

# การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์แบบวินโดว์เลื่อน สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส

## Harmonic Detection using Sliding Window with Fourier Analysis (SWFA) Method for Single-Phase Power Systems

มนีรัตน์ ผดุงศิลป์<sup>1</sup> กองพล อารีรักษ์<sup>2</sup> ทศพร ณรงค์ฤทธิ์<sup>3</sup>

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>1</sup>padungsilppp@gmail.com

<sup>2</sup>kongpol@sut.ac.th

<sup>3</sup>tosaporn@sut.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์แบบวินโดว์เลื่อน (Sliding Window with Fourier Analysis: SWFA) สำหรับใช้คำนวณหากระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อลดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส วิธี SWFA เป็นวิธีที่ให้ผลการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกถูกต้องแม่นยำ และมีความรวดเร็วในการประมวลผล การทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก ด้วยวิธี SWFA จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับโหลดวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ฉีดกระแสชดเชยตามลักษณะกระแสอ้างอิงที่ได้จากวิธี SWFA สามารถชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายให้มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) อยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std. 519-2014

**คำสำคัญ:** การวิเคราะห์ฟูรีเยอร์แบบวินโดว์เลื่อน, การตรวจจับฮาร์มอนิก, วงจรกรองกำลังแอกทีฟ, การกำจัดฮาร์มอนิก

### ABSTRACT

This paper presents a harmonic detection using Sliding Window with Fourier Analysis (SWFA) for computing the reference current of active power filter in single-phase power systems. The SWFA method is able to detect harmonic accurately and precisely with rapid processing. Ideal current source is used as active power filter for focusing on the harmonic detection performance. For testing the harmonic elimination, the SimPowerSystems Blockset and Simulink in MATLAB were used for simulation program. Therefore, The simulation result shows that the active power filter with the reference current computed by SWFA can provide the good performance compensation. The source current after compensation are nearly sinusoidal waveform and the total harmonic distortion (%THD) follows the frame of IEEE std.519-2014

**Keywords:** SWFA, Harmonic Detection, Active Power Filter, Harmonic Elimination

### 1) บทนำ

ระบบไฟฟ้าที่ต่อใช้งานโหลดไม่เป็นเชิงเส้น เช่น มอเตอร์ หม้อแปลง หรือวงจรคอนเวอร์เตอร์ต่าง ๆ จะทำให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่เดิมเป็นรูปไซน์เกิดการเปลี่ยนแปลงผิดเพี้ยนเนื่องจากมีฮาร์มอนิกปะปน โดยฮาร์มอนิกดังกล่าวจะก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพไฟฟ้าหลายประการด้วยกัน เช่น เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง [1] เกิดความร้อนและกำลังงานสูญเสียในอุปกรณ์ไฟฟ้า [2] ทำให้อุปกรณ์ป้องกันและเครื่องมือวัดทำงานผิดพลาด [3] ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่สั้นลง [4] และเกิดสัญญาณรบกวนในวงจรสื่อสาร [5] เป็นต้น การกำจัดฮาร์มอนิกเพื่อปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังให้เพิ่มขึ้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้งานวงจรกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF) [6] วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active Power Filter: APF) [7] และวงจรกรองกำลังไฮบริด (Hybrid Power Filter: HPF) [8] อย่างไรก็ตาม บทความนี้เลือกใช้งานวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถชดเชยฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าด้วย [9] การกำจัดฮาร์มอนิก ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟจำเป็นต้องมีการตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิงให้กับวงจร ซึ่งในอดีตจนถึงปัจจุบันการตรวจจับฮาร์มอนิกมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีตัวกรองคาลมาน [10] วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง [11] วิธีการแปลงฟูรีเยอร์แบบเร็ว [12] วิธีการบอยอิงซิงโครนัส [13] เป็นต้น โดยในบทความนี้ได้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยอร์แบบวินโดว์เลื่อน (Sliding Window with Fourier Analysis: SWFA) [14] เนื่องจากเป็นวิธีที่คำนวณวิเคราะห์จากค่ากระแสโหลดโดยตรง จึงให้ผลการคำนวณตรวจจับที่มีความถูกต้องแม่นยำ และมีความรวดเร็วในการประมวลผลตรวจจับฮาร์มอนิก

สำหรับการนำเสนอของบทความนี้จะประกอบด้วย หัวข้อที่ 2 นำเสนอการอธิบายขั้นตอนการตรวจจับด้วยวิธี SWFA หัวข้อที่ 3 นำเสนอการจำลองสถานการณ์การทดสอบสมรรถนะการตรวจจับ ฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ในหัวข้อที่ 4 จะนำเสนอการอภิปรายผลการจำลองสถานการณ์ และในหัวข้อที่ 5 คือ การสรุปผลที่ได้ ดังต่อไปนี้

2) การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน

การใช้วิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์แบบวินโดว์เลื่อน หรือวิธี SWFA ในการตรวจจับฮาร์มอนิกในที่นี้ จะเริ่มต้นจากการพิจารณาสมการความสัมพันธ์ของออยเลอร์ฟูรีเยร์ (Euler-Fourier formulas) ของกระแสไฟฟ้าที่โหลด ( $i_L$ ) ดังสมการที่ (1) ซึ่งจะพบว่าสมการดังกล่าวมีองค์ประกอบสองเทอม คือ เทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสตรง (DC Component) และเทอมที่เป็นองค์ประกอบสัญญาณกระแสสลับ (AC Component)

$$i_L(kT_s) = \frac{A_0}{2} + \underbrace{[A_n \cos(h\omega kT_s) + B_n \sin(h\omega kT_s)]}_{AC \text{ Component}} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) ถ้าพิจารณากระแสไฟฟ้าที่โหลดเฉพาะที่ความถี่มูลฐาน ( $i_{L1}$ ) ( $h=1$ ) จะแสดงได้ดังสมการที่ (2) โดยค่าสัมประสิทธิ์  $A_1$  และ  $B_1$  ในสมการดังกล่าว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$i_{L1}(kT_s) = A_1 \cos(\omega kT_s) + B_1 \sin(\omega kT_s) \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \cos(n\omega T_s) \quad (3)$$

$$B_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} i_L(nT_s) \sin(n\omega T_s) \quad (4)$$

โดยที่ ค่า  $T_s$  คือ ค่าเวลาในการซัดตัวอย่าง (วินาที, s)

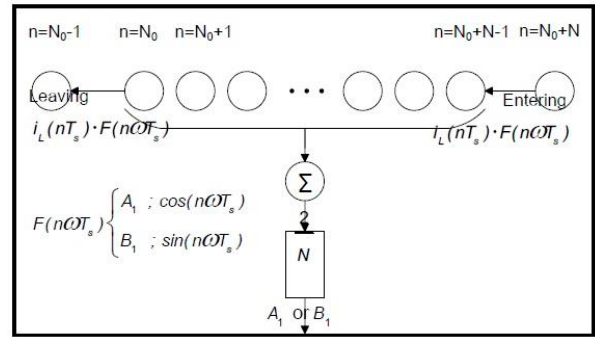
$\omega$  คือ ค่าความถี่เชิงมุมที่ความถี่มูลฐาน (เรเดียนต่อวินาที, rad/s)

$N$  คือ จำนวนจุดข้อมูลในการคำนวณต่อหนึ่งคาบความถี่มูลฐาน

การใช้สมการข้างต้นเพื่อคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกตามแบบวิธี SWFA สามารถทำได้โดยอาศัยขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 รับข้อมูลกระแสที่โหลด ( $i_L$ ) หนึ่งคาบ จำนวน  $N$  ข้อมูล มาใช้สำหรับการคำนวณหาค่าเริ่มต้นของวิธี SWFA

ขั้นที่ 2 คำนวณหาค่า  $A_1, B_1$  เริ่มต้น ตามสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ โดยใช้ข้อมูล  $i_L$  จำนวน  $N$  ข้อมูลจากขั้นที่ 1 ซึ่งจะถูกเรียงลำดับข้อมูลจาก  $n = N_0, N_0 + 1, N_0 + 2, \dots, N_0 + N - 1$  ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1: แผนภาพคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์  $A_1, B_1$

ขั้นที่ 3 คำนวณหาค่า  $A_1, B_1$  ค่าใหม่ ( $A_1^{new}, B_1^{new}$ ) โดยใช้เทคนิควินโดว์เลื่อน คือ เลื่อนลบข้อมูล  $i_L(nT_s) \cdot F(n\omega T_s)$  ค่าเก่า (ตำแหน่งข้อมูลที่  $n = N_0 - 1$ ) ออกจาก  $A_1^{old}, B_1^{old}$  (ในรอบแรกของการคำนวณค่า  $A_1, B_1$  เท่ากับค่า  $A_1, B_1$  เริ่มต้น) จากนั้นเลื่อนข้อมูล  $i_L(nT_s) \cdot F(n\omega T_s)$  ค่าใหม่ (ตำแหน่งข้อมูลที่  $n = N_0 + N$ ) บวกเข้าไปใน  $A_1^{old}, B_1^{old}$  ซึ่งสามารถแสดงเป็นรูปภาพได้ดังรูปที่ 1 โดยกรณีการคำนวณหาค่า  $A_1^{new}$  กำหนดให้  $F(n\omega T_s)$  คือ ฟังก์ชัน  $\cos(n\omega T_s)$  ส่วนกรณีการคำนวณหาค่า  $B_1^{new}$  กำหนดให้  $F(n\omega T_s)$  คือ ฟังก์ชัน  $\sin(n\omega T_s)$  ซึ่งสามารถอธิบายการคำนวณได้ดังสมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$A_1^{new} = A_1^{old} + \frac{2}{N} \left[ i_L \{ (N_0 + N) T_s \} \cdot \cos \{ (N_0 + N) \omega T_s \} - i_L \{ (N_0 - 1) T_s \} \cdot \cos \{ (N_0 - 1) \omega T_s \} \right] \quad (5)$$

$$B_1^{new} = B_1^{old} + \frac{2}{N} \left[ i_L \{ (N_0 + N) T_s \} \cdot \sin \{ (N_0 + N) \omega T_s \} - i_L \{ (N_0 - 1) T_s \} \cdot \sin \{ (N_0 - 1) \omega T_s \} \right] \quad (6)$$

ขั้นที่ 4 นำค่า  $A_1^{new}, B_1^{new}$  ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ไปใช้คำนวณหาค่า  $i_{L1}$  โดยใช้สมการที่ (2)

ขั้นที่ 5 นำค่า  $i_{L1}$  ที่ได้ไปหักลบออกจากค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดทั้งหมด ( $i_L$ ) จะทำให้ได้ค่ากระแสฮาร์มอนิกหรือกระแสอ้างอิงในการชดเชย ( $i_c$ ) ดังสมการที่ 7

$$i_c = i_L - i_{L1} \quad (7)$$

ขั้นที่ 6 จากขั้นตอนที่ 5 เป็นเพียงการคำนวณหาค่า  $i_c$  จุดข้อมูลแรกเท่านั้น สำหรับค่า  $i_c$  ของจุดข้อมูลถัดไปให้ดำเนินการคำนวณวนซ้ำในขั้นตอนที่ 3 ถึง 5 ต่อไปเรื่อย ๆ

จากการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ทั้ง 6 ขั้นตอนข้างต้น จะทำให้ได้ค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแยกที่ฟเพื่อฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าต่อไป ซึ่งรายละเอียดจะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไปนี้

### 3) การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

ระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 2 จากรูปดังกล่าว ส่วนแรก คือ ระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่ต่อเข้ากับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น คือ วงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ส่วนที่สอง คือ บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วย SWFA ทำหน้าที่ที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และส่วนสุดท้าย คือ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก โดยโครงสร้างของวงจรดังกล่าวในที่นี้เลือกใช้แหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติ ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบเฉพาะสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA โดยยังไม่พิจารณาถึงผลกระทบทางด้านโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุม การจำลองสถานการณ์ในบทความนี้ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (SimPower Systems Blockset) ร่วมกับ Simulink ในโปรแกรม MATLAB โดยภายในบล็อก SWFA คือ การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ที่มีขั้นตอนตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2

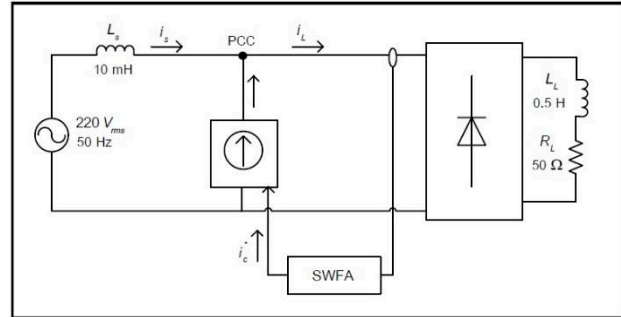
### 4) ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกของระบบรูปที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่าในช่วงก่อนการชดเชย (Before compensation) ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.1 วินาที กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ( $i_s$ ) จะมีลักษณะรูปสัญญาณบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ เหมือนกับกระแสที่โหลด ( $i_L$ ) เนื่องจากมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ อย่างไรก็ตามหลังการชดเชย (After compensation) โดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ทำการฉีดกระแสชดเชย ( $i_c$ ) ที่มีลักษณะรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสอ้างอิง ( $i_c^*$ ) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA เข้าไปในระบบ พบว่า รูปสัญญาณของ  $i_s$  มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์เพิ่มมากขึ้น และนอกจากนี้เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเพิ่มกระแสโหลดของระบบไฟฟ้าจาก 4.3 A เป็น 8.1 A โดยการเปลี่ยนค่าตัวต้านทาน  $R_L$  จาก  $50 \Omega$  เป็น  $25 \Omega$  ที่เวลา 0.2 วินาทีเป็นต้นไป พบว่า กระแสอ้างอิง  $i_c^*$  ที่ได้จากวิธี SWFA มีขนาดที่คล้อยตามกระแสโหลดที่เพิ่มขึ้น และรูปสัญญาณของ  $i_s$  หลังการชดเชยยังคงมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยวัดค่า %THD ได้เท่ากับ 0.18% ในขณะที่ค่า %THD ก่อนการชดเชยของกระแสดังกล่าวมีค่าสูงเท่ากับ 47.94% ซึ่งค่า %THD หลังการชดเชยอยู่ในกรอบ IEEE std. 519-2014 จากผลดังกล่าวหมายความว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA ให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องและมีสมรรถนะที่ดีในการตรวจจับฮาร์มอนิกให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ อีกทั้งยังสามารถคำนวณให้ผลที่รวดเร็วทันตามกระแสโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงด้วย

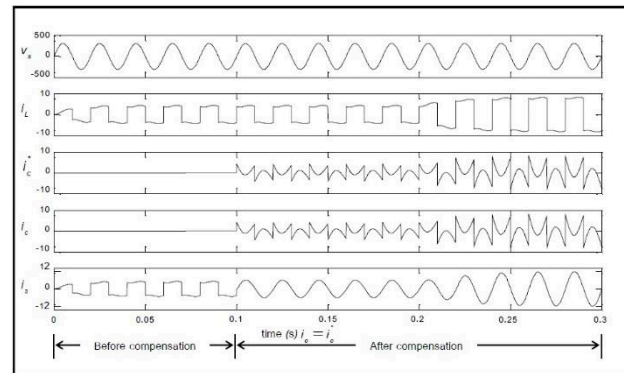
### 5) สรุป

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA สำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีในการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิก โดยผลการจำลอง

สถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SWFA พบว่า กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยสามารถกลับมาเป็นรูปไซน์และมีปริมาณฮาร์มอนิกลดลง โดยค่า %THD ของกระแสดังกล่าวภายหลังการชดเชยอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std. 519-2014



รูปที่ 2: ระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก



รูปที่ 3: ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัย อิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกล และการควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้สถานที่และเครื่องมือต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Hiranandani, "Calculation of cable ampacities including the effects of harmonics," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 42–51, Mar. 1998.
- [2] V. E. Wagner *et al.*, "Effects of harmonics on equipment," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 672–680, Apr. 1993.
- [3] R. D. Henderson and P. J. Rose, "Harmonics: the effects on power quality and transformers," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 3, pp. 528–532, May 1994.
- [4] D. E. Rice, "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics-Their Effect on Power Systems Components," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 1, pp. 161–177, Jan. 1986.
- [5] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pp. 1–29, Jun. 2014.

- [6] G. W. Chang, H.-L. Wang, and S.-Y. Chu, "Strategic placement and sizing of passive filters in a power system for controlling voltage distortion," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1204–1211, Jul. 2004.
- [7] M. Rukonuzzaman and M. Nakaoka, "Single-phase shunt active power filter with harmonic detection," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 149, no. 5, pp. 343–350, Sep. 2002.
- [8] P. K. Ray, G. Panda, and P. S. Puhan, "Fuzzy logic based intelligent Shunt Hybrid filter applied to single phase system," in *2013 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2013, pp. 1–6.
- [9] M. El-Habrouk, M. K. Darwish, and P. Mehta, "A survey of active filters and reactive power compensation techniques," in *2000 Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives (IEE Conf. Publ. No. 475)*, 2000, pp. 7–12.
- [10] J. Barros and E. Perez, "An adaptive method for determining the reference compensating current in single-phase shunt active power filters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 4, pp. 1578–1580, Oct. 2003.
- [11] V. Khadkikar, A. Chandra, and B. N. Singh, "Generalised single-phase p-q theory for active power filtering: simulation and DSP-based experimental investigation," *IET Power Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 67–78, Jan. 2009.
- [12] B. Han, "Single-phase active power filter using FFT with harmonic phase-delay compensation," in *2009 IEEE Power Energy Society General Meeting*, 2009, pp. 1–6.
- [13] B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol, and S. A. O. da Silva, "Proportional–integral/ proportional–integralderivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 10, pp. 2647–2659, 2014.
- [14] S. Tiyyarachakun, K. Areerak, and K. Areerak, "Instantaneous Power Theory with Fourier and Optimal Predictive Controller Design for Shunt Active Power Filter," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2014, pp. 1–20, Jan. 2014.