็นจริง เวลาที่ใช้ในการคำนวณมีค่าลดลง 60% โดยประมาณ จากผลการจำลองสถานการณ์การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี DQF สรุปได้ว่า วิธี DQF เป็นวิธีการที่ให้ผลดีอย่างยิ่งในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และเหมาะสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในเวลาจริงให้กับระบบไฟฟ้าสามเฟสสาย เนื่องจากวิธีการดังกล่าวใช้เวลาในการคำนวณสั้น และไม่ซับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- Chang, G.W., Chen, S.K. and Chu, M. 2002. An Efficient *a-b-c* Reference Frame-based Compensation Strategy for Three-Phase Active Power Filter Control. *Electric Power Systems Research*. 60(3): 161-166.
- Chen, C.L., Lin, C.E. and Huang, C.L. 1994. The Reference Active Source Current for Active Power Filter in an Unbalanced Three-Phase Power System via the Method of Instantaneous Power Theory. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC/94)*: 1020-1023.
- Chen, C.L., Lin, C.E. and Huang, C.L. 1994. An Active Filter for Unbalanced Three-Phase System Using Synchronous Detection Method. *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '94)*. 2: 1451-1455.
- Dash, P.K., Pradhan, A.K., Panda, G., Jena, R.K. and Panda, S.K. 2000. On-Line Tracking of Time Varying Harmonics Using an Integrated Extended Complex Kalman Filter and Fourier Linear Combiner. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. 3: 1575-1580.
- El-Amin, I. and Arafah, I. 1998. Artificial Neural Networks for Power Systems Harmonic Estimation. *IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power*. 2: 999-1009.
- El-Habrouk, M. and Darwish, M.K. 2001. Design and Implementation of a Modified Fourier Analysis Harmonic Current Computation Technique for Power Active Filter Using DSPs. *IEE Proc.-Electr. Power Appl.* 148(1): 21-28.
- Furuhashi, T., Okuma, S. and Uchikawa, Y. 1990. A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 37(1): 86-90.
- George, J.W. 2001. *Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design*. Springer, New York.
- Ho, J.M. and Liu, C.C. 2001. The Effects of Harmonics on Differential Relay for a Transformer. *IEE International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*. 2: 482.
- Indrajit, P. and Paul, J.S. 1989. Effect of Harmonics on Power Measurement. *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*: 129-132.
- Lin, C.E., Chen, C.L. and Huang, C.L. 1992. Calculating Approach and Implementation for Active Filters in Unbalanced Three-Phase System using Synchronous Detection Method. *Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation*. 1: 374-380.
- Takeda, M., Ikeda, K., Teramoto, A. and Aritsuka, T. 1988. Harmonic Current and Reactive Power Compensation with an Active Filter. *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '88)*. 2: 1174-1179.
- Ying, J., Xu, L., Lu, B. and Huang, M. 1999. An Improved Control Method for Three-phase Active Power Filter. *IEEE Power Electronics and Drives Systems Conference (PEDS'99)*: 905-909.

Zhang, F., Geng, Z. and Yuan, W. 2001. The Algorithm of Interpolating Windowed FFT for Harmonic Analysis of Electric Power System. IEEE Trans. on Power Delivery. 16(2): 160-164.

คำอธิบายสัญลักษณ์

i_u	กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ในเฟส u (แอมแปร์)	$i_{u,ref}$	กระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแยกที่สำหรับเฟส u (แอมแปร์)
i_v	กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ในเฟส v (แอมแปร์)	$i_{v,ref}$	กระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแยกที่สำหรับเฟส v (แอมแปร์)
i_w	กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ในเฟส w (แอมแปร์)	$i_{w,ref}$	กระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแยกที่สำหรับเฟส w (แอมแปร์)
i_α	กระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์บนแกน α (แอมแปร์)	i_h	กระแสฮาร์โมนิก ลำดับที่ h (แอมแปร์)
i_β	กระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์บนแกน β (แอมแปร์)	i_i	กระแสยอดที่ความถี่มูลฐาน (แอมแปร์)
i_0	กระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์บนแกน 0 (แอมแปร์)	T	เวลาในการซักตัวอย่าง (วินาที)
ω	ความถี่เชิงมุม (เรเดียน/วินาที)	N	จำนวนจุดข้อมูลในการคำนวณต่อหนึ่งคาบ
t	เวลา (วินาที)	N_0	ตำแหน่งจุดข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ
i_d	กระแสไฟฟ้าบนแกน d (แอมแปร์)	i_1	กระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (แอมแปร์)
i_q	กระแสไฟฟ้าบนแกน q (แอมแปร์)	i	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก (แอมแปร์)
i_{dh}	กระแสฮาร์โมนิกบนแกน d (แอมแปร์)	i_h	กระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ (แอมแปร์)
i_{qh}	กระแสฮาร์โมนิกบนแกน q (แอมแปร์)	i_{d1}	กระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานบนแกน d (แอมแปร์)
$i_{\alpha h}$	กระแสฮาร์โมนิกบนแกน α (แอมแปร์)	i_{q1}	กระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานบนแกน q (แอมแปร์)
$i_{\beta h}$	กระแสฮาร์โมนิกบนแกน β (แอมแปร์)		