



การควบคุมฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าเฟสเดียวสำหรับอาคารที่อยู่อาศัย
ที่มีกลไกการกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
HARMONICS CONTROL IN SINGLE-PHASE ELECTRICAL SYSTEMS
FOR RESIDENTAL BUILDINGS WITH AN SHUNT ACTIVE POWER
FILTERING MECHANISM

อัครกิตต์ ไชยชนกุลวัฒน์¹, ณัฐทิ ถึงสุข^{1*}, ธีรวุฒิ แสงวงบุญ¹, ศักดาวุฒิ บุญตัว¹, นฤพร คงคราญ¹
และ นฤมล เทพยาพระณรงค์¹

Arckarakit Chaithanakulwat¹, Nuttee ThungSuk^{1*}, Teerawut Sawangbun¹, Sakdawut
Boontua¹, Narporn Kongkran¹ and Narumon Thapayapanarong¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ ประเทศไทย 10540

¹Department of Electrical Engineering, Dhonburi Rajabhat University,
Bang Phli, Samut-Prakan, Thailand, 10540

*Corresponding author E-mail: Nuttee.t@dru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 29 มกราคม 2563

วันที่แก้ไขบทความ 31 มีนาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 3 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเฟสเดียวสำหรับอาคารที่อยู่อาศัย พร้อมกลไกการกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน เพื่อกรองกระแสที่ผิดเพี้ยนจากสภาพคลื่นไซน์ที่เกิดจากการจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นในอาคารที่อยู่อาศัยซึ่งทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า งานวิจัยนี้ผู้วิจัยทดสอบหลักการของกลไกที่นำเสนอด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้น เพื่อยืนยันความถูกต้องของระบบที่เสนอ ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าสามารถลดการเกิดฮาร์มอนิกส์ (THD) ให้เหลือเพียง 25.48% ซึ่งยืนยันว่ากลไกสามารถทำงานได้ตาม วัตถุประสงค์

คำสำคัญ: ผลรวมความเพี้ยน, ตัวกรองกำลังแอกทีฟ, อาคารที่อยู่อาศัย, เฟสคู่ปลี้อค, การกรองผ่านต่ำ

Abstract

This research paper presents control of harmonics in single-phase electrical systems for residential buildings with shunt active power filtering mechanisms. This research was conducted in order to filter distorted currents from the sine wave form caused by nonlinear-load supply in a residential building. They cause harmonics in the electrical system which influence the performance of the power grid system. In this research, the principles of the mechanism presented by the program MATLAB/Simulink were tested, and the created prototype equipment was compared. This was to verify the presented system. The results of the system simulation showed that the harmonic generation (THD) could be reduced to be only 25.48%. This is verified that the mechanism can work as intended.

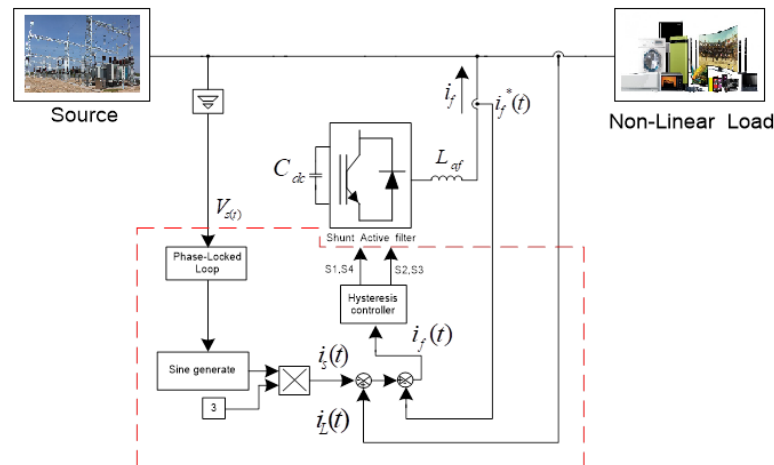
Key words: Total harmonic distortion, Active power filter, Residential building, Phase-Locked Loop, Low pass filter

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและเครื่องใช้ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่อำนวยความสะดวกแก่มนุษย์ทั้งหมดบนโลกนี้ก็มีอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน ซึ่งเป็นพื้นฐานของการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่หลากหลายทั้งสิ้น ตั้งแต่ผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็กกะทัดรัด เช่น โทรศัพท์มือถือ เครื่องขยายเสียง คอมพิวเตอร์ ฯลฯ อุปกรณ์ทั้งหมดที่กล่าวมามีกลไกที่เรียกว่าสวิตช์เพาเวอร์ซัพพลายซึ่งเป็นอุปกรณ์แรกสำหรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบควบคุมและระบบส่งกำลังให้กับอุปกรณ์ อุปกรณ์เหล่านี้มักทำให้เกิดความเพี้ยนของฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าต่ำถึงแรงดันไฟฟ้าสูง นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบซึ่งอาจทำให้เกิดกระแสเกินในตัวเก็บประจุและอาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์เหล่านั้นและยังทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง และยังส่งผลทำให้เกิดการรบกวนในระบบสื่อสารอีกด้วย (Tripathi & Sen, 1992; Chaithanakulwat & Kinnaree, 2017 และ Bus *et al.*, 1998) อีกทั้งคุณภาพของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าก็เปลี่ยนไปเช่นกัน การแก้ไขปัญหาคือความเพี้ยนของฮาร์มอนิกในระบบที่ใช้กันทั่วไปคือการแก้ปัญหาโดยใช้กลไกการกรองกำลังแบบพาสซีฟสำหรับการกรองฮาร์มอนิก แต่ยังมีขั้นตอนที่ยังยากซับซ้อนและยังไม่สามารถกรองฮาร์มอนิกให้ลดลงได้หมดสมบูรณ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการกรองฮาร์มอนิกโดยใช้กลไกการกรองกำลังแบบแอ็กทีฟแบบขนานโดยพิจารณาประเภทและหลักการทำงานของโพลต์ให้เกิดความสอดคล้องกับฟิสิกส์ของกลไก (Chaithanakulwat *et al.*, 2012; Chaithanakulwat *et al.*, 2012; Brodd & Novotny, 1984;

Gregory, 1994; Arriaga *et al.*, 1985 และ Kale & Oedemic, 2005) และสะดวกในการควบคุมซึ่งรายละเอียดของหลักการและกลไกจะอธิบายในส่วนถัดไป

2. คำอธิบายของภาพแบบที่เสนอ



ภาพที่ 1 ไดอะแกรมวงจรกลไกการกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

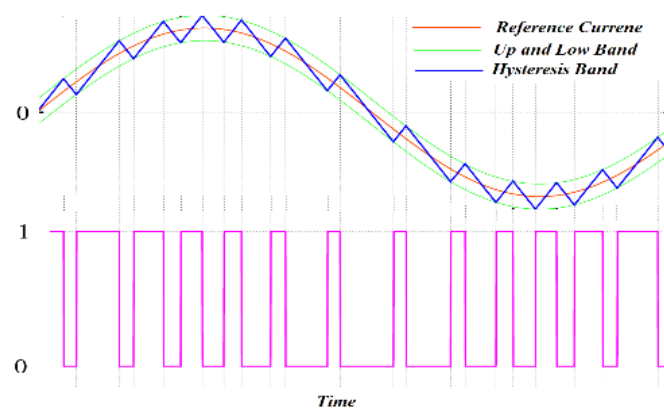
สำหรับหลักการทำงานของระบบและกลไกนี้ใช้วิธีการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า (V_s) ผ่านอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำ (L_{pf}) และอัลกอริทึมเฟสล็อก (PLL) เพื่อสร้างกระแสอ้างอิง (i_s) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดแบบไม่เชิงเส้น (i_L) เพื่อกำหนดเป็นกระแสไฟฟ้าอินพุต (i_f) เพื่อไปควบคุมการมอดูเลชันของกลไกตัวกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเพื่อให้กลไกการทำงานนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุและนำไปควบคุมกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากโหลดไม่เชิงเส้นในอาคารที่อยู่อาศัยซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกลไกตัวกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (i_f^*) นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับกระแสอินพุต (i_s) ที่จ่ายอยู่ในระบบทำให้กลไกการกรองเพื่อควบคุมกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าในอาคารที่อยู่อาศัยมาฮาร์มอนิกส์ลดลง ซึ่งระบบสามารถแสดงได้ดังแสดงในภาพที่ 1

2.1 การควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิส

หลักการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิสจะเป็นการดำเนินการควบคุมการปรับความกว้างของพัลส์โดยใช้เทคนิคการติดตามภาพคลื่นไซน์ที่มีการกำหนดขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสล่างและขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสบนเพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงภาพคลื่นไซน์ซึ่งมีขนาดและความถี่ตามการออกแบบที่คำนวณไว้แล้วเปรียบเทียบกับกระแสอินพุตที่จ่ายไปยังอาคารที่อยู่อาศัย เพื่อหากระแสที่ผิดปกติซึ่งสามารถ

พิจารณาได้ดังแสดงในภาพที่ 2 กระแสที่ผิดปกตินี้จะถูกพิจารณาเพื่อนำมากำหนดเงื่อนไขขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสล่างและขอบเขตฮิสเตอร์รีซิสบนของหลักการ พิจารณาจากภาพที่ 2 สามารถเขียนสมการเพื่ออธิบายการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับโหลดไม่เชิงเส้นดังสมการ (1) (Kazmierkowski & Sani, 1989)

$$i_L(t) = i_s \cos(\omega t) + \sum_{j=1}^{\infty} i_{2j} \cos(2j\omega t + \phi_{2j}) + \sum_{k=1}^{\infty} i_{2k+1} \cos((2k+1)\omega t + \phi_{2k+1}) \quad (1)$$



ภาพที่ 2 หลักการควบคุมกระแสฮิสเตอร์รีซิส

จากสมการ (2) เมื่อกระแสที่จ่ายออกจากแหล่งจ่ายไฟใช้เป็นกระแสอ้างอิงไซน์และเปรียบเทียบกับกระแสโหลดไม่เชิงเส้น จะได้กระแสชดเชยที่มีภาพคลื่นเข้าใกล้กับภาพคลื่นไซน์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาพคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดในอาคารที่พักอาศัย

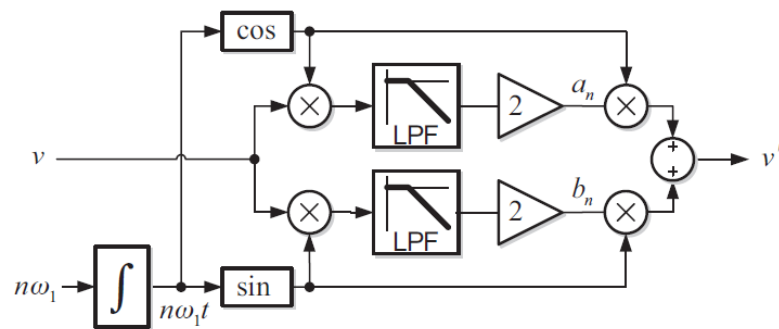
$$\begin{aligned} i_{f,1}(t) &= i_L(t) - i_s^*(t) \\ &= i_L(t) - i_s \cos \omega t \end{aligned} \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) เมื่อพิจารณากระแสอินพุตที่จ่ายให้กับโหลดและกระแสอ้างอิงที่เป็นภาพคลื่นไซน์ดังสมการที่ (1) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} i_f(t) &= i_s \cos \omega t + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{I_{2j}}{2} [\cos((2j+1)\omega t + \phi_{2j}) + \cos((2j-1)\omega t + \phi_{2j})] \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_{2k+1}}{2} [\cos((2k+2)\omega t + \phi_{2k+1}) + \cos(2k\omega t + \phi_{2k+1})] - i_s \cos \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 การกรองความถี่ต่ำ

จากภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของสัญญาณอินพุตที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟที่มีฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ที่จำเป็นจากการกรองสัญญาณความถี่ต่ำซึ่งเป็นฟังก์ชันของส่วนประกอบความถี่ต่ำของสัญญาณอินพุตภายใต้สภาวะการทำงานปกติและเป็นส่วนประกอบความถี่ต่ำของระบบโครงข่าย องค์ประกอบความถี่พื้นฐานจะเป็นความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ องค์ประกอบความถี่พื้นฐานนี้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่าย



ภาพที่ 3 หลักการกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

ความถี่ของไซน์และโคไซน์ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่จำเป็น ω_1 ถูกกำหนดโดยให้ $n = 1$ และองค์ประกอบความถี่ต่ำที่อินพุตของตัวกรองความถี่ต่ำมี $2\omega_1$ ที่ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ซึ่งเป็นความถี่ของตัวกรองความถี่ต่ำควรมีค่าน้อยกว่า $2\omega_1$ นั่นคือประมาณ 10 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์การตอบสนองสามารถหาได้จากสมการออยเลอร์นั่นคือ

$$\cos(n\omega t) = \frac{e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}}{2} \quad (4)$$

$$\sin(n\omega t) = \frac{e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}}{2} \quad (5)$$

นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูริเยร์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) (e^{jn\omega t} + e^{-jn\omega t}) dt \quad (6)$$

$$b_n = \frac{-j}{T} \int_0^T v(t) (e^{jn\omega t} - e^{-jn\omega t}) dt \quad (7)$$

$$c_n = \frac{1}{2} (a_n - jb_n) = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) e^{-jn\omega t} dt \quad (8)$$

ดังนั้นสมการแรงดันไฟฟ้าจะหาได้จาก

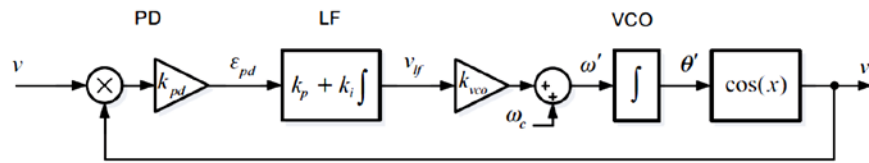
$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{jn\omega t} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n^* e^{-jn\omega t} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{n=0}^{\infty} c_n e^{jn\omega t} + \sum_{n=-1}^{-\infty} c_n e^{jn\omega t} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega t} \end{aligned} \quad (10)$$

จากสมการ (10) แสดงให้เห็นว่าสมการอนุกรมฟูริเยร์วิเคราะห์เฉพาะสำหรับความถี่บวกและลบเท่านั้น (Peng *et al.*, 1987; Rahman *et al.*, 1997 และ Salah, 2000)

2.3 เฟสล็อกกลุ๊ป

ไดอะแกรมพื้นฐานของเฟสล็อกกลุ๊ปสามารถแสดงได้ดังในภาพที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน นั่นคือ ส่วนที่ 1 อัลกอริทึมตรวจจับเฟสส่วนนี้จะสร้างสัญญาณเอ้าท์พุทที่แตกต่างจากสัญญาณไซน์ อินพุทและสัญญาณที่สร้างขึ้นโดยการกรองภายในเฟสล็อกกลุ๊ปเพื่อตรวจจับสัญญาณไซน์มีความถี่สูงและขึ้นอยู่กับความแตกต่างของสัญญาณ ส่วนที่ 2 อัลกอริทึมการกรองส่วนนี้จะกรองความถี่ต่ำเพื่อลดส่วนประกอบความถี่สูงจากเอาต์พุตของการตรวจจับสัญญาณไซน์ โดยปกติแล้วส่วนนี้จะสร้างขึ้นด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านการควบคุมด้วย PI ยิ่งไปกว่านั้นส่วนที่ 3 อัลกอริทึมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าส่วนนี้จะสร้างสัญญาณไฟสลับที่มีความถี่สัมพันธ์กับความถี่ของการกรองแรงดันไฟฟ้าที่ส่งผ่านจากตัวกรองความถี่ต่ำ



ภาพที่ 4 ไดอะแกรมพื้นฐานของเฟสล็อกกลูป

พิจารณาจากภาพที่ 4 สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$v = V \sin(\theta) = V \sin(\omega t + \phi) \quad (11)$$

นอกจากนี้สัญญาณที่สร้างขึ้นโดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ

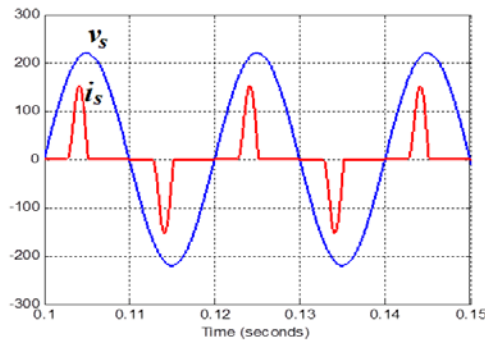
$$v' = \cos(\theta') = \cos(\omega' t + \phi') \quad (12)$$

สัญญาณข้อผิดพลาดของการตรวจจับสัญญาณไซน์สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

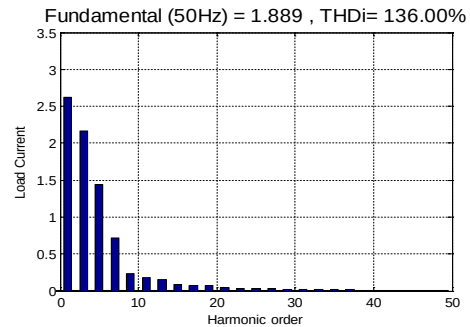
$$\begin{aligned} \varepsilon_{pd} &= V k_{pd} \sin(\omega t + \phi) \cos(\omega' t + \phi') \\ &= \frac{V k_{pd}}{2} [\sin((\omega - \omega')t + (\phi - \phi'))] [+ \sin((\omega + \omega')t + (\phi + \phi'))] \end{aligned} \quad (13)$$

3. ผลการจำลองและทดสอบ

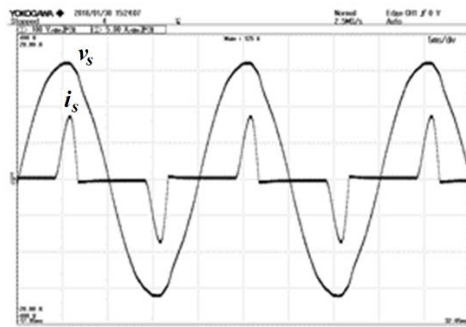
งานวิจัยนี้มีการทดสอบหลักการและกลไกที่นำเสนอข้างต้นโดยการทดสอบในระหว่างการใช้ งานปกติเมื่อเชื่อมต่อโหลดที่ไม่เชิงเส้นและการทดสอบในขณะที่จ่ายโหลดที่ไม่เชิงเส้นโดยการเชื่อมต่อ ต้นแบบกลไกเข้าไปในระบบไฟฟ้าของอาคารที่พักอาศัยโดยการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ต้นแบบที่มีกลไกการกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานซึ่ง สามารถแสดงได้ดังนี้



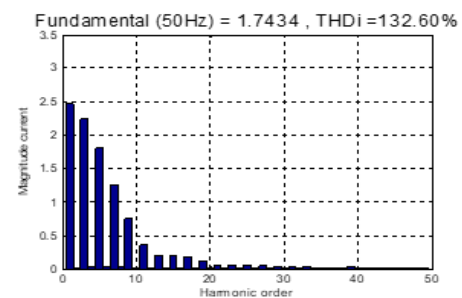
(ก)



(ข)



(ค)



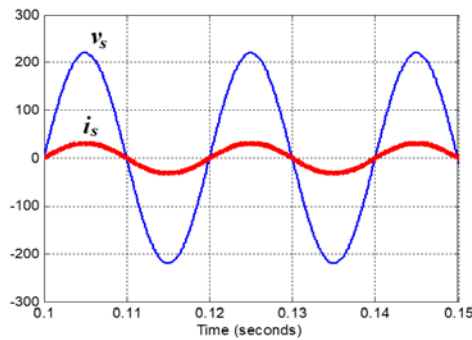
(ง)

ภาพที่ 5 (ก) และ (ข) แบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
(ค) และ (ง) การทดสอบจากอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้น

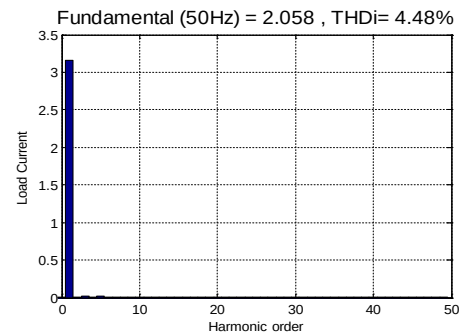
Normal Mode	Unver: []	Scaling: []	LineFit: []	YOKOGAWA
	Lower: []	Average: []	FreqFit: []	
[] SET: change items				
	Element1	Element2	Element3	
	U1 300V Auto	U2 300V Auto	U3 15V Auto	
	I1 5A Auto	I2 5A Auto	I3 500mA Auto	
Ums [V]	225.46	201.21	4.616	
Irms [A]	2.6098	2.8615	0.00	
P [W]	0.3655 _k	0.3421 _k	-0.000	
S [VA]	0.5884 _k	0.5758 _k	0.000	
Q [var]	0.4611 _k	0.4631 _k	0.000	
A []	0.6212	0.5942	Error	
φ [°]	G51.60	G53.54	Error	
f _u [Hz]	50.029	-----	-----	
f _i [Hz]	50.038	-----	-----	
PAGE 1/9				

ภาพที่ 6 การทดสอบหา P,S,Q และ Pf

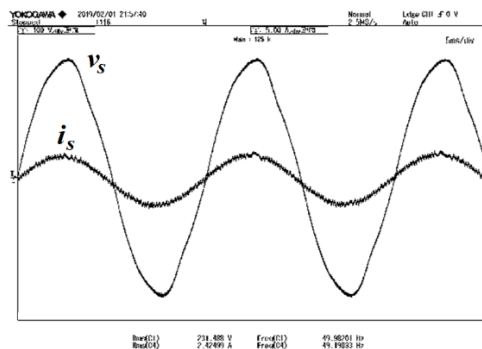
ภาพที่ 5 (ก) (ข) (ค) และ (ง) และภาพที่ 6 ผลการจำลองและผลการทดสอบเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าเฟสเดียวเชื่อมต่อกับโหลดที่ไม่เชิงเส้นในอาคารที่อยู่อาศัย ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเกิดการบิดเบี้ยวไปจากคลื่นไซน์นั่นคือการเกิด ฮาร์โมนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า ส่งผลให้ตัวประกอบกำลังลดลง จากการจำลองและการทดสอบสามารถพิสูจน์และยืนยันว่าเมื่อเชื่อมต่อโหลดที่ไม่เชิงเส้นส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าจริง



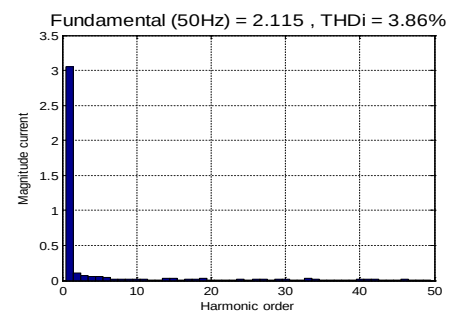
(ก)



(ข)



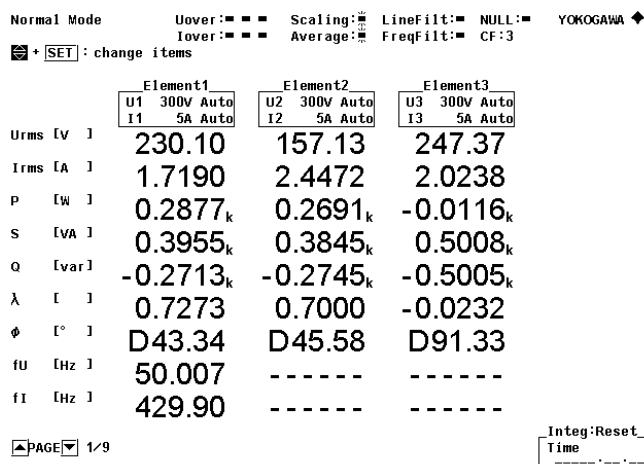
(ค)



(ง)

ภาพที่ 7 (ก) และ (ข) แบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
(ค) และ (ง) การทดสอบจากอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้น

ในทำนองเดียวกันจากภาพที่ 7 (ก) (ข) (ค) และ (ง) การจำลองและการทดสอบจากอุปกรณ์ต้นแบบเมื่อแหล่งจ่ายไฟเชื่อมต่อกับโหลดที่ไม่ใช่เชิงเส้นพบว่ากระแสที่ถูกชดเชยโดยกลไกการกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้งานจะทำให้ภาพคลื่นไซน์ที่ผิดเพี้ยนเปลี่ยนแปลงกลับมามีภาพคลื่นเข้าใกล้ภาพคลื่นไซน์



ภาพที่ 8 การทดสอบหา P,S,Q และ Pf

จากภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าจะสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้จริงและส่งผลทำให้ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเข้าใกล้หนึ่ง เป็นหลักการที่สามารถยืนยันได้ว่าถูกต้องตามหลักทฤษฎีและหลักการทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวไว้

4. สรุปผล

จากการวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าเฟสเดียวสำหรับอาคารที่อยู่อาศัยที่มีกลไกการกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเพื่อกรองกระแสไฟฟ้าที่ผลิตเพี้ยนจากภาพคลื่นไซน์เมื่อจากโหลดที่ไม่เชิงเส้นนั้นนักวิจัยได้ทดสอบหลักการของกลไกที่นำเสนอด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้น สามารถยืนยันความถูกต้องของระบบที่นำเสนอพร้อมผลการจำลองและการทดสอบจากอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นตามที่แสดงไว้ด้านบน ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่ากลไกดังกล่าวทำงานได้ตามเงื่อนไขและสามารถปรับปรุงการผิดเพี้ยนของกระแสให้เข้าใกล้ภาพคลื่นไซน์ซึ่งทำให้ฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าลดลง และสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้สำหรับงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี ที่สนับสนุนกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสรรค์ผลงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Arriaga, J., Bradley, D. A., & Badger, P.S. (1985). **Power system harmonic**. USA: John Wiley & Son Ltd.
- Brodd, D. M., & Novotny, W. (1984). **Current control of VSI-PWM inverters**, IEEE-IAS Annual Meeting, 418-425.
- Bus, S., Milesian, L., & Mattarella, P. (1998). Comparison of current control techniques for active filter applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 45, 722-729.
- Chaithanakulwat, A., & Kinnares, V. (2017). Implementation of a low-cost single-phase grid-connected photovoltaic system with active filtering mechanism. **International Review of Electrical Engineering**, 12(2), 175-182. Doi: 10.15866/iree.v12i2.11383
- Chaithanakulwat, A., Kinnares, V., & Thungsuk, N. (2012). **Modeling and simulation of a 3-phase grid-connected photovoltaic inverter with active power filter functionality for harmonic mitigation**. The International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2012), Kanazawa, Japan.
- Chaithanakulwat, A., Kinnares, V., & Thungsuk, N. (2012). **Single-phase grid-connected photovoltaic system with active power filter functionality**. 15th International Conference on Electrical Machines and System (ICEMS), Sapporo, Japan.
- Gregory, M. W. (1994). Estimation methods for power system harmonic effects on power distribution transformers. **IEEE Transactions on Industry Applications (electronic)**, 30(2).
- Kale, M., & Oedemic, E. (2005). An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter. **Electric Power Systems Research**, 73, 113-119.
- Kazmierkowski, M.P., & Sani, L. (1989). PWM current control techniques of voltage source converters-A survey. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 45(5), 691-703.
- Peng, P. Z., Akagi, H., & Nabeel, A. (1987). **A study of active filter using quad-series voltage- source PWM converters for harmonic compensation**. In conference Record IEEE /PESC. 87, 204-211.



- Rahman, K. M., Khan, M. R., Choudhury, MA., & Rahman, M. A. (1997) Variable-band hysteresis current controllers for PWM voltage-source inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 12, 964-970.
- Salah, T.M. (2000). **The Effect of the harmonic components upon transformer active losses in case of non-sinusoidal sources and non-Linear loads.** Department of Electrical Engineering Yilin Technical University, Istanbul, Turkey.
- Tripathi, A., & Sen, P. C. (1992). Comparative analysis of fixed and sinusoidal band Hysteresis current controllers for voltage source inverters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 39(1), 63-73.