

วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการแปลงสเปกเตอร์ประกอบกับวิธีฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน

Harmonic Identification via the Space Vector with Sliding Window Fourier Analysis Method

ชินพัฒน์ ชนะถาวรลักษณ์ กองพล อารีรักษ์ และ สรวุฒิ สุจิตจร¹

Chinnapat Chanatavaraluk, Kongpol Areerak, Sarawut Sujitjorn¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร.044-224400

E-mail: sarawut@sut.ac.th, kongpol@sut.ac.th, bigpatee11@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการใหม่ ที่เรียกว่า วิธีการแปลงสเปกเตอร์ประกอบกับวิธีฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (SVF) การทดสอบสมรรถนะของการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีดังกล่าวจะเปรียบเทียบกับวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกอีก 2 วิธี ได้แก่ วิธี PQ และ วิธี SWFA ซึ่งการเปรียบเทียบใช้การจำลองสถานการณ์ระบบสามเฟสด้วยโปรแกรม MATLAB โดยพิจารณา 2 กรณีของโหลดแหล่งจ่ายกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นกล่าวคือ โหลดสมดุลเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสจ่ายกำลังให้ RL อนุกรมและโหลดไม่สมดุล จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าวิธี SVF ให้ข้อมูลฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุด เนื่องจากหลังการชดเชยฮาร์มอนิกค่า %THD_i เหลือหลังการชดเชยฮาร์มอนิกอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 และสามารถรักษาภาวะสมดุลหลังการกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างดี

Abstract

This article proposes a new harmonic identification method namely the space vector with sliding window Fourier analysis (SVF) method. To assess its performance, comparison studies have been made among the PQ, the SWFA, and the proposed SVF methods via MATLAB simulations of three-phase systems. Two cases of current-source nonlinear loads are considered, i.e. a balanced load of the three-phase rectifier type feeding a series-RL, and some unbalanced loads. The simulation results indicate that the SVF method yields the most accurate harmonic

information, and %THD_i average after compensation is bounded to the IEEE Std.519-1992. Moreover, the phase balancing is retained.

คำอธิบายสัญลักษณ์

i_{lu}, i_{lv}, i_{lw} = กระแสโหลดสามเฟส

i_{su}, i_{sv}, i_{sw} = กระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักสามเฟส

v_{su}, v_{sv}, v_{sw} = แรงดันที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักสามเฟส

A_1, B_1 = ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ ที่ความถี่มูลฐาน

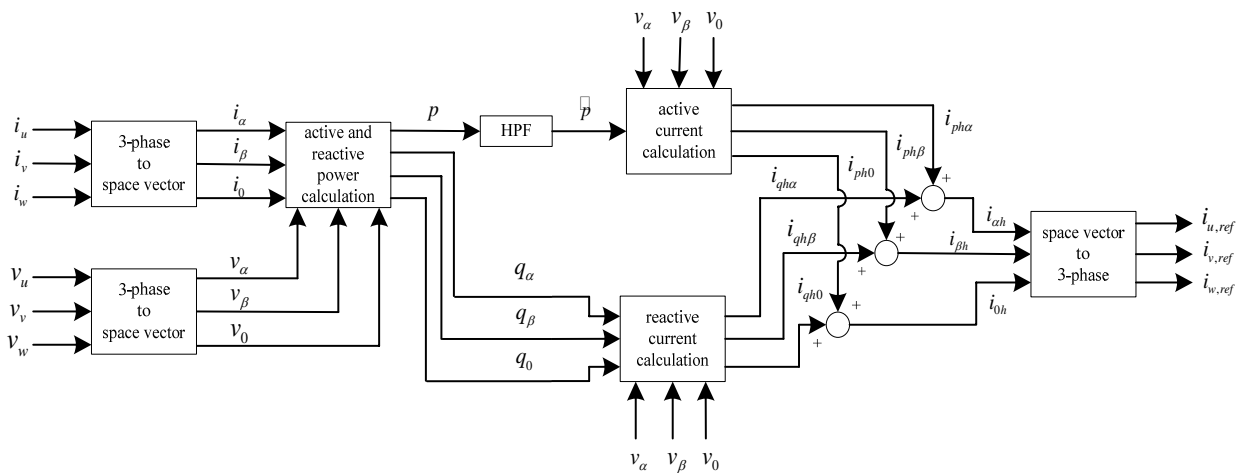
ω_1 = ความถี่เชิงมุมที่ความถี่มูลฐาน (rad/s)

1. บทนำ

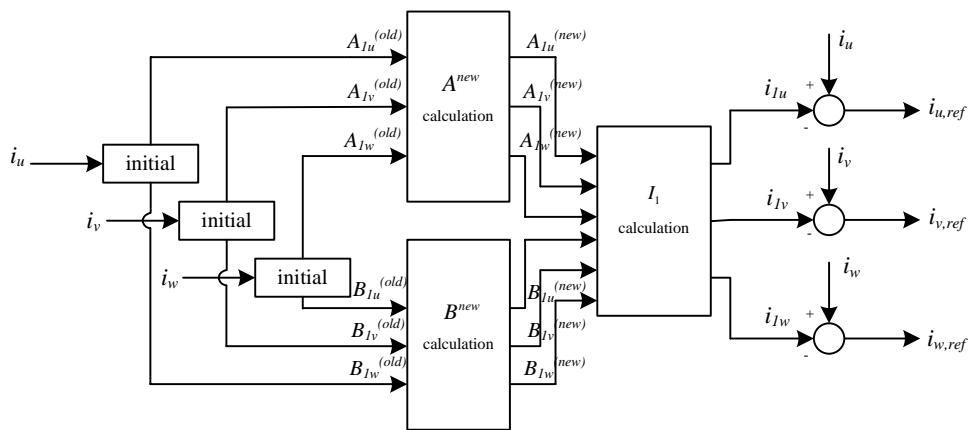
การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกเป็นตัวบ่งบอกได้ว่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณเท่าใด การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกจึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านการกำจัดฮาร์มอนิก การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกอาจแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่สนใจผลรวมของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบโดยไม่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกประเภทนี้เหมาะกับการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ ส่วนในกลุ่มที่สองเป็นการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่แสดงรายละเอียดอันดับของฮาร์มอนิก ซึ่งเหมาะกับการกำจัดฮาร์มอนิกบางอันดับ บทความนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแบบกำจัดฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ ในอดีตงานวิจัยของ Furuhashi at al. (1990) ได้เสนอวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous

reactive power theory, PQ) โดยตั้งต้นจากคำนวณหา กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟ หลังจากนั้นนำกำลังไฟฟ้า แอกทีฟผ่านวงจรกรองผ่านสูงแยกส่วนของฮาร์มอนิกออก จากองค์ประกอบมูลฐาน หลังจากนั้นจึงคำนวณค่ากระแส อ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ขั้นตอนดังกล่าว สามารถดูได้จากแผนภาพบล็อกดังรูปที่ 1 ต่อมางานวิจัยของ EI-Habrouk at al. (2001) ได้เสนอวิธี SWFA (sliding window Fourier analysis) ในการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก

ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่คำนวณได้เร็ว โดยคำนวณเฉพาะ องค์ประกอบของความถี่มูลฐานและนำไปลบกับกระแส โหลดทั้งหมดทำให้ได้กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ขั้นตอน การคำนวณด้วยวิธี SWFA นี้อาจดูได้จากแผนภาพบล็อกดัง รูปที่ 2 จากวิธีดังกล่าวทั้งสองวิธีจะนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับวิธี SVF ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่



รูปที่ 1 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ



รูปที่ 2 แผนภาพบล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA

2. การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีการแปลงสเปซ
เวกเตอร์ประกอบกับวิธีฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน

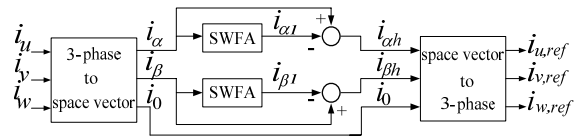
การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกวิธี SVF มีขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

ขั้นที่ 1 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส คือ i_u, i_v และ i_w เป็นกระแสไฟฟ้าสเปซเวกเตอร์ (i_α, i_β และ i_0) ดังสมการที่ (1)

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

ขั้นที่ 2 นำค่ากระแส $i_{\alpha,\beta}$ ผ่านกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธี SWFA ดังรูปที่ 3 โดยในขั้นแรกจะรับข้อมูลกระแส $i_{\alpha,\beta}$ จำนวนหนึ่งคาบ ซึ่งมีทั้งหมด N ข้อมูล หลังจากนั้นทำการคำนวณค่า $A_{\alpha1,\beta1}$ และ $B_{\alpha1,\beta1}$ ตามสมการที่ (2) และ (3) เพื่อคำนวณค่ากระแสเฉพาะองค์ประกอบมูลฐาน $i_{\alpha1,\beta1}$ ดังสมการที่ (4) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ $A_{\alpha1,\beta1}$ และ $B_{\alpha1,\beta1}$ ที่ได้จากการคำนวณในช่วงแรกนี้จะถูกเก็บเป็นข้อมูลในรูปแบบของแถวลำดับดังรูปที่ 4 ซึ่งในรูปดังกล่าว $F(n\omega_1 T) = \cos(n\omega_1 T)$ ในกรณีคำนวณค่า $A_{\alpha1,\beta1}$ และ $F(n\omega_1 T) = \sin(n\omega_1 T)$ ในกรณีคำนวณค่า $B_{\alpha1,\beta1}$ กระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นเป็นการคำนวณเพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธี SWFA และในรอบการคำนวณถัดไป เริ่มต้นจากการรับข้อมูลกระแสค่าใหม่ $i(N_0 + N)$ จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักและลบข้อมูลกระแสค่าเก่า $i(N_0 - 1)$ เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_{\alpha1,\beta1}$ ค่าใหม่ ($A_{\alpha1,\beta1}^{(new)}$) และค่าสัมประสิทธิ์ $B_{\alpha1,\beta1}$ ค่าใหม่ ($B_{\alpha1,\beta1}^{(new)}$) ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ โดยที่ $A_{\alpha1,\beta1}^{(old)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ $A_{\alpha1,\beta1}$ ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้ และ $B_{\alpha1,\beta1}^{(old)}$ คือค่าสัมประสิทธิ์

$B_{\alpha1,\beta1}$ ค่าเก่าที่ได้จากการคำนวณก่อนหน้านี้เช่นเดียวกัน จากกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดข้างต้น มีการคำนวณค่ากระแส $i_{\alpha1,\beta1}$ ที่เกิดขึ้นในทุกรอบของการรับข้อมูลกระแส $i_{\alpha,\beta}$ โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับ T วินาที

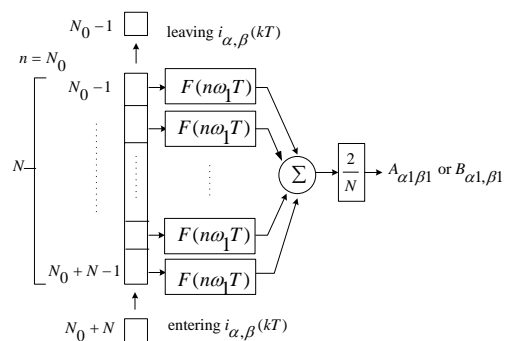


รูปที่ 3 บล็อกการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SVF

$$A_{\alpha1,\beta1} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_{\alpha,\beta}(nT) \cos(n\omega_1 T) \quad (2)$$

$$B_{\alpha1,\beta1} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_{\alpha,\beta}(nT) \sin(n\omega_1 T) \quad (3)$$

$$i_{\alpha1,\beta1}(kT) = A_{\alpha1,\beta1} \cos(\omega_1 kT) + B_{\alpha1,\beta1} \sin(\omega_1 kT) \quad (4)$$



รูปที่ 4 แผนภาพการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์

$$A_{\alpha1,\beta1} \text{ และ } B_{\alpha1,\beta1}$$

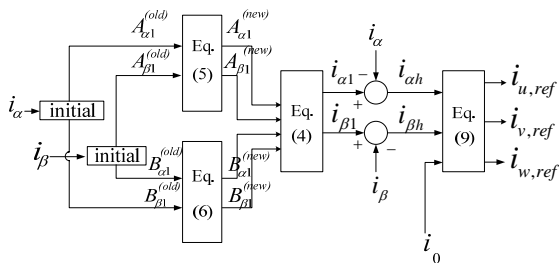
$$\begin{bmatrix} A_{\alpha 1}^{(new)} \\ A_{\beta 1}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\alpha 1}^{(old)} \\ A_{\beta 1}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_{\alpha}[(N_0 - 1)T] \\ i_{\beta}[(N_0 - 1)T] \end{bmatrix} \cos[(N_0 - 1)\omega_1 T] + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_{\alpha}(N_0 + N)T \\ i_{\beta}(N_0 + N)T \end{bmatrix} \cos[(N_0 + N)\omega_1 T] \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} B_{\alpha 1}^{(new)} \\ B_{\beta 1}^{(new)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\alpha 1}^{(old)} \\ B_{\beta 1}^{(old)} \end{bmatrix} - \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_{\alpha}[(N_0 - 1)T] \\ i_{\beta}[(N_0 - 1)T] \end{bmatrix} \sin[(N_0 - 1)\omega_1 T] + \frac{2}{N} \begin{bmatrix} i_{\alpha}(N_0 + N)T \\ i_{\beta}(N_0 + N)T \end{bmatrix} \sin[(N_0 + N)\omega_1 T] \quad (6)$$

ขั้นที่ 3 หลังจากที่คำนวณค่ากระแส $i_{\alpha 1, \beta 1}$ ในแต่ละรอบแล้วนำค่าดังกล่าวไปหักลบกับค่ากระแส $i_{\alpha, \beta}$ ดังสมการที่ (7) และ (8) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดคือ $i_{\alpha h, \beta h}$ แสดงเป็นบล็อกการคำนวณ ได้ดังรูปที่ 5

$$i_{\alpha h} = i_{\alpha} - i_{\alpha 1} \quad (7)$$

$$i_{\beta h} = i_{\beta} - i_{\beta 1} \quad (8)$$



รูปที่ 5 บล็อกการคำนวณหาค่ากระแส $i_{\alpha h}$ และ $i_{\beta h}$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงสามเฟสให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามเฟส ($i_{u,ref}$, $i_{v,ref}$ และ $i_{w,ref}$) โดยใช้การแปลงเมตริกซ์ดังสมการที่ (9) ซึ่งใช้ข้อมูลกระแส $i_{\alpha h}$, $i_{\beta h}$ และ i_0

$$\begin{bmatrix} i_{u,ref} \\ i_{v,ref} \\ i_{w,ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3. การจำลองสถานการณ์

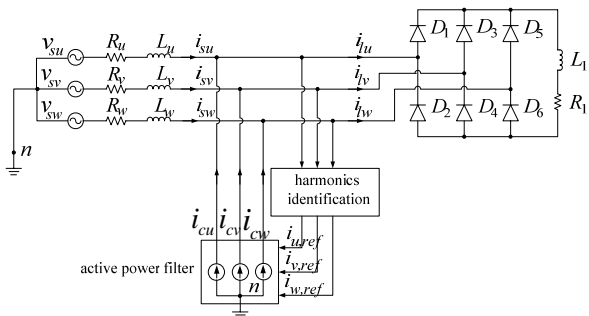
การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในที่นี้พิจารณาแบบจำลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ ที่กำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิก อัลกอริทึมเหล่านี้ได้แก่ วิธี PQ วิธี SWFA และวิธี SVF ในการจำลองสถานการณ์ได้พิจารณา ระบบ 2 รูปแบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแตกต่างกัน ได้แก่ ระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดแบบสมดุลทุกเฟส โหลดในที่นี้คือวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทาน ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ และระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดไม่สมดุลในแต่ละเฟส โดยโหลดทั้งสองระบบไม่ได้ติดตั้งตัวเก็บประจุในการปรับเรียบแรงดันสามารถพิจารณาเป็นโหลดในกลุ่มแหล่งจ่ายกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้อัลกอริทึมการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกแต่ละวิธี ใช้ค่า %THD_i เฉลี่ย ตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 ค่า %THD_i เฉลี่ย ดังกล่าวคำนวณได้จากสมการที่ (10) และ %unbalance ตามมาตรฐาน IEEE Std.141-1993 คำนวณได้จากสมการที่ (11) ภายหลังการชดเชยเป็นสำคัญ ทั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิก และความสมดุลของระบบไฟฟ้าภายหลังการชดเชย

$$\%THD_{i,ave} = \sqrt{\frac{\sum_{k=u,v,w} (\%THD_{i(k)})^2}{3}} \quad (10)$$

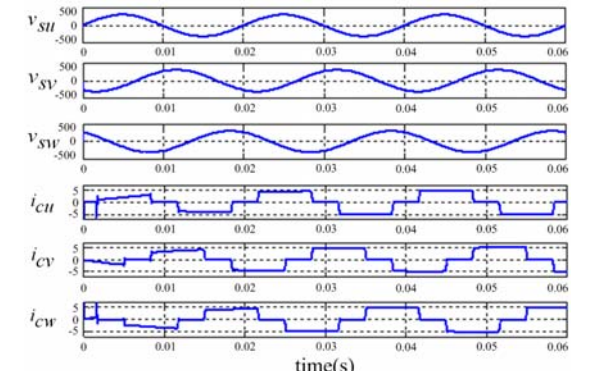
$$\%unbalance = \frac{|i_{\max} \text{ deviation from average } i_{rms}|}{\text{average } i_{rms}} \times 100\% \quad (11)$$

3.1 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อโหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

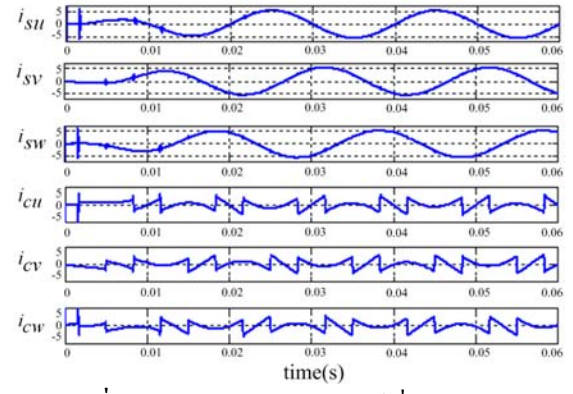
โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแสดงไว้ในรูปที่ 6 โดย ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง R_u, R_v และ R_w ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์มีค่าเท่ากับ 0.001Ω และค่า L_u, L_v และ L_w มีค่าเท่ากับ $100 \mu H$ ค่าโหลดความต้านทาน R_1 สมมติให้มีค่าเท่ากับ 100Ω ส่วนค่าโหลดตัวเหนี่ยวนำ L_1 สมมติให้มีค่าเท่ากับ $1 H$ โดยทำการจำลองสถานการณ์เป็นเวลา 0.06 วินาที



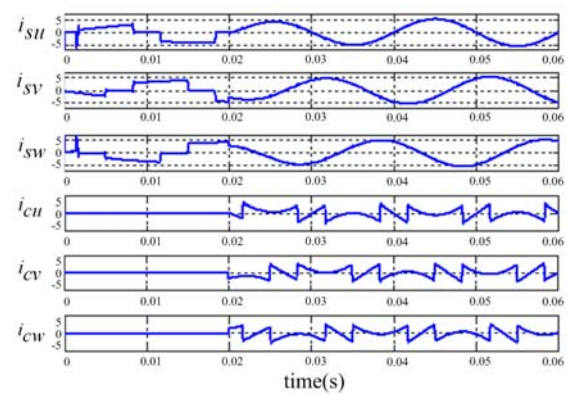
รูปที่ 6 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับ โหลดแบบสมดุลในแต่ละเฟส



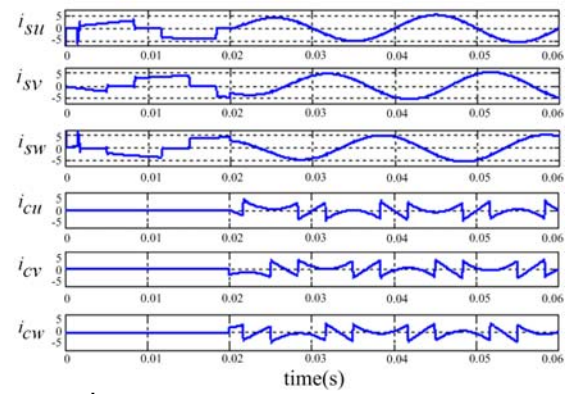
รูปที่ 7 แรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย



รูปที่ 8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี PQ



รูปที่ 9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SWFA



รูปที่ 10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SVF

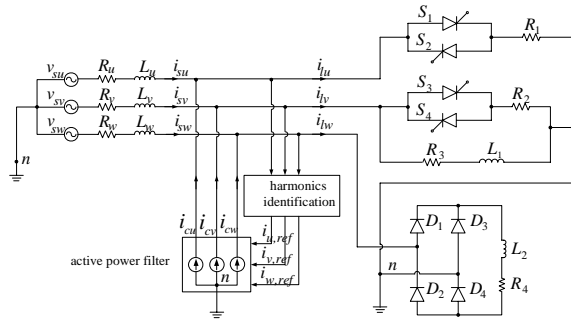
จากรูปที่ 7 กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชยมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ายังคงรูปคลื่นสัญญาณไซน์อยู่ และ

ถ้าพิจารณาค่า $\%THD_1$ ในแต่ละเฟสก่อนการชดเชยที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 สังเกตได้ว่าค่า $\%THD_1$ มีค่ามากกว่า IEEE Std. 519-1992 โดยค่า $\%THD_1$ เฉลี่ย ($\%THD_{1,ave}$) ก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 28.71% เมื่อได้มีการชดเชยฮาร์มอนิกแล้วกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มาก อาจมีบิดเบี้ยวบ้างแต่เพียงเล็กน้อยซึ่งอาจสังเกตได้จากรูปคลื่นของสัญญาณเหล่านี้ในรูปที่ 8 ถึง 10 ข้อมูลด้าน $\%THD_1$ เฉลี่ยและ $\%unbalance$ ได้รับการรวบรวมแสดงไว้ในตารางที่ 1 จากข้อมูลในตารางดังกล่าวอาจสังเกตได้ว่า วิธี SWFA และวิธี SVF เป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกให้ผลดีที่สุด โดยภายหลังการชดเชย ค่า $\%THD_1$ เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.20% ในขณะที่วิธี PQ ให้ผลการระบุเอกลักษณ์ได้ไม่ดีเท่าใดนัก จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลไม่ดีไปด้วย โดยค่า $\%THD_1$ เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.69% แต่อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังอยู่ในขอบเขตตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 นอกจากนี้ความสมดุลทั้งก่อนและหลังการชดเชยสามารถพิจารณาได้จากค่า $\%unbalance$ ในตารางที่ 1 โดยก่อนชดเชยและหลังชดเชยค่า $\%unbalance$ เท่ากับ 0% ซึ่งหมายถึงระบบอยู่ในสภาวะสมดุลนอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี SWFA และวิธี SVF ในรูปที่ 9 และ 10 สังเกตได้ว่าในช่วง 0.02 วินาทีแรกยังไม่มีการกำจัดฮาร์มอนิกเกิดขึ้นโดยไม่มีการฉีดกระแสชดเชยใดๆ เลย ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดังกล่าวต้องใช้เวลากำหนดค่าเริ่มต้น (initialization) ให้กับการคำนวณ และเมื่อพิจารณาการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ในรูปที่ 8 ยังสังเกตได้อีกว่า การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที จึงส่งผลให้ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกทั้งสองวิธีดังกล่าวใช้วงจรกรองผ่านสูงในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกออกจากองค์ประกอบมูลฐาน ซึ่งในการใช้วงจรดังกล่าวอาจทำให้เกิดเวลาประวิงได้นั่นเอง

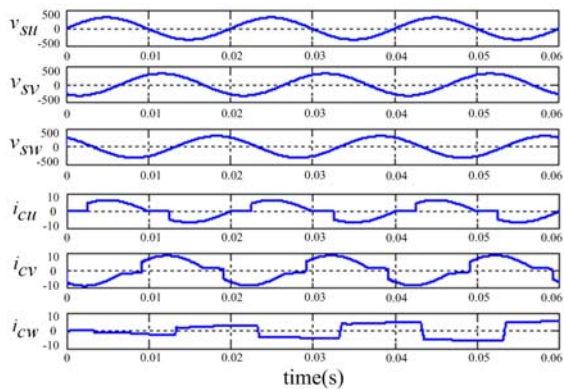
3.2 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อโหลดไม่สมดุลในแต่ละเฟส

โครงสร้างของระบบที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแสดงไว้ในรูปที่ 11 โดยค่าความต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในสายส่งใช้ค่าเดียวกับโหลดในรูปที่ 6 ค่าโหลดความต้านทาน R_1, R_2, R_3, R_4 สมมติให้มีค่าเท่ากับ $45 \Omega, 35 \Omega, 35 \Omega$ และ 25Ω ตามลำดับ ส่วนค่าโหลดตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 สมมติให้มีค่าเท่ากับ $0.5 H$ และ $1 H$ ตามลำดับ มุมจุดชนวนเกทของเอสซีอาร์ S_1, S_2, S_3 และ S_4 มีค่าเท่ากับ 45 องศา โดยทำการจำลองสถานการณ์เป็นเวลา 0.06 วินาที เช่นเดียวกันกับกรณีระบบสมดุล

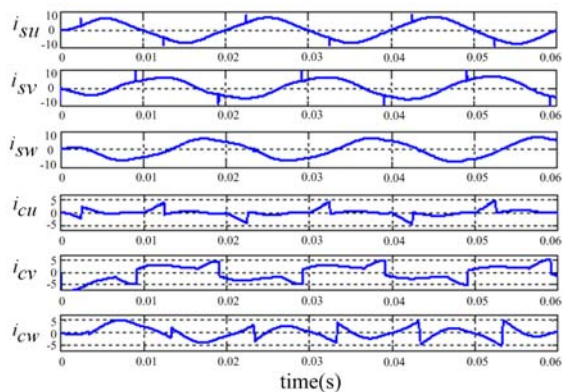
จากรูปที่ 12 กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชยมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยค่า $\%THD_1$ เฉลี่ยก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 32.20% และมีแอมพลิจูดไม่เท่ากัน ซึ่งส่งผลให้ระบบอยู่ในสภาวะไม่สมดุลอีกทั้งค่า $\%unbalance$ ก่อนการชดเชยในตารางที่ 2 มีค่าเท่ากับ 42.58% ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ายังคงรูปคลื่นสัญญาณไซน์อยู่ เมื่อได้มีการชดเชยฮาร์มอนิกแล้วกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มาก อาจมีบิดเบี้ยวบ้างแต่เพียงเล็กน้อยซึ่งอาจสังเกตได้จากรูปคลื่นของสัญญาณเหล่านี้ในรูปที่ 13 ถึง 15 ข้อมูลด้าน $\%THD_1$ เฉลี่ยในตารางที่ 2 บ่งชี้ว่าวิธี SVF เป็นวิธีการระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกที่มีความถูกต้องมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกให้ผลดีที่สุด โดยภายหลังการชดเชย ค่า $\%THD_1$ เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2.52% ในขณะที่วิธี PQ ให้ผลการระบุเอกลักษณ์ได้ไม่ดีเท่าใดนัก จึงส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลไม่ดีไปด้วย โดยค่า $\%THD_1$ เฉลี่ยมีค่า 4.49%



รูปที่ 11 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

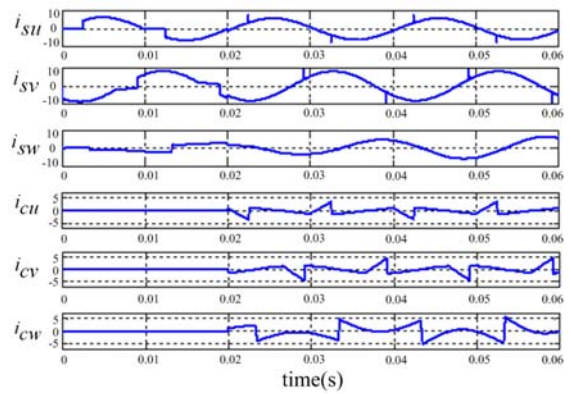


รูปที่ 12 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักก่อนการชดเชย

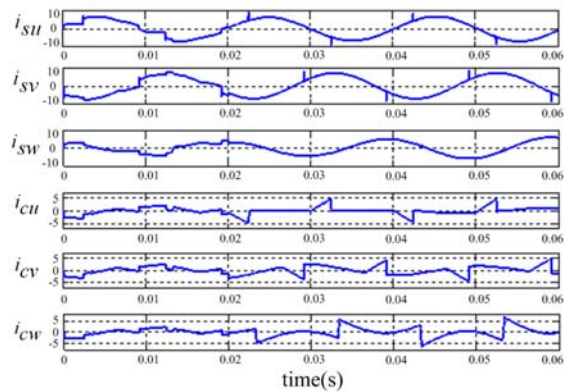


รูปที่ 13 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี PQ

ส่วนวิธี SWFA ให้ความแม่นยำในการระบุข้อมูลฮาร์มอนิกที่ค่อนข้างดี ส่งผลให้มี %THD₁ เฉลี่ยภายหลังการชดเชยเป็น 2.67% แต่อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังคงอยู่ภายในขอบเขตตามมาตรฐาน IEEE Std. 519- 1992 นอกจากนี้ ความสมดุล



รูปที่ 14 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SWFA



รูปที่ 15 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อใช้วิธี SVF

หลังการชดเชย สามารถพิจารณาได้จากค่า %unbalance ในตารางที่ 2 ซึ่งเห็นได้ว่าวิธี SVF สามารถรักษาสมดุลหลังการชดเชยได้ดีที่สุดโดยค่า %unbalance มีค่าเท่ากับ 0.93% ส่วนวิธี PQ สามารถรักษาสมดุลหลังการชดเชยได้บ้างแต่ไม่ดีเท่ากับวิธี SVF ในขณะที่วิธี SWFA ไม่สามารถรักษาสมดุลภายหลังการชดเชยได้เลย ซึ่งค่า %unbalance มีค่าเท่ากับ 37.78% สาเหตุเนื่องจากวิธี SWFA ไม่มีการคำนวณกระแสลำดับศูนย์ (zero sequence) เหมือนกับวิธี SVF ในสภาวะไม่สมดุลของระบบ จะมีค่ากระแสลำดับศูนย์เกิดขึ้นและถ้าไม่มีการชดเชยกระแสดังกล่าว ค่ากระแสลำดับศูนย์จึงยังปรากฏอยู่ซึ่งหมายความว่าระบบนั้นคงอยู่ในสภาวะไม่สมดุล

ตารางที่ 1 ผลการจำลองสถานการณ์ในสภาวะที่โหลดของระบบเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นความต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

วิธีการระบุ เอกลักษณ์ฮาร์มอนิก	%THD _i เฟส u	%THD _i เฟส v	%THD _i เฟส w	%THD _i เฉลี่ย	i_{su} (rms)	i_{sv} (rms)	i_{sw} (rms)	unbalance (%)
ก่อนการชดเชย	28.72	28.70	28.70	28.71	3.97	3.97	3.97	0
วิธี PQ	1.72	1.69	1.67	1.69	3.82	3.82	3.82	0
วิธี SWFA	1.23	1.21	1.17	1.20	3.82	3.82	3.82	0
วิธี SVF	1.23	1.20	1.17	1.20	3.82	3.82	3.82	0

ตารางที่ 2 ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อกับโหลดแบบไม่สมดุลในแต่ละเฟส

วิธีการระบุ เอกลักษณ์ฮาร์มอนิก	%THD _i เฟส u	%THD _i เฟส v	%THD _i เฟส w	%THD _i เฉลี่ย	i_{su} (rms)	i_{sv} (rms)	i_{sw} (rms)	unbalance (%)
ก่อนการชดเชย	25.63	23.71	43.49	32.20	4.30	5.96	6.71	42.58
วิธี PQ	4.04	4.59	4.81	4.49	5.45	5.15	5.22	5.69
วิธี SWFA	3.29	3.01	1.24	2.67	4.17	5.81	6.21	37.78
วิธี SVF	2.56	3.22	1.48	2.52	5.33	5.36	5.38	0.93

4. สรุป

การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SVF มีการคำนวณของอัลกอริทึมโดยนำกระแสเฟสเวกเตอร์บนแกน α และ β ผ่านวิธี SWFA ซึ่งวิธี SWFA เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำสูงจากผลการจำลองสถานการณ์ของโหลดชนิดสมดุลและไม่สมดุล วิธี SVF ให้การกำจัดฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพดีมาก และเนื่องจากอัลกอริทึมนำกระแสลำดับศูนย์มาพิจารณาด้วย จึงทำให้สามารถรักษาสมดุลของระบบไฟฟ้าภายหลังการชดเชยได้เป็นอย่างดี

5. อ้างอิง

1. IEEE Std. 519-1992. (1993). IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electrical power system.
2. IEEE Std. 141-1993. (1993). IEEE Recommended practice for electric power distribution for in industrial plants.

3. 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.
4. 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 Proceedings of Electric Power Applications., 148:21-28.